

Abschlussbericht

für das Verbundprojekt

**„Zuverlässigkeitsprognose von mechatronischen Systemen
zur Ableitung restnutzungsdauerbezogener Betriebs- und
Instandhaltungsstrategien“**



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Projektlaufzeit: 43 Monate

Projektbeginn: 01.10.2006

Projektende: 30.04.2010

Fachliche Koordination und Gesamtkoordination:

KSB AG, Frankenthal

Dr.-Ing. Dirk Kollmar



Administrative Koordination:

**Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik
(Fraunhofer IML)**

Dr.-Ing. Thomas Heller

Dipl.-Kffr. Britta Kohlmann



Förderung:

BETREUT VOM



**PTKA
Projektträger Karlsruhe**

im Karlsruher Institut für Technologie

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmenkonzept „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Karlsruhe (PTKA) betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Projektpartner:

KSB AG, Frankenthal

Dr.-Ing. Dirk Kollmar

Dr.-Ing. Stefan Laue



**Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik
(Fraunhofer IML)**

Dr.-Ing. Thomas Heller

Dipl.-Kffr. Britta Kohlmann



Infracor GmbH

Dipl.-Ing. Otger Harks

Dipl.-Ing. Harald Wakup



Evonik Stockhausen GmbH

Dipl.-Ing. Stefan Wagner

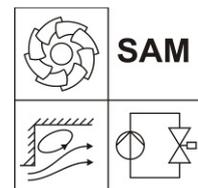
Dipl.-Ing. Guido Stutzmann



Technische Universität KaiserslauternLehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungs-
maschinen (SAM)

Dipl.-Ing. Nils Schumann

Dr.-Ing. Simon Schneider (jetzt BASF SE)



Q-DAS GmbH & Co. KG

Dipl.-Ing. Michael Roth

Dipl.-Ing. Alfred Schulze



i-for-t GmbH

Dipl.-Ing. Michael Danitschek



Siemens AG (nicht gefördert)

Dr. Thomas Müller-Heinzerling



Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	IV
Abbildungsverzeichnis.....	VII
1. Ausgangssituation.....	13
1.1 Instandhaltung von Pumpensystemen.....	14
1.2 Redundanz von Pumpensystemen.....	16
2. Motivation und Ziele von ReMain.....	17
3. Stand der Wissenschaft und Technik und bisherige Arbeiten der Projektpartner.....	19
3.1 Sensorik und Messtechnik.....	19
3.1.1 Automatisierte Schwingungsanalyse (online).....	19
3.1.2 Nicht automatisierte Schwingungsanalyse (offline).....	20
3.1.3 Klassische Permanentüberwachung mit diskreten Sensoren.....	21
3.1.4 Permanentüberwachung mittels intelligenter Diagnosesysteme.....	21
3.2 Restlebensdauerprognose und Zuverlässigkeitsanalyse.....	22
3.3 Bisherige Arbeiten der ReMain-Projektpartner.....	23
4. Projektplanung und Projektüberblick.....	32
5. Projektdurchführung.....	34
5.1 Betreiberumfrage zur Bestimmung des Versuchsumfangs.....	34
5.1.1 Systematik des Fragebogens.....	35
5.1.2 Ergebnisse der Betreiberumfrage.....	35
5.1.2.1 Teil 1: Pumpenpopulationen.....	36
5.1.2.2 Teil 2: Schadensursachen.....	40
5.1.2.3 Teil 3: Diagnosesysteme und Instrumentierung.....	48
5.1.3 Zusammenfassung.....	53
5.2 Auswahl der Diagnose- und Prognosemerkmale, Sensorik und Messtechnik.....	53
5.2.1 Begriffsdefinitionen.....	53
5.2.2 Auswahl der Diagnose- und Prognosemerkmale.....	54
5.2.3 Strategien zur Diagnose und Prognose.....	57
5.2.4 Auswahl und Anpassung der Sensorik und Messtechnik.....	58
5.2.5 Validierung der Sensorik durch Prüfstandversuche.....	65

5.2.5.1	Beschreibung der Prüfstände	65
5.2.5.2	Durchgeführte Prüfstandversuche.....	66
5.2.5.3	Zusammenfassung	83
5.3	Planung und Vorbereitung der Feldversuche.....	83
5.3.1	Auswahl der Versuchspumpen für die Feldversuche.....	83
5.3.2	Aufbau der Infrastruktur zur Datenerfassung: Überblick.....	86
5.3.3	Aufbau der Infrastruktur zur Datenerfassung: Umsetzung.....	89
5.3.3.1	Einsatz der RFID-Technologie bei den Wartungs- und Inspektionsrundgängen.....	89
5.3.3.2	Installation und Inbetriebnahme der Sensorik und Messtechnik.....	91
5.3.3.3	Datenfluss und Datensammlung	93
5.3.3.4	Befundung der Versuchspumpen.....	97
5.4	Datengewinnung, Datenanalyse und Verfahrensentwicklung.....	97
5.4.1	Analyse der Schadenshistorien der Versuchspumpen	99
5.4.1.1	Basisdokumente für die historische Schadensanalyse.....	99
5.4.1.2	Ergebnisse der historischen Schadensanalyse	100
5.4.1.3	Fazit für die weitere Projektarbeit.....	103
5.4.2	Ermittlung der mittleren Lebensdauern von Gleitringdichtungen.....	106
5.4.3	Versuchsbetreuung	109
5.4.3.1	Bereitstellung der Werkstattberichte	111
5.4.3.2	Datenübermittlung	111
5.4.4	Begleitende Prüfstandversuche	112
5.4.5	Plausibilitätsprüfung der Messdaten	117
5.4.6	Analyse der Betriebsweise der Versuchspumpen.....	117
5.4.6.1	Charakterisierung des hydraulischen Betriebs.....	118
5.4.6.2	Charakterisierung der Betriebspunktabhängigkeit ausgewählter Messgrößen und Merkmale.....	121
5.4.6.3	Zusammenfassung.....	123
5.4.7	Datenauswertung	124
5.4.7.1	Einzelanalysen ausgewählter Pumpen	124
5.4.7.2	Datenanalysen basierend auf rückgemeldeten Ausfällen.....	131
5.4.7.3	Zusammenfassung.....	134
5.4.7.4	Auswertung der Einwirkdauern mechanischer Schwingungen.....	135
5.4.8	Entwicklung eines Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose.....	136
5.4.8.1	Konzeptentwicklung und Umsetzung.....	136
5.4.8.2	Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Volumenstroms.....	141

5.4.8.3 Nutzen des Verfahrens.....	146
5.4.8.4 Zusammenfassung und Ausblick	148
5.5 Prozessgestaltung in Betrieb und Instandhaltung.....	150
5.5.1 Das Prozessketteninstrumentarium	151
5.5.2 Entwicklung von neuen Prozessabläufen	153
5.5.2.1 Aufnahme der Ist-Prozesse.....	154
5.5.2.2 Ermittlung von Verbesserungspotenzialen.....	156
5.5.2.3 Entwicklung von Soll-Prozessen	158
5.5.3 Bewertung	162
5.5.4 Zusammenfassung und Ausblick	163
6. Zusammenfassung	164
7. Ausblick.....	168
8. Literaturverzeichnis.....	169
Anhang 1: Fragebogen der Betreiberumfrage.....	172
Anhang 2: Rücklauf der Befragung	184
Anhang 3: Aktualisierte Ergebnisse der Betreiberumfrage.....	187
Anhang 4: Plausibilitätsprüfung.....	200

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Aufbau eines Pumpensystems	13
Abb. 2: Grundstrategien der Instandhaltung	14
Abb. 3: Angaben zur Redundanz gemäß ReMain-Betreiberumfrage	16
Abb. 4: Zustandsbasierte, vorausschauende Instandhaltung	18
Abb. 5: Ist-Situation und Ziele von ReMain	18
Abb. 6: Mitglieder des erweiterten ReMain-Arbeitskreises	32
Abb. 7: ReMain im Überblick	32
Abb. 8: Betreiberumfrage, Frage 1.1: Pumpentypen	36
Abb. 9: Betreiberumfrage, Frage 1.1: Bauarten und Dichtungsarten	37
Abb. 10: Betreiberumfrage, Frage 1.1: Antriebsarten	38
Abb. 11: Betreiberumfrage, Frage 1.2: Größenverteilung der Pumpentypen	39
Abb. 12: Betreiberumfrage, Frage 2.1: Angaben zum Inspektions- und Wartungsprozess	41
Abb. 13: Betreiberumfrage, Frage 2.2: Angaben zur Betriebsart	42
Abb. 14: Betreiberumfrage, Frage 2.5: Angaben zur Redundanz	43
Abb. 15: Betreiberumfrage, Frage 2.6: Angaben zu Inspektions- und Wartungsintervallen	44
Abb. 16: Betreiberumfrage, Frage 2.7: Angaben zu MTTR und MTBF	45
Abb. 17: Betreiberumfrage, Frage 2.8: Angaben zu Prozessausfallzeiten	46
Abb. 18: Betreiberumfrage, Frage 2.9: Angaben zu Schadensursachen und Schwachstellen	47
Abb. 19: Betreiberumfrage, Frage 3.1: Angaben zum Nutzen von Überwachungssystemen	49
Abb. 20: Betreiberumfrage, Frage 3.2: Angaben zu vorhandenen Überwachungssystemen	50
Abb. 21: Betreiberumfrage, Frage 3.3.1: Angaben zur überwachungsrelevanten Bauteilen	51
Abb. 22: Betreiberumfrage, Frage 3.3.2: Angaben zu überwachungsrelevanten Ausfallursachen	52
Abb. 23: Beispiel für eine mögliche Schadenskette eines Gleitringdichtungsschadens	55
Abb. 24: Sensoren und Merkmale	57
Abb. 25: Ansätze zur Restlebensdauer-Schätzung (Prognosestrategien)	58
Abb. 26: Ursprünglich geplanter und im ReMain-Projekt realisierter Instrumentierungsumfang	59

Abb. 27: Schematische Darstellung einer Frequenzanalyse eines Beschleunigungssignals mit und ohne vorheriger Hüllkurvenbildung	60
Abb. 28: Erkennung mechanischer Störung über der Schwingfrequenz.....	61
Abb. 29: Sensorintegrierte Auswertung der Schwingungssignale beim efector octavis, (A): Schnittzeichnung, (B): Sensortyp VE113A mit integriertem Anschlusskabel	62
Abb. 30: efector octavis - Fehlerobjekte für Kreiselpumpen	62
Abb. 31: Frequenzselektive Kenngrößen für die Diagnose von Kreiselpumpen	64
Abb. 32: Schematischer Aufbau der Prüfstände der Arbeitsgruppe Störungsfrüherkennung, Lehrstuhl SAM, TU Kaiserslautern [Quelle: SAM]	65
Abb. 33: Einteilung der Störungen beim Betrieb von Pumpen, Lehrstuhl SAM, TU Kaiserslautern.....	66
Abb. 34: Durch Kavitationserosion geschädigtes Laufrad, Lehrstuhl SAM, TU Kaiserslautern [Quelle: SAM]	67
Abb. 35: Ursachen von Gasmitförderung, Lehrstuhl SAM, TU Kaiserslautern [Quelle: SAM]	67
Abb. 36: Kennfelder der Versuchspumpe CPK 32-200, Laufraddurchmesser 209 mm [Quelle: KSB]	69
Abb. 37: Kennfelder der Versuchspumpe CPK 40-160, Laufraddurchmesser 150 mm [Quelle: KSB]	70
Abb. 38: Prozessmerkmal Förderhöhe, Versuch Kavitation und Normalbetrieb, Fördergrad $q = 1,0$	72
Abb. 39: Schwingungsmerkmal Peak Max, Versuch Kavitation und Normalbetrieb, Fördergrad $q = 1,0$	73
Abb. 40: Schwingungsmerkmal Average (Betragsmittelwert), Versuch Kavitation und Normalbetrieb, Fördergrad $q = 1,0$	74
Abb. 41: Schwingungsmerkmal Kavitation, Versuch Kavitation und Normalbetrieb, Fördergrad $q = 1,0$	75
Abb. 42: Abstufungen Gasgehalt, Versuch Gasmitförderung, Fördergrad $q = 1,0$	76
Abb. 43: Schwingungsmerkmal Peak Max, Versuch Gasmitförderung, Fördergrad $q = 1,0$	76
Abb. 44: Schwingungsmerkmal Average, Versuch Gasmitförderung, Fördergrad $q = 1,0$	77
Abb. 45: Prozessmerkmal Förderhöhe, Versuch Gasmitförderung, Fördergrad $q = 1,0$	77
Abb. 46: Häufigkeitsverteilung des Schwingungsmerkmals "Kavitation" für Normalbetrieb und Kavitation mit 3 %, 5 % und 9 % Förderhöhenabfall, CPK 32-200, Fördergrad $q = 1,0$	78
Abb. 47: Häufigkeitsverteilung des Schwingungsmerkmals "Kavitation" für Normalbetrieb und Kavitation mit 3 %, 5 % und 9 % Förderhöhenabfall , CPK 40-160, Fördergrad $q = 1,0$	79
Abb. 48: Vergleich CPK 32-200 mit CPK 40-160, Fördergrad $q = 1,0$	80

Abb. 49: Manipuliertes Laufrad, (A): Blick auf die Deckscheibe, (B): Blick auf die Tragscheibe [Quelle: SAM]	81
Abb. 50: Schwingungsmerkmal Unwucht, Vergleich Normalbetrieb – Unwucht	81
Abb. 51: Schwingungsmerkmal Unwucht, Vergleich Prüfstand-/Felddaten	82
Abb. 52: Hydraulikgrößen	84
Abb. 53: Verteilung der Versuchspumpen hinsichtlich Baugröße und Dichtungsart	85
Abb. 54: Antriebskonzepte	86
Abb. 55: Schematischer Aufbau der Infrastruktur zur Datensammlung.....	87
Abb. 56: Erfassung von Instandhaltungsinformationen unter Einsatz der RFID-Technologie	90
Abb. 57: Systematik für die pumpenspezifischen Wartungs- und Inspektionspläne	91
Abb. 58: Schwingungssensor auf Pumpengehäuse	92
Abb. 59: Funktionalitäten und Datenfluss: PLS, PIMS und Projekt-Server	94
Abb. 60: Informationssammlung und Datenflüsse vom Feld zum Server.....	95
Abb. 61: Laufzeitanalyse der Versuchspumpen in Matlab.....	96
Abb. 62: Systematik der (Erst-) Befundungen der Versuchspumpen	97
Abb. 63: Übersicht Analysewerkzeuge	98
Abb. 64: Historische Schadensanalyse: Anteile (in %) der bei den Ausfällen betroffenen Pumpenbauteile (über den Betrachtungszeitraum Januar 2005 bis Oktober 2008).....	101
Abb. 65: Historische Schadensanalyse: Jahresübersicht der Pumpenausfälle (über den Betrachtungszeitraum Januar 2005 bis Oktober 2008)	102
Abb. 66: Abschätzung der Anzahl der zu erwartenden Pumpenausfälle für das Jahr 2009 auf Basis der historischen Schadensanalyse	103
Abb. 67: Modifizierte Zielsetzung von ReMain auf Basis der historischen Schadensanalyse	104
Abb. 68: Historische Schadensanalyse aktualisiert: Anteile (in %) der bei den Ausfällen betroffenen Pumpenbauteile (über den Betrachtungszeitraum Januar 2005 bis Dezember 2009).....	105
Abb. 69: Historische Schadensanalyse aktualisiert: Jahresübersicht der Pumpenausfälle (über den Betrachtungszeitraum Januar 2005 bis Dezember 2009).....	106
Abb. 70: Prinzip zur Ermittlung des Ausfallverhaltens	107
Abb. 71: Ergebnisse, wobei nur die Ausfälle der Pumpe betrachtet wurden.....	107
Abb. 72: Ergebnisse, wenn die Stichprobe um die aktuelle Laufzeit der Pumpe erweitert wird.....	108

Abb. 73: Ausfallzeiten der zusammengefassten, baugleichen Pumpen im Wahrscheinlichkeitsnetz.....	108
Abb. 74: Berechnung der Kennwerte nur auf Ausfalldaten basierend.....	108
Abb. 75: Berechnung unter Berücksichtigung der nicht ausgefallenen Pumpen (d. h. aktuell noch intakt laufende Aggregate)	109
Abb. 76: Klassifikation von Ausfällen und Analogie aus dem Automobilbau	109
Abb. 77: Informationsquellen und Datensammlung	110
Abb. 78: Weiterverarbeitung auf dem Server in Kaiserslautern.....	112
Abb. 79: Vorgeschädigtes Lager [Quelle SAM]	113
Abb. 80: Vergleich Normalbetrieb – Betrieb mit Lagerschaden.....	113
Abb. 81: Schwingungsmerkmal Lagerzustand, Vergleich Prüfstand-/ Felddaten.....	114
Abb. 82: Schwingungsmerkmal Peak Max, Kavitationsversuch	115
Abb. 83: Gleitring (A) und Gegenring (B) nach drei Wochen Kavitationsversuch	116
Abb. 84: H-Q Scatterplot der Pumpe P261 (Laufzeit: 410 Stunden)	119
Abb. 85: Verteilung der Betriebsstunden über dem Fördergrad	120
Abb. 86: 3D-Verteilung der Betriebsstunden	121
Abb. 87: Scatterplot Betragsmittelwert der Schwingbeschleunigung	122
Abb. 88: Laufzeit über dem Mittelwert der Schwingbeschleunigung	123
Abb. 89: Grenzwerte für Schwingungsdiagnose für Lager bei unterschiedlichen Drehzahlen und Klassifikation der Pumpe P812A	124
Abb. 90: Fließbild der Verladung P812A.....	125
Abb. 91: Schwingungsmerkmale und Prozessdaten der Pumpe P812A (Zeitraum 24h).....	126
Abb. 92: Kennlinie und Betriebspunkte vor Umbau	126
Abb. 93: Kennlinie und Betriebspunkte nach Umbau	127
Abb. 94: Auswirkung des Umbaus auf den Betriebspunkt.....	127
Abb. 95: Auswirkung des Umbaus auf den Lagerkennwert.....	128
Abb. 96: Auswirkung des Umbaus auf den Kennwert für Kavitation	129
Abb. 97: Kavitationsversuche auf dem Prüfstand	130
Abb. 98: Schwingungsmerkmale und Prozessdaten bei sich zusetzendem Filter (Zeitraum ca. 35h).....	131
Abb. 99: Prozessdaten der Pumpe	133

Abb. 100: Mehrfaches Anfahren der Pumpe P2230A.....	134
Abb. 101: Sortierung der Einwirkdauer über dem Merkmal „Kavitation“ (Einheit: mg*Tage)	135
Abb. 102: Konzept: Kennlinienfelder als Bewertungsgrundlage.....	137
Abb. 103: Konzept: Vergleich der aktuellen und theoretischen Betriebspunkte über die Herstellerkennlinien.....	139
Abb. 104: Umsetzung: Visualisierung des Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose im PIMS	140
Abb. 105: Umsetzung: Detaillierte Trendansicht.....	141
Abb. 106: Berechnungsverfahren für den Volumenstrom.....	142
Abb. 107: Berechnung des Volumenstroms über Wärmebilanz	143
Abb. 108: Ermittlung des Volumenstroms über Wellenleistungskennlinie.....	144
Abb. 109: Ermittlung des Volumenstroms über Pumpenkennlinie.....	145
Abb. 110: Potenzial des Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose zur Verlängerung der Pumpenlebensdauer	147
Abb. 111: Zusammenfassung: Nutzen des Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose	149
Abb. 112: Interpretationshilfe der Abweichungen von den Pumpenkennlinien	150
Abb. 113: Vorgehensweise bei der Prozessgestaltung	151
Abb. 114: Exemplarischer Prozesskettenplan	152
Abb. 115: Die Parameter des Prozesskettenmodells	153
Abb. 116: Aufnahme der Ist-Prozesse	154
Abb. 117: Elektronische Aufbereitung.....	155
Abb. 118: Verifizierte Ist-Prozesse.....	156
Abb. 119: Verbesserungspotenzial RFID/ PDA-Anwendung.....	157
Abb. 120: Verbesserungspotenzial Datenübertragung.....	158
Abb. 121: Entwicklung von Soll-Prozessen	159
Abb. 122: Integration der Informationen aus dem Verfahren zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose in die Prozessabläufe	160
Abb. 123: Restlebensdauerabschätzung auf Basis der Informationen aus dem Verfahren zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose.....	161

Abb. 124: Kostenmäßige Bewertung der Einsparpotenziale bei Anwendung des Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose.....	163
Abb. 125: Für die Prozessneugestaltung berücksichtigte Technologieanwendungen	164
Abb. 126: Im Rahmen des ReMain-Projekts gewählter Instrumentierungsumfang.....	166
Abb. 127: Vergleich von Kennwerten für Referenzgruppen (Pumpen mit Ausfällen und vergleichbare Pumpen ohne Ausfälle)	167
Abb. 128: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 1.1: Pumpentypen.....	187
Abb. 129: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 1.1: Bauarten und Dichtungsarten	188
Abb. 130: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 1.1: Antriebskonzepte	188
Abb. 131: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 1.2: Größenverteilung der Pumpentypen	189
Abb. 132: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 2.1: Angaben zum Inspektions- und Wartungsprozess ...	190
Abb. 133: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 2.2: Angaben zur Betriebsart	190
Abb. 134: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 2.5: Angaben zur Redundanz	191
Abb. 135: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 2.6: Angaben zu Inspektions- und Wartungsintervallen ..	192
Abb. 136: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 2.7: Angaben zu MTTR und MTBF	193
Abb. 137: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 2.8: Angaben zu Prozessausfallzeiten.....	194
Abb. 138: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 2.9: Angaben zu Schadensursachen und Schwachstellen	195
Abb. 139: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 3.1: Angaben zum Nutzen von Überwachungssystemen	196
Abb. 140: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 3.2: Angaben zu vorhandenen Überwachungssystemen.....	197
Abb. 141: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 3.3.1: Angaben zu überwachungsrelevanten Bauteilen.....	198
Abb. 142: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 3.3.2: Angaben zu überwachungsrelevanten Ausfallursachen.....	199

1. Ausgangssituation

Mechatronische Pumpensysteme sind die treibende Kraft in fast allen Produktionsanlagen der verfahrenstechnischen Industrie. Ein Pumpensystem besteht in der Regel aus der Pumpe als Arbeitsmaschine, dem Elektromotor als Antriebsmaschine und der Kupplung als Verbindungsglied (vgl. Abb. 1).

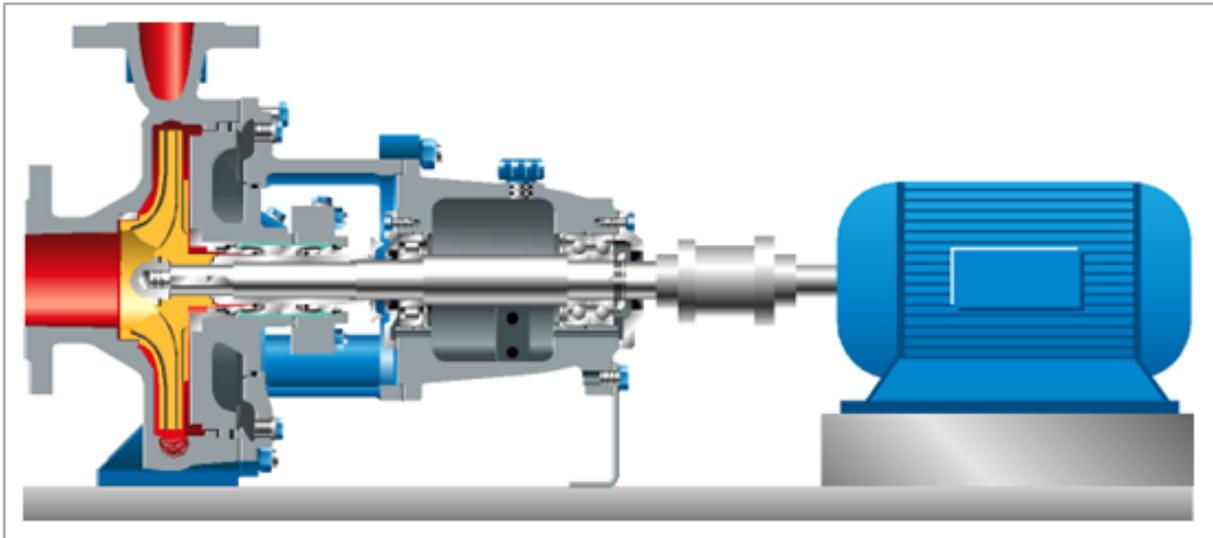


Abb. 1: Aufbau eines Pumpensystems

Das Pumpensystem ist Teil eines hydraulischen Systems, das als offener oder geschlossener Kreislauf ausgeführt sein kann. Dieses besteht in der Regel aus einer Vielzahl von Komponenten wie bspw. Tanks oder Becken, Rohrleitungen, Armaturen, Mess- und Regelungstechnik und Einbauten wie Wärmetauschern, Filtern oder verschiedensten verfahrenstechnischen Apparaten. Dabei ist die Pumpe mit ihrem Antrieb das Herz der Anlage [InEn10].

Aufgrund ihrer einfachen und robusten Bauweise sind insbesondere Kreiselpumpen weit verbreitet. Als Standardmaschinen der verfahrenstechnischen Industrie kommen sie zur Förderung, häufig auch zur Umwälzung und Dosierung verschiedenster Medien, zum Einsatz. Insbesondere in Chemieanlagen werden überwiegend Kreiselpumpen zur Förderung von Flüssigkeiten eingesetzt.

Das Pumpensystem ist die mechatronische Schlüsselkomponente, die in hohem Maße die Verfügbarkeit der gesamten Anlage bestimmt. Entsprechend den wachsenden Anforderungen werden Pumpensysteme bei zunehmenden Anlagenlaufzeiten näher an ihrer Belastungsgrenze betrieben. Dies führt zu einer erhöhten Fehleranfälligkeit der Systeme.

Der Ausfall einer Pumpe kann in vielen Fällen den Stillstand der gesamten Anlage zur Folge haben. Die dadurch entstehenden Produktionsausfallkosten können den Wert der Pumpe schnell übersteigen. Der Zuverlässigkeit dieser Komponente kommt daher ein ganz besonderer Stellenwert zu. Zudem ist insbesondere für produzierende Unternehmen der verfahrenstechnischen Industrie ein Höchstmaß an Sicherheit, Verfügbarkeit und Qualität unerlässlich.

1.1 Instandhaltung von Pumpensystemen

Die Veränderung der Anforderungen an Pumpensysteme bewirkt eine gleichzeitige Veränderung der Anforderungen an die Instandhaltung. Die Instandhaltung muss durch geeignete Strategien und Maßnahmen den hohen Erwartungen an die Systeme gerecht werden und ungeplante Anlagenstillstände und dadurch entstehende Produktionsausfallkosten weitestgehend vermeiden. Die Wahl der Instandhaltungsstrategie (vgl. Abb. 2) ist daher für den effizienten und kostenoptimierten Betrieb eines Pumpensystems von großer Bedeutung.

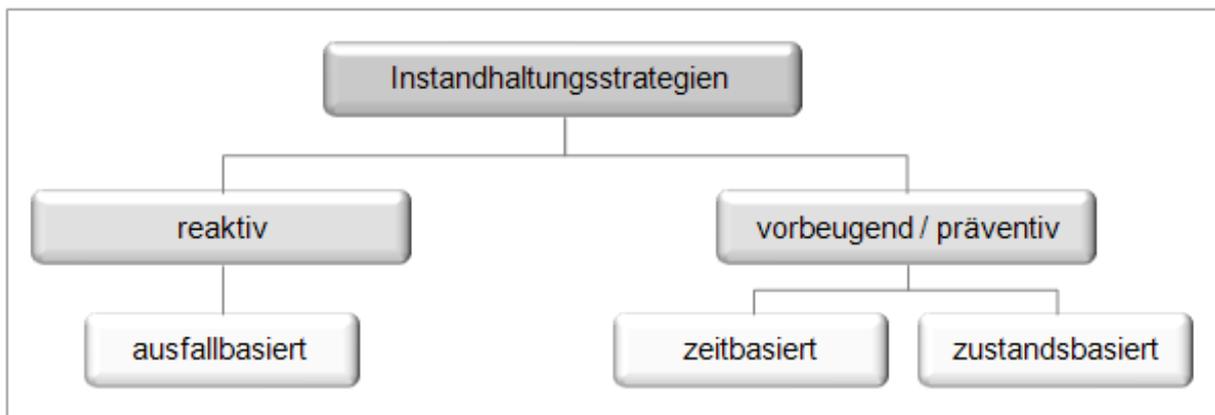


Abb. 2: Grundstrategien der Instandhaltung

Die Mehrzahl der Pumpenbetreiber und -instandhalter praktiziert Strategien der ausfall- und zeitbasierten Instandhaltung. Diese Strategien erzielen häufig jedoch nicht die gewünschte Verfügbarkeit, bezogen auf ungeplante Anlagenstillstände und den wirtschaftlich optimierten Einsatz von Ressourcen (bspw. in Hinblick auf Redundanz, Personal, Ersatzteile).

Bei der *ausfallbasierten Instandhaltung* wird die Pumpe bis zum Schadensfall betrieben. Diese Strategie hat den Vorteil, dass der Abnutzungsvorrat der Pumpe bzw. einzelner Bauteile voll ausgeschöpft werden kann. Die ausfallbasierte Instandhaltung kann bei Anlagen sinnvoll sein, deren ungeplanter Stillstand nicht so kostenintensiv ist oder bei Pumpen, die redundant

ausgelegt sind. Die Redundanz sorgt – je nach Variante (kalt oder warm¹) – für einen nahezu unterbrechungsfreien Betrieb.

Bei der *zeitbasierten Instandhaltung* werden im Rahmen vorbeugender bzw. präventiver Maßnahmen bestimmte Bauteile einer Pumpe oft zu früh ausgetauscht. Befindet sich eine Pumpe bspw. aufgrund eines Gleitringdichtungsschadens in der Werkstatt, werden neben der Gleitringdichtung (GLRD) nach längerer Laufzeit der Pumpe auch fast immer die Wälzlager (Verschleißteile) ausgetauscht, selbst wenn der Abnutzungsvorrat der Lager noch nicht ausgeschöpft ist. Dies ist gängige Praxis, da die Kosten für die Wälzlager nur einen geringen Anteil an den Gesamtkosten der Reparatur ausmachen. Damit wird der gesamte Abnutzungsvorrat der Lagerung wiederhergestellt. Die zeitbasierte Instandhaltung wird insbesondere praktiziert, um eine hohe Betriebssicherheit zu gewährleisten.

Neben diesen Strategien werden zur Erhöhung der Planbarkeit der Instandhaltungsmaßnahmen *Anlagenbegehungen* durchgeführt. Mit Hilfe dieser *Wartungs- und Inspektionsrundgänge*, die in regelmäßigen Intervallen und in Abhängigkeit der Belastung durchgeführt werden, ist es möglich, einen Teil der Fehler oder Störungen an einer Pumpe zu erkennen. Ein erfahrener Mitarbeiter ist bspw. in der Lage, aus der Veränderung des Betriebsgeräusches einer Pumpe und wenigen zusätzlichen Informationen (bspw. Leckage der GLRD) den Ist-Zustand der Pumpe abzuleiten. Der Zustand der Pumpe ist also bis zu einem gewissen Grad bekannt. Auf Basis dieser subjektiven Zustandsinformation entscheidet der Mitarbeiter, ob die Pumpe zu einem definierten Termin präventiv instandgesetzt oder kontrolliert bis zum Ausfall betrieben wird, wobei hier der Ausfallzeitpunkt der Pumpe auf Grundlage der Erfahrung des Mitarbeiters lediglich abgeschätzt werden kann. Der in beiden Fällen resultierende Stillstand ist aufgrund der Kenntnis des Zustands der Pumpe jedoch kein ungeplanter, sondern ein geplanter Stillstand.

Diese Vorgehensweise zur Zustandsbeurteilung ist jedoch häufig nicht ausreichend zuverlässig, so dass ungeplante Stillstände und damit auch ungeplante Instandhaltungsmaßnahmen nicht gänzlich verhindert werden können.

¹ Die Unterscheidung warme/ kalte Redundanz betrifft vor allem Kernprozesse der Chemie mit wechselnden oder kritischen Medien. Bei einer kalten Redundanz steht die Reservepumpe betriebsbereit, aber ungefüllt, und muss bei einer Störung der Betriebspumpe erst entlüftet und in Betrieb genommen werden. Bei einer warmen Redundanz ist die Reservepumpe gefüllt und entlüftet, also sofort einsatzbereit. Bei einem Medienwechsel sind beide Pumpen zu spülen, bei Medien mit besonderen Anforderungen an Temperatur oder Umwälzung sind diese auch in der Reservepumpe zu gewährleisten.

1.2 Redundanz von Pumpensystemen

Die Strategie der ausfallbasierten Instandhaltung und die Minimierung der negativen Auswirkungen ungeplanter Anlagenstillstände auf die Produktion werden in vielen Betrieben teuer durch redundant ausgeführte Pumpensysteme erkaufte.

Gemäß der im Verbundforschungsprojekt ReMain durchgeführten Betreiberumfrage² setzen 83 % der befragten Unternehmen auf Redundanz, um Produktionsausfälle durch Anlagenstillstände zu vermeiden (vgl. Abb. 3). Dabei kommen die redundanten Pumpen (Reservepumpen) vorrangig als kalte Redundanzen (Standby) bei Ausfall der Primärpumpe zum Einsatz (82 %). Die warme Redundanz wird nur dort eingesetzt, wo der Prozess unbedingt eine kontinuierliche Förderung verlangt (18 %). Redundanzen sind nicht nur für die Primärprozesse (d. h. für die Produktion) von Bedeutung, auch bei Sekundärprozessen werden redundante Pumpen vorgehalten (wenn bspw. aus versicherungstechnischen Gründen ein bestimmter Druck auf einem Löschwassernetz gehalten werden muss).

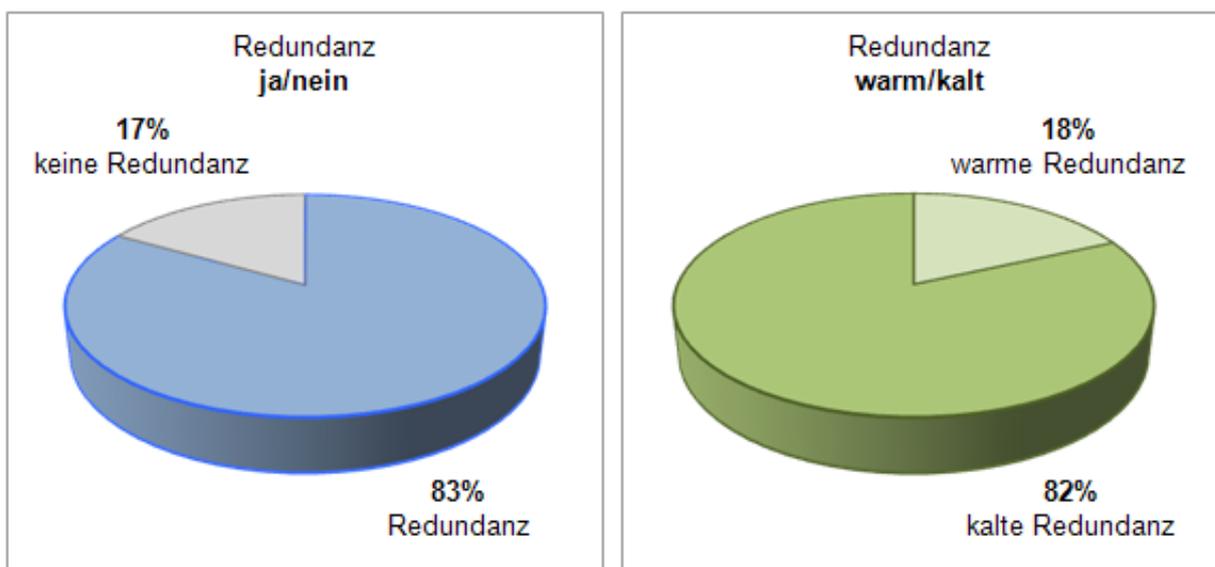


Abb. 3: Angaben zur Redundanz gemäß ReMain-Betreiberumfrage

Aufgrund der Redundanzen kommt es bei Pumpenschäden in den meisten Fällen zu keinem Anlagenstillstand und damit zu keinem Produktionsausfall. Redundanzen bedeuten jedoch zusätzliche Kosten: Die baugleichen Reservepumpen und die damit verbundene Installation von weiteren Rohrleitungen, Armaturen, Mess- und Regelungstechnik usw. sind mit einem hohen finanziellen und anlagentechnischen Mehraufwand sowie zusätzlichem Instandhal-

² Zu den Ergebnissen der ReMain-Betreiberumfrage vgl. Kapitel 5.1.2.

tungsaufwand verbunden. Nach einer Abschätzung des VCI (Verband der Chemischen Industrie) entfallen 9 % der Investitionskosten beim Bau einer Prozessanlage auf die Redundanz von Pumpensystemen mit allen notwendigen Komponenten (Rohrleitungen, Platz in der Anlage, Schaltanlagen, usw.) [VCI05]. Der teilweise Verzicht auf Redundanzen bietet dementsprechend ein hohes Einsparpotenzial.

Zudem reduziert die Maßnahme der Redundanz die Ausfallwahrscheinlichkeit der Anlagen oftmals nicht wunschgemäß. Redundanz ist vorteilhaft, wenn der Ausfall der Primärpumpe durch Verschleiß oder zufälliges Versagen eines Bauteils verursacht wird. Viele Ausfälle werden jedoch durch einen nicht bestimmungsgemäßen Betrieb, z. B. Trockenlauf, verursacht. Wird dieser als Ausfallursache für die Primärpumpe nicht erkannt, kann der Ausfall der Reservepumpe bereits kurze Zeit später erfolgen.

2. Motivation und Ziele von ReMain

Pumpensysteme spielen in Produktionsanlagen der verfahrenstechnischen Industrie eine wichtige Rolle. Umso interessierter sind Hersteller, Betreiber und Instandhalter an Möglichkeiten zur Zuverlässigkeits- und Verfügbarkeitssteigerung. Mit den aktuell praktizierten Strategien der ausfall- und zeitbasierten Instandhaltung lässt sich den hohen Anforderungen zukünftig kaum noch nachkommen. Diese Strategien erzielen in Verbindung mit redundant ausgeführten Pumpensystemen zwar weitestgehend eine bedarfsgerechte Verfügbarkeit, jedoch werden durch die baugleichen Pumpensysteme Kapital gebunden und die laufenden Kosten durch den zusätzlichen Instandhaltungsaufwand erhöht. Zudem reduziert die Maßnahme der Redundanz die Ausfallwahrscheinlichkeit der Anlagen oft nicht wunschgemäß. Hier eröffnen sich erhebliche Potenziale.

Die Anforderungen an einen effizienten und kostenoptimierten Betrieb von Pumpensystemen können zukünftig nur durch eine zustandsbasierte, vorausschauende Instandhaltung erfüllt werden (vgl. Abb. 4). Abgestimmt auf die wesentlichen ausfallkritischen Bauteile und Ausfallursachen einer Pumpe kann diese die Zuverlässigkeit der Pumpensysteme und damit der Verfügbarkeit der Anlagen wirtschaftlicher sichern. Mit dem Einsatz bzw. der Kombination entsprechender Technologien und Informationssysteme wachsen die Möglichkeiten, die Betriebs- und Instandhaltungsorganisation effizient zu gestalten.

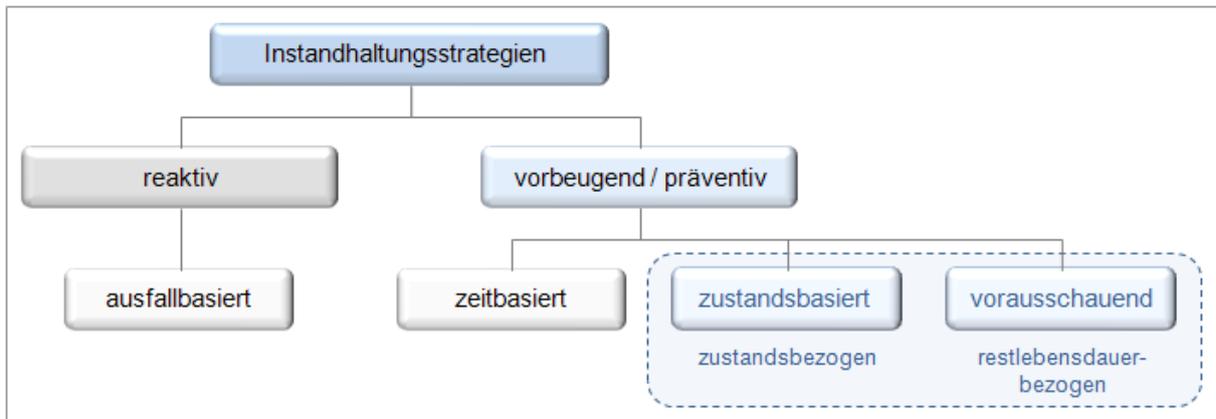


Abb. 4: Zustandsbasierte, vorausschauende Instandhaltung

Das Verbundforschungsprojekt ReMain machte es sich zur Aufgabe, eine Lösung zu erarbeiten, um den Betrieb und die Instandhaltung von Kreiselpumpen vorausschauend zu gestalten (vgl. Abb. 5). Ziel ist die Entwicklung eines robusten Verfahrens zur Zustandsdiagnose und Restlebensdauerprognose, das auf die in der Industrie gebräuchlichsten Kreiselpumpensysteme anwendbar ist und die wesentlichen ausfallverursachenden Abnutzungsmechanismen und ausfallkritischen Bauteile einer Pumpe berücksichtigt. Dabei spielt auch die frühzeitige Erkennung von nicht bestimmungsgemäßen, schädigenden Betriebsbedingungen eine zentrale Rolle. Die Projektergebnisse bilden die Grundlage für die Umsetzung einer zustandsbasierten, vorausschauenden Betriebs- und Instandhaltungsstrategie als sinnvolle Ergänzung zu den aktuell praktizierten ausfall- und zeitbasierten Strategien.

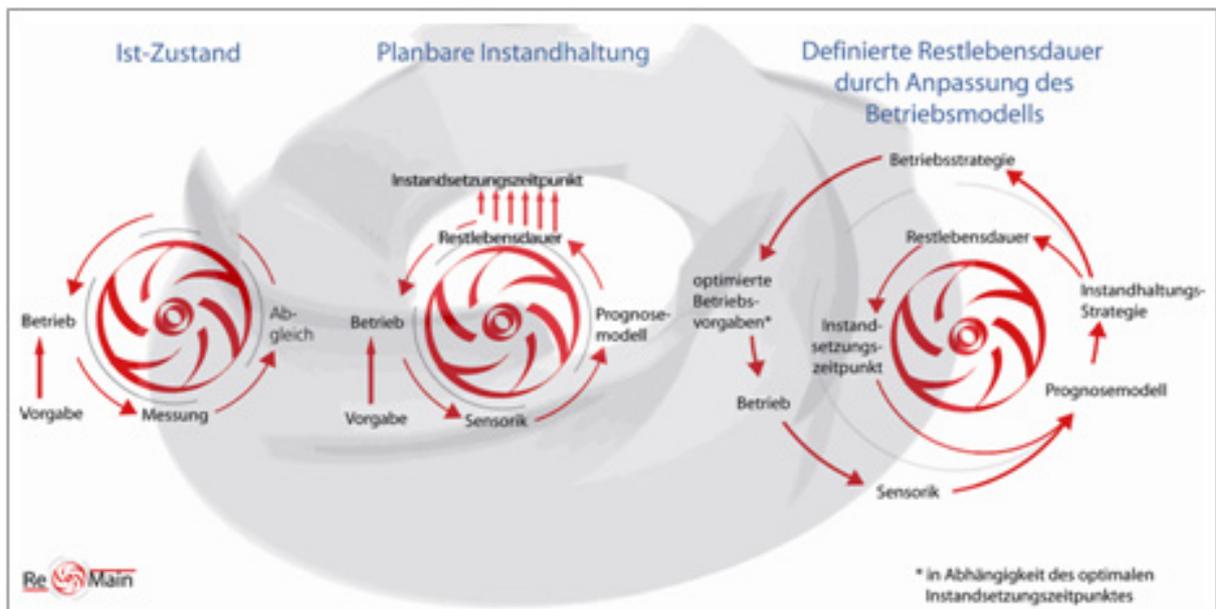


Abb. 5: Ist-Situation und Ziele von ReMain

3. Stand der Wissenschaft und Technik und bisherige Arbeiten der Projektpartner

Die moderne industrielle Produktionstechnik stellt höchste Anforderungen an die Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit und Betriebssicherheit hochautomatisierter Maschinen und Anlagen. Hier steht im Bereich der Instandhaltung immer weniger Personal einer zunehmend komplexeren Technik gegenüber. Die Instandhaltung befindet sich immer stärker im Spannungsfeld zwischen Erhöhung von Verfügbarkeit und Produktqualität auf der einen Seite und gleichzeitiger Senkung der Instandhaltungskosten auf der anderen Seite.

Die meisten Pumpenbetreiber und -instandhalter praktizieren Strategien der ausfall- und zeitbasierten Instandhaltung. Damit lässt sich den hohen Anforderungen kaum nachkommen, gehören doch ungeplante Stillstände oder der vorbeugende Tausch noch intakter Pumpenbauteile zu den kostenintensivsten Faktoren der Instandhaltung. Auf längere Sicht können die Anforderungen an die Instandhaltung nur durch einen zustandsbasierten, vorausschauenden Ansatz erfüllt werden, der fallweise auf ausfallkritische Anlagen und Komponenten abgestimmt werden muss.

Kosteneffizienz und Verfügbarkeit der Produktionsmittel gewinnen zunehmend an Bedeutung. Die Instandhaltung ist eine wichtige Größe in der Wertschöpfungskette und ein strategischer Erfolgsfaktor für Unternehmen in der Prozessindustrie. Eine zuverlässige und kostengünstige Überwachung und Diagnostik der Pumpen rückt daher zunehmend in den Interessenbereich der Betreiber und Instandhalter.

Im Folgenden wird der Stand der Technik vor Beginn des Projekts dargestellt.

3.1 Sensorik und Messtechnik

Die nach Stand der Wissenschaft und Technik bekannten Systemüberwachungen an Pumpen gliedern sich in die nachfolgend beschriebenen Verfahren.

3.1.1 Automatisierte Schwingungsanalyse (online)

Die Schwingungsanalyse in Form der Erfassung und Beurteilung von Maschinengeräuschen ist im Stand der Technik ein zielführendes Mittel zur Zustandsbeurteilung von Maschinen und Anlagen. Während früher Meister oder Betriebstechniker mit „Handauflegen“ aufgrund ihrer Erfahrung imstande waren, einen sich anbahnenden Ausfall zu prognostizieren, ist seit mehr als 40 Jahren die schwingungstechnische Sensortechnik ein Mittel der Wahl. Dabei gilt heute ebenso wie früher, dass laut nicht gleich schlecht und leise nicht gleich gut sein muss, son-

dem dass es vielmehr um das Auftreten ganz spezieller Klangmuster wie z. B. ein Klingeln oder ein Rasseln geht.

Spezielle Herausforderungen der Schwingungsüberwachung, verglichen mit der Überwachung von Prozessgrößen wie bspw. Druck oder Temperatur, liegen jedoch in der benötigten großen Bandbreite sowie in den teilweise komplizierten Algorithmen. So ist es meist ausreichend, Temperaturen einmal in der Minute zu erfassen und Drücke einmal in der Sekunde. Eine aussagefähige Schwingungsanalyse benötigt dagegen mehr als 30.000 Werte pro Sekunde. Diese Datenmenge kann in ihrer ursprünglichen Form keiner Steuerung oder Automatisierungstechnik zugeführt werden. Eine Vorauswertung ist zwingend notwendig. Zudem ist das eigentliche Schwingungssignal nur in wenigen Fällen symptomatisch für einen Maschinenschaden. Vielmehr muss eine zeitinvariante Transformation zur Interpretation stattfinden. Eine Signalkonditionierung kann über die so genannte Fast Fourier Transformation (FFT) stattfinden. Dabei wird das Signal in seine spektralen Komponenten zerlegt und kann – gegebenenfalls noch unter Gewichtung mit Betriebsparametern (z. B. Drehzahl und Last) – zur Aussage gebracht werden. In der Wissenschaft werden noch andere Transformationsverfahren, beispielsweise Cepstrum, Wigner-Ville oder Wavelet-Transformation, genutzt. Diese Transformationen zeigen andere Merkmale des Schwingungssignals auf als die Fast Fourier Transformation. Aufgrund der aufwändigen Implementierung dieser Verfahren und des Fehlens kommerzieller Analysatoren werden diese bisher nur fallweise industriell genutzt.

3.1.2 Nicht automatisierte Schwingungsanalyse (offline)

Periodische Messungen vordefinierter Merkmale durch Servicetechniker

Umfangreiche Erfahrungen im Bereich der Maschinendiagnose existieren bei der Überwachung von Prozessmaschinen durch periodisch durchgeführte, nicht automatisierte Schwingungsmessungen (Begehung durch Spezialist vor Ort). Im Fokus steht die Erkennung von Wälzlagerschäden, die einen Ausfall der Maschinen zur Folge haben.

Lagerschäden, die mit Hilfe von Schwingungsmessungen erkannt werden, stellen nur eine Ausfallursache von Prozessmaschinen dar. Vielfach verursachen hydraulische Störungen wie bspw. unzulässige Kavitation, Überlast, Trockenlauf oder Blockade Ausfälle von Kreiselpumpen, indem sie zu erhöhten Kräften und damit zu höheren Belastungen für Lager und GLRD führen. Für die Praxis bedeutet dies ein ungleichmäßiges Ausfallverhalten. Diese Phänomene werden durch die Betriebsführung und sonstige Umweltfaktoren beeinflusst und

wiederholen sich azyklisch. Einige hydraulische Störungen verursachen einen erheblichen Verschleiß, d. h. eine schnellere Verringerung des Abnutzungsvorrats.

3.1.3 Klassische Permanentüberwachung mit diskreten Sensoren

In der Prozessleittechnik werden in der Regel für einen Messwert, z. B. Temperatur, ein Warn- und ein Alarmwert hinterlegt, der dem Betreiber eine Aussage zum Prozesszustand ermöglicht. Die Verknüpfung mehrerer Messgrößen zu einer detaillierteren Aussage – insbesondere zur Restlebensdauerprognose – ist für Pumpensysteme nicht üblich.

3.1.4 Permanentüberwachung mittels intelligenter Diagnosesysteme

Online-Überwachung des Betriebszustands durch Sensor- bzw. Rechnersysteme

Diagnosesysteme für Pumpen sind ein zentraler Gegenstand der Forschung von Industrie und Hochschulen. Stellvertretend können die Arbeiten von Kenull [Kenu98], Hellmann [Hell99] und Kafka [Kafk99] sowie Laue [Laue98] und Huhn [Huhn01] genannt werden. Mittlerweile bieten u. a. die Unternehmen Goulds [Goul04], Flygt [Flyg05], KSB [KSB05] und Siemens [Siem08] modulare Diagnosesysteme für Pumpen an. Mit keinem der Produkte kann eine Prognose der Restlebensdauer von Pumpensystemen erreicht werden.

Der Markteintritt branchenfremder Unternehmen mit speziellen Diagnosesystemen für Pumpen, z. B. Texas Instrument PumpSystemAlert [Texa05] oder Emerson Machine Health Transmitter [Emer05] und weitgehenden Patentanmeldungen (vgl. bspw. [EIReo.J.]) verdeutlichen die strategische Relevanz der Pumpendiagnose.

Diese Systeme verarbeiten Signale von Schwingungs-, Druck-, Temperatur- oder Motorstromsensoren zu Informationen über den Zustand der Pumpe und über die vorliegenden Prozessbedingungen. Umfang und Güte steigen mit der Zahl der unterschiedlichen Messgrößen an. So kann das Trockenlaufen einer Pumpe durch verschiedene Betriebscharakteristika beispielsweise an einer abnehmenden Stromaufnahme des Antriebs, an einer sinkenden Temperatur am Lager und an einem sinkenden Differenzdruck zwischen Druck- und Saugseite erkannt werden. Im Gegensatz zur klassischen Überwachung enthalten diese Systeme physikalisches Wissen über das Verhalten des Pumpensystems (z. B. Zusammenhänge zwischen elektrischer Leistung, Fördermenge und Drehzahl).

Eine Alternative zur physikalischen Modellierung stellt die merkmalsorientierte Störungsfrüherkennung mit Verfahren des maschinellen Lernens dar. Wie ein Experte an einem veränderten Klang der Maschine eine Störung erkennen kann, ist es den Verfahren des maschinellen Lernens (z. B. Entscheidungsbäume oder neuronale Netze) möglich, charakteristische Mus-

ter in vieldimensionalen Merkmalsräumen zu identifizieren. Die notwendigen Merkmale für einen Stöorzustand einer Maschine werden im realen Betrieb generiert. Aufgrund der hohen Varianz von Pumpen und den noch erforderlichen Prüfläufen für jede Ausführung wird dieses Verfahren bisher nicht in Serie eingesetzt. In den Bereichen der Maschinen- und Getriebediagnostik hat sich das Verfahren bereits in der industriellen Anwendung bewährt [Gero99]; [Acid05]; [FVAo.J.].

3.2 Restlebensdauerprognose und Zuverlässigkeitsanalyse

Die Diagnose mit definierten Schadensstufen nach VDI 3832 ist für Wälzlager Stand der Technik (vgl. bspw. [FAG05]). Bei dem Einsatz des Analysesystems in einem Pumpensystem sind nur die in Motor und Pumpe verbauten Wälzlager, nicht jedoch andere Komponenten, abgesichert. Verschiedene Hersteller von Schwingungsdiagnosesystemen (vgl. bspw. [Ifor05]; [Prüf05]) bieten weitergehende Analysesysteme, die mit einem Schwingungssensor die Überwachung des Effektivwerts oder einzelner Schwingungsamplituden sicherstellen. Die im Einzelfall relevanten Größen und die zugehörigen Grenzwerte zur Erkennung einer Störung werden auf der Basis von Erfahrungswerten festgelegt. Verfahren zur Restlebensdauerprognose werden nicht angewendet.

Auf dem Gebiet der Zuverlässigkeitsanalyse sind in der Literatur Methoden zur Berechnung der Lebensdauer für einen Bauteiltyp aufgrund von bekannten Ausfalldaten beschrieben [VDA00]. Zusammen mit dem Wissen, wie die einzelnen Bauteile in dem zu analysierenden System zusammenwirken, werden die Ergebnisse aus der Betrachtung auf Bauteilebene verwendet, um die Systemzuverlässigkeit zu beschreiben. Dies geschieht über eine Modelltheorie (im Allgemeinen die des Booleschen Modells), aus der die Systemzuverlässigkeit ermittelt wird.

Um die unterschiedlichen Betriebsbedingungen zu berücksichtigen, werden die auf die Komponenten wirkenden Lastkollektive ermittelt und bei der Lebensdauerberechnung berücksichtigt. Diese Betrachtungen beziehen sich jedoch nicht auf eine einzelne Einheit, sondern auf die Gesamtheit aller zu betrachtenden.

Unter Berücksichtigung der individuellen Umgebungs- und Betriebsbedingungen könnte ein multiples Modell mit der Zielgröße Restlebensdauer eine bessere Vorhersage über das Ausfallrisiko jeder einzelnen betrachteten Einheit liefern und somit die Instandhaltungsstrategie für diese Einheit verbessern.

In der Evolution von Diagnosesystemen ist nach der Erkennung des aktuellen Betriebszustands eines Pumpensystems die Restlebensdauerprognose der nächste Schritt. Für den

Betreiber bietet diese zusätzliche Funktion einen wesentlichen Mehrwert durch die Steigerung der Verfügbarkeit und den Schlüssel zu signifikanten Kosteneinsparungen.

3.3 Bisherige Arbeiten der ReMain-Projektpartner

Die Projektpartner verfügen in ihren jeweiligen Kompetenzbereichen über führende Expertise und hohes Renommee. Alle Verbundpartner teilen Grundvorstellungen, die den Wandel in der Instandhaltung – bedingt durch die zunehmende Automatisierung und fortschreitende Globalisierung – beschreiben, und insbesondere das Ziel, geeignete Verfahren für die Vorhersage der Restlebensdauer zu entwickeln. Die Verbundpartner verbindet eine hohe Kompetenz und Innovationskraft im jeweiligen Fachgebiet sowie in einigen Fällen bereits positive Kooperationserfahrungen.

KSB

Die KSB AG ist der größte deutsche und ein international führender Pumpenhersteller. Der Markterfolg der KSB-Produkte basiert zu einem großen Teil auf der unternehmenseigenen Forschung und Entwicklung. Schwerpunkte liegen in der permanenten Weiterentwicklung und Automation der Pumpen- und Armaturentechnik zur Reduzierung der Lebenszykluskosten. Durch einen bestimmungsgemäßen Betrieb der Pumpe werden diese gesenkt. Auf die Pumpe abgestimmte Steuerungen und Drehzahlregelsysteme minimieren den Energieverbrauch der Anlage. Eine Diagnose des Pumpenzustands weist auf einen nicht bestimmungsgemäßen Betrieb der Pumpe hin und ist Voraussetzung zur Senkung von Reparatur- und Produktionsausfallkosten. Um diese innovativen Lösungen auf den Markt zu bringen, wurde seit 2001 die Kapazität der Entwicklungsabteilung Automation mehr als verdoppelt und der Vertrieb und der Service mit Automatisierungsexperten verstärkt. Die Integration der Automatisierung ist für KSB eine strategische Entscheidung, die durch eine Erhöhung des Kundennutzens eine Differenzierung gegenüber Pumpen aus Niedriglohnländern ermöglicht und somit die deutschen Fertigungsstandorte sichert.

Neben der Betriebserfahrung der bereits verkauften Diagnosesysteme ist der Online-Zugang zu etwa 15 Pumpen verschiedener Betreiber ein wichtiger Projektbeitrag, da die archivierten Daten einen längeren Zeitraum abdecken. Die eigene Serviceorganisation stellt Instandhaltungserfahrungen von Pumpensystemen vieler Betreiber zur Verfügung.

Firma	KSB
Anschrift	KSB AG Johann-Klein-Straße 9 67227 Frankenthal

Qualifikation für das ReMain-Projekt	KSB ist ein international führender Hersteller von Pumpen und verfügt über Ergebnisse aus zehn Jahren Forschung und Entwicklung von Pumpendiagnose. Seit 2003 vermarktet KSB als erster Pumpenhersteller ein Diagnosesystem für Kreiselpumpen und bringt somit wertvolle Praxiserfahrung mit ein.
Problemlage	Untersuchungen bei KSB und an verschiedenen Hochschulen zeigen, dass für eine einzelne Pumpe a posteriori aus der Zustandsveränderung auf die Restlebensdauer geschlossen werden kann. Aufgrund der komplexen physikalischen Vorgänge in einer Kreiselpumpe sowie der hohen konstruktiven Varianz kann die Restlebensdauer einer Pumpe bisher nicht a priori vorhergesagt werden. Voraussetzung für einen Erkenntnisgewinn ist eine homogene Datenbasis von einer großen Anzahl von Pumpen.
Zielstellung	Die im Projekt zu erarbeitenden generellen, herstellerübergreifenden Strategien zur Restlebensdauerprognose sollen anschließend im Rahmen einer konkreten Produktentwicklung auf KSB-Baureihen abgestimmt werden und in die KSB-Automationsprodukte integriert werden.
Arbeitsschwerpunkte	<p>Entwicklung, Validierung und Optimierung von Modellen zur Restlebensdauerprognose relevanter Pumpenbauteile auf der Basis geeigneter Merkmale:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Untersuchung und Auswahl signifikanter Merkmale • Entwicklung einer Diagnosestrategie zur Restlebensdauerschätzung • Entwurf, Validierung und Optimierung von Modellen (Umsetzung der Strategie) anhand systematisch erfasster Messdaten und Informationen aus Praxis und Prüfstandversuchen • Kombination der Modelle zu einem Verfahren

Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML

Das Fraunhofer IML verbindet langjährige Erfahrung aus Forschungs- und Industrieprojekten im Themenfeld Instandhaltung mit Kompetenz im Themenfeld Modellbildung und Simulation. Im ReMain-Projekt wird das IML dieses Wissen in die Restlebensdauerprognose und dessen Modellbildung zur Ausfallzeitvorhersage einfließen lassen. Die Einführung der Ergebnisse in die betriebliche Praxis wird an dieser Stelle ebenfalls begleitet. Das IML nutzt seine Mitgliedschaft im Forum Vision Instandhaltung (FVI) e.V., um bei der zielgerichteten Bearbeitung der Arbeitspakete das Wissen und die Erfahrung der Industriemitglieder des FVI zu verwenden.

Institut	Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML
Anschrift	Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2-4 44227 Dortmund
Qualifikation für das ReMain-Projekt	<ul style="list-style-type: none"> • Erfahrungen aus Industrie- und Forschungsprojekten auf den Themengebieten Diagnose- und Wissensmanagementsysteme • Entwicklung von Gestaltungsmodulen für das Anlagenmanagement und prozessorientierte Optimierung von Konzepten, Strategien, Methoden und Techni-

	ken für die Instandhaltung
Problemlage	<p>Es ist Aufgabe der Instandhaltung, eine hohe Anlagenverfügbarkeit und - funktionsfähigkeit zu gewährleisten. Durch geeignete Maßnahmen sollen bei gleichzeitiger Senkung der Instandhaltungs- und Ausfallkosten ungeplante Stillstände weitgehend vermieden und geplante Stillstandszeiten minimiert werden.</p> <p>Der zentrale Ansatzpunkt, um diesen Anforderungen gerecht zu werden, ist die Auswahl einer geeigneten Instandhaltungsstrategie. Während bei der periodisch vorbeugenden Instandhaltung der Austausch kritischer Anlagenteile i.d.R. zu früh erfolgt, reagiert die ausfallorientierte Instandhaltung oft zu spät.</p> <p>Hier ergibt sich ein Nutzengewinn durch Realisierung einer Instandhaltungsstrategie, die sich am aktuellen Zustand einer Anlage und am tatsächlichen Abbau des Abnutzungsvorrates orientiert.</p>
Zielstellung	<ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung eines Verfahrens zur Ermittlung des tatsächlichen Zustands einer Anlage und zur zuverlässigen Prognose des Ausfallzeitpunkts unter variablen Betriebsbedingungen • Ableitung eines Konzepts zur ganzheitlichen Strategieplanung und Optimierung der Instandhaltungsprozesse unter Aspekten der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit
Arbeitsschwerpunkte	<ul style="list-style-type: none"> • Unterstützung bei der Konzeption der Systematik zur Klassifizierung der Pumpensysteme sowie Durchführung der Umfrage und Auswertung der Fragebögen zur Bestimmung des Versuchsumfangs und zur Identifikation der untersuchungsrelevanten Versuchsmaschinen • Zusammenstellung von Verfahren und Merkmalen zur Zustandsdiagnose und Restlebensdauerprognose und Erarbeitung zielführender Diagnosestrategien • Versuchsplanung und -betreuung sowie Entwicklung und Optimierung des Verfahrens zur Restlebensdauerprognose • Unterstützung bei der Umsetzung eines Diagnosesystems als Applikation des Prozessinformationsmanagementsystems • Übertragung der Ergebnisse auf Instandhaltungsprozesse zur Realisierung einer proaktiven Instandhaltung

Infracor

Infracor ist einer der größten unabhängigen Instandhalter in Deutschland und der Standortbetreiber des Chemieparks in Marl. Das Geschäftsgebiet Technik der Infracor bedeutet umfassenden Technik-Service aus einer Hand, vom Einzelangebot bis zur Komplettdienstleistung. Der Service umfasst sowohl die Tätigkeiten im Rahmen der laufenden Instandhaltung als auch die zuverlässige und schnelle Behebung unerwarteter Störungen in Betriebsabläufen. Neben der Wartung, Inspektion, Instandsetzung, Montage, Materialwirtschaft sowie Optimierung von Anlagen und Produktionskomponenten übernimmt die Infracor Technik auch die planmäßige Revision von Anlagen. Außerdem betreut Infracor die übergreifende IT-Infrastruktur. Dies ist eine wichtige Voraussetzung zur effizienten Erreichung des Projektziels.

Im Chemiepark Marl werden rund 15.000 Pumpen – überwiegend Kreiselpumpen – eingesetzt. Die Instandhaltung dieser Pumpen übernimmt weitgehend die Infracor Technik. Hierdurch hat sich im Laufe der Jahrzehnte ein großes Know-how zu einer herstellerunabhängigen Pumpeninstandhaltung gebildet (Schadensbilder, Schadensursachen, Schadens-/ Pumpenhistorien). Auf dieses Wissen kann im Rahmen des Projekts zurückgegriffen werden.

Firma	Infracor
Anschrift	Infracor GmbH Paul-Baumann-Str. 1 45772 Marl
Qualifikation für das ReMain-Projekt	Zentraler Instandhalter am Standort und zuständig für ca. 15.000 Pumpen bzw. Anwendungen.
Problemlage	Die zustandsorientierte Instandhaltung ist, aufgrund der am Markt verfügbaren Systeme, stark verbesserungsbedürftig.
Zielstellung	Optimierung der Instandhaltungskosten und Reduzierung der Stillstands-/ Ausfallzeiten durch Pumpendefekte.
Arbeitsschwerpunkte	<ul style="list-style-type: none"> • Auswahl und Bereitstellung von repräsentativen Versuchspumpen unter Realbedingungen • Bewertung und Klassifizierung der Pumpen und deren Einsatzbedingungen • Datenerfassung der Pumpensysteme und deren Verarbeitung in technischen Großanlagen • Messen der erarbeiteten Lösung im praktischen Betrieb • Ableitung der Instandhaltungsstrategie aus den Restlebensdauerinformationen

Evonik Stockhausen GmbH

Schwerpunkt des Geschäftsbereichs ist die Herstellung und der Vertrieb von Superabsorbent. Superabsorber sind wasserunlösliche, vernetzte Polymere, die große Mengen wässriger Flüssigkeiten aufnehmen und speichern. Das Anwendungsgebiet umfasst die Hygieneindustrie, z. B. Babywindeln, Hygienebinden und Adult Care-Artikel. Am ReMain-Projekt wird sich der Standort Marl, an dem das Monomer Acrylsäure produziert wird, beteiligen.

Firma	Evonik Stockhausen
Anschrift	Evonik Stockhausen GmbH Bäkerpfad 25 47805 Krefeld
Qualifikation für das ReMain-Projekt	Betreiber und Instandhalter von 300 Kreiselpumpen, strategischer Partner des Standortdienstleisters Infracor (u. a. Einführung und Umsetzung innovativer Instandhaltungsstrategien).

Problemlage	Weiterentwicklung der zustandsorientierten Instandhaltung als ein Baustein zur optimalen Instandhaltungsstrategie.
Zielstellung	Reduzierung der Instandhaltungskosten und Erhöhung der Anlagenverfügbarkeit durch Minimierung von Pumpenausfällen.
Arbeitsschwerpunkte	<p>Die Evonik Stockhausen GmbH betreibt rund 300 Kreiselpumpen im Chemiepark Marl. Die Infrastruktur des Standorts wird von der Infracor GmbH betrieben. Als Standortbetreiber und Serviceprovider für die chemische Industrie bietet Infracor alle Leistungen, die zum Planen, Errichten und Betreiben der chemischen Anlagensysteme im Chemiepark erforderlich sind.</p> <p>Aufgrund der strategischen Zusammenarbeit der beiden Projektpartner wird sich die Evonik Stockhausen GmbH vom Standpunkt des Pumpenbetreibers auf die bereits im Rahmen der Firmendarstellung der Infracor GmbH beschriebenen Arbeitsschwerpunkte konzentrieren.</p>

**Technische Universität Kaiserslautern,
Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen**

Der Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen (SAM) der TU Kaiserslautern verfügt über die Erfahrung aus mehr als zehn Jahren Forschung auf dem Gebiet der Pumpendiagnose und besetzt mit dieser einzigartigen Kompetenz die Schnittstelle zwischen Pumpen, Sensorik und Analyseverfahren. Begleitend zum Betrieb der Versuchsmaschinen bei der Evonik Stockhausen GmbH werden ausgewählte Schäden an vergleichbaren Pumpen gezielt simuliert. Hierzu bietet der Lehrstuhl moderne Prüfstände mit automatisiertem Betrieb und Datenerfassung.

Institut	Technische Universität Kaiserslautern, Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen (SAM)
Anschrift	TU Kaiserslautern Lehrstuhl für Strömungsmechanik und Strömungsmaschinen Gottlieb-Daimler-Straße 67663 Kaiserslautern
Qualifikation für das ReMain-Projekt	<ul style="list-style-type: none"> • Langjährige wissenschaftliche Forschungen auf dem Gebiet der Diagnose und Störungsfrüherkennung an Strömungsmaschinen • Entwicklung von Verfahren zur Erkennung von nicht bestimmungsgemäßem Betrieb • Erfahrung auf verschiedenen Gebieten der Strömungsmaschinen durch langjährige enge Zusammenarbeit mit der Industrie (Hersteller, Betreiber und Instandhalter)
Problemlage	<ul style="list-style-type: none"> • Der Stand der Wissenschaft und Technik lässt nur die Kenntnis von nicht bestimmungsgemäßem Betrieb bzw. Erkennen von geschädigten Bauteilen zu • Die vollständige Instrumentierung der ausfallkritischen Komponenten einer Pumpe ist zwar möglich, jedoch zu teuer und die Signalverarbeitung zu aufwändig

	dig
Zielstellung	<ul style="list-style-type: none"> • Ausweitung des bisher möglichen Umfangs eines Diagnosesystems für zustandsorientierte Wartung und Restlebensdauerabschätzung • Erstellung von Modellen, die Aussagen über Ausfallwahrscheinlichkeiten im aktuellen Betriebszustand ermöglichen • Auffinden von Korrelationen zwischen Ausfallursachen und Betriebsweisen • Erreichen eines höchstmöglichen Grades an Übertragbarkeit auf andere Kreisel-pumpen bei unterschiedlichen, diversifizierten Betriebsweisen
Arbeitsschwerpunkte	<ul style="list-style-type: none"> • Auswahl der zu untersuchenden Maschinen als repräsentative Datenlieferanten • Begleitende Prüfstandversuche zur Sensor- und Merkmalsauswahl • Prüfstandversuche zur Modellgenerierung unter Laborbedingungen • Mitarbeit bei der Modellbildung und Extrapolation von Merkmalen mit hinreichender Korrelation aus den im Feldversuch generierten Daten

Q-DAS

Q-DAS ist ein international tätiges Softwarehaus, das sich mit der rechnergestützten Erfassung, Visualisierung, Überwachung, Auswertung und Darstellung von fertigungsrelevanten Qualitätsinformationen beschäftigt. Mit den Produktfamilien qs-STAT und procella bietet Q-DAS anerkannte Softwaretools in mittlerweile 18 Landessprachen an, die sich durch eine hohe Flexibilität und die Unterstützung marktgängiger Richtlinien, Standards und Normen auszeichnen. Die Produkte sind mit ca. 50.000 Installationen bei über 5.000 Kunden weltweit im Einsatz. Q-DAS bringt Methoden der Datenanalyse aus der Statistik, künstlicher Intelligenz und Erfahrung aus der Analyse großer Datenmengen in anderen Applikationen ein. Die Fähigkeit eines Prozesses ist eine statistische Analogie zur Restlebensdauerprognose.

Firma	Q-DAS
Anschrift	Q-DAS GmbH & Co. KG Eisleber Str. 2 69469 Weinheim
Produkte	<p>Q-DAS Produkte unterstützen die kontinuierliche Beobachtung und Bewertung von Qualitätsinformationen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Datenerfassung: Einheitliche Schnittstelle über Q-DAS Datenformate zur Datenerfassung • Visualisierung Fertigungs- und zeitnahe Überwachung der Qualitätsdaten mit Q-DAS Monitoring • Datenverwaltung: Zentrale Verwaltung der Prüfdaten mit Q-DAS Datenbankmanagementprodukten • Datenauswertung: Automatische Auswertungen der Qualitätsinformationen mit qs-STAT (basierend auf Normen und Richtlinien werden vergleichbare Kennzahlen generiert, die Ergebnisse werden in qs-STAT mit aussagekräftigen Grafiken und Be-

	<p>richten visualisiert)</p> <ul style="list-style-type: none"> • Berichtswesen: Frei definierbare Berichte mit dem Formulardesigner; individuell einstellbares Berichtswesen mit dem Reporting System • Archivierung: Verdichtung der Urwerte zu definierten Kennzahlen, die Langzeitbetrachtungen der erfassten Prozesse ermöglichen
Qualifikation für das ReMain-Projekt	<ul style="list-style-type: none"> • Methoden der Datenanalyse aus der Statistik • Erfahrung mit der Analyse großer Datenmengen • Statistische Verfahren zur Lebensdauerberechnung
Problemlage	<p>Lebensdauerberechnungen basieren zurzeit auf Ausfall- bzw. Überlebensdaten. Zustandsinformationen, die den aktuellen Abnutzungsgrad eines Systems widerspiegeln, gehen in die Berechnungen nicht ein.</p>
Zielstellung	<p>Mit der Einbeziehung der individuellen Zustandsdaten eines Teiles sollen Prognosewerte für die Restlebensdauer eines Bauteils bzw. Systems ermittelt werden, die auch den aktuellen Verschleiß und die Betriebsbedingungen eines Systems berücksichtigen.</p>
Arbeitsschwerpunkte	<ul style="list-style-type: none"> • Identifizieren der relevanten Ausfallursachen und Festlegung der repräsentativen Merkmale zur Bestimmung der Lebensdauerprognose der Bauteile • Aufbau der Infrastruktur zur Datenerfassung • Durchführung der Lebensdauerberechnung auf Bauteilebene • Entwicklung und Optimierung eines Modells zur Prognose der Restlebensdauer für Gesamtsysteme • Umsetzung in ein übertragbares Verfahren zur Instandhaltungsoptimierung

i-for-T

Die i-for-T GmbH ist ein Tochterunternehmen der ifm electronic GmbH. Die Kernkompetenzen sind Schwingungssensorik, digitales Signalprocessing und Softwareentwicklung für die Maschinendiagnose. Die i-for-T GmbH schließt eine wichtige Lücke im Segment der Instandhaltungsstrategien. Speziell der Bereich Condition Monitoring gewinnt zunehmend an Bedeutung in der Instandhaltungswelt.

Die i-for-T GmbH bietet einen einzigartigen, intelligenten Schwingungsaufnehmer mit integrierter Vorverarbeitung, der Voraussetzung für eine kostengünstige Realisierung der Aufgabenstellung ist. Hohe Kompetenz in allen Sensorsystemen sowie eine sehr breite Erfahrung aus dem Einsatz von Sensoren in unterschiedlichen Applikationen ermöglichen eine optimale Auswahl von Sensoren und das Definieren von signifikanten Merkmalen mit hohem Informationsgehalt aus den Sensorsignalen.

Firma	i-for-T
--------------	----------------

Anschrift	i-for-T GmbH Georg-Aicher-Str. 1 83026 Rosenheim
Produkte	octavis ® und efector octavis ® Produktplattform RTM Cockpit ®: Middleware zur Integration der Diagnoseergebnisse in SAP/PM und zur automatischen zustandsorientierten Instandhaltungsplanung in SAP/PM
Qualifikation für das ReMain-Projekt	<ul style="list-style-type: none"> • Technologische Kernkompetenzen im Bereich Sensorik, digitales Signalprocessing und Schwingungsanalyse für die Maschinendiagnose • Erfahrungen bezüglich der Interaktion von Hardware- und Softwarekomponenten im Bereich der Schwingungsanalyse (patentierter octavis-Technologie) mittels einer eigens generierten und branchenübergreifend einsetzbaren modularen Soft- und Hardwarearchitektur
Problemlage	<ul style="list-style-type: none"> • Derzeit nur sichere Erkennung von Schädigungsmerkmalen möglich (z. B. Lagerschaden). Es fehlt eine zuverlässige und differenzierbare Restlebensdauerangabe für Pumpen unter Berücksichtigung aktueller Betriebsparameter • Komplizierte Ankopplung von Sensorlösungen an Maschinensteuerungen bzw. Bussysteme sowie fehlende einheitliche Kommunikation zwischen erforderlichen Sensoren • Aufwändige Aufbereitung, Auswertung und Weiterverarbeitung der Informationen für die Anbindung an IPS-, ERP- und PPS-Systeme
Zielstellung	<ul style="list-style-type: none"> • Ermittlung eines funktionellen Zusammenhangs zwischen Betriebsparameter und Standzeit der Pumpe (Mean Time Between Failures-Abschätzung) • Differenzierung verschiedener Schadensmerkmale sowie deren Einfluss auf die Standzeit • Verknüpfung von Diagnosemerkmalen und Betriebsparametern zu einer Restlebensdauerschätzung (vergleichbar mit der Tankanzeige im Auto)
Arbeitsschwerpunkte	<ul style="list-style-type: none"> • Anpassung der eigenen modularen Diagnoseplattform octavis an die Erfordernisse der Pumpendiagnose • Anpassung der Abhängigkeiten der Diagnosemerkmale an Betriebsparameter (z. B. Druck, Temperatur etc.) • Inbetriebnahme der Diagnosemesstechnik zu dem Zweck der Datenermittlung unter realen Bedingungen • Permanente Erfassung der Merkmale sowie gegebenenfalls Anpassung der Messtechnik im Rahmen der Versuchsbegleitung

Siemens, Sektor Industry

Der Siemens-Sektor Industry ist der weltweit führende Anbieter von umweltfreundlicher Produktions-, Transport-, Gebäude- und Lichttechnik. Mit durchgängigen Automatisierungstechnologien und umfassenden Branchenlösungen steigert Siemens die Produktivität, Effizienz und Flexibilität seiner Kunden aus Industrie und Infrastruktur. Der Sektor besteht aus den sechs Divisionen Building Technologies, Drive Technologies, Industry Automation, Industry Solutions, Mobility und Osram (<http://www.siemens.de/industry>).

Die Division Industry Automation ist der weltweit führende Anbieter von Automatisierungs- und Messtechnik.

Siemens legt seit jeher großen Wert auf Innovationen; derzeit werden über 5 % des Umsatzes in F&E investiert.

Zur Diagnose von Pumpen bietet Siemens sowohl die geeignete Messtechnik als auch im Rahmen seines Leitsystems passende Diagnosesoftware. Hiermit können nicht bestimmungsgemäße Betriebszustände von Pumpen erkannt und in der Folge vermieden werden.

Firma	Siemens
Anschrift	Siemens AG Sektor Industry Chemical Industries Siemensallee 84 76187 Karlsruhe
Qualifikation für das ReMain-Projekt	Siemens ist international führender Hersteller von Automatisierungs- und Messtechnik.
Problemlage	Siemens bietet im Rahmen seines Leitsystems Software zur Überwachung von Pumpen an. Der naheliegende Anwenderwunsch nach einer Restlebensdauerprognose kann jedoch bisher nicht erfüllt werden. Durch die breite Datenbasis des Projekts wird ein Fortschritt in diese Richtung erwartet.
Zielstellung	Die im Projekt zu erarbeitenden Erkenntnisse zur Restlebensdauerprognose sollen anschließend in die o.g. Software zur Überwachung von Pumpen eingearbeitet werden.
Arbeitsschwerpunkte	Unterstützung des Projekts durch geeignete Mess- und Steuertechnik.

Erweiterter ReMain-Arbeitskreis

Der erweiterte Arbeitskreis (EAK) übernimmt die Funktion des Lenkungsausschusses, der bei relevanten Entscheidungen die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Anwendungen sicherstellt. Neben großen deutschen Chemieherstellern sind exemplarisch auch weitere Branchen vertreten, die Pumpen in Primärprozessen betreiben (z. B. die Stahlindustrie, Zuckerindustrie, Papierindustrie sowie kommunale Wasserversorger und Abwasserentsorger). Alle diese Firmen betreiben auch Pumpen in Sekundärprozessen, bspw. Heizung und Kühlung von Gebäuden und Prozessen und Kühlschmiermittelversorgung von Produktionsmaschinen. Sie stehen daher auch stellvertretend für die große Anzahl von Betreibern anderer Branchen, wie der Automobilhersteller mit Pumpen in Lackieranlagen, Kühlschmiermittelversorgung sowie Wärme und Kältekreisläufen.



Abb. 6: Mitglieder des erweiterten ReMain-Arbeitskreises

4. Projektplanung und Projektüberblick

Die Arbeiten im ReMain-Projekt unterteilen sich in drei Projektabschnitte (vgl. Abb. 7), welche im Folgenden beschrieben werden.

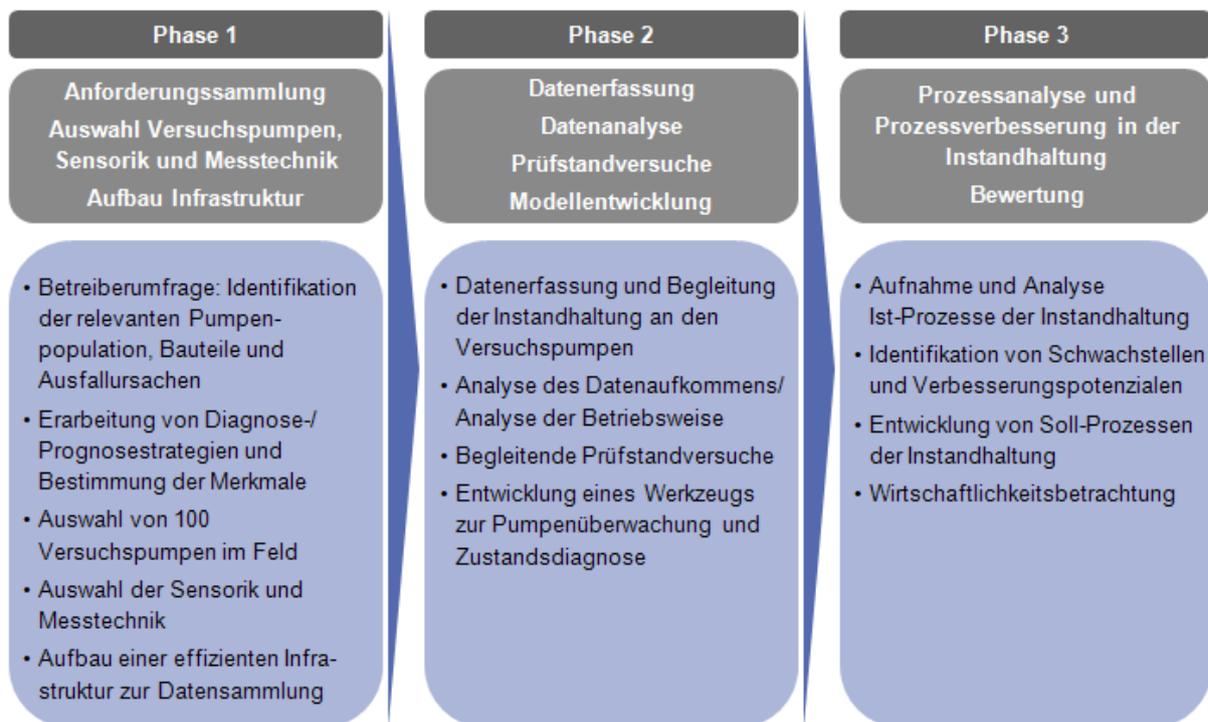


Abb. 7: ReMain im Überblick

Phase 1: Anforderungssammlung/ Auswahl Versuchspumpen, Sensorik und Messtechnik/ Aufbau Infrastruktur

Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung der Ziele des ReMain-Projekts ist eine fundierte Anforderungssammlung. Um ein praxistaugliches Verfahren zur Zustandsdiagnose und Restlebensdauerprognose entwickeln zu können, müssen sowohl die Anforderungen der Betreiber und Instandhalter als auch die Anforderungen, die aus den Produktions- und Instandhaltungsprozessen resultieren, ermittelt werden. Gleichzeitig muss die Ist-Situation der in verfahrenstechnischen Anlagen verbauten Pumpentypen bekannt sein und es müssen die ausfallkritischen Bauteile und relevanten Ausfallursachen und Schadensmechanismen identifiziert werden. Mit einer branchenübergreifenden, repräsentativen Umfrage wurden zu Beginn des Projekts diese erforderlichen Informationen zusammengetragen.

Auf Basis der Ergebnisse der Umfrage wurden in der Produktionsanlage (Acrylsäureanlage) des Projektpartners Evonik Stockhausen 100 Kreiselpumpen im Chemiepark Marl für die Feldversuche ausgewählt. Die Analyse der Schadensmechanismen führte zu einer Auswahl an Messgrößen und Merkmalen, die im Betrieb einer Pumpe mittels geeigneter Technologien erfasst werden müssen, um eine Zustandsdiagnose und Restlebensdauerprognose über alle relevanten Ausfallursachen zu ermöglichen. Dementsprechend wurden die für die Feldversuche ausgewählten Pumpen derart instrumentiert, dass ein umfangreicher Datenpool (Messgrößen und Merkmale) für die Umsetzung der im Projekt erarbeiteten Diagnose- und Prognoseansätze erwartet werden konnte.

Phase 2: Datenerfassung/ Datenanalyse/ Prüfstandversuche/ Modellentwicklung

In der zweiten Projektphase wurden für die ausgewählten Pumpen in Feldversuchen unter realen Betriebsbedingungen Daten erhoben. Dazu gehören sowohl die kontinuierliche Erfassung der Messgrößen der an den Pumpen installierten Sensorik und Messtechnik als auch die Informationen, die aus den werktäglichen Wartungs- und Inspektionsrundgängen resultieren. Alle Messgrößen, Daten und Informationen wurden für die Datenanalyse auf zwei projekteigenen Servern archiviert.

Im Rahmen der Datenanalyse wurde das gesamte Datenaufkommen hinsichtlich erkennbarer Auffälligkeiten untersucht, über die sich anbahnende Störungen oder Ausfälle im Vorfeld feststellen lassen. Insbesondere die Daten zwischen den Ausfällen der Versuchspumpen wurden einer detaillierten Betrachtung unterworfen. Zudem wurde eine Matlab-Applikation programmiert, um die Betriebsweise der Versuchspumpen näher zu untersuchen. Diese zielt auf die Charakterisierung typischer und untypischer Betriebsweisen z. B. hinsichtlich Laufzeiten, Fördergrade, Kavitationsgefährdung und deren Auswirkungen auf das Schwingungsver-

halten der Maschinen ab. Parallel wurden in Prüfstandversuchen schädigende Betriebszustände simuliert, um deren Einfluss auf das Ausfallverhalten der Pumpen zu ermitteln.

Weiterhin wurde als Anwendung des Prozessinformationsmanagementsystems der Acrylsäureanlage (Versuchsanlage) ein Werkzeug zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose entwickelt. Mit diesem Werkzeug wurde eine Möglichkeit geschaffen, die Versuchspumpen über das Prozessinformationsmanagementsystem mit den im Feld erzeugten Messdaten zu überwachen und auf Abweichungen vom Soll-Betrieb (Herstellerangaben) aufmerksam zu werden.

Phase 3: Prozessanalyse und Prozessverbesserung in der Instandhaltung/ Bewertung

In der dritten Projektphase erfolgte eine Abstimmung der Instandhaltungsprozesse auf das entwickelte Werkzeug zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose und eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit. Zu diesem Zweck wurde zunächst die Ist-Situation der Instandhaltung aufgenommen und in einem Prozesskettenplan visualisiert. Auf Basis dieser transparenten Darstellungsweise der Instandhaltungsprozesse und zugehörigen Informations- und Materialflüsse wurden Potenziale für eine verbesserte Prozessgestaltung der Instandhaltung erarbeitet, die in einem entsprechenden Soll-Prozesskettenplan dokumentiert wurden.

Darüber hinaus wurde ein Tool entwickelt, mit dem unterschiedliche Szenarien für die Instandhaltung über einen Kosten-Nutzen-Vergleich hinsichtlich ihrer Einsparmöglichkeiten bewertet werden können. So kann ermittelt werden, für welche Instandhaltungsszenarien und unter welchen Voraussetzungen sich eine Investition in entsprechende Messtechnik lohnt, um das entwickelte Werkzeug zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose umzusetzen.

5. Projektdurchführung

5.1 Betreiberumfrage zur Bestimmung des Versuchsumfangs

Für die Festlegung des Versuchsumfangs wurde zu Beginn des Projekts eine Betreiberumfrage durchgeführt. Mit Unterstützung des erweiterten Arbeitskreises³ und zwei Projektpartnern wurde auf diesem Weg herstellerübergreifend die Pumpenpopulation mit Betriebsbedingungen, ausfallkritischen Bauteilen und Hauptausfallursachen ermittelt. Diese Daten

³ Siehe Abb. 6: Mitglieder des erweiterten ReMain-Arbeitskreises

sind repräsentativ für die in Deutschland betriebenen Pumpensysteme und wurden nach ihrer hydraulischen und mechanischen Ausführung systematisch erfasst.

5.1.1 Systematik des Fragebogens

Für die Umfrage wurde ein Fragebogen⁴ erstellt, der sich in drei Bereiche gliederte. Im ersten Teil des Fragebogens wurde die Ist-Situation bei den Betreibern hinsichtlich der Population eingesetzter Kreiselpumpen abgefragt. Hier wurden Informationen bestimmter Konstruktionsmerkmale erhoben, die sich auf den Pumpentyp, die Bauart, Dichtungsart, Antriebsart und die Größenbezeichnung der Hydraulik erstrecken. Der zweite Teil des Fragenkatalogs wurde von den befragten Unternehmen des erweiterten Arbeitskreises repräsentativ für drei ausgewählte Pumpentypen beantwortet und umfasst u. a. Informationen über die individuellen Einsatzbedingungen in der Anlage, Inspektions- und Wartungsintervalle und Redundanzen. Weiterhin konnten für die Untersuchungen relevante Schadensursachen und ausfallgefährdete Bauteile identifiziert werden. Abschließend wurden im dritten Teil bereits vorhandene Überwachungseinrichtungen abgefragt und das Anforderungsprofil der Betreiber an Diagnoseverfahren zusammengestellt.

Zusätzlich zu den Fragebogeninhalten konnten die Betreiber anonymisierte Rohdaten, betreffend die Pumpenpopulation, Instandhaltungsdaten und Ausfallhistorien, für die Datenerhebung zur Verfügung stellen. Diese Rohdaten wurden auf Grundlage der Fragebogensystematik klassifiziert. Die Auswertung der Fragebogeninhalte erfolgte frageweise mit den jeweils zur Verfügung stehenden Daten.

5.1.2 Ergebnisse der Betreiberumfrage

Die Auswertung der Betreiberumfrage und die Verschriftlichung der Ergebnisse als Grundlage für die weitere Projektarbeit erfolgten im April 2007. Informationen zum Rücklauf der Befragung können dem Anhang 2: Rücklauf der Befragung entnommen werden. Im Dezember 2007 wurden die Ergebnisse der Betreiberumfrage aktualisiert, da zusätzliche Daten von einem Mitglied des erweiterten Arbeitskreises zur Verfügung gestellt wurden. Diese aktualisierten Ergebnisse sind im Anhang 3: Aktualisierte Ergebnisse der Betreiberumfrage abgebildet.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der im April 2007 vorgenommenen Auswertung vorgestellt.

⁴ Siehe Anhang 1: Fragebogen der Betreiberumfrage

5.1.2.1 Teil 1: Pumpenpopulationen

Im ersten Teil des Fragebogens wurde die Population eingesetzter Kreiselpumpen hinsichtlich folgender Merkmale analysiert:

Teil 1: Pumpenpopulationen	
Themengebiete:	
	Erfassung der Pumpentypen hinsichtlich
1.1	Bauart, Dichtungsart, Antriebsart
1.2	Bau- bzw. Hydraulikgröße

Frage 1.1: Welche Pumpentypen sind in Ihrem Unternehmen im Einsatz?

Für die Auswertung der Frage 1.1 nach den in den Produktions- und Prozessanlagen verbauten Pumpentypen wurden die Angaben von insgesamt 9 der befragten Unternehmen berücksichtigt. Aus der Zusammenfassung der Informationen ergab sich eine Datenbasis von 22.324 Pumpen. Diese Grundgesamtheit wurde in einem ersten Schritt analysiert nach Pumpentyp, Bauart und Dichtungsart.

Pumpentypen:

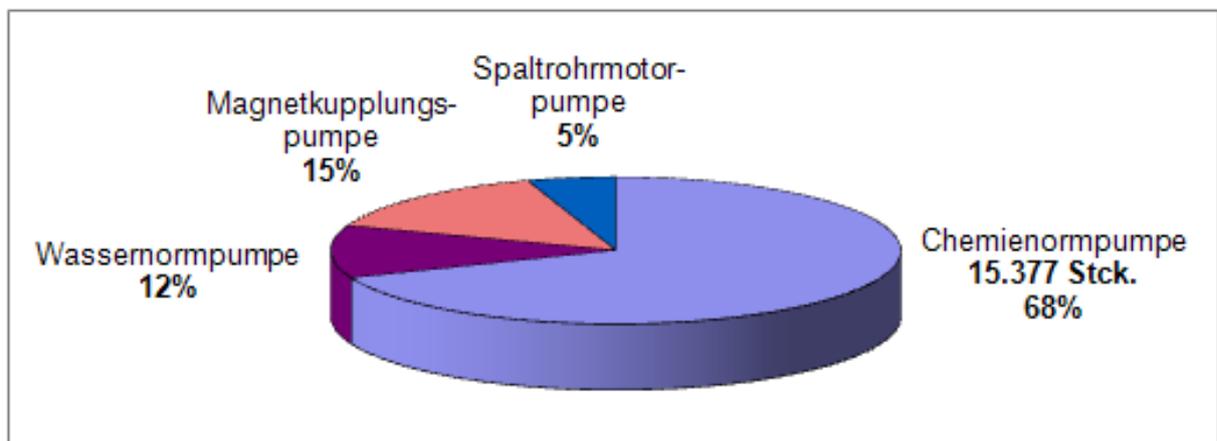


Abb. 8: Betreiberumfrage, Frage 1.1: Pumpentypen

Den größten Anteil der mit Frage 1.1 erfassten Pumpentypen nehmen Chemienormpumpen ein. Bei einer Gesamtheit von 22.324 Pumpen wurden 15.377 Chemienormpumpen erfasst.

Bauarten und Dichtungsarten:

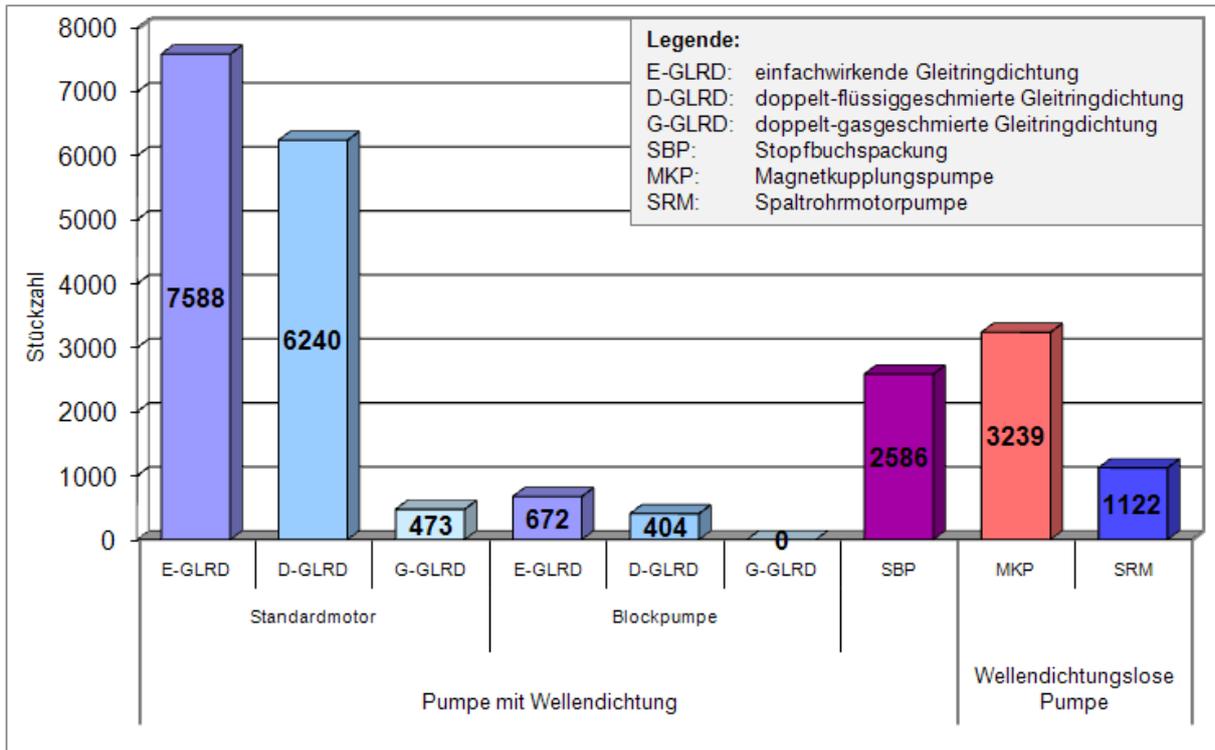


Abb. 9: Betreiberumfrage, Frage 1.1: Bauarten und Dichtungsarten

Den größten Teil der Chemienormpumpen macht die Bauart mit dynamischen Wellendichtungen aus. Es kommen fast ausschließlich Gleitringdichtungen zum Einsatz: Von den insgesamt 15.377 Chemienormpumpen sind 8.260 Pumpen mit einfachwirkenden und 7.117 mit doppeltwirkenden Gleitringdichtungen ausgestattet. Bei letzteren überwiegt der Anteil der flüssigkeitgeschmierten Gleitringdichtungen (6.644 Pumpen), gasgeschmierte Gleitringdichtungen finden bisher nur geringfügig Verwendung (473 Pumpen).

Antriebsarten:

Für die Auswertung der Frage 1.1 nach den Antriebsarten der verbauten Pumpentypen wurden die Angaben von insgesamt 10 der befragten Unternehmen berücksichtigt. Hier ergab sich eine Datenbasis von 23.452 Pumpen.

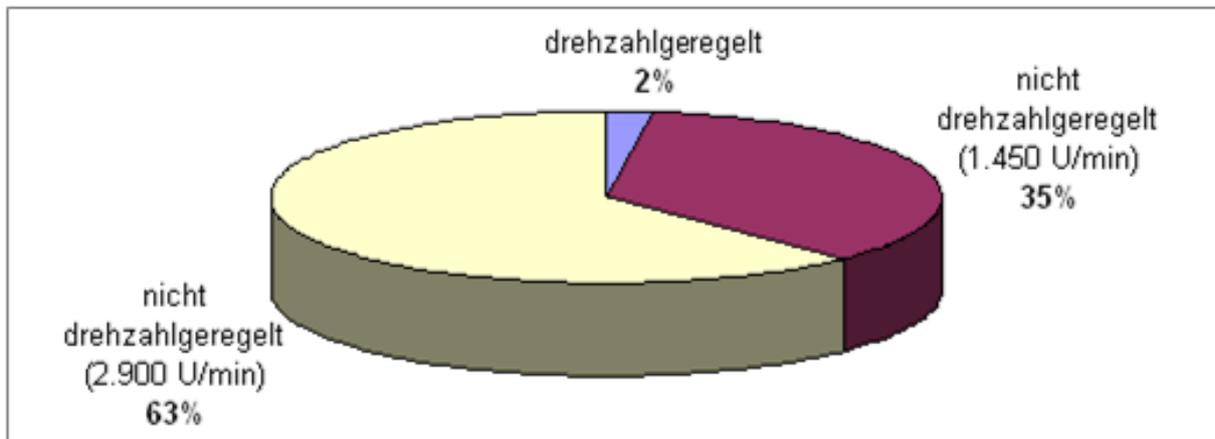


Abb. 10: Betreiberumfrage, Frage 1.1: Antriebsarten

Hinsichtlich der Antriebsarten dominieren die Ausführungen mit Standard IEC Normmotor und Wellenkupplung deutlich. Drehzahlregelte Pumpen sind aktuell nur wenig verbreitet (2 %). Kreiselpumpen mit einer Drehzahl von 2.900 U/min überwiegen (63 %).

Frage 1.2: Dimensionen Ihrer Pumpen: Hydraulik-Größen

Für die Erfassung der Hydraulik- bzw. Baugrößen in Frage 1.2 wurden die Angaben von insgesamt 11 der befragten Unternehmen berücksichtigt. Aus der Zusammenfassung der Informationen ergab sich für die Auswertung eine Datenbasis von 29.121 Pumpen. Diese Datenbasis wurde in Hinblick auf Pumpentyp und Hydraulikgröße untersucht.

Pumpentypen und Hydraulikgrößen:

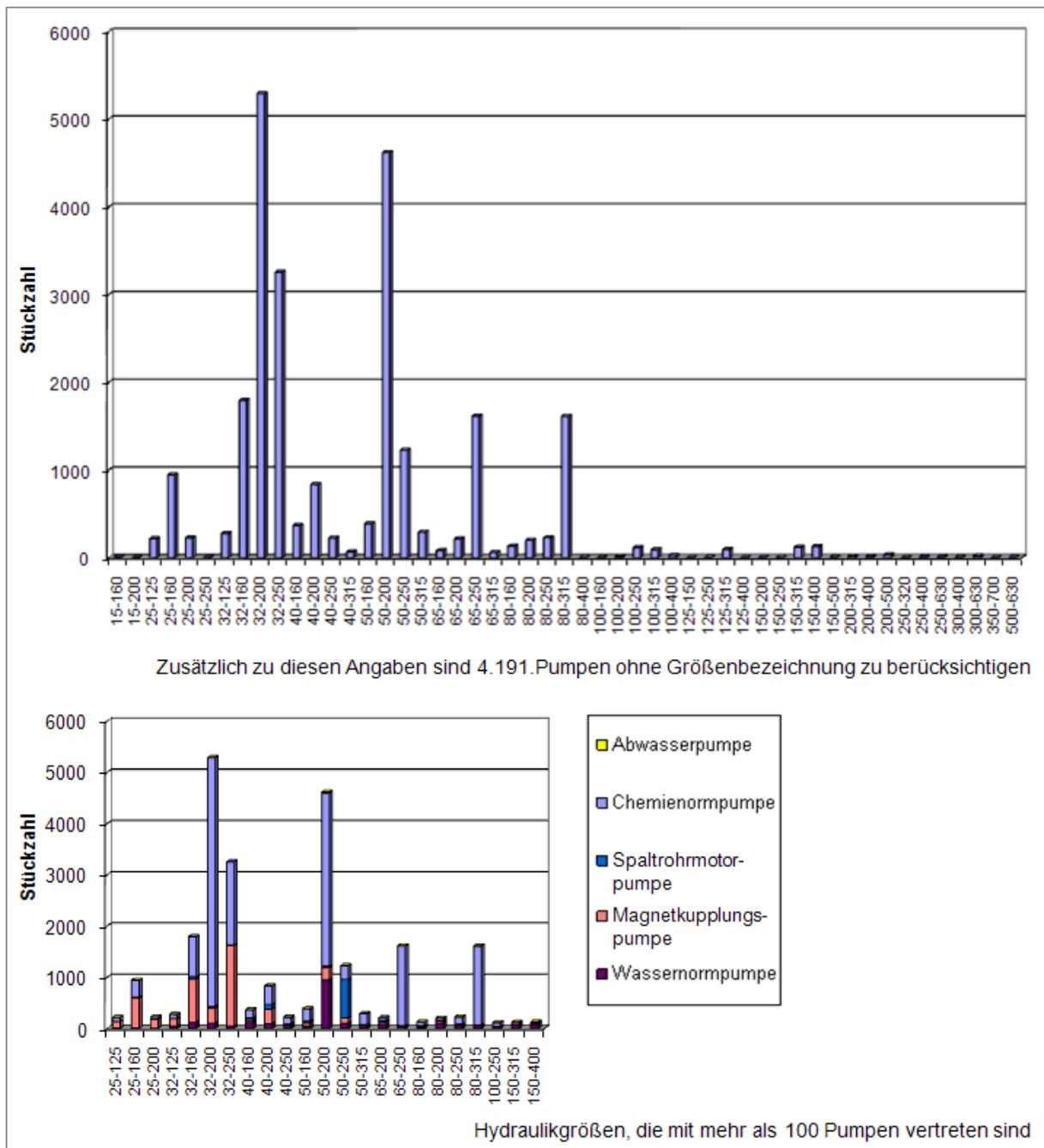


Abb. 11: Betreiberumfrage, Frage 1.2: Größenverteilung der Pumpentypen

Die Verteilung der Baugröße entspricht den Ergebnissen von anderen Untersuchungen: Kleine Nennweiten sind – insbesondere in der Chemiebranche und damit in Hinblick auf Chemienormpumpen – stärker repräsentiert. Bei einer Gesamtheit von 29.121 Pumpen sind insgesamt 5.291 Pumpen mit einer Größe von 32-200 stark verbreitet, es folgen die Baugrößen

ßen 50-200 mit einer Anzahl von 4.618 und 32-250 mit einer Anzahl von 3.256. Damit wird annähernd die Hälfte der erhobenen Pumpenpopulation mit diesen Hydraulikgrößen erfasst.

Zwischenergebnis Teil 1

Die am häufigsten eingesetzten Pumpen sind Chemienormpumpen mit einfach- und doppeltwirkenden (doppelt-flüssig) Gleitringdichtungen. Pumpen kleiner Baugrößen werden am häufigsten eingesetzt (32-200, 32-250, 50-200). Das Antriebskonzept sieht die Ausführung mit Standard IEC Normmotor und Wellenkupplung vor. Hierbei ist in der Regel keine Drehzahlregelung vorgesehen: Pumpen mit einem Antrieb von 2900 U/min überwiegen.

5.1.2.2 Teil 2: Schadensursachen

Im zweiten Teil des Fragebogens wurden für jeweils drei ausgewählte Pumpen Informationen zu folgenden Themengebieten abgefragt:

Teil 2: Schadensursachen	
Themengebiete:	
2.1	Inspektion und Wartung
2.2	Betriebsart
2.3	Fördermedium
2.4	Betriebsweise
2.5	Redundanz
2.6	Inspektions- und Wartungsintervalle
2.7	MTTR und MTBF
2.8	Prozessausfallzeiten
2.9	Schadensursachen/ Schwachstellen

Frage 2.1: Angaben zum Inspektions- und Wartungsprozess

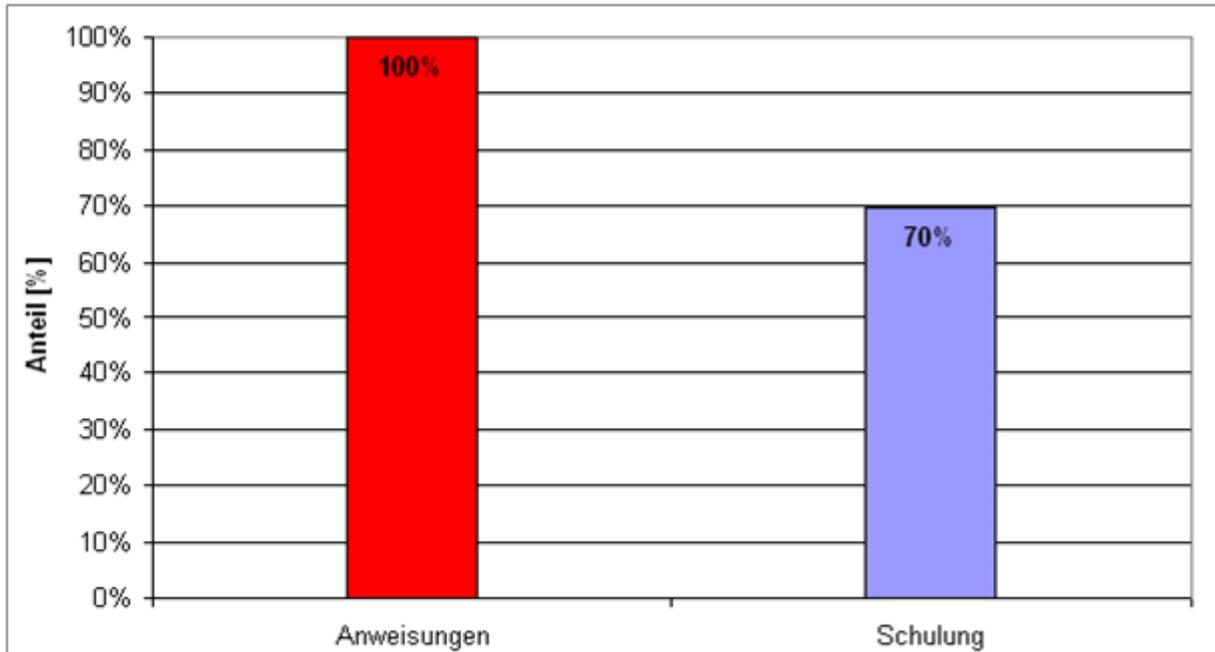


Abb. 12: Betreiberumfrage, Frage 2.1: Angaben zum Inspektions- und Wartungsprozess

Die ausgewählten Pumpen sind durch Betriebsanweisungen und interne Schulungen für Wartung und Inspektion bei dem verantwortlichen Betriebspersonal gut bekannt.

Bei allen Befragten liegen Betriebsvorschriften und Arbeitsanweisungen vor, in denen Zeitpunkt und Umfang der Kontroll- und Pflegearbeiten festgelegt sind. Dabei werden die erforderlichen Instandhaltungstätigkeiten zu 100 % selbst durchgeführt; eine Vergabe der Instandhaltung an externe Dienstleister findet nicht statt. In 70 % der Fälle werden das Instandhaltungs- und Bedienungspersonal in der Aufgabe der Wartung und Inspektion separat geschult.

Frage 2.2: Wie betreiben Sie die Pumpe vorwiegend und wie häufig wird sie eingeschaltet?

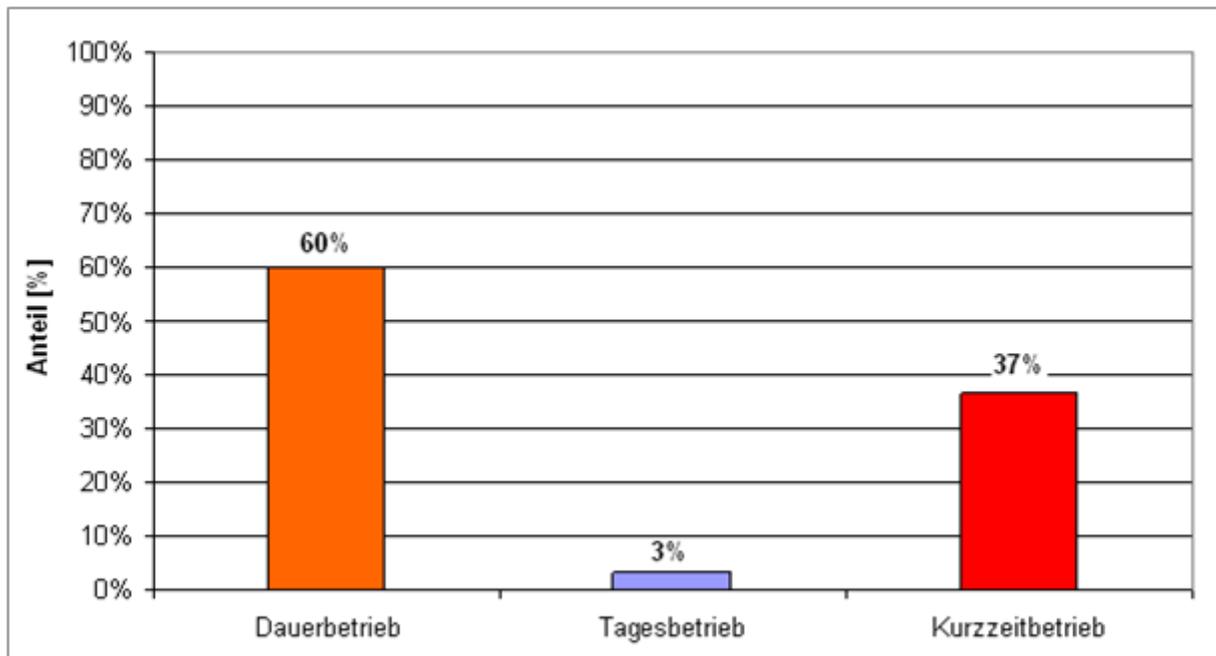


Abb. 13: Betreiberumfrage, Frage 2.2: Angaben zur Betriebsart

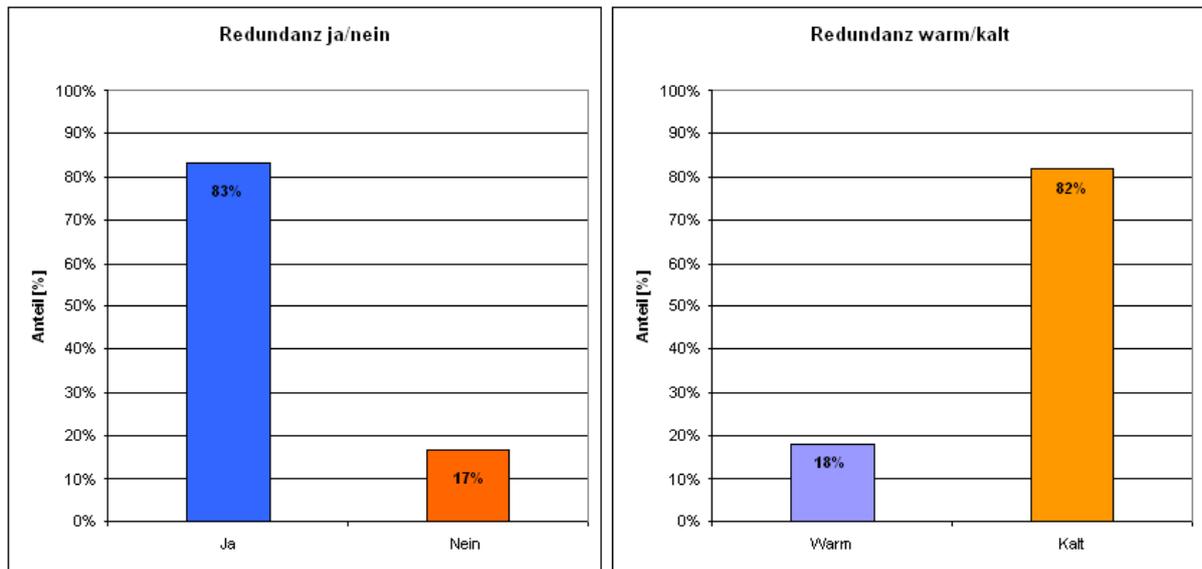
Die ausgewählten Pumpen sind überwiegend Dauerläufer (60 %).

Frage 2.3: Angaben zum Fördermedium

Zu den Fördermedien (im Fragebogen chemische Formel und Konzentration, Betriebstemperatur und Viskosität) konnten nur wenige Unternehmen eine Aussage machen. Begründet wurde dies damit, dass insbesondere in der Chemiebranche und Verfahrenstechnik mit dem gleichen Pumpentyp eine Vielzahl unterschiedlicher Medien gefördert wird. Auch eine diskontinuierliche Betriebsweise (d. h. Veränderungen während eines Batchprozesses) kann für eine Variation des Fördermediums verantwortlich sein.

Frage 2.4: Angaben zur Betriebsweise der Pumpen

Der Betriebspunkt (hydraulischer Fördergrad) ist in der Regel ebenfalls nicht bekannt.

Frage 2.5: Sind die Pumpen redundant ausgelegt?

Abb. 14: Betreiberumfrage, Frage 2.5: Angaben zur Redundanz

In den meisten Betrieben sind Pumpensysteme redundant ausgeführt (83 %), um Produktionsausfälle durch Anlagenstillstände zu vermeiden und die resultierenden Kostenfaktoren zu reduzieren. Die warme Redundanz (hot standby) wird nur dort eingesetzt, wo der Prozess unbedingt eine kontinuierliche Förderung verlangt. Als kalte Redundanz (82 %) kommen Sekundärpumpen nur bei Ausfall der Primärpumpe zum Einsatz.

Frage 2.6: Angaben zu Inspektions- und Wartungsintervallen: Wie hoch sind die Intervalle?

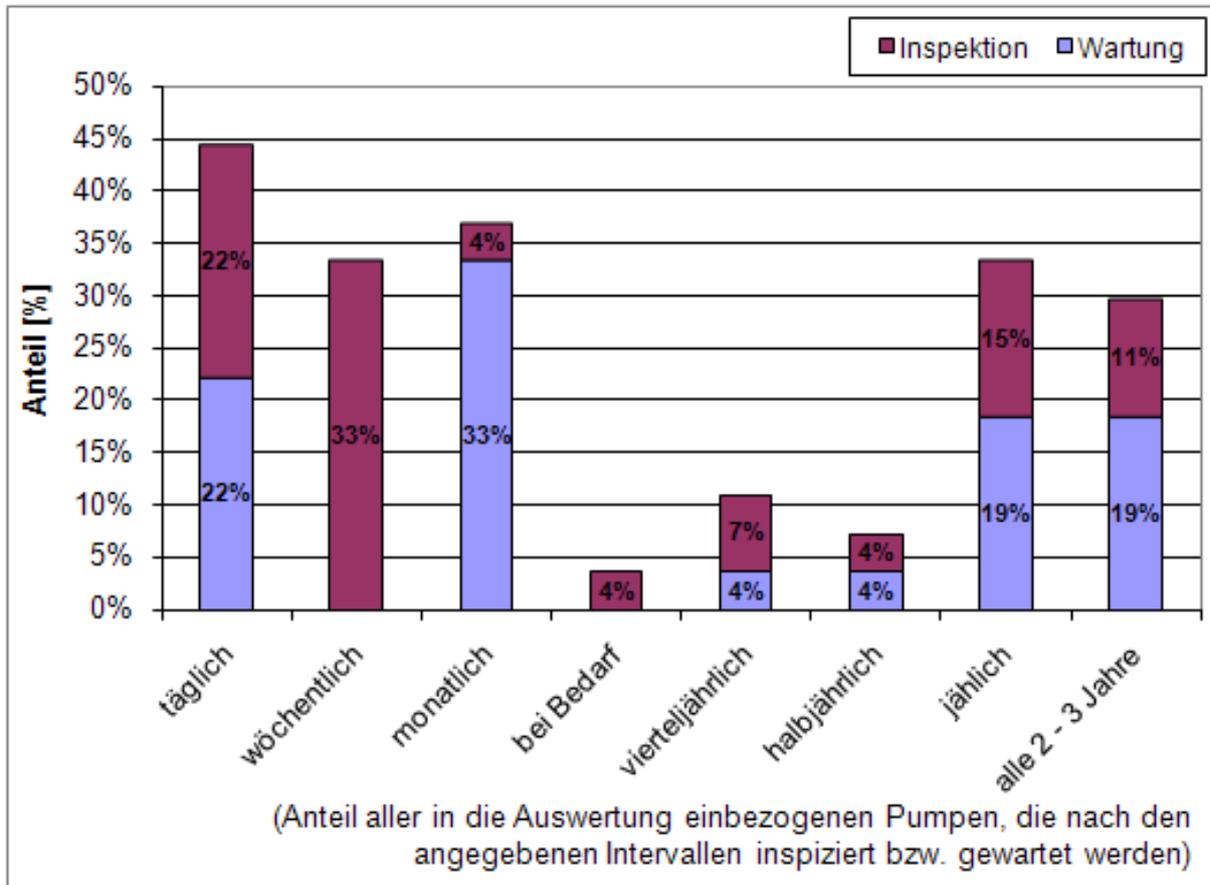


Abb. 15: Betreiberumfrage, Frage 2.6: Angaben zu Inspektions- und Wartungsintervallen

Durch Wartungs- und Inspektionstätigkeiten in regelmäßigen Intervallen ist das Verhalten der Pumpen bekannt. Inspektionen erfolgen in der Regel wöchentlich durch das Betriebspersonal vor Ort. Wartungstätigkeiten erfolgen überwiegend monatlich. Ein befragtes Unternehmen gab an, die Inspektions- und Wartungsintervalle in Abhängigkeit der vorherrschenden Betriebsbedingungen und des jeweiligen Pumpentyps anzupassen. Ein anderes gab an, die vom Hersteller empfohlenen Inspektions- und Wartungsintervalle zu übernehmen und ins SAP/PM-System zu übertragen.

Frage 2.7: Angaben zu MTTR und MTBF

Firmenübergreifend liegen die Angaben für MTTR (mittlere Instandsetzungszeit) und MTBF (durchschnittlicher Ausfallabstand) eng beieinander. Durch Zusammenfassung der Angaben konnten folgende Durchschnittswerte berechnet werden:

- MTTR = 19* Stunden

- MTBF = 11.000* Stunden.

[* Bei der Berechnung der Durchschnittswerte wurden die repräsentativen Angaben berücksichtigt.]

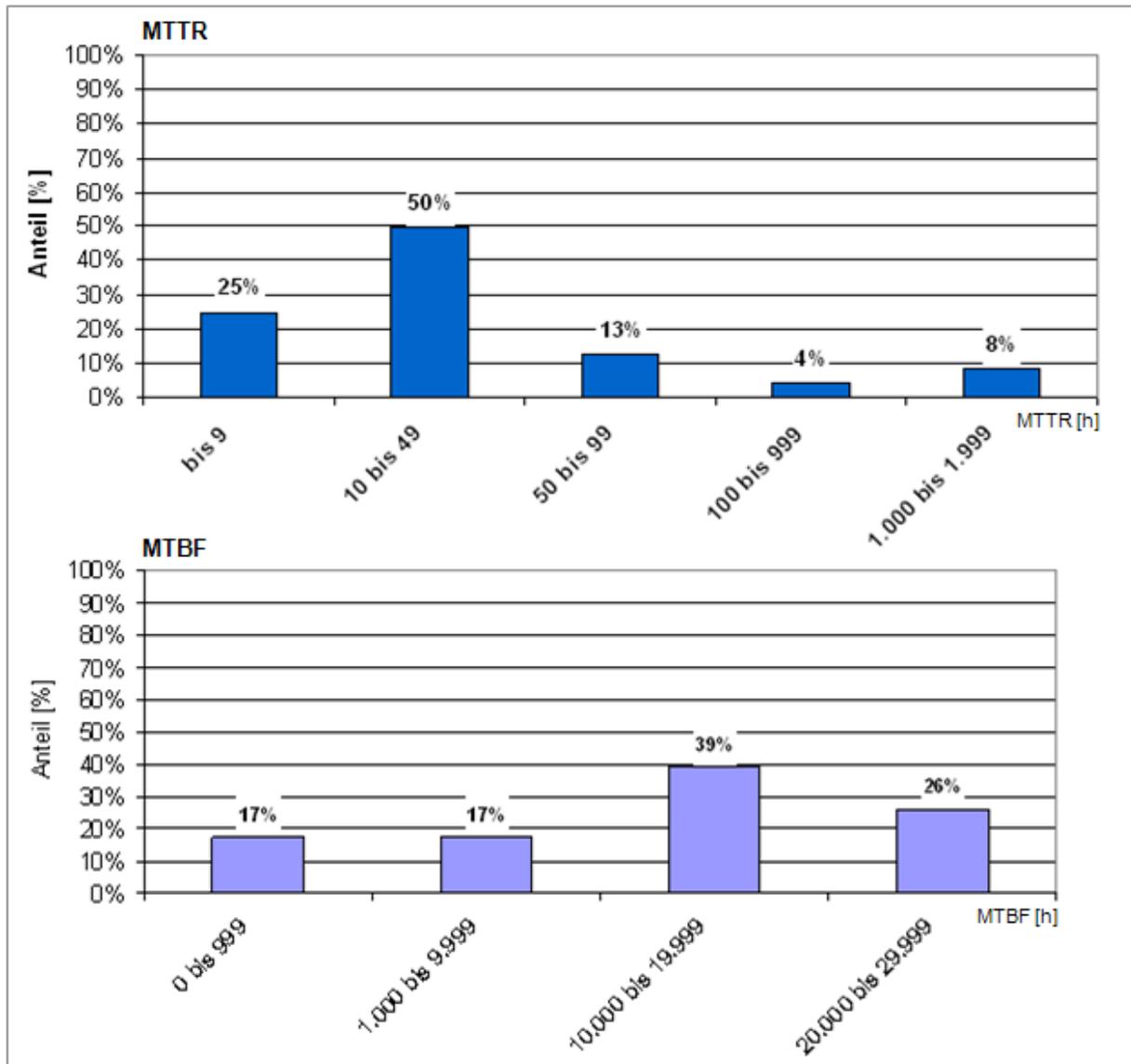


Abb. 16: Betreiberumfrage, Frage 2.7: Angaben zu MTTR und MTBF

Frage 2.8: Wie hoch sind die mittleren Prozessausfallzeiten?

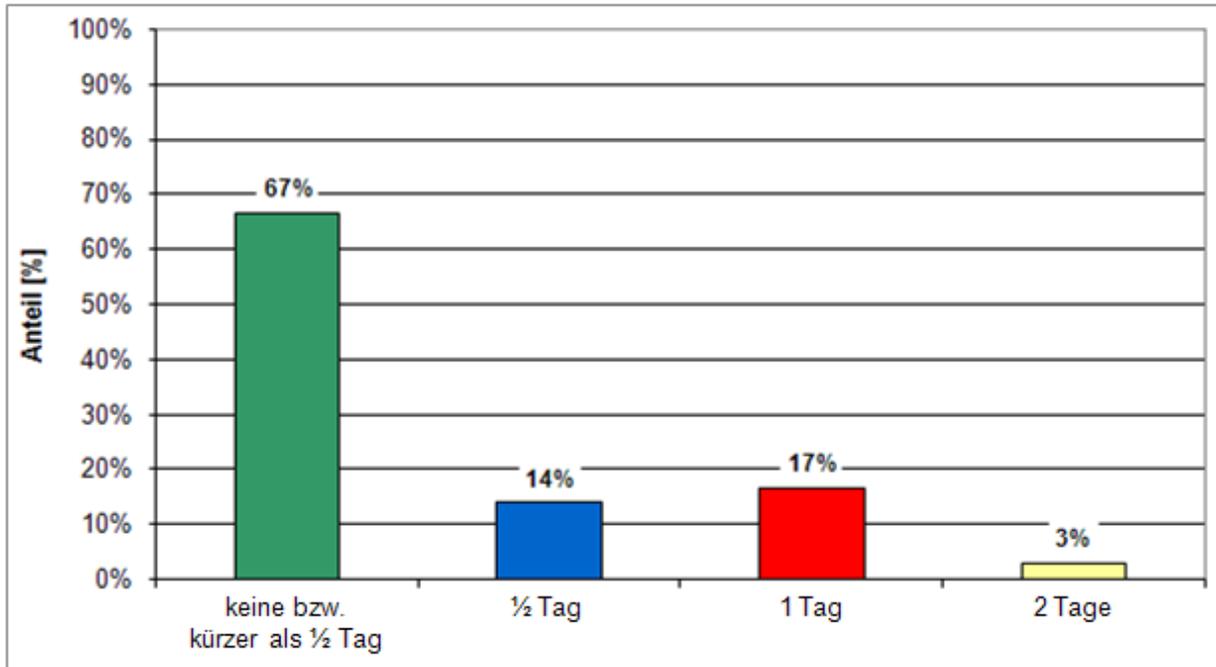


Abb. 17: Betreiberumfrage, Frage 2.8: Angaben zu Prozessausfallzeiten

Durch Redundanzen und optimierte Instandsetzungsprozesse folgt bei Aggregatausfall in der Regel nur ein kurzer bzw. kein (gemäß der Sitzung mit dem erweiterten Arbeitskreis vom 23.01.2007 ist die Angabe „keine Angabe“ gleichbedeutend mit der Angabe „keine Prozessausfallzeiten“) Stillstand der Gesamtanlage. Zu 67 % betragen die Prozessausfallzeiten bei Ausfall einer Pumpe weniger als einen halben Tag.

Frage 2.9: Wie häufig stellen Sie die genannten Schadensursachen/Schwachstellen an Ihren Pumpen fest?

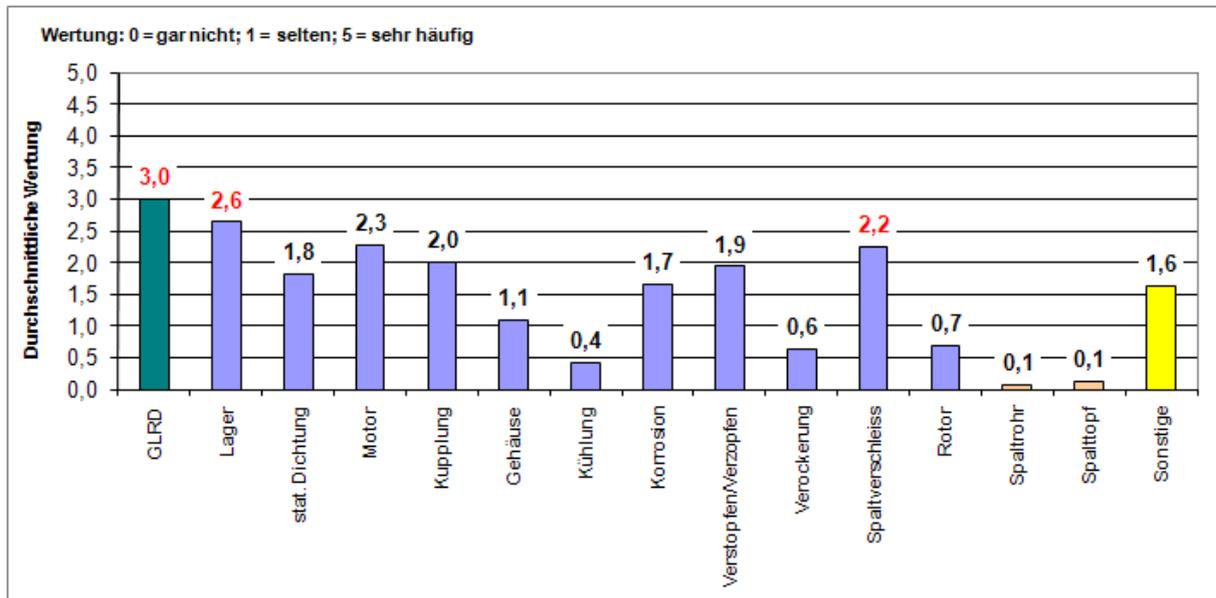


Abb. 18: Betreiberumfrage, Frage 2.9: Angaben zu Schadensursachen und Schwachstellen

Von den Befragten wurde die Gleitringdichtung als relevantes ausfallkritisches Bauteil benannt. Dies führt durch den hohen Anteil der Chemienormpumpen zu einer besonders hohen Gewichtung. Als weitere ausfallrelevante Bauteile konnten das Lager (Wälzlager) und der Dichtspalt identifiziert werden.

Motorschäden (überwiegend Lager- und Wicklungsschäden) treten bei Pumpensystemen um ca. eine Größenordnung seltener auf als Schäden an der Pumpe. Die Schädigungsmechanismen der Motorlager stimmen mit denen der Pumpenlager weitgehend überein und werden daher durch die Betrachtung der Pumpenlager abgedeckt. Wicklungsschäden werden bei modernen Motoren durch die Auslegung und mit Absicherung des Maximalstroms vergleichsweise selten beobachtet. In Einvernehmen mit dem erweiterten Arbeitskreis (Sitzung vom 23.01.2007) wurde der Motor nicht gesondert behandelt.

Zwischenergebnis Teil 2

Als häufigstes ausfallrelevantes Bauteil konnte mit der Expertenbefragung die Gleitringdichtung identifiziert werden. Die bei einer Pumpe mit Gleitringdichtung möglichen hydraulischen und mechanischen Schadensursachen decken 98 % der Nennungen ab. Das Lager (Wälzlager) und der Verschleiß des Dichtspalts als weitere ausfallkritische Bauteile sind unabhängig vom Pumpentyp.

Die Wartung und Inspektion der Pumpensysteme wird bei allen Befragten durch das Betriebspersonal durchgeführt. Es liegen Betriebsvorschriften vor, in denen der Zeitpunkt und der Umfang der Wartungs- und Inspektionsaufgaben festgelegt sind. Dabei sind die Intervalle für die Kontroll- und Pflegearbeiten nicht zwingend fix, sondern variieren in Abhängigkeit der einzelnen Pumpentypen und der vorherrschenden Betriebsbedingungen. Daraus lässt sich ableiten, dass das Verhalten der ausgewählten Pumpen in der Regel gut bekannt ist.

Ausfallkritische Pumpensysteme sind vielfach redundant ausgeführt. Durch die doppelten Systeme und die oben beschriebenen optimierten Instandhaltungsprozesse folgt bei Ausfall der Primärpumpe nur ein kurzer Stillstand der Gesamtanlage.

Zu den Fördermedien konnten nur wenige Unternehmen eine Aussage machen, da insbesondere in der Chemiebranche und Verfahrenstechnik mit dem gleichen Pumpentyp eine Vielzahl unterschiedlicher Medien gefördert wird. Zudem ist zu berücksichtigen, dass die zu fördernden Produkte und Mischungen per Definition stark variieren, was zu einem nicht bestimmungsgemäßen Betrieb führen kann.

5.1.2.3 Teil 3: Diagnosesysteme und Instrumentierung

Im dritten Teil des Fragebogens wurden abschließend folgende Themengebiete abgefragt:

Teil 3: Diagnosesysteme und Instrumentierung	
Themengebiete:	
3.1	Nutzen von Diagnosesystemen
3.2	Vorhandene Überwachungssysteme
3.3	Bauteile und Ausfallursachen

Frage 3.1: Welchen Nutzen erwarten Sie von einem Überwachungssystem an Pumpen, das von Ihrem Lieferanten angeboten wird?

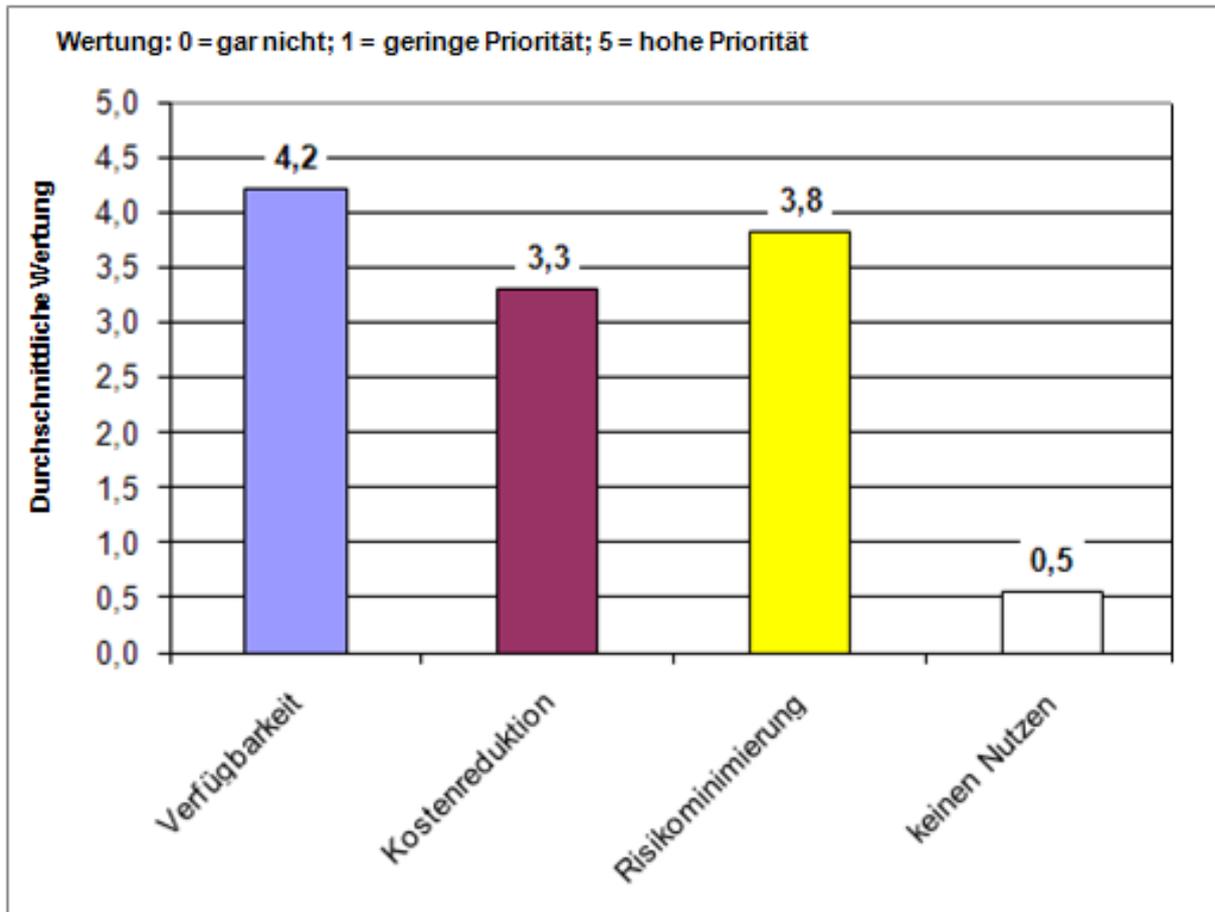


Abb. 19: Betreiberumfrage, Frage 3.1: Angaben zum Nutzen von Überwachungssystemen

Die höchste Priorität hat für die Befragten die Erhöhung der technischen Verfügbarkeit durch ein Überwachungssystem.

Frage 3.2: Wurden Ihre Pumpen mit folgenden Überwachungseinrichtungen versehen?

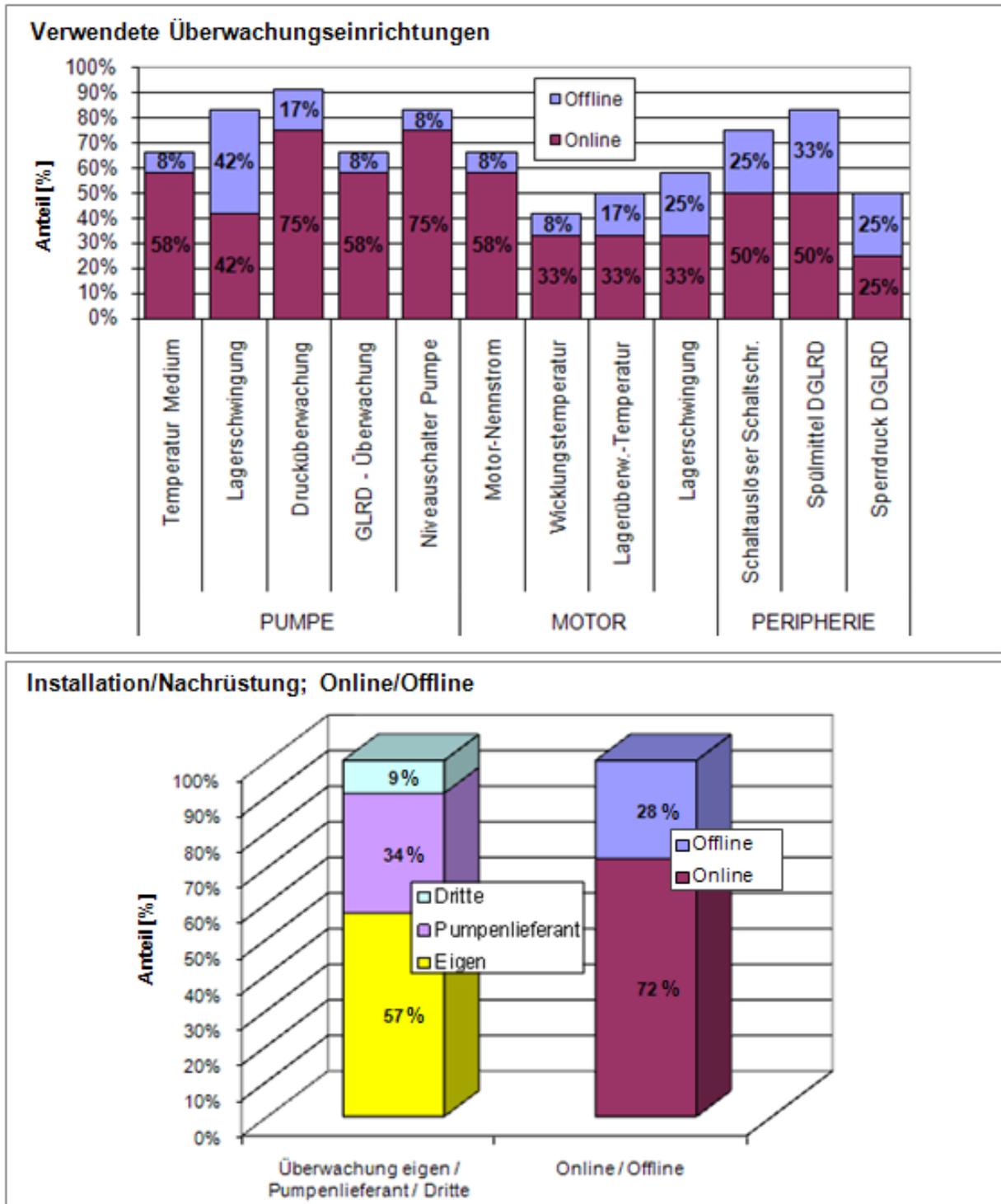


Abb. 20: Betreiberumfrage, Frage 3.2: Angaben zu vorhandenen Überwachungssystemen

Für Pumpen werden im Betrieb viele unterschiedliche, auf einzelne Bauteile spezialisierte Überwachungstechniken verwendet. Die Installation und das Nachrüsten der Überwa-

chungseinrichtungen übernimmt zumeist der Pumpenbetreiber selbst (57 %). Die Messwertaufnahme erfolgt zu 72 % online.

Frage 3.3.1: Für wie wichtig erachten Sie die Überwachung der folgenden Bauteile an Ihren Pumpen?

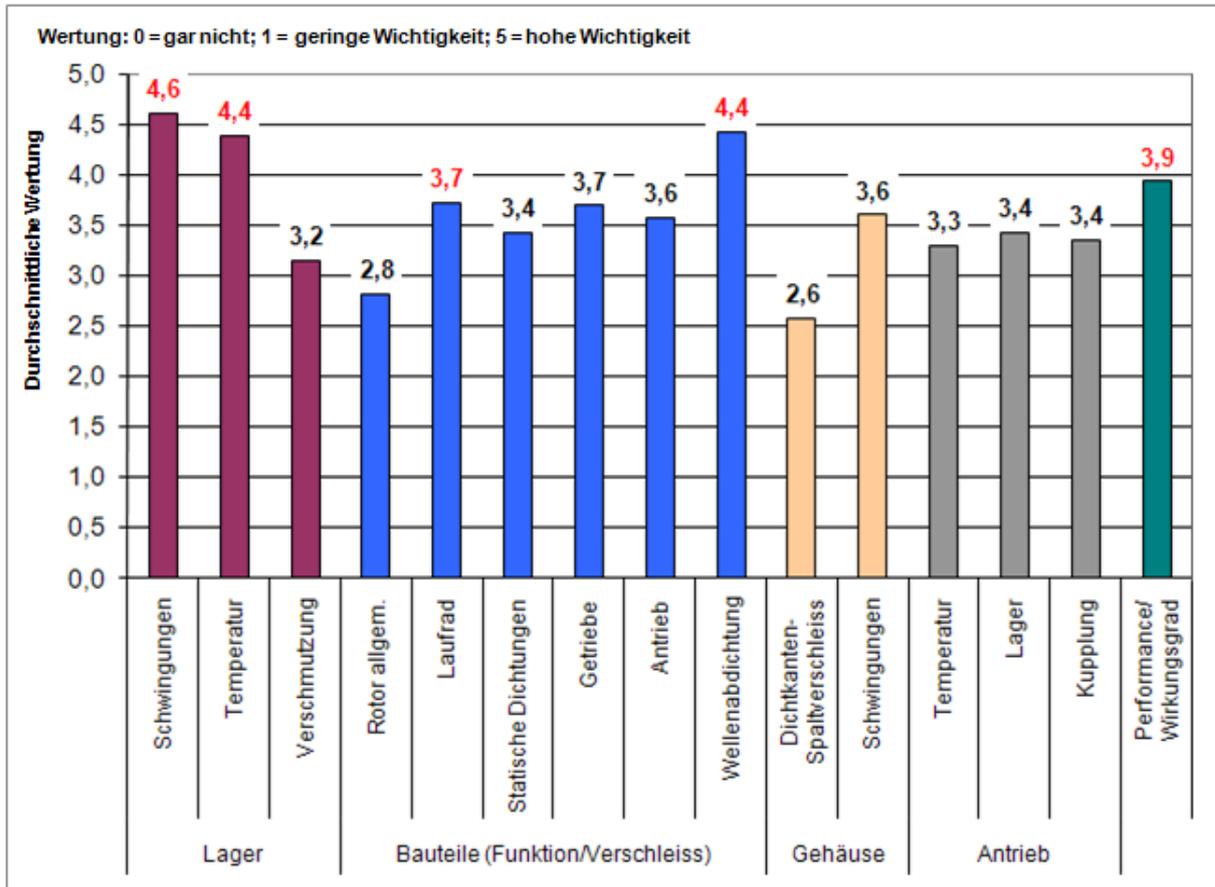


Abb. 21: Betreiberumfrage, Frage 3.3.1: Angaben zur überwachungsrelevanten Bauteilen

Hinsichtlich der Bauteile einer Pumpe wurde von den befragten Unternehmen die Überwachung folgender Kriterien als wichtig erachtet:

Von besonderer Relevanz ist zum einen die Überwachung des Lagers (hier insbesondere die Schwingungen und die Temperatur), zum anderen die Überwachung der Wellenabdichtung. Weiterhin werden Verfahren zur Zustandsüberwachung für das Laufrad und den Wirkungsgrad (insbesondere bei größeren Maschinen) als wichtig erachtet.

Frage 3.3.2: Für wie wichtig erachten Sie die Überwachung der folgenden Ausfallursachen an Ihren Pumpen?

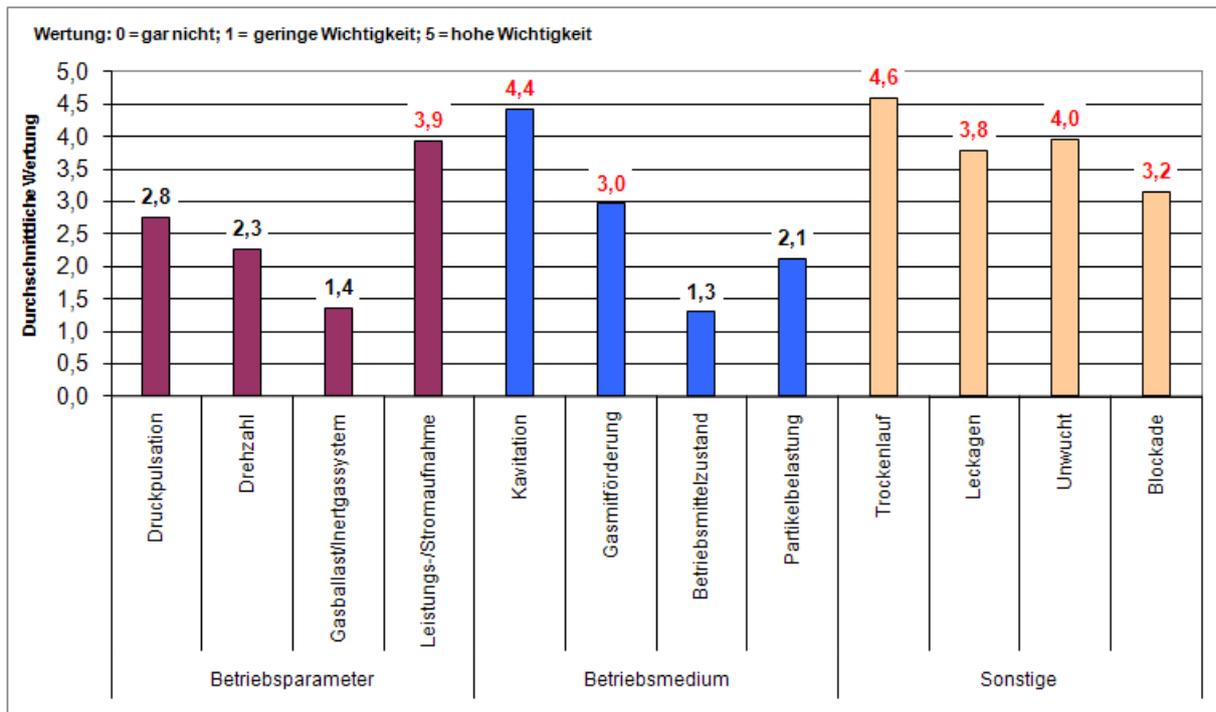


Abb. 22: Betreiberumfrage, Frage 3.3.2: Angaben zu überwachungsrelevanten Ausfallursachen

In Hinblick auf überwachungsrelevante Ausfallursachen einer Pumpe werden Diagnoseverfahren zum einen für hydraulische Störungen (nicht bestimmungsgemäße Betriebsweisen: Kavitation, Gasmittelförderung, Trockenlauf, Blockade), zum anderen für mechanische Störungen (Dichtungsschäden durch Trockenlauf oder unzulässige Schwingungsbelastung, Lager-schäden) als besonders wichtig erachtet. Weiterhin wurde von den Befragten die Überwachung der Leistungs- bzw. Stromaufnahme als sinnvoll angesehen. Als weitere überwachungsrelevante Betriebsparameter wurden hier auch der Förderstrom, der Förderdruck und der Saugdruck genannt.

Zwischenergebnis Teil 3

Im Betrieb kommen bereits unterschiedliche, auf einzelne Bauteile spezialisierte Überwachungstechniken zur Anwendung. Diese werden zumeist vom Betreiber selbst nachgerüstet, wobei die Messwertaufnahme in der Regel online erfolgt.

Hinsichtlich der Bauteilüberwachung wurde von den Befragten die Möglichkeit der Überwachung des Lagers, der Wellenabdichtung und des Laufrads als wichtig erachtet. Zusätzlich spielt insbesondere bei größeren Maschinen die Überwachung des Wirkungsgrads eine Rol-

le. Bezüglich der Ausfallursachen ist insbesondere die Kontrolle der bestimmungsgemäßen Betriebsweisen von besonderer Bedeutung.

5.1.3 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der Expertenbefragung zeigen, dass insbesondere Chemienormpumpen mit einfach- und doppelwirkenden (doppelt-flüssig) Gleitringdichtungen bei der Mehrzahl der Befragten zum Einsatz kommen. Pumpen kleiner Baugrößen werden am häufigsten eingesetzt.

Im Rahmen der betrachteten Pumpenpopulation ist die Gleitringdichtung das wesentliche ausfallkritische Bauteil. Weitere ausfallrelevante Bauteile sind das Lager (Wälzlager) und der Verschleiß des Dichtspalts.

Die relevanten Ausfallursachen sind hydraulische Störungen (nicht bestimmungsgemäße Betriebsweisen: Kavitation, Gasmitförderung, Trockenlauf, Blockade) sowie mechanische Störungen (Dichtungsschäden durch Trockenlauf oder unzulässige Schwingungsbelastung, Lagerschäden).

Jede Pumpe ist aufgrund der natürlichen Alterungs- und Verschleißprozesse im bestimmungsgemäßen Betrieb an eine bestimmte Lebensdauer gebunden. Durch eine nicht optimale Betriebsweise wird die Lebensdauer einer Pumpe jedoch beeinträchtigt. Daher ist es von besonderer Bedeutung, die Symptome für einen nicht bestimmungsgemäßen Betrieb (Veränderungen des hydraulischen Betriebsverhaltens, Leckage der Gleitringdichtung, Beeinträchtigung des Pumpenwirkungsgrades etc.) zu erkennen, um rechtzeitig die Betriebsweise zu korrigieren und gegebenenfalls die erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen einzuleiten.

Die Ergebnisse der Betreiberumfrage wurden im April 2007 dokumentiert und zur Information und Diskussion an die Mitglieder des erweiterten Arbeitskreises übermittelt. Die Umfrageergebnisse wurden von allen EAK-Mitgliedern als Basis für die weitere Projektarbeit angenommen.

5.2 Auswahl der Diagnose- und Prognosemerkmale, Sensorik und Messtechnik

5.2.1 Begriffsdefinitionen

Im Folgenden werden einige grundsätzliche Begriffe bzw. Zusammenhänge wie folgt verwendet bzw. angenommen: Bei der *technischen Diagnose* handelt es sich um das Erkennen des Zustands einer technischen Betrachtungseinheit. Der Schwerpunkt liegt dabei i.d.R. darauf, fehlerhafte, schadhafte oder unzulässige Zustände zu erkennen und graduell zu bewer-

ten. Es kann zwischen Bauteilzuständen und Betriebszuständen unterschieden werden. Die Erkennung und Bewertung erfolgen durch Klassifizieren von einem oder mehreren Merkmalen. Dabei sind die Klassen bestimmten Zuständen (z. B. Trockenlauf) oder Ausprägungen eines Zustands (z. B. Kavitation mit 3 %-5 % Förderhöhenabfall) zugeordnet. Merkmale sind an der Betrachtungseinheit erfasste Informationen und Messgrößen oder aus diesen abgeleitete Größen. An einer Kreiselpumpe kann beispielsweise der $NPSH_A$ -Wert als ein aus den Messgrößen Zulaufdruck und Förderstrom berechnetes Merkmal aufgefasst werden, das zur Bewertung des Betriebszustands hinsichtlich unzulässiger Kavitation herangezogen wird. Die Klassifikation erfolgt in diesem Fall durch einen Vergleich mit einem betriebspunktabhängigen Referenzwert ($NPSH_R$). An die Merkmale besteht der Anspruch, eine möglichst direkte und gut verwertbare Abhängigkeit von einem oder mehreren interessierenden Zuständen aufzuweisen. Die technische Diagnose befasst sich fast ausschließlich mit der Gegenwart. Mitunter werden jedoch Informationen aus der Vergangenheit herangezogen, um gegenwärtige uneindeutige Zustände richtig zu interpretieren.

Aussagen über zukünftige Zustände einer technischen Betrachtungseinheit zu treffen ist Gegenstand der *technischen Prognose*. Im Vordergrund steht dabei häufig die Restlebensdauer insbesondere ausfallgefährdeter Bauteile. Die Prognose stützt sich nicht zwingend auf die gleichen Merkmale wie die Diagnose (vgl. Kapitel 5.2.3 Strategien zur Diagnose und Prognose).

5.2.2 Auswahl der Diagnose- und Prognosemerkmale

Bei der Auswahl der Diagnosemerkmale werden folgende Anforderungen berücksichtigt:

- möglichst direkte und gut verwertbare Abhängigkeit der Merkmale von einem oder mehreren der relevanten Zustände,
- möglichst hohe Relevanz der Merkmale hinsichtlich der Belastung der ausgewählten Bauteile,
- praxisrelevanter Investitionsaufwand für ggf. erforderliche Sensorik und
- praxisrelevanter Aufwand zur Installation der Sensorik.

Bei der konkreten Auswahl zeigt sich, dass die bereits zu Projektbeginn zusammengetragene Sammlung potenzieller Diagnoseverfahren alleine nicht dazu verwendet werden kann, geeignete Merkmale auszuwählen. Vielmehr müssen die einzelnen Schadensmechanismen, welche die Restlebensdauer der Maschinen maßgeblich bestimmen, betrachtet werden. Dazu werden die Schadensketten der ausfallgefährdeten Bauteile betrachtet.

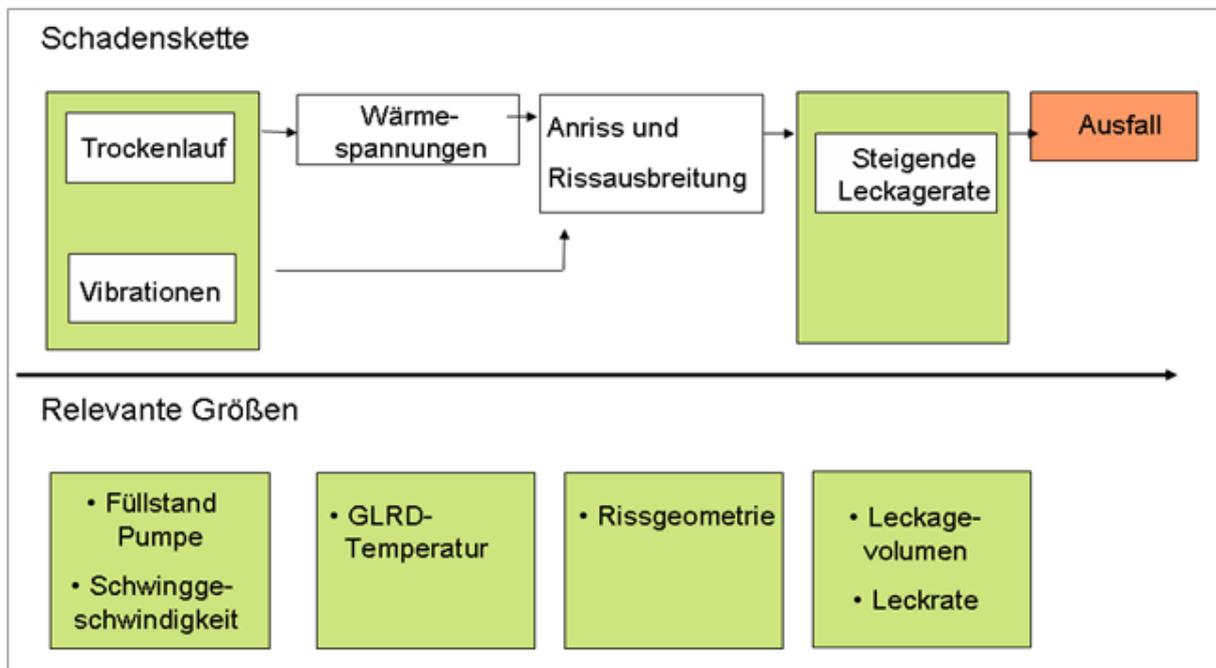


Abb. 23: Beispiel für eine mögliche Schadenskette eines Gleitringdichtungsschadens

Abbildung 23 zeigt exemplarisch eine Schadenskette für eine Gleitringdichtung (in Abbildung oben) und die zu den einzelnen Phasen der Schadensentwicklung zugehörigen relevanten Größen (in Abbildung unten). Auslösendes Ereignis ist in diesem Fall ein Trockenlauf der Pumpe. Der fehlende Schmierfilm zwischen den Gleitringen führt zu einer hohen thermischen Belastung der Dichtung. Die Folge sind Wärmespannungen und daraus resultierend Risse, deren Ausbreitung möglicherweise durch Schwingungen forciert wird. Die Dichtwirkung ist damit nicht mehr gegeben – Leckage tritt auf. Betrachtungen dieser Art (vgl. nachfolgende Tabelle) für Schäden an allen ausgewählten Bauteile führen auf eine Vorauswahl relevanter Größen.

Bauteil	Schadensmechanismus
GLRD	Trockenlaufbedingte Schädigung
	Verkleben / Verkrusten
	Aufquellen der Polymere
	Schwingungsinduzierte Spaltkavitation
Lauftrad	Kavitationserosion
	Schaufelverschmutzung
	abrasive Verschleiß durch Feststoffe
Dichtspalt	Aufweitung durch unwuchtbedingtes Anlaufen
	Aufweitung durch abrasiven Verschleiß
Wälzlager	Mangelschmierung
	Thermische Überlastung
	Verunreinigung
	Mechanische Überlastung

Für die Bauteile Gleitringdichtung und Wälzlager kann festgestellt werden, dass hier die Schadensmechanismen überdurchschnittlich vielfältig und komplex sein können [Laue06]. Dadurch ist es nicht möglich, einen Satz ermittelbarer Merkmale festzulegen, der die Belastung dieser Bauteile auch nur annähernd vollständig beschreibt. Die Komplexität wird ferner durch die Vielzahl der möglichen konstruktiven Ausführungen dieser Bauteile erhöht. Jedoch führen sowohl bei der Gleitringdichtung als auch beim Wälzlager beginnende Schäden zu vergleichsweise leicht erfassbaren (messbaren) Effekten. Im Fall von Gleitringdichtungsschäden tritt i.d.R. Leckage auf, die über eine geeignete Messeinrichtung erfasst werden könnte. Im Fall von Wälzlager-Schäden entstehen bekannte Maschinenstrukturschwingungen, die eindeutig dem Lagerschaden zugeordnet werden können. Es wird davon ausgegangen, dass eine Trend-Analyse dieser messbaren Effekte eine Abschätzung der Zeit bis zum Ausfall ermöglicht. Aus diesen Erkenntnissen ergeben sich für das Projekt folgende zwei Ansätze:

- Entwicklung einer Einrichtung zur Messung der Leckage an Gleitringdichtungen und
- Einsatz eines "intelligenten" Schwingungssensors (efector octavis).

Der erstgenannte Ansatz kann nach einer Grobabschätzung des Aufwands nicht im Rahmen des Projekts umgesetzt werden. An Stelle dessen wird eine Vorlagebehälter-Überwachung der ohnehin überwiegend in Tandemanordnung ausgeführten Gleitringdichtungen organisiert.

Dem zweiten Ansatz kommt eine besondere Bedeutung zu. Nach einer Bewertung der Auswahl-Merkmale hinsichtlich Aufwand, Nutzen und Machbarkeit, muss eine Vielzahl dieser Merkmale wegen hohem Instrumentierungsaufwand verworfen werden. Es stellt sich daher die Aufgabe, die fehlenden Informationen mittels des Körperschallsensors zu ersetzen. So ist beispielsweise die Erosionsintensität der Kavitation ein Merkmal, das nur mit extrem hohem Aufwand messtechnisch erfassbar ist. Eine Umsetzung an 100 Maschinen ist ausgeschlossen. Es wird daher in eigens zu diesem Zweck durchgeführten Versuchen untersucht, inwieweit sich Kavitation und andere ausgewählte Betriebszustände auf das Schwingungsverhalten der Maschine auswirkt. Ziel ist es, für die nicht messbaren Merkmale ersatzweise Merkmale mit dem eingesetzten intelligenten Schwingungssensor zu erzeugen (vgl. Kapitel 5.2.5 Validierung der Sensorik durch Prüfstandversuche).

Die ausgewählten Merkmale werden als Vorgabe für die Instrumentierung der Pumpenaggregate im Feld herangezogen. Die tatsächliche Instrumentierung ergibt sich als Kompromiss aus den formulierten Wünschen und dem in der realen Anlage Realisierbaren. Abbildung 24 zeigt die eingesetzten Sensoren und die mit diesen generierten Merkmale. Eine de-

taillierte Beschreibung der Schwingungsmerkmale erfolgt im Kapitel 5.2.4 Auswahl und Anpassung der Sensorik.

Sensor	Merkmal							
	Saugdruck	NPSHA	Förderhöhe	Förderstrom	Motorleistung	Wellenleistung	Medientemperatur	Schwingungsmerkmale
Drucksensor saugseitig	X	X	X					
Drucksensor druckseitig		X	X	X				
Magnetisch induktives Durchflussmessgerät		X						
Leistungsmessgerät				X	X			
Medientempersensur		X				X		
Beschleunigungssensor							X	

Abb. 24: Sensoren und Merkmale

5.2.3 Strategien zur Diagnose und Prognose

Zur Diagnose ausgewählter Betriebszustände der Pumpen werden insbesondere die typischen Prozessgrößen Förderhöhe, Förderstrom, Motorwirkleistung und NPSH als Merkmale herangezogen. Die Klassifikation, also die Entscheidung über das Vorliegen eines bestimmten Betriebszustands, erfolgt durch Vergleich dieser Werte mit Referenzwerten. So erfolgt beispielsweise eine Bewertung des Betriebspunkts einer Pumpe durch Vergleich des auf den Bestpunkt bezogenen relativen Förderstroms, Fördergrad genannt, mit den Herstellerempfehlungen. Eine detaillierte Darstellung erfolgt im Kapitel 5.4.8 Entwicklung eines Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose.

Bezüglich der Prognose der Restlebensdauer der ausfallgefährdeten Bauteile werden zwei grundsätzliche Strategien zur Prognose der Restlebensdauer identifiziert (vgl. Abb. 25). Der statistische Ansatz geht davon aus, dass die wesentlichen, die Restlebensdauer bestimmenden Einflussgrößen erfassbar bzw. messbar sind, und dass ein nachweisbarer Zusammenhang zwischen diesen Einflussgrößen und der Restlebensdauer existiert. Dieser Zusammenhang kann auf der Grundlage statistischer Erhebungen an den Feldversuchspumpen, unter der Voraussetzung einer gewissen Mindestmenge beobachteter Ausfälle, mittels multivariater Regression hergestellt werden. Der extrapolierende Ansatz basiert auf der direkten Messbarkeit einer Schadensgröße, also z. B. die Leckage einer Gleitringdichtung. Hier soll durch eine geeignete Extrapolation der beobachtete Verlauf in die Zukunft verlängert werden, um im Schnittpunkt mit der Ausfallgrenze einen Schätzwert für den Ausfallzeitpunkt zu erhalten. Nachteilig bei diesem Ansatz ist die Tatsache, dass Restlebensdauer-

Informationen erst generiert werden können, wenn bereits eine gewisse Mindestschädigung eingesetzt hat. Der Vorhersagebereich begrenzt sich dadurch vermutlich auf Zeiträume in der Größenordnung von einigen Tagen bis maximal Wochen. Eine Kombination beider Verfahren ist zu diskutieren.

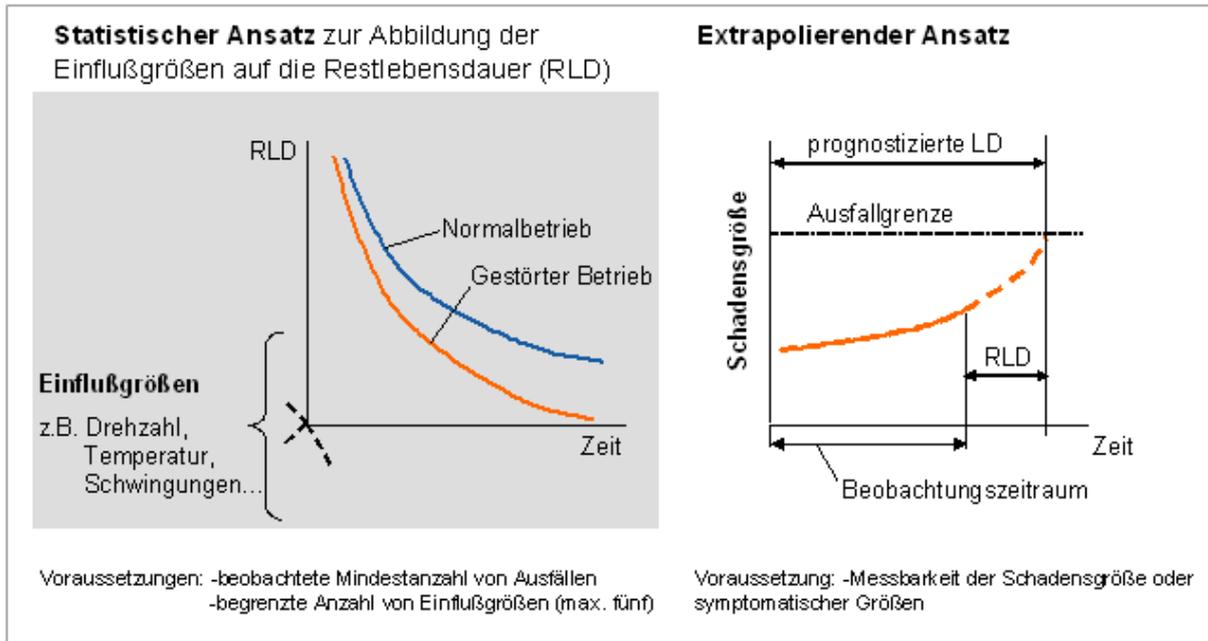


Abb. 25: Ansätze zur Restlebensdauer-Schätzung (Prognosestrategien)

5.2.4 Auswahl und Anpassung der Sensorik und Messtechnik

Die Auswahl der Sensorik richtet sich nach den ausgewählten Merkmalen gemäß Kapitel 5.2.2 Auswahl der Diagnose- und Prognosemerkmale. Abgesehen von den Schwingungsmerkmalen werden für alle anderen Merkmale (vgl. Abb. 24) handelsübliche Sensoren (Prozessmesstechnik) eingesetzt. Die Schwingungsüberwachung erfolgt im Gegensatz zu handelsüblichen Beschleunigungssensoren mit dem diagnoseintegrierten Schwingungssensor efector octavis des Projektpartners i-for-t bzw. ifm. Gegenüber dem ursprünglichen Ansatz (Verwendung von zwei Schwingungssensoren, sowohl auf dem Pumpengehäuse als auch auf dem Motor, vgl. auch Projektantrag) kann die Schwingungsmessung am Motor entfallen, da es sich beim Motor, entsprechend der Auswertung der Schadenshistorie (vgl. Kapitel 5.4.1 Analyse der Schadenshistorien der Versuchspumpen), um keine ausfallrelevante Komponente handelt. Die Leistungsmessung erfolgt mit feldbusfähigen Simocode-Transmittern von Siemens. Eine schematische Darstellung des realisierten Instrumentierungsumfangs zeigt Abbildung 26.

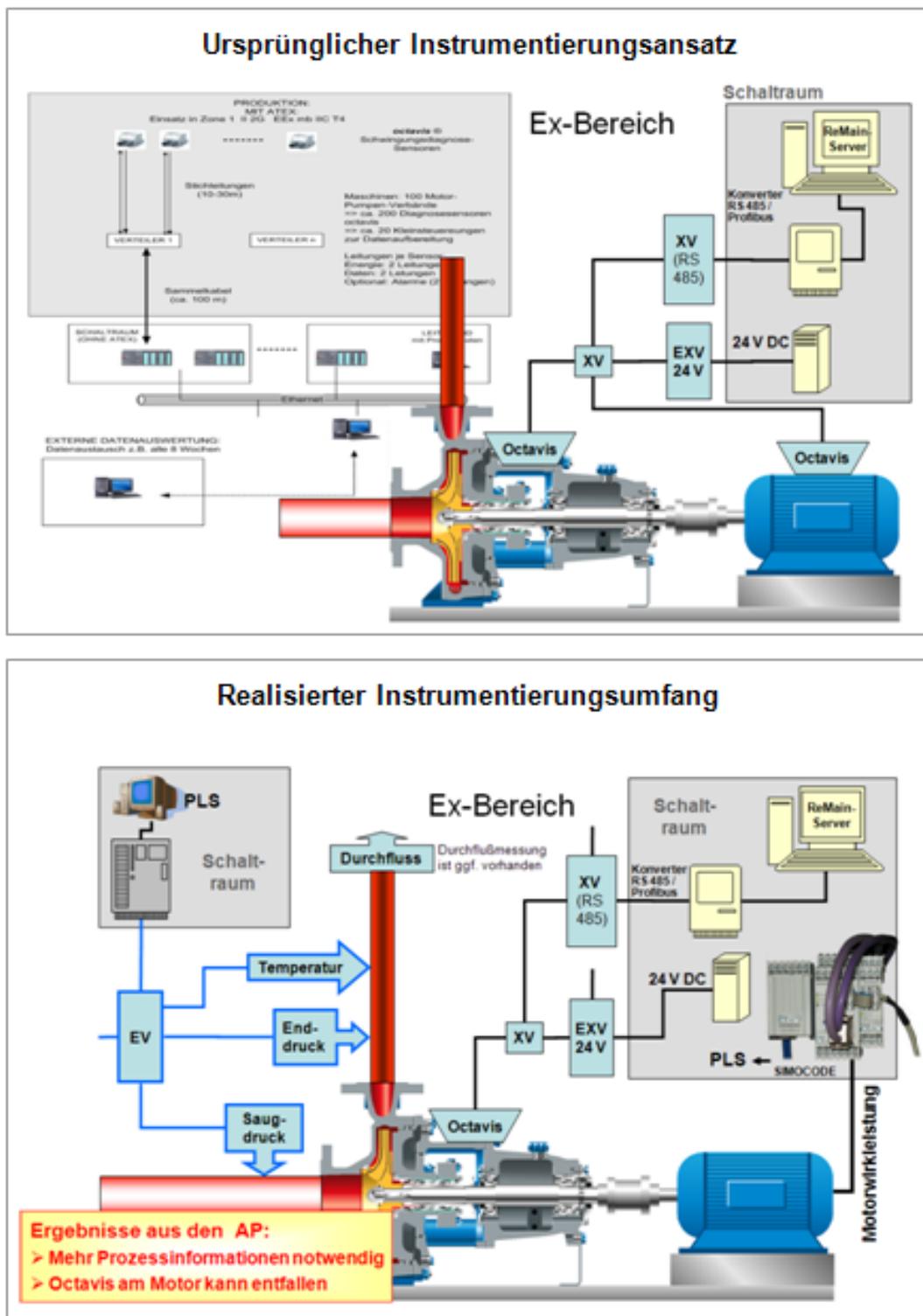


Abb. 26: Ursprünglich geplanter und im ReMain-Projekt realisierter Instrumentierungsumfang

Anpassung der Schwingungsmesstechnik

Der Schwingungsdiagnosesensor efector octavis erfasst kontinuierlich die Beschleunigungen an der Maschinenoberfläche. Dabei werden ca. 25.000 Messwerte/Sekunde erfasst und in

Echtzeit die Merkmalsberechnung im Zeit- und Frequenzbereich durchgeführt. Die Merkmalsgestaltung erfolgt softwaregestützt über den Parametriervorgang.

Dem Sensor stehen im Frequenzbereich zwei Analyseverfahren zur Verfügung:

- Das FFT Verfahren errechnet mit Hilfe einer sogenannten Zoom-FFT das Linearspektrum des Beschleunigungssignals. Die Frequenzauflösung beträgt konstant 1,25 Hz bis hin zu einer Grenzfrequenz von 6.000 Hz.
- Das H-FFT oder auch Hüllkurvenverfahren errechnet das Frequenzspektrum aus dem Hüllkurvensignal. Der Hüllkurvenfilter entspricht dabei einem Bandpass von 1.000 bis 6.000 Hz. Dabei wird das Signal nach dem Hochpass gleichgerichtet und anschließend die Hüllkurve mit Hilfe eines digitalen Tiefpassfilters gebildet. In Abbildung 27 zeigt sich die Wirkungsweise der Hüllkurvenbildung auf die Frequenzanalyse am Beispiel eines Lagerschadens.

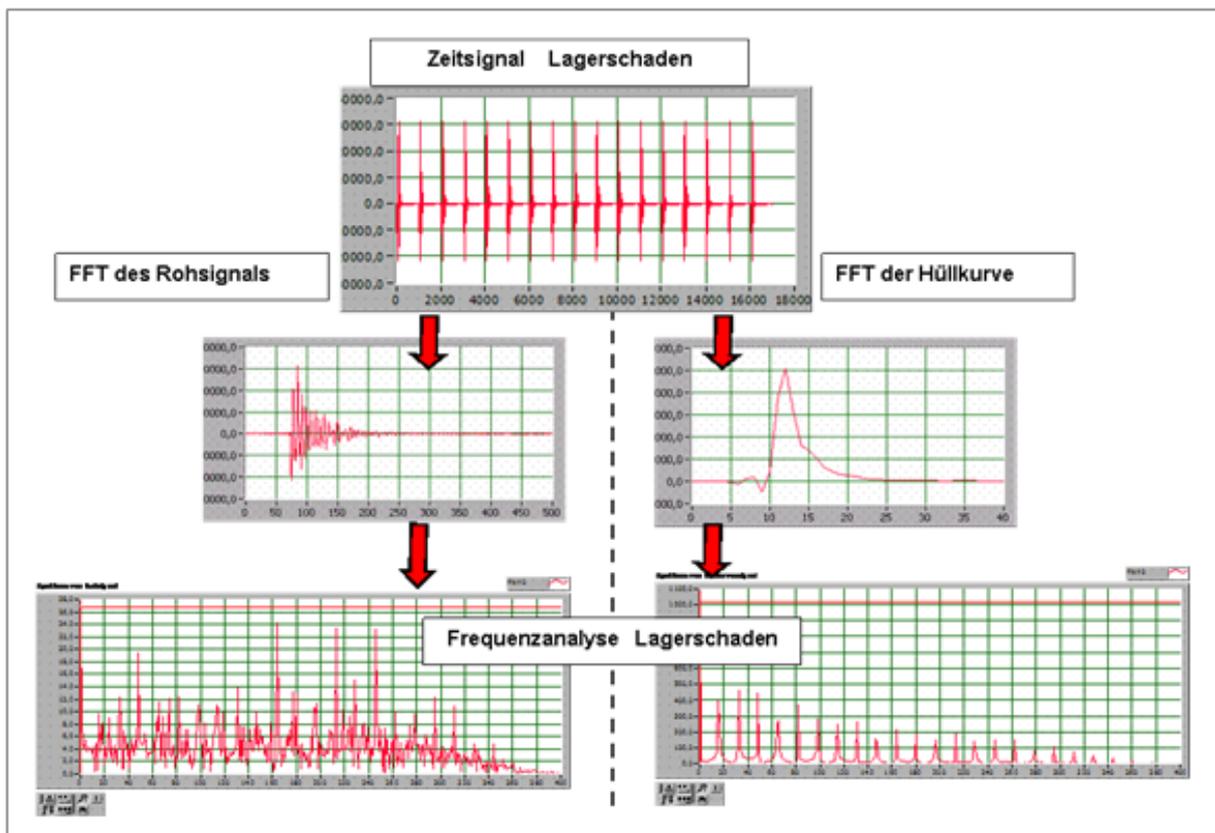


Abb. 27: Schematische Darstellung einer Frequenzanalyse eines Beschleunigungssignals mit und ohne vorheriger Hüllkurvenbildung

Die Verwendung der Schwingbeschleunigung bietet den Vorteil, hochfrequente und tieffrequente Schwingungen gleichermaßen zu erfassen und auszuwerten.

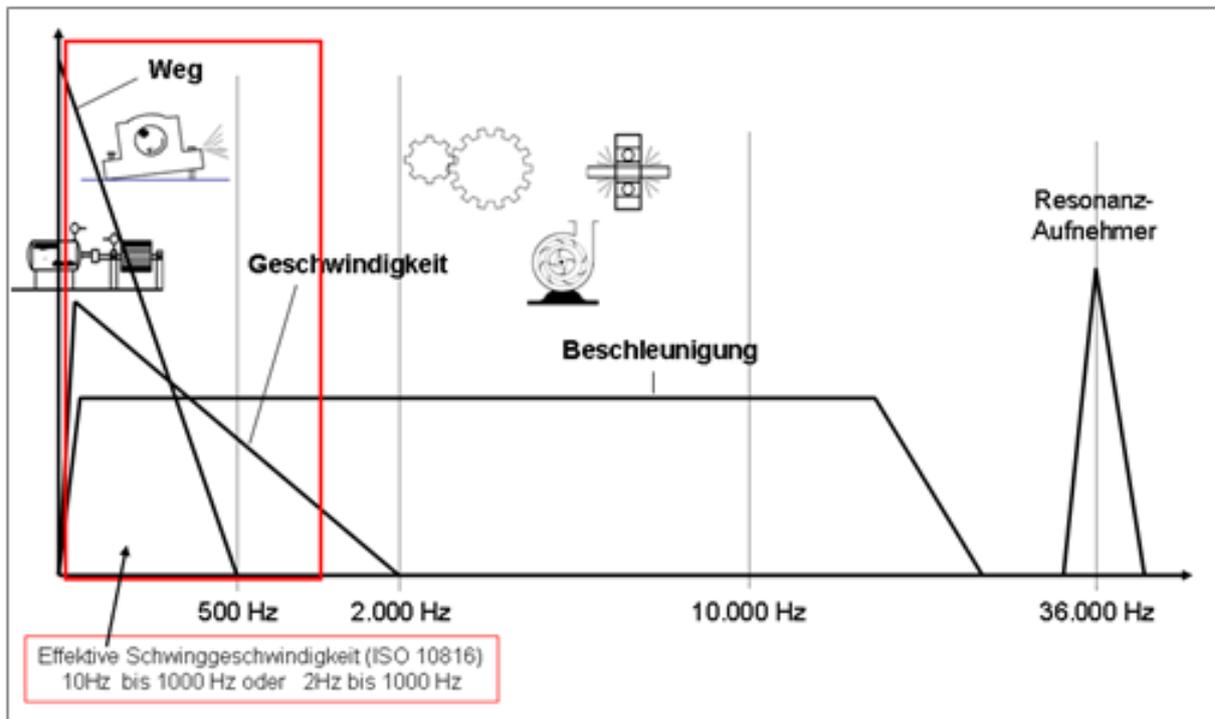


Abb. 28: Erkennung mechanischer Störung über der Schwingfrequenz

Die sensorintegrierte Signalanalyse

Spezielle Herausforderungen der messtechnischen Schwingungsüberwachung, verglichen mit Prozessgrößen wie Druck oder Temperatur, liegen in der benötigten großen Bandbreite sowie in der teilweise komplizierten Algorithmik. So ist es meist ausreichend, Temperaturen und Drücke wenige Male in der Minute abzufragen. Die zuverlässige Schwingungsanalyse benötigt dagegen mehr als 25.000 Werte pro Sekunde. Diese Datenmenge kann in Ihrer rohen Form keiner Steuerung oder Automatisierungstechnik zugeführt werden. Eine Vorauswertung ist zwingend erforderlich. Weiter ist das eigentliche Schwingungssignal nur in wenigen Fällen symptomatisch für einen Maschinenfehler. Vielmehr müssen zuvor im Rahmen einer Signalanalyse entsprechende Merkmale errechnet werden.

Hierfür wird im Rahmen der Parametrierung ein so genannter Fehlerbaum der Pumpe erstellt. Für die Analyse der einzelnen „Fehler-Objekte“ werden verschiedene schwingungstechnische Berechnungen im Frequenz- oder Zeitbereich angeboten.

Durch die sensorintegrierte Signalanalyse kann das Datenaufkommen schlagartig von 25.000 Werten pro Sekunde auf acht Merkmale pro fünf Sekunden reduziert werden. Dieses Datenaufkommen ist dann leicht z. B. über Profibus an übergeordnete Software-Applikationen weiterleitbar.

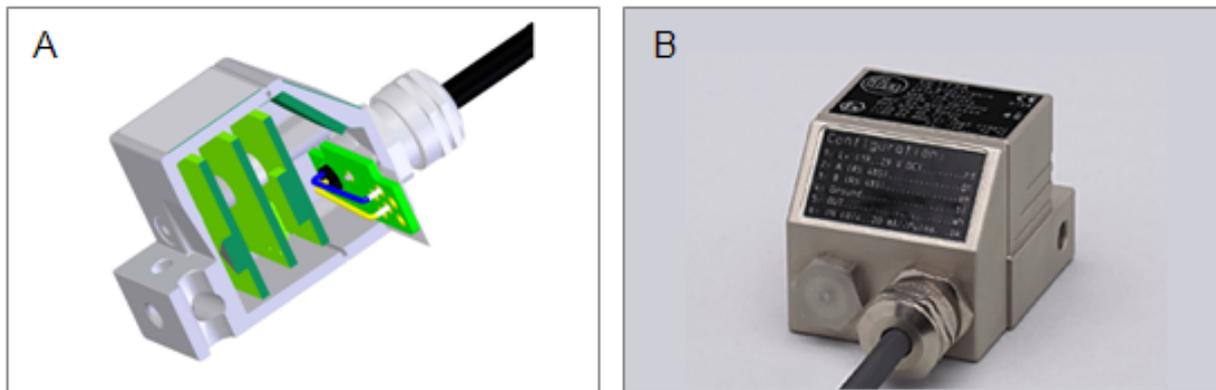


Abb. 29: Sensorintegrierte Auswertung der Schwingungssignale beim efector octavis, (A): Schnittzeichnung, (B): Sensortyp VE113A mit integriertem Anschlusskabel

Für die Überwachung der 100 Pumpen im Rahmen des Projekts wurde ein Einheitsparametersatz für Kreiselpumpen erstellt, der sich nur durch unterschiedliche Betriebsdrehzahlen und die Anzahl der Laufradschaufeln unterscheidet. Die kinematischen Überrollfrequenzen der verwendeten Wälzlager wurden hinsichtlich ihrer Frequenzlage in vier Frequenzfenster aufgeteilt. Der Vorteil gegenüber der vom Hersteller angebotenen individuellen schmalbandigen Einstellung ist die universelle Verwendbarkeit des Parametersatzes bei allen Pumpen.

Als Hüllkurvenfilter wird der Bereich von 1.000 Hz bis 6.000 Hz verwendet.

Diagnosebaum:			
Lagerzustand Diagnoseobjekt-Typ: Sonstiges Lagerbezeichnung: 6305 Über- oder Untersezung: 1 / 1,000 Analyseverfahren: H-FFT erforderlicher Suchradius: 5 % Teach-Wert: 50 mg Grenzwert gelb: 5 Grenzwert rot: 10 frq1 Ordnungszahl: 3,50 frq2 Ordnungszahl: 4,53 frq3 Ordnungszahl: 6,24 frq4 Ordnungszahl: 8,60	Kavitation Diagnoseobjekt-Typ: Sonstiges Über- oder Untersezung: 1 / 1,000 Analyseverfahren: H-FFT erforderlicher Suchradius: 20 % Teach-Wert: 10 mg Grenzwert gelb: 10 Grenzwert rot: 20 kav1 Ordnungszahl: 0,45	Unwucht Diagnoseobjekt-Typ: Unwucht Über- oder Untersezung: 1 / 1,000 Analyseverfahren: FFT erforderlicher Suchradius: 5 % Teach-Wert: 25 mg Grenzwert gelb: 2 Grenzwert rot: 6 Unwucht Ordnungszahl: 1,00	Harmonische Diagnoseobjekt-Typ: Sonstiges Über- oder Untersezung: 1 / 1,000 Analyseverfahren: FFT erforderlicher Suchradius: 20 % Teach-Wert: 20 mg Grenzwert gelb: 10 Grenzwert rot: 20 har1 Ordnungszahl: 2,00 har2 Ordnungszahl: 3,00
Schaufelklang Diagnoseobjekt-Typ: Sonstiges Über- oder Untersezung: 1 / 1,000 Analyseverfahren: H-FFT erforderlicher Suchradius: 20 % Teach-Wert: 10 mg Grenzwert gelb: 8 Grenzwert rot: 10 4schaufel Ordnungszahl: 4,00	Pegelwächter aktiv Filter: 6 kHz Überwachung: Stoßwächter Mittelungen: 1 mal Ansprechverzögerung: 5 Schaltpunkte gelb: 5000 Schaltpunkte rot: 8000	V.Effektivwächter inaktiv	Applikation: Parameter für: VE113A Drehzahl: Konstant 3000 U/min Endstufe: Öffner Mittelungen: 4 mal Ansprechverzögerung: 5 Verwendeter Suchradius: 13 %

Abb. 30: efector octavis - Fehlerobjekte für Kreiselpumpen

Gemäß den Ergebnissen der Betreiberumfrage zu erwartenden Schäden sowie der erarbeiteten Schadensketten werden auf Basis von Prozessdaten und der substituierten Diagnose-
daten des Schwingungssensors efector octavis folgende Merkmale in Zusammenhang mit
möglichen Schäden gebracht:

Diagnosegrößen octavis	Prognosemöglichkeiten					
	Wälzlager	Kupplung	Pumpenrad	GLRD	Sonstiges	Mechanik allg.
Lagerschadensfrequenzen (H-FFT)	x					
Unwucht (FFT)		x				x
Harmonische (FFT)			x			
Kavitation (H-FFT)			x			
Schaufelpassierfrequenz (H-FFT)					Anstreifen	
pk_max	x		x		Stösse	
a_mittel (Betrag)	x	x	x			x
Abgeleitete Diagnosegrößen (Einwirkdauer)						
Einwirkdauer Unwucht			x	x		
Einwirkdauer Harmonische	x	x		x		x
Einwirkdauer Kavitation	x			x		
Einwirkdauer pk_max			x	x		x
Einwirkdauer a_mittel			x	x		x
Einwirkdauer Lagerschadensfrequenzen	x		x	x		
Einwirkdauer Schaufelklang (moduliert)			x	x		

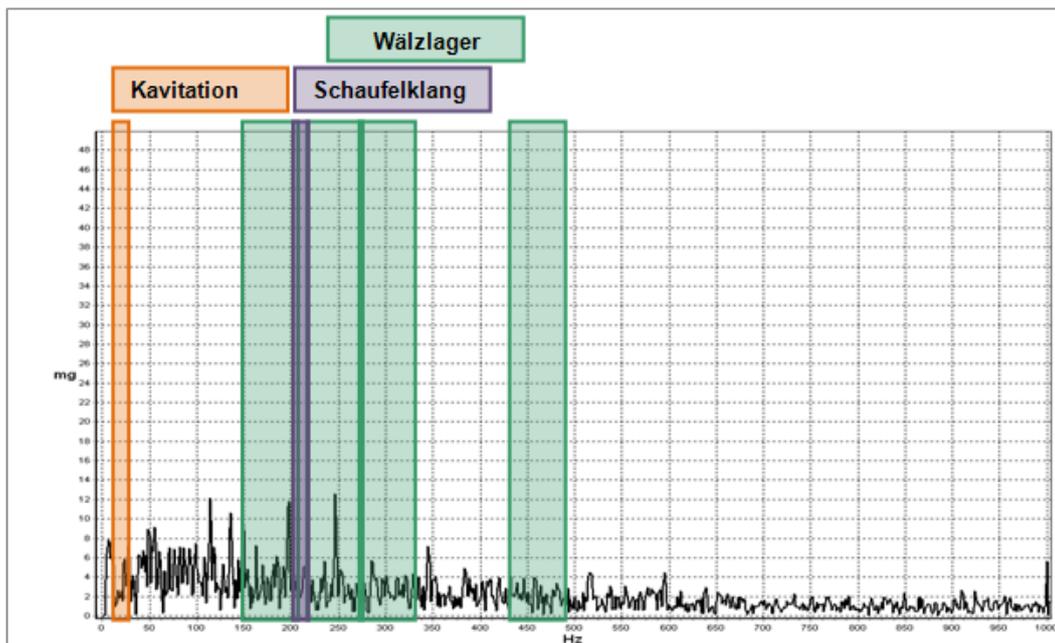
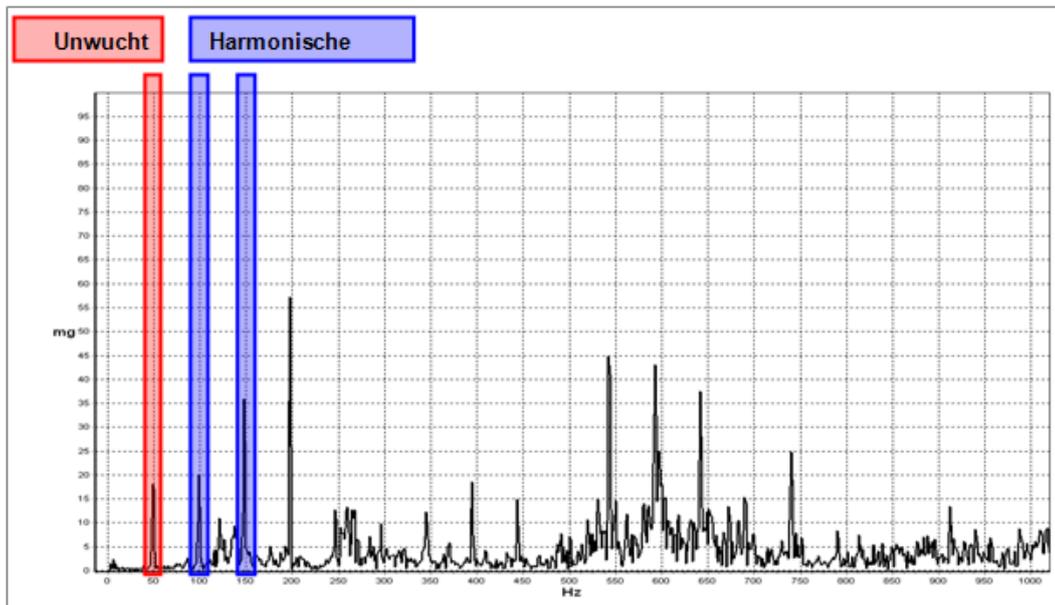


Abb. 31: Frequenzselektive Kenngrößen für die Diagnose von Kreiselpumpen

5.2.5 Validierung der Sensorik durch Prüfstandversuche

Ziel dieses Arbeitspunktes war die Festlegung eines allgemeingültigen Parametersatzes für alle 100 Versuchspumpen, um eine pumpenübergreifende Auswertung zu ermöglichen. Dazu wurden die Prüfstandpumpen des Lehrstuhls SAM gezielt im Normalbetrieb sowie im nicht bestimmungsgemäßen Betrieb betrieben, um Merkmale festzulegen und deren Eignung festzustellen.

5.2.5.1 Beschreibung der Prüfstände

Für das ReMain-Projekt standen zwei automatisierte, geschlossene Ringleitungsprüfstände zur Verfügung. Die Prüfstände sind komplett in Edelstahl ausgeführt. Die Nennweite der Rohrleitungen beträgt DN 50. Die Tanks verfügen über ein Fassungsvermögen von 1 m³. In den Druck- und Saugleitungen sind Druckmessstellen sowie Temperaturmessstellen montiert. Zur Messung des Volumenstroms kommen in allen Prüfständen magnetisch induktive Durchflussmessgeräte (MID) zum Einsatz. In den Druckleitungen sind zudem Wärmetauscher verbaut, welche an das universitätseigene Kühlwassernetz angeschlossen sind, um eine konstante Temperatur der Fördermedien einzustellen. Je nach Anforderung kann zusätzlich noch ein Kryostat zwischengeschaltet werden, um verschiedene Mediumtemperaturen zu realisieren.

Die Anlagenkennlinie kann über die in den Rohrleitungen montierte Regelarmatur derart verändert werden, dass die Pumpen entlang ihrer Kennlinie betrieben werden können. Neben einem Betrieb mit Drosselregelung können die Pumpen auch mit einem Frequenzumrichter im drehzahlgeregelten Betrieb gefahren werden.

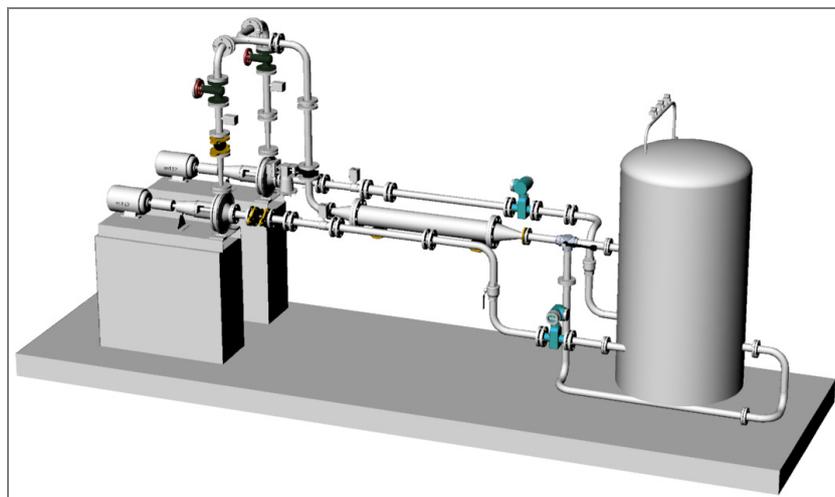


Abb. 32: Schematischer Aufbau der Prüfstände der Arbeitsgruppe Störungsfrüherkennung, Lehrstuhl SAM, TU Kaiserslautern [Quelle: SAM]

An den Prüfständen können neben dem Normalbetrieb entlang der Kennlinie auch hydraulische Störungen (wie z. B. Blockade, starke Teillast, starke Überlast, unzulässige Kavitation, unzulässige Gasmitförderung) und mechanische Störungen (wie z. B. Lagerschaden, Fehlausrichtung) gezielt untersucht werden (zur Einteilung vgl. Abb. 33).

Hydraulische Störungen	Mechanische Störungen
Blockade	Unwucht
Starke Teillast	Fehlausrichtung
Starke Überlast	Lagerverschleiß
Kavitation	Dichtungsverschleiß
Gasmitförderung	Externe Anregung
Feststoffmitförderung	
Trockenlauf/Einblocken	

Abb. 33: Einteilung der Störungen beim Betrieb von Pumpen, Lehrstuhl SAM, TU Kaiserslautern

5.2.5.2 Durchgeführte Prüfstandversuche

Im Rahmen des Arbeitspunktes „Validierung der Sensorik durch Prüfstandversuche“ wurden u. A. die Störungen Kavitation und Gasmitförderung untersucht. Nachfolgend werden diese exemplarisch näher erläutert.

Kavitation

Als Kavitation wird die durch hydrodynamische Druckabsenkung hervorgerufene Bildung von Dampfblasen im Inneren einer strömenden Flüssigkeit bezeichnet. Sie entsteht, wenn in einer Flüssigkeit der statische Druck örtlich unter den zu der Temperatur des Fördermediums gehörenden Dampfdruck fällt und ein Teil der strömenden Flüssigkeit verdampft. Sobald der statische Druck in der strömenden Flüssigkeit den zur jeweiligen Temperatur gehörenden Dampfdruck wieder überschreitet, was unmittelbar am Eintritt in die Laufradschaufeln der Pumpe beginnt, erfolgt eine implosionsartige Rückkondensation der Dampfblasen. Implodieren die Dampfblasen in der Nähe von Oberflächen, z. B. Pumpengehäusen oder Laufrädern, können die Druckspitzen zu deren Schädigung führen (vgl. Abb. 34). In der Literatur [Güli99] wird dieser Vorgang als Kavitationserosion definiert.



Abb. 34: Durch Kavitationserosion geschädigtes Laufrad, Lehrstuhl SAM, TU Kaiserslautern [Quelle: SAM]

Zur Realisierung der hydraulischen Störung Kavitation ist am Tank eine Drehschiebervakuumpumpe angeschlossen, mit deren Hilfe eine Absenkung des Saugdrucks realisieren werden kann. Als Regelkriterium für die Kavitation wird auf den Förderhöhenabfall Δh zurückgegriffen [Güli99].

Gasmitförderung

In vielen industriellen Prozessen sind in den Fördermedien häufig Gasanteile enthalten oder werden z. B. aufgrund von undichten Armaturen mit in die Pumpe angesaugt (vgl. Abb. 35).

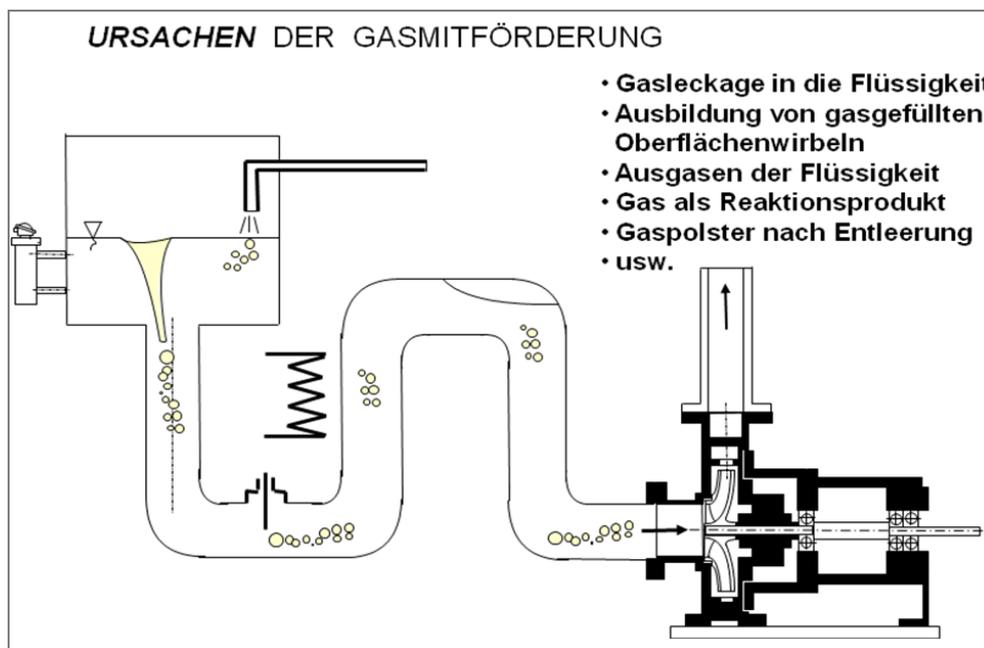


Abb. 35: Ursachen von Gasmitförderung, Lehrstuhl SAM, TU Kaiserslautern [Quelle: SAM]

Gase besitzen im Vergleich zu Wasser eine um den Faktor 1000 geringere Dichte und sind im Gegensatz zu Flüssigkeiten kompressibel. Geringe Gasanteile können, wenn sie im Fördermedium homogen verteilt sind, problemlos mit gefördert werden. Problematisch wird es, wenn bei höheren Gasanteilen aufgrund des hohen Dichteunterschieds eine Phasenseparation stattfindet. Kreiselpumpen können üblicherweise Gasgehalte von maximal 6 bis 7 Volumenprozent mit fördern. Bei höheren Gasanteilen kann es zum Abreißen der Strömung in den Laufradkanälen kommen und dadurch zum Zusammenbrechen der Förderung. Gasmitförderung lässt sich am Prüfstand über eine Druckluftleitung, welche an die Saugleitung angeschlossen ist, einstellen. Zur Messung der Luftmenge wird ein Massendurchflussregler für Gase verwendet. Auch geringe Gasmengen, welche zunächst das Betriebsverhalten einer Kreiselpumpe nicht beeinflussen, können sich während des Betriebes der Pumpe z. B. im hinteren Radseitenraum ansammeln und nach einer gewissen Zeit bspw. einen Trockenlauf der Gleitringdichtung zur Folge haben.

In Abhängigkeit des Fördergrads wurden verschiedene Abstufungen an Gasgehalten eingestellt und dabei das Schwingungsverhalten der Pumpen sowie die Prozessdaten erfasst.

Übersicht Prüfstandpumpen

Bei den Prüfstandpumpen handelt es sich um zwei Chemienormpumpen mit den hydraulischen Baugrößen 32-200 (CPK 32-200) und 40-160 (CPK 40-160).

Die Prüfstandpumpen wurden nach bestimmten Kriterien für die Versuche ausgewählt. Diese sind im Einzelnen:

- Möglichkeit zum Testen auf den Pumpenprüfständen der Arbeitsgruppe Störungsfrüherkennung
- Verwendung der Pumpen in der Versuchsanlage in Marl
- Häufigkeitsverteilung der hydraulischen Baugröße beim erweiterten Arbeitskreis (siehe Ergebnisse der Betreiberumfrage, Kapitel 5.1.2.1).

Um die Messdaten der Pumpen miteinander zu vergleichen, wurden die Versuche in Abhängigkeit des Fördergrads aufgenommen. Der Fördergrad q ist definiert als Quotient aus aktuellem Volumenstrom der Pumpe, bezogen auf den Volumenstrom im Punkt besten Wirkungsgrads der Pumpe. Die Pumpen wurden bei den unterschiedlichen Fördergraden (FG)

- $q = Q/Q_{opt} < 1,0$ (Teillast)
- $q = Q/Q_{opt} = 1,0$ (Fördergrad besten Wirkungsgrads) und
- $q = Q/Q_{opt} > 1,0$ (Überlast)

betrieben.

Nachfolgende Diagramme zeigen die Originalkennlinien des Herstellers der Pumpen.

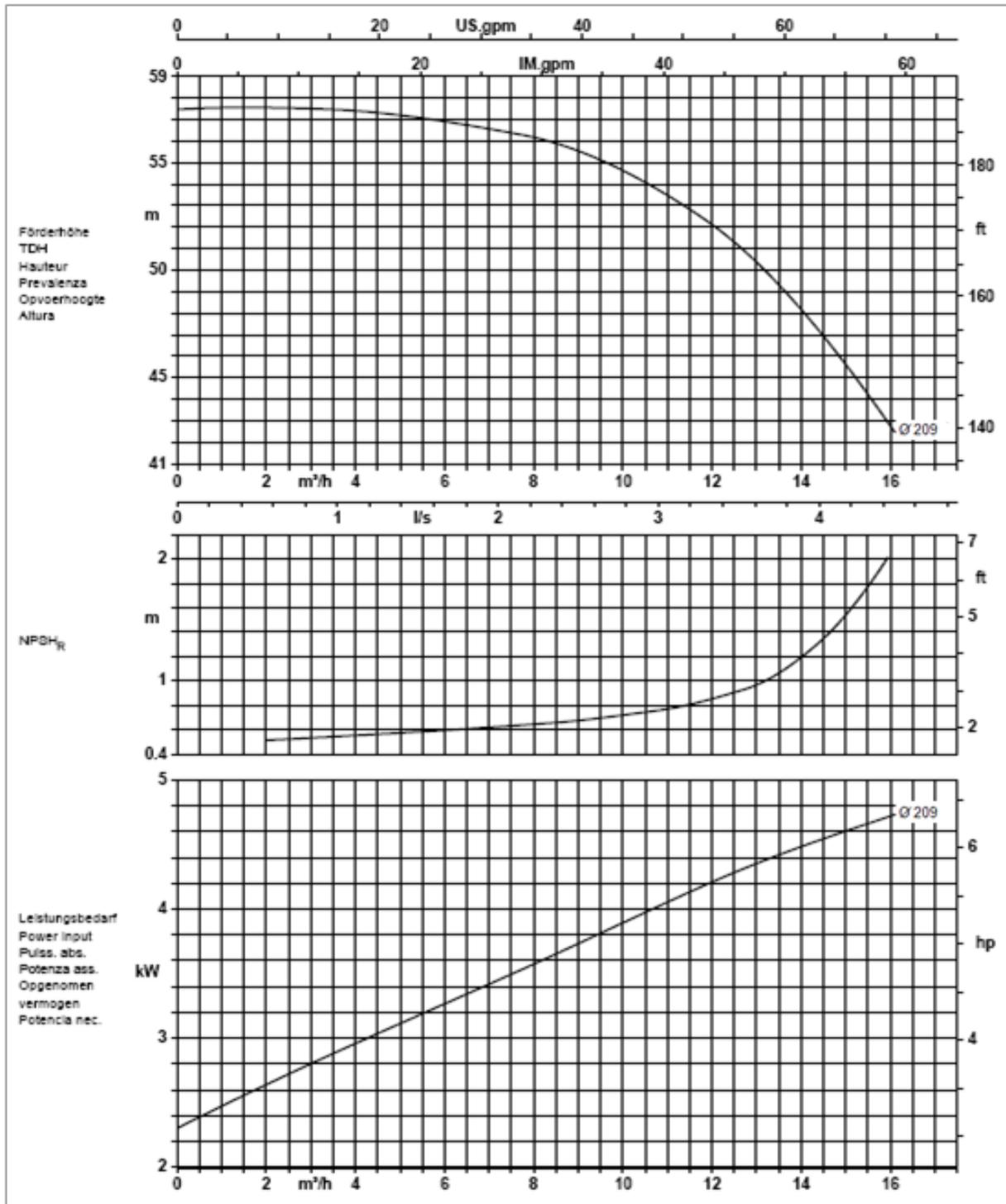


Abb. 36: Kennfelder der Versuchspumpe CPK 32-200, Laufraddurchmesser 209 mm [Quelle: KSB]

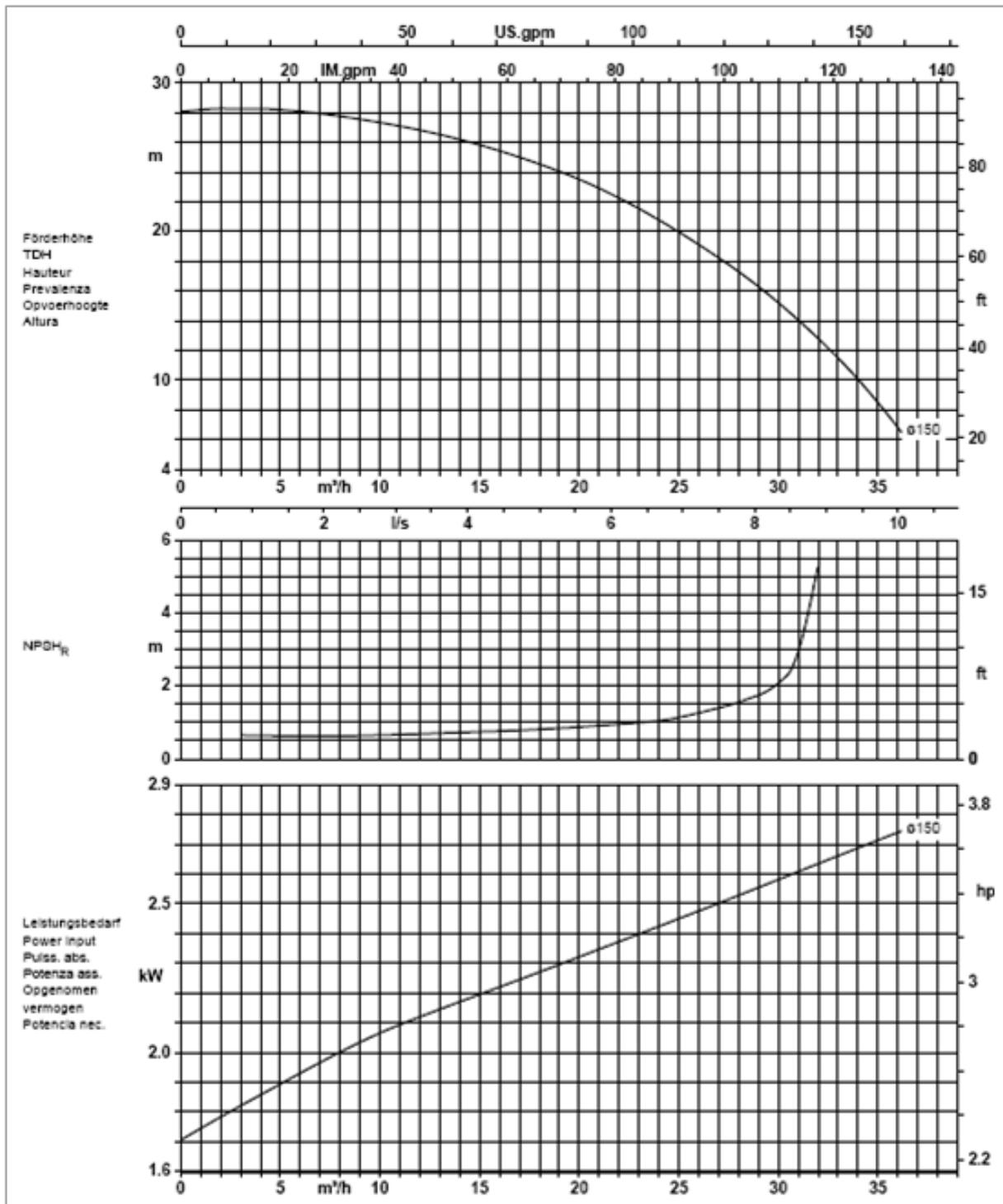


Abb. 37: Kennfelder der Versuchspumpe CPK 40-160, Laufraddurchmesser 150 mm
[Quelle: KSB]

Die Konfiguration des Schwingungssensors efector octavis erfolgt wie in Kapitel 5.2.4 beschrieben.

Nachfolgend werden drei Beispiele zu den untersuchten Messreihen der Versuchspumpe CPK 32-200 aufgezeigt. Zuerst werden Versuchsergebnisse zum Betrieb der Pumpe in Kavitation, nachfolgend von Gasmitförderung und Unwucht dargestellt.

Beispiel 1: Kavitation im Punkt $q = 1,0$

Nachfolgendes Beispiel vergleicht zwei Messreihen der gleichen Versuchspumpe im Betrieb Kavitation miteinander. Dabei wurde am Merkmal Förderhöhenabfall die Kavitationsintensität gemessen und in drei Abstufungen am Prüfstand eingestellt:

- Normalbetrieb ($\Delta H = 0 \%$)
- Förderhöhenabfall 3 % ($\Delta H = 3 \%$)
- Förderhöhenabfall 5 % ($\Delta H = 5 \%$)
- Förderhöhenabfall 9 % ($\Delta H = 9 \%$).

Die Versuchsreihe 1 wurde bei einer Förderleistung von $14,35 \text{ m}^3/\text{h}$, die Versuchsreihe 2 bei einer Förderleistung von $13,9 \text{ m}^3/\text{h}$ gefahren.

In Abbildung 38 sind die untersuchten Abstufungen des Kavitationskriteriums Förderhöhe bzw. Förderhöhenabfall in Abstufungen von $\Delta H = 0 \%$, $\Delta H = 3 \%$, $\Delta H = 5 \%$ und $\Delta H = 9 \%$ deutlich zu erkennen.

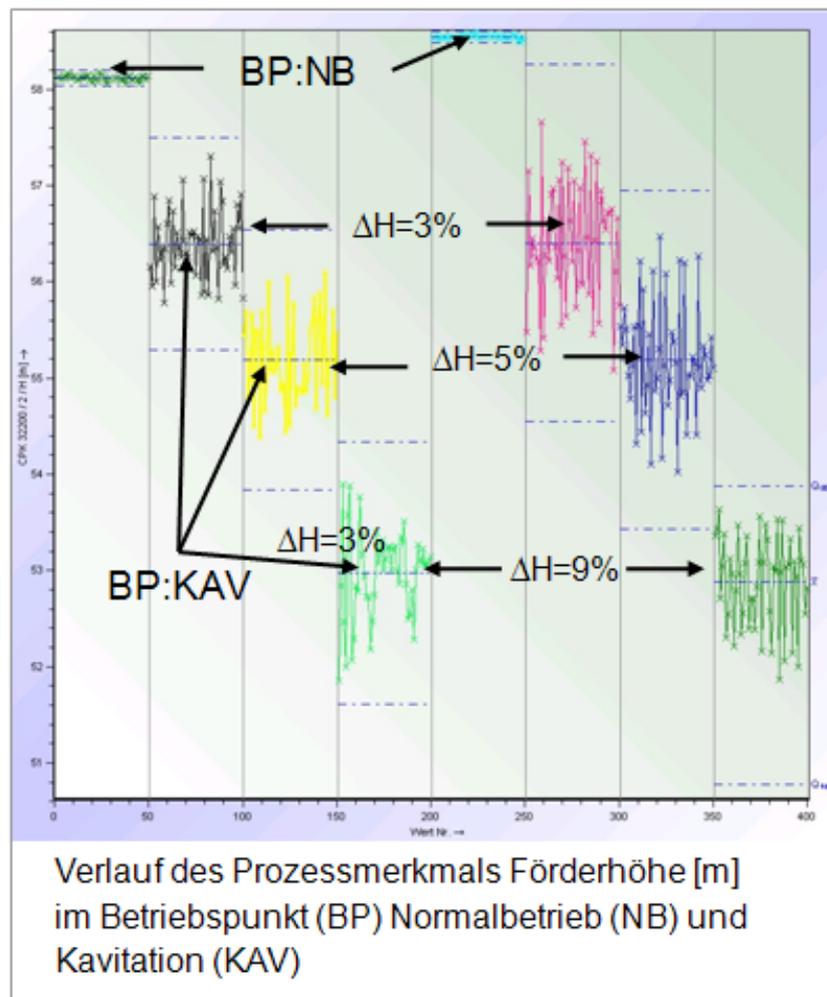


Abb. 38: Prozessmerkmal Förderhöhe, Versuch Kavitation und Normalbetrieb, Fördergrad $q = 1,0$

Ähnlich wie bei der Lagerschadenserkennung wurden drei Kenngrößen hinsichtlich ihrer Signifikanz verglichen. Gegenüber dem Normalbetrieb kann mit jeder der Kenngrößen Kavitation in unterschiedlichem Maß erkannt werden. Abhängig vom Fördergrad sind jedoch die absoluten Werte etwas verschoben:

Merkmal	Förderhöhenabfall			
	0%	3%	5%	9%
Kavitation	5 mg	140 mg	160 mg	180 mg
	5 mg	140 mg	175 mg	190 mg
Peak Max	1.800 mg	14.000 mg	16.000 mg	17.000 mg
	1.800 mg	14.000 mg	16.000 mg	18.000 mg
Betragsmittelwert der Schwingbeschleunigung	500 mg	2.400 mg	2.700 mg	2.900 mg
	500 mg	2.600 mg	2.750 mg	3.100 mg

Eine eindeutige Abgrenzung zwischen Normalbetrieb und Kavitationsbetrieb der Pumpe ist durch das Schwingungsmerkmal Peak Max möglich (vgl. Abb. 39).

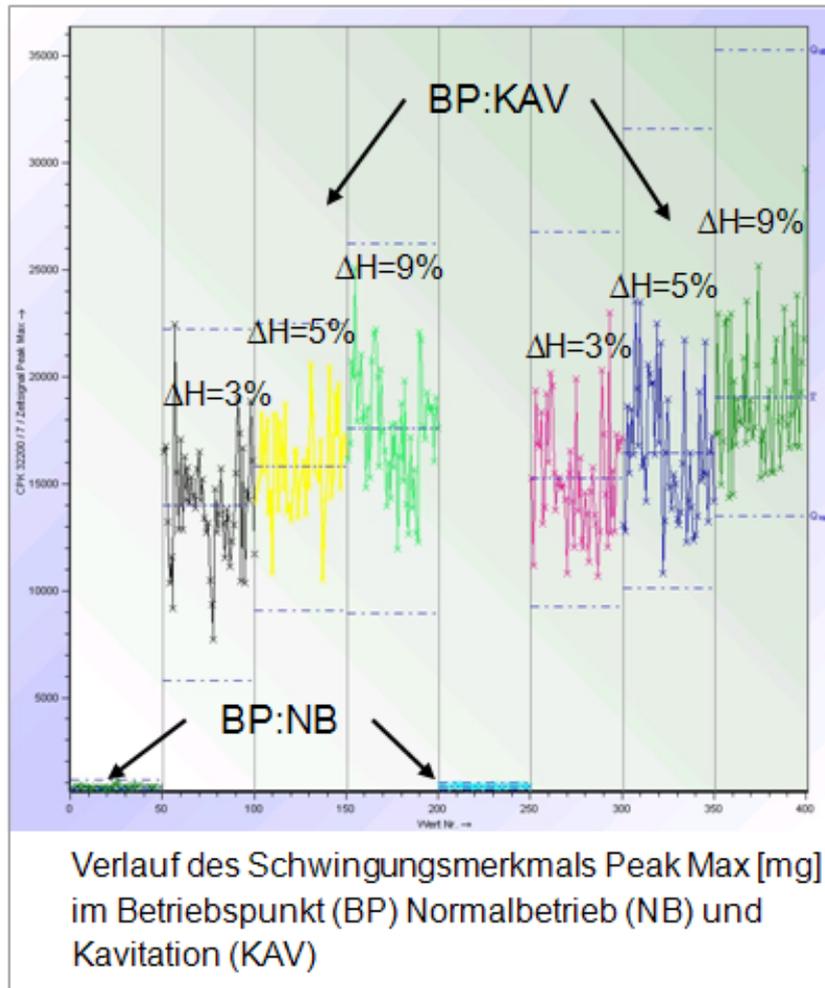


Abb. 39: Schwingungsmerkmal Peak Max, Versuch Kavitation und Normalbetrieb, Fördergrad $q = 1,0$

Aufgrund des zeitlich instabilen Zustands der Kavitation ist es schwer, nur mit Hilfe der Schwingungsdaten eine klare Abgrenzung der einzelnen Abstufungen vorzunehmen. Die Mittelwerte der gemessenen Daten in den jeweiligen Abstufungen steigen an. Das gleiche Verhalten zeigt sich auch im Schwingungsmerkmal Betragsmittelwert der Schwingbeschleunigung (vgl. Abb. 40). Hier kann ebenfalls eine klare Abgrenzung zum Normalbetrieb getroffen werden, eine Unterscheidung unterschiedlich starker Kavitation ist nur schwer möglich.

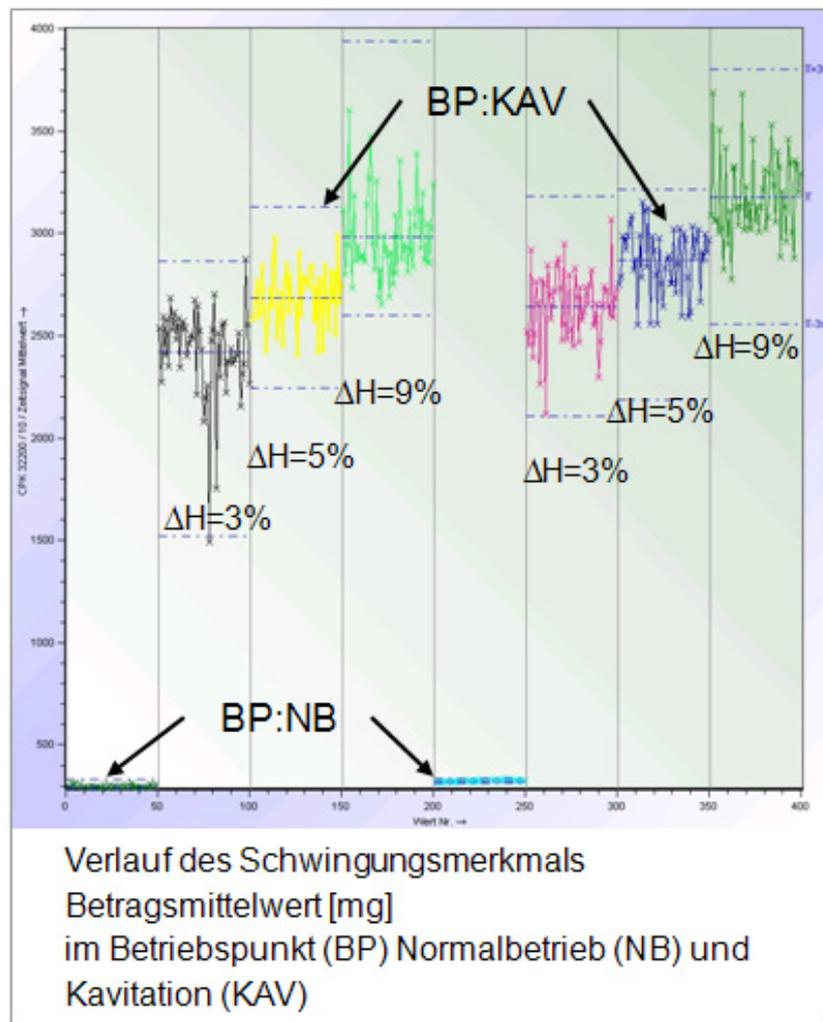


Abb. 40: Schwingungsmerkmal Average (Betragsmittelwert), Versuch Kavitation und Normalbetrieb, Fördergrad $q = 1,0$

Das Schwingungsmerkmal Kavitation (vgl. Abb. 41) zeigt dieselben Phänomene zuvor bereits beschriebener Schwingungsmerkmale.

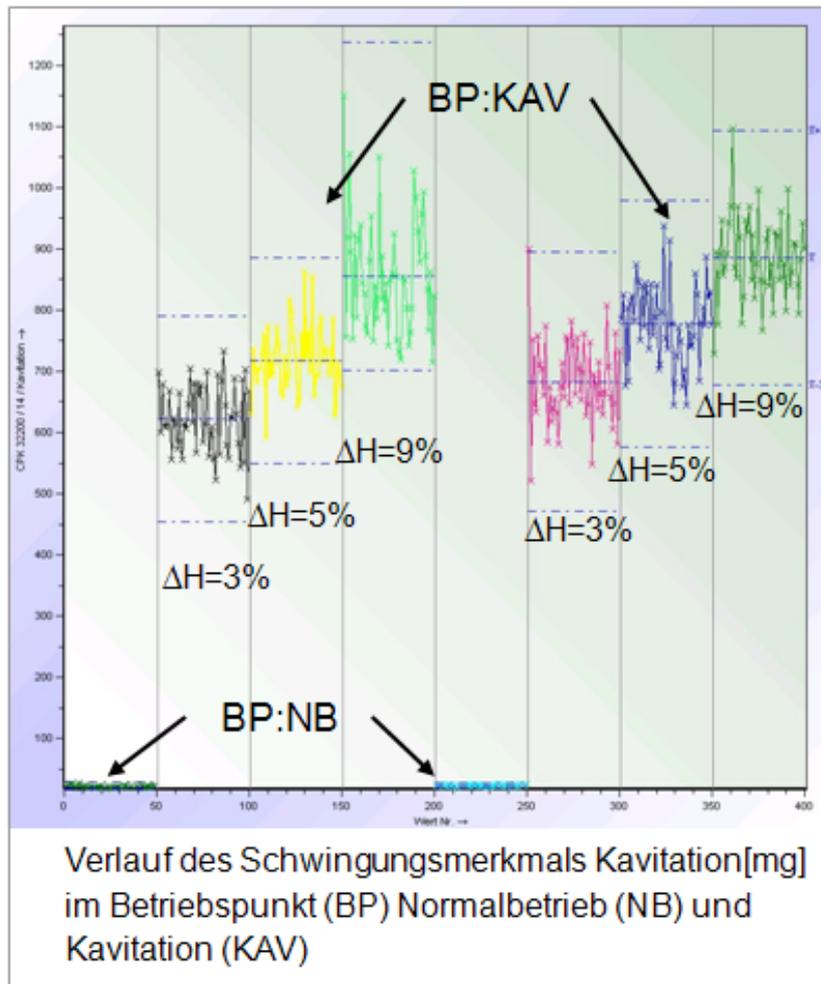


Abb. 41: Schwingungsmerkmal Kavitation, Versuch Kavitation und Normalbetrieb, Fördergrad $q = 1,0$

Die Kombination des Prozessmerkmals Förderhöhe (vgl. Abb. 38) mit den Schwingungsmerkmalen (vgl. bspw. Abb. 41) liefert eine sehr gute Beschreibung der Betriebsweise der Pumpe und lässt am Prüfstand auf die Störung Kavitation schließen.

Beispiel 2: Gasmitförderung im Punk $q = 1,0$

Bei diesem Versuch wurde die Pumpe im Wechsel mit Gasmitförderung sowie im Normalbetrieb gefahren und es wurden die Prozess- und Schwingungsmerkmale erfasst. Die Menge an mit gefördertem Gas wurde dabei schrittweise um 1 % angehoben (vgl. Abb. 42).

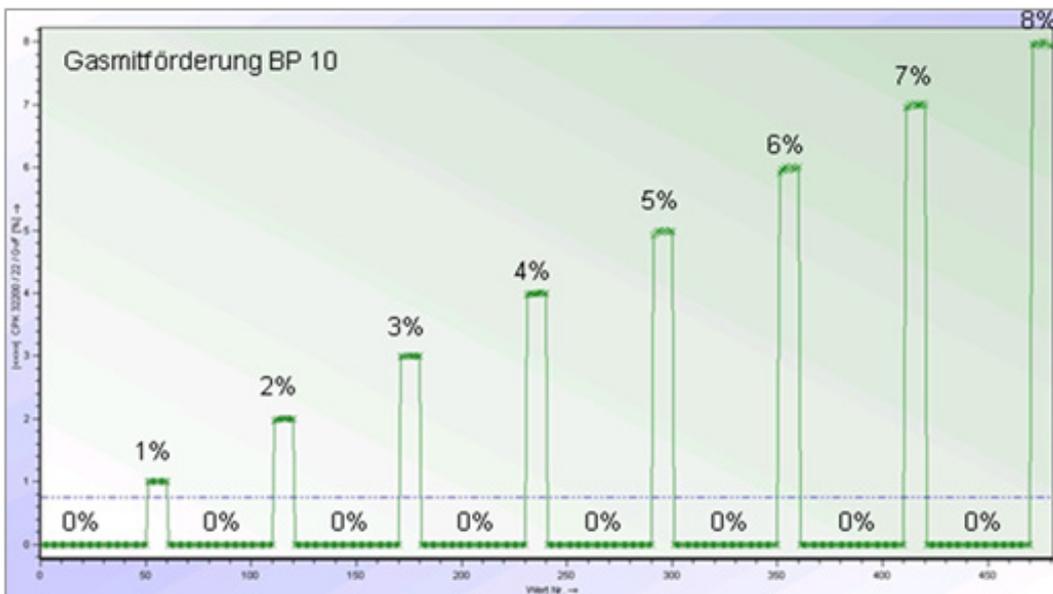


Abb. 42: Abstufungen Gasgehalt, Versuch Gasmitförderung, Fördergrad $q = 1,0$

Nachstehende Abbildung (vgl. Abb. 43) zeigt deutlich die Zunahme des Schwingungsmerkmals Peak Max mit steigender Gasmitförderung. Gleiches Verhalten lässt sich auch am Schwingungsmerkmal Average (vgl. Abb. 44) erkennen. Die Unterscheidung der einzelnen Ausprägungen wird mit zunehmender Gasmitförderung ungenauer.

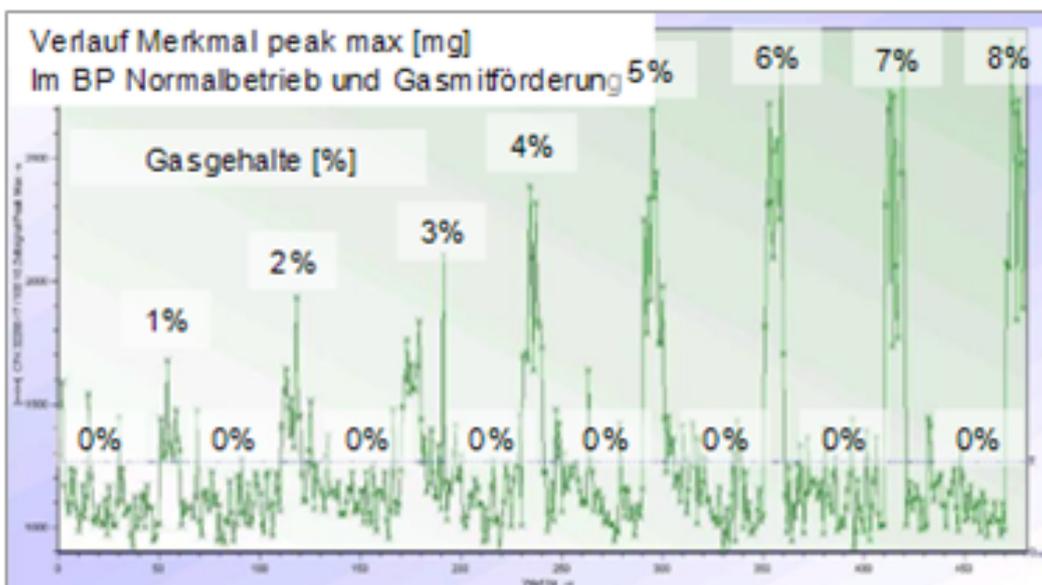


Abb. 43: Schwingungsmerkmal Peak Max, Versuch Gasmitförderung, Fördergrad $q = 1,0$

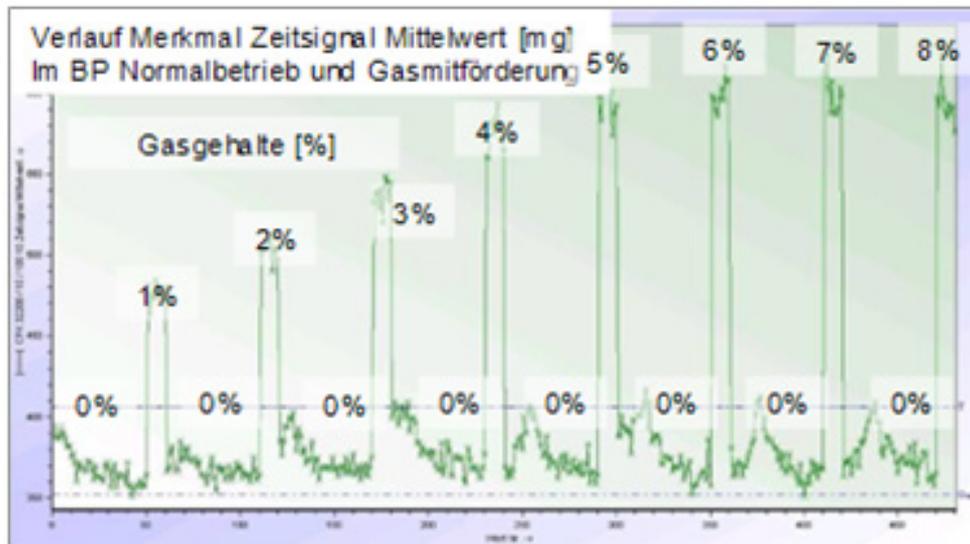


Abb. 44: Schwingungsmerkmal Average, Versuch Gasmitföderung, Fördergrad $q = 1,0$

Beim Vergleich der Schwingungsmerkmale mit den Prozessmerkmalen Förderstrom und Förderhöhe ist eine Abnahme der Förderhöhe (vgl. Abb. 45) bei gleich bleibendem Förderstrom zu erkennen. Während der Versuche wurde der Volumenstrom im Rahmen der Regel-toleranz konstant gehalten.

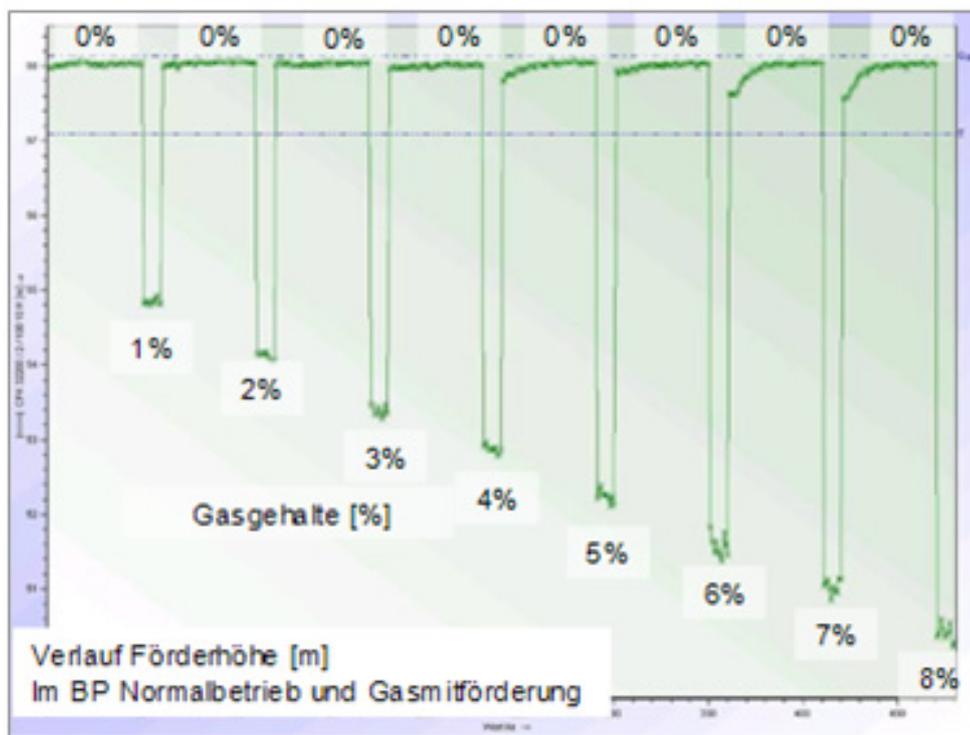


Abb. 45: Prozessmerkmal Förderhöhe, Versuch Gasmitföderung, Fördergrad $q = 1,0$

Durch Kombination der Schwingungsdaten mit den Prozessdaten ist am Prüfstand eine Aussage über den Betriebszustand Gasmitförderung möglich.

Direkter Vergleich der Versuchspumpen CPK 32-200 und CPK 40-160

Der direkte Vergleich beider Versuchspumpen auf dem Prüfstand zeigt deutlich den Baugrößeneinfluss auf das Schwingungsverhalten auf. Neben dem Normalbetrieb wirkt sich der Baugrößeneinfluss auch auf die untersuchten Störungen aus. Nachfolgendes Beispiel stellt die Störung Kavitation in $q = 1$ für beide Pumpen dar. In der ersten Zeile wird die Verteilung des Normalbetriebs aufgezeigt, in den weiteren Zeilen die Verteilung der Messwerte für Kavitation in Abstufungen des Förderhöhenabfalls $\Delta H = 3 \%$, $\Delta H = 5 \%$ und $\Delta H = 9 \%$. Dargestellt wird das Schwingungsmerkmal Kavitation. Die Darstellungen der Pumpen CPK 32-200 (vgl. Abb. 46) und CPK 40-160 (vgl. Abb. 47) sind identisch.

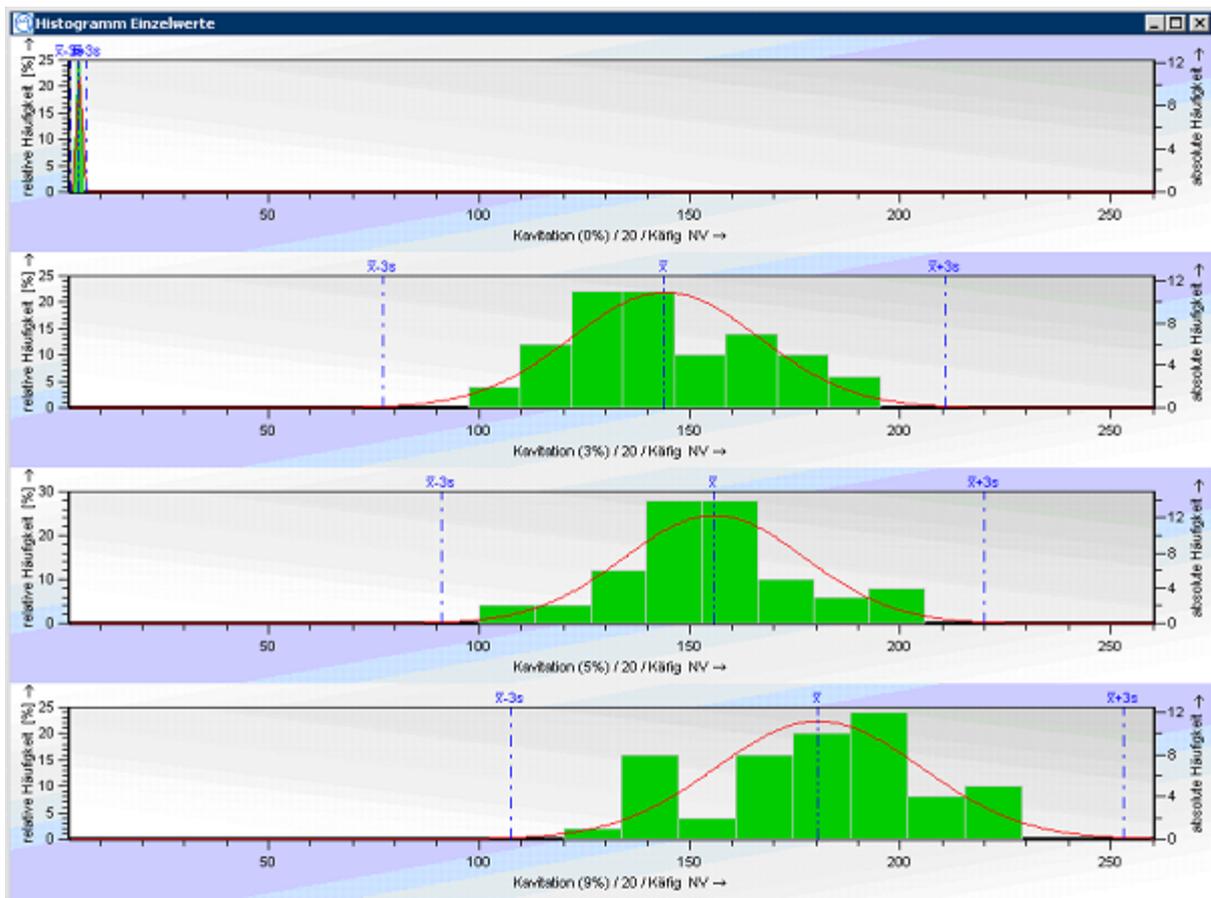


Abb. 46: Häufigkeitsverteilung des Schwingungsmerkmals "Kavitation" für Normalbetrieb und Kavitation mit 3 %, 5 % und 9 % Förderhöhenabfall, CPK 32-200, Fördergrad $q = 1,0$

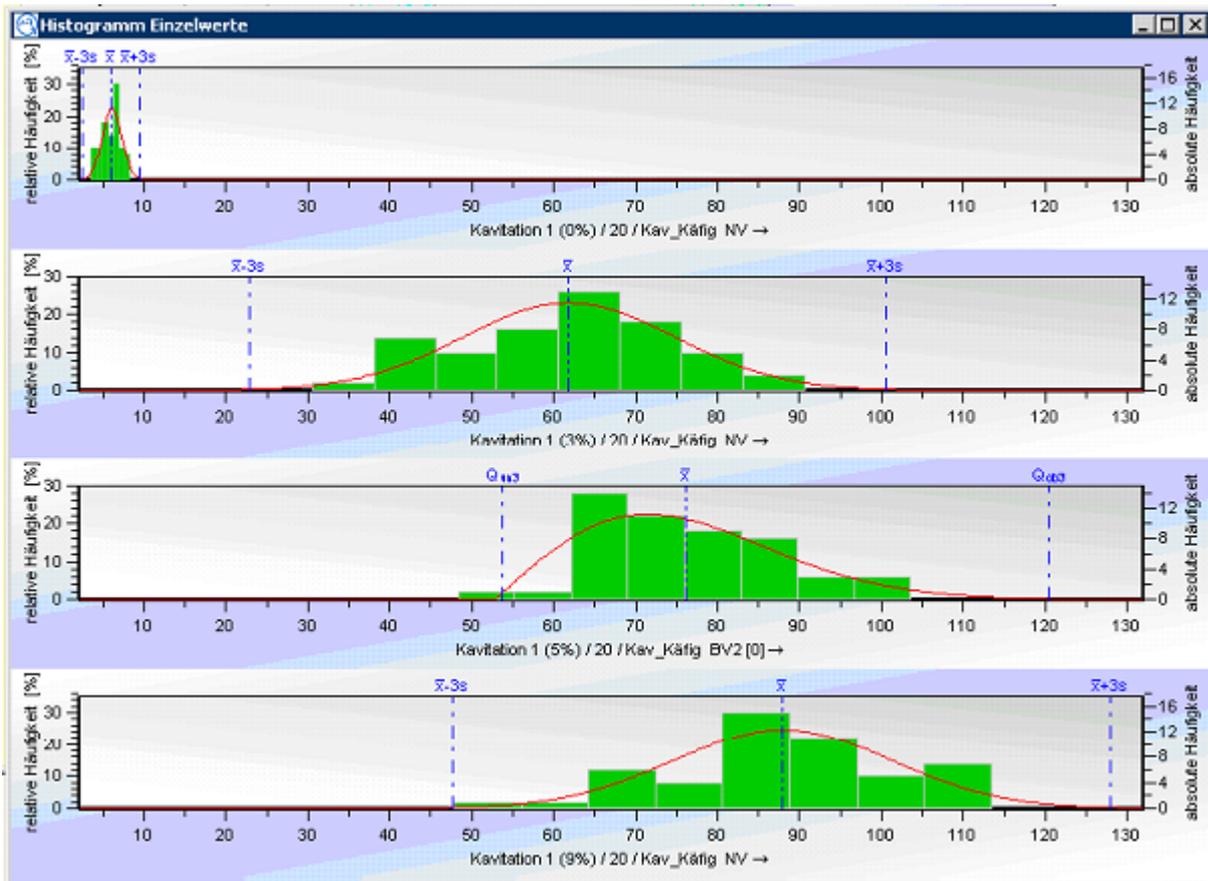


Abb. 47: Häufigkeitsverteilung des Schwingungsmerkmals "Kavitation" für Normalbetrieb und Kavitation mit 3 %, 5 % und 9 % Förderhöhenabfall , CPK 40-160, Fördergrad $q = 1,0$

In Abbildung 48 werden die beiden Pumpen in einem Diagramm gegenübergestellt. Zuerst wird der Normalbetrieb (Zeilen eins und zwei), anschließend das Schwingungsmerkmal Kavitation im Bereich $\Delta H = 3 \%$ (Zeilen drei und vier) dargestellt. Hier ist deutlich der Baugrößeneinfluss zu erkennen: Im Vergleich zur Störung (Kavitation) bewegt sich der Normalbetrieb beider Pumpen in einem ähnlichen Bereich, das Schwingungsverhalten beider Pumpen beim Betrieb in Störungen unterscheidet sich jedoch stark voneinander.

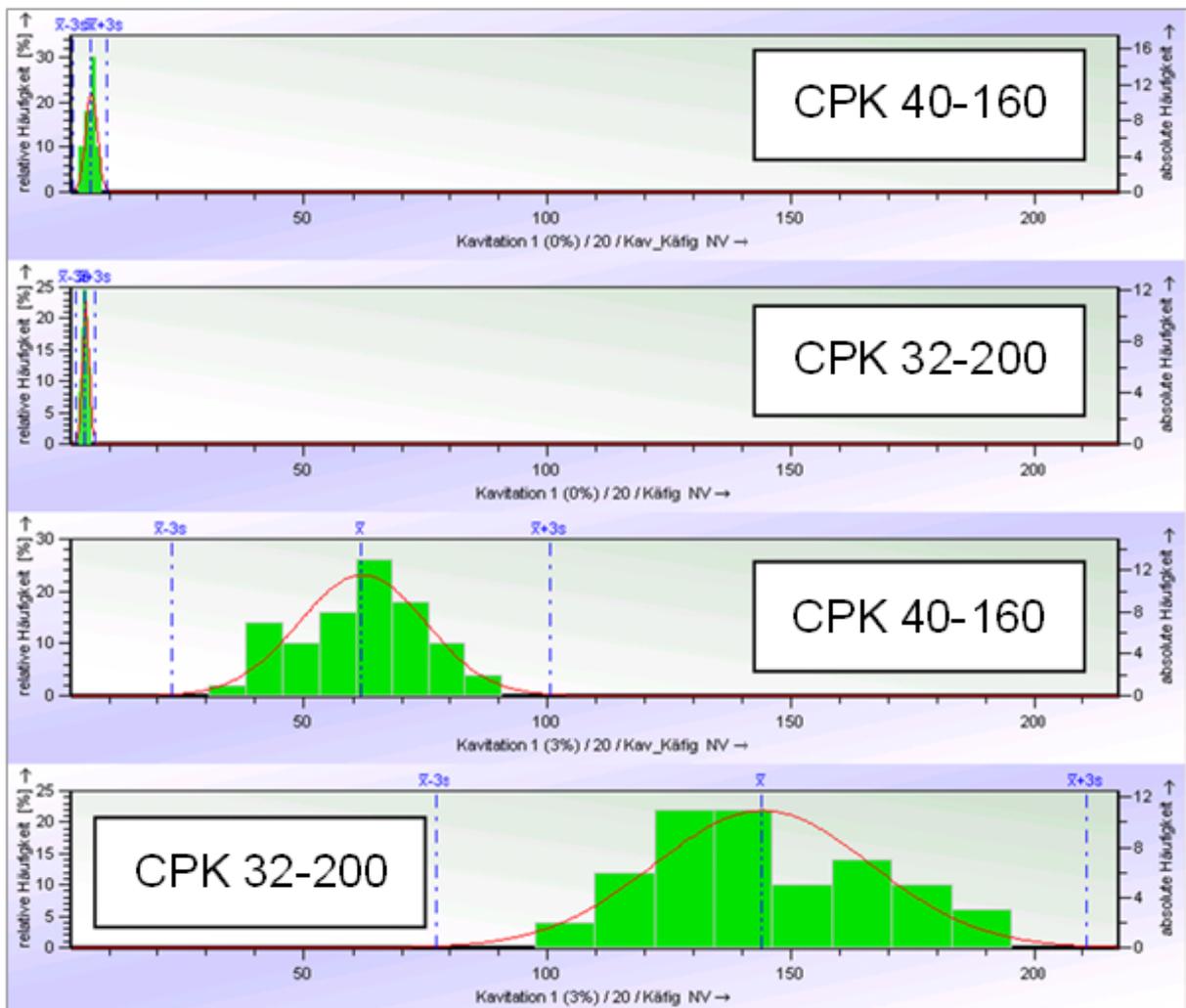


Abb. 48: Vergleich CPK 32-200 mit CPK 40-160, Fördergrad $q = 1,0$

Beispiel 3: Unwucht bei $q = 1,0$

Die Unwuchterkennung erfolgt schmalbandig bei Drehfrequenz des Pumpenrads. Für die Validierung der Unwuchterkennung wurde am Pumpenrad ein zusätzliches Gewicht von 8 g angebracht. Die Messung des Merkmals ergab einen Anstieg von 10 mg auf 75 mg bzw. von 0,3 mm/s auf 2,3 mm/s.

Um einen Betrieb mit einem nicht der Wuchtgüte für Pumpen entsprechenden Laufrad zu realisieren, wurde ein Laufrad manipuliert. Dazu wurden bei einem bestimmten Hebelarm Gewichte appliziert, was eine signifikante Verschiebung der Wuchtgüte zur Folge hatte (vgl. Abb. 49).

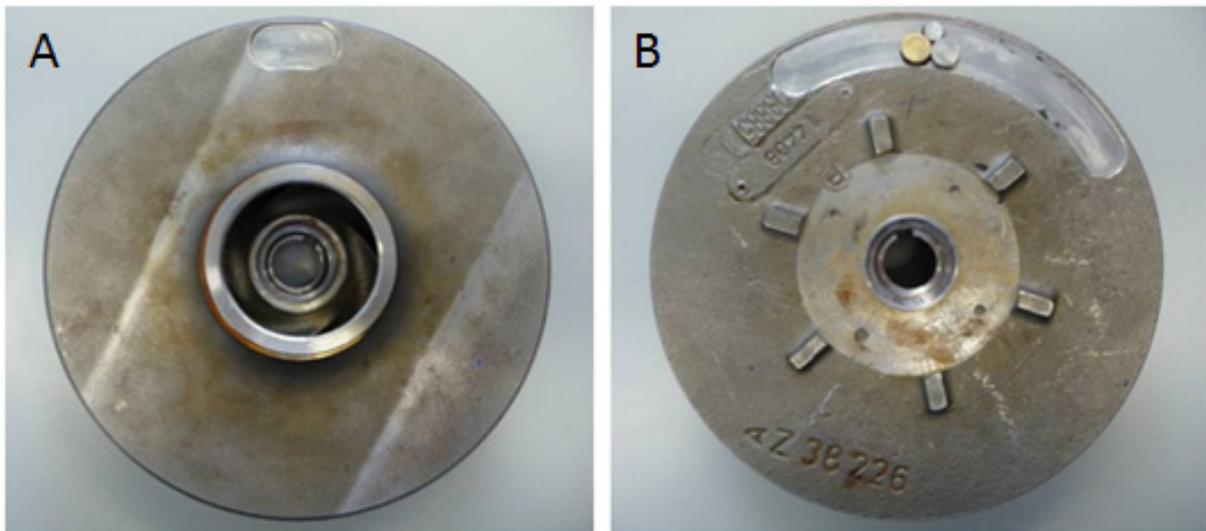


Abb. 49: Manipuliertes Laufrad, (A): Blick auf die Deckscheibe, (B): Blick auf die Tragscheibe
[Quelle: SAM]

Die Wuchtgüte G des Laufrads verschlechterte sich durch das Applizieren der Gewichte von G 6,3 auf G 40. Im Prüfstand konnte die Auswirkung der Unwucht sehr gut in der Veränderung der Schwingungsdaten erkannt werden, vergleiche hierzu das Beispiel Schwingungsmerkmal Unwucht in der nachfolgenden Abbildung 50.

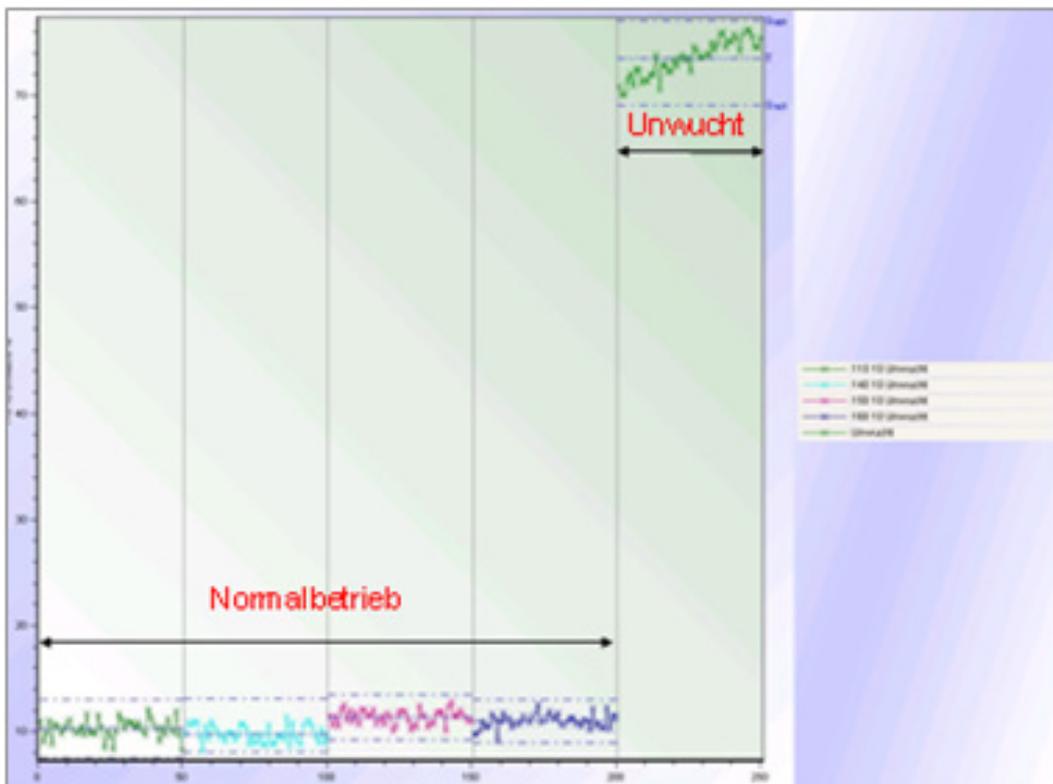


Abb. 50: Schwingungsmerkmal Unwucht, Vergleich Normalbetrieb – Unwucht

Die Überprüfung der Datenbank auf auffällige Pumpen mit überhöhtem Schwingungsmerkmal Unwucht ergab z. B. eine Pumpe der Baugröße 100-250. Die Antriebsdrehzahlen der Prüfstandpumpe und der Feldpumpe sind gleich hoch, der Volumenstrom im Punkt besten Wirkungsgrades unterscheidet sich jedoch signifikant für beide Pumpen, was sich durch die deutlich größere hydraulische Baugröße der Feldpumpe erklären lässt. Nachfolgend werden der Normalbetrieb sowie der Unwuchtbetrieb der Prüfstandpumpe mit der auffälligen Feldpumpe verglichen.

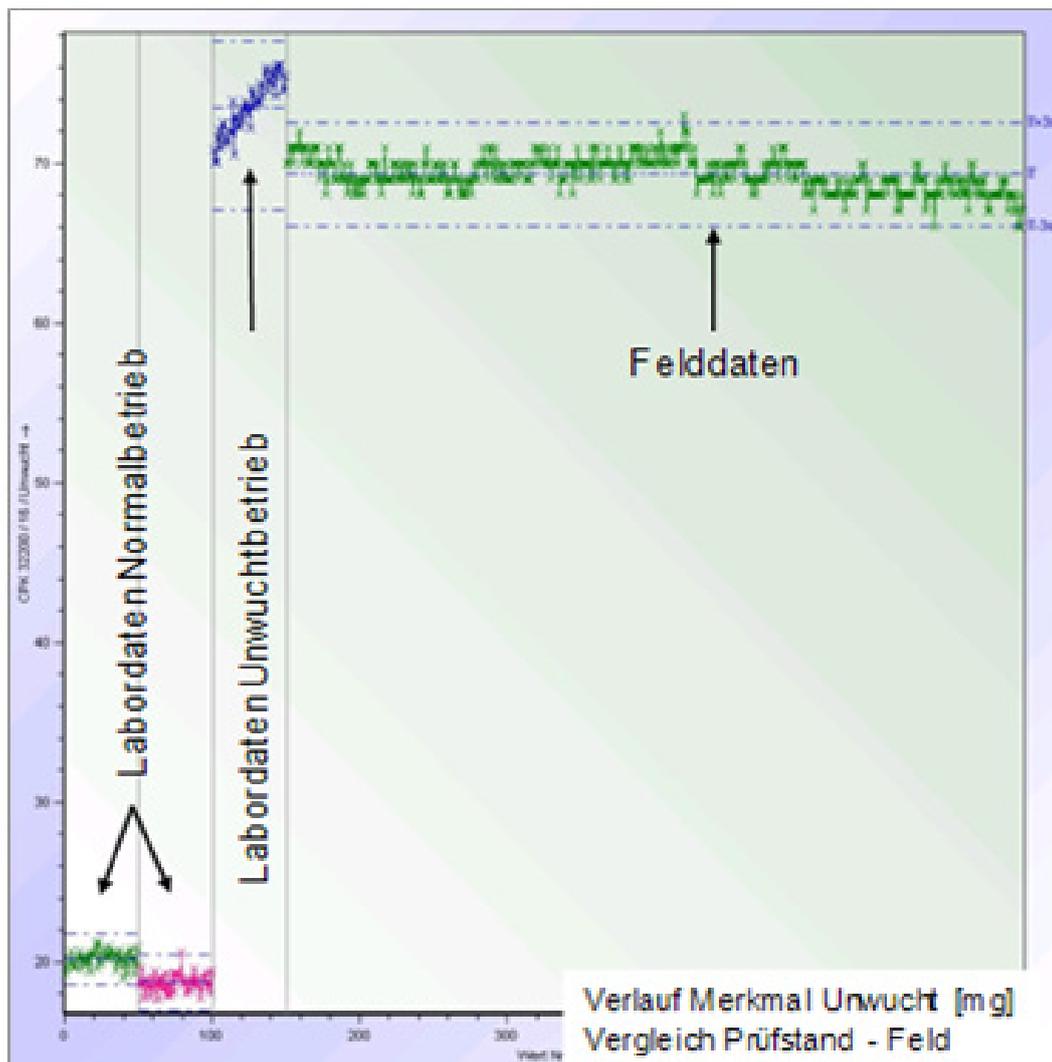


Abb. 51: Schwingungsmerkmal Unwucht, Vergleich Prüfstand-/Felddaten

Im Rahmen der begleitenden Prüfstandversuche wurden an den Pumpen weitere Störungen sowie verschiedene schädigende Betriebszustände simuliert, um deren Einfluss auf das Ausfallverhalten der Gleitringdichtung zu untersuchen.

5.2.5.3 Zusammenfassung

Durch die Kombination von Prozessgrößen (Drücke, Volumenströme, Leistungen etc.) mit Schwingungsmerkmalen (z. B. Kenngrößen aus der Schwingbeschleunigung der Pumpe) war es möglich, die untersuchten Störungen Kavitation, Gasmitförderung und Blockade für die Pumpen am Prüfstand zu detektieren.

Durch die Prüfstandversuche konnte der Baugrößeneinfluss auf das Schwingungsverhalten beider Prüfstandpumpen herausgearbeitet werden. Die Herausforderung für die Analyse der Felddaten bestand in der Datenauswertung für eine Pumpenbaureihe, die mit verschiedenen Fördermedien inklusive Temperaturschwankungen und bei unterschiedlichen Drehzahlen betrieben wurden.

5.3 Planung und Vorbereitung der Feldversuche

Im nachfolgenden Kapitel 5.3.1 werden zunächst die Kriterien vorgestellt, auf Basis derer 100 Pumpen in der Produktionsanlage des Projektpartners Evonik Stockhausen für die Feldversuche ausgewählt wurden. Die Kapitel 5.3.2 und 5.3.3 beschreiben den Instrumentierungsumfang der Versuchspumpen sowie die Gestaltung der für die Feldversuche und die Datensammlung und Datenauswertung notwendigen Infrastruktur. Anschließend wird in Kapitel 5.3.3.4 die Vorgehensweise erläutert, nach der der technische Zustand der Versuchspumpen zu Beginn der Feldversuche ermittelt wurde.

5.3.1 Auswahl der Versuchspumpen für die Feldversuche

Ausgehend von den Ergebnissen der Betreiberumfrage hat der Projektpartner Lehrstuhl SAM der TU Kaiserslautern die Auswahl von 100 Versuchspumpen beim Projektpartner Evonik Stockhausen im Chemiepark Marl auf Basis der folgenden Rahmenbedingungen durchgeführt:

Die *Bauart* der Versuchspumpen wurde festgelegt auf radiale und halbaxiale Kreiselpumpen in Prozessbauweise.

Innerhalb der mit der Betreiberumfrage erhobenen Pumpenpopulation überwiegen hinsichtlich der *Hydraulikgröße* kleine Nennweiten. Das entscheidende Kriterium für die Größenauswahl der Versuchspumpen ist die Verteilung der Baugrößen. Hier dominieren die Baugrößen 32-200, 32-250 und 50-200. Die Untersuchungen im Rahmen des Projekts fokussierten sich daher auf diese Hydraulikgrößen. Zusätzlich hat eine Kontrollgruppe größerer Baugrößen Berücksichtigung gefunden, um das Prognoseverfahren an großen Maschinen zu verifizieren und den Größeneinfluss auf das Verfahren zu untersuchen (vgl. Abb. 52).

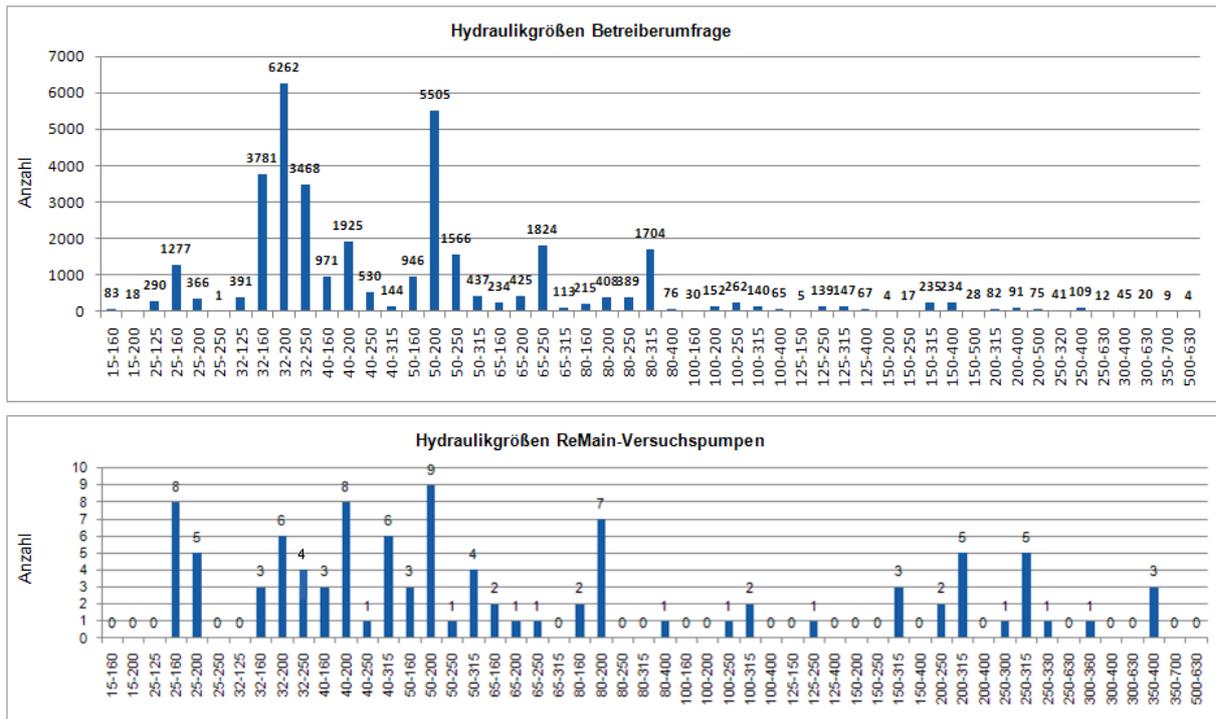


Abb. 52: Hydraulikgrößen

Hinsichtlich der *Kupplung* wurden im Rahmen der Untersuchungen ausschließlich Pumpen mit mechanischen Kupplungen (Klauenkupplung) betrachtet.

Für ein robustes und reproduzierbares Prognosemodell erstreckte sich die Kernausswahl der Versuchspumpen auf Kreiselpumpen mit *Gleitringdichtungen*. In Bezug auf die Häufigkeitsverteilungen sind die Fraktionen einfach- und doppelwirkende Gleitringdichtungen bei den Pumpenbetreibern des erweiterten Arbeitskreises annähernd gleich vertreten. Der für ReMain zur Verfügung stehende Maschinenpark umfasst überwiegend Maschinen mit doppelwirkenden Gleitringdichtungen. Um diesen vorhandenen Pool auch unter ökonomischen Aspekten bestmöglich zu nutzen, wurden die Untersuchungen auf Chemienormpumpen mit doppelwirkenden flüssigkeitgeschmierten Gleitringdichtungen fokussiert. Zwecks Untersuchung der Übertragbarkeit des Prognosemodells wurden die Versuchsmaschinen zusätzlich um eine kleinere Population mit einfachwirkenden Gleitringdichtungen erweitert (vgl. Abb. 53).

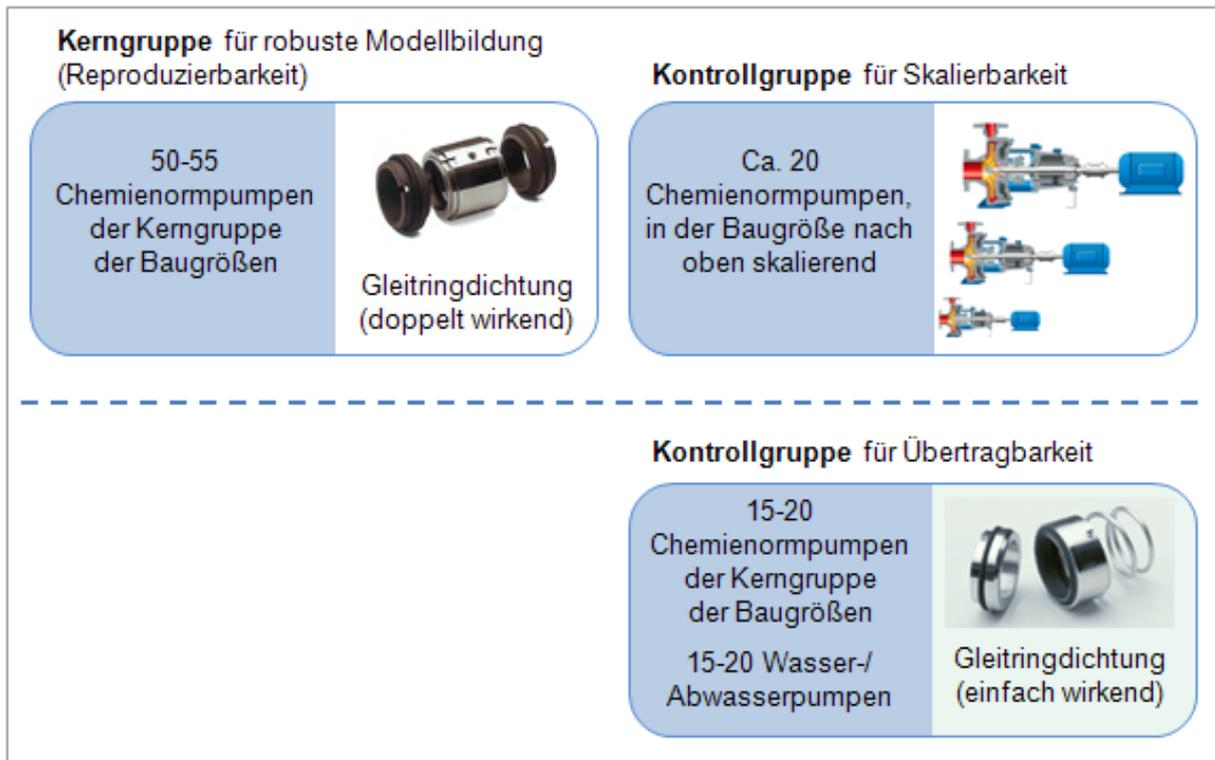


Abb. 53: Verteilung der Versuchspumpen hinsichtlich Baugröße und Dichtungsart

Insbesondere in der Chemiebranche und Verfahrenstechnik wird mit dem gleichen Pumpentyp eine Vielzahl unterschiedlicher Medien gefördert. Daher ist das *Fördermedium* das Kriterium, das die Versuchsbedingungen erheblich variiert. Fördermedien können hinsichtlich einer Vielzahl von Parametern wie Temperatur, Dichte/Viskosität, Siededruck, Volumenstrom, Mehrphasenförderung und Partikelbelastung variieren. Für ReMain war daher eine Beschränkung auf bestimmte Fördermedien nicht möglich.

Gemäß der Fragebogenergebnisse überwiegt bei den Pumpenbetreibern ein kontinuierlicher Betrieb der Pumpen. Für die Auswahl der Versuchspumpen folgte demzufolge die Konzentration auf eine kontinuierliche *Fahrweise*.

Bei den im Rahmen der Betreiberumfrage befragten Unternehmen sind drehzahlgeregelte Kreiselpumpen nur wenig verbreitet (2 %). Die Untersuchungen im Rahmen von ReMain fokussierten sich daher auf Pumpen *ohne Drehzahlregelung*. Entsprechend der Betreiberumfrage wurden vorzugsweise Pumpen mit der am häufigsten anzutreffenden Drehzahl 2.900 U/min betrachtet (vgl. Abb. 54).

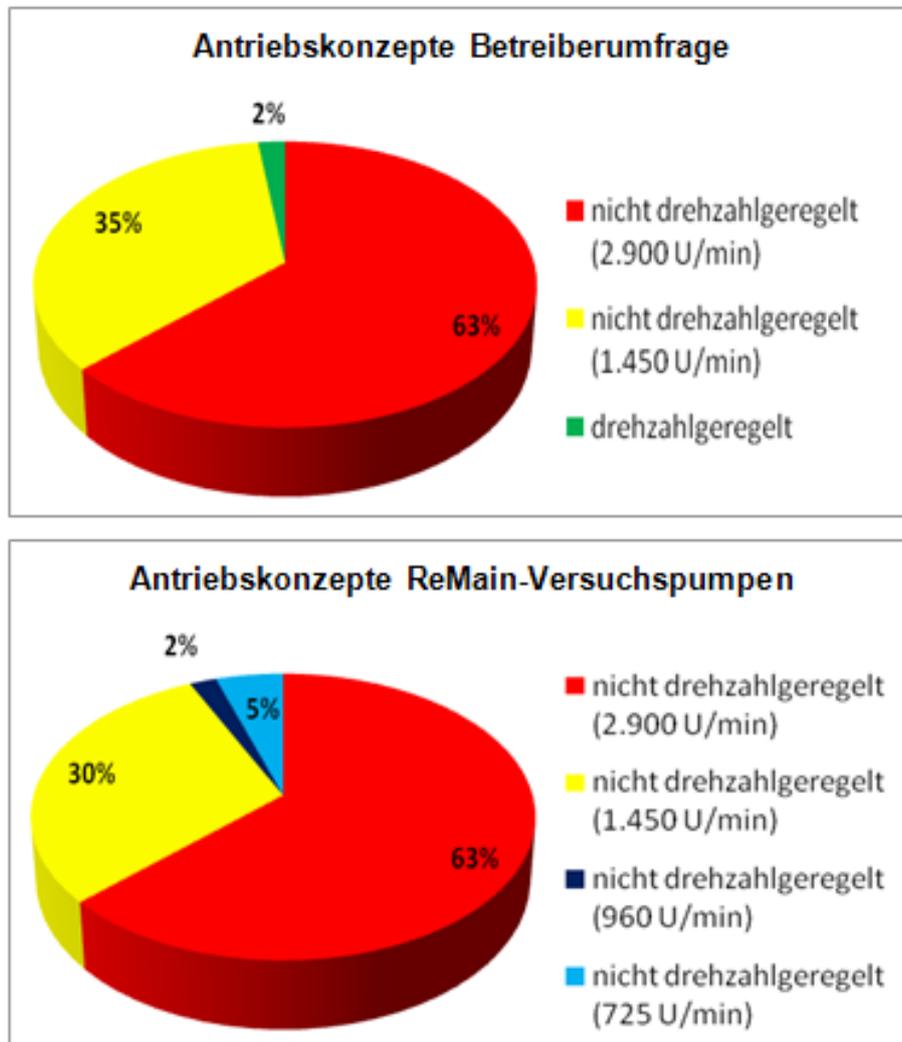


Abb. 54: Antriebskonzepte

Um einer der Reproduzierbarkeit abträglichen, breiten Streuung entgegenzuwirken, wurden Versuchspumpen mit ähnlichen hydraulischen *Geometrien* ausgewählt. Pumpen sind bau-reihenübergreifend nur bedingt vergleichbar, daher wurde für ReMain eine Konzentration auf eine Bauart vorgenommen.

Die 100 Versuchspumpen für das ReMain-Projekt wurden in der Acrylsäureanlage des Projektpartners Evonik Stockhausen am Standort Marl – als externe Prüfstände der TU Kaiserslautern – akquiriert.

5.3.2 Aufbau der Infrastruktur zur Datenerfassung: Überblick

Die ausgewählten Versuchspumpen wurden gemäß den in Kapitel 5.2 beschriebenen Anforderungen mit Messtechnik und Sensorik ausgestattet, um eine kontinuierliche Datensammlung und die Generierung eines umfangreichen Datenpools für die Modellentwicklung zu ge-

währleisten. Die nachfolgende Abbildung gibt einen Überblick über den Instrumentierungsumfang und die Gestaltung der Infrastruktur.

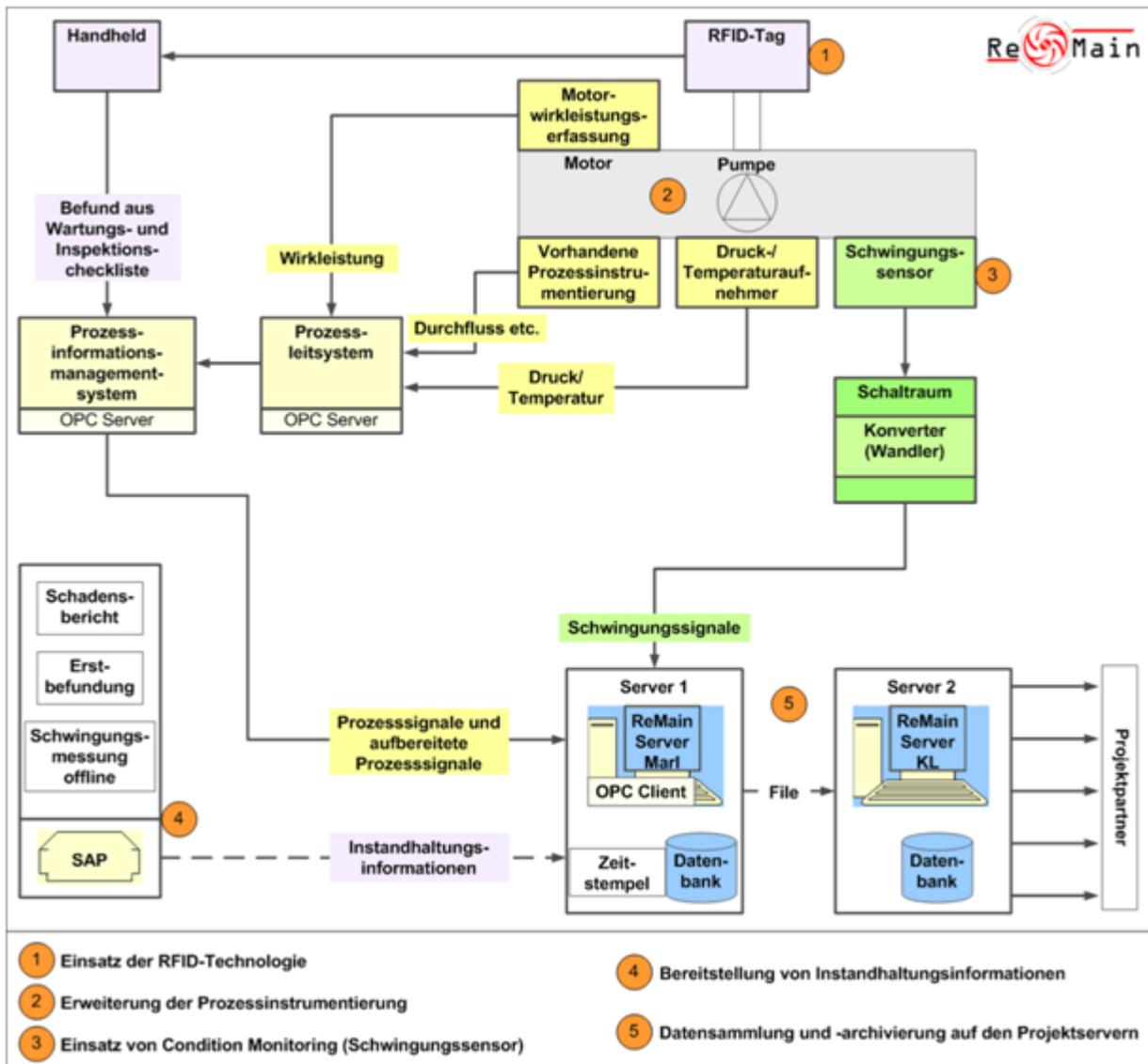


Abb. 55: Schematischer Aufbau der Infrastruktur zur Datensammlung

1) Einsatz der RFID-Technologie

Die Beobachtungen der Instandhalter bei ihren regelmäßigen Anlagenrundgängen (Wartungs- und Inspektionsrundgänge) sind wichtige Informationsquellen. Hierdurch können sowohl Veränderungen an der Pumpe selbst als auch Änderungen der Betriebszustände und der Umweltbedingungen erfasst werden. Für die Auswertung der Informationen aus den Anlagenrundgängen ist eine einheitliche und systematische Erfassung notwendig. Die Umsetzung im ReMain-Projekt erfolgte derart, dass die Daten mobil auf Basis der RFID-Technologie (Radio-Frequenz-Identifikation) erfasst wurden und anschließend über eine Do-

cking-Station vom Lesegerät in das Prozessinformationsmanagementsystem geladen wurden (vgl. Kapitel 5.3.3.1).

2) Erweiterung der Prozessinstrumentierung

Alle 100 Versuchspumpen wurden über die in der Acrylsäureanlage bereits vorhandene Prozessinstrumentierung hinaus mit zusätzlicher Messtechnik (Saug- und Enddruck, Temperatur des Fördermediums, Motorwirkleistung Siemens Simocode) ausgestattet (vgl. Kapitel 5.2.4). Die Messwerte gehen in das Prozessleitsystem ein und werden langfristig im Prozessinformationsmanagementsystem archiviert.

3) Einsatz des Schwingungssensors efector octavis

Über den auf dem Pumpengehäuse angebrachten Schwingungssensor efector octavis des Projektpartners i-for-t werden Messgrößen erfasst, die das Schwingungsverhalten der Pumpen charakterisieren. Der Sensor erfasst kontinuierlich die Schwingbeschleunigung an der Pumpenoberfläche und errechnet aus den erfassten Werten die Amplituden der Schadensfrequenzen von bis zu fünf verschiedenen Diagnoseobjekten. Für ReMain wurde der Sensor so parametrierung, dass sowohl der technische Zustand bestimmter ausfallkritischer Pumpenbauteile (Beispiel Wälzlager: Diagnose des Lagerzustands aus den Amplituden der Schadensfrequenzen für den Innenring, Außenring und die Wälzkörper) als auch mechanische Störungen (z. B. Unwucht) und ein nicht bestimmungsgemäßer Betrieb (z. B. unzulässige Kavitation) diagnostiziert werden können (vgl. Kapitel 5.2.4 und 5.2.5).

4) Bereitstellung von Instandhaltungsinformationen

Für die Datenauswertung wurden verfügbare Maschinenhistorien in Form von Schadensberichten bereitgestellt. Über die Berichte ist die schädigungsrelevante Vorgeschichte der Versuchspumpen grundsätzlich bekannt (vgl. Kapitel 5.4.1).

Ein einheitlicher, definierter Ausgangszustand konnte aus wirtschaftlichen Gründen nicht für alle Versuchspumpen hergestellt werden. Daher wurden im Projekt (Erst-) Befundungen durchgeführt, um für einige Pumpen den technischen Zustand zu Versuchsbeginn, für andere den Zustand zum Zeitpunkt der ersten Instandsetzung in der Pumpenwerkstatt, möglichst genau zu ermitteln (vgl. Kapitel 5.3.3.4).

Darüber hinaus wurden die Ergebnisse einer diskontinuierlichen Schwingungsmessung, die in regelmäßigen Abständen an 12 (nicht redundanten) Versuchspumpen durchgeführt wird, ebenfalls bereitgestellt. Für die Beurteilung des Ist-Zustands der Pumpen werden die auf dem Pumpengehäuse aufgenommenen Schwingungen mit Referenz-Messungen bzw. den

vorherigen Messungen verglichen. In den zugehörigen Berichten werden bspw. die höchsten gemessenen Werte oder Grenzwertüberschreitungen dokumentiert.

5) Datensammlung und -archivierung auf den Projektservern

Alle Informationen, Messgrößen und Merkmale wurden auf einem projekteigenen Server in Marl gesammelt, archiviert und in regelmäßigen Abständen auf einen weiteren Projekt-Server, der bei der TU Kaiserslautern eingerichtet wurde, transferiert. Von dort konnte allen Projektpartnern der Zugriff auf den Datenpool zur Datenauswertung und Modellentwicklung gewährt werden (vgl. Kapitel 5.3.3.3).

5.3.3 Aufbau der Infrastruktur zur Datenerfassung: Umsetzung

Der oben beschriebene Instrumentierungsumfang und die Gestaltung der Infrastruktur werden nachfolgend im Detail erläutert.

5.3.3.1 Einsatz der RFID-Technologie bei den Wartungs- und Inspektionsrundgängen

Die Beobachtungen der Instandhalter bzw. Betriebstechniker bei ihren regelmäßigen Anlagenrundgängen (Wartungs- und Inspektionsrundgänge) sind wichtige Informationsquellen. Hierdurch können sowohl Veränderungen an den Pumpen selbst als auch Änderungen der Betriebszustände und der Umweltbedingungen erfasst werden, die eine Veränderung der Messwerte erklären können.

In der Regel werden die Anlagenrundgänge in regelmäßigen Abständen, nicht jedoch werktäglich, durchgeführt. Dabei begehen die Mitarbeiter feste, vordefinierte Wege in der Anlage. Die Vor-Ort-Bedingungen an den Pumpen werden erfasst, aber ohne eine einheitliche Systematik aufgezeichnet und archiviert. Da die Anlagenrundgänge von unterschiedlichen Mitarbeitern durchgeführt werden, ist eine einheitliche und systematische Erfassung der Informationen jedoch eine notwendige Voraussetzung für eine konsistente Datenbasis und die Auswertung der aufgenommenen Informationen.

Um eine einheitliche und systematische Informationserfassung zu gewährleisten, wurden für ReMain die Beobachtungen werktäglich aufgenommen und mobil unter Einsatz der RFID (Radio-Frequenz-Identifikation)-Technologie verwechslungssicher zur richtigen Pumpe zugeordnet (vgl. Abb. 56). Dafür wurde ein passiver RFID-Tag an den Vor-Ort-Steuereinrichtungen (Ein-/ Aus-Schalter) der Pumpen montiert. Über das Funksignal des (explosions-geschützten) Lesegeräts werden die Tags angesprochen und die Pumpen über die auf den Tags hinterlegten technischen Nummern eindeutig identifiziert. Verwechslungen

und damit eine falsche Zuordnung der aufgenommenen Beobachtungen zu den Pumpen sind somit ausgeschlossen.

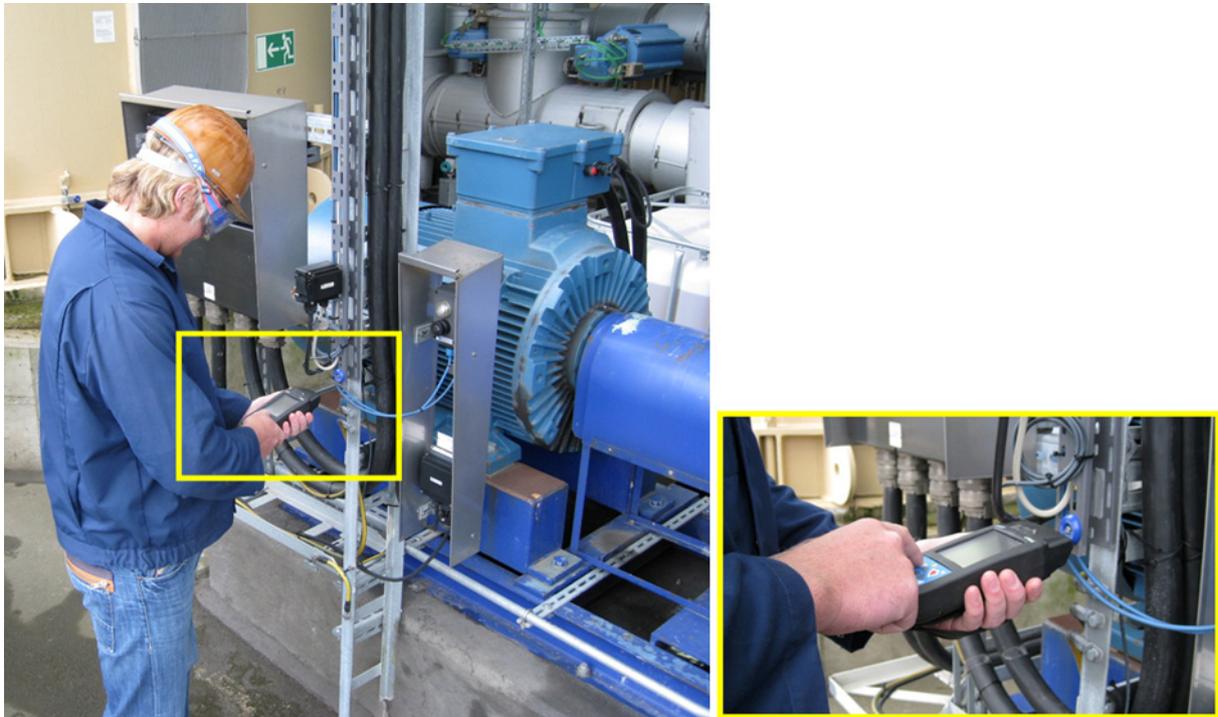


Abb. 56: Erfassung von Instandhaltungsinformationen unter Einsatz der RFID-Technologie

Sobald die Tags über das Funksignal des Lesegeräts angesprochen werden, wird der der jeweiligen Pumpe zugehörige Wartungs- und Inspektionsplan aufgerufen. Die für ReMain entwickelten Pläne sind pumpenspezifisch und ermöglichen die Eingabe der Vor-Ort-Bedingungen an den Pumpen und der durchgeführten Tätigkeiten (vgl. Abb. 57). Eingabemöglichkeiten zum Füllstand des Thermosiphonbehälters bspw. werden je nach Pumpentyp bzw. Art des Gleitringdichtungssystems abgefragt. Andere Merkmale werden bei jeder Pumpe abgefragt, z. B. Geräusche an Pumpe und Motor, erkennbare Leckagen und Schwingungen sowie Nachfüllung des Thermosiphonbehälters. Eingetragen in den mobilen Wartungs- und Inspektionsplan werden sowohl konkrete Werte (bspw. Nachfüllmenge des Thermosiphonbehälters) als auch Ja-/ Nein-Angaben (bspw. Geräusche). Dabei sind die im Lesegerät einzutragenden Werte bereits vordefiniert (bspw. 0 bis 10 Liter bei Nachfüllung des Thermosiphonbehälters), so dass eine falsche Eingabe von bspw. 100 Litern nicht möglich ist.

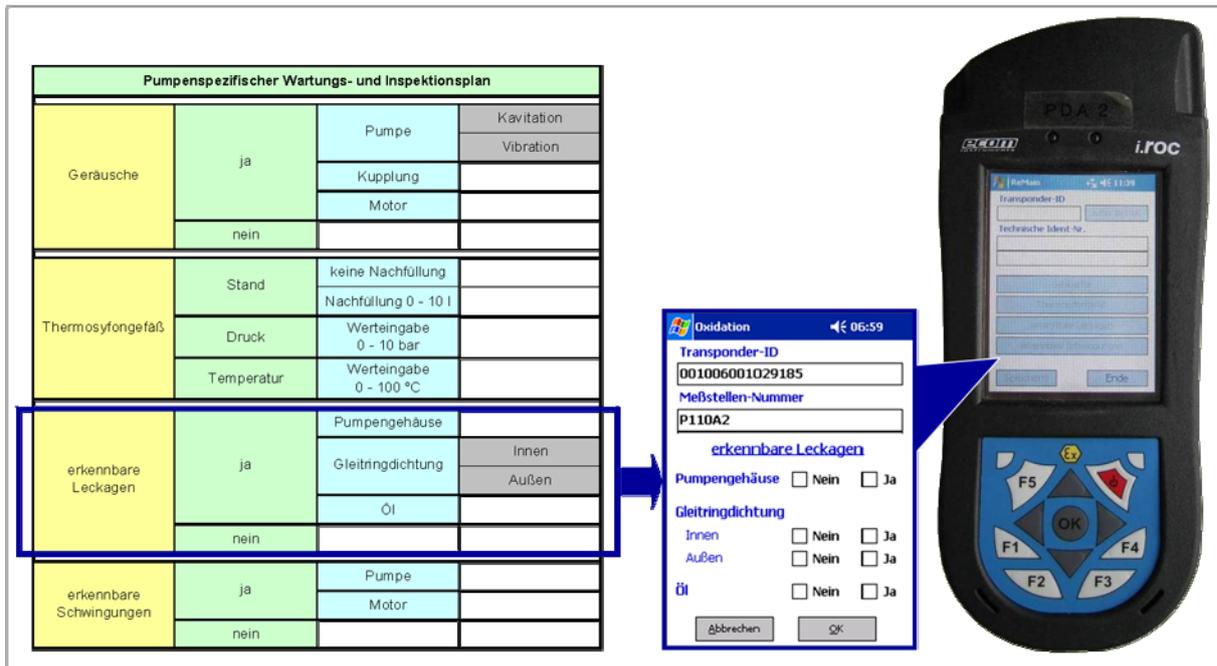


Abb. 57: Systematik für die pumpenspezifischen Wartungs- und Inspektionspläne

Sobald die Eingaben je Pumpe bestätigt werden, erzeugt das Lesegerät automatisch den zugehörigen Zeitstempel (d. h. Datum der Anlagenbegehung). So konnten die Beobachtungen aus den Anlagenbegehungen bei der Datenauswertung gut mit an anderer Stelle (bspw. über die Prozessinstrumentierung oder den Schwingungssensor) erkennbaren Ereignissen an den Versuchspumpen in Verbindung gebracht werden.

Nach Beendigung eines Anlagenrundgangs wird vom Lesegerät geprüft, ob alle Versuchspumpen bearbeitet wurden. Gegebenenfalls erscheint eine Liste der noch zu bearbeitenden Pumpen. So kann sichergestellt werden, dass alle Pumpen bzw. Prüfstellen inspiziert wurden. Anschließend werden die aufgenommenen Beobachtungen über eine Docking-Station aus dem Lesegerät in eine dafür angelegte Tabelle im Prozessinformationsmanagementsystem geladen. Diese Tabelle ist analog der Systematik der Wartungs- und Inspektionspläne strukturiert und beinhaltet die Ja-/ Nein-Angaben als binäre Ziffern (Ja = 1; Nein = 0), die konkreten Werte sowie den Zeitstempel der Anlagenbegehung. Für die Datenauswertung wurde die Tabelle in regelmäßigen Abständen auf die Projekt-Server in Marl und Kaiserslautern transferiert und archiviert.

5.3.3.2 Installation und Inbetriebnahme der Sensorik und Messtechnik

Die Feldversuche werden in der Acrylsäureanlage – einer großtechnischen Chemieanlage unter den Betriebsbedingungen des Explosionsschutzes – durchgeführt. Hier sind bei der In-

Installation und Inbetriebnahme der Sensorik und Messtechnik die entsprechenden Vorschriften zu beachten und der Produktionsbetrieb nicht zu behindern. Die einschlägigen Vorschriften zum Arbeiten in explosionsgefährdeten Bereichen sowie die allgemeinen und betriebs-spezifischen Arbeitsschutzvorschriften sind einzuhalten. Die Inbetriebnahme erfolgt grundsätzlich erst nach vorheriger Abnahme der Installation. Nach Prüfung und Abnahme wird die Prozessmesstechnik von Pumpe zu Pumpe zugeschaltet, im Prozessleitsystem angemeldet und auf korrekte Zuordnung geprüft. Im Bedarfsfall kann durch Simulation von Sensorsignalen die Kalibrierung und Zuordnung von Signalen überprüft werden.

Um negative Folgen für die laufende Produktionsanlage zu vermeiden, müssen die Arbeitsschritte, in denen in das Prozessleitsystem bzw. das Prozessinformationsmanagementsystem eingegriffen wird oder Einbindungen durchgeführt werden, mit dem Anlagenbetreiber genau abgestimmt und terminlich koordiniert werden. Des Weiteren müssen, da prozessbedingt vertrauliche Informationen verarbeitet werden, diese entsprechend abgesichert werden und nur die selektierten Daten zur Zustandsüberwachung weitergegeben werden.

Die Schwingungsdiagnosesensoren efector octavis werden an einer von der TU Kaiserslautern vorgegebenen Stelle auf dem Pumpengehäuse über metallische (aufgeklebte) Träger angebracht (vgl. Abb. 58). Während die Messwerte der Prozessmesstechnik über das Prozessleitsystem bzw. das Prozessinformationsmanagementsystem zum projekteigenen Server in Marl übermittelt werden, werden die Merkmale der Schwingungssensoren direkt zum Projekt-Server in Marl übertragen.



Abb. 58: Schwingungssensor auf Pumpengehäuse

5.3.3.3 Datenfluss und Datensammlung

Prozessleitsystem und Prozessinformationsmanagementsystem

Für ReMain wurden die Versuchspumpen über die in der Acrylsäureanlage bereits vorhandene Instrumentierung hinaus mit umfangreicher Prozessmesstechnik ausgerüstet. Dazu gehört die Installation von jeweils 100 Druckmessumformern auf der Saugseite der Pumpen sowie Messtechnik zur Erfassung der Motorwirkleistung. Zusätzlich wurden bei einigen Versuchspumpen bereits vorhandene Messtechniken zur Erfassung des Enddrucks der Pumpen und der Temperatur der Fördermedien auf alle Pumpen ausgeweitet.

In Abhängigkeit der Änderungsgeschwindigkeit der jeweiligen Messwerte werden die Messstellen in kurzfristigen Zeitabständen abgetastet. Die Messwerte gehen in ihrer Rohform zunächst ins Prozessleitsystem (PLS) ein (vgl. Abb. 55). Das PLS dient zum Regeln und Steuern der Prozesse in der Acrylsäureanlage: Veränderungen in den Messwerten werden angezeigt und ermöglichen bei Bedarf den sofortigen Eingriff durch den Leitstandfahrer. Aufgrund der hohen Abtastraten der Messstellen laufen im PLS sehr große Datenmengen auf. Da keine Datenkompression stattfindet, ist im PLS lediglich eine kurzzeitige Datenspeicherung möglich.

Die Messwerte werden in regelmäßigen Abständen vom PLS ins Prozessinformationsmanagementsystem (PIMS) übermittelt (vgl. Abb. 55). Das betrifft nicht nur die Messwerte der für ReMain nachgerüsteten Messtechnik (Saug- und Enddruck, Temperatur des Fördermediums, Motorwirkleistung), sondern auch die Werte bereits vorhandener Messtechnik (bspw. Durchfluss), die im Projekt ebenfalls genutzt werden. Auch die bei den werktäglichen Anlagenrundgängen mittels RFID-Technologie aufgenommenen Informationen werden ins PIMS übertragen (vgl. Kapitel 5.3.3.1). Im PIMS ist im Gegensatz zum PLS eine langfristige Datenspeicherung möglich. Mit Hilfe eines Komprimierungsalgorithmus wird die Anzahl der Messwerte verringert, so dass die so verdichteten Messwerte langfristig in der Datenbank des PIMS gespeichert werden können. Über den Komprimierungsalgorithmus wird genau dann ein neuer Wert abgespeichert, wenn sich dieser in einem festgelegten Maß von dem vorherigen unterscheidet. Spätestens jedoch jede Stunde wird ein neuer Wert gespeichert, auch wenn dieser sich gegenüber dem vorherigen nicht gemäß dem festgelegten Maß verändert hat. So werden pro Tag mindestens 24 Werte je Messstelle gespeichert (ein Messwert pro Stunde), in der Regel entstehen aber ungefähr 200 Messwerte pro Tag.

Während das PLS zum Regeln und Steuern dient, dient das PIMS zur Datenaufbereitung und Datenanalyse. Über bestimmte Module (bspw. SQL-Plus, Graphics Editor und Process Explorer) können individuelle Darstellungen einzelner Anlagenkomponenten, Anlagenteile

oder der Gesamtanlage erzeugt und visualisiert werden. Darüber hinaus können nicht nur die Messwerte aus dem PLS dargestellt werden, es können auch neue Variablen bzw. Tags berechnet und grafisch abgebildet werden (vgl. Abb. 59).

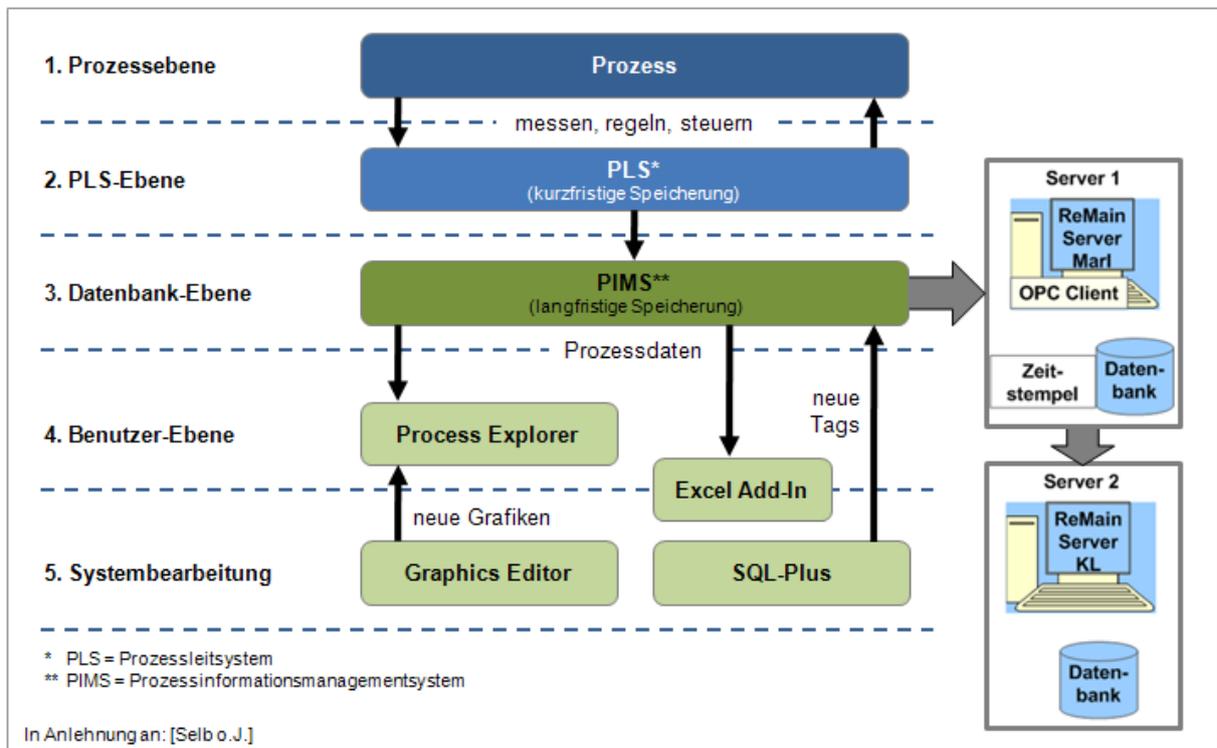


Abb. 59: Funktionalitäten und Datenfluss: PLS, PIMS und Projekt-Server

Projekt-Server Marl

Alle für die Datenauswertung relevanten Messwerte, berechneten Tags und Informationen aus den Anlagenrundgängen werden vom PIMS auf einen projekteigenen Server in Marl transferiert (vgl. Abb. 59). An dieser Stelle werden die Daten aus dem PIMS mit den Merkmalen der Schwingungssensoren zusammengeführt (vgl. Abb. 55). Vom ReMain-Server in Marl werden die Daten in täglich Abständen auf einen weiteren Projekt-Server, der bei der TU Kaiserslautern eingerichtet wurde, übermittelt. Hier werden die Daten langfristig archiviert und allen Projektpartnern der Zugriff auf den Datenpool zur Datenauswertung gewährt (vgl. Abb. 60).

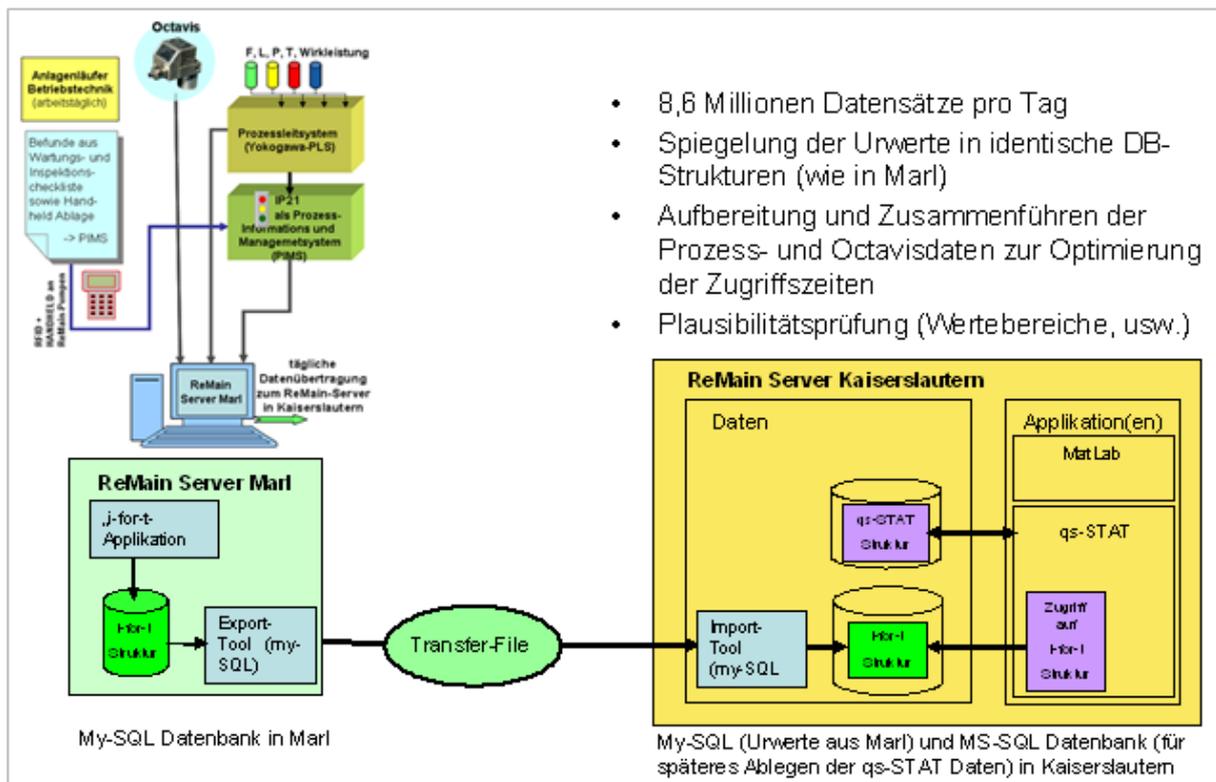


Abb. 60: Informationssammlung und Datenflüsse vom Feld zum Server

Projekt-Server Kaiserslautern

Der Server bei der TU Kaiserslautern, der als Arbeitsrechner von allen Projektpartnern genutzt wurde, erlaubt einen zeitgleichen Zugriff von mehreren Nutzern. Neben den gängigen MS-Office-Tools wurde die Software qs-STAT vom Projektpartner Q-DAS sowie das Rechenprogramm MATLAB installiert. Jeden Tag werden die erfassten Daten vom ReMain-Server in Marl auf den Server in Kaiserslautern übertragen. Abbildung 60 zeigt den Datenfluss von Marl nach Kaiserslautern.

qs-STAT

qs-STAT ist ein Programmpaket für umfassende statistische Auswertungen fertigungsrelevanter Qualitätsinformationen zur Beurteilung von Prozessen und Systemen. Bei der Maschinen- und Prozessqualifikation basieren die Auswertungen auf integrierten Normen und Standards sowie Firmenrichtlinien (z. B. BMW, General Motors, Robert Bosch, Volkswagen etc.). Es stehen zahlreiche statistische Verfahren zur Verfügung, mit denen das bestangepasste Verteilungszeitmodell automatisch gefunden und eine Zuordnung zu den Prozessmodellen nach DIN ISO 21747 vorgenommen wird. Die Nutzung einer standardisierten Auswertung gibt Sicherheit und garantiert Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Im ReMain-Projekt wurde die Software dazu genutzt, um die erfassten Daten vom Prüfstand in Kaiserslautern und von den 100 Versuchspumpen in Marl zu visualisieren und zu analysieren (siehe Kapitel 5.2.5 und 5.4.7).

MATLAB

Bei Matlab handelt es sich um eine kommerzielle, plattformunabhängige Software des Unternehmens The MathWorks Inc., zur Lösung mathematischer Probleme und zur grafischen Darstellung der Ergebnisse. Matlab ist primär für numerische Berechnungen mithilfe von Matrizen ausgelegt, woher sich auch der Name ableitet: MATrix LABoratory.

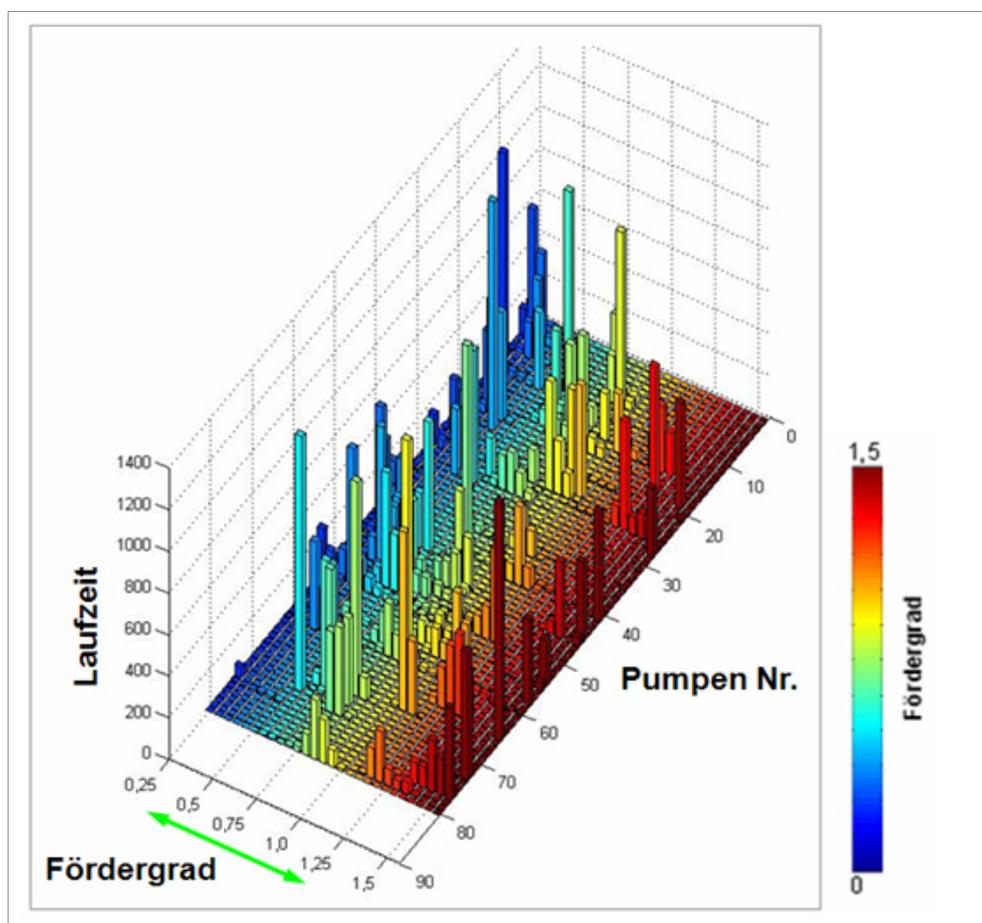


Abb. 61: Laufzeitanalyse der Versuchspumpen in Matlab

Datenbank mySQL

Bei der eingesetzten Datenbank zum Archivieren der Prozess- und Sensordaten kommt das freie relationale Datenbankverwaltungssystem mySQL zum Einsatz.

5.3.3.4 Befundung der Versuchspumpen

Ein einheitlicher, definierter Ausgangszustand konnte nicht für alle 100 Versuchspumpen hergestellt werden. Daher wurden im Projekt (Erst-) Befundungen durchgeführt, um den Zustand der Pumpen zu Versuchsbeginn bzw. zu dem Zeitpunkt, an dem sich die Pumpen zum ersten Mal nach Versuchsbeginn zur Instandsetzung in der Pumpenwerkstatt befanden, möglichst genau zu ermitteln. Zu den Informationen bzw. Merkmalen, die bei den Befundungen dokumentiert wurden, gehören bspw. die Laufzeiten der Wälzlager oder der GLRD, Vorschädigungen des Laufrads (z. B. Kavitationskrater) und eine Abschätzung der historischen Belastung, bspw. durch die Anzahl der Pumpenanläufe (vgl. Abb. 62).

Bauteil	Erstbefundungsmerkmal	Aus- bau	Motiv	Bemerkung
Lager	Laufzeit der Lager	nein	Abschätzung der historischen Belastung	Bei fast jeder Pumpenreparatur werden auch die Lager gewechselt, Analyse der SAP-Aufträge und PIMS-IP 21
Lager	Stillstandszeit des Lagers	nein	Abschätzung der historischen Belastung	
GLRD	Laufzeit der GLRD	nein	Abschätzung der historischen Belastung	Ermittlung durch Analyse der SAP-Aufträge
GLRD	Leckagerate (ml/h)	nein	Feststellen v on Vorschädigungen	Wird eine Leckage festgestellt, so erfolgt auch eine zeitnahe Reparatur → WHG
Laufrad	Laufzeit des Laufrads	nein	Abschätzung der historischen Belastung	Ermittlung durch Analyse der SAP-Aufträge
Laufrad	Kavitationskrater-Größenverteilung	ja	Feststellen v on Vorschädigungen	Diese drei Punkte sollen zukünftig zusätzlich bei der Reparatur von ReMain-Pumpen durchgeführt und im SAP-System dokumentiert werden (ggf. Messwerte und Fotos)
Laufrad	Anlaufriefen	ja	Feststellen v on Vorschädigungen	
Laufrad/ Schleißring	Spaltweite Dichtspalt	ja	Feststellen des Abnutzungsvorrats	
Allgemein	Ggf. Infos über Vorschädigungen und Besonderheiten	nein	Abschätzung der historischen Belastung	Analyse der Reparaturberichte der Pumpen
Allgemein	Anzahl der Pumpenanläufe	nein	Abschätzung der historischen Belastung	Analyse des PIMS-IP 21
Motor	Alter und Einsatzbereich der Motoren	nein	Abschätzung der historischen Belastung	Ermittlung durch Analyse der SAP-Aufträge bzw. Hü-Nr-Datei
Kupplung	Abnutzung der elastischen Pakete in der Kupplung	ja	Feststellen des Abnutzungsvorrats	Beim Austausch und Ausrichtung eines Motors wird auch der Kupplungszustand überprüft und ggf. die elastischen Pakete ersetzt. Erfahrung -> geringer Verschleiß.

Abb. 62: Systematik der (Erst-) Befundungen der Versuchspumpen

5.4 Datengewinnung, Datenanalyse und Verfahrensentwicklung

Von Oktober 2008 an wurden für die 100 ausgewählten Versuchspumpen im Feldversuch unter realen Betriebsbedingungen Daten erhoben. Diese Daten bilden die Basis für die in diesem Kapitel beschriebenen, durchgeführten Analysen. Als ergänzende Informationen wurden zu allen 100 Versuchspumpen die historischen Daten bezüglich der Ausfälle und der damit einhergehenden Werkstattaufenthalte analysiert (vgl. Kapitel 5.4.1) und mit den Daten zu den im Beobachtungszeitraum aufgetretenen Ausfälle fortgeschrieben.

Die Auswertungen der im ReMain-Projekt erfassten Versuchsdaten aus Marl wurden nach folgenden Arbeitspunkten durchgeführt:

- 1) Systematische Analyse der Betriebsweise über die gesamten Pumpen bzw. bestimmte Teilmengen (vgl. Kapitel 5.4.6),
- 2) Nach Rückmeldung aus der Anlage bzw. Auswertung der Informationen aus den Wartungs- und Inspektionsrundgängen wird gezielt eine bestimmte Pumpe betrachtet,
- 3) Manuelle, stichprobenartige Sichtung der Daten (vgl. Kapitel 5.4.7.1)
 - Direkte Selektion auf Datenbankebene (z. B. Werte größer oder kleiner als vorgegebene Grenzwerte)
 - Mittels entsprechenden Analysetools
- 4) Betrachtung der Historie einer Pumpe nach rückgemeldetem Ausfall bzw. Werkstattaufenthalt (vgl. Kapitel 5.4.7.2).

Die Analysetools lassen sich in online- und offline-Werkzeuge einteilen (vgl. Abb. 63).

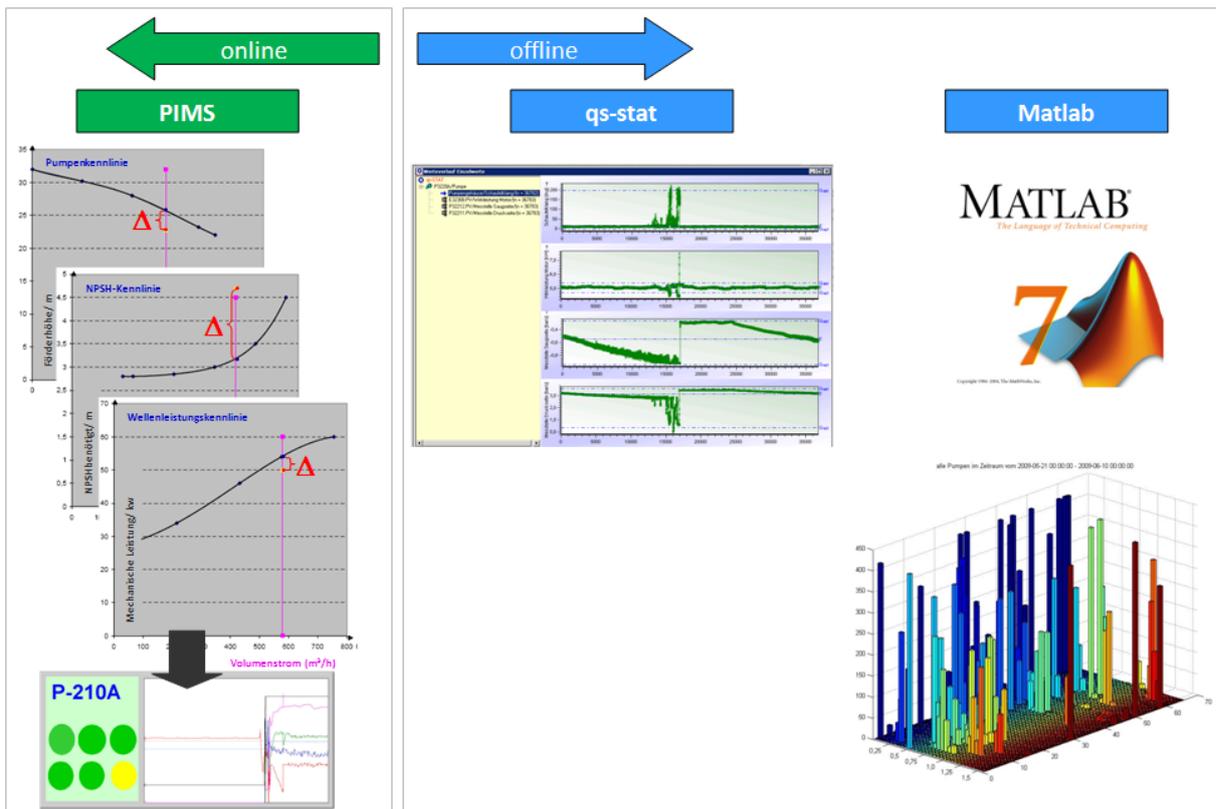


Abb. 63: Übersicht Analysetools

Das online-Werkzeug ermöglicht ein zeitnahes Reagieren auf Zustandsänderungen bei den instrumentierten Pumpen im Betrieb (vgl. Kapitel 5.4.8). Die Offline-Tools ermöglichen das Postprozessing der Felddaten.

Im nachfolgenden Kapitel 5.4.1 werden zunächst die Ergebnisse der historischen Datenanalyse und die Auswirkungen auf den weiteren Projektverlauf vorgestellt. Im Kapitel 5.4.3 wird anschließend die Vorgehensweise bei der Versuchsbetreuung erläutert. Kapitel 5.4.4 beschreibt die Inhalte der begleitenden Prüfstandversuche. In Kapitel 5.4.5 wird als notwendige Voraussetzung für die Datenauswertung die Plausibilitätsprüfung der Daten vorgestellt. Die abschließenden Kapitel beschreiben die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Datenauswertungen und Verfahrensentwicklung.

5.4.1 Analyse der Schadenshistorien der Versuchspumpen

Im ReMain-Projekt wurden im laufenden Produktionsbetrieb Ausfalldaten der ausgewählten 100 Versuchspumpen gesammelt, wobei die Ausfälle weder in Anzahl noch Art vorhersagbar waren. Aus diesem Grund wurden zu Beginn des Arbeitspunktes Datengewinnung, Datenanalyse und Verfahrensentwicklung im Dezember 2008 die Schadens- bzw. Werkstattberichte zu den vergangenen Ausfällen der Versuchspumpen (Betrachtungszeitraum: Januar 2005 bis Oktober 2008) einer detaillierten Analyse unterzogen, um einen Überblick über die Ausfallsituation der vergangenen Jahre zu erhalten. Gleichzeitig wurde auf Basis der Ergebnisse dieser historischen Analyse eine Abschätzung der in der verbleibenden Projektlaufzeit voraussichtlich zu erwartenden Ausfälle und der bauteilbezogenen Ausfallursachen der Versuchspumpen gemacht, um die Arbeiten im Rahmen der Datenanalyse und Verfahrensentwicklung sowie der begleitenden Prüfstandversuche darauf abzustimmen.

5.4.1.1 Basisdokumente für die historische Schadensanalyse

Für die historische Analyse standen zwei Arten von Berichtsdokumenten zur Verfügung. Hierbei handelte es sich zum einen um die Schadens- bzw. Werkstattberichte des Projektpartners Infracor, zum anderen um Berichte des Kooperationspartners EagleBurgmann.

Der Projektpartner Infracor ist für die Instandhaltung der Pumpen verantwortlich. Im Schadensfall einer Pumpe wird diese in der Pumpenwerkstatt befundet und instand gesetzt. Die relevanten Informationen zu dem aufgetretenen Schaden werden in einem entsprechenden Schadens- bzw. Werkstattbericht protokolliert. Hier werden diejenigen Parameter vermerkt, die zu dem Ausfall der Pumpe geführt haben und die den vorliegenden Schaden beschreiben. Dazu gehören bspw. das betroffene Schadens- bzw. Pumpenbauteil (z. B. Gleitringdich-

tung, Wälzlager, Laufrad), das beobachtete Schadensbild (z. B. gebrochen, korrodiert), die Schadensursache (z. B. Trockenlauf, mechanische Überlastung) und die durchgeführten (Instandhaltungs-) Maßnahmen.

Handelt es sich bei dem betroffenen Schadens- bzw. Pumpenbauteil um die Gleitringdichtung, wird diese zur Befundung und Instandsetzung von Infracor an den strategischen Vor-Ort-Partner und Gleitringdichtungshersteller EagleBurgmann übergeben. Rund 75 % der bei den 100 ReMain-Versuchspumpen eingesetzten Gleitringdichtungen (betrifft einfachwirkende und doppelt-flüssiggeschmierte Gleitringdichtungen) sind von EagleBurgmann. Für diese Wellendichtungen übernimmt EagleBurgmann die Instandsetzung selbst. Entsprechend den Schadens- bzw. Werkstattberichten von Infracor erstellt EagleBurgmann separate Zustandsberichte zu den an den Gleitringdichtungen detektierten Schäden und übermittelt diese zur Dokumentation und Archivierung an Infracor.

5.4.1.2 Ergebnisse der historischen Schadensanalyse

In dem Betrachtungszeitraum von knapp vier Jahren (Januar 2005 bis Oktober 2008) lagen insgesamt 218 Ausfälle der 100 ReMain-Versuchspumpen vor. Die Auswertung der Berichtsdokumente zeigte unter anderem auf, welche Pumpen wie häufig ausgefallen waren, welche Schadens- bzw. Pumpenbauteile wie häufig betroffen waren, welche Schadensbilder auftraten, was die Ursachen für die Pumpenausfälle waren und wie sich die Ausfälle zeitlich über den Betrachtungszeitraum erstreckten.

Auffällig war in diesem Zusammenhang die hohe Anzahl von Ausfällen aufgrund von Schäden an den Gleitringdichtungen (vgl. Abb. 64).

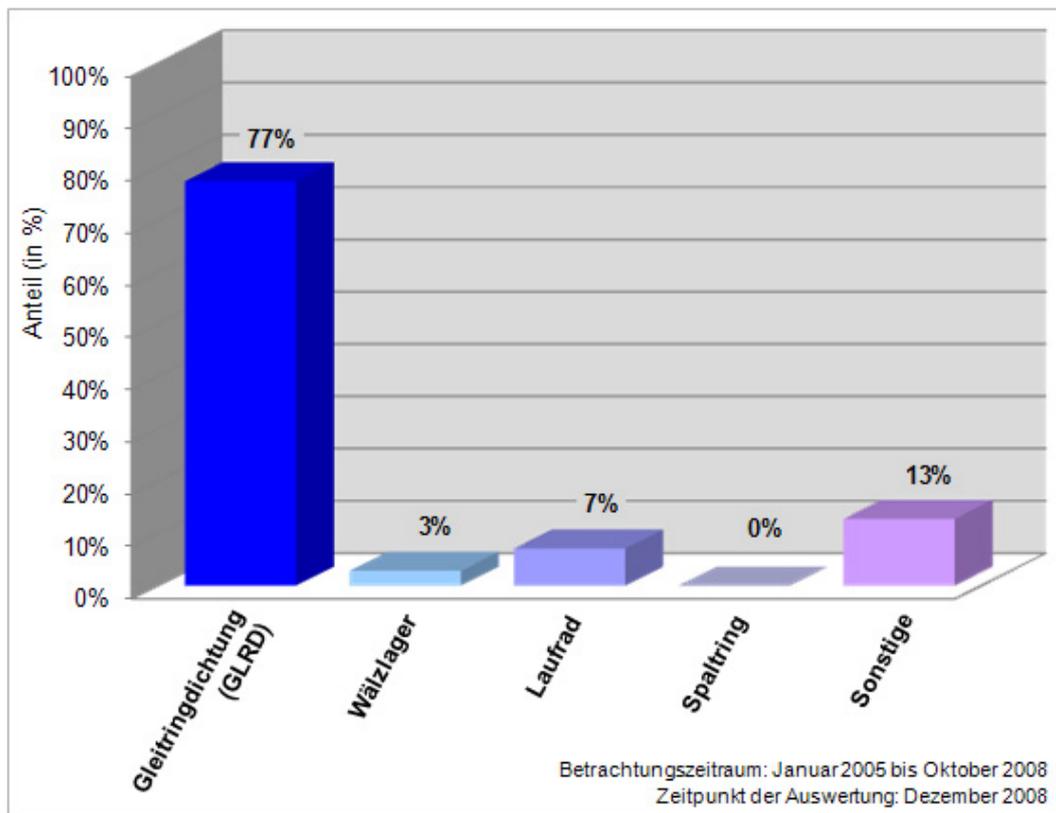


Abb. 64: Historische Schadensanalyse: Anteile (in %) der bei den Ausfällen betroffenen Pumpenbauteile (über den Betrachtungszeitraum Januar 2005 bis Oktober 2008)

Von den insgesamt 218 Ausfällen waren 77 % auf Schäden an den Gleitringdichtungen zurückzuführen. Alle anderen der für ReMain als ausfallkritisch und damit untersuchungsrelevant identifizierten Pumpenbauteile (Wälzlager, Spaltring, Laufrad) waren in der Versuchsanlage im Betrachtungszeitraum im Vergleich nur wenig betroffen.

Der hohe Anteil der Gleitringdichtungsschäden ist im Wesentlichen auf die Beschaffenheit des Fördermediums in der ReMain-Versuchsanlage zurückzuführen. Hier wird mit Acrylsäure ein Medium gefördert, das stark zur Polymerisation neigt. Die Acrylsäure kann bspw. in den Thermosiphonbehälter der Gleitringdichtung ausflocken und damit den Trockenlauf der Dichtung hervorrufen. Aus diesem Grund waren in der ReMain-Versuchsanlage grundsätzlich mehr Gleitringdichtungsschäden zu erwarten als in Anlagen, die unkritischere Medien fördern. Ein weiterer Grund für den hohen Anteil der Schäden an den Gleitringdichtungen ist der, dass in den Berichten i.d.R. nur die Hauptausfallursache dokumentiert wird. Gemäß der beschriebenen Beschaffenheit des Fördermediums ist das zumeist die Gleitringdichtung. Wenn neben der Gleitringdichtung bspw. auch das Wälzlager beschädigt war, wurde dies nur in den Fällen zusätzlich vermerkt, in denen das Lager befundet und der Schaden festge-

stellt wurde. Aus diesem Grund war anzunehmen, dass die Gleitringdichtungsschäden mögliche Schäden an den anderen Pumpenbauteilen überlagern.

Ein weiteres interessantes Ergebnis der Auswertungen war die Verringerung der Anzahl der Pumpenausfälle über den Betrachtungszeitraum (vgl. Abb. 65).

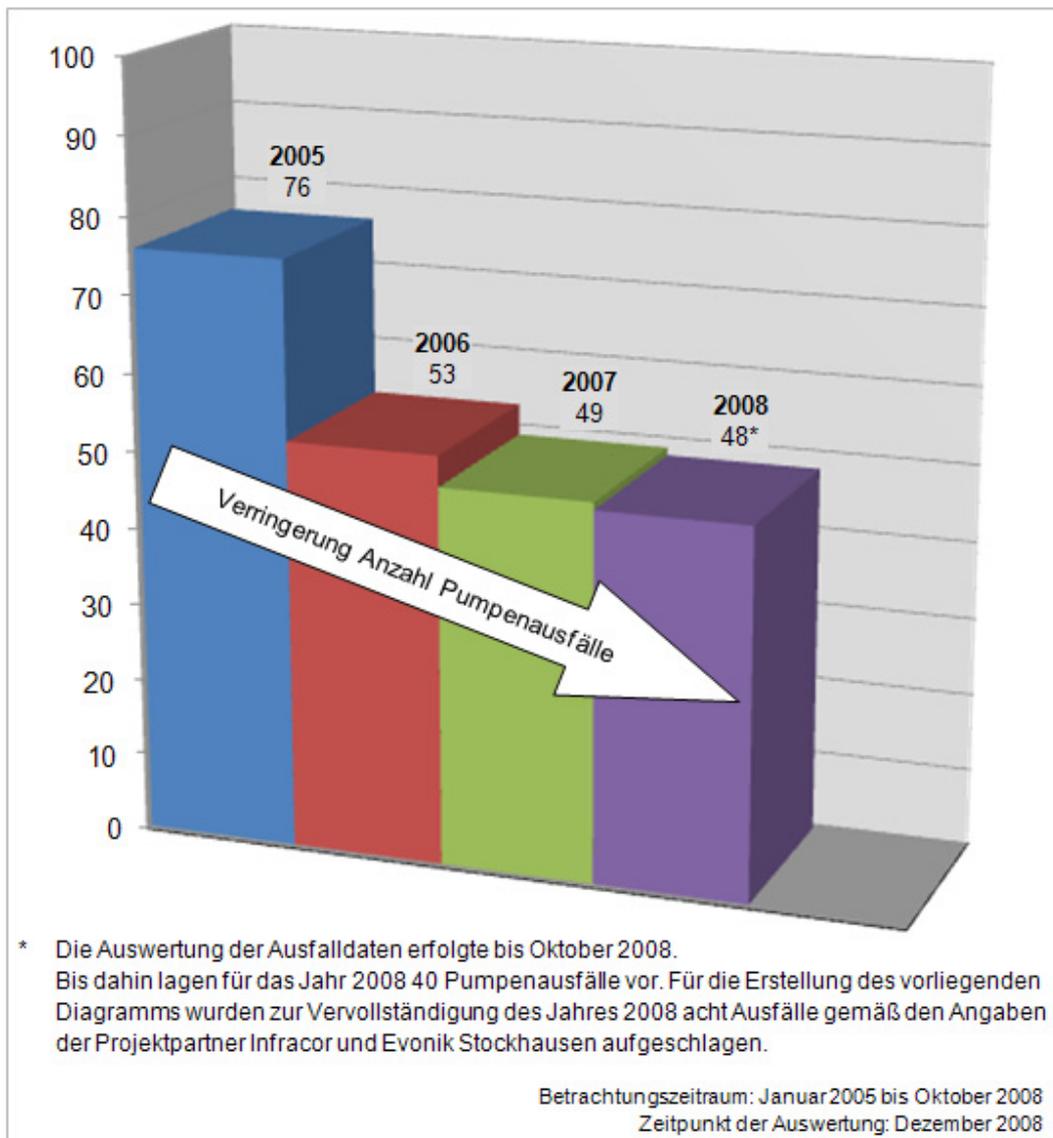


Abb. 65: Historische Schadensanalyse: Jahresübersicht der Pumpenausfälle (über den Betrachtungszeitraum Januar 2005 bis Oktober 2008)

Vor Projektbeginn, d. h. im Jahr 2005, lag die Anzahl der Ausfälle pro Jahr bei 76 Stück. Durch Verbesserungen in der Anlage basierend auf den Erkenntnissen aus dem Projekt, aber auch durch Schulungsmaßnahmen der Mitarbeiter in Produktion und Instandhaltung, ging die Anzahl der Ausfälle mit Projektbeginn im Jahr 2006 und in den nachfolgenden Jahren auf annähernd 50 Stück zurück.

5.4.1.3 Fazit für die weitere Projektarbeit

Auf Basis der durchgeführten historischen Analyse wurde von den Projektpartnern eine Abschätzung der in der verbleibenden Projektlaufzeit voraussichtlich zu erwartenden Ausfälle und der bauteilbezogenen Ausfallursachen der Versuchspumpen gemacht (vgl. Abb. 66).

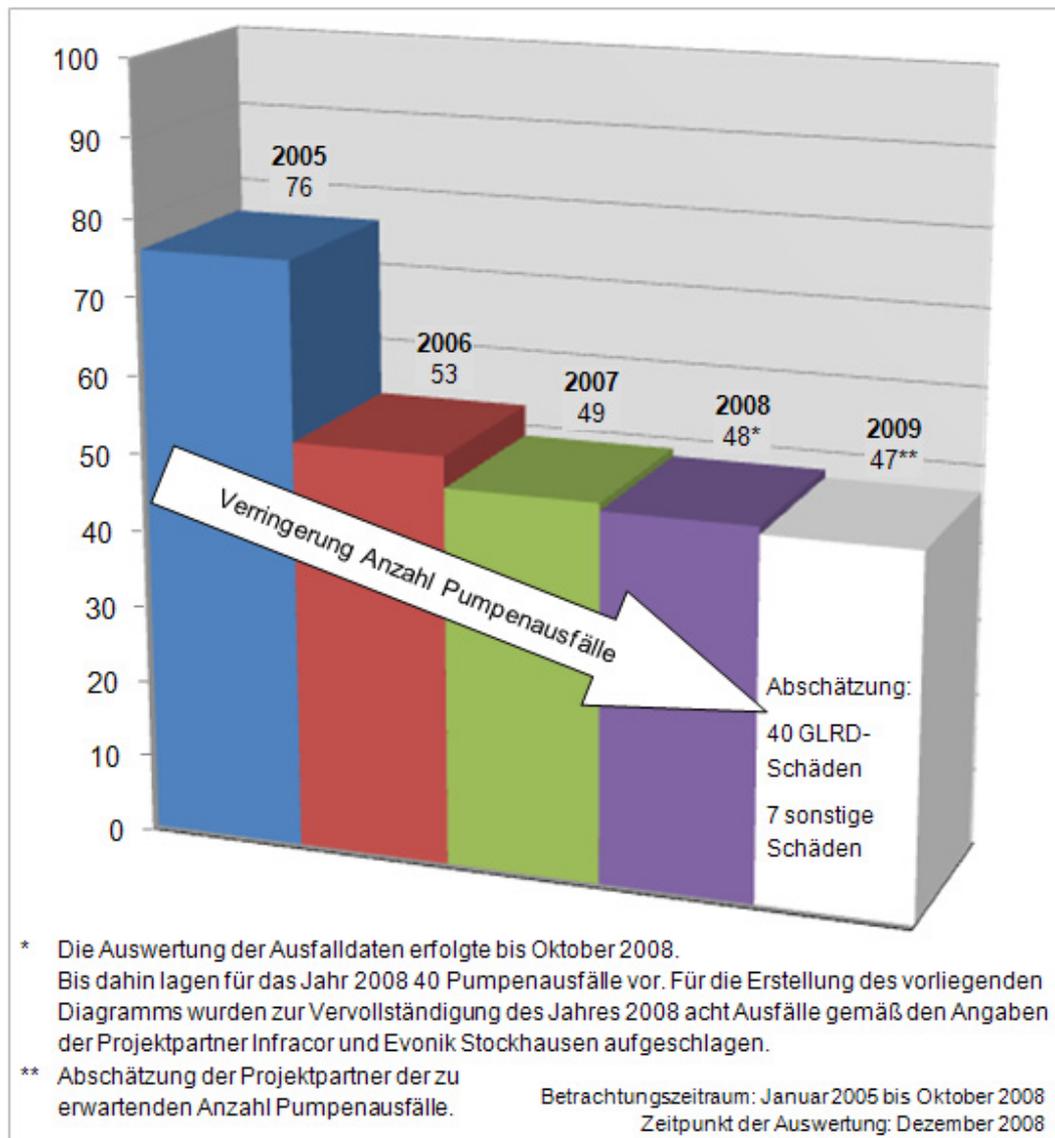


Abb. 66: Abschätzung der Anzahl der zu erwartenden Pumpenausfälle für das Jahr 2009 auf Basis der historischen Schadensanalyse

Die Ergebnisse der Analyse ließen vermuten, dass bis zum Ende der Projektlaufzeit von den für ReMain als relevant identifizierten Pumpenbauteilen für die Gleitringdichtung voraussichtlich eine interpretierbare Anzahl von Schäden erwartet werden kann, nicht jedoch für das Wälzlager und das Laufrad (bzw. Spaltring). Das bedeutete die Schlussfolgerung, dass für das Wälzlager und das Laufrad die zu erwartende Anzahl von Schäden im Versuchsfeld der

Acrylsäureanlage vermutlich nicht ausreichend sein würde, um statistische Zusammenhänge zwischen Belastungen und Restlebensdauern herzustellen.

Daraus ergaben sich geänderte Rahmenbedingungen für die weitere Projektarbeit, insbesondere in Hinblick auf die Datenanalyse und Verfahrensentwicklung sowie die begleitenden Prüfstandversuche. Es war zu vermuten, dass für das Wälzlager und das Laufrad lediglich theoretische bzw. physikalische Modelle erarbeitet werden können, die voraussichtlich nur mit Hilfe von Prüfstandversuchen, nicht jedoch mit beobachteten Schäden im Versuchsfeld validiert werden können. Für die für die Gleitringdichtung zu entwickelnden Modelle war davon auszugehen, dass diese über eine aus statistischer Sicht erforderliche Anzahl von Schäden im Versuchsfeld validiert werden können.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde im Dezember 2008 eine modifizierte Zielsetzung für ReMain erarbeitet (vgl. Abb. 67) und für die weitere Projektarbeit zugrunde gelegt. Eine weitere Maßnahme war die Einbindung des Kooperationspartners EagleBurgmann als Kompetenzträger für Gleitringdichtungen in das Projekt ab April 2009.

1	Robuste Diagnoseverfahren, basierend auf <ul style="list-style-type: none"> • Indikatormerkmalen für den Betriebszustand als Belastungsgröße von Bauteilen • Indikatormerkmalen für die Vorschädigung von Bauteilen unter Berücksichtigung der Exemplarstreuung und der Variation von Prozess und Betriebsparametern sowie Einfluss von Randbedingungen (z. B. Temperatur, Medien) → Einganggröße für Prognosemodell
2	Übertragung von Phänomenen auf Pumpen anderer Größe und Bauweise → Anwendbarkeit von Diagnose/Prognose auf Baureihen ohne Einzelbetrachtung
3	Über betrachtete Ausfälle (teil-)validierte Prognosemodelle für die Gleitringdichtung

Stand: Dezember 2008

Abb. 67: Modifizierte Zielsetzung von ReMain auf Basis der historischen Schadensanalyse

Ergänzung

Die zu einem späteren Zeitpunkt im Projekt fortgeschriebene Analyse der aufgetretenen Ausfälle der Versuchspumpen bestätigte weitestgehend die im Dezember 2008 vermutete Ausfallsituation für das Jahr 2009.

In dem fortgeführten Betrachtungszeitraum (Januar 2005 bis Dezember 2009) lagen insgesamt 260 Ausfälle der Versuchspumpen vor, die zu 79 % aus Schäden an den Gleitringdich-

tungen resultierten (vgl. Abb. 68). Dieses Ergebnis validierte die im Dezember 2008 angenommene hohe Anzahl von Gleitringdichtungsschäden für das Jahr 2009.

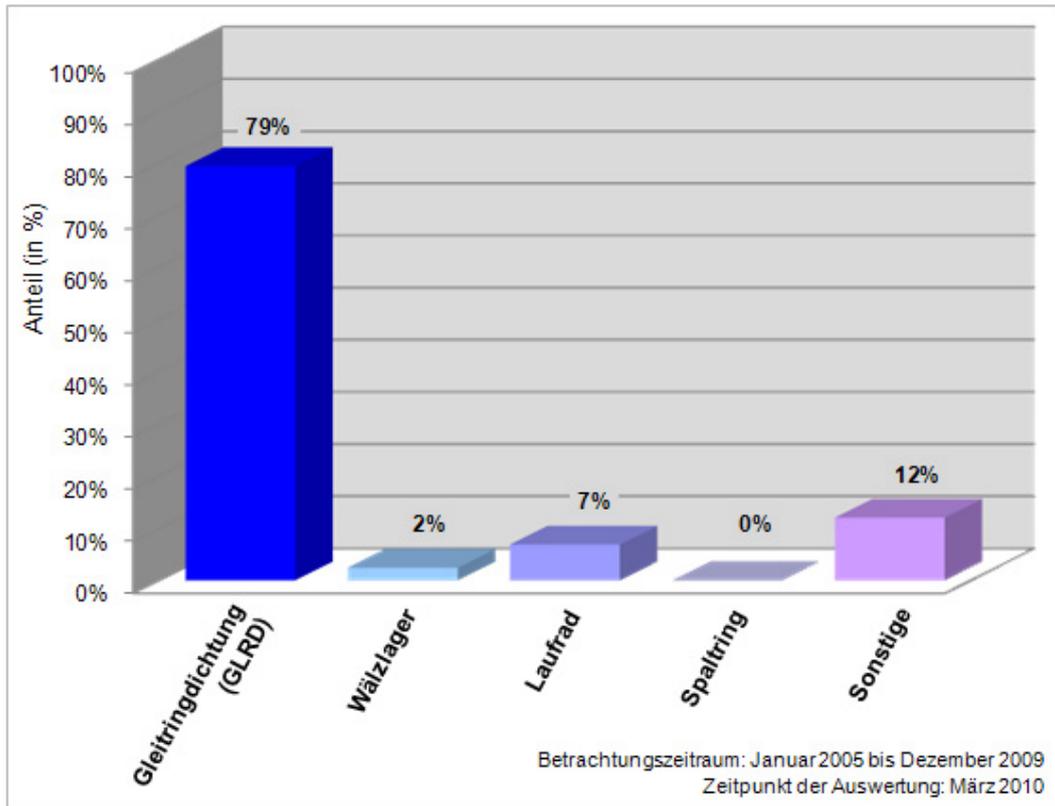


Abb. 68: Historische Schadensanalyse aktualisiert: Anteile (in %) der bei den Ausfällen betroffenen Pumpenbauteile (über den Betrachtungszeitraum Januar 2005 bis Dezember 2009)

Auch die Betrachtung der Anzahl der Pumpenausfälle pro Jahr führte die bereits festgestellte Tendenz fort (vgl. Abb. 69). Im Jahr 2009 lagen mit 38 tatsächlichen Pumpenausfällen weniger Ausfälle vor als erwartet (Abschätzung im Dezember 2008: 47 zu erwartende Ausfälle in 2009). Diese deutliche Reduzierung der Ausfälle ist auf die Kombination verschiedener Maßnahmen zurückzuführen, bspw. die Sensibilisierung der Mitarbeiter in Produktion und Instandhaltung und die Visualisierung von Informationen zum Betriebszustand der Versuchspumpen im Prozessinformationsmanagementsystem (vgl. Kapitel 5.4.8). Dadurch konnte eine nachweisbare Standzeitverlängerung der Versuchspumpen erreicht werden.

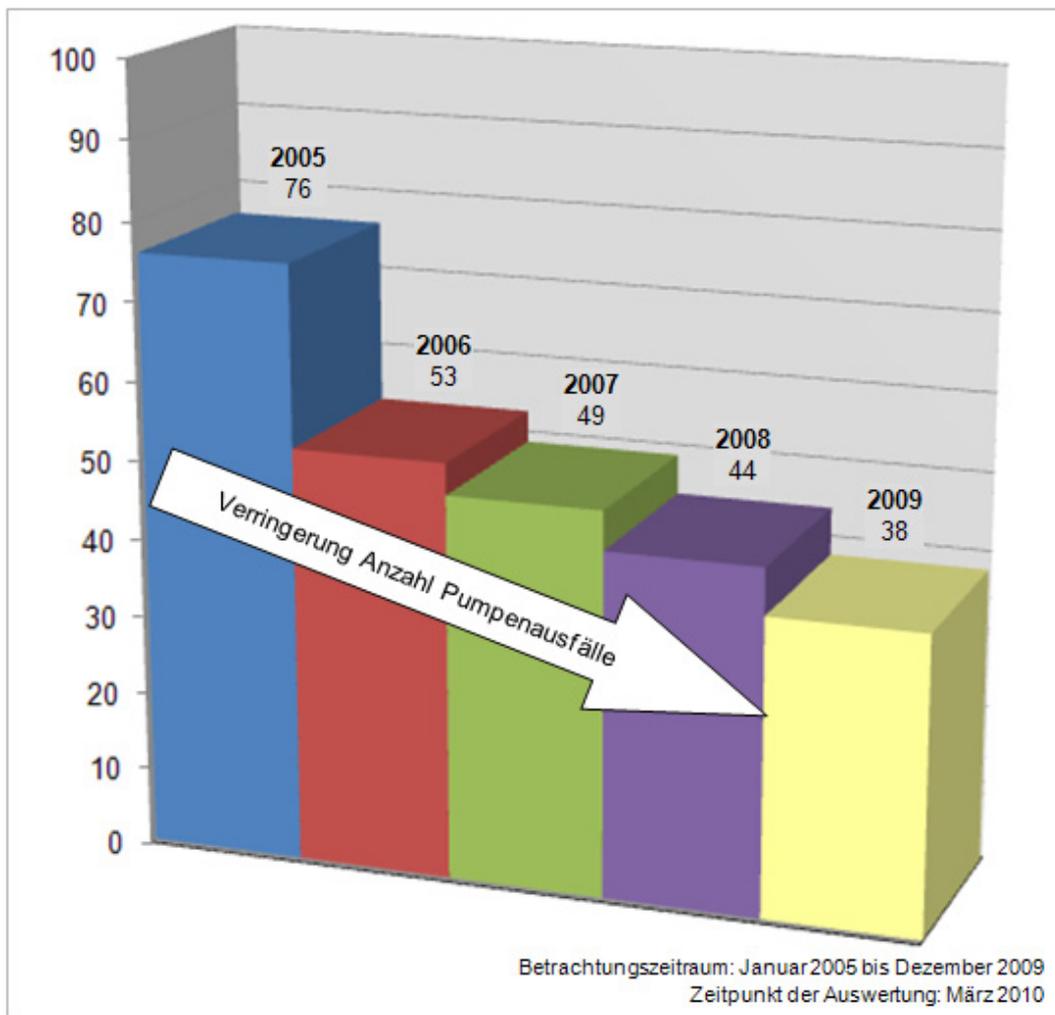


Abb. 69: Historische Schadensanalyse aktualisiert: Jahresübersicht der Pumpenausfälle (über den Betrachtungszeitraum Januar 2005 bis Dezember 2009)

5.4.2 Ermittlung der mittleren Lebensdauern von Gleitringdichtungen

Basierend auf den Werkstattberichten und den zwischen zwei Ausfallzeitpunkten ermittelten Laufzeiten einer Pumpe lässt sich eine Lebensdauerbetrachtung für die Gleitringdichtung durchführen. Nachfolgende Abbildung 70 schematisiert das Vorgehen.

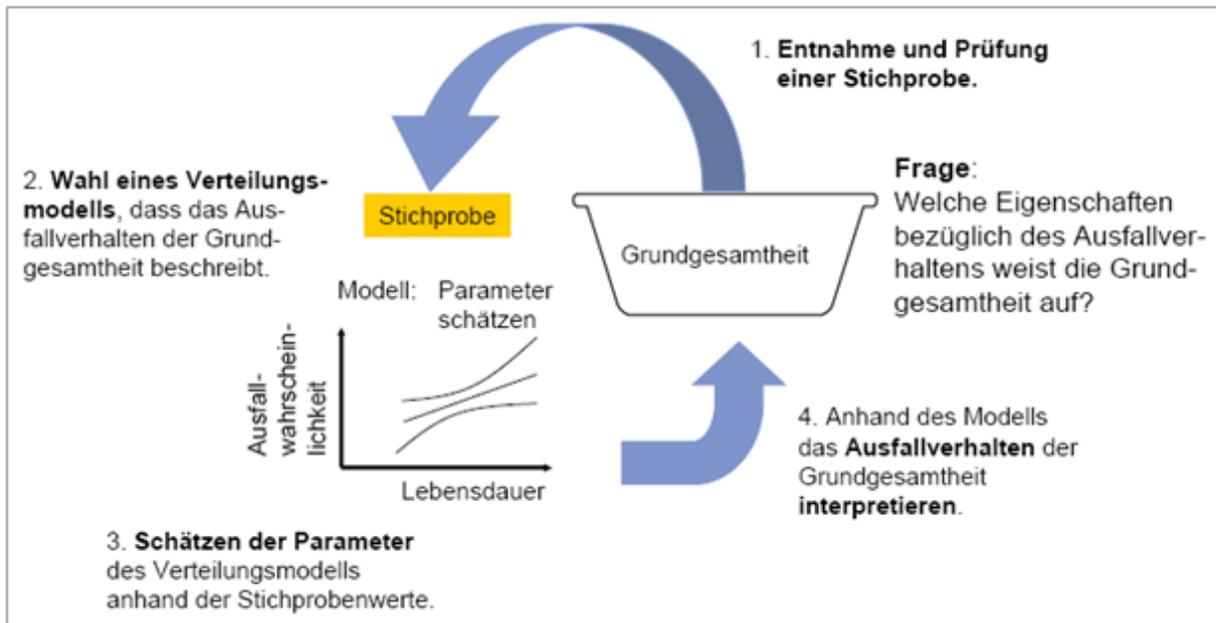


Abb. 70: Prinzip zur Ermittlung des Ausfallverhaltens

Die Stichprobe, die entnommen wird, entspricht den zu einer Pumpe erfassten Gleitringdichtungsausfällen. Erfasst wird jeweils die Laufzeit der Pumpe zwischen zwei Ausfällen.

Exemplarisch wurde das Vorgehen für die Pumpe P812A durchgeführt und folgende Kenngrößen ermittelt (vgl. Abb. 71):

Lageparameter	T	$590,084 \leq \mathbf{2083,90} \leq 10025,1$
Lebensdauer bei 10% Ausfällen	B10	$213,247 \leq \mathbf{244,374} \leq 494,644$
Formparameter	b	$0,272 \leq \mathbf{0,553} \leq 0,930$

Abb. 71: Ergebnisse, wobei nur die Ausfälle der Pumpe betrachtet wurden

Bei insgesamt acht Ausfällen, zu denen die entsprechenden Laufzeiten der Pumpe bis zum Ausfall ermittelt wurden, ergeben sich entsprechend große Vertrauensbereiche, die sich auch in einer Restlebensdauerabschätzung wieder finden würden, wenn diese nur auf der Information der Laufzeiten einer Pumpe basieren würde.

Der Lageparameter T (entspricht etwa der MTBF-Zeit) könnte für diese Pumpe in einem Bereich zwischen 590 und 10.025 Stunden liegen.

Bezieht man in die Betrachtung noch das aktuelle Wissen, nämlich die Zeit, die die Pumpe aktuell (fehlerfrei) läuft, mit ein, erhöhen sich die Schätzwerte (vgl. Abb. 72).

Lageparameter	T	2556,99
Lebensdauer bei 10% Ausfällen	B10	257,871
Formparameter	b	0,57041

Abb. 72: Ergebnisse, wenn die Stichprobe um die aktuelle Laufzeit der Pumpe erweitert wird

Unter der Annahme, dass baugleiche Pumpen zusammengefasst werden können, kann man die Stichprobe vergrößern und damit „bessere“ Parameter-Schätzer erhalten.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Ergebnisse, die für eine Gruppe ähnlicher Pumpen ermittelt wurden. Zusammengefasst wurden Pumpen, die eine mit der P812A vergleichbare Baugröße besitzen. Dadurch bekommt man natürlich auch eine größere Spanne im Wertebereich (51 bis 13.751 Stunden), wie aus der folgenden Abbildung 73 deutlich wird.

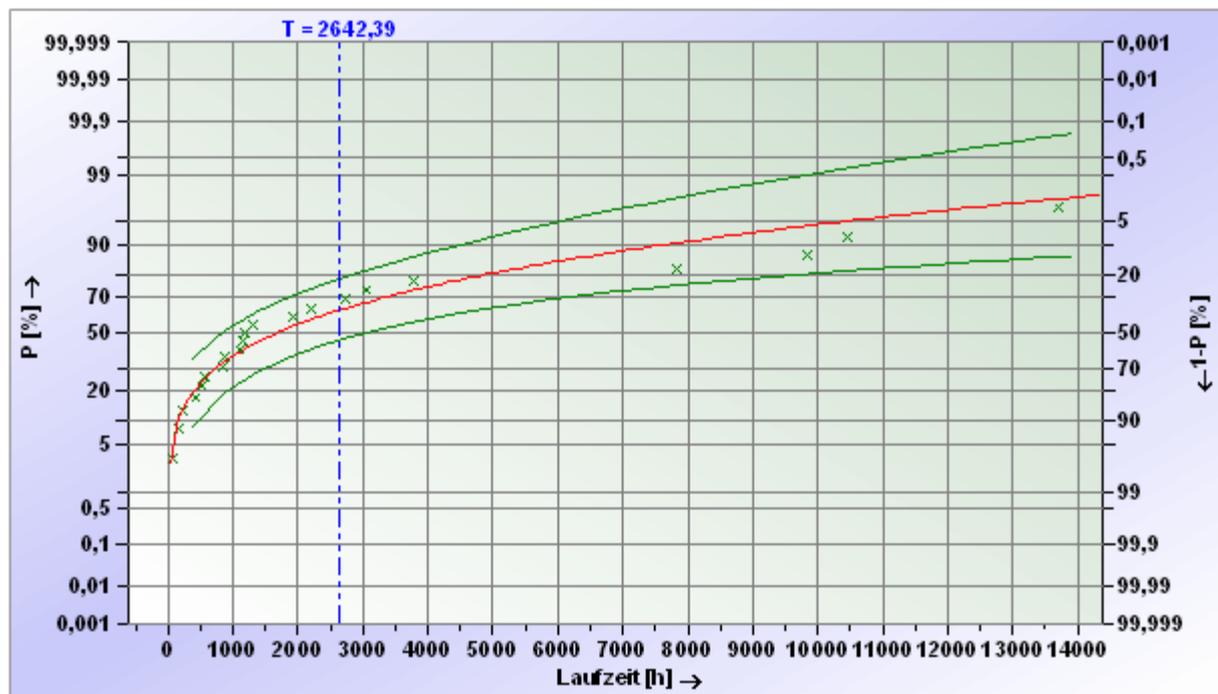


Abb. 73: Ausfallzeiten der zusammengefassten, baugleichen Pumpen im Wahrscheinlichkeitsnetz

Die Ergebnisse für die Betrachtung der reinen Ausfälle zeigen einen engeren Vertrauensbereich (vgl. Abb. 74).

Lageparameter	T	$1337,77 \leq 2553,70 \leq 4754,47$
Lebensdauer bei 10% Ausfällen	B10	$64,0767 \leq 164,800 \leq 421,062$
Formparameter	b	$0,511 \leq 0,754 \leq 1,045$

Abb. 74: Berechnung der Kennwerte nur auf Ausfalldaten basierend

Eine Berücksichtigung der aktuellen Laufzeiten der jeweiligen Pumpen wirkt sich deutlich auf die Schätzwerte aus (vgl. Abb. 75).

Lageparameter	T	6169,36
Lebensdauer bei 10% Ausfällen	B10	159,259
Formparameter	b	0,57438

Abb. 75: Berechnung unter Berücksichtigung der nicht ausgefallenen Pumpen (d. h. aktuell noch intakt laufende Aggregate)

Zur Interpretation wird ein Vergleich aus der Automobilindustrie herangezogen (vgl. Abb. 76).

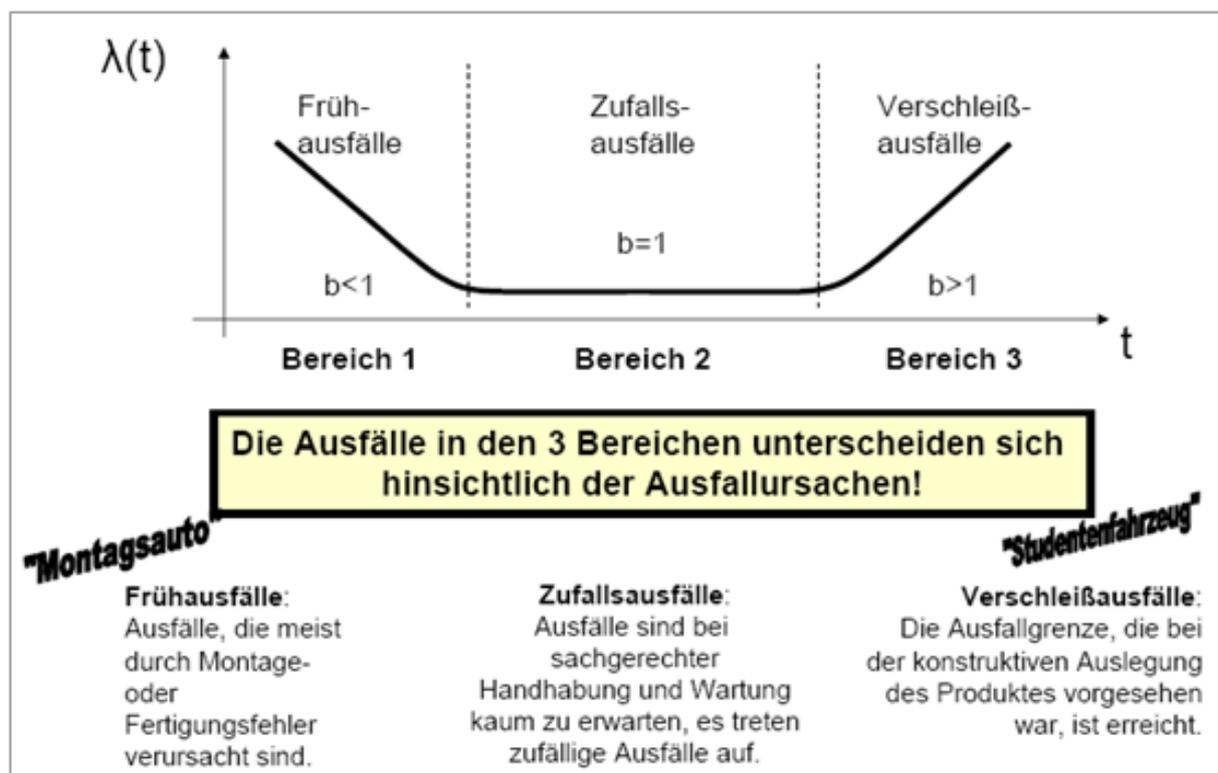


Abb. 76: Klassifikation von Ausfällen und Analogie aus dem Automobilbau

Der Parameter b der ermittelten Verteilungen liegt jeweils im Bereich der Früh- ausfälle.

Eine Abschätzung der Restlebensdauer ausschließlich über die MTBF-Zeiten ist mit einer verhältnismäßig hohen Unsicherheit behaftet, da die Ausfälle eher das statistische Verhalten aufzeigen, das typisch für Früh- ausfälle ist.

5.4.3 Versuchsbetreuung

Für die Versuchsbetreuung wird das Informationsmanagement einerseits über das SAP-System und andererseits über den Projekt-Server Marl organisiert (vgl. Abb. 77).

Dabei wurden folgende Informationen im SAP-System des Projektpartners Evonik Stockhausen gesammelt und einmal wöchentlich per Mail an den Projektpartner TU Kaiserslautern übertragen:

- Die Störungsmeldungen und ggf. zusätzlichen Informationen, die von den Leitstandfahrern oder Anlagenläufern der Produktion über eine Katalogauswahl im SAP-System als Schadensbild hinterlegt wurden,
- Die von der Pumpenwerkstatt bei jeder Instandsetzung erstellten Schadens- und Werkstattberichte (gemäß Kapitel 5.4.1) einschließlich der Ergebnisse der (Erst-) Befundung (gemäß Kapitel 5.3.3.4).

Darüber hinaus wurden die Ergebnisse einer diskontinuierlichen Schwingungsmessung, die in regelmäßigen Abständen an 12 (nicht redundanten) Versuchspumpen durchgeführt wurde, ebenfalls im SAP-System bereitgestellt.

Wie im Kapitel 5.3.3 beschrieben werden die Daten der Anlagenläufer der Betriebstechnik (Informationen aus den Wartungs- und Inspektionsrundgängen) und die Prozessdaten im Prozessinformationsmanagementsystem gesammelt und zusammen mit den Daten des Schwingungssensors efector octavis auf den ReMain-Server in Marl übermittelt und täglich automatisiert zur TU Kaiserslautern übertragen.

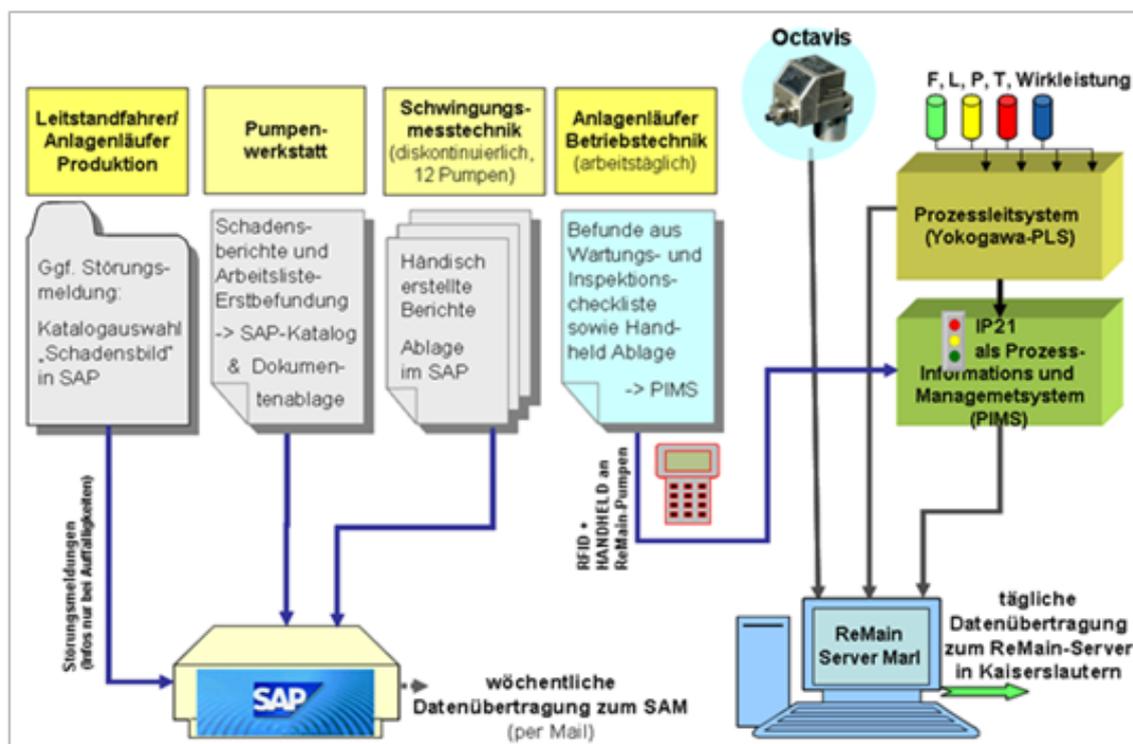


Abb. 77: Informationsquellen und Datensammlung

In regelmäßigen Workshops wurden von den Projektbeteiligten in Marl die Messreihen mit den Zustandsinformationen des Instandhaltungs- und Wartungspersonals (I&W-Personal) verglichen. Bei diesen Zustandsinformationen handelt es sich zum Einen um „harte Messdaten“ aus Offline-Inspektionen (z. B. Thermographiebilder), zum Anderen aber auch um subjektive Eindrücke des I&W-Personals wie beispielsweise Geräusche.

5.4.3.1 Bereitstellung der Werkstattberichte

Von der Pumpenwerkstatt des Projektpartners Infracor wird nach jeder Instandsetzung einer Pumpe ein Schadens- bzw. Werkstattbericht erstellt. Hierin werden die relevanten Informationen zu den aufgetretenen Schäden protokolliert. Dazu gehören bspw. das betroffene Schadens- bzw. Pumpenbauteil (z. B. Gleitringdichtung, Wälzlager, Laufrad), das beobachtete Schadensbild (z. B. gebrochen, korrodiert), die Schadensursache (z. B. Trockenlauf, mechanische Überlastung) und die durchgeführten Instandsetzungsmaßnahmen.

Handelt es sich bei dem betroffenen Pumpenbauteil um die Patronengleitringdichtung, wird die Befundung und Instandsetzung vom Gleitringdichtungshersteller EagleBurgmann, dem strategischen Vor-Ort-Partner der Infracor, übernommen. Entsprechend den Schadens- bzw. Werkstattberichten von Infracor erstellt EagleBurgmann separate Zustandsberichte zu den an den Gleitringdichtungen detektierten Schäden und übermittelt diese an Infracor.

Im Anschluss an die Instandsetzung werden die Schadens- und Werkstattberichte durch die Pumpenwerkstatt der Infracor in das SAP-System des Projektpartners Evonik Stockhausen zur weiteren Verwendung eingestellt.

5.4.3.2 Datenübermittlung

Die in Marl erfassten Daten werden täglich auf den Server in Kaiserslautern übertragen.

In Kaiserslautern laufen Routinen zum Import und zur Plausibilitätsprüfung der Daten automatisiert ab. Danach können die Daten von den Projektpartnern mit den entsprechenden Tools bearbeitet und analysiert werden.

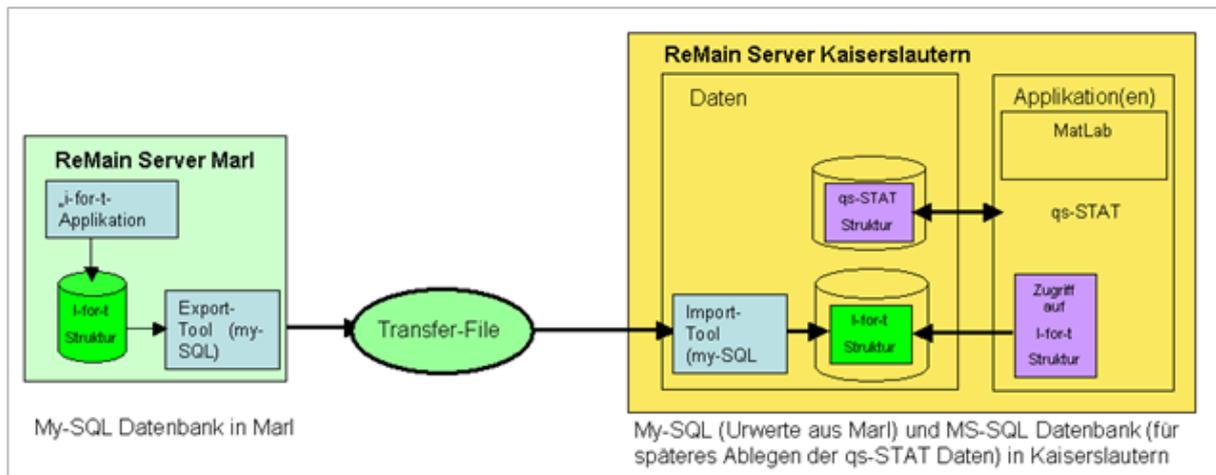


Abb. 78: Weiterverarbeitung auf dem Server in Kaiserslautern

5.4.4 Begleitende Prüfstandversuche

Wie in Kapitel 5.4.1 beschrieben, wurden verfügbare Maschinenhistorien der Versuchspumpen einer detaillierten Analyse unterzogen, um einen Überblick über die Ausfallsituation der letzten Jahre zu erhalten und die in der verbleibenden Projektlaufzeit zu erwartenden Ausfälle abzuschätzen. Als Ergebnis dieser Auswertung wurde die Gleitringdichtung (GLRD) als Hauptausfallbauteil ermittelt. Daher lag ein Schwerpunkt der begleitenden Prüfstandversuche auf der genaueren Untersuchung der GLRD-Ausfälle. Der zweite Schwerpunkt lag in der Weiterführung der in Kapitel 5.2.5 beschriebenen Versuchsreihen des Arbeitspunktes „Validierung der Sensorik durch Prüfstandversuche“. Zu diesen Versuchsreihen zählten u. a. die Untersuchung der Auswirkungen eines Lagerschadens auf das Betriebsverhalten der Pumpe sowie das Verhalten der Pumpe beim Betrieb mit einem ungewuchteten Laufrad. Diese Versuchsreihen wurden an den Prüfständen wie folgt realisiert:

Versuch 1: Lagerschaden bei $q = 1,0$

Für die Validierung der Konfiguration des Schwingungssensors efector octavis zur Erkennung von Wälzlagerschäden wurde an der Prüfstandpumpe ein Lager mit einem künstlichen Außenringsschaden eingebracht (vgl. Abb. 79). Hierbei wurde durch funkenerosives Abtragen ein Außenring-Pitting mit einer Eintauchtiefe von ca. 0,1 mm erzeugt. Diesen Spalt durchlaufen die Wälzkörper, was zu einem unruhigen Lauf der Maschinen führt. Dadurch lässt sich zwar ein Schaden simulieren, aber es ist nicht möglich, die Entwicklung des Schadens zu erfassen.



Abb. 79: Vorgeschädigtes Lager
[Quelle SAM]

Die Erkennung des schadhafte Wälzlagers kann sowohl im Zeitbereich als auch im Frequenzbereich erkannt werden. Der Kennwert, bestehend aus den kinematischen Schadensfrequenzen, zeigt dabei erwartungsgemäß die größte Signifikanz. Nachfolgende Abbildung 80 zeigt deutlich den Unterschied zum Normalbetrieb auf.

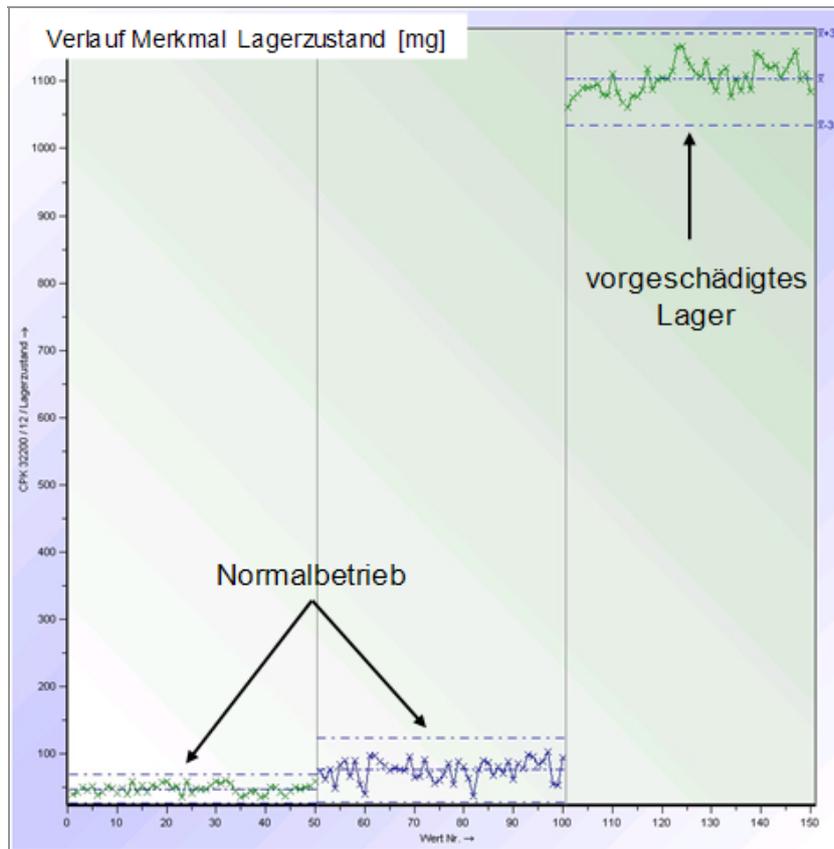


Abb. 80: Vergleich Normalbetrieb – Betrieb mit Lagerschaden

Im Rahmen der Prüfstandversuche ist der Unterschied zwischen dem Normalbetrieb der Pumpe und dem Betrieb der Pumpe mit einem defekten Lager deutlich zu erkennen (vgl. nachfolgende Tabelle). Das Merkmal Lagerzustand (BPFO, BPFI, BSF) ist um den Faktor 14,7 im Vergleich zum Normalbetrieb überhöht.

	Normal	Schaden	Schaden/Normal
peak_max	1.800 mg	15.000 mg	8,3
a_mittel	500 mg	3.400 mg	6,8
BPFO, BPFI, BSF (H-FFT)	75 mg	1.100 mg	14,7

Nach Prüfung der Felddaten konnte auch eine Pumpe identifiziert werden, die eine Überhöhung des Lagerzustandsmerkmals aufzeigte (vgl. Abb. 81). Es handelte sich dabei um eine Pumpe der Baugröße 40-200.

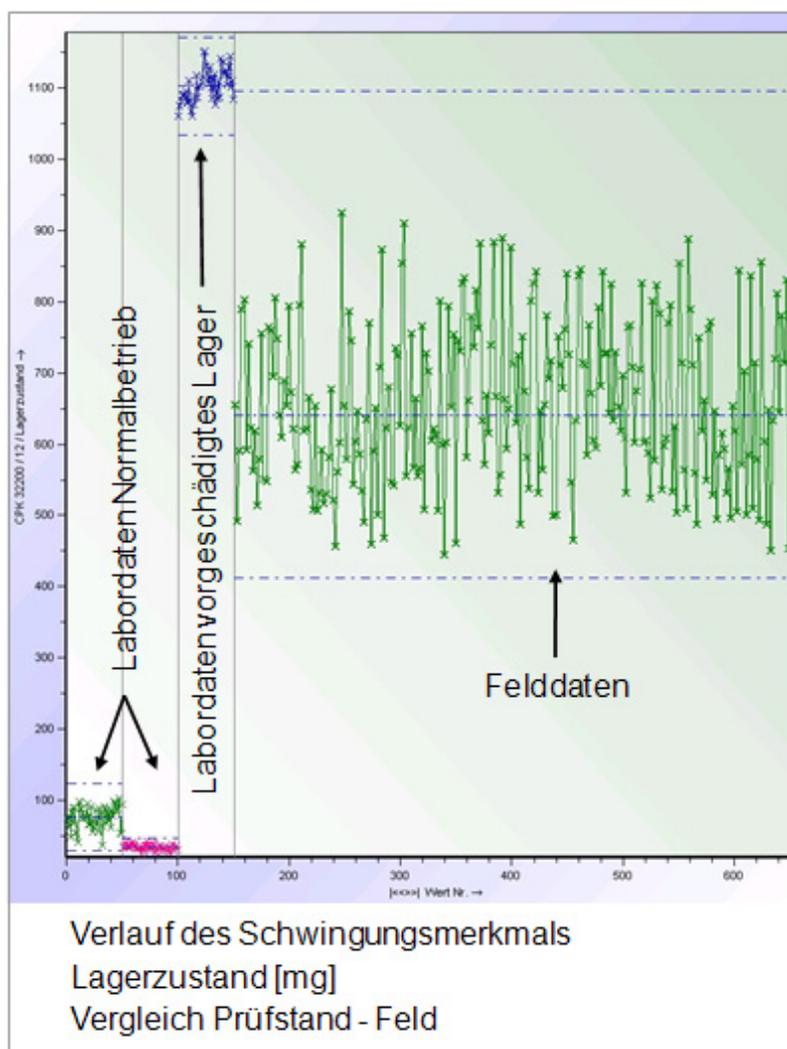


Abb. 81: Schwingungsmerkmal Lagerzustand, Vergleich Prüfstand-/ Felddaten

Die Werte des Schwingungsmerkmals Lagerzustand aus dem Prüfstandversuch lagen deutlich über den Werten der Versuchspumpe im Feld. Ob ein Schaden an den Lagern vorliegt und wie stark die Lager eventuell geschädigt sind, kann erst eine Befundung nach Demontage klären.

Versuch 2: Dauer-Kavitationsversuch $q = 1,0$

Bei diesem Versuch handelte es sich um einen Langzeitversuch, in dem die Prüfstandpumpe mit der hydraulischen Störung Kavitation betrieben wurde. Diese Störung wurde mit einer hohen Intensität, d. .h. einem Förderhöhenabfall von $\Delta H = 30\%$ eingestellt. Bei dem Versuch wurde Wasser als Fördermedium verwendet, die Laufzeit des Versuchs betrug drei Wochen. Das Schwingungsverhalten der Pumpe wurde erfasst und mit den Versuchsreihen aus dem Arbeitspunkt „Validierung der Sensorik durch Prüfstandversuche“ verglichen (vgl. Kapitel 5.2.5).

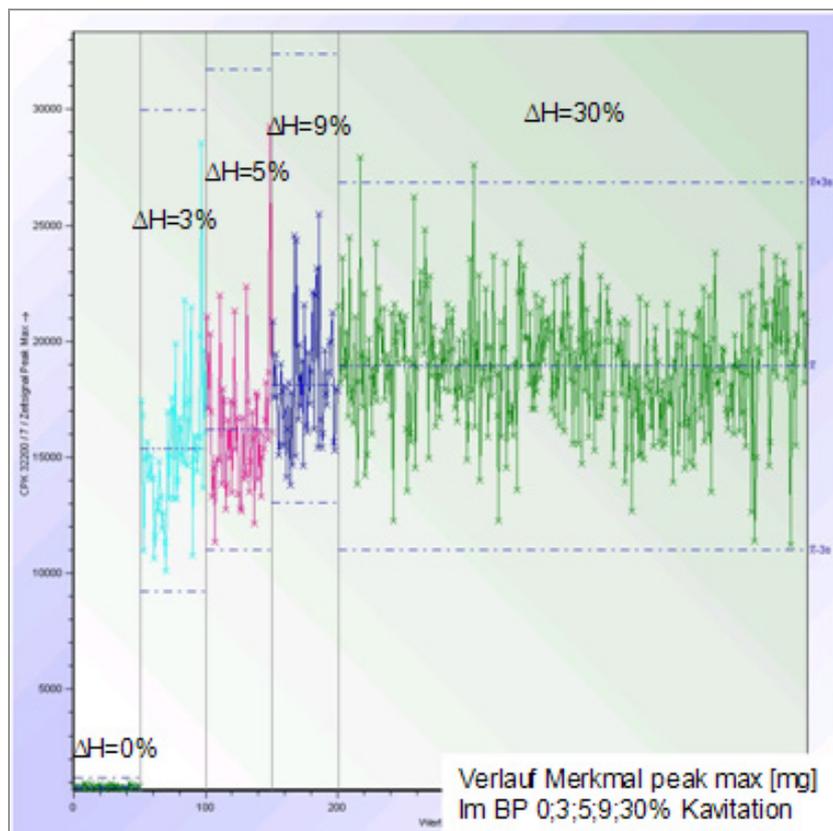


Abb. 82: Schwingungsmerkmal Peak Max, Kavitationsversuch

Ein Vergleich des Verlaufs der kavitationsbedingten Maschinenschwingungen mit dem Normalbetrieb zeigt, dass bereits ein Förderhöhenabfall von $\Delta H = 3\%$ einen signifikanten Anstieg des Schwingungspegels zur Folge hat. Mit zunehmendem Förderhöhenabfall steigt der

Schwingungspegel weiter an. Es sind jedoch keine starken Unterschiede zwischen $\Delta H = 9\%$ und $\Delta H = 30\%$ zu erkennen.

Nach Demontage der Gleitringdichtung konnten keine Verschleißspuren festgestellt werden (vgl. Abb. 83). Da bei den Versuchen reines Wasser ohne Feststoffe zum Einsatz kam, kann dies der Grund sein, warum kein Schaden an den Dichtflächen aufgetreten ist.

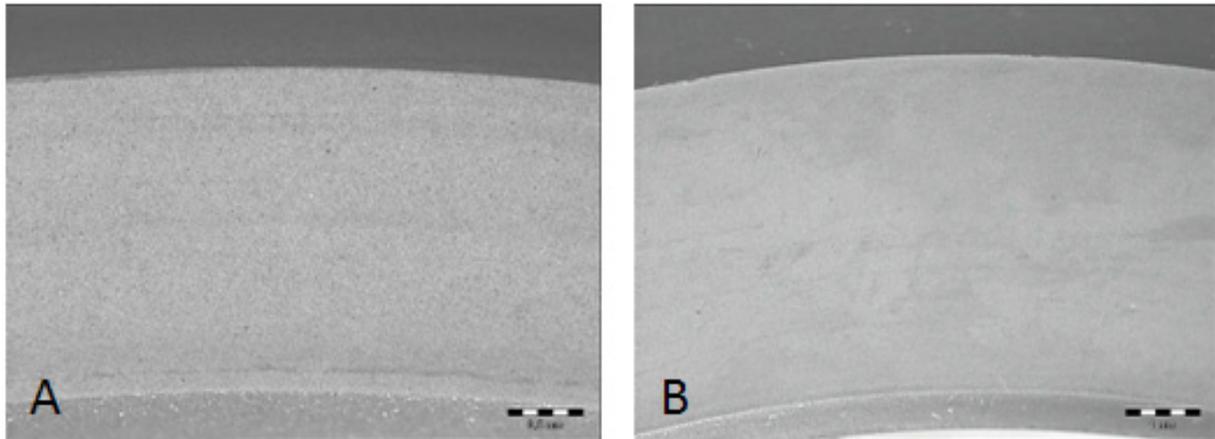


Abb. 83: Gleitring (A) und Gegenring (B) nach drei Wochen Kavitationsversuch

Der Versuch soll mit einer Veränderung der Betriebsparameter der Pumpe wiederholt werden, um herauszufinden, ob und wenn ja welchen Einfluss der Fördergrad der Pumpe auf das Ausfallverhalten der Dichtung hat.

In zukünftigen Forschungsprojekten sollte der Einfluss feststoffbeladener Medien im Kavitationsbetrieb der Pumpe in Hinblick auf das Betriebsverhalten der Gleitringdichtung untersucht werden.

Versuch 3: Einfluss vorgeschädigter Lager auf das Ausfallverhalten von GLRD

Zusätzlich wurde mit einem weiteren Langzeitversuch, der den Einfluss vorgeschädigter Lager auf das Betriebsverhalten der Gleitringdichtung klären sollte, begonnen. Hierzu wurde eine Versuchspumpe mit den zuvor beschriebenen vorgeschädigten Wälzlager ausgerüstet und die Pumpe zehn Wochen lang betrieben. Ob der aufgetretene Schaden an der Dichtfläche des Gleitrings eindeutig dem vorgeschädigten Lager zuzuschreiben ist, muss durch weitere Versuchsreihen in zukünftigen Forschungsprojekten bestätigt werden. Da diese Dauerlaufversuche autark ablaufen, stellen sie hohe Anforderungen an die Sicherheit. Des Weiteren bündeln sie viele Ressourcen. Auch diese Versuchsreihen bleiben Gegenstand zukünftiger Forschung am Lehrstuhl SAM. Es gibt verschiedene Veröffentlichungen und Erfahrungen anderer Institute und Unternehmen, die Ausfälle von Gleitringdichtungen auf geschädigte Wälzlager zurückführen, vgl. hierzu bspw. [Sonn09].

5.4.5 Plausibilitätsprüfung der Messdaten

Die Belastbarkeit der Daten stellt eine Plausibilitätsprüfung in Form eines MATLAB-Programms sicher. Das Programm umfasst folgende Funktionalitäten:

- - Prüfung der Datenvollständigkeit,
- - Prüfung der physikalischen Plausibilität,
- - Prüfung der messtechnischen Plausibilität und
- - Prüfung der technischen Plausibilität.

Bei der Prüfung auf physikalische Plausibilität werden die Messwerte und daraus berechnete Größen mit allgemeinen physikalischen Grenzen verglichen. Beispiele hierfür sind: Aggregatwirkungsgrad < 1 oder Eintrittsdruck ≥ 0 bar (bei Absolutdruck-Sensoren). Die messtechnische Plausibilität eines Messwerts ist gegeben, wenn sich dieser innerhalb des Messbereichs des jeweiligen Sensors bewegt.

Die technische Plausibilität der Messwerte oder daraus berechneter Merkmale ist gegeben, wenn diese die baureihen- bzw. baugrößenabhängigen Ober- oder Untergrenzen nicht verletzen. Beispiele für Obergrenzen sind der modellabhängige maximale Austrittsdruck und der maximale Volumenstrom der Pumpe. Ein gewisser Anspruch entsteht durch die Fallunterscheidung zwischen laufender und stehender Maschine. Bei laufender Maschine erfolgt ferner ein Abgleich der Daten mit den Kennlinien des Herstellers.

Die Ergebnisse der Plausibilitätsprüfung werden für jeden einzelnen Messwert über einen Fehlercode codiert und in einer Datenbank verwaltet. Die Zusammenhänge der Plausibilitätsprüfung sind im Angang 4: Plausibilitätsprüfung dargelegt.

5.4.6 Analyse der Betriebsweise der Versuchspumpen

Ziel dieser Analyse ist es, die Betriebsweise der untersuchten 100 Pumpen zu charakterisieren. Die Realisierung erfolgt in Form einer MATLAB -Applikation, die automatisiert Diagramme, Scatterplots und Histogramme ausgewählter Daten aller Pumpen erstellt. Die Ergebnisse werden in Form eines elektronischen Katalogs verwaltet, der einen schnellen Zugriff auf alle 1180 Abbildungen über Hyperlinks ermöglicht. Die Analyse zielt auf die Charakterisierung typischer und untypischer Betriebsweisen, z. B. hinsichtlich Laufzeiten, Betriebspunkte, Kavitationsgefährdung und deren Auswirkungen auf das Schwingungsverhalten der Maschinen ab. Ferner werden spezielle Fragen der Schwingungsexperten aufgegriffen, wie zum Beispiel die Frage danach, ob bei baugleichen Maschinen ähnliche Schwingungen auftreten.

Die Analyse der Betriebsweise umfasst im Wesentlichen die zwei Themen:

- Charakterisierung des hydraulischen Betriebs und
- Charakterisierung der Betriebspunktabhängigkeit ausgewählter Messgrößen und Merkmale.

5.4.6.1 Charakterisierung des hydraulischen Betriebs

Der hydraulische Betrieb der untersuchten Kreiselpumpen soll hier über die Größen Förderhöhe und Förderstrom bzw. Fördergrad beschrieben werden. Aufgrund des drehzahlstarren Antriebs aller betrachteten Maschinen kann auf Drehzahlbetrachtungen verzichtet werden. Eine Charakterisierung kann durch die Beantwortung folgender Fragen erfolgen:

- Wie variieren die Betriebspunkte der Maschinen zeitlich?
- Wie variieren die Betriebspunkte innerhalb der betrachteten Maschinenauswahl?
- Wo liegen die Betriebspunkte relativ zu Herstellerkennlinien und Betriebspunkten optimalen Wirkungsgrades?

Zur Beantwortung dieser Fragen werden folgende Darstellungen generiert und ausgewertet:

- H-Q Scatterplot mit Katalogkennlinie,
- Verteilung der Betriebsstunden über dem Fördergrad,
- 3D-Verteilung der Betriebsstunden über dem Fördergrad.

Anhand des H-Q Scatterplot kann bewertet werden, inwiefern eine Pumpe auf der vom Hersteller vorgegeben Kennlinie läuft. Abbildung 84 zeigt einen solchen Scatterplot mit der Herstellerkennlinie (in der Grafik als blaue Linie zu erkennen). Treten Abweichungen von dieser Kennlinie auf, so können diese zum Beispiel durch Verschleiß, Verstopfung oder Fertigungstoleranzen erklärt werden.

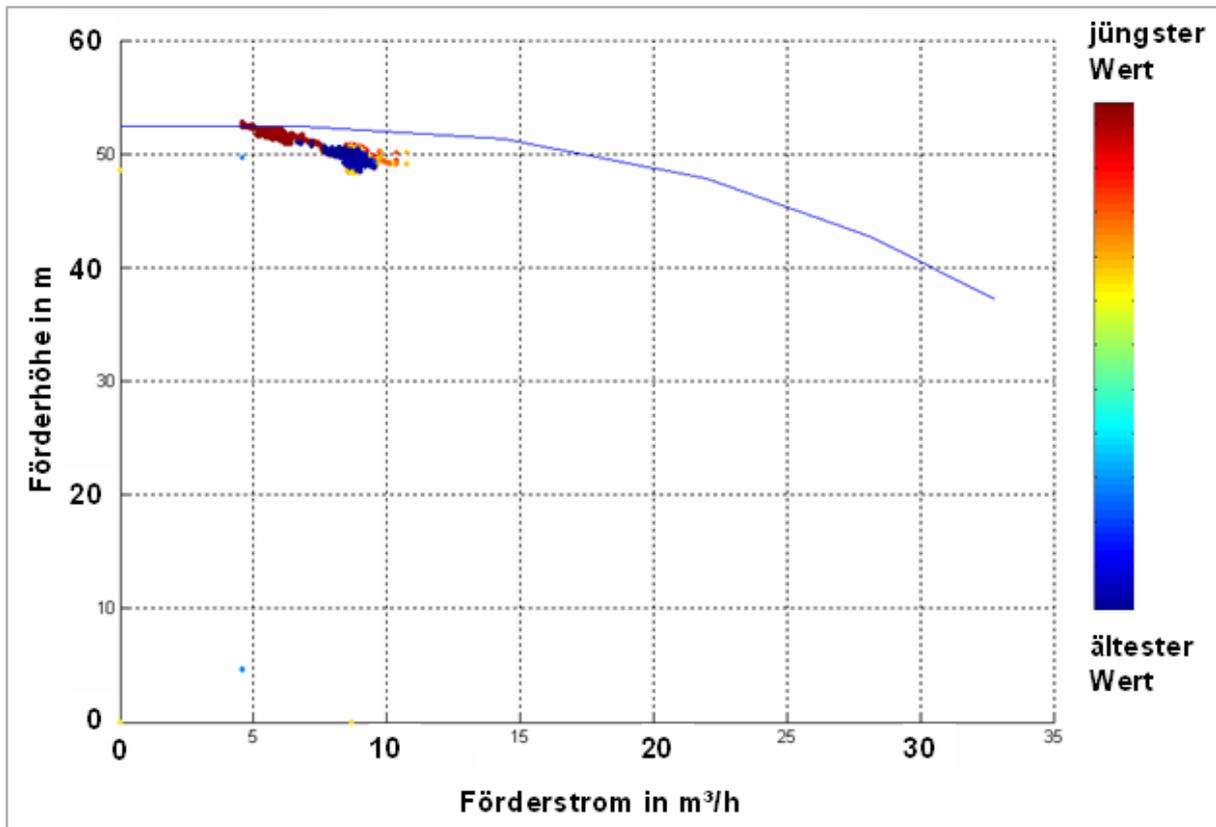


Abb. 84: H-Q Scatterplot der Pumpe P261 (Laufzeit: 410 Stunden)

Wird wie hier zusätzlich die Zeit durch Variation der Farbe der einzelnen Messpunkte dargestellt, kann diese Darstellung auch zur Trendanalyse des Betriebspunktes genutzt werden.

Die Verteilung der Betriebsstunden über dem Fördergrad (vgl. Abb. 85) charakterisiert die Aufteilung der Betriebszeit auf unterschiedliche Betriebspunkte.

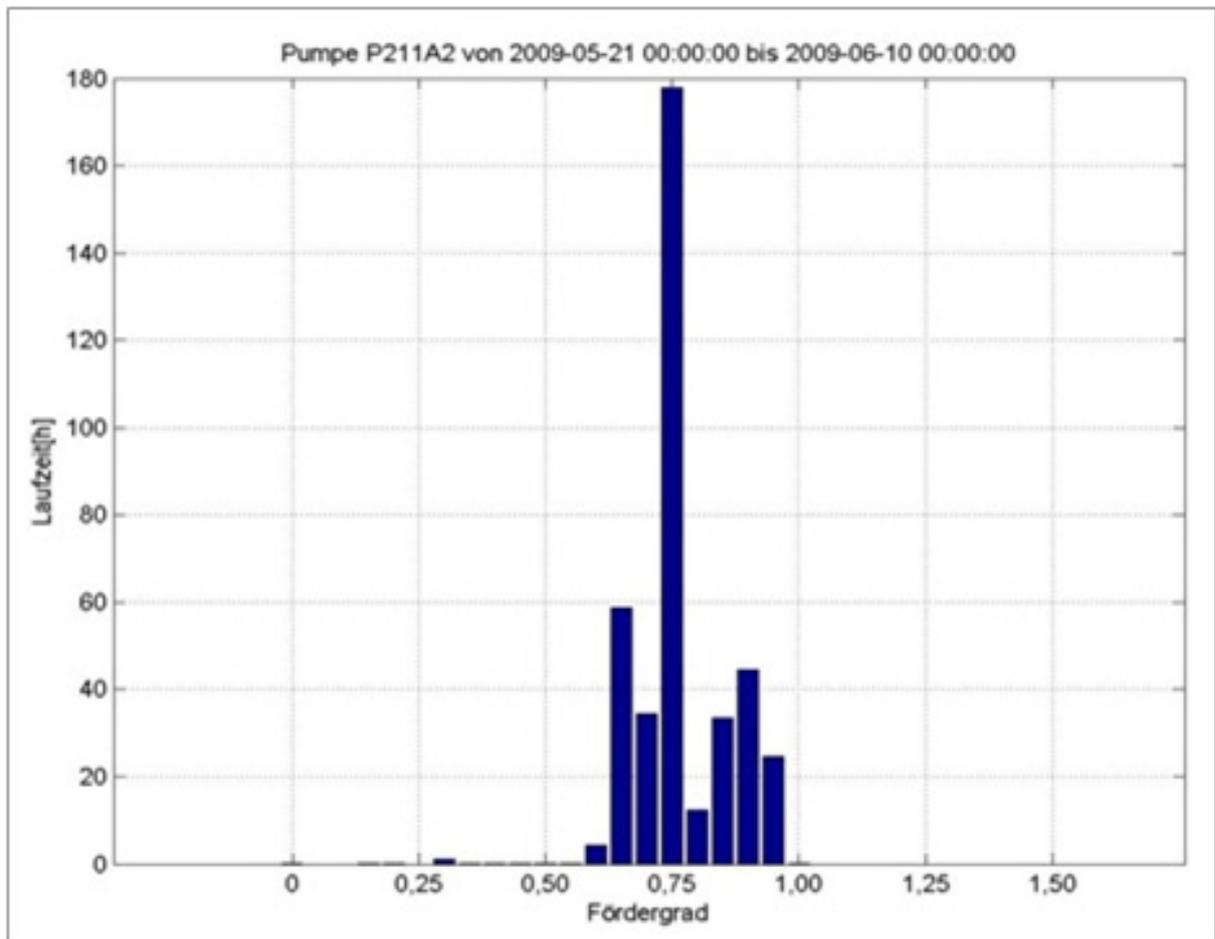


Abb. 85: Verteilung der Betriebsstunden über dem Fördergrad

Anhand der 3D-Verteilung der Betriebsstunden (vgl. Abb. 86) lässt sich die Gesamtheit der Pumpen hinsichtlich der Lage ihres Betriebspunkts beurteilen. Hier werden die Werte aller Pumpen entlang einer dritten Koordinate aufgereiht. In der Abbildung ist der empfohlene Betriebsbereich mit einem grünen Doppelpfeil dargestellt.

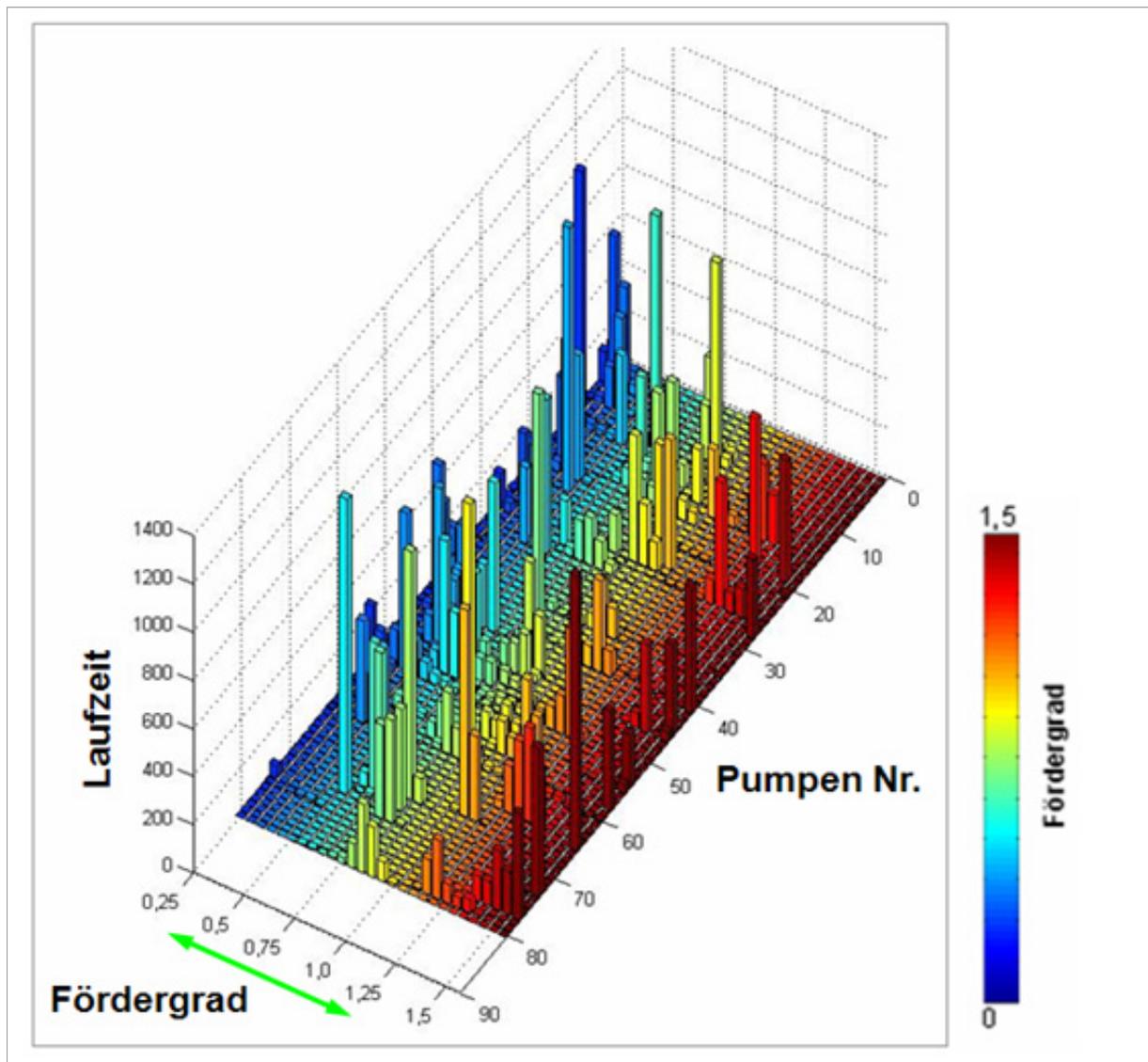


Abb. 86: 3D-Verteilung der Betriebsstunden

5.4.6.2 Charakterisierung der Betriebspunktabhängigkeit ausgewählter Messgrößen und Merkmale

Hinsichtlich der Betriebspunktabhängigkeit stellen sich insbesondere folgende Fragen:

- Sind erkennbare Abhängigkeiten charakteristisch für alle oder bestimmte Teilmengen der betrachteten Maschinen?
- Haben die unterschiedlichen Baugrößen einen erkennbaren Einfluss auf das Schwingungsverhalten?

Scatterplots der einzelnen Merkmale über dem Fördergrad ermöglichen eine Beantwortung dieser Fragen. Abbildung 87 zeigt exemplarisch den Scatterplot für den Betragsmittelwert

der Schwingbeschleunigung. Diese Grafiken werden sowohl in 2D zur Beurteilung einzelner Pumpen, als auch in 3D für Pumpengruppen erzeugt.

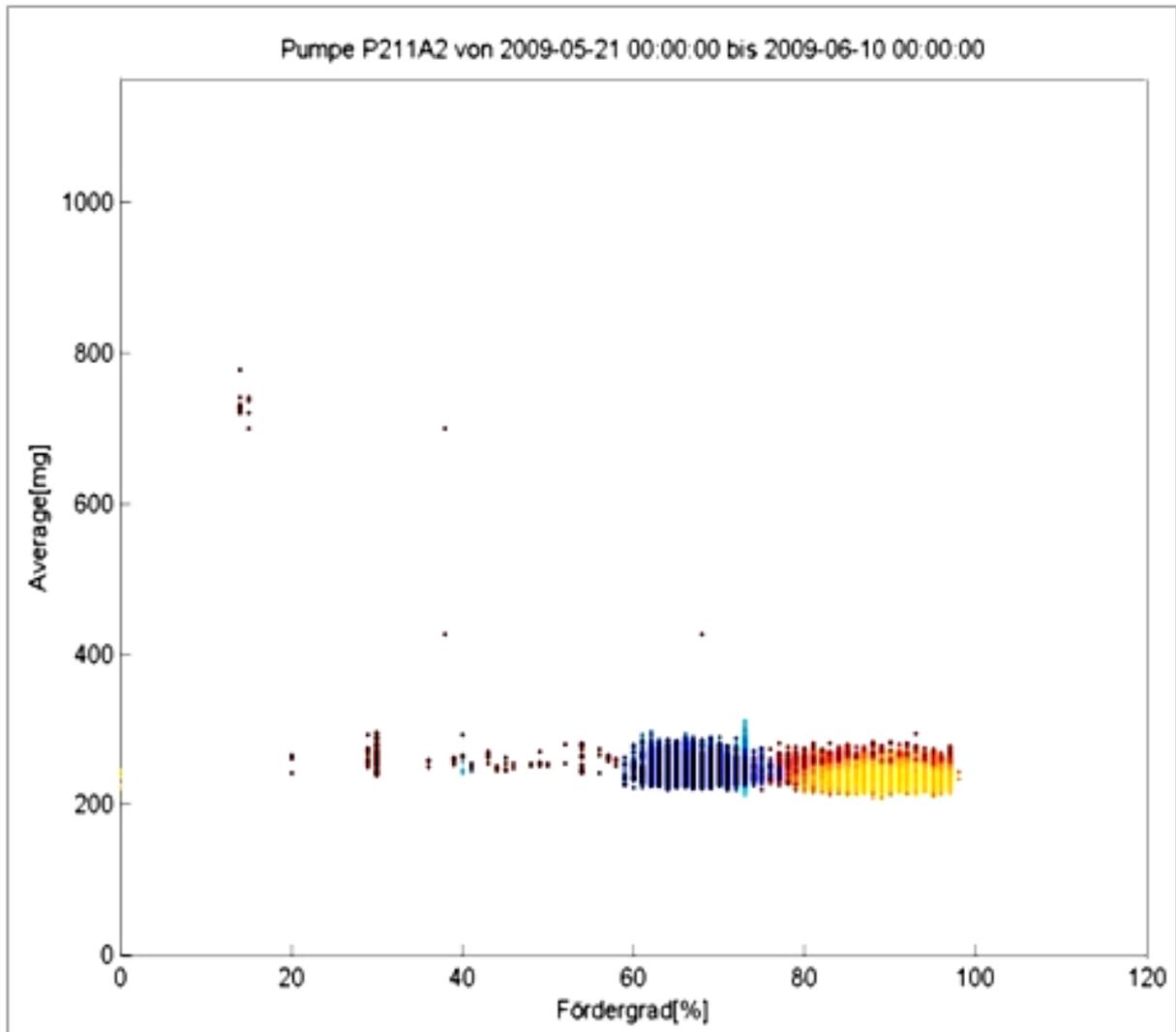


Abb. 87: Scatterplot Betragsmittelwert der Schwingbeschleunigung

Ergänzend hierzu zeigt Abbildung 88 die Verteilung der Laufzeit über dem Betragsmittelwert der Schwingbeschleunigung.

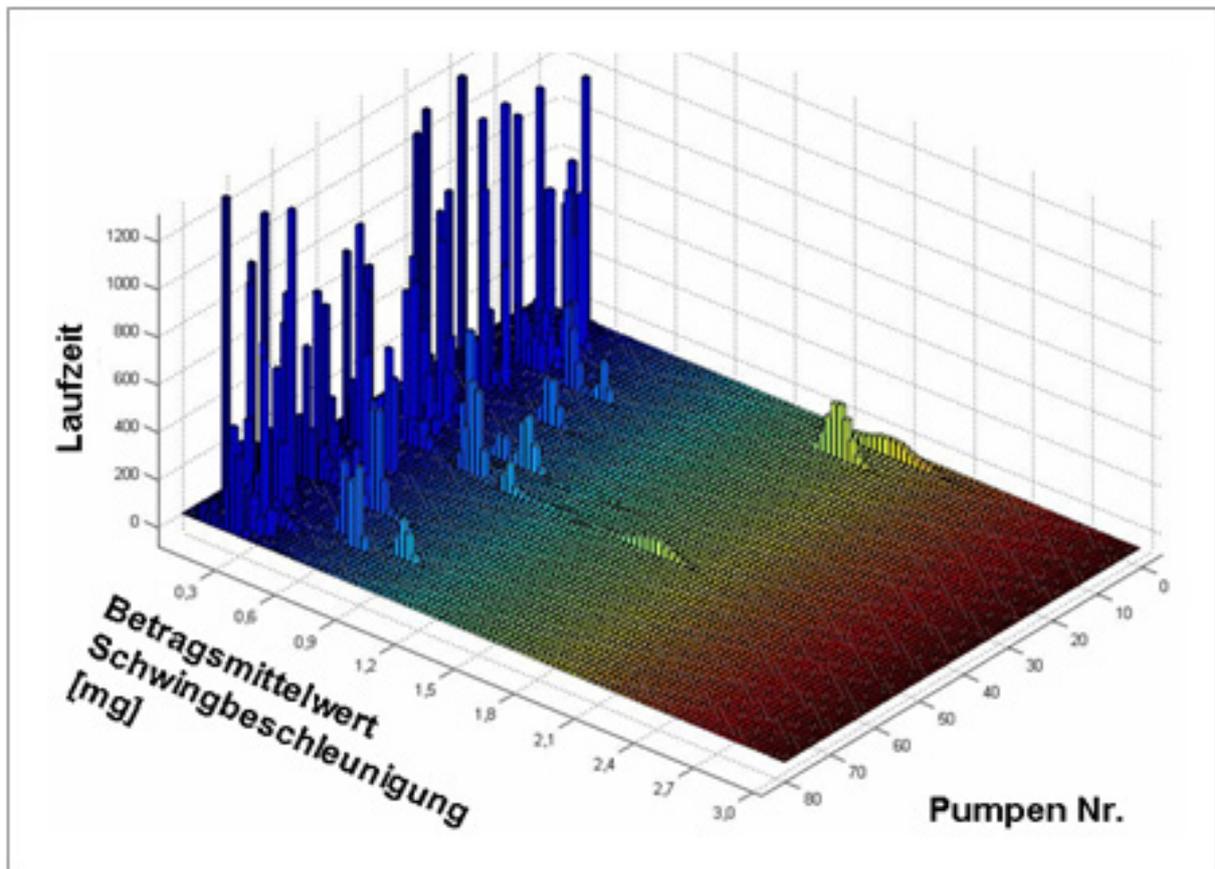


Abb. 88: Laufzeit über dem Mittelwert der Schwingbeschleunigung

5.4.6.3 Zusammenfassung

Wesentlich Erkenntnisse der Analyse sind:

- Die meisten der betrachteten Maschinen sind Dauerläufer (sie werden im Durchschnitt mehr als zwölf Stunden am Stück betrieben).
- Die Betriebspunkte der Versuchsmaschinen liegen unerwartet häufig außerhalb des empfohlenen Betriebsbereichs.
- Die meisten der betrachteten Maschinen laufen abseits des optimalen Betriebspunkts.
- Ein prinzipieller Zusammenhang zwischen dem Betriebspunkt der untersuchten Maschinen und dem Schwingungsverhalten ist nicht erkennbar.
- Gemeinsamkeiten im Schwingungsverhalten ähnlicher Maschinen sind nur sehr begrenzt auffindbar.
- Vereinzelt Maschinen fallen durch überdurchschnittlich hohe Schwingungswerte auf.

5.4.7 Datenauswertung

5.4.7.1 Einzelanalysen ausgewählter Pumpen

Im Folgenden werden ausgewählte Beispiele vorgestellt, bei denen Auffälligkeiten in den Betriebsdaten erkannt wurden.

Analysen nach manueller, stichprobenartiger Sichtung der Daten (direkte Selektion auf Datenbankebene)

Beispiel 1: Überhöhte Messwerte auf den Schwingungsmerkmalen

Die Erfahrungen des Projektpartners i-for-t/ ifm bezüglich Lagerdiagnose sind in der folgenden Grenzwerttabelle (vgl. Abb. 89) zusammengefasst.

octavis Object value	120 to	500 to	1000 to	3000 to
Bearing (= BPFO+BPFI+BSF)	500 rpm	1000 rpm	3000 rpm	12000 rpm
> 550				
450 to 550 mg				
350 to 450 mg			P812A	
250 to 350 mg				
150 to 250 mg				
50 to 150 mg				
0 to 50 mg				

Abb. 89: Grenzwerte für Schwingungsdiagnose für Lager bei unterschiedlichen Drehzahlen und Klassifikation der Pumpe P812A

Nach Überprüfung der Datenmenge auf Datenbankebene konnte eine Pumpe gefunden werden, die sehr hohe Kennwerte auf dem erfassten Merkmal Lagerzustand hat. Bei dieser Pumpe handelte es sich um eine Verladepumpe, die permanent zur Umwälzung eines Fördermediums im Tank in Betrieb ist. Je nach Bedarf wird zusätzlich eine Abfüllung aktiv (z. B. zum Befüllen eines Tankwagens).

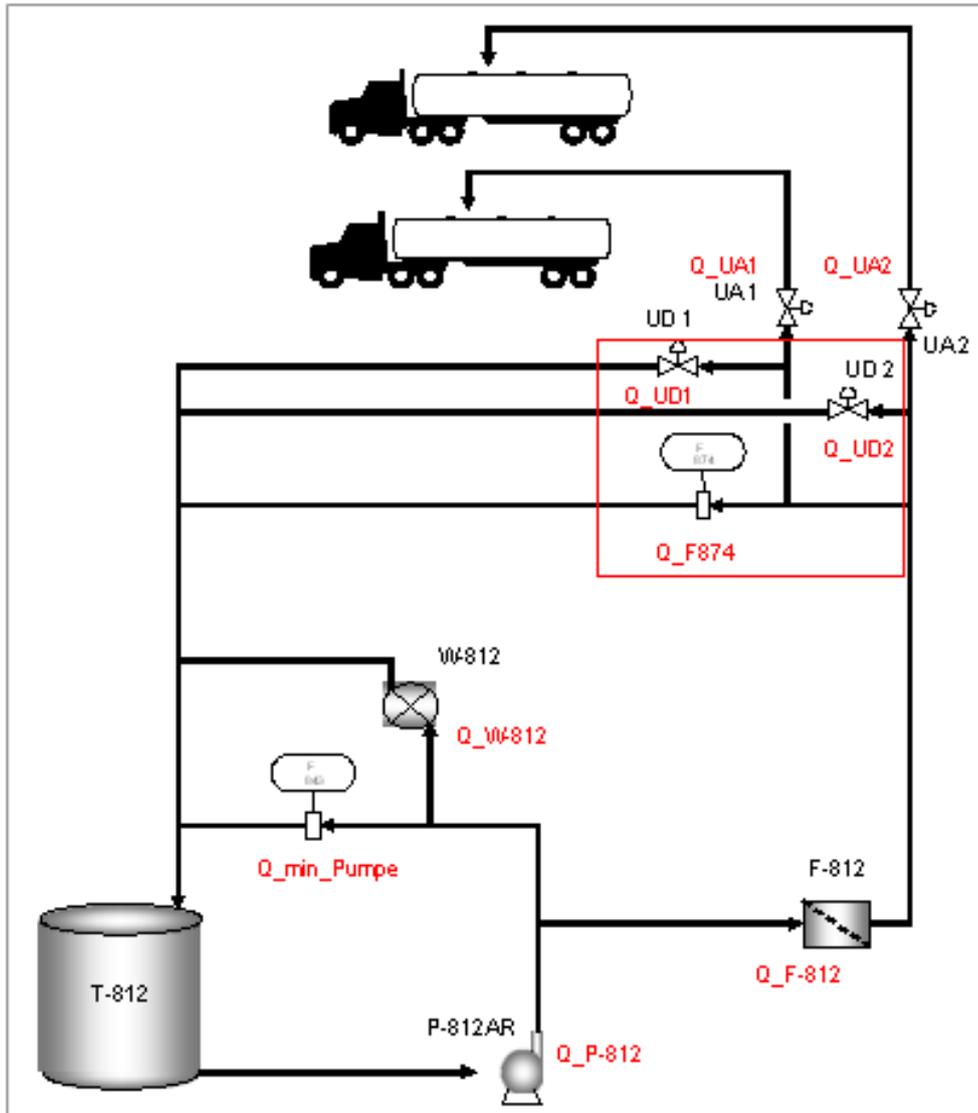


Abb. 90: Fließbild der Verladung P812A

Nachfolgende Abbildung 91 stellt zeitgleich den Verlauf mehrerer Merkmal dar.

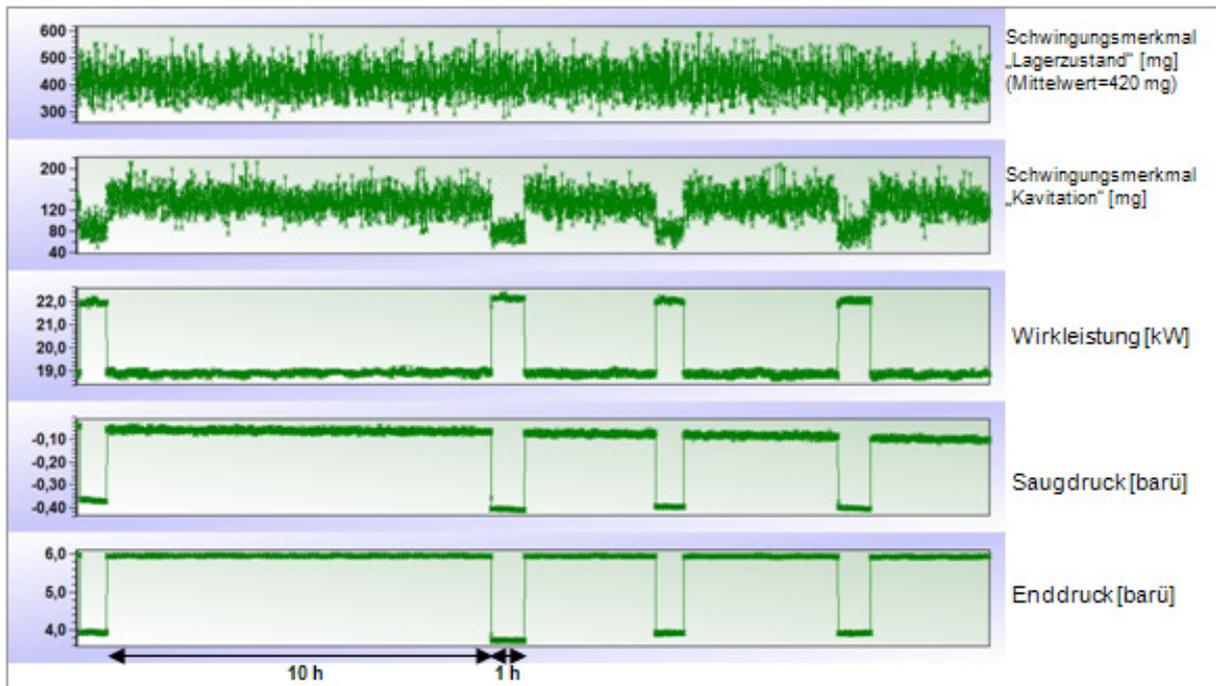


Abb. 91: Schwingungsmerkmale und Prozessdaten der Pumpe P812A (Zeitraum 24h)

Das Schwingungsmerkmal Lagerzustand zeigt deutlich die permanente Überhöhung mit Mittelwerten um 420 mg. Im Verlauf der Wirkleistung sind die Zeitpunkte einer Verladung zu erkennen. Der Vorgang der Verladung dauert in etwa eine Stunde. Nach Analyse und Rückfrage im Betrieb konnte der Ist-Zustand der Anlage ermittelt werden:

Die Pumpe wird während der Umwälzung in Überlast betrieben. Findet zusätzlich noch eine Tankwagenbefüllung statt, verschiebt sich der Betriebspunkt der Pumpe weiter in Richtung starke Überlast (vgl. Abb. 92). Dieser Zustand ist die Ursache für die starke Überhöhung des Merkmals Lagerzustand.

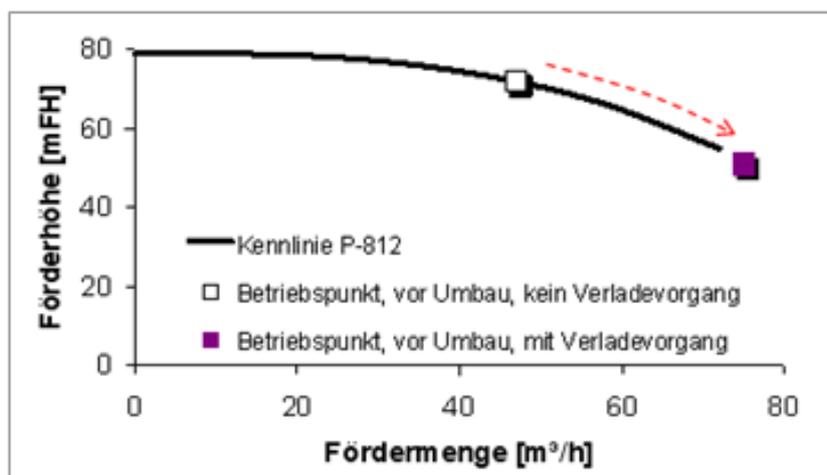


Abb. 92: Kennlinie und Betriebspunkte vor Umbau

Um diesen nicht bestimmungsgemäßen Betrieb der Pumpe zu vermeiden, verbaute der Betrieb in dem Rohrleitungssystem eine Blende. Diese Blende dient als Strömungswiderstand und verändert den Betriebspunkt der Pumpe in Richtung Teillast (vgl. Abb. 93).

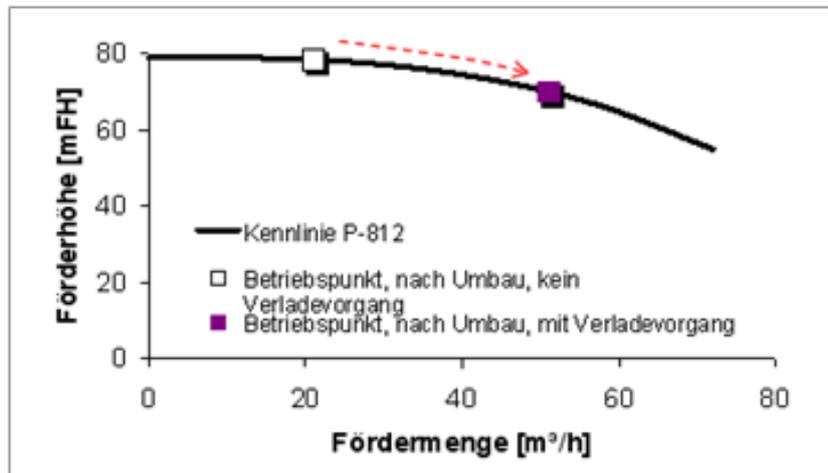


Abb. 93: Kennlinie und Betriebspunkte nach Umbau

Die Verschiebung des Betriebspunktes ist in den Daten aus Marl sehr gut nachzuvollziehen (vgl. Abb. 94).

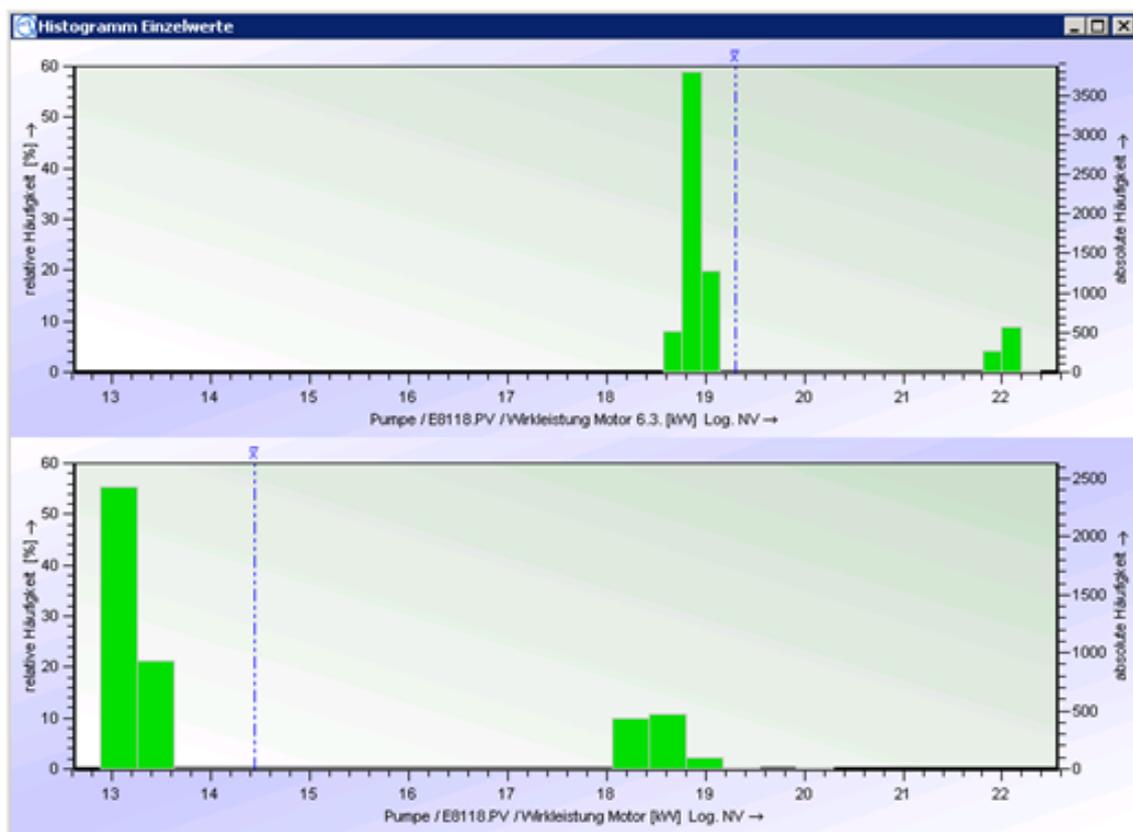


Abb. 94: Auswirkung des Umbaus auf den Betriebspunkt

Der Vergleich der Messdaten nach dem Einbau der Blende zeigt, dass die Werte des Schwingungsmerkmals Lagerzustand zurück auf 360 mg gefallen sind (vgl. Abb. 95).

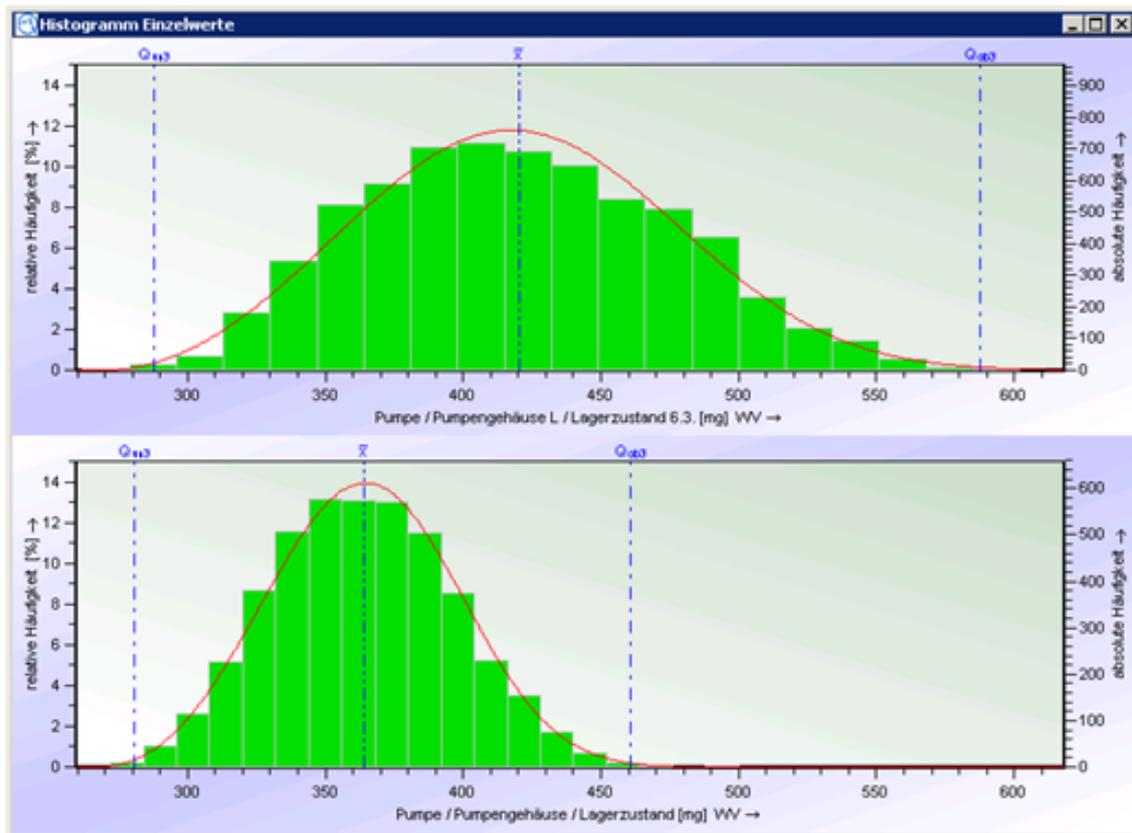


Abb. 95: Auswirkung des Umbaus auf den Lagerkennwert

Das Merkmal Lagerzustand verhält sich proportional zu einer Veränderung des Betriebspunktes.

Das Merkmal Kavitation ist mit Werten im Mittel um 200 mg überhöht (vgl. Abb. 96). Diese Schwingungen an der Pumpe können auch in den Angaben aus den Wartungs- und Inspektionsrundgängen nachvollzogen werden (aber unabhängig von der Umbaumaßnahme).

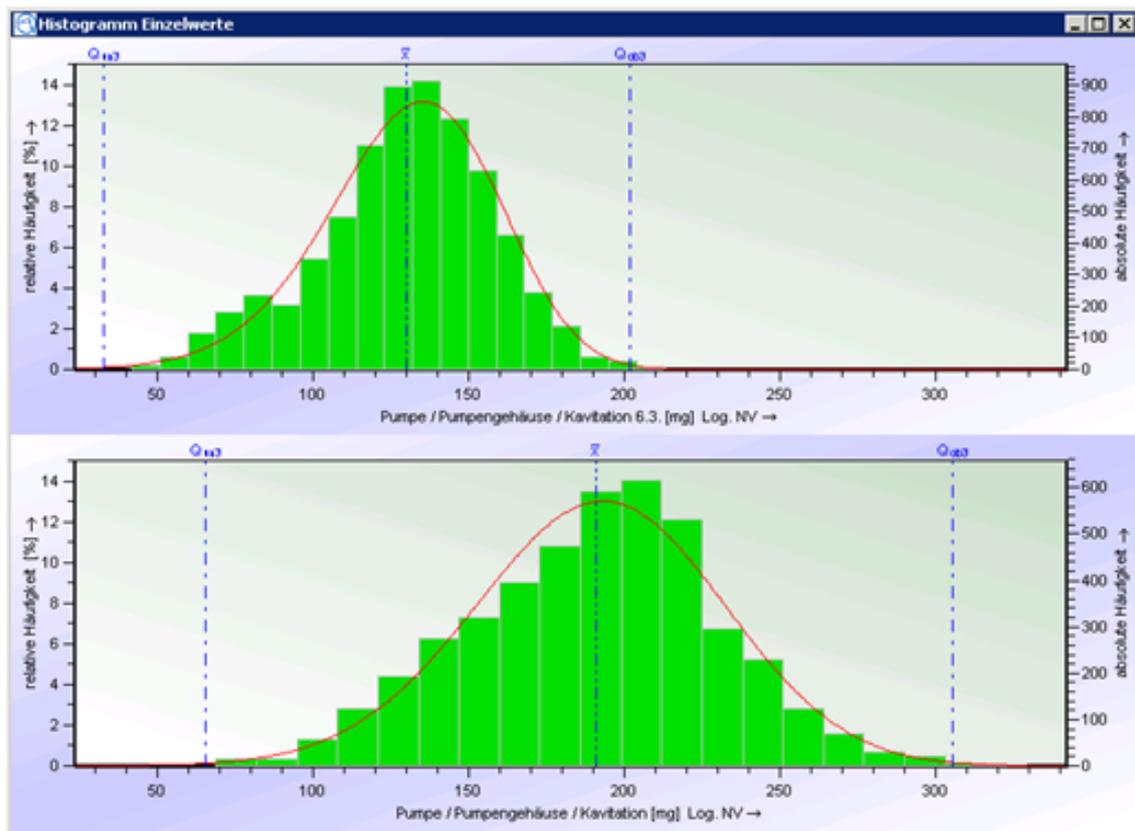


Abb. 96: Auswirkung des Umbaus auf den Kennwert für Kavitation

Vergleicht man das Schwingungsverhalten der Pumpe aus dem Feld mit den Erfahrungen aus den Prüfstandversuchen, kann man die Veränderung des Schwingungsverhaltens der Feldpumpe begründen, da das Merkmal Kavitation abhängig vom Betriebspunkt der Pumpe ist. Die Prüfstandversuche haben gezeigt, dass sich das Kavitationsmerkmal nicht proportional mit dem Betriebspunkt ändert, wenn Kavitation vorliegt.

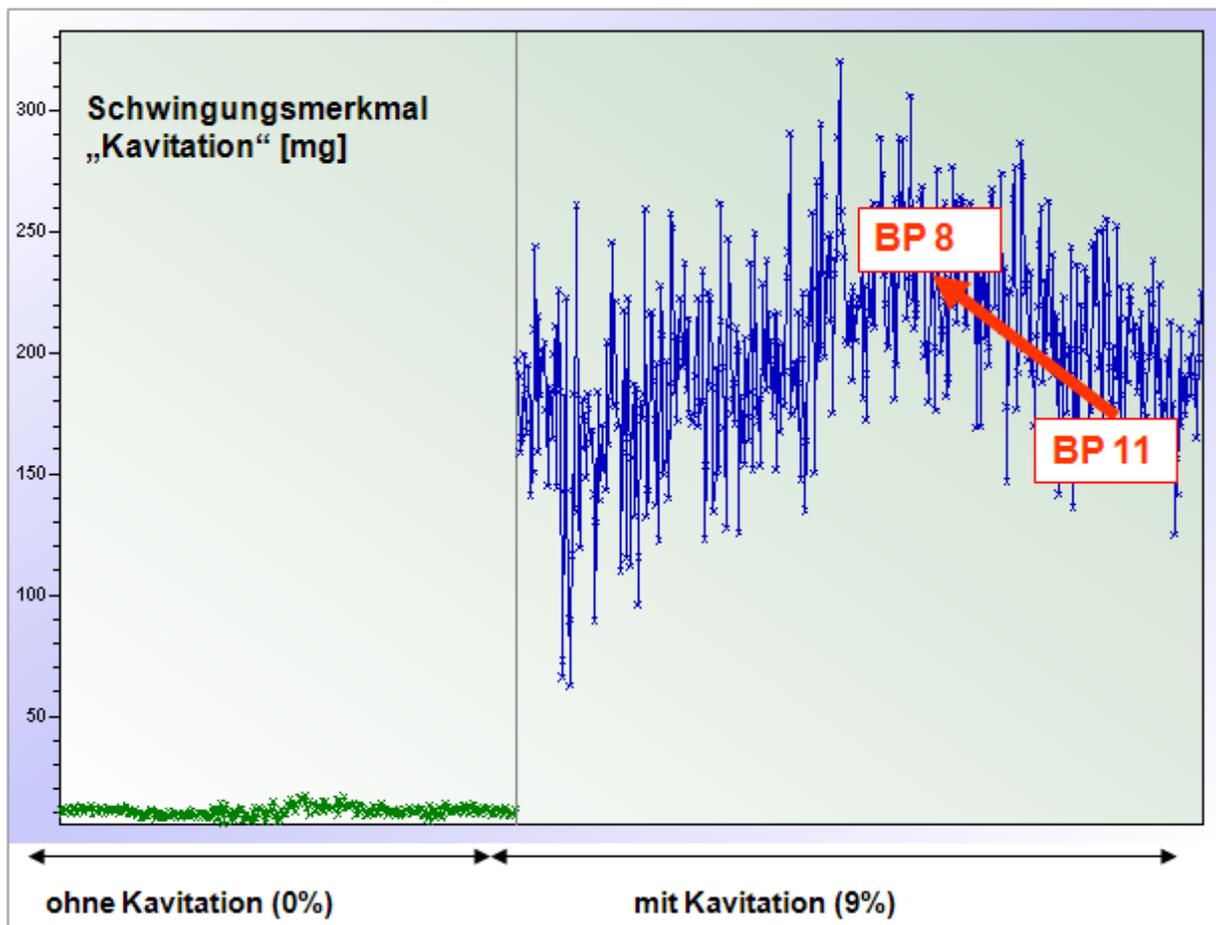


Abb. 97: Kavitationsversuche auf dem Prüfstand

Die Pumpe im Feld wird im Bereich von Überlast betrieben (in Abbildung 97 mit dem roten Pfeil gekennzeichnet). Dort bewirkt eine Verschiebung des Betriebspunktes in Richtung Optimum eine Erhöhung der Signalwerte (in der Grafik oben von BP 11 nach BP 8).

Aus den Daten ist nicht eindeutig nachvollziehbar, ob die Pumpe mit einem Lagerschaden und/oder in Kavitation betrieben wird. Bei dem nächsten Werkstattaufenthalt der Pumpe wird nachgeprüft, ob ein Lagerschaden vorliegt oder die Pumpe in Kavitation betrieben wurde.

Beispiel 2: Zugesezter Filter in der Saugleitung

Nach Selektion auf Datenbankebene konnten für die Suche nach Werten größer 200 mg für das Kavitationsmerkmal folgende Pumpe gefunden werden: Es handelt sich um eine Pumpe der hydraulischen Baugröße 50-315. Der Vergleich der Messdaten Saugdruck, Wirkleistung und Schwingungsmerkmal Kavitation zeigt deutlich eine Abnahme des Zulaufdruckes bei nahezu gleichbleibender Wirkleistung.

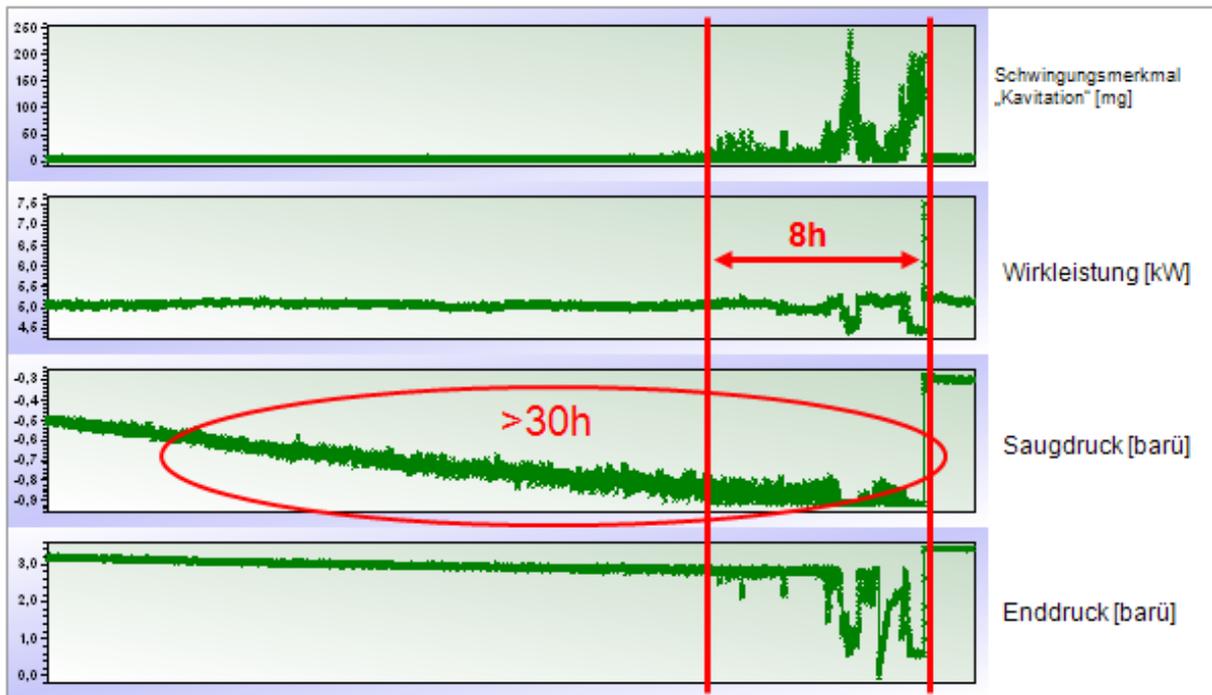


Abb. 98: Schwingungsmerkmale und Prozessdaten bei sich zusetzendem Filter (Zeitraum ca. 35h)

Nach Rücksprache mit dem Betrieb konnte in der Saugleitung ein Filter identifiziert werden, der sich im Laufe des Betriebes durch im Medium befindliche Partikel zusetzt. Sobald der Strömungswiderstand in der Saugleitung zu groß wird, befindet sich die Pumpe im nicht bestimmungsgemäßen Betrieb Kavitation. Die Abnahme des Zulaufdruckes, also das Zusetzen des Filters, kann frühzeitig mit Hilfe der Prozessdaten erkannt werden. Der nichtbestimmungsgemäße Betriebszustand wird durch den Schwingungssensor eindeutig sichtbar. Kriterium ist die Zunahme der Schwingungsmerkmale. Wenn der Filter vorschriftsmäßig gereinigt wird, lässt sich der Zustand des Kavitationsbetriebes vermeiden. Da mit Hilfe von Prozess- und Schwingungsdaten der Prozess transparent wird, lassen sich klare Handlungsanweisungen definieren und Mitarbeiter können sensibilisiert werden.

5.4.7.2 Datenanalysen basierend auf rückgemeldeten Ausfällen

Zunächst ein kurzer Überblick über die „Gesamtheit“ der Ausfälle:

Als Betrachtungszeitraum für den Abschlussbericht wurde Oktober 2008 bis Dezember 2009 festgelegt. In diesem Zeitraum wurden 51 Ausfälle bei 26 unterschiedlichen Pumpen beobachtet. 14 dieser 26 Pumpen sind mehrfach ausgefallen. Bei diesen Ausfällen handelt es sich um Schäden an der Gleitringdichtung. Diese Tatsache untermauert die Erkenntnisse der Betreiberumfrage, dass es sich bei der GLRD um das ausfallkritischste Bauteil handelt.

Aus den gemeldeten Ausfällen werden im Folgenden exemplarisch einige Pumpen betrachtet.

P812A:

Die Auffälligkeiten bezüglich der Prozess- und Schwingungsdaten wurden in Kapitel 5.4.7.1 schon gezeigt. Parallel dazu konnten auch bei den Meldungen der Anlagenläufer im Vorfeld eines Ausfalls Tendenzen erkannt werden, die auf einen Ausfall der GLRD hindeuten.

Bei dieser Pumpe traten innerhalb von vier Wochen zwei GLRD-Schäden auf. Bei der Nachbetrachtung der Rückmeldungen der Anlagenläufer zu dieser Pumpe konnte bei der dokumentierten Nachfüllmenge jeweils Abweichungen zu dem „Normalbetrieb“ festgestellt werden. Ebenso hatte der Anlagenläufer erhöhte Schwingungen an der Pumpe vermerkt (vgl. Octavis-Werte in Kapitel 5.4.7.1). Neben den Schwingungen hat der Anlagenläufer auch Medienaustritt vermerkt.

Abzuklären bleibt, welchen Einfluss genau die Betriebsweise auf den Ausfallmechanismus der GLRD bei dieser Pumpe hat.

P211A2:

Bei dieser Pumpe liegen mehrere Ausfälle innerhalb des Betrachtungszeitraumes vor. Dabei handelt es sich immer um GLRD-Schäden. Im Gegensatz zur Pumpe P812A können hier jedoch keine Auffälligkeiten in den erfassten Prozess- oder Schwingungsdaten erkannt werden. Indizien in Richtung eines GLRD-Schadens liefern lediglich die Rückmeldungen der Anlagenläufer.

Folgende Situation ergab sich aus der Analyse der Prozessinformationen (vgl. Abb. 99):

- Die Pumpe läuft unauffällig,
- Kein Betrieb in Kavitation (siehe $NPSH_A$ -Wert unauffällig),
- Keine Auffälligkeiten bei der Betriebsweise.

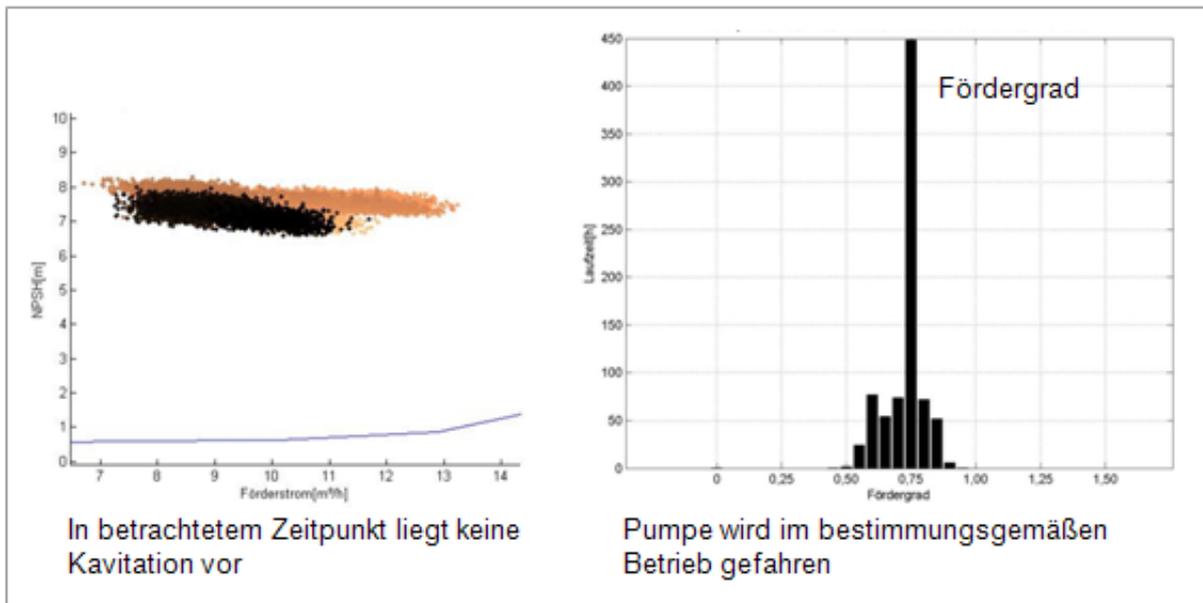


Abb. 99: Prozessdaten der Pumpe

P2230A:

Die Pumpe der hydraulischen Baugröße 25-160 ist mit einer gasgeschmierten Gleitringdichtung ausgeführt. Nach Prüfung der Daten auf Auffälligkeiten konnte ein mehrmaliges Anfahren der Pumpe (vgl. Abb. 100) festgestellt werden.

Schadensursache war hier eine zugesetzte Entlüftungsleitung der Pumpe. Das Entlüften der Pumpe war dadurch nicht möglich und mehrmaliges Anfahren der Pumpe führte zum Trockenlauf der Dichtung und folglich zum Schaden. Hier wurde durch das Auseinandersetzen mit den Messdaten in Verbindung mit der Schadensursache der Prozess sichtbar gemacht und eine klare Handlungsanweisung zum Pumpenstart vom Projektpartner erfasst und umgesetzt.

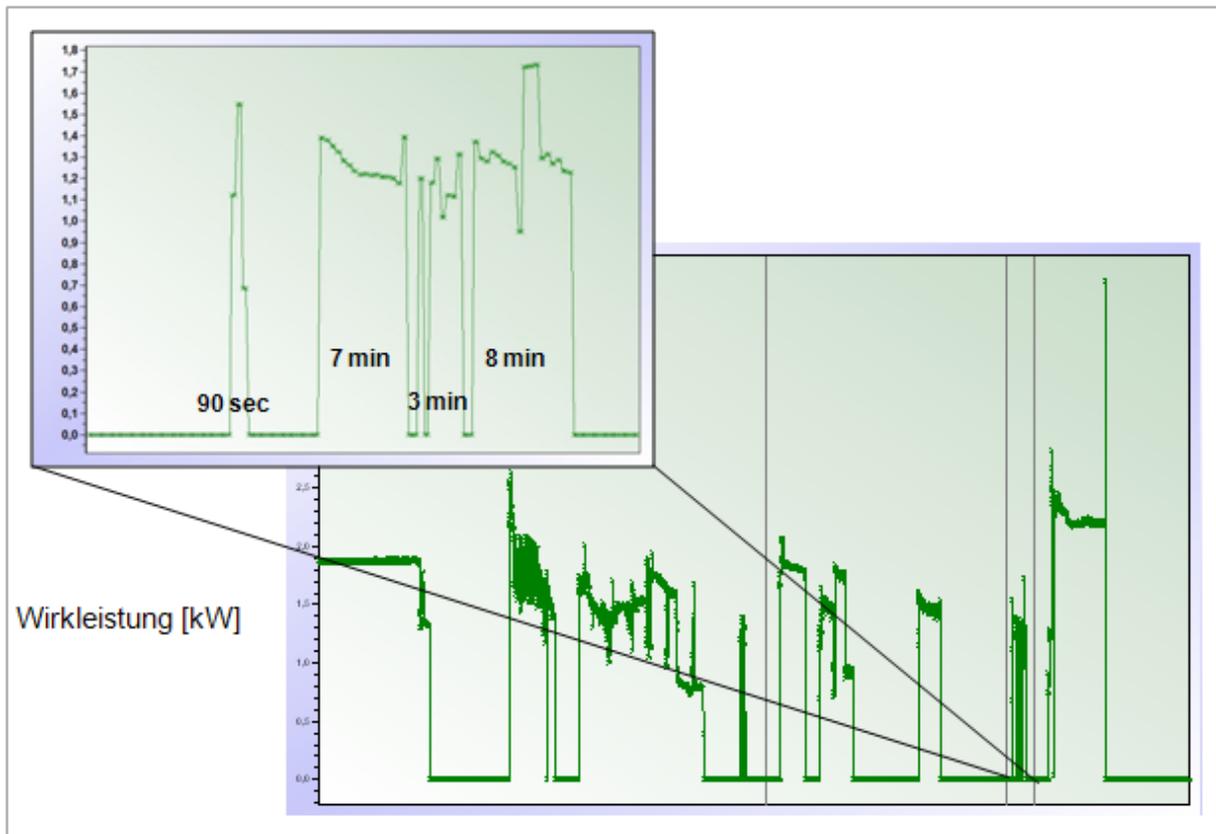


Abb. 100: Mehrfaches Anfahren der Pumpe P2230A

In einer Nachbetrachtung können die unterschiedlichen Anfahrvorgänge in den Daten wiedergefunden werden. Sinnvoll ist aber ein direktes Reagieren beim Anfahren vor Ort bzw. eine Möglichkeit, den Zustand der Entlüftungsleitung zu Erkennen.

5.4.7.3 Zusammenfassung

Zurzeit handelt es sich bei der Ausfallbetrachtung um eine Einzelfallanalyse einer bestimmten Pumpe. Allgemeingültige Aussagen sind schwer zu treffen, da in den Ausfällen keine Systematik erkennbar ist.

Ausfälle lassen sich reduzieren, indem eine kritische Auseinandersetzung mit dem System Pumpe, Verfahrenstechnik, Anlage und Mensch stattfindet. Fragen, die es im Einzelfall zu beantworten gilt, sind u. a., ob Pumpen korrekt dimensioniert sind oder ob eine Anpassung der Werkstoffpaarungen der GLRD ratsam wäre.

Ebenso lassen sich Ausfälle reduzieren, in dem die Mitarbeiter zusätzlich für das Zusammenspiel von Pumpe und Betriebsweise sensibilisiert werden.

5.4.7.4 Auswertung der Einwirkdauern mechanischer Schwingungen

Von den dokumentierten Schäden sind folgende Pumpen aufgrund wiederholten Ausfalls der GLRD sowie Vollständigkeit der Messdaten im Auswertzeitraum im Detail betrachtet worden:

- P211A (4 Schäden an GLRD)
- P411A (3 Schäden an GLRD)
- P441A (2 Schäden an GLRD)
- P110A (2 Schäden an GLRD)
- P812A (2 Schäden an GLRD)
- P652A2 (Laufgeräusche und GLRD-Ausfall).

Dabei wurde die unten aufgeführte Einwirkdauer als Summe der mittleren Tageseinwirkung für die jeweilige Pumpe ermittelt. Die dargestellten Tabellen sind in der jeweils markierten Spalte der Größe nach sortiert.

#	machine_id	peak	avg	lager	kav	unwuch	harm.	schaufe	days
1	P441A	700688	113799	42635	16337	1741	1284	9312	117
2	P812A	693304	137233	25369	13655	6934	3299	11720	113
3	P654A2	907590	129170	25266	8934	5849	6609	5876	111
4	P211A	324342	65294	12321	7530	2320	1240	2925	137
5	P603AR	421049	111420	20267	6153	450	1585	5237	111
6	P411A	261381	58937	12289	5828	4181	1639	7182	117
7	P1280	361438	74239	16277	5586	355	1135	3135	112
8	P1270	381496	70989	16018	4520	554	518	3778	112
9	P204	426294	88067	26760	4099	1931	2022	15902	114
10	P3221A	547068	70640	27639	3573	5960	5476	6475	111
11	P260A	92357	14359	4342	3370	232	524	2147	118
12	P1261	300011	53391	11183	3179	642	1324	2629	113
13	P652A2	316060	74046	9990	2511	8169	2187	2493	111
14	P110A	359708	84314	9698	2481	961	1022	2439	137
15	P653A	427654	63273	10139	2013	11098	4215	2425	114
16	P2233	181234	24954	5443	1863	106	496	1315	118
17	P212A	224486	55282	8490	1758	29722	2896	1634	137
18	P110A2	277493	65689	7254	1687	257	1101	1870	137
19	P215A	206980	39455	8071	1684	2925	15204	1635	134
20	P763A	249021	53313	7087	1675	6196	3706	1795	137
21	P211A2	199909	44875	6532	1565	2498	1357	1600	111
22	P802A	106582	35192	3772	1368	9851	2239	1198	114
23	P2231A	138035	34860	4572	1361	2858	3388	1527	118
24	P212A2	156554	28852	5138	1302	1968	3483	1236	111
25	P233A	162375	29703	4203	1202	105	724	967	117

Abb. 101: Sortierung der Einwirkdauer über dem Merkmal „Kavitation“ (Einheit: mg*Tage)

Es zeigte sich, dass bei allen hochfrequenten Merkmalen (Peak_max, a_mittel, Kavitation, Lagergeräusch, Schaufelklang-moduliert) die ausgewählten Schäden mit der Einwirkdauer mehr oder weniger stark zu korrelieren scheinen. Besonders gut zeigte sich bei den Merkmalen Kavitation und Peak_max, dass alle Treffer unter den Top 18 bzw. Top 20 Ergebnissen sind. Das bedeutet, dass bei einer Sortierung über das Merkmal Kavitation sieben der Top 18 Pumpen bzw. acht der Top 20 tatsächlich aufgrund von GLRD-Schäden ausgefallen sind.

Eine weitergehende Untersuchung zwischen mechanischer Schwingeinwirkung und Ausfallverhalten an GLRD wird im Anschluss an das ReMain-Projekt an der TU Kaiserslautern durchgeführt.

5.4.8 Entwicklung eines Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose

Die im Rahmen der Betreiberumfrage (vgl. Kapitel 5.1) ermittelten Informationen zu häufigen Schadensursachen, ausfallkritischen Bauteilen und Anforderungen an die Instrumentierung und Zustandsdiagnose von Pumpensystemen flossen im ReMain-Projekt in die Entwicklung eines Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose ein. Nachfolgend wird das Konzept des Verfahrens und dessen Umsetzung sowie der zu erwartenden Nutzen beschrieben.

5.4.8.1 Konzeptentwicklung und Umsetzung

Das Verfahren zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose wurde innerhalb des Prozessinformationsmanagementsystems (PIMS) der Acrylsäureanlage (Produktionsanlage des Projektpartners Evonik Stockhausen) implementiert und für die ausgewählten 100 Versuchspumpen prototypisch umgesetzt. Wie bereits in Kapitel 5.3.3.3 dargelegt, dient das PIMS als Informationssystem, in das die in der Anlage erfassten Informationen (z. B. Messwerte) über das Prozessleitsystem (PLS) übermittelt werden und langfristig gespeichert und analysiert werden können. Über integrierte Module können individuelle Berechnungen durchgeführt werden und Darstellungen erzeugt und visualisiert werden. Darüber hinaus können nicht nur bereits im PLS verfügbare Informationen im PIMS dargestellt werden, es können auch neue Informationen generiert und grafisch abgebildet werden. Diese Funktionalitäten wurden für das entwickelte Verfahren verwendet.

Das Verfahren nutzt die Messwerte der an den Versuchspumpen installierten Prozessmesstechnik und verrechnet diese unter Berücksichtigung zusätzlicher Daten und Informationen nach einer im PIMS programmierten Logik derart miteinander, dass ein Vergleich der aktuellen mit den theoretischen Betriebspunkten der Pumpen möglich wird.

Grundlage für das Verfahren sind die vom Pumpenhersteller mitgelieferten Kennlinien (vgl. Abb. 102). Diese stellen den Zusammenhang und den Verlauf der Förderhöhe (Pumpenkennlinie), der NPSH-Werte (NPSH-Kennlinie, kennzeichnet den vom Hersteller geforderten Mindestabstand zum Siedepunkt des Fördermediums) und des Leistungsbedarfs an der Pumpenwelle (Wellenleistungskennlinie) über dem Volumenstrom grafisch dar und charakterisieren die theoretisch befahrbaren Betriebspunkte bzw. das theoretische Leistungsspektrum der jeweiligen Pumpe. Die im Verfahren hinterlegten Kennlinienfelder der 100 Versuchspumpen sind sowohl an die Spezifikationen bzw. Auslegungsdaten der Pumpen (Lauf-
raddurchmesser und Motordrehzahl) als auch an die individuellen Eigenschaften der Fördermedien (Dichte und Viskosität) angepasst. Damit ist sichergestellt, dass die für das Verfahren zugrunde gelegten Kennlinien das tatsächliche theoretische Leistungsspektrum der jeweiligen Pumpe abbilden.

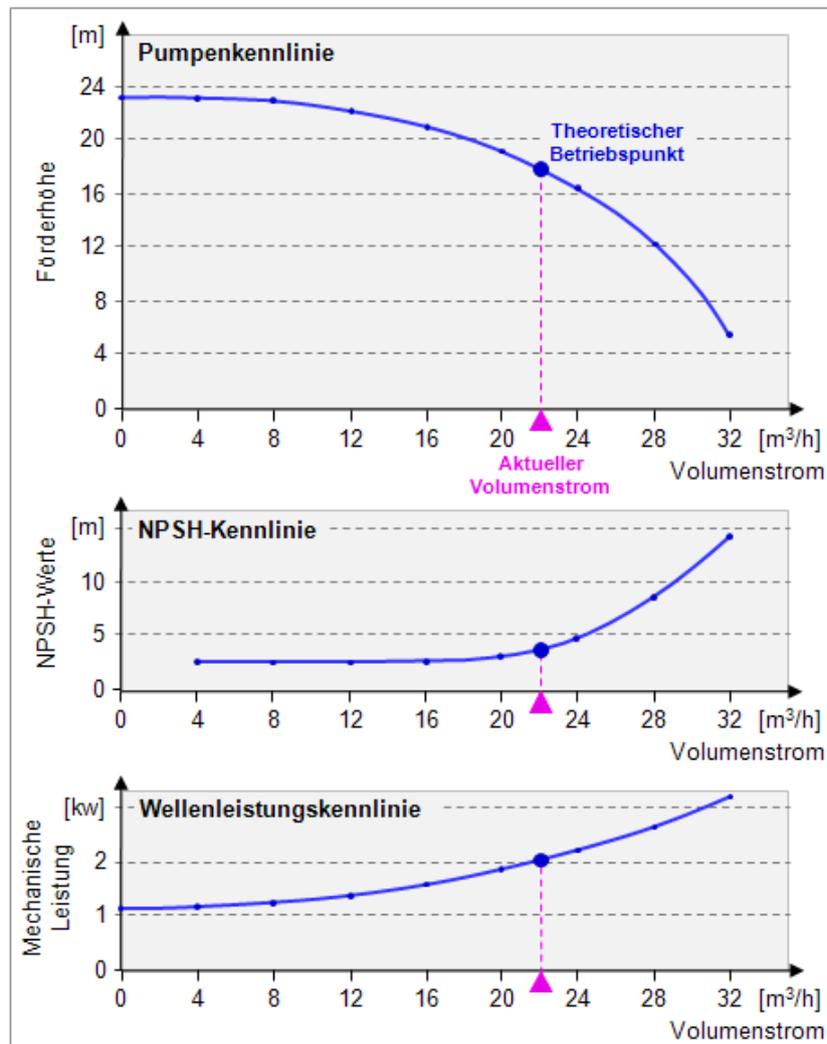


Abb. 102: Konzept: Kennlinienfelder als Bewertungsgrundlage

Eine weitere Basisgröße für das Verfahren ist der aktuelle Volumenstrom der Pumpe, der typischerweise über die Durchflussmessstellen kontinuierlich berechnet wird. Bei denjenigen Pumpen, die über keine Durchflussmessung verfügen, kommen alternative Berechnungsverfahren für den Volumenstrom zum Einsatz (diese werden im nachfolgenden Kapitel 5.4.8.2 näher erläutert). Der Schnittpunkt des aktuellen Volumenstroms mit den Herstellerkennlinien bildet den Soll-Betrieb bzw. den theoretischen Betriebspunkt der Pumpe ab (vgl. Abb. 102). Da die im Verfahren hinterlegten Kennlinien wie oben beschrieben an die individuellen Stoffeigenschaften der Fördermedien und an die Auslegungsdaten der Pumpen angepasst sind, ist gewährleistet, dass der theoretische Betriebspunkt bzw. der Soll-Betrieb mit einer guten Genauigkeit dargestellt werden kann.

Über die Erfassung und Verrechnung der aktuellen Messwerte der an den Pumpen installierten Prozessmesstechnik können in Kombination mit dem aktuellen Volumenstrom die aktuellen Betriebspunkte ermittelt werden. Wie in Kapitel 5.2.4 beschrieben, wurden die Versuchspumpen über die in der Acrylsäureanlage vor Projektbeginn bereits vorhandene Prozessinstrumentierung hinaus mit zusätzlicher Messtechnik ausgestattet. Dazu gehörte die Installation von Messtechnik zur Erfassung der Drücke (Saug- und Enddruck), der Temperatur des Fördermediums und der Motorwirkleistung (vgl. Abb. 26). Mit diesen Prozessgrößen können die aktuelle Förderhöhe, der aktuelle Leistungsbedarf an der Pumpenwelle und der aktuelle NPSH-Wert ermittelt werden. Letzterer kennzeichnet den aktuellen Abstand zum Siedepunkt (Dampfdruck) des jeweiligen Fördermediums. Das setzt voraus, dass der Siedepunkt des Fördermediums bekannt ist und bei der Berechnung des aktuellen NPSH-Wertes berücksichtigt wird. Im entwickelten Verfahren fließt daher bei der Ermittlung des aktuellen NPSH-Wertes die Dampfdruckkurve des jeweiligen Fördermediums mit ein.

Die aktuelle Förderhöhe, der aktuelle NPSH-Wert und der aktuelle Leistungsbedarf an der Pumpenwelle stellen in Verbindung mit dem berechneten aktuellen Volumenstrom die aktuellen Betriebspunkte dar. Über den Vergleich der aktuellen mit den theoretischen Betriebspunkten wird ersichtlich, ob die Pumpe erwartungsgemäß, d. h. auf oder zumindest in der Nähe der Herstellerkennlinien, arbeitet oder ob Abweichungen zum vom Hersteller vorgegebenen Kennlinienverlauf vorliegen. Treten Abweichungen auf und überschreiten diese festgelegte Grenzwerte, wird dies über die Visualisierungsmaske im PIMS in Form einer Ampel (grün-gelb-rot) gestuft animiert (vgl. Abb. 103 und Abb. 104).

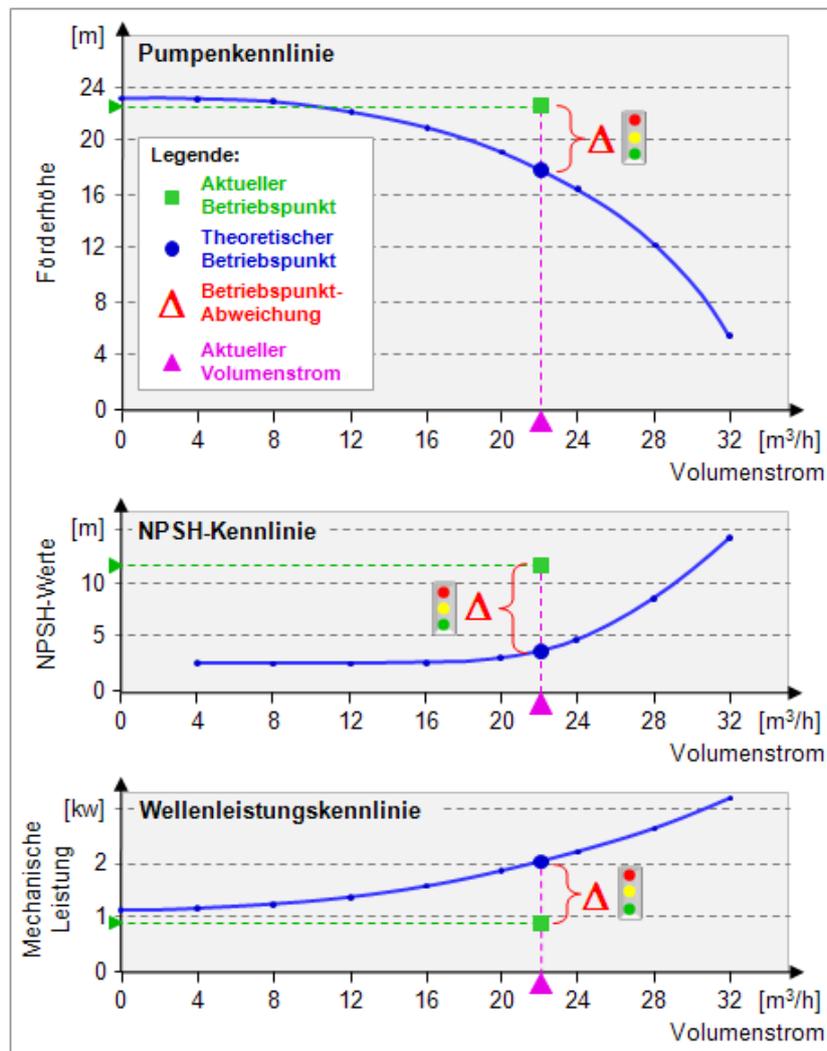


Abb. 103: Konzept: Vergleich der aktuellen und theoretischen Betriebspunkte über die Herstellerkennlinien

Die Abweichungen der aktuellen Betriebspunkte zu den Herstellerkennlinien – betreffend die Förderhöhe und die Wellenleistung – werden im Verfahren zum einen als absolute Differenzen, zum anderen als entsprechende Relationen (d. h. aktuelle Betriebspunkte im Verhältnis zu den Herstellerkennlinien) ausgegeben (vgl. Abb. 104). Insbesondere die Kenntnis der relativen Abweichung ist wichtig, wenn der Anwender die jeweilige Pumpe und deren theoretisches Leistungsspektrum nicht unmittelbar vor Augen hat. Im entwickelten Verfahren sind die Herstellerkennlinien zwar als Bewertungsgrundlage hinterlegt, werden in der Visualisierungsmaske im PIMS aber nicht abgebildet. Ausgegeben und visualisiert werden hier lediglich die berechneten Abweichungen der aktuellen Betriebspunkte zu den theoretischen Kennlinienverläufen. Daher kann zum Beispiel eine negative absolute Abweichung in der Förderhöhe von 5 m nur schwer bewertet werden, wenn nicht auch zusätzlich angezeigt

wird, wie viel Förderhöhe die betrachtete Pumpe theoretisch leisten sollte. Bei einer Pumpe, bei der theoretisch 50 m Förderhöhe zu erwarten sind, erscheint eine negative Abweichung in der Förderhöhe von 5 m recht unkritisch. Kann die betrachtete Pumpe allerdings nur eine theoretische Förderhöhe von 10 m leisten, sind 5 m negative Abweichung doch eine erhebliche Einbuße in der Förderleistung. Die nachfolgende Abbildung 104 zeigt exemplarisch für eine Pumpe die im PIMS umgesetzte Visualisierung.

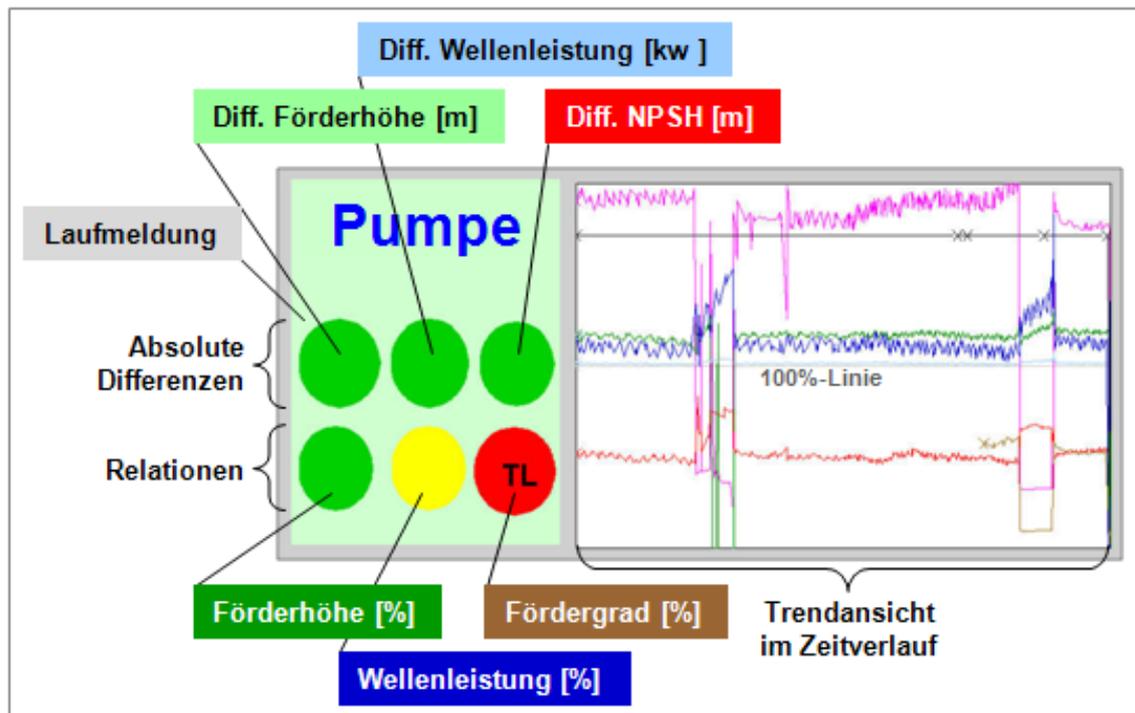


Abb. 104: Umsetzung: Visualisierung des Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose im PIMS

Neben den Abweichungen der aktuellen Betriebspunkte zu den Kennlinienverläufen generiert das entwickelte Verfahren auch eine Information zum aktuellen Fördergrad der betrachteten Pumpe. Damit erhält der Anwender Hinweise zum Betriebsverhalten der Pumpe, d. h. Informationen darüber, ob die Pumpe im ihrem Optimum (Punkt besten Wirkungsgrades) oder eher teillastig oder überlastig betrieben wird. Weiterhin visualisiert das Verfahren auch die Laufmeldung der Pumpe (grün – Pumpe läuft, grau – Pumpe läuft nicht). Die Berechnungsprogramme des Verfahrens laufen kontinuierlich und erzeugen somit auch kontinuierlich Ergebnisse, unabhängig davon, ob die jeweilige Pumpe läuft oder nicht. Läuft die Pumpe nicht, erzeugt das Programm unplausible Ergebnisse. Daher ist die Kenntnis der Laufmeldung der betrachteten Pumpe insbesondere in Hinblick auf die Datenauswertung eine wichtige Information. Neben den animierten sechs Statuspunkten (Betriebspunktabweichungen und Fördergrad) und der ebenfalls animierten Laufmeldung werden die Informationen auch

in einer Trendansicht ausgegeben. Per Drag & Drop können die Trendverläufe aus dem kleinen Ansichtsfeld in eine größere Detailansicht gezogen werden. In dieser Detailansicht (vgl. Abb. 105) können einzelne Parameter für die Datenauswertung variiert werden, bspw. der Start- und Endzeitpunkt für die Trendverläufe.

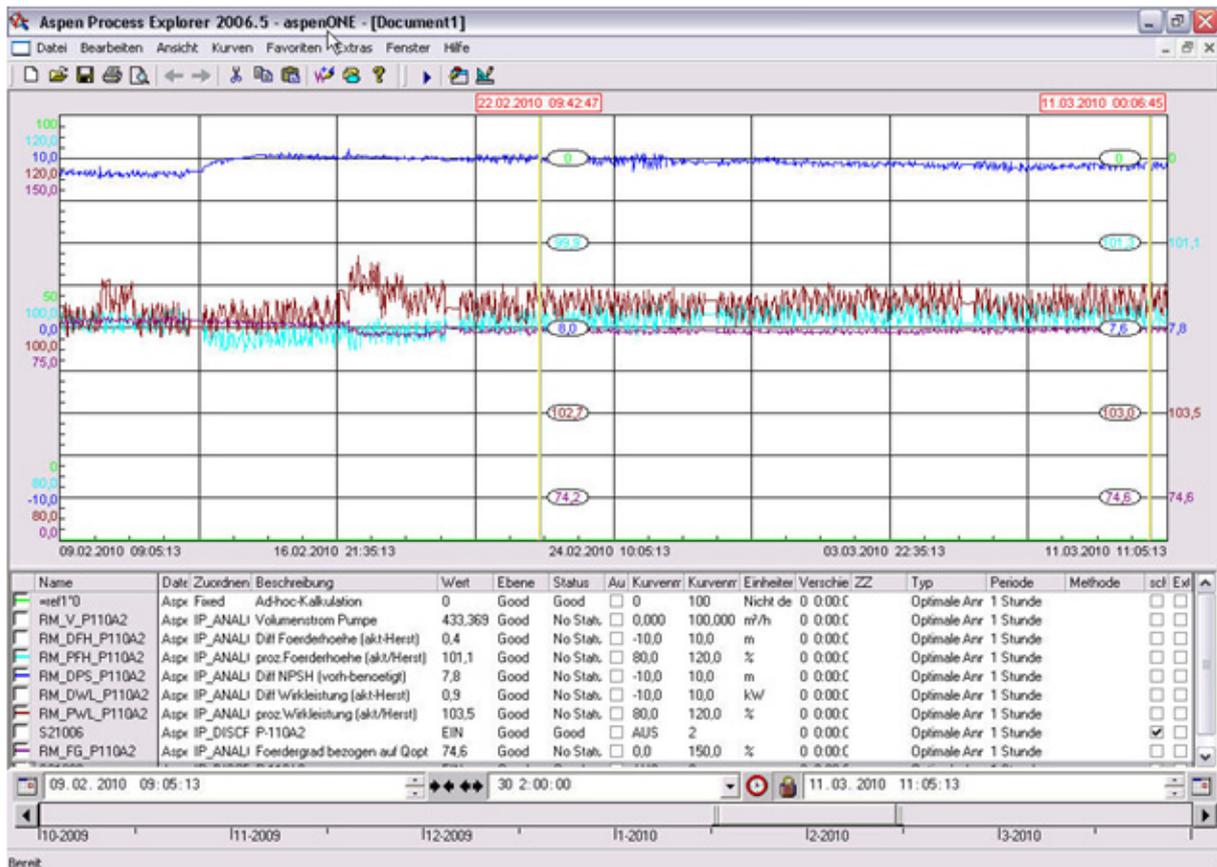


Abb. 105: Umsetzung: Detaillierte Trendansicht

5.4.8.2 Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Volumenstroms

Eine wichtige Basisgröße für das Verfahren zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose ist der aktuelle Volumenstrom der jeweiligen Pumpe. Ohne die Kenntnis des Volumenstroms kann das Verfahren nicht umgesetzt werden. Die Hälfte der 100 Versuchspumpen, für die das Verfahren realisiert wurde, verfügen über Durchflussmessstellen, über die der Volumenstrom berechnet werden kann. Bei den restlichen Versuchspumpen wurden alternative Berechnungsverfahren angewendet, um den aktuellen Volumenstrom zu bestimmen. Abbildung 106 gibt einen Überblick über die Berechnungsverfahren für den Volumenstrom, die im Folgenden näher erläutert werden.

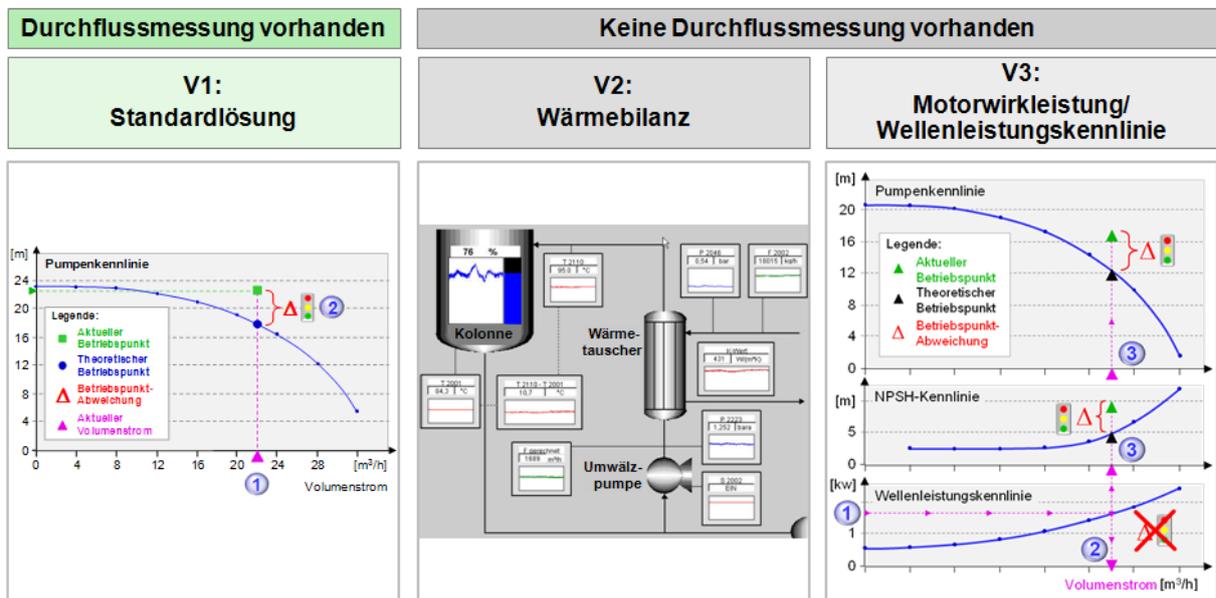


Abb. 106: Berechnungsverfahren für den Volumenstrom

Variante 1 (Standardlösung): Berechnung des Volumenstroms über Durchflussmessung

Im Rahmen der Standardlösung (Variante 1) werden die Volumenströme der Versuchspumpen wie bereits erläutert über die vorhandenen Durchflussmessstellen kontinuierlich berechnet. Dabei werden die über die Messstellen erfassten Durchflussmengen (Massenströme in kg/h) über die Dichte des jeweiligen Fördermediums und unter Berücksichtigung zusätzlicher Förderströme, die in der Regel nicht von den Messstellen erfasst werden (z. B. Mindestmengen), in die entsprechenden Volumenströme (m^3/h) umgerechnet. Mit den so berechneten aktuellen Volumenströmen können über die Schnittpunkte mit den Herstellerkennlinien die theoretischen Betriebspunkte der Versuchspumpen ermittelt werden (vgl. Abb. 106, Punkt 1 am Beispiel Pumpenkennlinie) und mit den aktuellen Betriebspunkten verglichen werden (vgl. Abb. 106, Punkt 2). Für diejenigen Pumpen, die über keine Durchflussmessstellen verfügen, kommen alternative Berechnungsverfahren für den Volumenstrom zum Einsatz.

Variante 2: Berechnung des Volumenstroms über Wärmebilanz

Die erste Alternativvariante (Variante 2) ist die Berechnung des Volumenstroms über eine Wärmebilanz. Diese Variante konnte im Projekt für einige Umwälzpumpen angewendet werden, die zwar nicht über Durchflussmessstellen, jedoch über andere Messstellen verfügen, mithilfe derer der Volumenstrom ebenfalls kontinuierlich berechnet werden kann. Das Prinzip der Wärmebilanz zur Berechnung des Volumenstroms wird anhand der nachfolgenden Abbildung 107 aufgezeigt.

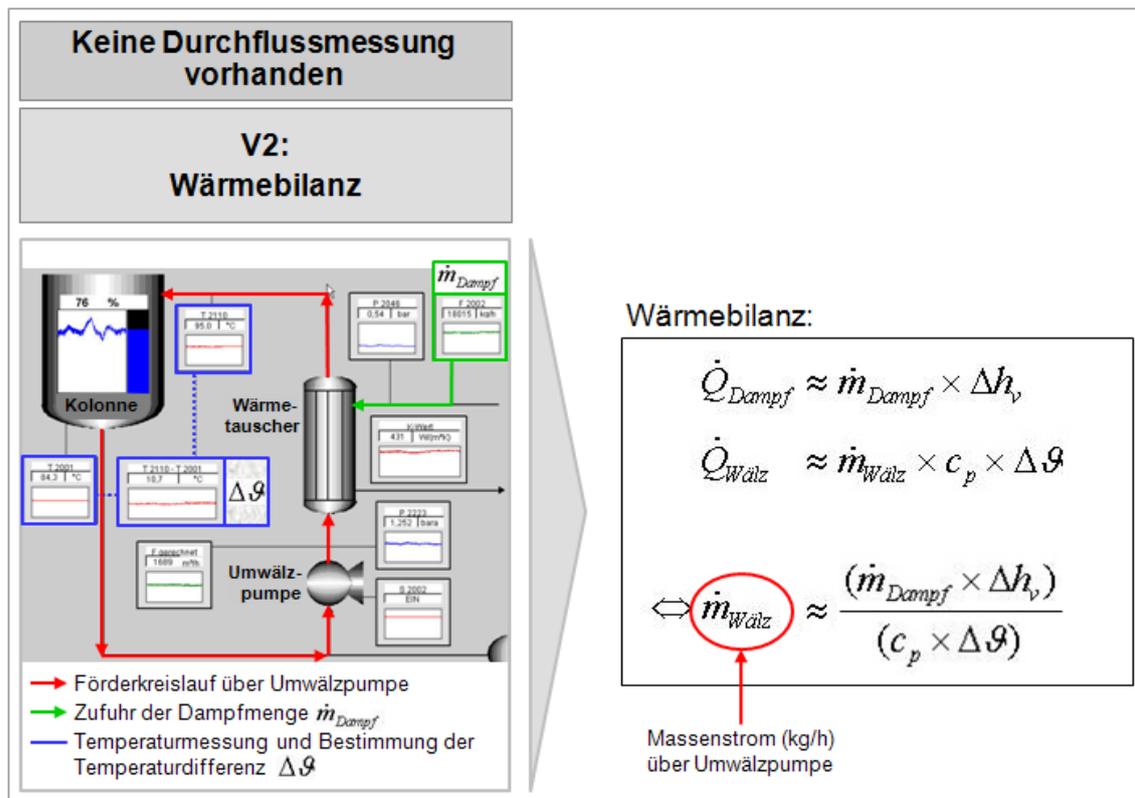


Abb. 107: Berechnung des Volumenstroms über Wärmebilanz

Das Prinzip einer Umwälzung, wie sie im grafischen Teil der Abbildung 107 dargestellt ist, ist das, dass in eine Kolonne Energie eingebracht werden soll. Dazu wird das Medium mittels einer Umwälzpumpe aus der Kolonne im Kreis gefördert und in einem Wärmetauscher über eine Dampfzufuhr erhitzt.

Auf Basis einer Wärmebilanz soll nun der Massenstrom des Mediums berechnet werden, der über die Umwälzpumpe gefördert wird. Dafür müssen die einzelnen Parameter der Wärmebilanz bekannt sein. In Abbildung 107 ist neben der prinzipiellen Funktionsweise einer Umwälzung auch die Gleichung der Wärmebilanz abgebildet. Anhand dieser Gleichung ist ersichtlich, welche Parameter zur Berechnung des Massenstroms ($m_{Wälz}$ in kg/h) bekannt sein müssen.

Eine notwendige Größe für die Berechnung des Massenstroms $m_{Wälz}$ ist die Dampfmenge m_{Dampf} (in kg/h), die dem Wärmetauscher für die Erhitzung des Mediums zugeführt wird. Diese Dampfmenge wird im abgebildeten Prozess über eine Messstelle ermittelt (vgl. Abb. 107). Eine weitere notwendige Information ist die Temperaturdifferenz ($\Delta \vartheta$) über die Kolonne. Auch diese kann im dargestellten Prozess über zwei Temperaturmessstellen ermittelt werden. Sind diese Größen bekannt, kann unter Verwendung der Verdampfungsenthalpie (Δh_v)

und der spezifischen Wärmekapazität (c_p) des Fördermediums der Massenstrom über die Wälzpumpe $m_{Wälz}$ berechnet und unter Berücksichtigung der Dichte des Mediums in den aktuellen Volumenstrom umgerechnet werden. Mit diesem können analog zur Standardlösung die Differenzbetrachtungen in den Kennlinienfeldern der jeweiligen Versuchspumpen durchgeführt werden.

Diese Variante der Berechnung des aktuellen Volumenstroms ist qualitativ gleichzusetzen mit der Standardlösung, denn auch hier wird der Volumenstrom auf Basis von Messstellen kontinuierlich berechnet.

Variante 3: Ermittlung des Volumenstroms über Wellenleistungskennlinie

Die zweite Alternativvariante (Variante 3b) ist die Ermittlung des Volumenstroms über die Wellenleistungskennlinie. Besteht keine Möglichkeit, den aktuellen Volumenstrom zu berechnen (entweder über eine Durchflussmessung oder über eine Wärmebilanz), wird dieser über die Wellenleistungskennlinie des Herstellers festgelegt.

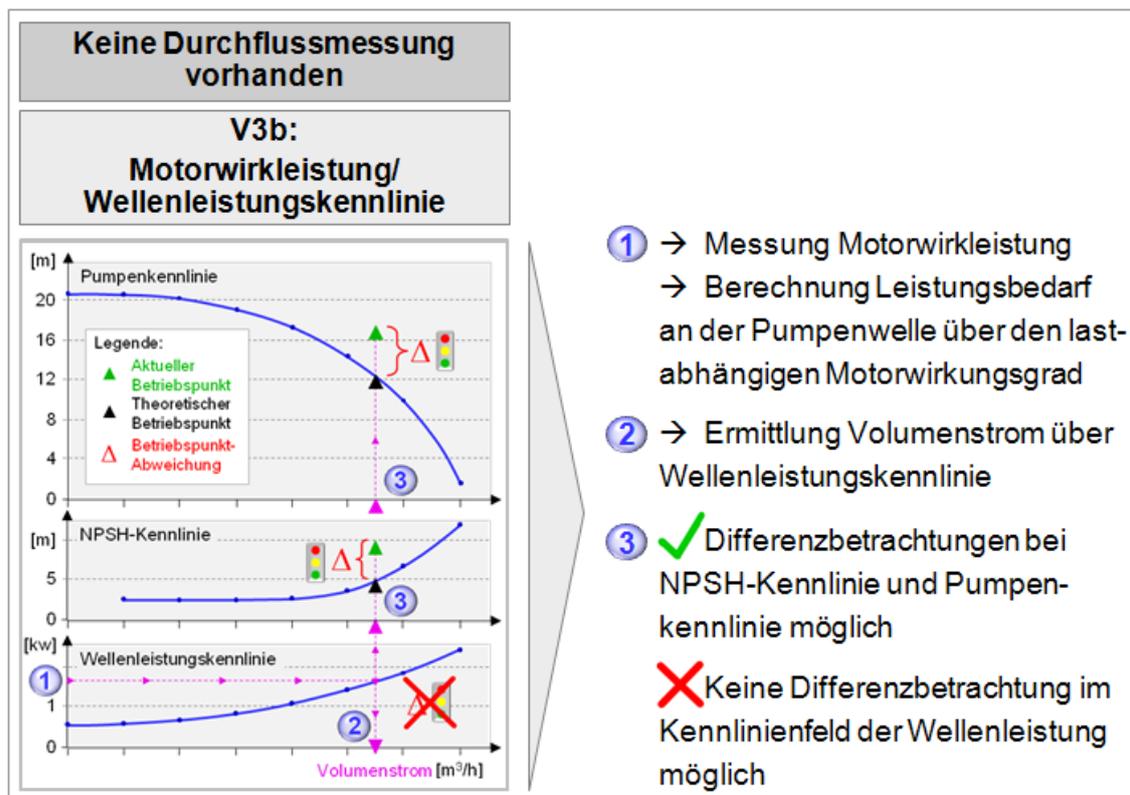


Abb. 108: Ermittlung des Volumenstroms über Wellenleistungskennlinie

Hier wird auf Basis der gemessenen aktuellen Motorwirkleistung und unter Berücksichtigung des lastabhängigen Motorwirkungsgrads die mechanische Wellenleistung bzw. der aktuelle Leistungsbedarf an der Pumpenwelle ermittelt (vgl. Abb. 108, Punkt 1). Über den Schnitt-

punkt des aktuellen Leistungsbedarfs an der Pumpenwelle mit der Wellenleistungskennlinie wird der dazugehörige Volumenstrom festgelegt (vgl. Abb. 108, Punkt 2). Mit dem so ermittelten und als aktuell gesetzten Volumenstrom können über die Schnittpunkte mit der Pumpen- und der NPSH-Kennlinie die theoretischen Betriebspunkte bestimmt und mit den aktuellen Betriebspunkten verglichen werden (vgl. Abb. 108, Punkt 3).

Bei dieser Variante ist zu jedoch beachten, dass im Kennlinienfeld der Wellenleistung keine Differenzbetrachtung möglich ist. Auch ist nicht gewährleistet, dass der über die Wellenleistungskennlinie festgelegte Volumenstrom tatsächlich den aktuellen Volumenstrom der betrachteten Pumpe repräsentiert. Das ist nur dann der Fall, wenn davon ausgegangen werden kann, dass in Hinblick auf die Wellenleistung keine Störungen vorliegen, d. h. wenn die betrachtete Pumpe zumindest in Bezug auf den Leistungsbedarf an der Pumpenwelle keine Abweichungen zum vom Hersteller vorgegebenen Kennlinienverlauf aufweist.

Neben der beschriebenen Variante 3b besteht ebenfalls die Möglichkeit, den Volumenstrom über die Pumpenkennlinie festzulegen (Variante 3a, vgl. Abb. 109).

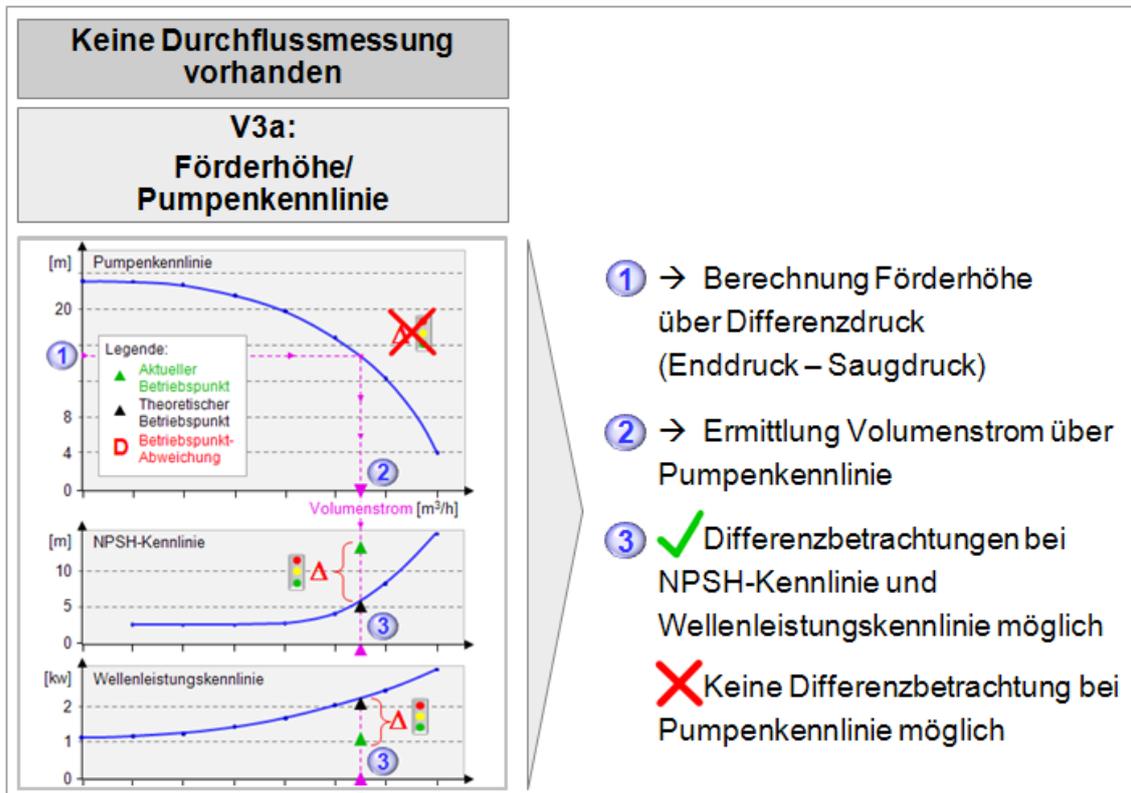


Abb. 109: Ermittlung des Volumenstroms über Pumpenkennlinie

Hier kann die gemessene Druckdifferenz genutzt werden, um über den Schnittpunkt mit der Pumpenkennlinie den Volumenstrom festzulegen. In diesem Fall ist eine Differenzbetrach-

tung im Feld der Pumpenkennlinie nicht möglich. Ebenfalls gelten die oben erläuterten Einschränkungen analog.

In diesem Zusammenhang besteht weiterer Untersuchungsbedarf, der im Projekt nicht mehr geleistet werden konnte. Bei der Umsetzung des Verfahrens wurde bei denjenigen Versuchspumpen, bei denen der aktuelle Volumenstrom weder über eine Durchflussmessung, noch über eine Wärmebilanz, berechnet werden konnte, ausschließlich die Variante 3b angewendet. Der Grund dafür ist der, dass eine Differenzbetrachtung bei der Pumpenkennlinie im Projekt von größerem Interesse war als eine Differenzbetrachtung bei der Wellenleistungskennlinie. Hier erscheint es sinnvoll, die Aussagegenauigkeit der beiden Varianten 3a und 3b zur Ermittlung des Volumenstroms über die Herstellerkennlinien genauer zu betrachten. So könnte die Frage geklärt werden, welche Variante für das Verfahren zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose tatsächlich die besseren und für den Anwender interessanteren Ergebnisse generiert.

5.4.8.3 Nutzen des Verfahrens

Mit dem Verfahren zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose wurde eine Möglichkeit geschaffen, die Pumpen über das PIMS mit den im Betrieb erzeugten Messdaten zu überwachen und auf Abweichungen von den Herstellerangaben bzw. vom Soll-Betrieb aufmerksam zu werden. Weichen die aktuellen Betriebspunkte erheblich von den Kennlinien ab, so deutet dies auf nicht bestimmungsgemäße Betriebsweisen hin, die sich negativ auf die Lebensdauer der Pumpen auswirken. Jede Pumpe ist aufgrund natürlicher und nicht vermeidbarer Verschleißprozesse im bestimmungsgemäßen Betrieb an eine bestimmte Lebensdauer gebunden. Durch eine nicht bestimmungsgemäße Betriebsweise wird diese Lebensdauer jedoch beeinträchtigt. Für die Standzeitverlängerung der Pumpe ist es daher von besonderer Bedeutung, einen nicht bestimmungsgemäßen Betrieb zu erkennen, zu überwachen und bestenfalls zu vermeiden.

Das entwickelte Verfahren zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose zeigt beispielsweise das Vorliegen einer unzulässigen Kavitation als nicht bestimmungsgemäße Betriebsweise an. Die absolute Differenz des NPSH-Wertes, d. h. der aktuelle Abstand zum Dampfdruck des Fördermediums im Vergleich zum vom Hersteller geforderten Mindestabstand, ist dabei ein zuverlässiger Indikator. Dauert diese über einen längeren Zeitraum an, kann von Verschleißmechanismen ausgegangen werden, die bis zur mechanischen Zerstörung bestimmter Pumpenbauteile (z. B. Laufrad) führen können. Kann anhand der sinkenden absoluten Differenz des NPSH-Wertes eine zunehmende unzulässige Kavitation aufgezeigt werden, können betriebliche Maßnahmen oder Maßnahmen der Instandhaltung zur Vermeidung

des nicht bestimmungsgemäßen Betriebs der betrachteten Pumpe rechtzeitig eingeleitet werden. Die nachfolgende Abbildung 110 verdeutlicht exemplarisch das Potenzial des Verfahrens zur Standzeitverlängerung der Versuchspumpen.



Abb. 110: Potenzial des Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose zur Verlängerung der Pumpenlebensdauer

Neben der Gefahr der mechanischen Zerstörung bestimmter Pumpenbauteile durch unzulässige Kavitation können kavitationsbedingte Schwingungen die Lebensdauer der Wellendichtungen (Gleitringdichtungen) als besonders ausfallkritische Bauteile erheblich beein-

trächtigen. Das Erkennen und rechtzeitige Vermeiden der unzulässigen Kavitation kann zukünftig dazu beitragen, den hohen Anteil an Gleitringdichtungsschäden in der Versuchsanlage zumindest zu reduzieren.

Weiterhin erhält der Anwender mit dem aktuellen Fördergrad Informationen zum Betriebsverhalten der Pumpe, d. h. Informationen darüber, ob die Pumpe in ihrem Optimum betrieben wird oder in Teillast bzw. Überlast läuft, was zum einen mit Wirkungsgradeinbußen, zum anderen mit Störungen aufgrund von unzulässiger Kavitation und resultierenden Schwingungen verbunden ist. Darüber hinaus können mithilfe des Verfahrens weitere Belastungsgrößen, die sich negativ auf die Lebensdauer der Pumpe auswirken, identifiziert werden, beispielsweise die Anzahl der An- und Abfahrvorgänge.

5.4.8.4 Zusammenfassung und Ausblick

Bei sinnvoller Wahl der im Verfahren zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose hinterlegten Grenzwerte sind nicht bestimmungsgemäße Betriebsweisen und Fehlzustände frühzeitig diagnostizierbar. Mithilfe der Trendansicht können Belastungsgrößen, z. B. unzulässige Kavitation, Teillast/ Überlast, Anzahl An- und Abfahrvorgänge, im Zeitverlauf überwacht und Gegenmaßnahmen, z. B. eine Korrektur der Betriebsweise oder Wartungs- und Instandsetzungsmaßnahmen, geplant und rechtzeitig eingeleitet werden. Gleichzeitig wird eine Transparenz geschaffen über die Vorgänge an der Pumpe. Damit können in einem ersten Schritt unzulässige, verschleißfördernde Mechanismen erkannt und vermieden und in der Folge die Standzeiten der Pumpen verlängert werden. Zukünftig wird erwartet, dass durch den Aufbau einer Belastungshistorie und zunehmendem Erfahrungswissen typische Schadensverläufe erkannt und Ursachen zugeordnet werden können. Dadurch kann erreicht werden, dass möglichst genaue Informationen über die Instandhaltungsbedarfe der Pumpe generiert werden und die erforderlichen Instandhaltungstätigkeiten vorausschauend bzw. restlebensdauerbezogen abgeleitet werden können.

Die nachfolgende Abbildung 111 fasst den Nutzen des Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose abschließend zusammen.

- ⇒ **Grenzwertüberwachung**
 - Alarmsystem über Ampelanimation
- ⇒ **Frühzeitiges Erkennen von nicht bestimmungsgemäßen Betriebsweisen und Fehlzuständen über**
 - kontinuierlichen Soll/ Ist-Vergleich:
Vergleich der aktuellen Betriebspunkte mit den Herstellerkennlinien (theoretische Betriebspunkte)
- ⇒ **Überwachung und Auswertung von Trendverläufen**
 - Überwachung von Belastungsgrößen im Zeitverlauf und Auswertung von Trendverläufen
- ⇒ **Planung und rechtzeitige Einleitung von Gegenmaßnahmen**
 - Korrektur der nicht bestimmungsgemäßen Betriebsweisen und Fehlzustände mithilfe betrieblicher Maßnahmen und Maßnahmen der Instandhaltung
- ⇒ **Schaffung von Transparenz**
 - Nachweis darüber, wie die Pumpe betrieben wurde
- ⇒ **Aufbau einer Belastungshistorie**
 - Zukünftig können Rückschlüsse auf den Zustand und die Restlebensdauer der Pumpe (Schadensdiagnose und -prognose) gezogen werden

**Abb. 111: Zusammenfassung:
Nutzen des Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose**

Weiterer Untersuchungsbedarf besteht in der umfassenden Interpretation der über das Verfahren ermittelten und ausgegebenen Abweichungen der aktuellen Betriebspunkte zu den Herstellerkennlinien. Aktuell kann über die absolute Differenz des NPSH-Wertes eine unzulässige Kavitation als nicht bestimmungsgemäße Betriebsweise zuverlässig nachgewiesen werden. Es existiert jedoch eine Reihe weiterer hydraulischer und mechanischer Störungen als nicht bestimmungsgemäße Betriebsweisen, die ebenfalls Abweichungen zu den Herstellerkennlinien hervorrufen. Weiterhin können Abweichungen zu den Kennlinien nicht nur aus nicht bestimmungsgemäßen Betriebsweisen resultieren, sondern auch in anderen Ursachen begründet liegen, wie beispielsweise in der Änderung der Spezifikationen bzw. Auslegungsdaten der Pumpen (Laufreddurchmesser, Motordrehzahl etc.), in der Änderung der Stoffeigenschaften der Fördermedien (Dichte, Viskosität etc.) oder im Verschleiß bestimmter Pumpenbauteile. In diesem Zusammenhang ist zu untersuchen, welche Abweichungen oder welche Kombination von Abweichungen zu den Herstellerkennlinien auf welche Ursachen schließen lassen, um entsprechende Gegenmaßnahmen einleiten zu können. Im Rahmen des Projekts wurden bereits einige Ursache-Wirkungsbeziehungen in einem ersten Entwurf zusammengestellt (vgl. Abb. 112).

PIMS-Programmierung						Mögliche Ursachen
Volumenstrom V	Differenz Förderhöhe		Differenz Wellenleistung		Differenz NPSH	
	$\Delta FH \uparrow$	$\Delta FH \downarrow$	$\Delta WL \uparrow$	$\Delta WL \downarrow$	$\Delta NPSH \downarrow$	
		X		X	X	Nicht bestimmungsgemäßer Betrieb
		X		X		Kavitation
						Gasmitförderung
						Unwucht
	X			XX		Nicht berücksichtigter Parallelbetrieb
V ↓ (gegen Null)			X			Blockade
V ↓		X		X		Trockenlauf
V ↓		X		X		Förderstromabriss
						Änderung Pumpendaten
	X		X			Größeres Laufrad
		X		X		Kleinere Laufrad
	X		XX			Höhere Drehzahl
		X		XX		Geringere Drehzahl
						Verschleiß
			Effekt zu gering			Defektes Wälzlager
		X	X			Vergrößerte Spaltmaße (Kurzschlussströmung)
			X			Anstreifender Spaltring
		X				Laufradverschleiß
						Änderung Stoffdaten
	X			X		T > TAuslegung → Viskosität ↓, Dichte ↓
		X	X			T < TAuslegung → Viskosität ↑, Dichte ↑
	X ?	X ?	X ?	X ?	X ?	Änderung Stoffzusammensetzung

Abb. 112: Interpretationshilfe der Abweichungen von den Pumpenkennlinien

Die in Abbildung 112 dargestellten Zusammenhänge konnten im Projekt nicht mehr validiert werden. Hier eröffnet sich weiterer Untersuchungsbedarf, um zukünftig die Potenziale des Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose umfassend auszuschöpfen.

5.5 Prozessgestaltung in Betrieb und Instandhaltung

Das im ReMain-Projekt entwickelte Verfahren zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose liefert Informationen, die die betrieblichen Prozesse und die der Instandhaltung nachhaltig verändern können. Der tatsächliche Nutzen des Verfahrens hängt allerdings maßgeblich von der Gestaltung der Prozesse ab. Das bedeutet, dass die existierenden Prozessabläufe (Ist-Prozesse) entsprechend angepasst und die aus dem Verfahren resultierenden Informationen bei einer Neugestaltung der Prozessabläufe (Soll-Prozesse) berücksichtigt werden müssen.

Um zu gewährleisten, dass die aus dem Verfahren resultierenden Informationen auch in den betrieblichen Alltag integriert werden können, musste für die Entwicklung von Soll-Prozessen eine Methode ausgewählt werden, die eine transparente Darstellung der existierenden Prozessabläufe ermöglicht. Da insbesondere die Informationsmenge und Informationsqualität durch die Anwendung des Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose eine Änderung erfahren, musste die auszuwählende Methode neben den physischen Abläufen der Prozesse auch die Informationswege darstellen können. Weiterhin sollte berücksichtigt

werden, dass ergänzend zu der Prozessdarstellung eine kostenorientierte Bewertung vorgenommen werden kann. Eine einfache Handhabbarkeit war ein weiteres Entscheidungskriterium.

Diese Voraussetzungen erfüllt das Prozessketteninstrumentarium, welches im Kapitel 5.5.1 zunächst allgemein beschrieben wird. Im nachfolgenden Kapitel 5.5.2 wird die Aufnahme und Analyse der Ist-Prozesse sowie die Ermittlung von Verbesserungspotenzialen und die Gestaltung der Soll-Prozesse erläutert. Abschließend wird in Kapitel 5.5.3 eine Möglichkeit aufgezeigt, um die Einsparmöglichkeiten bei der Anwendung des Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose kostenorientiert zu bewerten. Die Abbildung 113 verdeutlicht in diesem Zusammenhang die im Projekt gewählte Vorgehensweise.

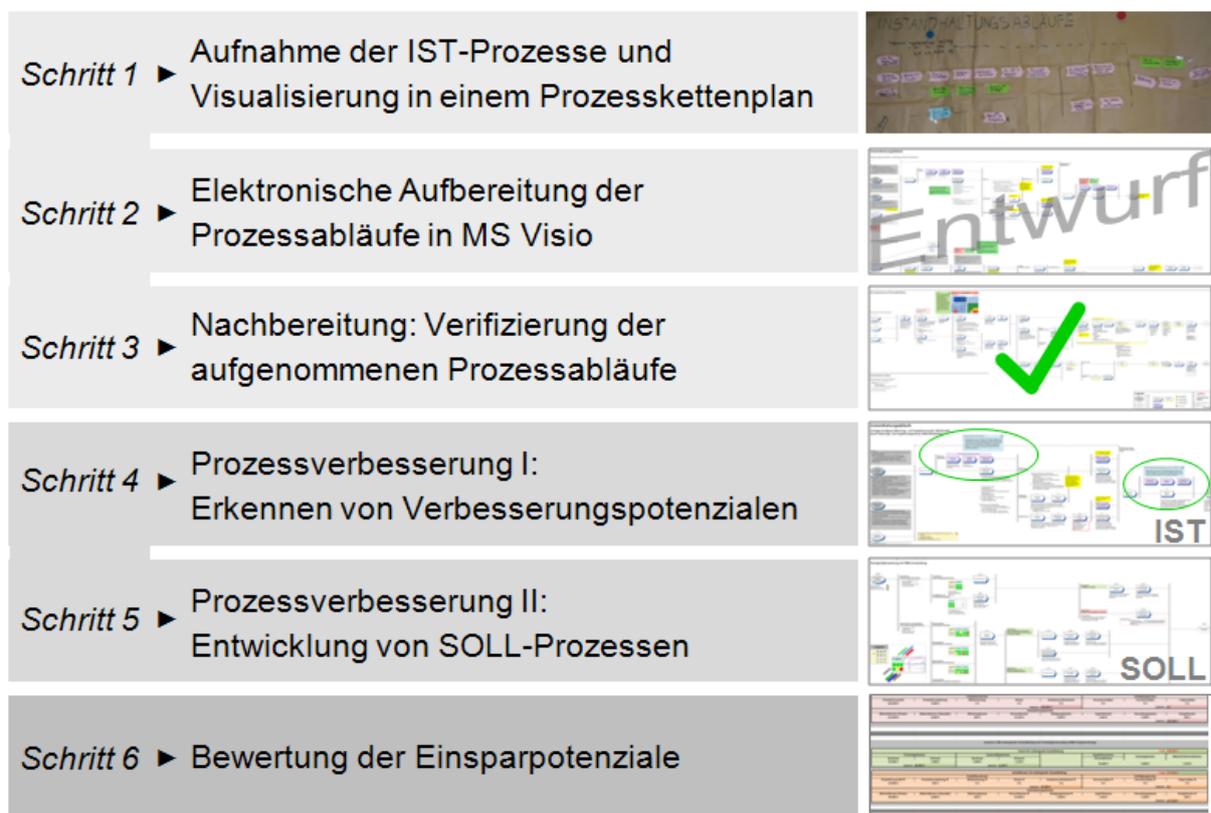


Abb. 113: Vorgehensweise bei der Prozessgestaltung

5.5.1 Das Prozessketteninstrumentarium

Das Prozessketteninstrumentarium ist vom Projektpartner Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik entwickelt worden. Mit dem Prozessketteninstrumentarium können Wertschöpfungsketten bzw. Unternehmensprozesse inklusive der zugehörigen Material- und Informationsflüsse in Form einer prozessorientierten Modelldarstellung mithilfe von Prozess-

kettenplänen ganzheitlich visualisiert, analysiert, neugestaltet und bewertet werden [Haaß09]; [Kuhn99]; [Kuhn 95].

Prozesskettenpläne bestehen in der Regel aus zusammengesetzten Teilprozessketten. Dabei wird zwischen mehreren Ebenen unterschieden, die entweder einen Material- oder einen zur Planung und Koordination erforderlichen Informationsfluss darstellen (vgl. Abb. 114) [Haaß09]; [Piel95]. Neben der Ebene der Materialflüsse werden auf der Ebene der planenden Informationsflüsse Prozessketten dargestellt, welche die Auftragsplanung und Administration beschreiben. Beispiele hierfür sind die Planung von Instandsetzungstätigkeiten oder von Materialbedarfen. Koordinierende Informationsflüsse bilden die steuernden Prozessketten ab. In diesen werden Informationen verarbeitet [Haaß09]; [Kuhn95].

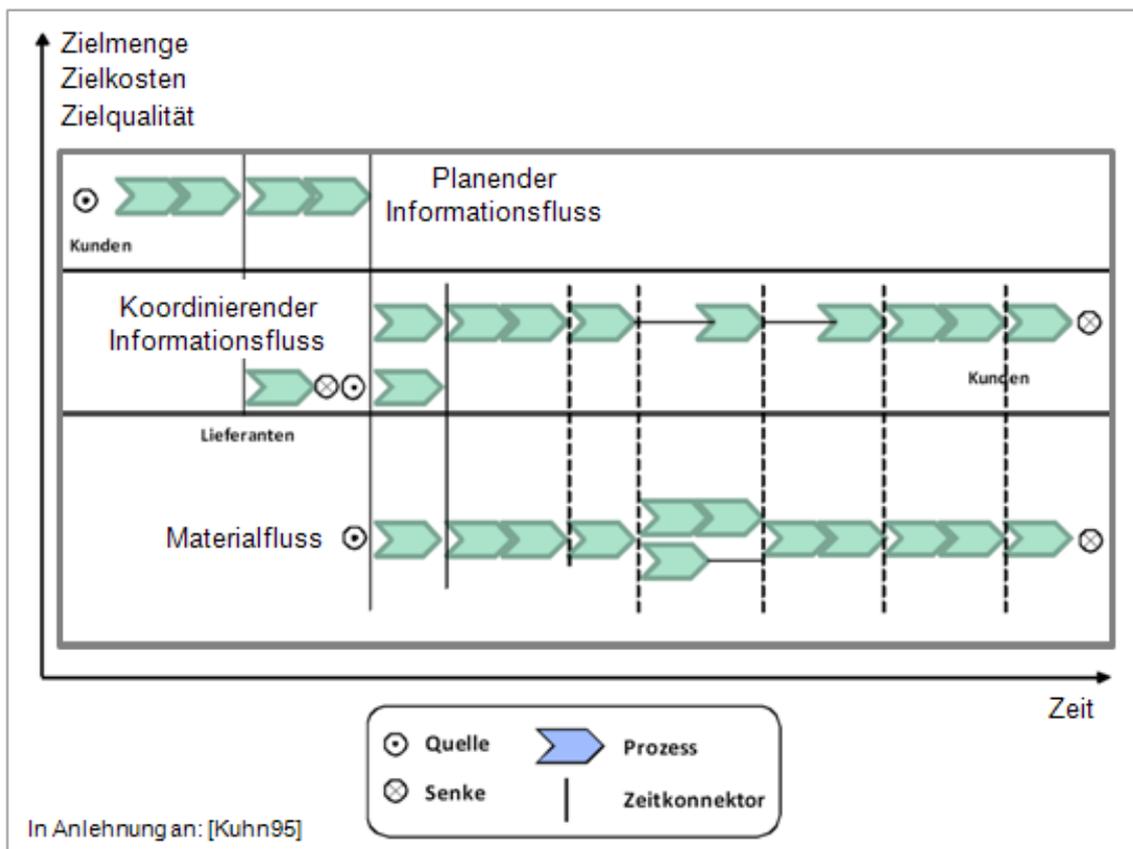


Abb. 114: Exemplarischer Prozesskettenplan

Prozessketten umfassen eine verbundene Folge zeitlich und räumlich geordneter Prozesskettenelemente, die in einem logischen Zusammenhang stehen. Gemäß dem Prinzip der Kunden-Lieferanten-Beziehung versteht sich in einer Prozesskette jedes Prozesskettenelement zum einen als Kunde bezüglich des vorgelagerten Prozesses und zum anderen als Lieferant bezüglich des nachgelagerten Prozesses [Haaß09]; [Klau00]; [Bloe97]. Jedes Pro-

zesskettenelement besteht aus den Parametern Quelle und Senke, Prozesse, Lenkung, Ressourcen und Struktur. Daraus folgt, dass Prozesskettenelemente auf allen Detaillierungsebenen den gleichen Aufbau aufweisen [Haaß09]; [Kuhn95]; [Piel95]. Die nachfolgende Abbildung 115 zeigt den Aufbau und die Parameter eines Prozesskettenelements.

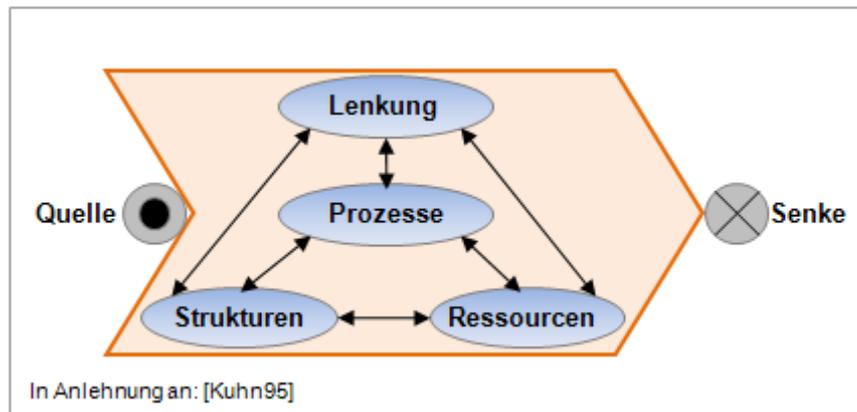


Abb. 115: Die Parameter des Prozesskettenmodells

Die *Quelle* kennzeichnet den Eingang eines Prozesskettenelements. Sie stellt Basisobjekte (d. h. Informationen oder Materialien) bereit, die das Prozesskettenelement durchlaufen sollen. Die *Senke* bezeichnet den Ausgang eines Prozesskettenelements. Sie beschreibt den Abfluss an transformierten Basisobjekten aus einem Prozesskettenelement. Die *Prozesse* geben Auskunft darüber, was innerhalb des modellierten Systems geschieht und beschreiben die Transformation der Basisobjekte in Form zeitlich aufeinander folgender Prozesskettenelemente. Die *Lenkung* stellt Vorschriften zur Regelung und Steuerung zur Verfügung, die den Entscheidungsspielraum bestimmter Prozesse in Hinblick auf übergeordnete Systeme und Kompetenzen sowie auf benachbarte Prozesse bestimmen. Für die Transformation der Basisobjekte in den Prozesskettenelementen werden *Ressourcen* benötigt, die ihrerseits Kosten verursachen. Zu den Ressourcen gehören Personal, Flächen, Bestand, Arbeitsmittel, Arbeitshilfsmittel und Organisationshilfsmittel. Um für die Transformation der Basisobjekte ein Minimum an Kosten zu verursachen, ist es Aufgabe der Lenkung, die Ressourcen möglichst effizient einzusetzen. In der *Strukturbeschreibung* erfolgt letztendlich die Einordnung von Prozesskettenelementen und ganzen Prozessketten in übergeordnete Systemstrukturen (z. B. Unternehmensstrukturen) [Haaß09]; [Winz96], [Kuhn95]; [Piel95].

5.5.2 Entwicklung von neuen Prozessabläufen

In diesem Abschnitt wird dargestellt, wie die bestehenden Prozessabläufe aufgenommen und in Hinblick auf die Integration der Informationen aus dem Verfahren zur Pumpenüberwa-

Die so zusammengetragenen Informationen zum Ablauf der Betriebs- und Instandhaltungsprozesse und der zugehörigen Informations- und Materialflüsse wurden anschließend mittels geeigneter Software (Microsoft Visio) elektronisch aufbereitet und damit in eine übersichtliche und bearbeitbare Form überführt (vgl. Abb. 117).

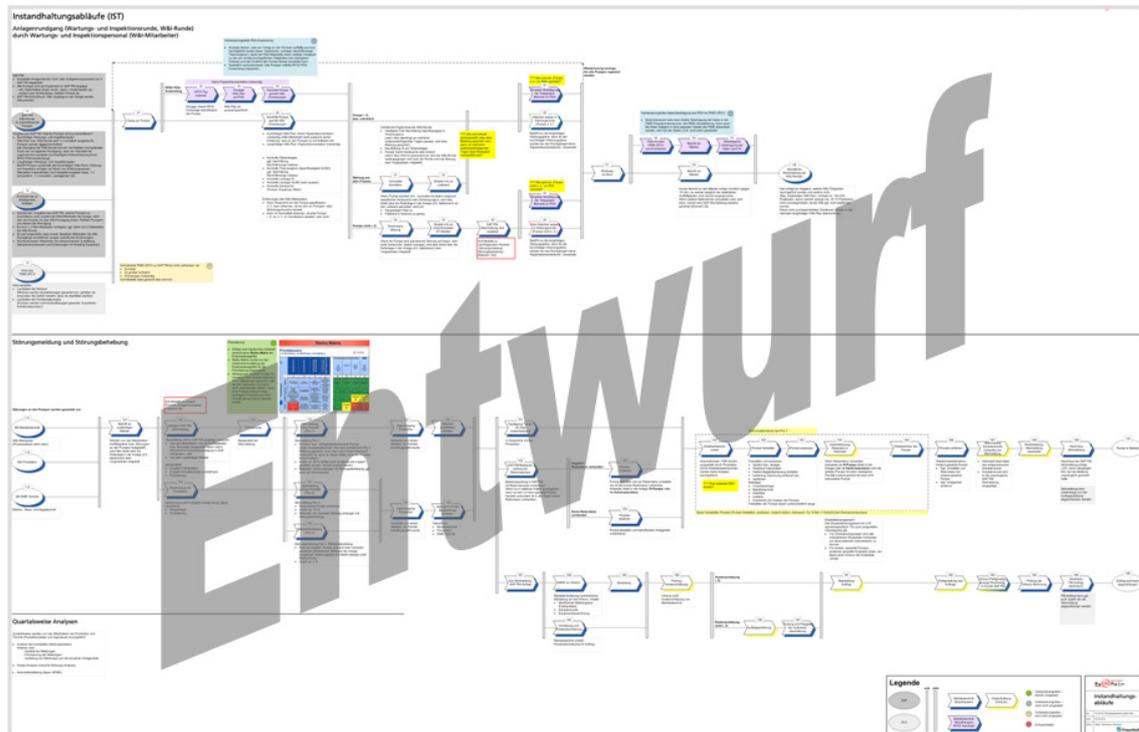


Abb. 117: Elektronische Aufbereitung

Auf Basis dieser transparenten Darstellungsweise der Prozessabläufe konnte eine Kontrolle erfolgen, ob alle Prozesse richtig aufgenommen und verstanden wurden. In diesem Zusammenhang erhielten die an der Prozessaufnahme beteiligten Mitarbeiter aus Betrieb und Instandhaltung die elektronisch aufbereiteten Prozesse zur Einsicht. Nachdem Korrekturen und Ergänzungen vorgenommen worden waren, dienten die verifizierten Prozessabläufe (vgl. Abb. 118) als Grundlage für die anschließende Identifikation von Verbesserungspotenzialen.

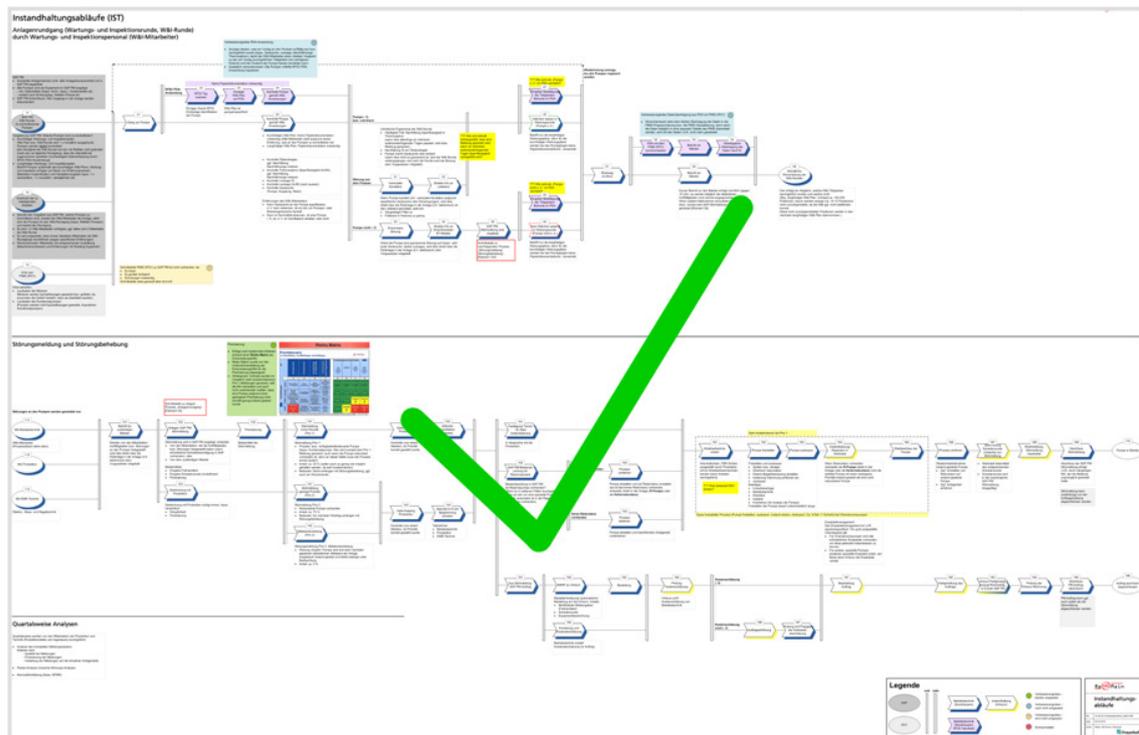


Abb. 118: Verifizierte Ist-Prozesse

5.5.2.2 Ermittlung von Verbesserungspotenzialen

Basierend auf den aufgenommenen und verifizierten Ist-Prozessen wurden im Projekt Prozessverbesserungen erarbeitet. Dabei waren zwei Anforderungen zu erfüllen. Diese bestanden zum Einen darin, die in den aktuellen Prozessabläufen vorhandenen Schwachstellen zu identifizieren und Verbesserungspotenziale auszuweisen, zum Anderen sollten die Informationen aus dem entwickelten Verfahren zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose bestmöglich in die aktuellen Prozessabläufe integriert und Soll-Prozessabläufe aufgezeigt werden. Nachfolgend wird die Umsetzung dieser Anforderungen exemplarisch erläutert.

Ein Verbesserungspotenzial besteht in der Unterstützung der Wartungs- und Inspektionsrundgänge durch die RFID-Technologie (vgl. Abb. 119). Hier wird ein an der Pumpe montierter passiver RFID-Tag über das Funksignal des Lesegeräts (PDA) angesprochen und der pumpenspezifische Wartungs- und Inspektionsplan aufgerufen, der die Eingabe der durchgeführten Tätigkeiten und erkannten Auffälligkeiten ermöglicht. In diesem Zusammenhang ist es sinnvoll, die Programmierung des Lesegeräts so zu modifizieren, dass in der Eingabemaske auch die an den Vortagen durchgeführten Tätigkeiten und dokumentierten Auffälligkeiten angezeigt werden. Kann der Mitarbeiter beispielsweise nachvollziehen, dass an mehreren aufeinanderfolgenden Tagen die Sperrflüssigkeit der Gleitringdichtung im Thermosi-

phonbehälter nachgefüllt wurde, nach außen aber keine Undichtigkeit erkennbar ist, kann daraus eine Leckage der Gleitringdichtung gefolgert werden, wobei die Sperrflüssigkeit nach innen in das Fördermedium austritt. Durch den direkten Vergleich mit den an den Vortagen bereits durchgeführten Wartungs- und Inspektionstätigkeiten kann in der Folge der Zustand der Pumpe besser beurteilt und die notwendigen Gegenmaßnahmen schnellstmöglich einleitet werden.

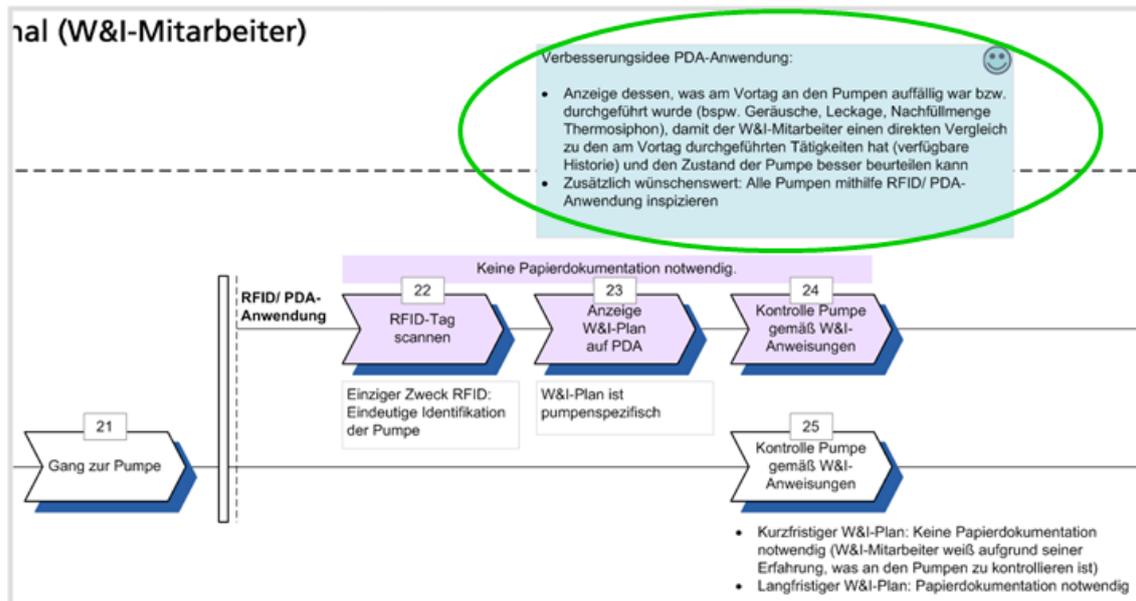


Abb. 119: Verbesserungspotenzial RFID/ PDA-Anwendung

Ein weiteres Verbesserungspotenzial konnte im Rahmen der Übertragung der mobil erfassten Daten in das Prozessinformationsmanagementsystem (PIMS) aufgezeigt werden (vgl. Abb. 120). Die Daten werden über eine Docking-Station aus dem PDA in eine dafür angelegte Tabelle im PIMS geladen, wo sie für die Datenauswertung im Projekt zur Verfügung standen. Hier zeigte sich, dass eine Integration zumindest einiger Daten aus den Wartungs- und Inspektionsrundgängen in das im PIMS programmierte Verfahren zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose sinnvoll ist. Insbesondere die Information einer Leckage der Gleitringdichtung könnte in das Verfahren eingebunden und entsprechend visualisiert werden. Damit erhält der Anwender die Möglichkeit, den Zustand der Gleitringdichtung als besonders ausfallkritisches Bauteil auf Basis der werktäglich aufgenommenen Daten aus den Wartungs- und Inspektionsrundgängen über die Visualisierungsmaske des Verfahrens zu überwachen. Somit wäre es nicht mehr erforderlich, regelmäßig mehrere Datenquellen im PIMS für die Datenauswertung heranzuziehen.

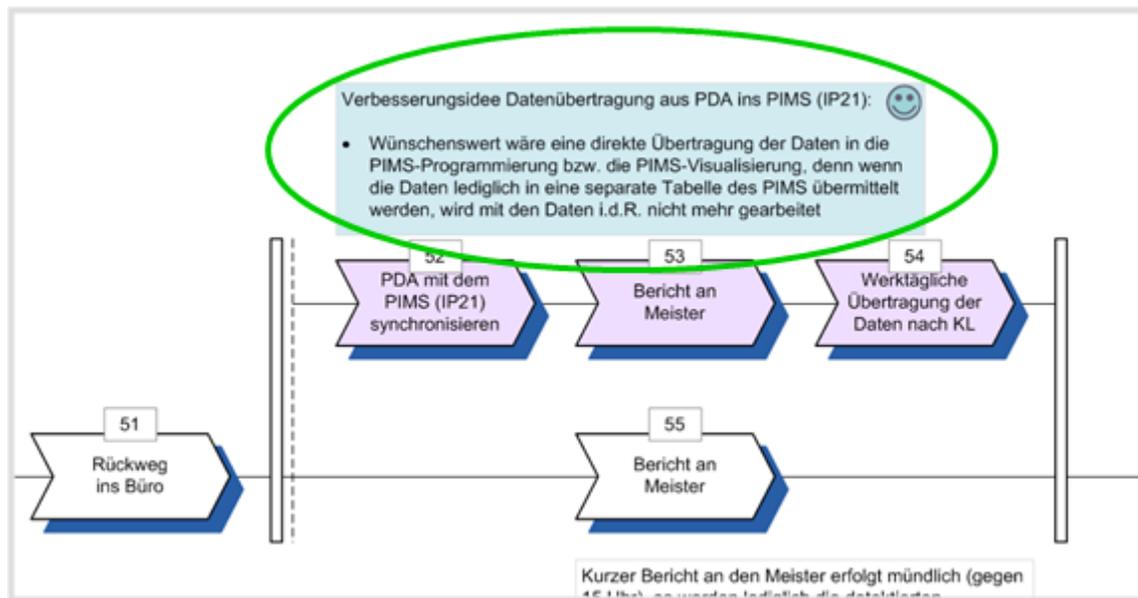


Abb. 120: Verbesserungspotenzial Datenübertragung

Auf Basis dieser Verbesserungspotenziale kann zukünftig eine verbesserte Prozessgestaltung in Betrieb und Instandhaltung erarbeitet werden.

5.5.2.3 Entwicklung von Soll-Prozessen

Neben der Identifikation von Verbesserungspotenzialen war die zweite Anforderung im Rahmen der Prozessverbesserung die Integration der Informationen aus dem entwickelten Verfahren zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose in die aktuellen Prozessabläufe und die Darstellung von Soll-Prozessabläufen, insbesondere in Hinblick auf die Potenziale zur Abschätzung der Restlebensdauer der Pumpe unter den vorliegenden Betriebszuständen. Die nachfolgende Abbildung 121 zeigt die im Projekt aufgezeigten Abläufe der Soll-Prozesse.

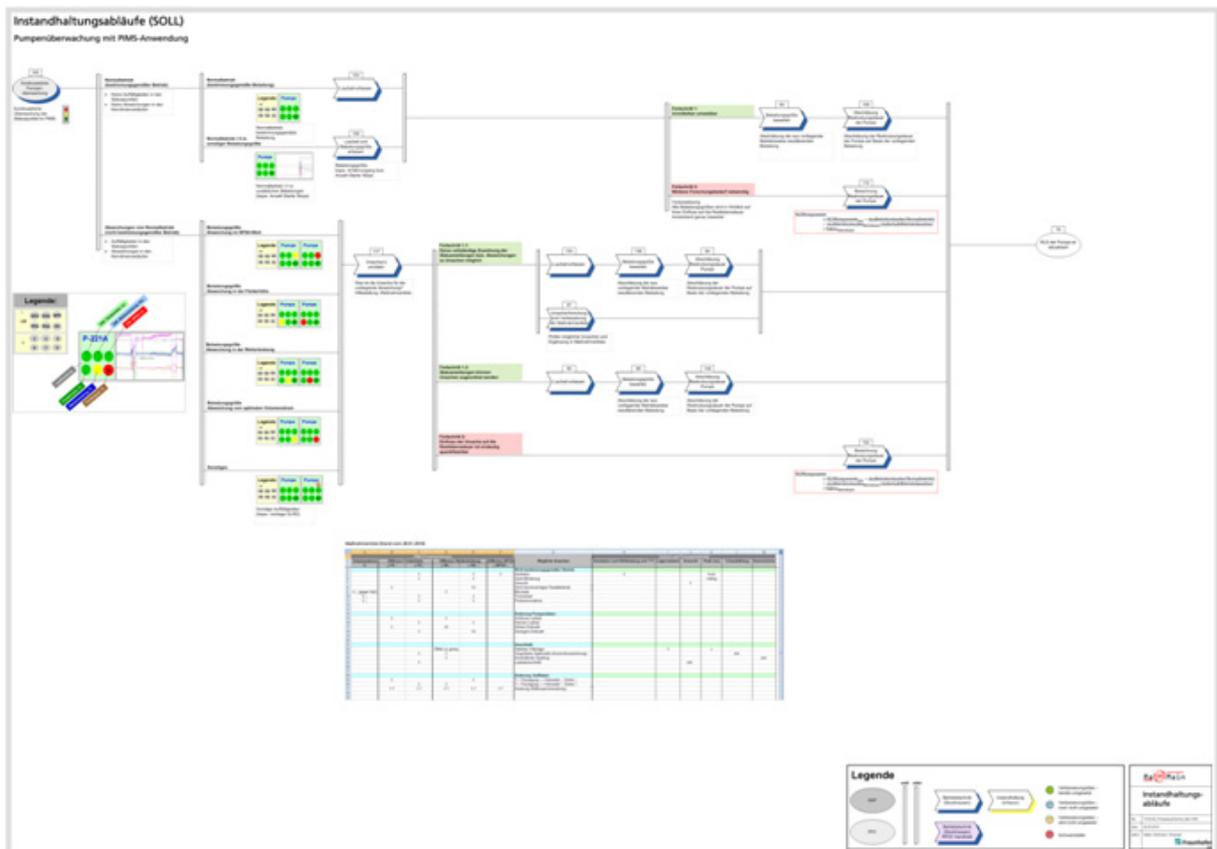


Abb. 121: Entwicklung von Soll-Prozessen

Wie im vorangehenden Kapitel 5.4.8 beschrieben wurde, eröffnet das Verfahren zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose die Möglichkeit, Belastungsgrößen zu identifizieren, die sich auf die Lebensdauer der Pumpe auswirken. Hierbei handelt es sich zum Einen um nicht vermeidbare Belastungsgrößen (z. B. An- und Abfahrvorgänge), zum Anderen um Belastungsgrößen, die aus nicht bestimmungsgemäßen Betriebsweisen resultieren (z. B. unzulässige Kavitation). Auch ein bestimmungsgemäßer Betrieb der Pumpe hat Verschleißprozesse zur Folge. Im Rahmen einer Neugestaltung der Prozesse müssen diese Informationen bestmöglich in die bestehenden Betriebs- und Instandhaltungsprozesse integriert werden. Nachfolgend wird in den Abbildungen 122 und 123 ein modifizierter Prozessablauf dargestellt und beschrieben.

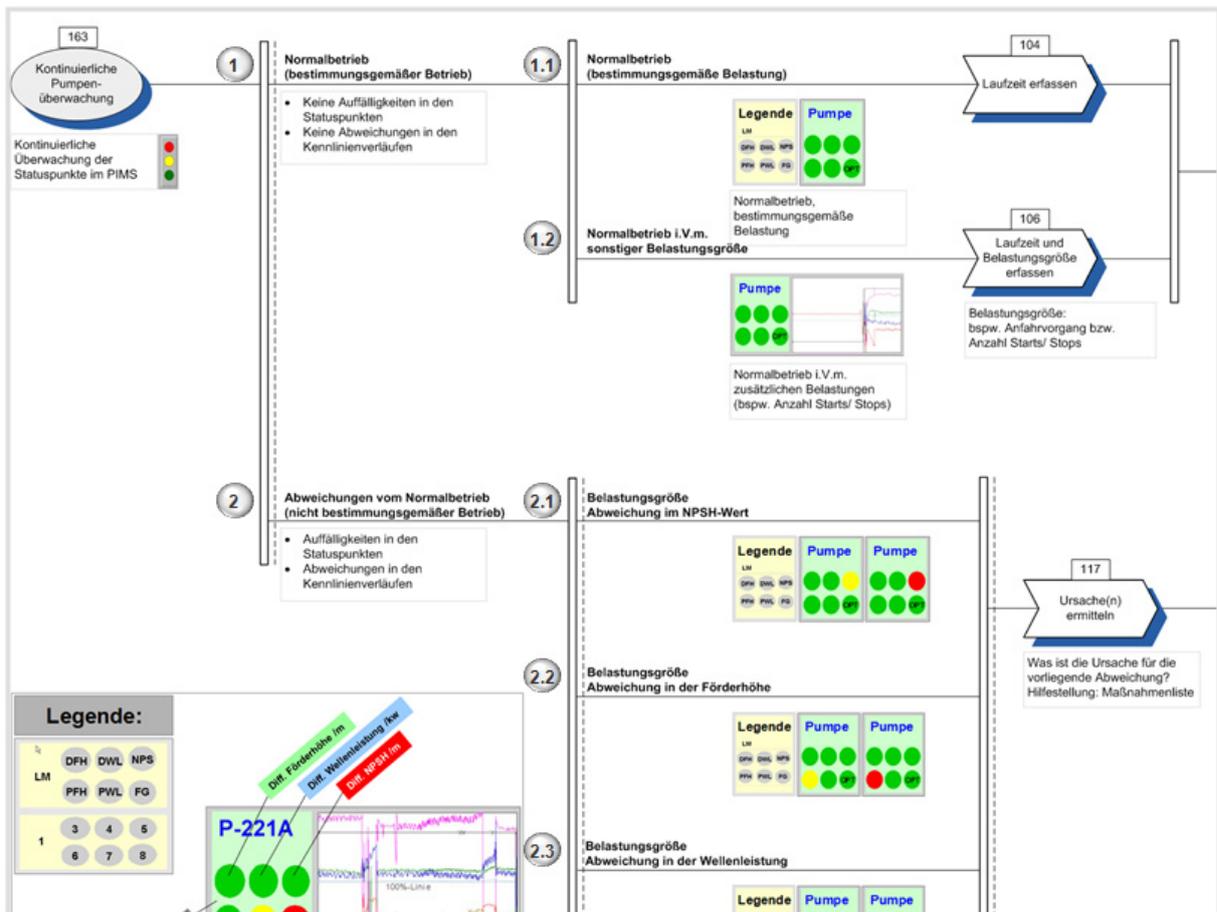


Abb. 122: Integration der Informationen aus dem Verfahren zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose in die Prozessabläufe

Die Quelle im Prozesskettenplan kennzeichnet die kontinuierliche Überwachung der Pumpe mittels des entwickelten Verfahrens (vgl. Abb. 122). Hier wird zunächst unterschieden, ob die Pumpe gemäß den Herstellerkennlinien arbeitet (Pfad 1) oder ob Abweichungen zu diesen vorliegen (Pfad 2).

Treten keine Abweichungen zu den Kennlinien auf, kann davon ausgegangen werden, dass die Pumpe bestimmungsgemäß betrieben wird (Pfad 1.1). Da auch der bestimmungsgemäße Betrieb der Pumpe Verschleißmechanismen zur Folge hat, ist die Kenntnis der Laufzeit der Pumpe für die Bewertung der aus dem Normalbetrieb resultierenden Belastung eine wichtige Information. Gleichzeitig können trotz bestimmungsgemäßer Betriebsweise Belastungen vorliegen, die grundsätzlich nicht vermeidbar sind (Pfad 1.2). Hier kommt es ebenfalls darauf an, die Laufzeit der Pumpe unter der jeweiligen Belastungsgröße zu erfassen.

Treten Abweichungen zu den Herstellerkennlinien auf und überschreiten diese die hinterlegten Grenzwerte, wird dies über die Visualisierungsmaske des Verfahrens angezeigt (Pfad 2). Die Abweichungen von den Kennlinien deuten auf nicht bestimmungsgemäße Betriebswei-

sen hin, können aber auch in anderen Ursachen begründet liegen. Hier ist es von Bedeutung, die Ursachen für die vorliegenden Abweichungen zu ermitteln, um zum Einen unter Berücksichtigung der Laufzeit die resultierende Belastung für die Pumpe bestmöglich zu bewerten, und zum Anderen geeignete Gegenmaßnahmen einleiten zu können. Hilfestellung bietet in diesem Zusammenhang die im Projekt in einem ersten Entwurf erarbeitete Tabelle der Ursache-Wirkungsbeziehungen (vgl. Abb. 112), die zukünftig mit wachsendem Erfahrungswissen an Exaktheit gewinnt.

Die Informationen über die vorliegende Belastungsgröße und die entsprechende Laufzeit der Pumpe bilden die Grundlage für die anschließende Bewertung in Hinblick auf die verbleibende Lebens- bzw. Nutzungsdauer der Pumpe (vgl. Abb. 123).

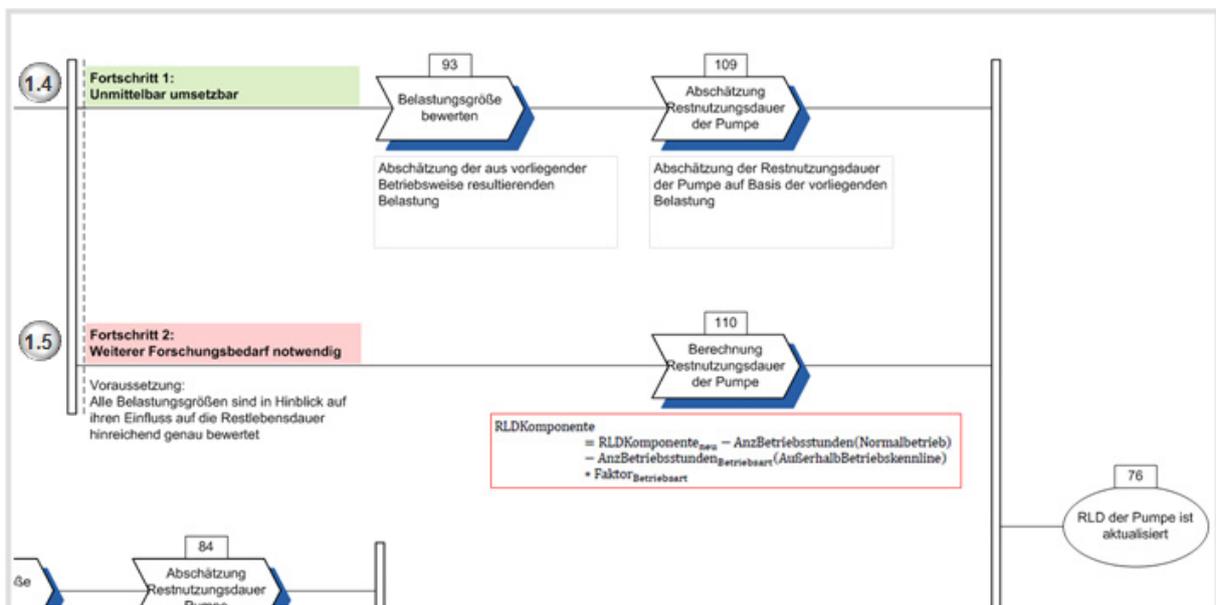


Abb. 123: Restlebensdauerabschätzung auf Basis der Informationen aus dem Verfahren zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose

Aktuell können mithilfe des Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose an der Pumpe vorliegende Betriebszustände erkannt werden, so dass Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können und in der Folge die Standzeit der Pumpe verlängert werden kann. Die tatsächlichen Auswirkungen der aus den Betriebszuständen resultierenden Belastungen auf die Restlebensdauer können gegenwärtig jedoch nur abgeschätzt werden (Pfad 1.4). An dieser Stelle ist das Potenzial des Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose noch nicht ausgeschöpft. Zukünftig ist denkbar, dass die aus den Betriebszuständen resultierenden Belastungen in Hinblick auf ihren Einfluss auf die Restlebensdauer hinreichend genau bewertet werden können und die Restlebensdauer der Pumpe über eine im Verfahren hinterlegte Formel automatisch berechnet werden kann. Der Anwender wäre da-

mit kontinuierlich über die vorliegenden Belastungen an der Pumpe und deren tatsächlichen Auswirkungen auf die Restlebensdauer informiert. Hier ist jedoch weiterer Forschungsbedarf notwendig, der abschließend auch nochmal in Kapitel 5.5.4 erläutert wird.

5.5.3 Bewertung

Im Anschluss an die Entwicklung von neuen Prozessabläufen wurde im Projekt in einer ersten Version ein Microsoft Excel-Tool entwickelt, um die Einsparmöglichkeiten bei der Anwendung des Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose zu untersuchen. Zukünftig können die in den vorherigen Kapiteln aufgezeigten Zusammenhänge die operative Gestaltung von Betrieb und Instandhaltung beeinflussen. Das entwickelte Verfahren eröffnet beispielsweise Möglichkeiten, den Anteil an reaktiver, ausfallbasierter Instandhaltung zu reduzieren und den Anteil vorbeugender Maßnahmen zu erhöhen. Damit können Kostensenkungspotenziale erschlossen werden, insbesondere in Bezug auf den effizienten Einsatz von Ressourcen. Damit verbunden sind jedoch auch notwendige Investitionen, beispielsweise in Messtechnik oder Software.

Mit dem Microsoft Excel-Tool können unterschiedliche Szenarien für die Instandhaltung über einen Kosten-Nutzen-Vergleich hinsichtlich ihrer Wirtschaftlichkeit bewertet werden. Das Tool summiert bestimmte Kostenpositionen (z. B. Ausfallkosten, Materialkosten, Personalkosten), so dass ein kostenorientierter Vergleich der Szenarien möglich wird. Darüber kann ermittelt werden, für welche Instandhaltungsszenarien und unter welchen Voraussetzungen sich eine Investition in entsprechende Technologien lohnt, um beispielsweise das entwickelte Verfahren zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose im Prozessinformationsmanagementsystem umzusetzen.

Die Kostenpositionen des Microsoft-Excel-Tools wurden im Projekt exemplarisch beziffert und kalkuliert (vgl. Abb. 124). Dabei wurde die bisherige Strategie der vorwiegend ausfall- und zeitbasierten Instandhaltung mit dem zukünftig denkbaren Szenario einer vermehrten vorbeugenden, zustandsorientierten Instandhaltung unter Anwendung des Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose verglichen. Im Rahmen dieser beispielhaften Betrachtung konnte ein positiver Betrag ausgewiesen werden. Daraus kann abgeleitet werden, dass das Verfahren zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose in Verbindung mit einer zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie zukünftig einen wesentlichen Beitrag für einen kosten- und ressourceneffizienten Pumpenbetrieb leisten kann.

Szenario 1: Ohne vorbeugende Instandhaltung								
Ausfallkosten ohne vorbeugende Instandhaltung								Total: 320.200 €
Produktionskosten			Pönale			Schädigungskosten		
Produktionsausfall	Produktionsänderung	Minderleistung	Pönale	Kundenunzufriedenheit	Personenschäden	Umweltschäden	Folgeschäden	
160.000 €	4.000 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €
Summe: 164.000 €					Summe: 0 €			
Instandsetzungskosten								
Materialkosten (Primär)	Materialkosten (Sekundär)	Werkzeugkosten	Personalkosten	Reinigungskosten	Logistikkosten	Verwaltungskosten	Energiekosten	
120.000 €	8.000 €	600 €	19.200 €	4.000 €	2.000 €	2.000 €	400 €	
Summe: 156.200 €								

Szenario 2: Mit vorbeugender Instandhaltung und Technologieanwendung (PIMS-Programmierung)								
Kosten für vorbeugende Instandhaltung						Total: 128.900 €		
Technologiekosten		Systempflegekosten		Inspektionskosten		Schulungskosten		Material-Restwertkosten
Hardware	Software	Hardware	Software	Personalkosten				
65.000 €	1.000 €	5.000 €	1.250 €	50.400 €		5.000 €		1.250 €
Summe: 66.000 €		Summe: 6.250 €						
Ausfallkosten mit vorbeugender Instandhaltung								Total: 137.650 €
Produktionskosten			Pönale			Schädigungskosten		
Produktionsausfall	Produktionsänderung	Minderleistung	Pönale	Kundenunzufriedenheit	Personenschäden	Umweltschäden	Folgeschäden	
20.000 €	500 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	0 €	
Summe: 20.500 €					Summe: 0 €			
Instandsetzungskosten								
Materialkosten (Primär)	Materialkosten (Sekundär)	Werkzeugkosten	Personalkosten	Reinigungskosten	Logistikkosten	Verwaltungskosten	Energiekosten	
90.000 €	6.000 €	450 €	14.400 €	3.000 €	1.500 €	1.500 €	300 €	
Summe: 117.150 €								

Szenario 1: 320.200 €	Szenario 2: 266.550 €	Gewinn: 53.650 €
-----------------------	-----------------------	------------------

Abb. 124: Kostenmäßige Bewertung der Einsparpotenziale bei Anwendung des Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose

5.5.4 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Entwicklung von neuen Prozessabläufen in Betrieb und Instandhaltung wurden die im Projekt umgesetzten Technologieanwendungen nahezu vollständig berücksichtigt (vgl. Abb. 125). Sowohl die RFID/ PDA-Anwendung bei den werktäglichen Wartungs- und Inspektionsrundgängen als auch die erweiterte Prozessinstrumentierung und die darauf aufbauende Programmierung des Verfahrens zur Pumpenüberwachung und Zustandsdiagnose im Prozessinformationsmanagementsystem wurden in die Prozessgestaltung integriert. Zukünftig sollen auch die Informationen des Schwingungssensors efector octavis Verwendung finden, um die Umsetzung einer zustandsorientierten Instandhaltung zu unterstützen und die Neugestaltung der Prozessabläufe fortzuführen.

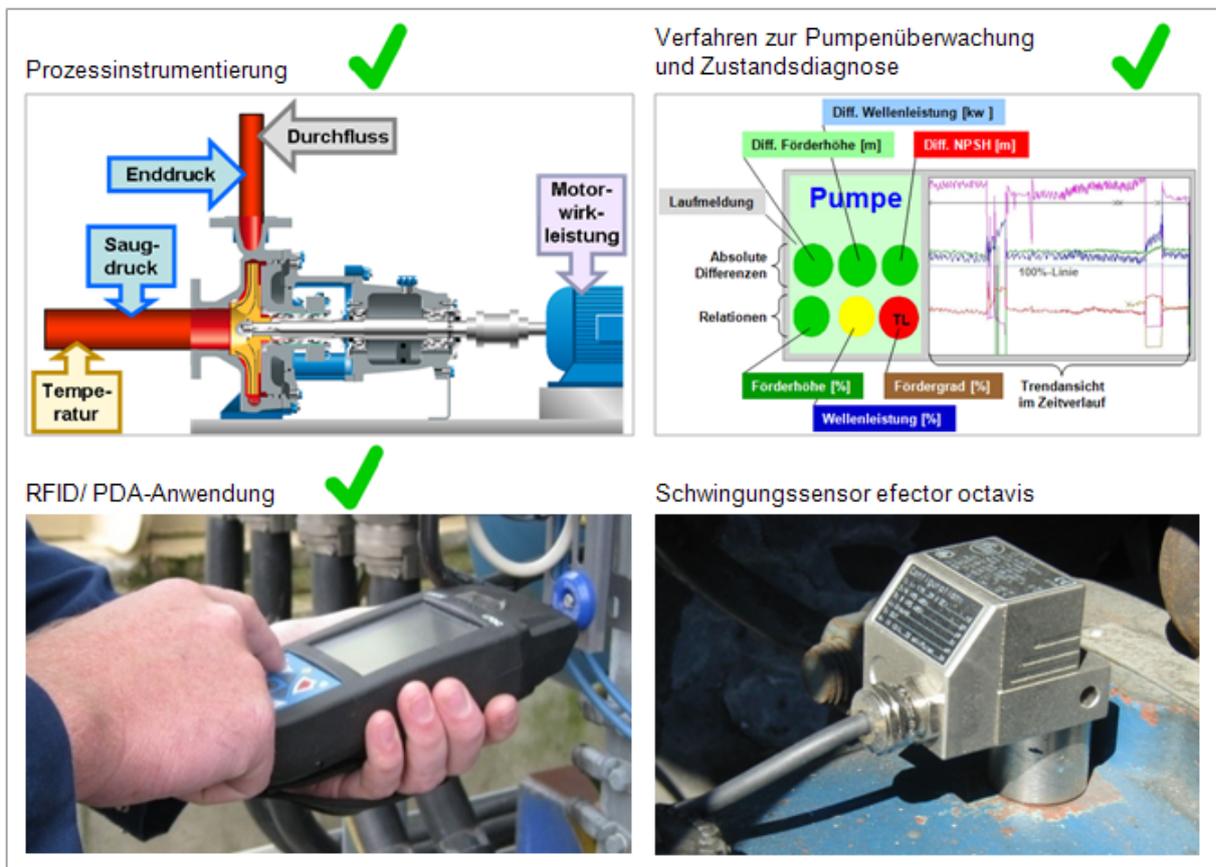


Abb. 125: Für die Prozessneugestaltung berücksichtigte Technologieanwendungen

6. Zusammenfassung

Im Vorfeld des Forschungsprojekts ReMain haben verschiedene Forschungsinstitute und Industrieunternehmen gezeigt, dass die Entwicklung eines Pumpenausfalls aus der Veränderung von Messdaten erkennbar ist. Dies entspricht dem Wissen der erfahrenen Betriebsingenieure, Betriebsmeister und Wassermeister, die nach vielen Jahren bereits am Klang der Pumpe oder durch „Handauflegen“ eine Veränderung der Pumpe und einen eintretenden Schaden vorhersagen konnten. Sowohl der Erfahrungsschatz der Experten als auch die o. g. Messungen sind durch beobachtete Ausfälle einzelner Pumpen gewonnen und auf die Vorhersage von Ausfällen dieser Pumpen beschränkt.

Eine Aggregation dieses Erfahrungswissens ist nur bedingt möglich, da die Wahrnehmung der Experten, aber auch die bei den Versuchen eingesetzte Messtechnik, unterschiedlich ist.

Aus dieser Erkenntnis wurde die Idee für das Projekt ReMain geboren: Eine größere Anzahl von Pumpen in einer Produktionsanlage mit ausgewählter Verteilung von Größen und Ausführungen sollte mit einer einheitlichen Messtechnik ausgestattet und über einen längeren

Zeitraum beobachtet werden. Durch die Beobachtungen von Pumpen in laufenden Produktionsanlagen können im Vergleich zu Laborversuchen breitere Erkenntnisse gewonnen werden: Medienvielfalt, normale Schwankungen der Betriebsweise und Betriebsstörungen, die einen normalen Alltag ausmachen.

Die Durchführung des Forschungsprojekts in einer Produktionsanlage ist eine Herausforderung, da die betrieblichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen mit den Erfordernissen und Wünschen des Projekts in Einklang gebracht werden müssen. Die Unterstützung durch den Betreiber Evonik Stockhausen war außergewöhnlich gut. Die Betriebsweise der Anlage sowie Störungen und Verbesserungspotenziale wurden offen mit den Projektpartnern diskutiert und waren Voraussetzung für den gemeinsamen Erkenntnisgewinn. Ebenfalls sehr förderlich für das Projektergebnis war die enge Kooperation der Ansprechpartner für Produktion und Technik.

Die erste Projektphase war sehr umfangreich und aufwändig. In einer großen Betreiberumfrage bei den Mitgliedern des erweiterten Arbeitskreises wurden Pumpenpopulationen und Ausfallursachen analysiert, um den Projektumfang auf relevante Pumpentypen und Störungen zu beschränken. Im gleichen Zeitraum definierte das interdisziplinäre Projektteam gemeinsame Anforderungen an die Versuchsausstattung. Die Kooperation von Vertretern eines Instandhalters, eines Betreibers, von Herstellern von Pumpen, Sensoren und Software für Statistik sowie zwei wissenschaftlichen Partnern mit unterschiedlichen Schwerpunkten war bereichernd, erforderte aber gerade zu Projektbeginn viel Offenheit für die Interessen und Schwerpunkte der anderen Parteien.

Die Planung und Umsetzung der zu ergänzenden Messtechnik in einer laufenden Produktionsanlage mit Explosionsschutzvorschriften war eine Herausforderung für alle Projektpartner. Der Beginn der Messungen weniger als zwei Jahre nach Start des Projekts war eine große Leistung aller Verantwortlichen. Verzögerungen gegenüber der Antragstellung kompensierten die Projektpartner durch eine Verlängerung der Projektlaufzeit ohne zusätzliche Fördermittel.

Die ganzheitliche Überwachung der Versuchspumpen unter Berücksichtigung der historischen Werkstattberichte, elektronisch erfasster Tagesmeldungen aus den Wartungs- und Inspektionsrundgängen, Prozessdaten, Meldungen der Leitwarte, Messdaten der Sensoren sowie Ergebnisse des im Prozessinformationsmanagementsystem implementierten Online-Diagnosesystems hat den Diagnoseexperten bestmögliche Voraussetzungen gegeben.

Durch Erkennen von Ausfallursachen und Umsetzen von Verbesserungsmaßnahmen wurde die im ReMain-Projekt betrachtete Anlage ständig verbessert. Zum Vorteil des Betreibers,

aber zum Nachteil der Projektergebnisse sank die Ausfallrate der Pumpen von 2005 bis 2009 um 50 %. Damit wurden die Annahmen bei Antragstellung⁵ bzgl. der Wirtschaftlichkeit des Projekts und von Pumpenüberwachung im Allgemeinen noch übertroffen. Die für die Restlebensdauer erhoffte Datenbasis mit Ausfalldaten, die eine statistische Auswertung ermöglicht, wird erst nach längerer Messdauer zur Verfügung stehen. Dennoch konnten aus dem Projekt ReMain bereits eine Vielzahl wertvoller Erkenntnisse gewonnen werden:

Die Betreiberumfrage liefert einen Überblick über relevante Ausfallursachen von Kreiselpumpen. Deren Ursache und Wirkung wurde durch Schadensketten im Detail dargestellt. Zugehörig wurden mögliche Messverfahren dokumentiert und auf Wirtschaftlichkeit und Praxistauglichkeit bewertet. Eine pauschale Empfehlung zur Reduktion der Messgrößen ist nicht möglich. Vielmehr ist die Auswahl für den speziellen Einsatzfall zu bewerten. Durch kombinierte Nutzung von Sensoren zur Prozessführung und Pumpenüberwachung können Kosten gesenkt und Komplexität reduziert werden.

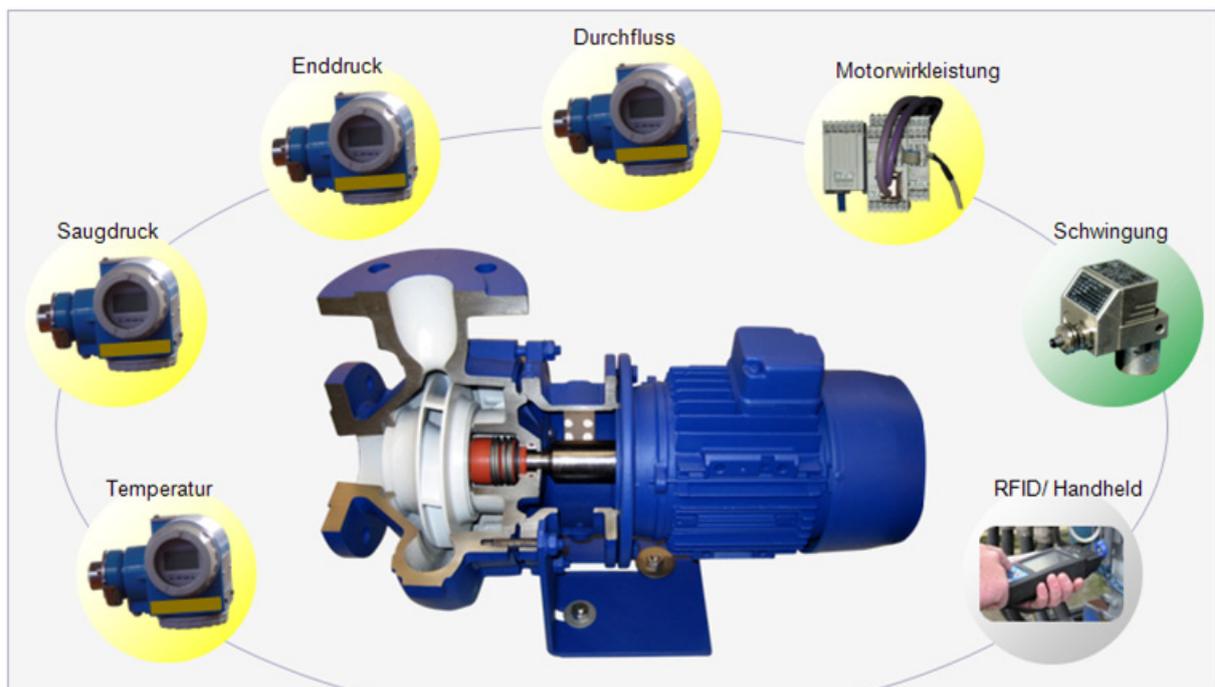


Abb. 126: Im Rahmen des ReMain-Projekts gewählter Instrumentierungsumfang

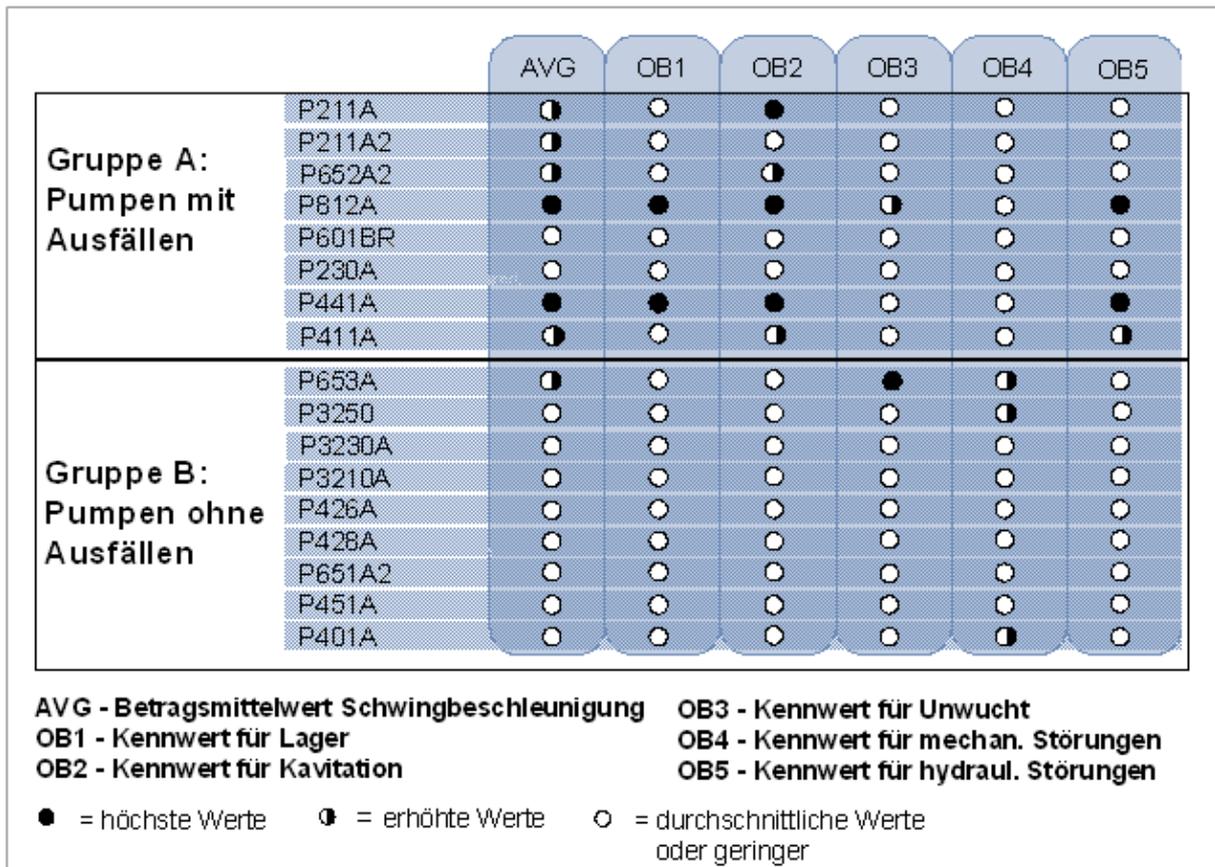
Für den intelligenten Schwingungssensor efector octavis wurde ein für unterschiedliche Pumpen einsetzbarer Parametersatz definiert und validiert.

⁵ Aus dem Projektantrag: Vermeidung von 25 % der Ausfälle ergibt eine Einsparung von über 16 Mio € p. a. bei den 100.000 Pumpen des erweiterten Arbeitskreises (zzgl. Produktionsausfallkosten).

Durch den Aufbau der Infrastruktur steht Anwendern ein Best-Practice Beispiel zur Verfügung. Die Auswahl der Messgrößen und die Vernetzung der Datenströme können einfach auf andere Anlagen übertragen werden.

Das im Prozessinformationsmanagementsystem integrierte Diagnosesystem bestimmt für unterschiedliche Konfigurationen von Sensoren unter anderem den Volumenstrom der Pumpe und stellt den Bezug zu dem bestimmungsgemäßen Betrieb der Pumpe her. Dieses System generiert aus den Messdaten der Sensoren in Echtzeit für den Anlagenfahrer interpretierbare Informationen.

Aus der Analyse von Vergleichsgruppen (Daten von Pumpen mit Ausfällen und vergleichbaren Pumpen ohne Ausfälle) konnten verschiedene Hinweise auf in der Praxis einsetzbare Verfahren gewonnen werden. Pumpen mit höherer Ausfallrate haben ein signifikant höheres Schwingungsniveau und vor allem einen höheren Pegel von hochfrequenten Schwingungsanteilen.



**Abb. 127: Vergleich von Kennwerten für Referenzgruppen
(Pumpen mit Ausfällen und vergleichbare Pumpen ohne Ausfälle)**

Eine Prozessaufnahme und -optimierung mit allen Beteiligten (Produktion, Betriebstechnik und Dienstleister für Instandhaltung) verbessert das gegenseitige Verständnis der Anforderungen und ist der Schlüssel zu einem störungsarmen Betrieb. Ein wichtiges Werkzeug ist dabei die Visualisierung der Prozessketten. Die Optimierung der Prozesse und deren Implementierung durch Schulung aller Beteiligten war ein wesentlicher Faktor, um über die Projektlaufzeit die Anzahl der Ausfälle zu halbieren.

7. Ausblick

Eine der Zielsetzungen im ReMain-Projekt bestand darin, die Restlebensdauer einer Pumpe auf Basis der Informationen aus einer Zustandsdiagnose und -überwachung zu ermitteln.

Dieses Ziel kann erst dann erreicht werden, wenn eine ausreichende Menge an Informationen über die Betriebs- und Schadenshistorie der Pumpen vorliegt. Eine Momentaufnahme, wie beispielsweise die aktuellen Abweichungen von den Pumpenkennlinien, ermöglicht allein keine Aussage über die Restlebensdauer der Pumpe. Mit der im Projekt Remain geschaffenen Infrastruktur kann diese Datenbasis in den nächsten Jahren aufgebaut werden.

Die ersten Ergebnisse aus der Analyse der Messdaten lassen erwarten, dass signifikante Zusammenhänge zwischen Zustand der Pumpe und der Veränderung von messgrößenbasierten Merkmalen identifiziert werden können.

Einzig für die Überwachung von Gleitringdichtungen fehlen derzeit noch industrietaugliche Messverfahren. Die Gleitringdichtung ist als empfindlichstes Bauteil des Pumpensystems ein sehr guter Indikator für viele Störungen und versagt bei starker Belastung der Pumpe als erstes Bauelement.

Mit den Indikationen zur Restlebensdauer wird nicht nur die bessere Planbarkeit der Instandhaltung möglich, sondern auch eine verbesserte Zusammenarbeit von Betriebs- und Instandhaltungsplanung. Je genauer die Instandhaltung Aussagen über Lebensdauer der Pumpen liefern kann, desto besser kann auch die Betriebsplanung darauf abgestimmt werden. Weiterhin kann durch die Veränderung von Betriebsparametern die Standzeit der Pumpe verlängert und damit der Instandhaltungszeitpunkt beispielsweise in Hinblick auf den nächsten betrieblichen Stillstand geplant werden. Zudem kann die Kenntnis über die Restlebensdauer bei nicht kontinuierlich betriebenen Anlagen zumindest eine Verringerung von Redundanzen ermöglichen.

8. Literaturverzeichnis

- [Acid05] Website Acida GmbH, Produkte: Online Machine Monitoring Systems, Micro Online Machine Monitoring Systems, URL: <http://www.acida.de/>, letzte Aktualisierung 2005.
- [Blo97] Bloech, J.; Ihde, G. B. (Hrsg.): Vahlens Großes Logistiklexikon, Vahlen, München, 1997.
- [EIReo.J.] Patentanmeldung Electric Reliance: Cavitation detection for pumps using neural networks, EP1 286 056 B1.
- [Emer05] Website Emerson, URL: http://www.mhm.assetweb.com/9210/9210_intro.html, letzte Aktualisierung 2005.
- [FAG05] Website FAG, URL: <http://www.fag.de/content/de/index.jsp>, letzte Aktualisierung 2005.
- [Flyg05] Website Flygt Pumps, Produkt: MAS 711, URL: <http://www.flygt.com/>, letzte Aktualisierung 2005.
- [FVAo.J.] Forschungsvorhaben 242-I-IIIc: Einsatzerweiterung der Verzahnungsdiagnose durch kostengünstige Mikrosysteme und durch Anwendung bei veränderlichen Betriebszuständen.
- [Gero99] Geropp, B.: Hüllkurvenanalyse – Verfahren zur Schadensfrüherkennung, Antriebstechnik, Band 38, Nr. 1, 1999.
- [Goul04] Website Goulds Pumps, Produkt: ProSmart Control Solution, URL: <http://www.gouldspumps.com/>, letzte Aktualisierung 2005.
- [Güli99] Gülich, J.: Kreiselpumpen: Ein Handbuch für Entwicklung, Anlagenplanung und Betrieb, 1. Auflage, Springer, 1999.
- [Haaß09] Haaß, M.: Entwicklung eines Optimierungsmodells für die Veränderungsplanung einer komplexen Ersatzteilwirtschaft, Dissertation, TU Dortmund, Fakultät Maschinenbau, 2009.
- [Hell99] Hellmann, D.-H.: Maximale Wirtschaftlichkeit erreichen – Lebenszyklus-Kosten-Analyse von Pumpenanlagen, Verfahrenstechnik, Sonderausgabe 1999, Seite 74-76.

- [Huhn01] Huhn, D.: Störungsfrüherkennung an wellendichtungslosen Pumpen durch bauteilintegrierte Sensorik, Dissertation, TU Kaiserslautern, Lehrstuhl für Strömungs- und Verdrängermaschinen, 2001.
- [Ifor05] Website i-for-t GmbH, Produkt: octavis, URL: <http://www.i-for-t.com/>, letzte Aktualisierung 2005.
- [InEn10] Website Initiative Energieeffizienz, Informationsblatt zu Pumpensystemen: Systemkomponenten und Energiebedarf von Pumpen und Pumpensystemen, Hrsg.: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Berlin, URL: <http://www.industrie-energieeffizienz.de/>, <http://www.industrie-energieeffizienz.de/fileadmin/InitiativeEnergieEffizienz/system-effizienz/downloads/Systemkomponenten.pdf>, letzte Aktualisierung im Mai 2010.
- [Kafk99] Kafka, T.: Aufbau eines Störungsfrüherkennungssystems für Pumpen der Verfahrenstechnik mit Hilfe Maschinellen Lernens, Dissertation, TU Kaiserslautern, 1999.
- [Kenu98] Kenull, T.: Zustandsdiagnose an Kreiselpumpen anhand instationärer Schwankungen der Motorstromaufnahme, Dissertation, TU Braunschweig, 1998.
- [Klau00] Klaus, P.; Krieger, W. (Hrsg.): Gabler Lexikon Logistik, Management logistischer Netzwerke und Flüsse, 2. Auflage, Gabler, Wiesbaden, 2000.
- [KSB05] Website KSB AG, Produkt: PumpExpert, URL: <http://www.ksb.de>, letzte Aktualisierung 2005.
- [Kuhn95] Kuhn, A.: Prozessketten in der Logistik: Entwicklungstrends und Umsetzungsstrategien, Verlag Praxiswissen Dortmund, 1995.
- [Kuhn99] Kuhn, A. (Hrsg.): Prozesskettenmanagement, Erfolgsbeispiele aus der Praxis, Verlag Praxiswissen Dortmund, 1999.
- [Laue98] Laue, S.; Schroll, M.; Siekmann, H. E.: Technische Fehlerdiagnose für axiale Tauchmotorpumpen bezüglich Zustand und Restlebensdauer, Kraftwerkstechnisches Kolloquium, Turbomaschinen für Kraftwerke, TU Dresden, 27./ 28. Oktober 1998.
- [Laue06] Laue, S.: Experimentelle Untersuchungen zur modellbasierten Fehlerdiagnose an axialen Tauchmotor-Pumpenaggregaten, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2006, ISBN 978 3 86664 325 3.

- [Piel95] Pielok, T.; Kuhn, A. (Hrsg.): Prozesskettenmodulation: Management von Prozessketten mittels logistic function deployment, Verlag Praxiswissen Dortmund, 1995.
- [Prüf05] Website Prüftechnik AG, Produkte: Online Condition Monitoring, URL: <http://www.pruftechnik.de>, letzte Aktualisierung 2005.
- [Selbo.J.] Selbach, A.; Schriewer, R.: IP21-Schulung: „power-user“, PIMS in der Acrylsäureanlage (Marl), S-TE-EN-P1/4, Evonik Degussa GmbH.
- [Siem08] Siemens PumpMon, Function Block for cost-effective Monitoring and Diagnostics of Centrifugal Pumps; Asset Management and Condition Monitoring; 2008; www.automation.siemens.com.
- [Sonn09] Sonnek Engineering: Warum fallen Pumpen aus? Vortrag im Rahmen der SchneiAkademie, 2009.
- [Texa05] Website Texas Instruments, Produkt: PumpSystemAlert, URL: <http://www.ti.com/>, letzte Aktualisierung 2005.
- [VCI05] Website Verband der Chemischen Industrie, Informationsbroschüre: Chemiewirtschaft in Zahlen, Ausgabe 2005, URL: <http://www.vci.de/>, letzte Aktualisierung im Juli 2008.
- [VDA00] VDA (Verband der Automobilindustrie e.V.): Zuverlässigkeitssicherung bei Automobilherstellern und Lieferanten, Band 3, Teil 1, ISSN 0943-9412 2000.
- [VDI3832] Körperschallmessungen zur Zustandsbeurteilung von Wälzlagern in Maschinen und Anlagen, 2007.

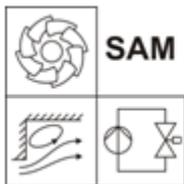
Anhang 1: Fragebogen der Betreiberumfrage

Technische Universität Kaiserslautern

Fachbereich Maschinenbau und Verfahrenstechnik

Lehrstuhl für Strömungs- und Verdrängermaschinen

Prof. Dr.-Ing. D.-H. Hellmann



Umfrage zu Betrieb und Überwachung von Pumpen im Rahmen von



GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

BETREUT VOM



Projektträger
Forschungszentrum
Karlsruhe (PTKA)

Dieses Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) innerhalb des Rahmenkonzeptes „Forschung für die Produktion von morgen“ gefördert und vom Projektträger Forschungszentrum Karlsruhe, Bereich Produktion und Fertigungstechnologien (PTKA-PFT), betreut.

ReMain bezeichnet das Projekt „Zuverlässigkeitsprognose von mechatronischen Systemen zur Ableitung restnutzungsdauerbezogener Betriebs- und Instandhaltungsstrategien“:

Im Rahmen dieses Projekts soll ein praxistaugliches Verfahren zur Restlebensdauerprognose erarbeitet werden. Basierend auf den Erfahrungen der Betreiber des erweiterten Arbeitskreises werden relevante Pumpenausführungen und deren Hauptausfallursachen gesammelt. Durch diese Datenerhebung werden für relevante Störungen an ausgewählten, repräsentativen Pumpen im Betrieb Daten gesammelt. Aus den erfassten Daten werden mittels Verfahren der Statistik und des maschinellen Lernens verallgemeinerungsfähige Verfahren zur Restlebensdauerprognose für mechatronische Pumpensysteme entwickelt und durch Einsatz in der Instandhaltung erprobt.

Wir möchten gerne Ihre Anforderungen bei der Auswahl berücksichtigen, damit Sie am Projektende die Ergebnisse direkt bewerten und in Ihrem Haus umsetzen können. Dazu soll der folgende Fragebogen dienen.

Der Fragebogen ist in vier Bereiche gegliedert:

- **Teil 1:** Pumpenpopulation in Häufigkeitsverteilungen
- **Teil 2:** Informationen zu Schadensursachen, durchschnittlichen Ausfallraten, Betriebsarten, Redundanz, Wartung/Inspektion
- **Teil 3:** Nutzen von Überwachungssystemen
- **Teil 4:** Kontaktdaten des Ansprechpartners

Die nachfolgenden Aufstellungen können sehr gerne durch anonymisierte Rohdaten (z. B. aus SAP-PM, Excel-Sheets oder jede Form von unformatierten Datensammlungen) „ausgefüllt“ werden. Die Auswertung und Formatierung übernimmt dann ReMain. Sämtliche Informationen unterliegen dabei dem Datenschutz. Die Ergebnisse werden vertraulich behandelt und nur in Summenauswertungen dem Arbeitskreis und der Öffentlichkeit präsentiert.

Teil 1: IST-Analyse

Dieser Teil erfasst die Pumpenpopulation in Häufigkeitsverteilungen. Die Zielgruppe sind sämtliche Kreiselpumpentypen (Chemie-, Wasser-, & Abwasserpumpen). Zum Ausfüllen von Fragenblock 1 kann das beigelegte Excel-Sheet benutzt werden oder Sie können anonymisierte Rohdaten zur weiteren Auswertung zur Verfügung stellen.

Frage 1.1: Wie viele der folgenden Pumpentypen sind in ihrem Unternehmen im Einsatz?

(SBP – Stopfbuchspackung; E-GLRD – einfachwirkende Gleitringdichtung; D-GLRD – doppeltwirkende Gleitringdichtung; G-GLRD – gasgeschmierte Gleitringdichtung)

Bauart	Pumpentyp		drehzahl geregelt	nicht drehzahl geregelt bei	
				1450 [U/min]	2900 [U/min]
Pumpe mit Wellendichtung	Standardmotor	SBP			
		E-GLRD			
		D-GLRD			
		G-GLRD			
	Blockpumpe	SBP			
		E-GLRD			
		D-GLRD			
		G-GLRD			
Pumpe ohne Wellendichtung	Magnetkupplungspumpe				
	Spaltrohrmotorpumpe				

Wenn Sie Rohdaten zur Verfügung stellen, enthalten diese dann auch Informationen zu Schadensursachen, durchschnittlichen Ausfallraten, Betriebsarten, Redundanz, Wartung/Inspektion und Instrumentierung?

Wenn dies nicht der Fall ist, füllen Sie bitte repräsentativ für 3 ausgewählte Pumpen den Fragenblock 2 aus. Sie können den Fragenblock 2 auch ausfüllen, um Ihre Anforderungen speziell am Beispiel von 3 Maschinen einzubringen.

Teil 2: Bitte wählen Sie die drei Pumpentypen (Bauart und -größe) aus und beantworten Sie die nachfolgenden Fragen entsprechend für jeden Typ.

Typ 1: _____

Typ 2: _____

Typ 3: _____

Frage 2.1: Angaben zum Inspektions- und Wartungsprozess

Existieren für die drei Pumpentypen Betriebsanweisungen für die Wartung und Inspektion?

- ja
- nein

Wurde das Betriebspersonal in der Aufgabe der Wartung und Inspektion separat geschult?

- ja
- nein

Wird die Wartung und Inspektion selbst oder von Fremdfirmen durchgeführt?

Wartung

- Selbst durchgeführt
- An Fremdfirma vergeben

Inspektion

- Selbst durchgeführt
- An Fremdfirma vergeben

Frage 2.6: Angaben zu Inspektions- & Wartungsintervallen: Wie hoch sind die Intervalle?

(Bitte je nur eine Antwort)

	Pumpe 1		Pumpe 2		Pumpe3	
	Wartung	Inspektion	Wartung	Inspektion	Wartung	Inspektion
• täglich	<input type="checkbox"/>					
• wöchentlich	<input type="checkbox"/>					
• monatlich	<input type="checkbox"/>					
• vierteljährlich	<input type="checkbox"/>					
• halbjährlich	<input type="checkbox"/>					
• jährlich	<input type="checkbox"/>					
• alle 2-3 Jahre	<input type="checkbox"/>					
• alle 3-5 Jahre	<input type="checkbox"/>					
• keine	<input type="checkbox"/>					
•						
•						

Frage 2.7: Können Sie Angaben machen zu:

Pumpe 1: MTTR: _____[h] MTBF: _____[h]

Pumpe 2: MTTR: _____[h] MTBF: _____[h]

Pumpe 3: MTTR: _____[h] MTBF: _____[h]

MTTR - Mean Time To Repair (mittlere Instandsetzungszeit)

MTBF - Mean Time Between Failure (durchschnittlicher Ausfallabstand; Erwartungswert der Zeit zwischen Fehlern)

Frage 2.8: Wie hoch sind die mittleren Prozess-Ausfallzeiten?

Wie lange steht Ihre Anlage bei einem ungeplanten Ausfall Ihrer Pumpe?

(Bitte je nur eine Antwort)

	Pumpe 1	Pumpe 2	Pumpe 3
• kürzer	<input type="checkbox"/> [h]	<input type="checkbox"/> [h]	<input type="checkbox"/> [h]
• ½ Tag	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• 1 Tag	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• 2 Tage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• 3 Tage	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• länger	<input type="checkbox"/> [d]	<input type="checkbox"/> [d]	<input type="checkbox"/> [d]

Frage 2.9: Wie häufig stellen Sie die genannten Schadensursachen/Schwachstellen an Ihren Pumpe/n fest?

(Bitte Gewichtung angeben)

1 - selten ... 5 - sehr häufig	Pumpe 1						Pumpe 2						Pumpe 3					
	1	2	3	4	5	Nicht vorhanden	1	2	3	4	5	Nicht vorhanden	1	2	3	4	5	Nicht vorhanden
Lager	<input type="checkbox"/>																	
GLRD	<input type="checkbox"/>																	
Dichtung	<input type="checkbox"/>																	
Motor	<input type="checkbox"/>																	
Kupplung	<input type="checkbox"/>																	
Gehäuse	<input type="checkbox"/>																	
Kühlung	<input type="checkbox"/>																	
Korrosion	<input type="checkbox"/>																	
Verstopfen/Verzopfen	<input type="checkbox"/>																	
Verockerung	<input type="checkbox"/>																	
Spaltverschleiss	<input type="checkbox"/>																	
Rotor	<input type="checkbox"/>																	
Spaltrohr	<input type="checkbox"/>																	
Spalttopf	<input type="checkbox"/>																	
Sonstige (z.B. prozessbedingte Störungen):																		
	<input type="checkbox"/>																	

Teil 3: Nutzen von Überwachungssystemen

Frage 3.1: Welchen Nutzen erwarten Sie von einem Überwachungssystem an Pumpen, das von Ihrem Lieferanten angeboten wird?

Ordnen Sie den Nutzen nach Prioritäten von 1-5

- Erhöhung der technischen Verfügbarkeit
z.B.: - Schadensbegrenzung durch rechtzeitige Warnung
- Vermeidung von ungeplanten Produktionsausfällen

- Kostenreduktion / Effizienzsteigerung
z.B.: - geringe Ersatzteilkhaltung
- effektiverer, reduzierter Wartungseinsatz
- Verzicht auf Redundanz

- Risikominimierung
z.B. aus Sicherheitsgründen für:
- Mensch
- Umwelt
- Pumpe
- Prozesssicherheit
- andere Anlagenteile

- keinen Nutzen

- sonstiger Nutzen:

Frage 3.2: Fragen zu vorhandener Überwachungseinrichtung: Wurden Ihre Pumpen mit folgenden Überwachungseinrichtungen versehen?

	Wurde die Überwachungseinrichtung von Ihnen, einem Pumpenhersteller oder von einem Dritten erstellt?			Erfolgt die Messwertaufzeichnung on- oder offline?		Wenn offline: In welchen Zyklen werden die Daten erfasst?
	Eigen	Pumpenlieferant	Dritte	Online	Offline	Angaben bitte mit Zeiteinheiten [m,w,d,h,min]
Pumpe						
Temperaturüberwachung des Fördermedium						
Lager - Schwingungsüberwachung						
Drucküberwachung						
GLRD-Überwachung						
Niveauschalter Pumpe						
Motor						
Motor-Nennstrom						
Wicklungstemperatur						
Lagerüberwachung – Temperatur						
Lager - Schwingungsüberwachung						
Peripherie						
Motor - Schaltauslöser Schaltschrank						
Behälter Spülmittel GLRD						
Sperrdruck GLRD						

Frage 3.3: Für wie wichtig erachten Sie die Überwachung der folgenden Kriterien an Ihrer/n genannten Pumpe/n? Bitte fügen Sie weitere relevante Punkte hinzu!

1 – unwichtig... 5 – sehr wichtig

Kriterien/Gewichtung	5	4	3	2	1		5	4	3	2	1
Betriebsparameter						Gehäuse:					
Druckpulsation						Dichtkanten-Spaltverschleiß					
Drehzahl						Schwingungen					
Gasballast/Inertgassystem											
Leistungs-/Stromaufnahme											
						Antrieb:					
						Temperatur					
						Lager					
						Kupplung					
Betriebsmedium						Sonstige:					
Kavitation						Trockenlauf					
Gasmitförderung						Leckagen					
Betriebsmittelzustand						Urwucht					
Partikelbelastung						Blockade					
						Performance:					
						Wirkungsgrad					
Lager											
Schwingungen											
Temperatur											
Verschmutzung											
Bauteile (Funktion/Verschleiß):											
Rotor allgemein											
Laufrad											
Statische Dichtungen											
Getriebe											
Antrieb											
Wellenabdichtung											

Teil 4: Fragen zum Unternehmen und zur Person**Personenbezogene Daten des Ansprechpartners**

Ihre Angaben werden vertraulich behandelt und unterliegen dem Datenschutz.

Alternativ zum Ausfüllen des Rahmens können Sie Ihre Visitenkarte einkleben.

Firmenname:	_____
Firmenteil:	_____
Anschrift:	_____

Rufnummer:	_____

Name:	_____
Beruf:	_____
Stellung:	_____
Durchwahl:	_____
Arbeitsgebiet/-aufgabe:	_____

Anhang 2: Rücklauf der Befragung

Im Rahmen der Datenerhebung mittels der Betreiberumfrage wurden insgesamt 16 Unternehmen befragt. Dazu gehörten sowohl die Mitglieder des erweiterten Arbeitskreises als auch zwei Projektpartner.

Ausgefüllte Fragebögen wurden von 12 Unternehmen für die Auswertung übermittelt. Zusätzlich wurden Rohdaten – betreffend die Pumpenpopulationen und Schadensberichte der vergangenen Jahre – von fünf Befragten eingereicht. Lediglich drei der befragten Unternehmen konnten aus Kapazitätsgründen bis zum Abgabetermin keine Informationen übermitteln.

Der Rücklauf der Befragung wird nachfolgend dargelegt:

Rücklauf Teil 1: Pumpenpopulationen

Für die Auswertung der Frage 1.1 hinsichtlich Pumpentyp, Bauart und Dichtungsart wurden die Angaben von insgesamt 9 der befragten Unternehmen berücksichtigt. Aus der Zusammenfassung der Informationen ergab sich hierfür eine Datenbasis von 22.324 Pumpen.

Für die Auswertung der Frage 1.1 hinsichtlich Antriebsart wurden die Angaben von insgesamt 10 der befragten Unternehmen berücksichtigt. Hier ergab sich eine Datenbasis von 23.452 Pumpen.

Frage 1.1: Erfassung der Pumpentypen	
Für die Auswertung berücksichtigte Angaben von:	Anzahl der Pumpen:
Unternehmen 1	[601]*
Unternehmen 2	909
Unternehmen 3	613
Unternehmen 4	70
Unternehmen 5	16.400
Unternehmen 6	485
Unternehmen 7	Keine quantitativen Angaben
Unternehmen 8	Keine quantitativen Angaben
Unternehmen 9	160
Unternehmen 10	[1.128]**
Unternehmen 11	432
Unternehmen 12	428
Unternehmen 13	2.827
Summe Unternehmen:	Summe Pumpen:
10	22.324 [23.452]**
*	Angaben zur Pumpenpopulation wurden für die quantitative Auswertung (Frage 1.1 und 1.2) nicht verwendet, da keine repräsentativen Daten vorlagen.
**	Angaben zur Pumpenpopulation wurden nur zur Auswertung der Antriebskonzepte verwendet.

Für die Auswertung der Frage 1.2 hinsichtlich Pumpentyp und Hydraulikgröße wurden die Angaben von insgesamt 11 der befragten Unternehmen berücksichtigt. Aus der Zusammenfassung der Informationen ergab sich hier eine Datenbasis von 29.121 Pumpen.

Frage 1.2: Erfassung der Hydraulikgrößen	
Für die Auswertung berücksichtigte Angaben von:	Anzahl der Pumpen:
Unternehmen 1	[601]*
Unternehmen 2	909
Unternehmen 3	613
Unternehmen 4	78
Unternehmen 5	16.400
Unternehmen 6	120
Unternehmen 7	Keine quantitativen Angaben
Unternehmen 8	3.703
Unternehmen 9	160
Unternehmen 10	2.243
Unternehmen 11	432
Unternehmen 12	428
Unternehmen 13	4.035
Summe Unternehmen:	Summe Pumpen:
11	29.121
* Angaben zur Pumpenpopulation wurden für die quantitative Auswertung (Frage 1.1 und 1.2) nicht verwendet, da keine repräsentativen Daten vorlagen.	

Rücklauf Teil 2: Schadensursachen

Im zweiten Teil des Fragebogens wurden für jeweils drei ausgewählte Pumpen Informationen zu bestimmten Themengebieten abgefragt. Der Rücklauf an verwertbaren Informationen zu den einzelnen Themengebieten kann der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Teil 2: Schadensursachen		
Themengebiete:	Für die Auswertung berücksichtigte Angaben von:	
2.1 Inspektion und Wartung	11 Unternehmen	
2.2 Betriebsart	10 Unternehmen	
2.3 Fördermedium	8 Unternehmen	
2.4 Betriebsweise	8 Unternehmen	
2.5 Redundanz	10 Unternehmen	
2.6 Inspektions- und Wartungsintervalle	9 Unternehmen	
2.7 MTTR und MTBF	8 Unternehmen	
2.8 Prozessausfallzeiten	12 Unternehmen	
2.9 Schadensursachen/ Schwachstellen	11 Unternehmen	

Rücklauf Teil 3: Diagnosesysteme und Instrumentierung

Die im dritten Teil des Fragebogens abgefragten Themengebiete und der entsprechende Rücklauf an verwertbaren Informationen sind in der nachfolgenden Tabelle abgebildet.

Teil 3: Diagnosesysteme und Instrumentierung		
Themengebiete:		Für die Auswertung berücksichtigte Angaben von:
3.1	Nutzen von Diagnosesystemen	11 Unternehmen
3.2	Vorhandene Überwachungssysteme	12 Unternehmen
3.3	Bauteile und Ausfallursachen	11 Unternehmen

Anhang 3: Aktualisierte Ergebnisse der Betreiberumfrage

Im Dezember 2007 wurden die Ergebnisse der Betreiberumfrage aktualisiert, da zusätzliche Daten von einem Mitglied des erweiterten Arbeitskreises zur Verfügung gestellt wurden. Analog zu den Ausführungen in Kapitel 5.1.2 sind nachfolgend die entsprechend aktualisierten Diagramme dargestellt. Grundlage für die Arbeiten im ReMain-Projekt waren jedoch die in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Ergebnisse.

Teil 1: Pumpenpopulationen

Frage 1.1: Welche Pumpentypen sind in Ihrem Unternehmen im Einsatz?

Pumpentypen:

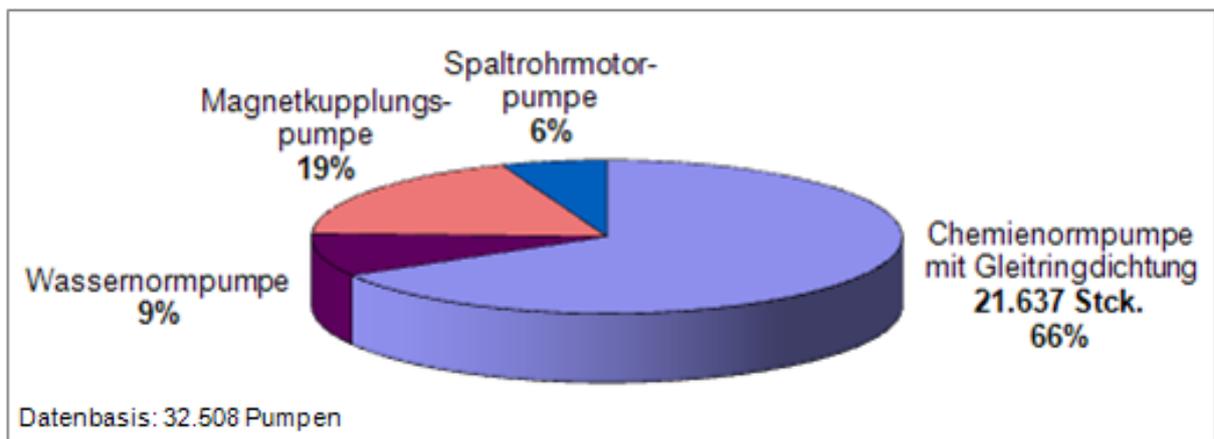


Abb. 128: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 1.1: Pumpentypen

Bauarten und Dichtungsarten:

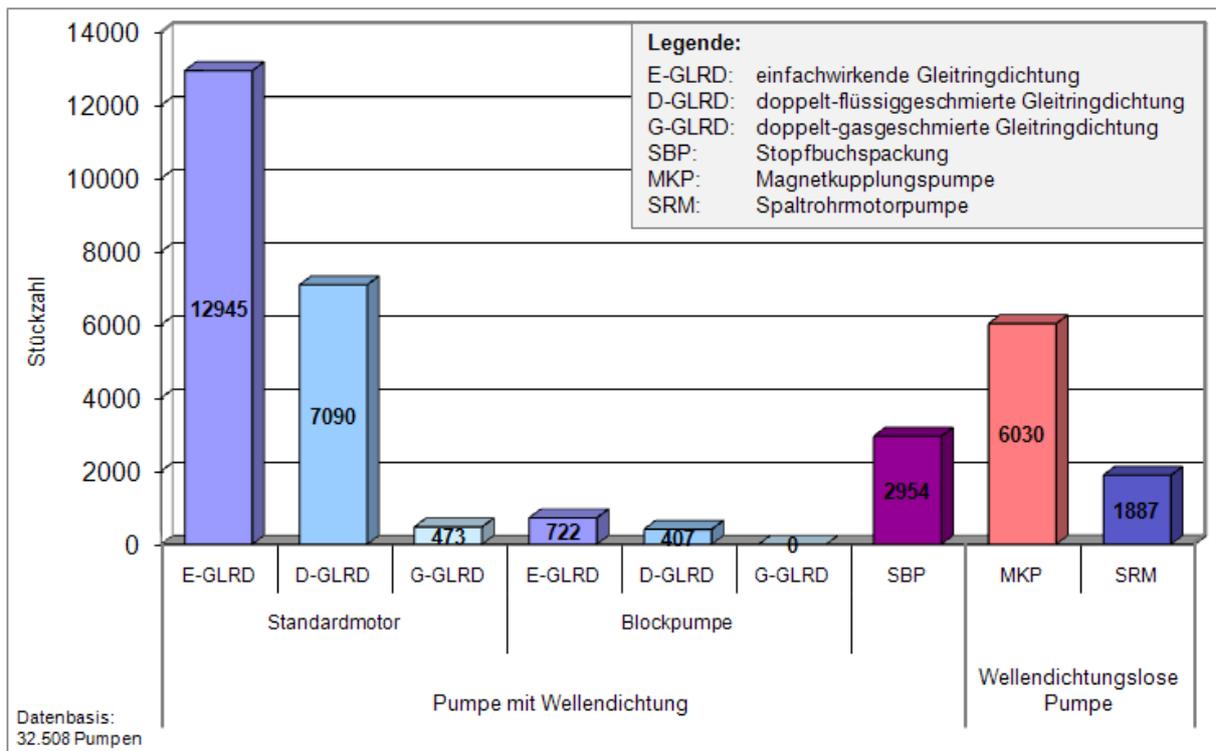


Abb. 129: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 1.1: Bauarten und Dichtungsarten

Antriebskonzepte:

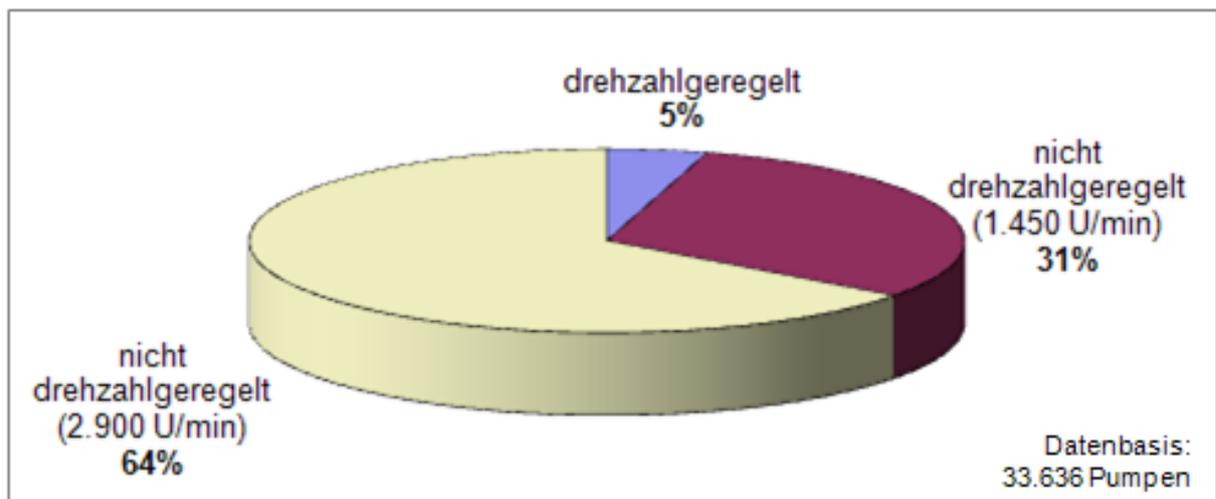


Abb. 130: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 1.1: Antriebskonzepte

Frage 1.2: Dimensionen Ihrer Pumpen: Hydraulik-Größen

Pumpentypen und Hydraulikgrößen:

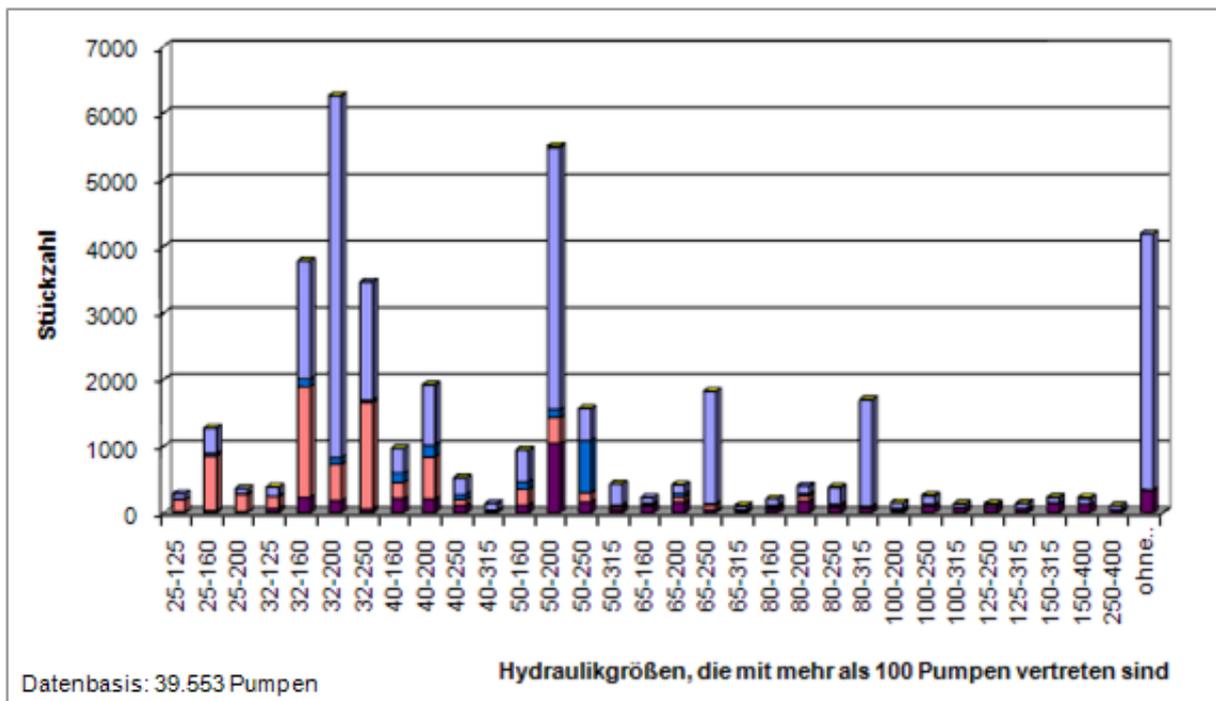
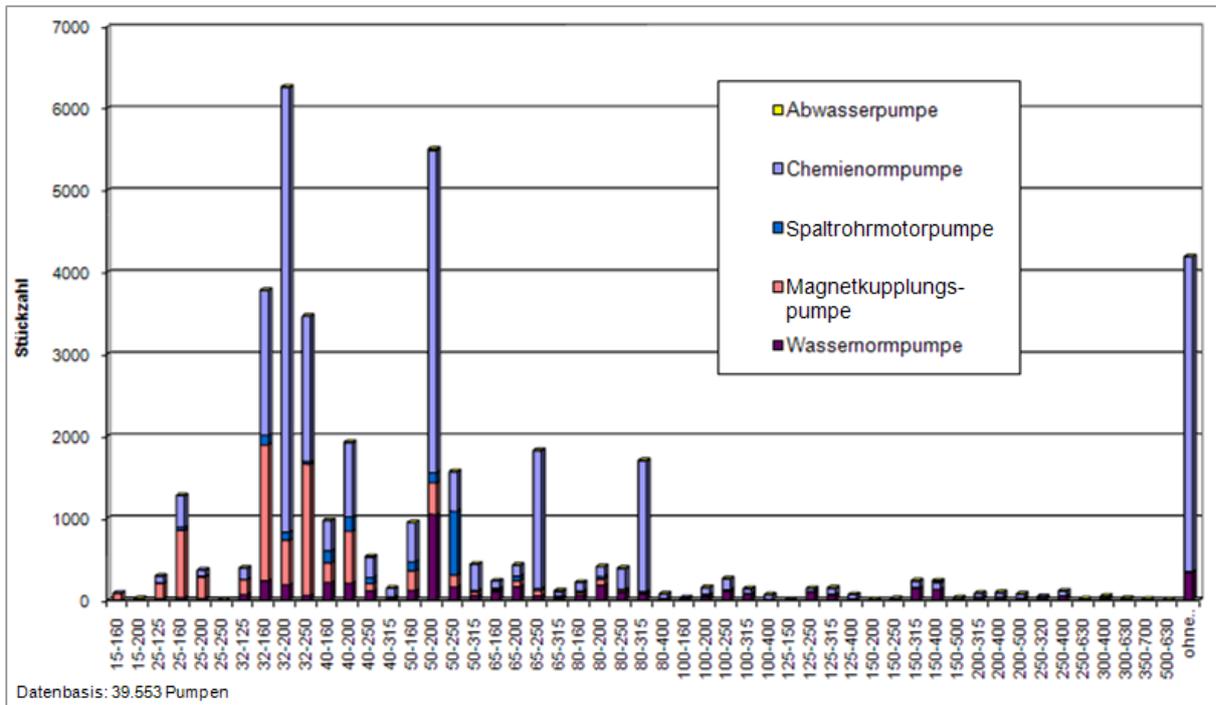


Abb. 131: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 1.2: Größenverteilung der Pumpentypen

Teil 2: Schadensursachen

Frage 2.1: Angaben zum Inspektions- und Wartungsprozess

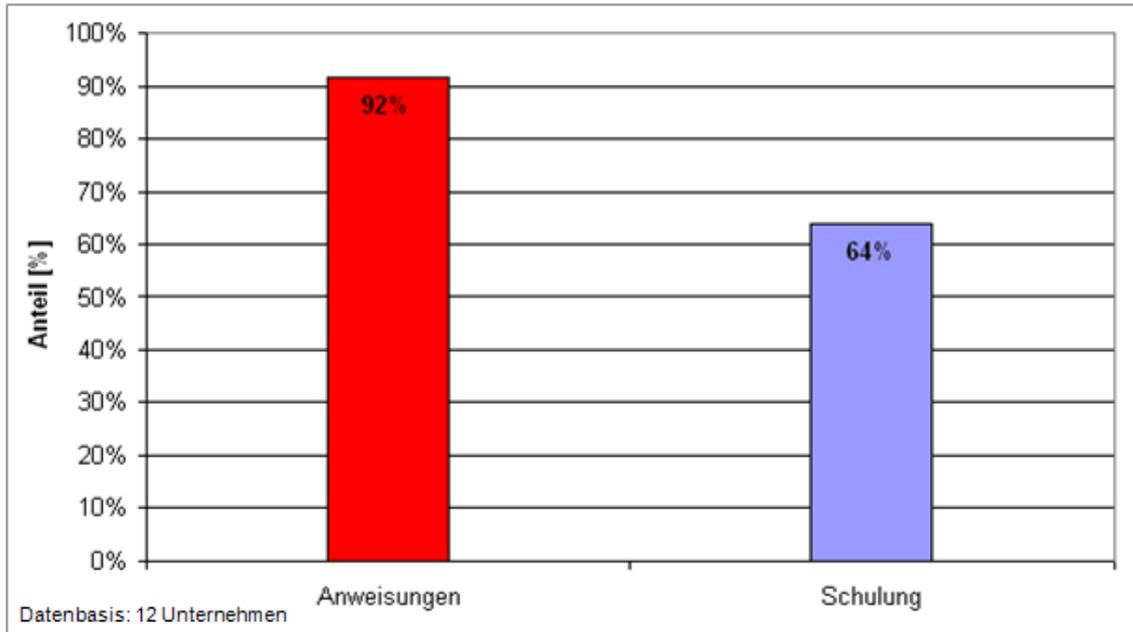


Abb. 132: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 2.1: Angaben zum Inspektions- und Wartungsprozess

Frage 2.2: Wie betreiben Sie die Pumpe vorwiegend und wie häufig wird sie eingeschaltet?

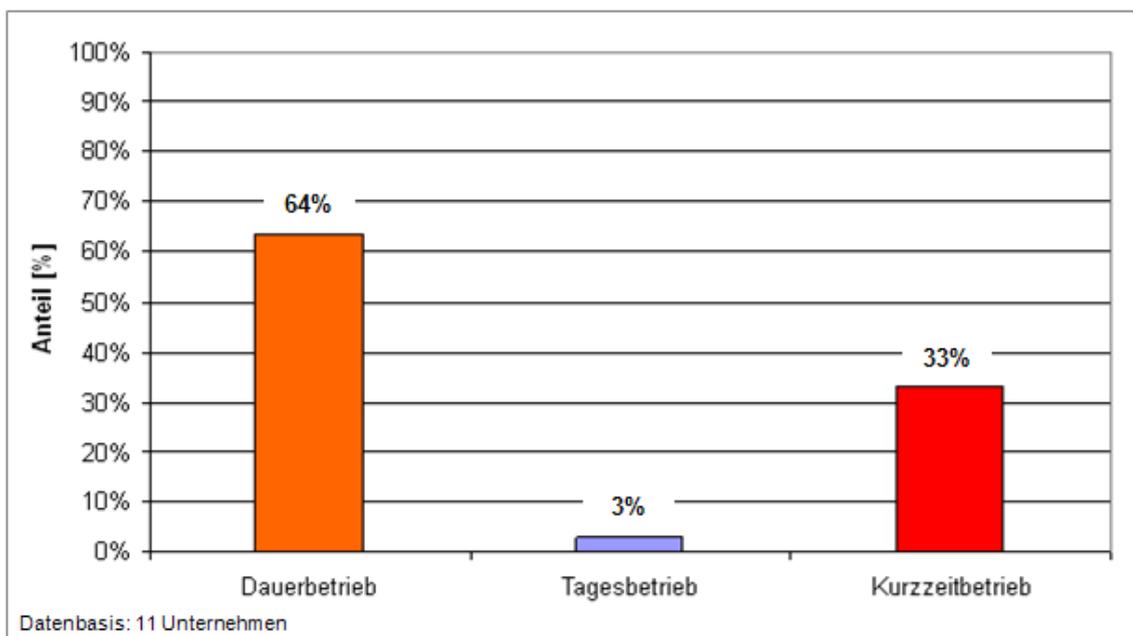


Abb. 133: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 2.2: Angaben zur Betriebsart

Frage 2.3: Angaben zum Fördermedium

Siehe Kapitel 5.1.2.2.

Frage 2.4: Angaben zur Betriebsweise der Pumpen

Siehe Kapitel 5.1.2.2.

Frage 2.5: Sind die Pumpen redundant ausgeführt?

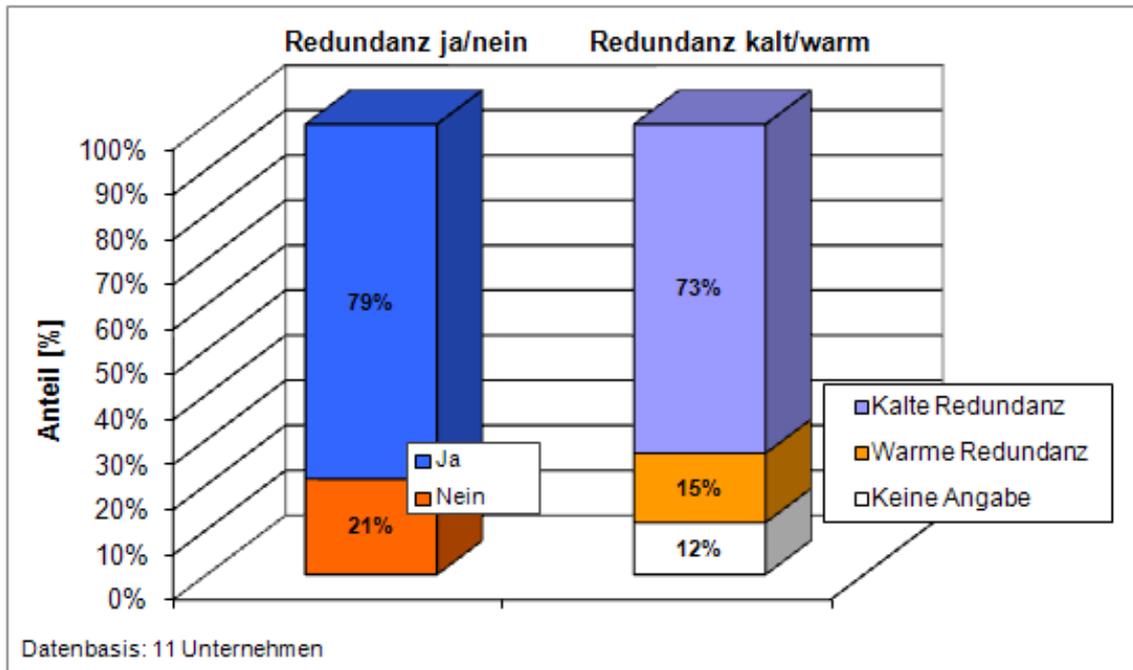


Abb. 134: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 2.5: Angaben zur Redundanz

Frage 2.6: Angaben zu Inspektions- und Wartungsintervallen: Wie hoch sind die Intervalle?

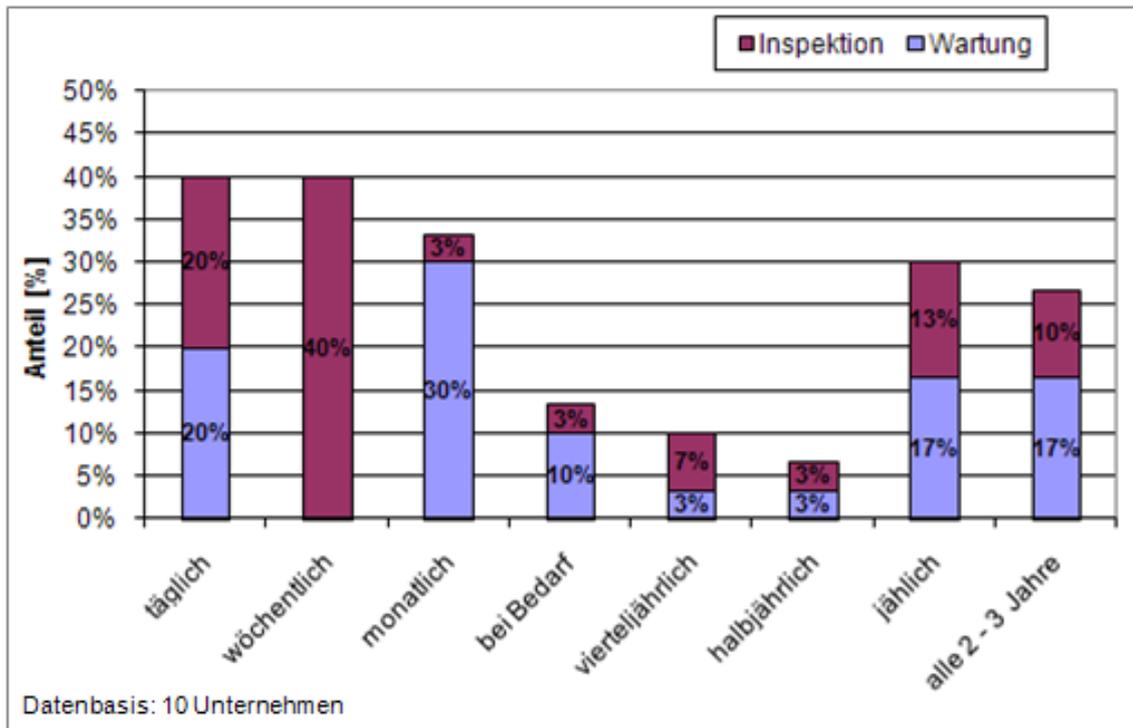


Abb. 135: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 2.6: Angaben zu Inspektions- und Wartungsintervallen

Frage 2.7: Angaben zu MTTR und MTBF

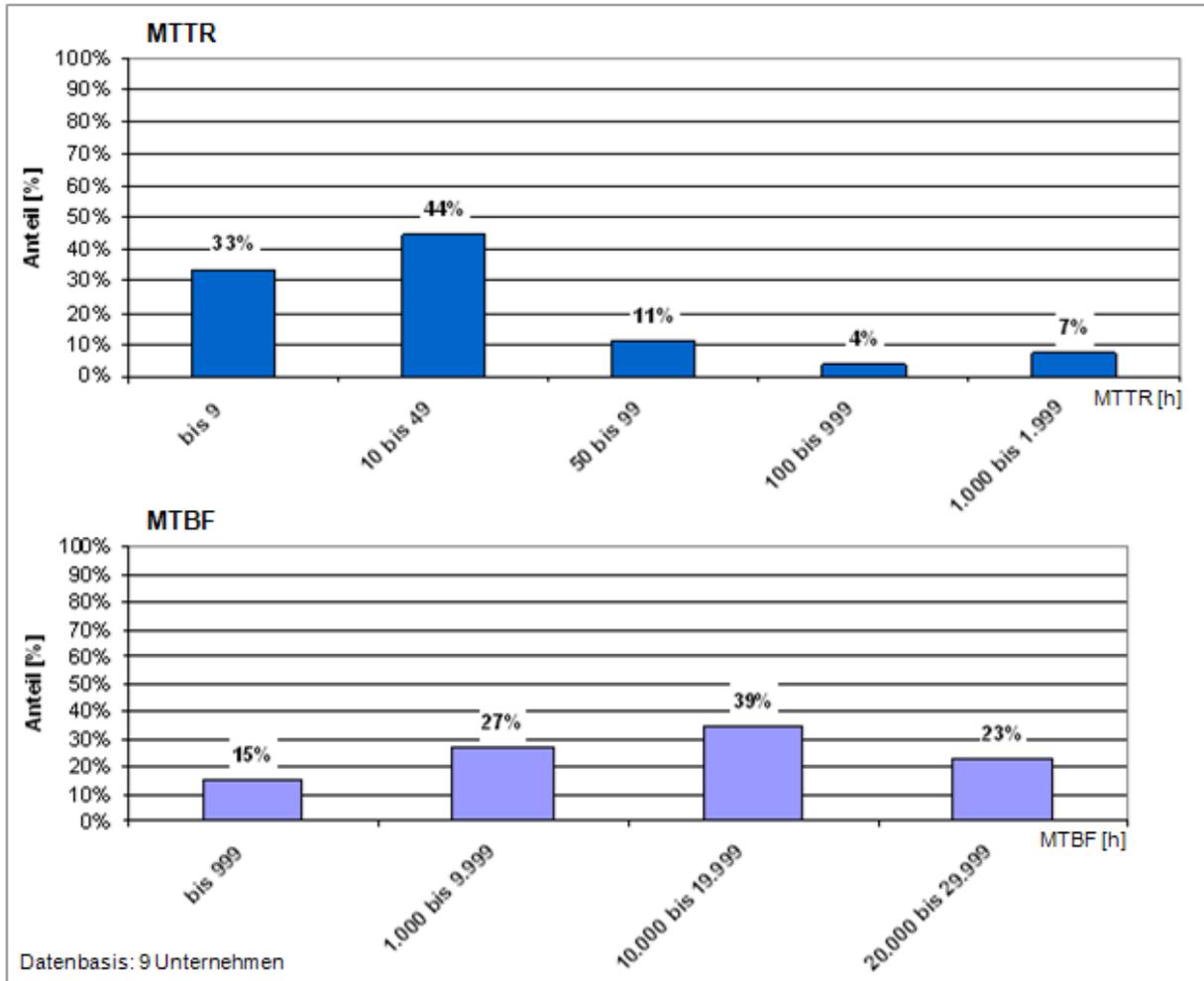


Abb. 136: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 2.7: Angaben zu MTTR und MTBF

Durch Zusammenfassung der Angaben wurden folgende Durchschnittswerte berechnet:

- MTTR = 17* Stunden
- MTBF = 10.000* Stunden

* Bei der Berechnung der Durchschnittswerte wurden die repräsentativen Angaben berücksichtigt.

Frage 2.8: Wie hoch sind die mittleren Prozessausfallzeiten?

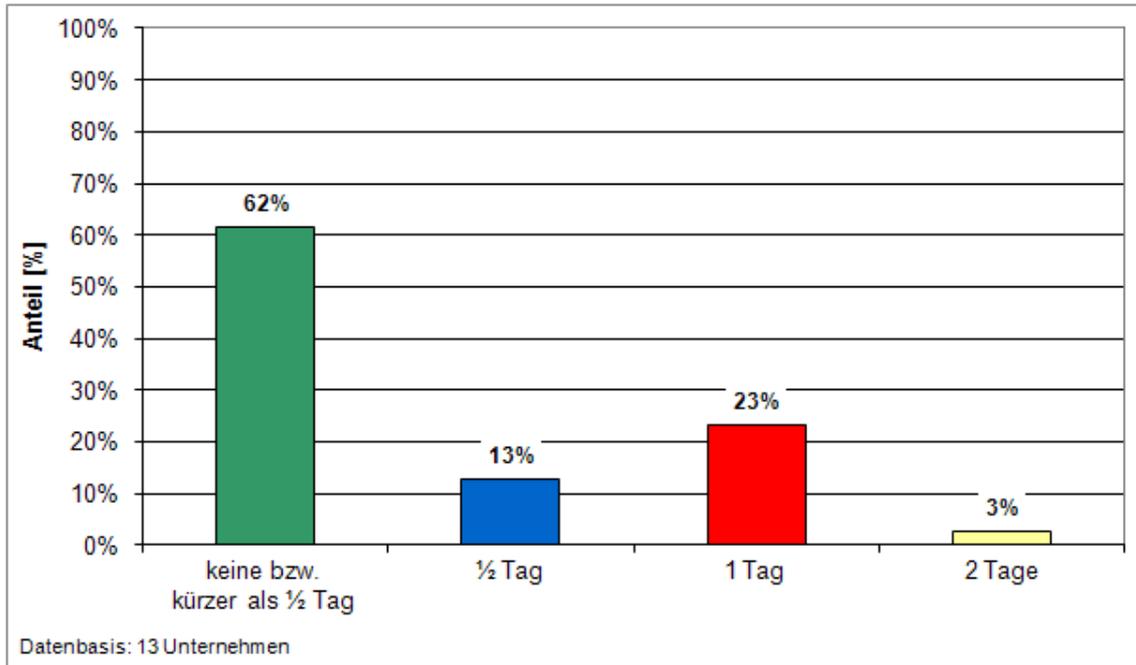


Abb. 137: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 2.8: Angaben zu Prozessausfallzeiten

Frage 2.9: Wie häufig stellen Sie die genannten Schadensursachen/Schwachstellen an Ihren Pumpen fest?

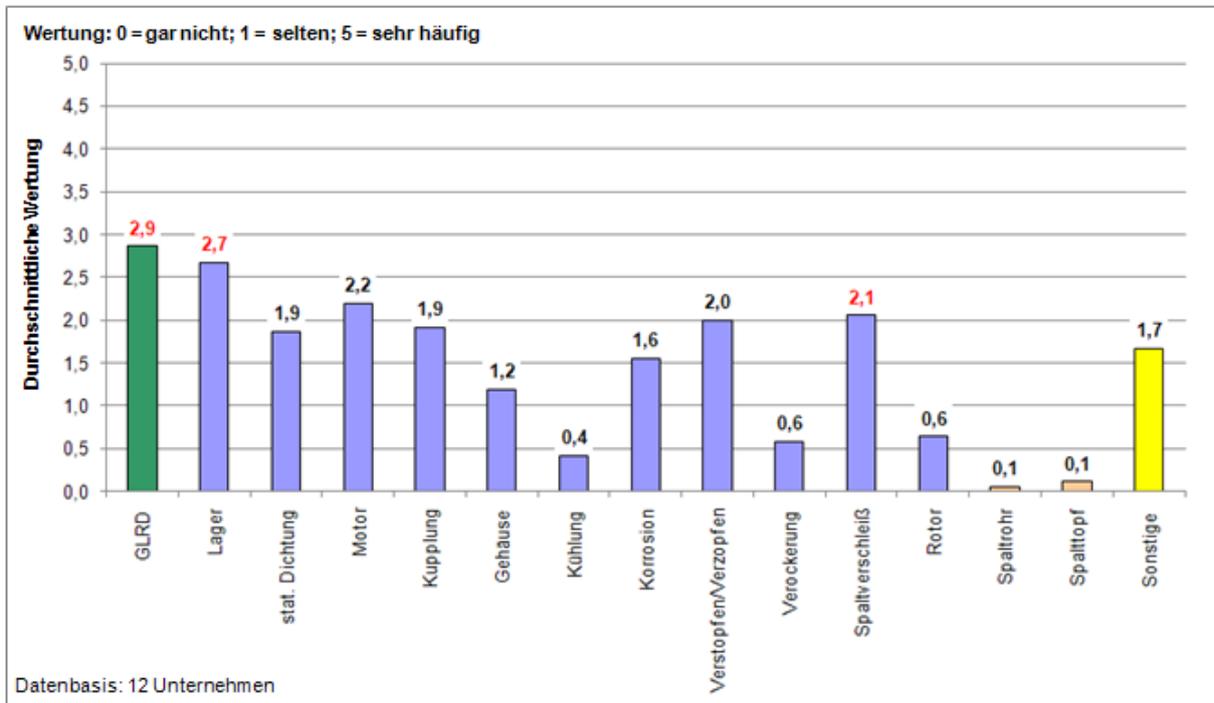


Abb. 138: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 2.9: Angaben zu Schadensursachen und Schwachstellen

Teil 3: Diagnosesysteme und Instrumentierung

Frage 3.1: Welchen Nutzen erwarten Sie von einem Überwachungssystem an Pumpen, das von Ihrem Lieferanten angeboten wird?

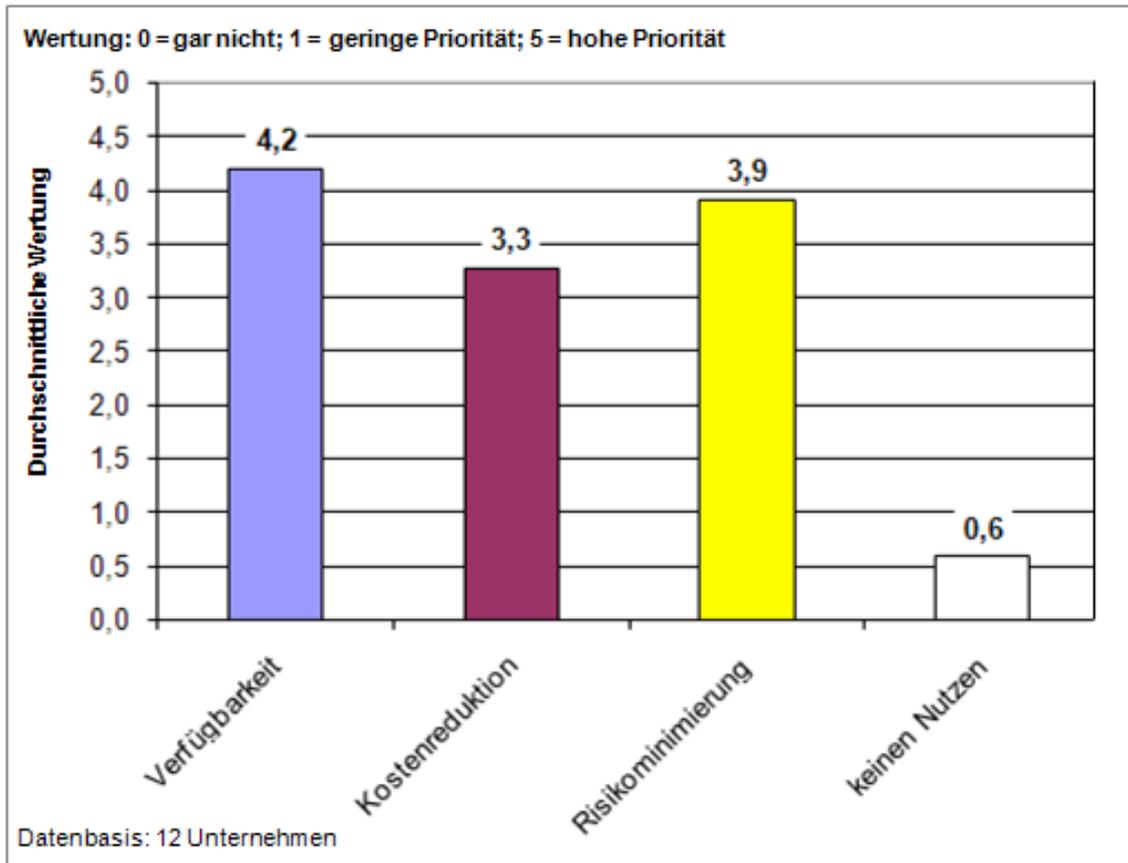


Abb. 139: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 3.1: Angaben zum Nutzen von Überwachungssystemen

Frage 3.2: Wurden Ihre Pumpen mit folgenden Überwachungseinrichtungen versehen?

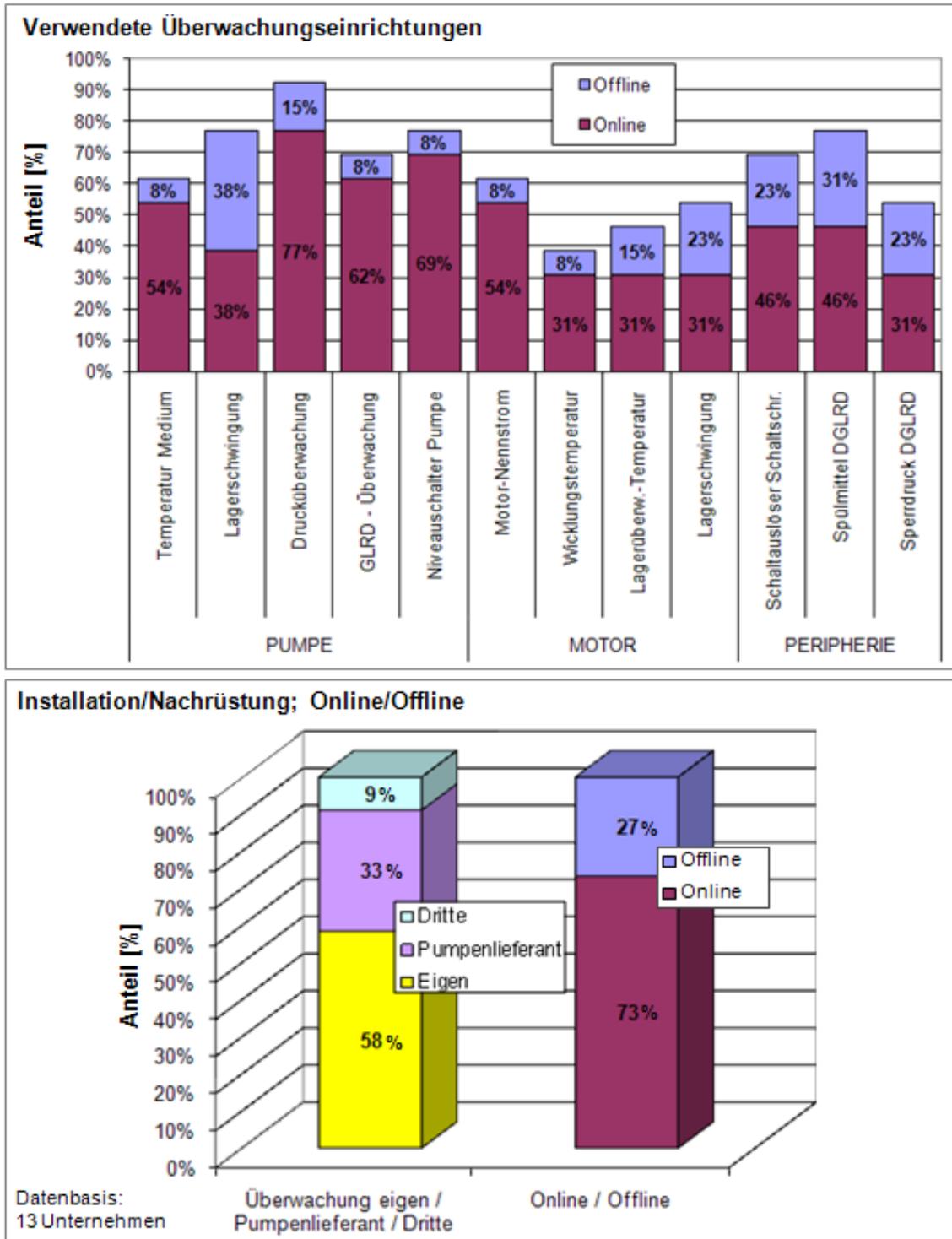


Abb. 140: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 3.2: Angaben zu vorhandenen Überwachungssystemen

Frage 3.3.1: Für wie wichtig erachten Sie die Überwachung der folgenden Bauteile an Ihren Pumpen?

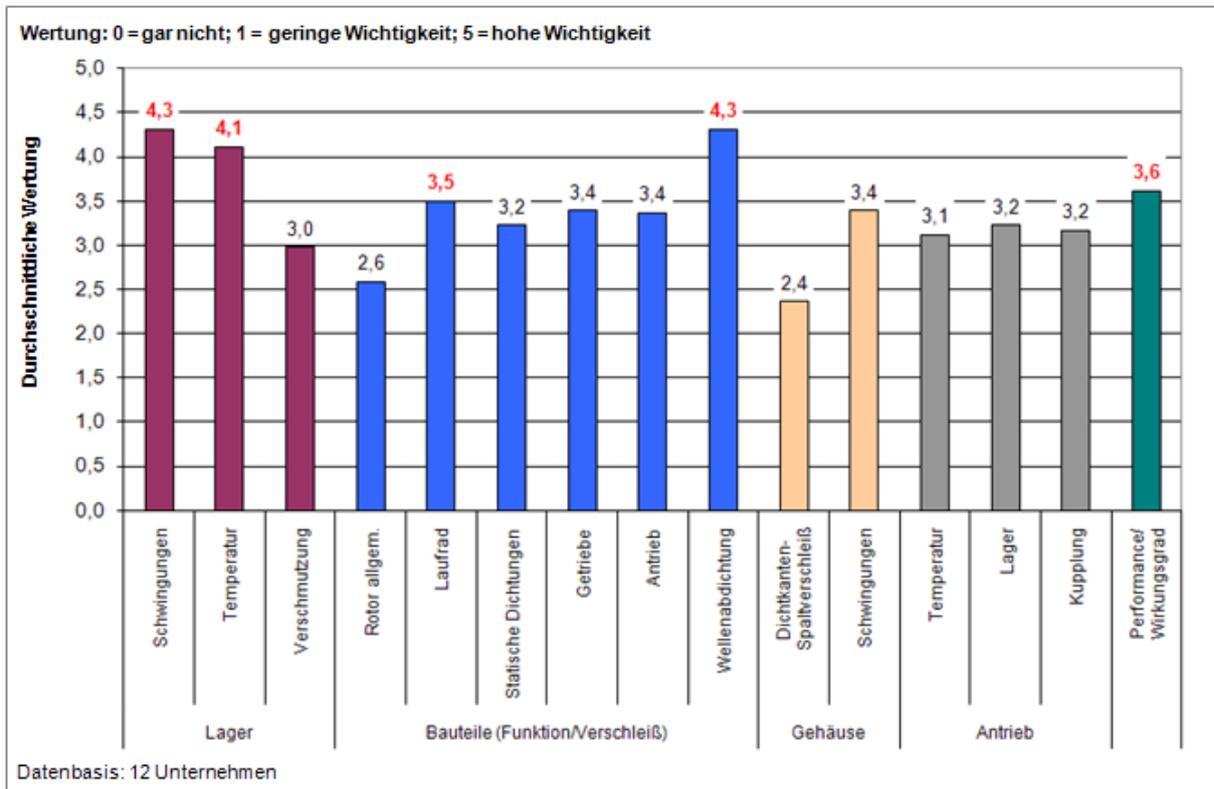


Abb. 141: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 3.3.1: Angaben zu überwachungsrelevanten Bauteilen

Frage 3.3.2: Für wie wichtig erachten Sie die Überwachung der folgenden Ausfallursachen an Ihren Pumpen?

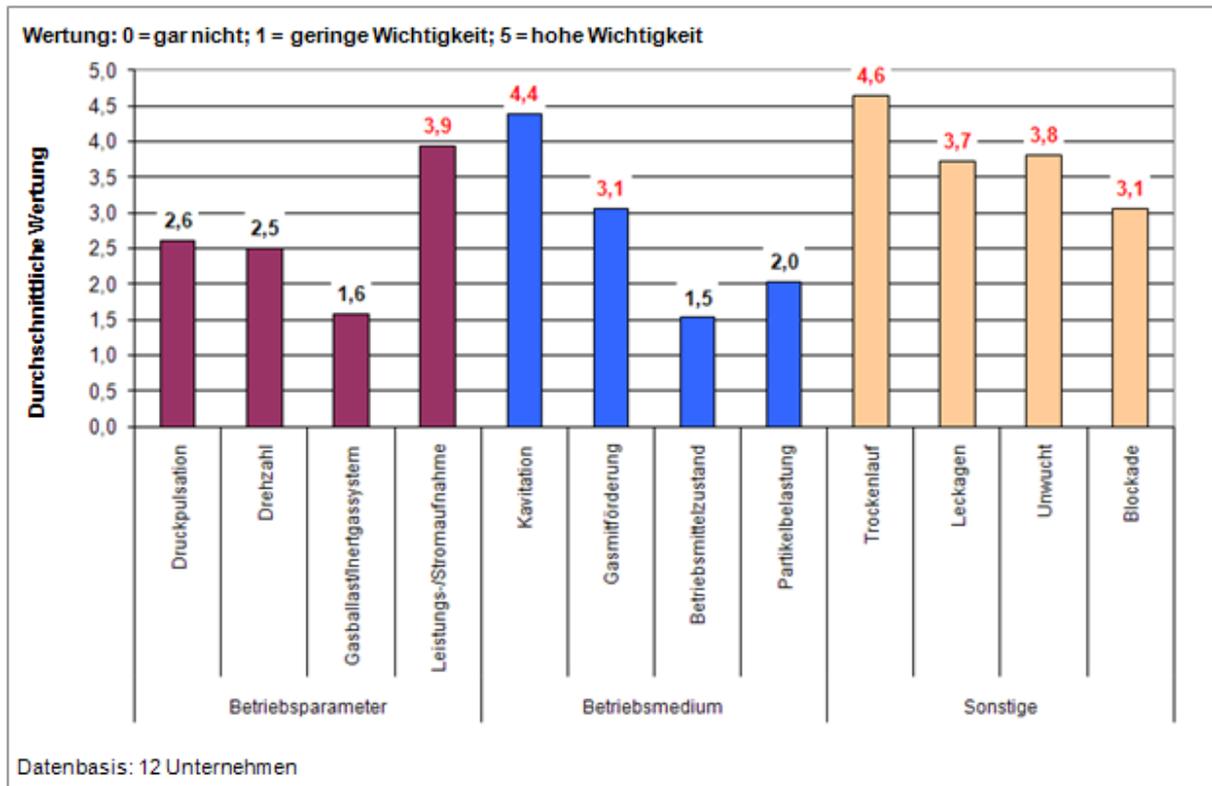


Abb. 142: Betreiberumfrage aktualisiert, Frage 3.3.2: Angaben zu überwachungsrelevanten Ausfallursachen

Anhang 4: Plausibilitätsprüfung

Projekt Remain

Plausibilitätsprüfung der Sensormesswerte

Möglichkeiten der Plausibilitätsprüfung für die Prozessgrößen, die in der Tabelle prozess_measurement erfasst werden:

Verwendete Abkürzungen nach DIN EN 12723:

Volumenstrom (Förderstrom)	Q	Messwert
maximaler Volumenstrom der entsprechenden Pumpe gemäß techn. Angaben	Q_{\max}	vorgegeben
Pumpen-Austrittsdruck	p_2	Messwert
maximal von der Pumpe erzeugter Druck gemäß techn. Angaben	$p_{2\max}$	vorgegeben
Pumpen-Eintrittsdruck	p_1	Messwert
Leistungsaufnahme des Motors (entspricht der elektrischen Wirkleistung)	P_{mot}	Messwert
Nenn-Leistung des Motors	P_N	vorgegeben
hydraulische Leistung	P_h	errechnet aus Messwerten
maximaler hydraulischer Wirkungsgrad	$\eta_{\text{hmax}} = 0.8$	gewählt
minimaler Aggregatwirkungsgrad	$\eta_{\text{grmin}} = 0.3$	gewählt
vorhandener Aggregatwirkungsgrad	η_{gr}	errechnet aus den Messwerten
Motor-Wirkungsgrad	η_{mot}	vorgegeben
Temperatur	θ	Messwert
maximal zulässige Temperatur für die entsprechende Pumpe gemäß Pumpenliste	θ_{\max}	vorgegeben
minimal zulässige Temperatur für die entsprechende Pumpe gemäß Pumpenliste	θ_{\min}	vorgegeben

Bemerkung: es wird nach absoluten und relativen Druckmesssensoren unterschieden!

Überprüfungsmöglichkeiten, basierend auf physikalischen und/oder technischen Grenzen für den einzelnen Sensor

1. Pumpen-Austrittsdruck p_2

- muss kleiner als der maximale Druck der entsprechenden Pumpe sein
 $[p_2 < p_{2max}]$
- muss größer als 0 bar (absolut) bzw. -1 bar (relativ) sein
 $[p_2 > 0 \text{ bar}]$ (absolut)
 $[p_2 > -1 \text{ bar}]$ (relativ)

Hieraus lässt sich für die Plausibilitätsprüfung folgende Bedingung ableiten:

$$[0 \text{ bar} < p_d < p_{max}] \text{ bzw. } [-1 \text{ bar} < p_d < p_{max}]$$

2. Pumpen-Eintrittsdruck p_1

- muss größer als 0 bar (absolut) bzw. -1 bar (relativ) sein
 $[0 \text{ bar} < p_1]$ (absolut)
 $[-1 \text{ bar} < p_1]$ (relativ)
- kann nicht größer als der Pumpen-Austrittsdruck sein
 $[p_1 \leq p_2]$

Die Bedingung lautet dann:

$$[0 \text{ bar} < p_1 \leq p_2] \text{ bzw. } [-1 \text{ bar} < p_1 \leq p_2]$$

3. Volumenstrom Q

- kann nicht negativ sein
 $[0 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \leq Q]$
- kann nicht größer als der maximale Volumenstrom der entsprechenden Pumpe sein
 $[Q \leq Q_{max}]$

Die Bedingung lautet dann:

$$[0 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \leq Q \leq Q_{max}]$$

4. vom Motor aufgenommene Leistung P_{mot} (entspricht der elektrischen Wirkleistung)

- kann nicht negativ sein
 $[0 \text{ W} \leq P_{\text{mot}}]$
- kann im normalen Betrieb nicht größer als das 1.2 fache der Nennleistungsaufnahme sein
 $[P_{\text{mot}} < \frac{1.2}{\eta_{\text{mot}}} * P_N]$

Die Bedingung lautet dann:

$$[0 \text{ W} \leq P_{\text{mot}} < \frac{1.2}{\eta_{\text{mot}}} * P_N]$$

- Für Anfahrvorgänge wird die folgende Bedingung formuliert

$$[P_{\text{mot}} < \frac{\theta}{\eta_{\text{mot}}} * P_N]$$

Wegen des Messintervalls von 10 s dürfen jedoch keine zwei aufeinanderfolgenden Messwerte im Intervall $[\frac{1.2}{\eta_{\text{mot}}} * P_N < P_{\text{mot}} < \frac{\theta}{\eta_{\text{mot}}} * P_N]$ liegen, da ein Anfahrvorgang keine 10 s dauert.

5. Temperatur θ

- kann nicht niedriger sein als die minimal zulässige Prozesstemperatur (nur sinnvoll sofern die Prozesstemperatur relevante Grenzen hat)
 $[\theta_{\text{min}} \leq \theta]$
- kann nicht größer sein als die maximal zulässige Prozesstemperatur
 $[\theta \leq \theta_{\text{max}}]$

Die Bedingung lautet dann:

$$[\theta_{\text{min}} \leq \theta \leq \theta_{\text{max}}]$$

Überprüfungsmöglichkeiten, anhand voneinander abhängiger Größen

6. Kennlinie

- Die aus den Messwerten berechnete Förderhöhe H und der Förderstrom Q dürfen als Wertepaar eine vorgegebene Abweichung von der Kennlinie der entsprechenden Pumpe nicht überschreiten.

Hieraus lässt sich für die Plausibilitätsprüfung folgende Bedingung ableiten:

$$[(H, \dot{V}) \in [\text{Kennlinie} + \text{zul. Abweichung}]]$$

7. Pumpen-Austrittsdruck p_2 , Volumenstrom Q , Motor-Leistungsaufnahme P_{mot}

Im Folgenden wird eine Fallunterscheidung in die Zustände >>Pumpe läuft<< und >>Pumpe steht<< getroffen

Fall I: >>Pumpe läuft<<, wenn

- Die Leistungsaufnahme größer als 5% der Nenn-Leistungsaufnahme ist

$$[P_{\text{mot}} > \frac{0.05}{\eta_{\text{mot}}} * P_N]$$

- Der Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit größer als 0.5 mm/s ist

$$[v_{\text{eff}} > 0.5 \frac{\text{mm}}{\text{s}}]$$

Fall II: >>Pumpe steht<<, wenn

- Die Leistungsaufnahme kleiner als 5% der Nenn-Leistungsaufnahme ist

$$[P_{\text{mot}} > \frac{0.05}{\eta_{\text{mot}}} * P_N]$$

- Der Effektivwert der Schwinggeschwindigkeit kleiner als 1 mm/s ist

$$[v_{\text{eff}} > 1 \frac{\text{mm}}{\text{s}}]$$

Bem.: wenn aus dem PIMS die Information, ob die Pumpe steht oder läuft, verfügbar ist werden die oben formulierten Bedingungen zur Überprüfung der PIMS Information genutzt.

Fall I liegt vor:

- Der Volumenstrom und die Förderhöhe müssen größer als 10% ihres Nennwertes sein
 $[Q > 0.1 * Q_N \text{ und } H > 0.1 * H_N]$
- Dann muss der Pumpen-Austrittsdruck größer 0 (absolut) bzw. größer -1 (relativ) sein
 $[Fall\ 1 \rightarrow p_2 > 0]$ (absolut)
 $[Fall\ 1 \rightarrow p_2 > -1]$ (relativ)
- Die hydraulische Leistung kann nicht größer sein als die mechanische Wellenleistung gewertet mit dem maximalen hydraulischen Wirkungsgrad
 $[P_h < \eta_{h\text{max}} * (P_{\text{mot}} * \eta_{\text{motor}})]$ mit $\eta_{h\text{max}} = 0.8$
- Dann muss der Aggregatwirkungsgrad größer als der minimale Aggregatwirkungsgrad sein
 $[\eta_{\text{gr}} = \frac{P_h}{P_{\text{mot}}} > \eta_{\text{grmin}}]$ mit $\eta_{\text{grmin}} = 0.3$

Fall II liegt vor:

- Der Volumenstrom und die Förderhöhe müssen kleiner als 10% ihres Nennwertes sein
 $[Q < 0.1 * Q_n \text{ und } H < 0.1 * H_n]$

- Dann muss der Aggregatwirkungsgrad kleiner als der minimale Aggregatwirkungsgrad sein

$$[\eta_{gr} = \frac{P_h}{P_{mot}} < \eta_{grmin}] \text{ mit } \eta_{grmin} = 0.3$$

9. Octavis-Sensor

- Ist die Motor-Leistungsaufnahme größer als 5% der Nenn-Leistungsaufnahme, so muss die vom Octavis-Sensor gemessene effektiv Schwinggeschwindigkeit größer als 0.5 mm/s sein

$$[P_{mot} > \frac{0.05}{\eta_{mot}} * P_N \rightarrow v_{eff} > 0,5 \text{mm/s}]$$