

Entwicklung eines wissensbasierten Systems zur wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung der Minimalmengenschmierung bei der Planung flexibler Fertigungssysteme

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Josep M. Grebner

aus Barcelona, Spanien

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche

Tag der Einreichung: 04.05.2016

Tag der mündlichen Prüfung: 18.10.2016

Darmstadt 2017

D17

Vorwort des Herausgebers

Im Dezember 2015 legte die internationale Staatengemeinschaft auf der Klimakonferenz einen Grundstein für die zukünftige weltweite Umweltpolitik. Durch die gemeinsame Verpflichtung zur Einhaltung einer festgelegten Obergrenze der Erderwärmung stellt sie sich einer der großen Herausforderungen unserer Zeit: Förderung ökologischer Nachhaltigkeit zur Abwendung der drohenden Veränderung des Weltklimas und seinen Folgen.

Diese Entwicklung schlägt sich auch in den Auftragsbüchern der deutschen Industrie nieder: Mit steigender Relevanz ökologischer Nachhaltigkeit erfahren ressourceneffiziente Produkte und Prozesse eine stetig steigende Nachfrage. Der Bereich der Metallbearbeitung bietet zahlreiche Ansätze zur Hebung von Effizienzpotenzialen. In diesem Kontext gewinnt die bereits seit Mitte der Neunzigerjahre erforschte Minimalmengenschmierung zunehmend an Bedeutung. Manager und Fabrikplaner stehen der vergleichsweise neuen Technologie allerdings skeptisch gegenüber – zu unberechenbar sind die fallspezifische Umsetzbarkeit sowie ihre ökologischen und monetären Vorteile angesichts der derzeitigen Faktenlage.

In der vorliegenden Arbeit wurde diese Problemstellung aufgegriffen. Am Beispiel der spanenden Fertigung in der Automobilindustrie wurde eine Methode entwickelt, um den Einsatz der Minimalmengenschmierung ökologisch und wirtschaftlich zu bewerten und seine Umsetzbarkeit zu beurteilen. Der Ansatz basiert auf der strukturierten Unterteilung flexibler Fertigungssysteme in ihre Elemente und der Identifikation jener Systemelemente, die von einer Einführung der Minimalmengenschmierungstechnologie betroffen sind. Für den Einsatz in den Phasen der Fertigungssystem- und Technologieplanung ist eine Softwarelösung entwickelt worden. Sie bietet demnach eine Bandbreite an Bewertungsmöglichkeiten von einzelnen Werkstückfeatures bis hin zu kompletten Fertigungshallen. Neben den Kosten werden die vom europäischen Gemeinschaftssystem für das freiwillige Umweltmanagement empfohlenen Umweltkenngrößen für Energie, Wasser, Abfälle und Fläche herangezogen. Die Bewertung erfolgt als Differenzbetrachtung im Vergleich zu herkömmlichen Kühlschmierungsstrategien.

Die ökologischen und ökonomischen Vorteile der Minimalmengenschmierung konnten anhand einer Fallstudie für Szenarien mit gering oder nicht ausgeprägter Bestandsinfrastruktur aufgezeigt werden. Angesichts des Einflusses von Werkstückvorgaben und vorhandenen Strukturen bietet sich eine fallspezifische Betrachtung auf Basis der vorgeschlagenen Methode an.

Darmstadt, im Dezember 2016

Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als externer Doktorand am Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW) der Technischen Universität Darmstadt in enger Kooperation mit der BMW Group.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele, dem Leiter des Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche, dem Leiter des Instituts für Produktionstechnik und Umformmaschinen der Technischen Universität Darmstadt, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Auf Seiten der BMW Group gilt mein besonderer Dank Herrn Ronald Sondermeier für die fachliche Betreuung dieser Arbeit, Herrn Johann Kratzer, der die Anregung zu dieser Arbeit gab und sie stets unterstützte, Herrn Dr.-Ing. Adam Wissmann und Herrn Florian Ertle für ihre intensive Unterstützung bei der Umsetzung meines Pilotversuchs sowie Herrn Dr.-Ing. Julien Hohenstein für seine wertvollen Hinweise und die zahlreichen fachlichen Diskussionen. Meinem ehemaligen Gruppenleiter Herrn Dr.-Ing. Tilman Friedrich danke ich dafür, dass er mir für das nebenberufliche Verfassen meiner Dissertation den nötigen Freiraum gewährt hat.

Für die aufmerksame, gründliche und zeitintensive Durchsicht danke ich herzlich meiner Verlobten Carolin Dolata, meinem Vater Norbert Grebner sowie meinem langjährigem Freund Jochen Hellener: Danke für euer ehrliches Feedback!

Darüber hinaus bedanke ich mich bei meinen zahlreichen Kollegen, Diplomanden und Praktikanten im Bereich Produktion Antrieb der BMW Group, meinen Kollegen und wissenschaftlichen Hilfskräften am PTW sowie meinen Projektpartnern für die Unterstützung bei der Entwicklung des vorliegenden Lösungsansatzes. Meinen Kollegen im Promotionsprogramm der BMW Group danke ich besonders für zahlreiche fachliche Diskussionen und ihre hilfreichen Anregungen.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, der ich diese Arbeit widme: Meiner Schwester Lara, die mir mit Ihrer Lebensfreude ein großes Vorbild ist. Meinen Großeltern Felicia, José, Leni und Alois sowie meiner Patentante Lilia für Ihre Unterstützung und den Glauben, den Sie in mich setzen und gesetzt haben. Ganz besonders bedanke ich mich bei meinen Eltern Angela und Norbert: Sie haben mir meine Ausbildung ermöglicht und mich auf dem Weg zur Promotion stets ermutigt und unterstützt.

Herzlicher Dank gilt meiner Verlobten Carolin, die neben der Durchsicht meiner Arbeit viel Verständnis und Geduld aufgebracht hat und mir auch in schwierigen Zeiten zur Seite stand.

Nicht zuletzt möchte ich meinen Freunden danken, die mich in meinem Vorhaben bestärkt und es währenddessen mit mir ausgehalten haben. Danke, dass ich mich stets auf euch verlassen kann!

München, im Dezember 2016

Josep M. Grebner

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Problemdefinition, Zielsetzung und Anforderungen an den Lösungsansatz	3
2.1	Problemdefinition und Zielsetzung.....	3
2.2	Darstellung und Abgrenzung des Betrachtungsrahmens	3
2.3	Anforderungen an den Lösungsansatz und Ableitung der Forschungsfragen.....	6
3	Einsatz von MMS in flexiblen Fertigungssystemen für Aluminiumbauteile	9
3.1	Kühlung und Schmierung im Zerspanungsprozess	9
3.1.1	Arten von KSS	10
3.1.2	Einsatz von KSS in der zerspanenden Metallbearbeitung.....	11
3.2	Abgrenzung von Nass-, MMS- und Trockenbearbeitung	11
3.2.1	Nassbearbeitung.....	12
3.2.2	Trockenbearbeitung	13
3.2.3	MMS	14
3.2.4	Gegenüberstellung der vorgestellten Kühlschmierstrategien	16
3.2.5	Anwendungsgebiete der MMS bei spanender Bearbeitung von Aluminiumwerkstoffen.....	18
3.3	Einfluss der Werkstoffeigenschaften von Aluminiumgusslegierungen auf den Zerspanprozess mit MMS	20
3.4	Anforderungen flexibler Fertigungssysteme für Aluminiumbauteile an den Einsatz der MMS	22
4	Wissensbasierte Systeme in der Neuplanung spanender Fertigungssysteme	27
4.1	Grundlagen des Wissensmanagements.....	27
4.1.1	Begriffe.....	27
4.1.2	Zentrale Ansätze	29
4.2	Wissensrepräsentationsmethoden zur Modellierung wissensbasierter Systeme	32
4.2.1	Prädikatenlogik	33
4.2.2	Regelbasierte Systeme	33
4.2.3	Semantische Technologien	34
4.2.4	Fallbasiertes Schließen	34
4.2.5	Fuzzy-Theorie.....	35
4.2.6	Künstliche neuronale Netze.....	36
4.2.7	Evolutionäre Algorithmen	37

4.3	Wissensbasierte Systeme im Produktionsumfeld	38
4.3.1	Lösungsansätze für die Fabrikplanung	39
4.3.2	Lösungsansätze für die Fertigungssystemplanung	40
4.3.3	Lösungsansätze für die Technologieplanung	41
4.3.4	Lösungsansätze für den Produktionsbetrieb	42
4.4	Zwischenfazit.....	43
5	Experimentelle Untersuchung des Einsatzes von MMS in flexiblen Fertigungssystemen	47
5.1	Analyse der Werkstückeignung hinsichtlich des Einsatzes von Minimalmengenschmierung	47
5.1.1	Identifikation entscheidungsrelevanter Parameter.....	48
5.1.2	Ableitung zu untersuchender entscheidungsrelevanter Bearbeitungsfeatures.....	53
5.1.3	Experimentelle Untersuchung entscheidungsrelevanter Bearbeitungsfeatures.....	56
5.2	Analyse flexibler Fertigungssysteme für Aluminiumbauteile mit herkömmlicher Kühlschmierstrategie.....	79
5.2.1	Struktur und Systemelemente	80
5.2.2	Energiebedarf.....	86
5.2.3	Lebenszykluskosten	98
5.3	Integrationsmöglichkeiten der Minimalmengenschmierung in flexible Fertigungssysteme für Aluminiumbauteile und Bewertung der Auswirkungen.....	102
5.3.1	Erforderliche Anpassungen an FFS-Struktur und Systemelementen	102
5.3.2	Bewertung der Auswirkungen auf Energiebedarf und Lebenszykluskosten des FFS.....	108
6	Entwicklung eines wissensbasierten Systems zur wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung der MMS in der Planung flexibler Fertigungssysteme	115
6.1	Auswahl geeigneter Methoden des Wissensmanagements	115
6.1.1	Konkretisierung der Systemumgebung	115
6.1.2	Auswahlkriterien.....	116
6.1.3	Gegenüberstellung der Methoden und Auswahl geeigneter Ansätze.....	117
6.2	Ableitung des Systemmodells.....	119
6.2.1	Grundfunktionalität.....	120
6.2.2	Bewertungsparameter zur Beurteilung wirtschaftlicher und ökologischer Auswirkungen beim Einsatz von MMS	120

6.2.3	Teilsysteme und Zusammenwirken	128
6.3	Implementierung des Moduls zur Fertigungssystemplanung	130
6.3.1	Wissensbasis	130
6.3.2	Problemlösungskomponente.....	145
6.3.3	Dialog- und Erklärungskomponente.....	146
6.3.4	Wissenserwerbskomponente und Expertenschnittstelle	147
6.4	Implementierung des Moduls zur Technologieplanung	147
6.4.1	Aufbau der Fallbasis	148
6.4.2	Distanzfunktion und Retrieve-Prozess	149
6.4.3	Erklärungsfunktion und Reuse-Prozess	153
6.4.4	Unsicherheitsfunktion und Revise-Prozess	154
6.4.5	Expertenschnittstelle und Retain-Prozess.....	156
7	Demonstration der Methodik am Fallbeispiel.....	157
7.1	Einsatz in der Fertigungssystemplanung	157
7.1.1	Planungsprämissen	157
7.1.2	Dimensionierung der Lösungsvarianten	160
7.1.3	Ökonomische Bewertung.....	163
7.1.4	Ökologische Bewertung.....	167
7.2	Einsatz in der Technologieplanung	170
7.2.1	Untersuchte Fallbeispiele.....	171
7.2.2	Ökonomische Bewertung.....	172
7.3	Interpretation und Diskussion der Analyseergebnisse.....	174
8	Zusammenfassung und Ausblick	177
8.1	Zusammenfassung	177
8.2	Ausblick	179
9	Literaturverzeichnis.....	181
10	Anhang	205

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1: Prozessmodell der Fabrikplanung nach [VDI11] in Anlehnung an [WIEN01, BEHR09]	4
Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Lebenszykluskosten von Investitionsgütern nach [VDI05, WO14] in Anlehnung an [DIN04]	6
Abbildung 2.3: Anforderungen an den wissensbasierten Lösungsansatz.....	7
Abbildung 3.1: Wärmeverteilung bei der Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide nach [KK05] in Anlehnung an [VIER59, KRON54]	9
Abbildung 3.2: Unterteilung der für die Metallbearbeitung relevantesten Kühlschmierstoffe nach [DIN13, VDI07, KK05]	10
Abbildung 3.3: Arten der Kühlschmierstoffzufuhr in Anlehnung an [MFH01]	11
Abbildung 3.4: Varianten der KSS-Aufbereitung und des Spänetransports in Anlehnung an [VDI08] und [BAUM13].....	13
Abbildung 3.5: In der Motorenfertigung der BMW Group vorrangig eingesetzte Varianten der KSS-Versorgung [BMW11]	13
Abbildung 3.6: Äußere und innere Zuführung von MMS-Medium [KK05]	15
Abbildung 3.7: Problemfelder beim Einsatz von KSS, insbesondere bei Nassbearbeitung. Inhalte nach [VDA14, BOUB12, KUCH12, DGUV11a, KK05, LUTH01, WEIN99].	17
Abbildung 3.8: Auswirkungen der Verminderung der KSS-Hauptfunktionen auf den Zerspanvorgang in Anlehnung an [KG98].....	18
Abbildung 3.9: Mengenverteilung von Aluminium in Fahrzeugen aus europäischer Fertigung in Anlehnung an [EAA13]	20
Abbildung 3.10: Entwicklung von CO ₂ -Emissionen und Kraftstoffverbrauch von PKW im NEFZ (engl. NEDC) [ICC14]	21
Abbildung 3.11: Bohren von Aluminium mit und ohne MMS [KK05]	22
Abbildung 3.12: FFS der BMW Group mit automatisiertem Werkstück- und Werkzeugfluss (Bildquelle: <i>Felsomat GmbH & Co. KG</i>)	22
Abbildung 4.1: Wissenstreppe nach [NORT11, NORT05].....	28
Abbildung 4.2: Wissensspirale nach Nonaka und Takeuchi [NT97] in Anlehnung an [CLAU13, STAA02]	29
Abbildung 4.3: Bausteine des Wissensmanagements nach [PROB10].....	30
Abbildung 4.4: Schematischer Aufbau eines Expertensystems in Anlehnung an [BEIE08, ZH00, BUSC94, OEMI91, PUPP86]	32
Abbildung 4.5: CBR-Zyklus [CLAU13] in Anlehnung an [AP94].....	35
Abbildung 4.6: Fuzzy-Mengen und linguistische Variablen	36

Abbildung 4.7: Darstellung eines Neurons in Anlehnung an [KINN94, YEGN99].....	36
Abbildung 4.8: Mögliche Netzwerkarchitekturen und Verschaltungsarten nach [KINN94, DECK02, YEGN99].....	37
Abbildung 4.9: Schematische Darstellung des Ablaufs Evolutionärer Algorithmen in Anlehnung an [NISS97]	38
Abbildung 5.1: Häufigkeitsverteilung der Werkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide bei flexiblen Fertigungssystemen für Aluminium-Kurbelgehäuse der BMW Group [GREB16]	48
Abbildung 5.2: Die Bearbeitungsaufgabe als Eingangsparameter der Technologieplanung	48
Abbildung 5.3: Einfluss von Featureparametern auf den Mehraufwand bei Entwicklung und Fertigung von MMS-Werkzeugen [GREB16].....	52
Abbildung 5.4: Ergebnis der Experteninterviews im Rahmen einer betreuten Arbeit zu Mehrkosten bei Entwicklung und Fertigung von MMS-Werkzeugen auf Basis von Bohrungsdurchmesser und -tiefe [GREB16].....	52
Abbildung 5.5: Untersuchte Werkstücke Zylinderkopf N20 und Kurbelgehäuse B48 der BMW Group	54
Abbildung 5.6: Hauptölkanäle und Injektorbohrungen im Zylinderkopf N20.....	54
Abbildung 5.7: Ölbohrung im Kurbelgehäuse B48	55
Abbildung 5.8: Einordnung der nach L/D -Verhältnis als entscheidungsrelevant eingestuften Features der analysierten Bauteile ZK N20 und KG B48	56
Abbildung 5.9: Versuchsmaschinen im Versuchsfeld des Werkzeugherstellers A (links) und des PTW der TU Darmstadt (rechts).	57
Abbildung 5.10: Aufspannsituation der Versuchswerkstücke bei WZA und PTW	58
Abbildung 5.11: Links: Eingesetzte Koordinatenmessmaschine Leitz PMM 864 im Versuchsfeld des PTW (TU Darmstadt), Rechts: Am PTW gemessene Qualitätskriterien	59
Abbildung 5.12: Prozessabfolge beim dynamischen MMS-Sprühtest für einstufige Bohrwerkzeuge von WZA.....	60
Abbildung 5.13: Angewandtes stationäres Verfahren zur Prüfung des Sprühbildes mehrstufiger Werkzeuge	60
Abbildung 5.14: Finaler Stand der MMS-Werkzeuge für die Bearbeitung des Hauptölkanals im ZK N20	62

Abbildung 5.15: Featurekontur der Injektorbohrung des ZK N20 (Außenkontur), im Vordergrund das Vorbearbeitungswerkzeug aus dem Serienprozess.....	62
Abbildung 5.16: Finaler Stand der MMS-Werkzeuge zur Bearbeitung der Injektorbohrung im ZK N20.....	63
Abbildung 5.17: Finaler Stand der MMS-Werkzeuge für die Bearbeitung der Ölbohrung mit $D = 4,5$ mm im KG B48	64
Abbildung 5.18: Stufen der Faktoren im Rahmen der statistischen Versuchsplanung für die Bearbeitung der Features am Kurbelgehäuse B48	66
Abbildung 5.19: Im Versuchsfeld des PTW verwendetes Versuchswerkstück in Frontalansicht	66
Abbildung 5.20: Ergebnisse des dynamischen Sprühtests beider Varianten des Finish-Werkzeugs für den Hauptölkanal des ZK N20 mit unterschiedlichen Luftdrücken	67
Abbildung 5.21: Druckluft-Volumenstrom bei den eingesetzten Werkzeugvarianten für den Hauptölkanal des ZK N20 in Abhängigkeit vom am MMS-System anliegenden Luftdruck	68
Abbildung 5.22: Erste Version des spiralisierten Finish-Werkzeugs für den Hauptölkanal des ZK N20 mit verschweißten Spänen in der Spannut (links) und Späne nach Zerspanung mit Schnittwerten aus Serienprozess (rechts)	68
Abbildung 5.23: Mikroskopaufnahmen der Schneiden der zweiten Version des spiralisierten Finish-Werkzeugs für den Hauptölkanal des ZK N20 mit unterschiedlichen Schnittwerten	69
Abbildung 5.24: Späne nach Bearbeitung des Werkstücks mit den in Tabelle 5.9 genannten Prozessparametern	70
Abbildung 5.25: Qualitätsmängel verschiedener Bearbeitungskonzepte der Injektorbohrung des ZK N20 nach Abschluss der Vorbearbeitung (links) und Finish-Bearbeitung (rechts)	70
Abbildung 5.26: Detailaufnahme des Finish-Werkzeugs für die Injektorbohrung des ZK N20	71
Abbildung 5.27: Auswahl an Werkzeug- und Werkstückschäden im Rahmen der Versuche	74
Abbildung 5.28: Effekt der Schmiermittelart auf die Geradheit und Schmiermittelmenge auf die Rundheit bei unterschiedlichen Werkzeugen	75
Abbildung 5.29: Effekt des Vorschubs auf Geradheit und Rundheit beim Finish-Werkzeug zur Bearbeitung des Features #4.....	75

Abbildung 5.30: Signifikante Wechselwirkungseffekte bei den Werkzeugen zur Bearbeitung der Features #5 und #6.....	76
Abbildung 5.31: Verteilung der Auftretenshäufigkeit der Stufen einzelner Faktoren in der idealen Faktorkombination	77
Abbildung 5.32: Chronologie einer Thermographieaufnahme.....	78
Abbildung 5.33: Temperaturverlauf bei der Zerspanung von 34 Bohrungen mit den Finish-Werkzeugen der Hersteller WZA und WZB für Feature #6	78
Abbildung 5.34: Temperaturverlauf bei der Zerspanung von 16 Bohrungen mit den Finish-Werkzeugen der Hersteller WZA und WZB für Feature #4	79
Abbildung 5.35: Temperaturverlauf bei der Zerspanung von 20 Bohrungen mit den Finish-Werkzeugen des Herstellers WZB für Feature #2 bei Schmierung mit ATS AL und Microtol	79
Abbildung 5.36: Schematische Darstellung eines flexiblen Fertigungssystems für Aluminiumkurbelgehäuse bei der BMW Group	81
Abbildung 5.37: Untersuchte, verkettete Bearbeitungszentren und Werkstückaufspannung im BMW Werk Steyr, Fertigungssystem Z1	82
Abbildung 5.38: Detailaufnahmen des Arbeitsraums eines untersuchten BAZ des Typs Grob BZ500L und entstandener Spänenester im BMW Werk Steyr, Fertigungssystem Z1	83
Abbildung 5.39: Untersuchte KSS-Unterdruckbandfilteranlage im BMW Werk Steyr.....	86
Abbildung 5.40: Untersuchte Druckluftkompressoren im BMW Werk Steyr	86
Abbildung 5.41: Elemente eines Energiewertstroms, Visualisierung in Anlehnung an [ERLA09, REIN10, SUTH12], erweitert um Zustandsklassen Produktion, Warten, Transport.....	87
Abbildung 5.42: Schematische Darstellung der Teilsysteme einer Fabrik und Abgrenzung des Betrachtungsrahmens	88
Abbildung 5.43: Vergleich der Wirkleistungsaufnahme einzelner Aggregate eines BAZ mit der eingespeisten Wirkleistung	88
Abbildung 5.44: Messung von elektrischer Energie, Druckluft- und KSS-Volumenströmen im BMW Werk Steyr.....	89
Abbildung 5.45: Entwickelte Messauswertungssoftware und Vorgehensweise bei Auswertung am Beispiel der elektrischen Energie.....	90
Abbildung 5.46: Leistungs- und Medienbedarf eines Doppelspindel-BAZ des Typs MAG Specht Duo L in der AFO 130 des FFS für Kurbelgehäuse G2 im BMW Werk Steyr	92

Abbildung 5.47: Volumenstrom des Hochdruck-KSS ohne und mit Einsatz von Frequenzumrichter in einem Einspindler-BAZ des Typs Ex-Cell-O XHC 241 des Zylinderkopffertigungssystems Z5 im BMW Werk München, nach [GREB11]	92
Abbildung 5.48: Einfluss von Frequenzumrichtern auf die Leistungsaufnahme der KSS-HD-Pumpen von Ein- und Doppelspindel-BAZ	93
Abbildung 5.49: Pneumatische Wartungseinheit eines untersuchten BAZ des Typs Ex-Cell-O XHC 241 des Zylinderkopffertigungssystems Z5 im BMW Werk München: Eingangs- und tatsächlich benötigter pneumatischer Druck in Anlehnung an [XIE12].....	94
Abbildung 5.50: Leistungsbedarf einer untersuchten Reinigungszelle des Typs Dürr Ecoclean des FFS für Kurbelgehäuse G2 im BMW Werk Steyr.....	94
Abbildung 5.51: Leistungs- und Medienbedarfe der FFS für Zylinderköpfe (Z2) und Kurbelgehäuse (G2) im BMW Werk Steyr nach Systemelementklassen	95
Abbildung 5.52: Gesamtleistungsaufnahme FFS für Zylinderköpfe Z2 im BMW Werk Steyr nach Systemelementklassen; Gesamtleistungsaufnahme der Nebenbetriebe separat ausgewiesen.....	96
Abbildung 5.53: Gesamtleistungsaufnahme des FFS für Kurbelgehäuse G2 im BMW Werk Steyr nach Systemelementklassen; Gesamtleistungsaufnahme der Nebenbetriebe separat ausgewiesen.....	96
Abbildung 5.54: Darstellung der Leistungs- und Medienbedarfe einzelner Maschinen des flexiblen Kurbelgehäusefertigungssystems G2 im BMW Werk Steyr.....	97
Abbildung 5.55: Darstellung des medienübergreifenden Leistungsbedarfs einzelner Maschinen des flexiblen Kurbelgehäusefertigungssystems G2 im BMW Werk Steyr	98
Abbildung 5.56: Betrachtete Kostenarten der untersuchten flexiblen Fertigungssysteme	99
Abbildung 5.57: Produktaufbruchstruktur der betrachteten flexiblen Fertigungssysteme	100
Abbildung 5.58: Durchschnittliche Betriebskosten der betrachteten FFS; Aufwände für KSS-Versorgung inkl. zugehörigem Anteil an Energie- und weiteren Kosten	101
Abbildung 5.59: Durchschnittliche Betriebskosten der betrachteten FFS für KSS-Versorgung	101

Abbildung 5.60: MMS-System an einem untersuchten BAZ im Pilotsystem im BMW Werk Steyr und Lanze für ein 2-Kanal-MMS-System	103
Abbildung 5.61: Vergleich der Ausführung des Maschinenbetts untersuchter BAZ mit MMS und KSS im BMW Werk Steyr	104
Abbildung 5.62: Aufspannsituation in Bearbeitungszentren bei Einsatz von Adapterplatten	104
Abbildung 5.63: Arbeitsraum und Absaugvorrichtung eines untersuchten, verketteten MMS-BAZ im Pilotsystem im BMW Werk Steyr	105
Abbildung 5.64: Werkstück- und Maschinenverschmutzung beim Einsatz von MMS	106
Abbildung 5.65: Späneentsorgungskonzept mit Kratzerförderern für betrachtete FFS	107
Abbildung 5.66: Späneentsorgungskonzept in niedriger gelegenes Geschoss bei MMS-Betrieb	108
Abbildung 5.67: Der Bewertung zugrundeliegende Prämissen	108
Abbildung 5.68: Untersuchtes MMS-BAZ in verketteter Arbeitsfolge im MMS-Pilotsystem im BMW Werk Steyr	110
Abbildung 5.69: Berechnete Leistungs- und Medienbedarfe der FFS für Kurbelgehäuse G2 und Zylinderköpfe Z2 im BMW Werk Steyr nach Systemelementklassen bei Einsatz von MMS	111
Abbildung 5.70: Berechnete Gesamtleistungsaufnahme des FFS für Kurbelgehäuse G2 im BMW Werk Steyr nach Systemelementklassen bei Einsatz von MMS	111
Abbildung 5.71: Berechnete Gesamtleistungsaufnahme des FFS für Zylinderköpfe Z2 im BMW Werk Steyr nach Systemelementklassen bei Einsatz von MMS	112
Abbildung 5.72: Vergleich der durchschnittlichen Leistungsbedarfe der betrachteten FFS bei Einsatz von KSS und MMS	112
Abbildung 5.73: Überleitung der Betriebskosten der betrachteten FFS bei Einsatz von KSS und MMS	113
Abbildung 5.74: Berechnete durchschnittliche Betriebskosten der betrachteten FFS bei Einsatz von MMS; Aufwände für KSS-Versorgung inkl. zugehörigem Anteil an Energie- und weiteren Kosten	114
Abbildung 6.1: Einordnung in die Systemumgebung	116
Abbildung 6.2: Systemmodell und Zusammenwirken der beiden Module	120
Abbildung 6.3: Schematische Darstellung der betrachteten Kostenelemente in Anlehnung an [DIN04]	121
Abbildung 6.4: Einteilung ausgewählter Verfahren der Investitionsrechnung in Anlehnung an [WEBE96, GÖTZ14]	122

Abbildung 6.5: Schematische Darstellung der Benutzerausgabe des FSP-Moduls	129
Abbildung 6.6: Schematische Darstellung der Benutzerein- und -ausgaben des TP-Moduls	130
Abbildung 6.7: Schematische Darstellung des entwickelten relationalen Datenbankmodells	132
Abbildung 6.8: Zuordnung von Systemelementarten und Skalierungsarten	137
Abbildung 6.9: Ausschnitt der Systemelementklassen-Tabelle der spanenden Fertigung mit Fokus auf Bearbeitungszentren in Anlehnung an [BMW13]	142
Abbildung 6.10: S Ausschnitt aus der <i>Prämissen</i> -Tabelle mit Fokus auf die Nutzungsphase	144
Abbildung 6.11: Screenshot der Haupttabelle der implementierten Problemlösungskomponente in Anlehnung an [BMW13]	145
Abbildung 6.12: Screenshot der Nebentabelle zur Kapitalwertberechnung	146
Abbildung 6.13: Screenshot der Eingabemaske	146
Abbildung 6.14: Screenshot des Hauptteils der Ausgabemaske	147
Abbildung 6.15: Datenfeldstruktur der Fallbasis, verwendete Datentypen und Elemente des Fallvektors	149
Abbildung 6.16: Ansätze möglicher Ähnlichkeitsfunktionen in Anlehnung an [BERG03]	151
Abbildung 6.17: Vergleich einer linearen und einer glockenförmigen Ähnlichkeitsfunktion	152
Abbildung 6.18: Beispielhafte Ähnlichkeitsbewertung zweier Bohrfeatures	153
Abbildung 6.19: Grenzwerte zur Berechnung der lokalen Kritikalität	154
Abbildung 6.20: Auswahl möglicher Funktionen zur Berechnung der Unsicherheit	155
Abbildung 6.21: Screenshotausschnitt der Dialogkomponente des entwickelten TP-Moduls nach Bewertung eines Falls (Kosten und Falldaten aus Datenschutzgründen verfälscht)	156
Abbildung 6.22: Aufbau der implementierten Fallbasis	156
Abbildung 7.1: Screenshot der Eingabemaske mit konstanten und variablen Eingabeparametern	158
Abbildung 7.2: Relative Beschaffungskosten eines Prüfplatzes zur Zylinderinspektion in Abhängigkeit von der Zylinderanzahl	160
Abbildung 7.3: Relative Beschaffungskosten der Rohteilbeladung in Abhängigkeit vom jährlichen Produktionsvolumen	161
Abbildung 7.4: Anzahl der Vor- und Endreinigungszellen in Abhängigkeit vom jährlichen Produktionsvolumen	161

Abbildung 7.5: Anzahl der Ein- und Doppelspindel-BAZ in Abhängigkeit von Zylinderanzahl und jährlichem Produktionsvolumen	162
Abbildung 7.6: Relative Beschaffungskosten von KSS-Filteranlagen in Abhängigkeit vom jährlichen Produktionsvolumen.....	163
Abbildung 7.7: Anzahl Maschinenladeportale in Abhängigkeit von Zylinderanzahl und jährlichem Produktionsvolumen	163
Abbildung 7.8: Differenz der Beschaffungskosten von KSS- und MMS-FFS in Abhängigkeit von Zylinderanzahl, jährlichem Produktionsvolumen und vorhandener Infrastruktur	164
Abbildung 7.9: Differenz der Beschaffungskosten von KSS- und MMS-FFS im Verhältnis zu jenen von FFS mit Nassbearbeitung in Abhängigkeit von Zylinderanzahl, jährlichem Produktionsvolumen und vorhandener Infrastruktur	165
Abbildung 7.10: Differenz der jährlichen Betriebskosten von KSS- und MMS-FFS in Abhängigkeit von Zylinderanzahl und jährlichem Produktionsvolumen.....	165
Abbildung 7.11: Differenz der jährlichen Betriebskosten von KSS- und MMS-FFS im Verhältnis zu jenen von KSS-FFS	166
Abbildung 7.12: Gegenüberstellung der Kapitalwertberechnung von FFS mit 1- und 2-Kanal-MMS im Vergleich zur Nassbearbeitung	166
Abbildung 7.13: Aufwandsorientierter Kapitalwert der Differenzinvestition in Abhängigkeit von Zylinderanzahl, jährlichem Produktionsvolumen und vorhandener Infrastruktur	167
Abbildung 7.14: Differenz des spezifischen Energiebedarfs von KSS- und MMS-FFS im Verhältnis zum spezifischen Energiebedarf bei Nassbearbeitung	168
Abbildung 7.15: Differenz des spezifischen Energiebedarfs von KSS- und MMS-FFS in Abhängigkeit von Zylinderanzahl und jährlichem Produktionsvolumen.....	168
Abbildung 7.16: Differenz des spezifischen Wasserverbrauchs von KSS- und MMS-FFS in Abhängigkeit von Zylinderanzahl und jährlichem Produktionsvolumen.....	169
Abbildung 7.17: Differenz des spezifischen Anfalls von Abfall bei KSS- und MMS-FFS in Abhängigkeit von der Zylinderanzahl des Werkstücks	169
Abbildung 7.18: Spezifischer Flächenbedarf von KSS- und MMS-FFS in Abhängigkeit von Zylinderanzahl und jährlichem Produktionsvolumen.....	170

Abbildung 7.19: Differenz des spezifischen Flächenbedarfs von KSS- und MMS-FFS im Verhältnis zum spezifischen Energiebedarf bei Nassbearbeitung	170
Abbildung 7.20: Untersuchte Bohrungstypen	171
Abbildung 7.21: Ausschnitt der Ausgabemaske (vgl. auch Abbildung 6.15)	172
Abbildung 7.22: Ausschnitt der Ausgabemaske mit Details zum Fallbeispiel c – Versackung (vgl. auch Abbildung 6.15)	173
Abbildung 7.23: Ausschnitt der Ausgabemaske mit Details zum Fallbeispiel 3b – Durchgangsbohrung (vgl. auch Abbildung 6.15).....	174
Abbildung 10.1: Eingesetzter Messwagen und verwendete Messsoftware (Entwicklung s. [SCHN12]) zur Erfassung der Energie- und Medienbedarfe	209
Abbildung 10.2: Schematische Darstellung des Pumpenprüfstands im Verbundlabor für Aerodynamik, Aeroakustik und Fluidtechnik der Hochschule München nach [SCHI10]	210
Abbildung 10.3: Messabweichung bei Anwendung des Druckdifferenz- und Ultraschall-Laufzeitdifferenzverfahrens zur Messung des KSS-Volumenstroms (Messstelle aus Stahl) [BUFF12].....	211
Abbildung 10.4: Messabweichung bei Anwendung des Druckdifferenz- und Ultraschall-Laufzeitdifferenzverfahrens zur Messung des KSS-Volumenstroms (Messstelle aus Plexiglas) [BUFF12]	211

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Vergleich von äußerer und innerer Zufuhr nach [DGUV10]	15
Tabelle 3.2: Vorteile 1- und 2-kanaliger MMS-Zufuhr nach [BIEL13, GÜHR12, ABEL12b, DGUV10]	16
Tabelle 3.3: Anwendungsgebiete der MMS-Technologie bei Aluminiumwerkstoffen nach [KALS11, PAUC08, ALLE08, KK05, WESS01, CEME12]	19
Tabelle 3.4: Gegenüberstellung der Ausprägungen von Mehrmaschinensystemen in Anlehnung an [WEST07, WECK05]	24
Tabelle 4.1: Implizites und explizites Wissen in Anlehnung an [NT97] und [FREY13]	28
Tabelle 4.2: Bewertung betrachteter Forschungsansätze in der Fabrikplanung	43
Tabelle 4.3: Bewertung betrachteter Forschungsansätze in der Fertigungssystemplanung	44
Tabelle 4.4: Bewertung betrachteter Forschungsansätze in der Technologieplanung	44
Tabelle 5.1: Betrachtete Featureparameter von Bohrungen in Anlehnung an [PAPS11]	49
Tabelle 5.2: Relativer Mehraufwand im Vergleich zur Nassbearbeitung [GREB16]	50
Tabelle 5.3: Bewertungsskala nach Saaty [SAAT90], übersetzt aus dem Englischen nach [RIED06]	51
Tabelle 5.4: Paarvergleich des Einflusses von Featureparametern auf den Mehraufwand bei Entwicklung und Fertigung von MMS- Bohrwerkzeugen in Relation zu Werkzeugen für die Nassbearbeitung [GREB16] in Anlehnung an Saaty [SAAT90]	51
Tabelle 5.5: Zur Untersuchung ausgewählte Features des Zylinderkopfes N20. Grau hinterlegt sind die als kritisch eingestuften Featureparameter.	55
Tabelle 5.6: Zur Untersuchung ausgewählte Features des Kurbelgehäuses B48. Grau hinterlegt sind die als kritisch eingestuften Featureparameter.	55
Tabelle 5.7: Daten der Werkzeuge zur Bearbeitung der Features #1 und #4 am ZK N20	63
Tabelle 5.8: Daten des Werkzeugs zur Bearbeitung des Features #4 und #4 am KG B48	64
Tabelle 5.9: Schnittparameter bei der Bearbeitung des Hauptölkanals vom ZK N20 mit bestem Zerspannungsergebnis	69

Tabelle 5.10: Prozessparameter bei der Bearbeitung der Injektorbohrung vom ZK N20 mit bestem Zerspanungsergebnis	71
Tabelle 5.11: Angewandte Stufen der Faktoren für die Finish-Bearbeitung der Features am Kurbelgehäuse B48	73
Tabelle 5.12: Gegenüberstellung der idealen Faktorkombinationen und Herstellervorgaben für die entscheidungsrelevanten Bearbeitungsfeatures des Kurbelgehäuses B48.....	77
Tabelle 6.1: Zusammenfassende Gegenüberstellung relevanter Wissensrepräsentationsmethoden.....	119
Tabelle 6.2: Schlüsselbereiche und Maßeinheiten für Kernindikatoren nach [EGV09]	124
Tabelle 6.3: Berichtete und bezielte Umweltkennzahlen ausgewählter Automobilkonzerne und zugehöriger Motoren- und Komponentenwerke [BMW15a, BMW15b, DAIM15a, DAIM15b, VOLK15a, VOLK15b]	125
Tabelle 6.4: Skalierungsarten im BMW Group Referenzsystem der mechanischen Fertigung in Anlehnung an [BMW13]	134
Tabelle 6.5: Mögliche Ausprägungen des Attributs „Besondere Formen“ in Anlehnung an [EIME14]	149
Tabelle 6.6: Ähnlichkeitsmatrix des Attributs „Besondere Formen“ nach [GREB14, EIME14]	152
Tabelle 7.1: Ausprägung der relevantesten Stellhebel (weitere Parameter aus Geheimhaltungsgründen nicht dargestellt).....	159
Tabelle 7.2: Ausprägung der relevantesten Prämissen zur Berechnung der Betriebskosten (weitere Parameter aus Geheimhaltungsgründen nicht dargestellt)	160
Tabelle 7.3: Entscheidungsrelevante Featureparameter der untersuchten Fallbeispiele (vgl. auch Abbildung 6.15)	171
Tabelle 10.1: Technische Daten der eingesetzten Versuchsmaschinen [GROB12, EXCE05].....	206
Tabelle 10.2: Überblick über die eingesetzten Schmierstoffe, unterstrichen sind die Kurzbezeichnungen im Rahmen dieser Arbeit	206
Tabelle 10.3: Werkzeugliste zur Bearbeitung der ausgewählten entscheidungsrelevanten Features am ZK N20	207
Tabelle 10.4: Werkzeugliste zur Bearbeitung der ausgewählten entscheidungsrelevanten Features am KG B48.....	208
Tabelle 10.5: Empfohlene Prozessparameter für die übrigen entscheidungsrelevanten Bearbeitungsfeatures des Zylinderkopfs	

N20 (Hauptölkanal s. Tabelle 5.9, Injektorbohrung s. Tabelle 5.10).....	208
Tabelle 10.6: Übersicht der Leistungs- und KSS-Bedarfe des FFS für Kurbelgehäuse G2 im BMW Werk Steyr inkl. betrachteter Nebenbetriebe auf AFO-Ebene	212
Tabelle 10.7: Verzeichnis betreuter Studienarbeiten.....	213

Abkürzungsverzeichnis

AFO	Arbeitsfolge
AHP	Analytischer Hierarchieprozess / engl.: <i>Analytic Hierarchy Process</i>
AMB	Internationale Ausstellung für Metallbearbeitung
BAZ	Bearbeitungszentrum
BDE	Betriebsdatenerfassung
bielomatik	<i>bielomatik Leuze GmbH + Co. KG</i> (MMS-Systemhersteller)
BMW Group	<i>Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft</i>
CBR	Fallbasiertes Schließen / engl.: <i>Case-Based Reasoning</i>
Daimler	<i>Daimler AG</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung e.V.</i>
DL	Druckluft
DoE	Statistische Versuchsplanung / engl.: <i>Design of Experiments</i>
DS	Doppelspindel-BAZ
EA	Evolutionäre Algorithmen (auch: Genetische Algorithmen)
EMAS	<i>Eco-Management and Audit Scheme</i>
ES	Einspindliges BAZ
Ex-Cell-O	<i>Ex-Cell-O GmbH</i> (Werkzeugmaschinenhersteller, mittlerweile Teil der <i>MAG IAS GmbH</i>)
F1.1	Forschungsfrage 1.1
F1.2	Forschungsfrage 1.2
F1.3	Forschungsfrage 1.3
F2.1	Forschungsfrage 2.1
F2.2	Forschungsfrage 2.2
FFS	Flexibles Fertigungssystem
FK	Zugehörig zum FFS mit herkömmlicher Kühlschmierstrategie (Index)
FM	Zugehörig zum FFS mit MMS-Kühlschmierstrategie (Index)
FRK	Fremdschlüssel einer Datenbanktabelle (engl.: <i>foreign key</i>)
FSP	Fertigungssystemplanung
Grob	<i>Grob-Werke GmbH & Co. KG</i> (Werkzeugmaschinenhersteller)
HD	Hochdruckemulsion (KSS)
HSC	Hochgeschwindigkeitszerspanung / engl.: <i>High Speed Cutting</i>
HSS	Schnellarbeitsstahl / engl.: <i>High Speed Steel</i>
IH	Instandhaltung
KG	Kurbelgehäuse
KNN	Künstliche neuronale Netze
KSS	Kühlschmierstoff

LCC	Lebenszykluskosten / engl.: <i>Life Cycle Costs</i>
LDS	Lichtbogen-Draht-Spritzen (Zylinderlaufbahntechnologie)
LLP	Logistikladeportal
LM	Logistikmodul
MAG	<i>MAG IAS GmbH</i> (Werkzeugmaschinenhersteller)
MLP	Maschinenladeportal
MMS	Minimalmengenschmierung
ND	Niederdruckemulsion (KSS)
PRK	Primärschlüssel einer Datenbanktabelle (engl.: <i>primary key</i>)
PKD	Polykristalliner Diamant
PSS	Produktionssteuerungssystem
PTW	<i>Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen</i>
PU	Produktionsunterbrechung
Rother	<i>Rother Technologie GmbH & Co. KG</i> (MMS-Systemhersteller)
SPC	Statistische Prozesslenkung / engl.: <i>Statistical Process Control</i>
TB	Trockenbearbeitung
TCO	<i>Total Cost of Ownership</i>
TP	Technologieplanung
VHM	Vollhartmetall
VDI	<i>Verein Deutscher Ingenieure e.V.</i>
VOC	Flüchtige organische Verbindungen (z. B. SO ₂ , NO _x , PM) / engl.: <i>Volatile organic compounds</i>
Volkswagen	<i>Volkswagen AG</i>
WC/C	Wolframcarbin/Kohlenstoff
WZ	Werkzeug
WZA	Werkzeughersteller A
WZB	Werkzeughersteller B
WZM	Werkzeugmaschine
XPS	Expertensystem
ZK	Zylinderkopf
ZLS	Zentrales Logistiksystem

Formelverzeichnis

Griechische Buchstaben

α	Signifikanzniveau (maximal zulässige Irrtumswahrscheinlichkeit)
\mathcal{E}_{DL}	Spezifischer Energieumsatz bezogen auf Druckluft
\mathcal{E}_{KSS}	Spezifischer Energieumsatz bezogen auf Kühlschmierstoffe
$\mathcal{E}_{Elektrisch}$	Spezifischer Energieumsatz bezogen auf elektrische Leistungsaufnahme
\mathcal{E}_{Gesamt}	Spezifischer Energieumsatz über alle Energieformen
$\Delta\mathcal{E}_{Gesamt}$	Spezifischer Energieumsatz über alle Energieformen (Differenzbetrachtung KSS-MMS)
κ_0	Kapitalwert zum Zeitpunkt $j = 0$ (Investitionsrechnung)
κ_{FK-FM}	Aufwandsorientierter Kapitalwert der Differenzinvestition KSS-MMS
λ	Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes
A_0	Anfangsauszahlung (Investitionsrechnung)
$A_{0,a}$	Beschaffungskosten einer Systemelementart a
$A_{0,a,s}$	Beschaffungskosten eines Systemelements s einer Systemelementart a
$A_{0,s}$	Beschaffungskosten eines Systemelements s
$A_{0,s,fix}$	Fixe Beschaffungskosten eines Systemelements s
$A_{0,s,3Zyl}$	Beschaffungskosten eines Systemelements s für $z_{WS} = 3$
A_j	Auszahlungen während einer Periode (Investitionsrechnung)
A_J	Lebenszykluskosten
$A_{B,kum}$	Über den Lebenszyklus kumulierte Betriebskosten
σ_{Abfall}	Spezifischer Anfall von Abfällen
$\Delta\sigma_{Abfall}$	Spezifischer Anfall von Abfällen (Differenzbetrachtung KSS-MMS)
$\sigma_{Fläche}$	Spezifischer Flächenbedarf eines FFS
$\Delta\sigma_{Fläche}$	Spezifischer Flächenbedarf (Differenzbetrachtung KSS-MMS)
σ_{Wasser}	Spezifischer Wasserverbrauch
$\Delta\sigma_{Wasser}$	Spezifischer Wasserverbrauch (Differenzbetrachtung KSS-MMS)
Σ_j	Einzahlungen während einer Periode (Investitionsrechnung)
ν	Viskosität
Ψ_{BP}	Auswahlparameter für die Bauart (<i>Bedplate/Deepskirt</i>)
Ψ_{FT}	Auswahlparameter für die Fertigungstiefe eines Werkstücks
Ψ_{LB}	Auswahlparameter für die Laufbahntechnologie
Ψ_{M12}	Auswahlparameter für 1- oder 2-kanaliges MMS
Ψ_{NFB}	Auswahlparameter für Baumaßnahmen (Nebenfunktionen)
Ψ_{NFS}	Auswahlparameter für Strukturmaßnahmen (Nebenfunktionen)
$\Psi_{Standort}$	Auswahlparameter für den Standort eines FFS

Lateinische Buchstaben

A	Oberfläche, durch die Wärme strömt
$A_{Bebaut,H}$	Flächenbedarf für eine Fertigungshalle
$A_{Bebaut,K}$	Flächenbedarf für ein Kellergeschoss
$A_{Bebaut,KSS}$	Flächenbedarf für KSS-Filteranlagen
$A_{Bebaut,s}$	Flächenbedarf eines Systemelements inklusive anteiliger Gemeinflächen
C_{EMAS}	Flächenanteil der KSS-Anlage im Sinne des EMAS
C_{ES}	Anteil der Einspindel-BAZ an der Gesamtanzahl von BAZ eines FFS
C_{EQ}	Ersatzquote: außerplanmäßig zu fertigende Austausch- und Ersatzteile
C_{Flex}	Flexibilitätsvorhalt zur Kompensation unterjähriger Produktionsschwankungen
C_{FT}	Faktor zur Quantifizierung der Fertigungstiefe auf die Bearbeitungszeit
C_{NFB}	Anteiliger Aufschlag für Baumaßnahmen (Nebenfunktion)
C_{NFEM}	Anteiliger Aufschlag für Energie- und Medienversorgung (Nebenfunktion)
C_{NFS}	Anteiliger Aufschlag für Strukturmaßnahmen (Nebenfunktion)
C_{NFO}	Anteiliger Aufschlag für Objektabsaugung (Nebenfunktion)
C_{NFST}	Anteiliger Aufschlag für Steuerungstechnik (Nebenfunktion)
C_{OEE}	Zielwert der Gesamtanlageneffektivität
$C_{Split,0}$	Anteil der Beschaffungskosten, die zum Zeitpunkt $t = 0$ entrichtet werden
$C_{Standort}$	Standortspezifischer Auf- oder Abschlag auf die Lebenszykluskosten
$C_{WS,1}$	Anteiliges Produktionsvolumen im ersten Jahr [%]
C_{WSK}	Faktor zur Quantifizierung der Werkstückkomplexität aus C_{Zyl} und C_{FT}
C_{Zyl}	Faktor zur Quantifizierung der Zylinderanzahl auf die Bearbeitungszeit
D	Durchmesser eines Werkzeugs oder Features
$D_{St.,max}$	Größter Durchmesser einer Stufe eines Werkzeugs oder Features
$D_{St.,min}$	Geringster Durchmesser einer Stufe eines Werkzeugs oder Features
E_{DL}	Energieumsatz zur Erzeugung des Druckluftvolumenstroms
$E_{Elektrisch}$	Elektrischer Energieumsatz
E_{Gesamt}	Energieumsatz eines flexiblen Fertigungssystems
E_{KSS}	Energieumsatz zur Erzeugung des gesamten KSS-Volumenstroms
f	Vorschub
f_z	Vorschub pro Zahn
i	Index einer Bohrzeile
i_z	Kalkulationszinssatz (Investitionsrechnung)
j	Periode (Investitionsrechnung)
j_A	Dynamische Amortisationszeit (Investitionsrechnung)
j_A^*	Periode mit letztmalig negativem kumuliertem Barwert (Investitions-

	rechnung)
J	Lebensdauer im Lebenszyklus / maximale Periodenanzahl (Investitionsrechnung)
J_{AS}	Dauer zwischen zwei Neuansätzen einer KSS-Filteranlage
J_R	Periode, in der die Restzahlung geleistet wird
$k_{0,H}$	Preis pro Flächeneinheit für Fertigungshalle [€/m ²]
$k_{0,K}$	Preis pro Flächeneinheit für Kellergeschoss [€/m ²]
k_{Abfall}	Spezifische Abfallentsorgungskosten [€/t Abfall]
$k_{Add,KSS}$	Spezifische Additivkosten [€/kg]
$k_{Energie}$	Spezifische Energiekosten [€/kWh]
$k_{Schmier,KSS}$	Kosten des KSS-Schmierstoffs je Mengeneinheit
$k_{Schmier,MMS}$	Kosten des MMS-Schmierstoffs je Mengeneinheit
k_{Span}	Erlös aus Verkauf des Spanmaterials pro Tonne
k_{Wasser}	Spezifische Wasserkosten [€/l]
$K_{Add,FK}$	Stückkosten für Additive
K_{HRH}	Lohnstückkosten für Betreiberpersonal des FFS in der Fertigungshalle
K_{HRK}	Lohnstückkosten für Betreiberpersonal der KSS-Filteranlagen
K_{IHH}	Stückkosten für Instandhaltung des FFS
K_{IHK}	Stückkosten für Instandhaltung der KSS-Filteranlagen
K_{RM}	Stückkosten für Reinigungsmittel
$K_{Schmier}$	Stückkosten für Schmierstoff
K_{Vlies}	Stückkosten für Filtervlies
K_{WZ}	Stückkosten für Werkzeug
L	Bohrungstiefe: Länge eines Werkzeugs oder Features
$m_{Abfall,P}$	Je Periode anfallende Masse an Abfällen
$m_{Abfall,St}$	Je Werkstück anfallende Masse an Abfällen
$m_{Span,St}$	Je Werkstück anfallende Masse an Spanmaterial
n	Drehzahl
$n_{a,s}$	Anzahl an Systemelementen einer Art
n_s	Anzahl an Systemelementen eines FFS
$n_{Schicht,W}$	Anzahl an Arbeitsschichten je Arbeitswoche
$n_{W,Arbeit}$	Anzahl an Arbeitswochen je Periode
$n_{WS,J}$	Innerhalb des Lebenszyklus produzierte Anzahl an Werkstücken
$n_{WS,P}$	Innerhalb einer Periode produzierte Anzahl an Werkstücken
$n_{WS,P,s}$	Produktionskapazität eines Systemelements s innerhalb einer Periode
$n_{WS,P,Vorhalt}$	Vorhalt an Produktionsvolumen je Periode
n_r	Versuchsaufwand (DoE)
$N_{Gewinde}$	Anzahl der Gewinde eines Werkzeugs oder Features
$N_{Passungen}$	Anzahl der Passungen eines Werkzeugs oder Features

$N_{Schneiden}$	Anzahl der Schneiden eines Werkzeugs
N_{Stufen}	Anzahl der Stufen eines Werkzeugs oder Features
p_{DL}	Luftdruck
$p_{DL,Misch}$	Luftdruck beim Mischen des Aerosols im Rother Aerosolmaster 4000
p	Signifikanzwert (Irrtumswahrscheinlichkeit)
P_{DL}	Wirkleistungsaufnahme zur Erzeugung des Druckluftvolumenstroms
$P_{Elektrisch}$	Wirkleistung
$P_{El.,HDP,M}$	Mittlere Wirkleistungsaufnahme der KSS-HD-Pumpe
P_{KSS}	Wirkleistungsaufnahme zur Erzeugung des gesamten KSS-Volumenstroms
$P_{KSS,HD}$	Wirkleistungsaufnahme zur Erzeugung des KSS-HD-Volumenstroms
$P_{KSS,ND}$	Wirkleistungsaufnahme zur Erzeugung des KSS-ND-Volumenstroms
Q_{DL}	Volumenstrom Druckluft
$Q_{KSS,Gesamt}$	Volumenstrom KSS insgesamt
$Q_{KSS,HD}$	Volumenstrom KSS-Hochdruckemulsion
$Q_{KSS,ND}$	Volumenstrom KSS-Niederdruckemulsion
Q_{MMS}	Schmiermittelmenge (Volumenstrom)
$Q_{MMS,M}$	Mittlere Schmiermittelmenge (Volumenstrom) aller Werkzeuge eines FFS
\dot{Q}	Wärmeleistung nach dem Fourierschen Gesetz
s	Systemelement in einem FFS [Index]
$S_{Anschluss}$	Elektrische Anschlussleistung (Scheinleistung)
S_{MMS}	Schmiermittelart
Δt_G	Geradheit (Formtoleranz)
Δt_R	Rundheit (Formtoleranz)
Δt_P	Position (Lagetoleranz)
$t_{Bearb.,BAZ}$	Gesamtbearbeitungszeit eines Werkstücks in BAZ
$t_{Bearb.,M}$	Mittlere Bearbeitungszeit eines Werkstücks in einem FFS
$t_{Bearb.,BAZ,R}$	Referenzwert der Gesamtbearbeitungszeit eines Werkstücks in BAZ
$t_{Betrieb}$	Laufzeit eines FFS innerhalb einer Periode
$t_{eing,frei,M}$	Mittlere eingriffsfreie Zeit eines Werkstücks in einem FFS
t_{PU}	Kumulierte Dauer der geplanten Produktionsunterbrechungen einer Periode
$t_{Schicht}$	Dauer einer Arbeitsschicht
$t_{Sprüh}$	Verfahrzeit beim Sprühversuch
$t_{Sprüh}$	Verfahrzeit beim Sprühversuch
t_{Takt}	Taktzeit eines FFS
ΔT	Temperaturdifferenz nach dem Fourierschen Gesetz
ΔT_{WS}	Differenz der Werkstücktemperaturen vor und nach einem Versuch

v_c	Schnittgeschwindigkeit
v_f	Vorschubgeschwindigkeit
$V_{Add,AS}$	Je Neuansatz verwendete Masse an KSS-Additiv
$V_{Schm,St,FK}$	Je Werkstück verbrauchte Masse an KSS-Schmierstoff
$V_{Schmier,AS}$	Je Neuansatz verbrauchte Masse an KSS-Schmierstoff
V_{Wasser}	Wasserverbrauch eines FFS
$V_{Wasser,St}$	Wasserverbrauch eines FFS pro produziertem Werkstück
x	Abstand in X-Richtung
y	Abstand in Y-Richtung
y_i	Abstand zwischen dem Mittelpunkt der Bohrreihe i und der Werkstückoberfläche in Y-Richtung
z	Abstand in Z-Richtung
z_{WS}	Zylinderanzahl des Werkstücks

1 Einleitung

Das im Zuge der industriellen Revolution einsetzende Bevölkerungswachstum geht mit einem stetig steigenden Ressourcenbedarf einher, der das Ökosystem der Erde an seine Belastungsgrenze bringt [WEIZ10]. Ressourceneffizienz und ökologische Nachhaltigkeit gewinnen daher zunehmend an Bedeutung für Politik und Wirtschaft [WALL06, HOFF08a, BRIN11, HOFF11, BIJE14]. So erließen das Europäische Parlament und der Europäische Rat zahlreiche Richtlinien und Verordnungen (z. B. [EGR05], [EGV09], [EUR10]), um den effizienten Umgang der Industrie mit begrenzten Ressourcen zu fördern. Diese Entwicklung wird durch den Beschluss der 21. UN-Klimakonferenz am 12.12.2015 in Paris, die globale Erwärmung auf „*bedeutend weniger als 2 °C*“ [FAZ15] zu begrenzen, weiter bestärkt. [UNFC15a, UNFC15b, ZEIT15] Trotz der gesetzlichen Anreize und des unternehmensseitigen Umsetzungsbestrebens liegen die Einsparpotenziale des Medienverbrauchs in der deutschen Industrie bis 2020 Untersuchungen zufolge bei 10 bis 30 Prozent [KRIS08, MCKI09]. Vor dem Hintergrund der Gestaltung effizienterer Metallzerspanungsprozesse steht verstärkt die Kühlschmierstoffversorgung mit Kostenanteilen zwischen 10 und 17 Prozent [ABEL12a] im Fokus [KUHR11, KG98]. Ansätze zur Reduzierung des durch Kühlschmierstoffe (KSS) erzeugten Energie- und Medienbedarfs wurden beispielsweise im Förderprojekt „Maximierung der Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen“ erarbeitet [ABEL13] und in der Automobilindustrie teilweise erfolgreich umgesetzt [GREB11]. Als Befähigertechnologie zur Hebung weiterer Kosten- und Ressourceneffizienzpotenziale erfährt auch die Minimalmengenschmierung (MMS) zunehmende Beachtung [ABEL12b]. Obwohl die Technologie seit Mitte der Neunzigerjahre Gegenstand diverser Forschungsaktivitäten ist [KLOC95, WEIN99, TT02], sehen sich Anwender nach wie vor mit Umsetzungshemmnissen konfrontiert: Neben Vorbehalten von Entscheidungsträgern gegenüber der Prozesssicherheit und -qualität von MMS [KIßL04] verhindert die mangelnde Verfügbarkeit allgemeingültiger Angaben zu den Umsetzungskosten der MMS-Technologie eine Verbreitung im großen Maßstab [ABEL04]. Veröffentlichungen belegen zwar die erfolgreiche Umsetzung von MMS in der Automobilindustrie [EMUG13, FORD13, MAPA12, KORN10, FSA07, STOL04], doch die Vorteile auf ökologischer und ökonomischer Seite sind nicht in der Form quantifiziert, um eine Übertragung auf andere Anwendungsfälle zu ermöglichen.

2 Problemdefinition, Zielsetzung und Anforderungen an den Lösungsansatz

Vor dem Hintergrund der im vorangegangenen Kapitel aufgezeigten Situation in der Industrie wird in den folgenden Abschnitten zunächst das konkrete Problem beschrieben und das Ziel der Arbeit definiert. Zur Eingrenzung des Untersuchungsfeldes wird anschließend der Betrachtungsrahmen dargestellt und abgegrenzt. Abschließend werden die Anforderungen an den zu entwickelnden Lösungsansatz abgeleitet.

2.1 Problemdefinition und Zielsetzung

Wie einleitend erläutert, wird die MMS-Technologie seit Mitte der Neunzigerjahre erforscht und in der Metallbearbeitung auch vereinzelt umgesetzt. Aufgrund verschiedener Faktoren hat sie sich bislang jedoch nicht annähernd flächendeckend durchgesetzt. Ein entscheidender Grund ist die Skepsis von Managern und Fabrikplanern hinsichtlich der Umsetzbarkeit von MMS sowie ihrer ökologischen und wirtschaftlichen Vorteile. Dies ist zurückzuführen auf die mangelnde Verfügbarkeit öffentlich zugänglicher, spezifischer Informationen über die Kosten und Risiken dieser Technologie. (vgl. Kapitel 1) Zudem erschwert die oftmals auf Erfahrung basierende Fabrikplanungssystematik auf Anwender- und Herstellerseite die Aufnahme neuer Technologien in den Lösungsraum [BEHR09].

Ein umfassendes Werkzeug zur Unterstützung bei der ökologischen und ökonomischen Bewertung von MMS im Planungsprozess von Fertigungssystemen würde die Transparenz erhöhen, existiert jedoch derzeit nicht. Ziele der vorliegenden Arbeit sind daher die Entwicklung einer Methodik, die diese Art der Bewertung anwendungsspezifisch für Neuprojekte ermöglicht, ihre exemplarische Umsetzung in Form eines wissensbasierten Planungswerkzeugs und die Erprobung an einem Praxisbeispiel in der Motorenfertigung der *Bayerischen Motoren Werke Aktiengesellschaft* (BMW Group). Dazu ist im Vorfeld die Umsetzbarkeit der Einführung von MMS in dieses Umfeld zu prüfen.

2.2 Darstellung und Abgrenzung des Betrachtungsrahmens

Sowohl die Metallzerspanung als auch die Fabrikplanung sind umfassende Forschungsfelder, deren vollständige Erläuterung den Rahmen der vorliegenden Arbeit übersteigen würde. Der folgende Abschnitt grenzt den Betrachtungsrahmen dieser Arbeit daher hinsichtlich der relevanten Planungsphasen, Fertigungstechnologien und Werkstoffe ab. Zum besseren Verständnis wird zunächst das Prozessmodell der Fabrikplanung erläutert.

In der Literatur findet sich eine Vielzahl von Ansätzen zur Strukturierung der Prozesse bei der Planung von Fabriken [WRN14, GRUN12, WIEN01, EVER96, AGGT87, KETT84]. Im Rahmen der VDI-Richtlinie 5200 wurde auf dieser Basis ein einheitli-

ches Prozessmodell aufgesetzt (vgl. Abbildung 2.1). Demnach lässt sich die Fabrikplanung in sieben Phasen unterteilen, die mehrere Prozessschritte umfassen. Der Umfang dieser variiert in Abhängigkeit vom Planungsfall. Im Folgenden wird der Ablauf der im Kontext der vorliegenden Arbeit relevanten Fälle der Neuplanung eines Fertigungssystems zu seiner Errichtung auf der „grünen Wiese“ oder einer wiederaufbereiteten Fabrikfläche erläutert. [VDI11]

Ergebnisse der Zielfeststellung sind der Zielekatalog sowie ein Projektplan und daraus abgeleitete Arbeitspakete. Diese Vorgaben werden im Rahmen der Grundlagenübermittlung konkretisiert, auf Machbarkeit geprüft und um sämtliche für die weitere Planung erforderlichen Daten und Informationen ergänzt. Resultate der Konzeptplanung sind eine oder mehrere quantitativ und qualitativ bewertete favorisierte Layoutvarianten. Zunächst werden hierzu die Produktionsprozessfolgen innerhalb der Fabrik entworfen (Strukturplanung), Art und Flächenbedarf sowie Anzahl der Betriebsmittel ermittelt (Dimensionierung) und deren mögliche räumliche Anordnung ohne Berücksichtigung von Restriktionen in mehreren Ideallayoutvarianten dargestellt und bewertet (Idealplanung).

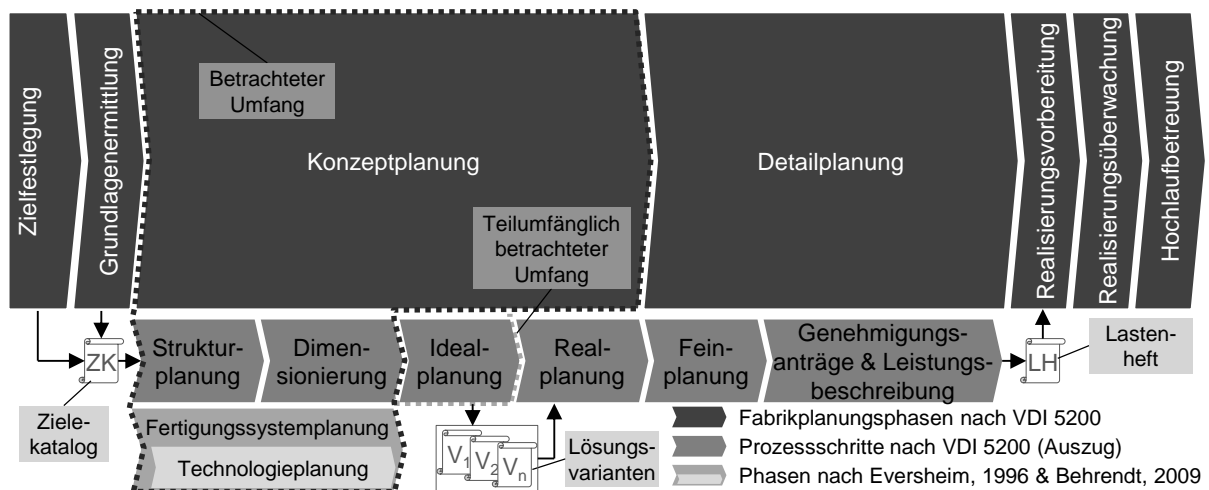


Abbildung 2.1: Prozessmodell der Fabrikplanung nach [VDI11] in Anlehnung an [WIEN01, BEHR09]

Im Rahmen der Realplanung werden daraus unter Einbeziehung der lokalen Einschränkungen Layoutvarianten abgeleitet und erneut bewertet. Sie dienen der Ausplanung einer oder mehrerer Varianten des Fabrikkonzepts während der Detailplanung: In der Feinplanung wird der Detaillierungsgrad weiter erhöht, um die Unterlagen für den Genehmigungsprozess (etwa für Baumaßnahmen) bereitzustellen und schließlich das Lastenheft abzuschließen. Nach der Ausschreibung erfolgen im Rahmen der Realisierungsvorbereitung der Angebotsvergleich sowie die Vergabe und Überwachung der Ausführungspläne. Der auftrags- und plangemäße Aufbau der Gebäude und Systeme wird in der Realisierungsüberwachungsphase kontrolliert, um nach Inbetriebnahme einen möglichst reibungslosen Hochlauf des Systems zur vollen Leistungsfähigkeit zu erreichen. [VDI11]

Die planerische Ausarbeitung einer potenziellen Lösungsvariante mit MMS würde im Zuge der Fertigungsprozessplanung erfolgen. Eversheim nutzt in diesem Zusammenhang den in der Literatur geläufigeren Begriff der operativen Technologieplanung (TP) [EVER96]. Dieser wird im weiteren Verlauf für die Planung von Fertigungsprozessen verwendet. Dem Prozessmodell des VDI folgend ist die Technologieplanung Teil der Strukturplanung und Dimensionierung. Behrendt fasst beide Prozessschritte zur Fertigungssystemplanung (FSP) zusammen [BEHR09]. Die Entscheidung für oder gegen eine Einführung der MMS fällt schließlich bei der qualitativen und quantitativen Bewertung der Ideallayouts. Aus diesem Grund umfasst der Betrachtungsrahmen die Fertigungssystemplanung sowie die ökologische und ökonomische Bewertung der Lösungsvarianten als Eingangsgröße für die Idealplanung.

Forschungsgegenstand sind dabei Produktionslinien in der Motorenfertigung der Automobilindustrie. Als Beispiel dienen flexible Fertigungssysteme (FFS) für prismatische Aluminiumbauteile, da sie im Motorenbau der BMW Group den Standard darstellen. Die Machbarkeit der Einführung der MMS-Technologie wird an den Motorbauteilen Zylinderkopf (ZK) und Kurbelgehäuse (KG) der BMW Group untersucht. Diese Werkstücke bieten sich an, da die Verbreitung der MMS in diesem Bereich auch aufgrund der hohen Bauteilkomplexität derzeit nur mäßig wächst [EMUG13, FORD13, ABEL12b, MAPA12, KORN10, FSA07, SSK05, STOL04]. Die Werkstücke sind aus der im Motorenbau gängigen Aluminiumlegierung AlSi7MgCu0,5 T6 gefertigt [KHT08].

Um eine ganzheitliche Kostenbetrachtung zu gewährleisten, erfolgt die ökonomische Bewertung der Lösungsvarianten im zu entwickelnden wissensbasierten Planungswerkzeug auf Basis der Lebenszykluskostenrechnung nach der VDI-Richtlinie 2884 [VDI05]. Sie unterscheidet die Produktlebensphasen vor, während und nach der Nutzung und definiert die Lebenszykluskosten (LCC) analog zu DIN EN 60300-3-3 [DIN04] als über die Lebensdauer eines Investitionsguts kumulierte Kosten (vgl. Abbildung 2.2).

Der in der Literatur oftmals gleichbedeutend eingesetzte Ansatz der *Total Cost of Ownership* (TCO) unterscheidet sich von der LCC-Methode darin, dass er Transaktionskosten bei der Berechnung berücksichtigt. Da diese bei Investitionsgütern im Sinne der Zielstellung eine untergeordnete Rolle spielen, findet er im Rahmen der vorliegenden Arbeit keine Berücksichtigung. [WO14]

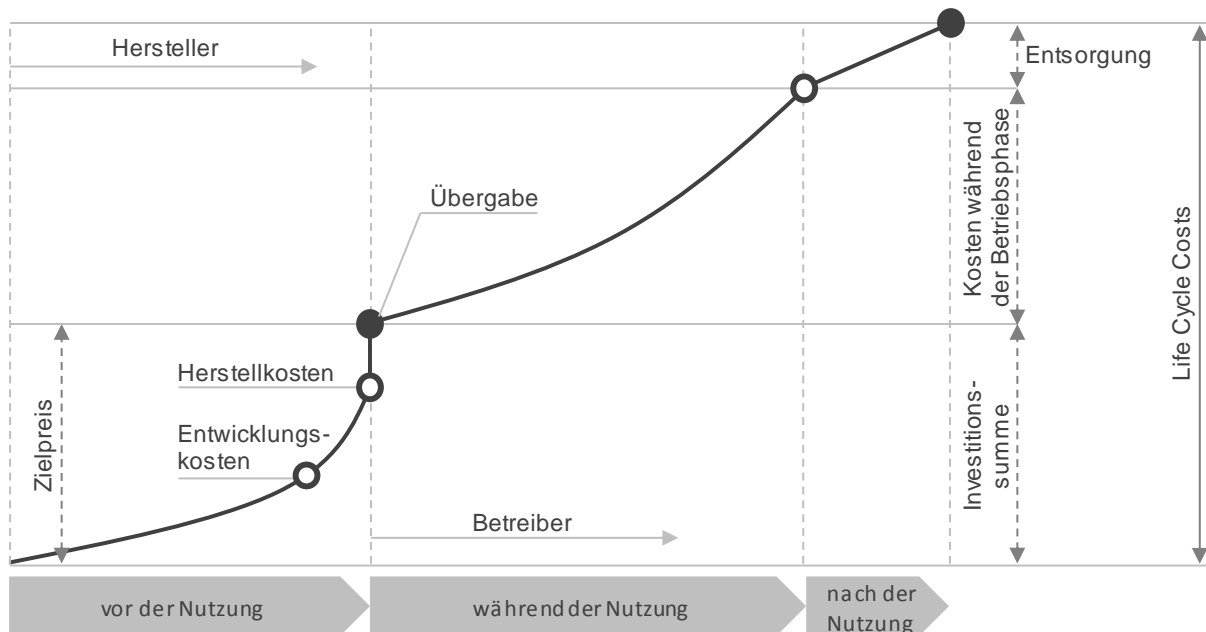


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Lebenszykluskosten von Investitionsgütern nach [VDI05, WO14] in Anlehnung an [DIN04]

Allgemeine Beschaffungskosten für Anschaffung, Fracht, Einbau und Inbetriebnahme sowie Folgekosten der Beschaffung zur Personalakquise und -schulung oder für Reisen während der Planungsphase fallen vor der Nutzung an. Während der Nutzung sind die Kosten für Betriebs- und Hilfsstoffe, Instandhaltung (IH) und Bedienungspersonal anzurechnen. Auf die Phase nach der Nutzung entfallen Kosten zur Außerbetriebnahme und Verwertung des Produkts. [VDI05, DIN04]

Zur Aufwandsreduzierung sind lediglich die im Kontext der Problemstellung relevanten Phasen bzw. Kostenarten zu berücksichtigen. Folgen der Einführung der MMS, deren Zuordnung zu den genannten Kostenarten der LCC nicht ohne Weiteres möglich ist, werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit vernachlässigt. Dazu zählen etwa positive Auswirkungen auf die Gesundheit des Bedienpersonals durch Vermeidung des Kontakts mit flüssigen KSS oder potenzielle Gesundheitsrisiken durch Einatmen des Aerosols bei unzureichender Absaugung [DGUV11a, DGUV11b, DGUV10].

Zur ökologischen Bewertung der Lösungsvarianten ist ein geeignetes Kennzahlensystem aufzubauen und in den zu entwickelnden wissenschaftlichen Ansatz zu integrieren. Zu berücksichtigen sind hierbei die im Produktionsumfeld der BMW Group vorherrschenden Energie- und Medienströme.

2.3 Anforderungen an den Lösungsansatz und Ableitung der Forschungsfragen

Aus der Zielsetzung lassen sich sowohl anwendungsübergreifende als auch szenariospezifische Anforderungen an den wissenschaftlichen Lösungsansatz ableiten (vgl. Abbildung 2.3). Die geforderten Aussagen zur Machbarkeit sowie ökonomischen und ökologischen Auswirkungen der Einführung der MMS-Technologie sind auf Basis von

Eingangsdaten zu treffen, deren Qualität und Granularität jener des Zielekatalogs nach Abschluss der Zielfestlegungsphase entsprechen. Zur Entlastung des Benutzers ist eine weitgehend automatisierte, rechnergestützte Problemlösungs- und Bewertungsfunktion vorzusehen. Sowohl Eingabe- als auch Ausgabemaske sind auf den Kenntnisstand und den Informationsbedarf des Planungspersonals der entsprechenden Anwendungsbereiche auszurichten. Um die Beurteilbarkeit der Lösungsvarianten durch den Planer zu gewährleisten, ist der Lösungsweg für diesen nachvollziehbar darzulegen. Bei Bedarf sind dem Nutzer über eine Erklärungsfunktion weitere Details zur Verfügung zu stellen. Modifikationen und Erweiterungen der Lösungsdatenbank sind explizit eingewiesenen Experten zu ermöglichen.



Abbildung 2.3: Anforderungen an den wissensbasierten Lösungsansatz

Da die beiden Anwendungsszenarien unterschiedliche zeitliche Horizonte aufweisen und sich an verschiedene Planungsteams richten, sind zwei getrennte Module zu entwickeln.

Für die Anwendung des wissensbasierten Systems bei der Fertigungssystemplanung sind zunächst die Erfordernisse zur Einführung der MMS-Technologie in das Referenzsystem der mechanischen Fertigung der BMW Group [BMW11] zu untersuchen und eine MMS-fähige Alternative zu entwerfen. Struktur und Zusammenhänge der Systemelemente beider Referenzkonzepte sind anschließend als modulare Datenmodelle zu hinterlegen. Basierend auf den Nutzereingaben zu Zielen, Prämissen und Werkstückeigenschaften wird aus diesen Modellen je Kühlschmierstrategie eine Variante eines FFS abgeleitet und dimensioniert. Eine ökologische und ökonomische Bewertung beider Lösungsvarianten schließt den Prozess ab und dient als Input für die Idealplanungsphase.

Zur Nutzung im Rahmen der Technologieplanungsphase sind historische Daten zur Umsetzung von MMS in der Motorenfertigung zu generieren und in einer Form zu hinterlegen, die eine Verarbeitung durch das zu entwickelnde wissensbasierte System ermöglicht. Da der Umfang der Daten zu Beginn der Nutzungsphase aufgrund der eingeschränkten Verfügbarkeit von Praxisbeispielen im Untersuchungsumfeld gering sein wird, könnte das System etwa durch unpräzise Angaben aufgrund von Wissenslücken in der Datenbank an Akzeptanz verlieren. Dem Nutzer sind daher verschiedene, nach Relevanz priorisierte Lösungsalternativen zu präsentieren, um ihm eine erfahrungsbasierte Weiterverarbeitung des Wissens zu ermöglichen. Um den Aufwand bei der Dateneingabe zu reduzieren, ist der Nutzer auf entscheidungsrelevante Bearbeitungsmerkmale des Werkstücks hinzuweisen. Die Machbarkeit einer möglichen Einführung der MMS in den Bearbeitungsprozess ist über den Vergleich mit Präzedenzfällen zu bewerten. Dazu sind geeignete Bewertungsparameter zu ermitteln. Die monetären Auswirkungen der MMS-Einführung sind zu bestimmen und über eine Schnittstelle an das FSP-Modul zu übermitteln.

Zusammengefasst ergeben sich für die vorliegende Arbeit folgende Forschungsfragen:

1. Technologie Minimalmengenschmierung

1. Unter welchen Voraussetzungen ist MMS in spanenden FFS für Aluminiumbauteile einsetzbar? Wie sind spanende FFS für Aluminiumbauteile anzupassen? (F1.1)
2. Welche Parameter sind zur ökonomischen und ökologischen Bewertung des Einsatzes von MMS in diesem Umfeld heranzuziehen? (F1.2)
3. Welche wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen hat der Einsatz von MMS in diesem Umfeld? (F1.3)

2. Wissensbasiertes System

1. Welche Methodik eignet sich bei der Neuplanung von FFS nach Kapitel 2.2 zur Unterstützung der Fertigungssystems- und Technologieplanung bei der Bewertung des Einsatzes von MMS? (F2.1)
2. Wie ist diese Methodik zu konkretisieren und einzusetzen? (F2.2)

3 Einsatz von MMS in flexiblen Fertigungssystemen für Aluminiumbauteile

Im folgenden Kapitel werden Nutzen und Einsatz von KSS im Zerspanprozess erläutert, einzelne KSS-Arten differenziert und der Begriff der Minimalmengenschmierung definiert. Details zum Stand der Technik des Zerspanprozesses sind unter anderem in den Abhandlungen von Klocke [KK05] und Paucksch [PAUC08] zu finden.

3.1 Kühlung und Schmierung im Zerspanungsprozess

Die während der Zerspanung aufgebrauchte mechanische Arbeit wird in der Scher- und Randzone fast vollständig in Wärmeenergie umgewandelt [PAUC08]. Abbildung 3.1 zeigt schematisch die Wärmeverteilung bei der Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide und verdeutlicht, dass ca. 70 bis 80 Prozent der Wärme in den Span überführt wird [KK05].

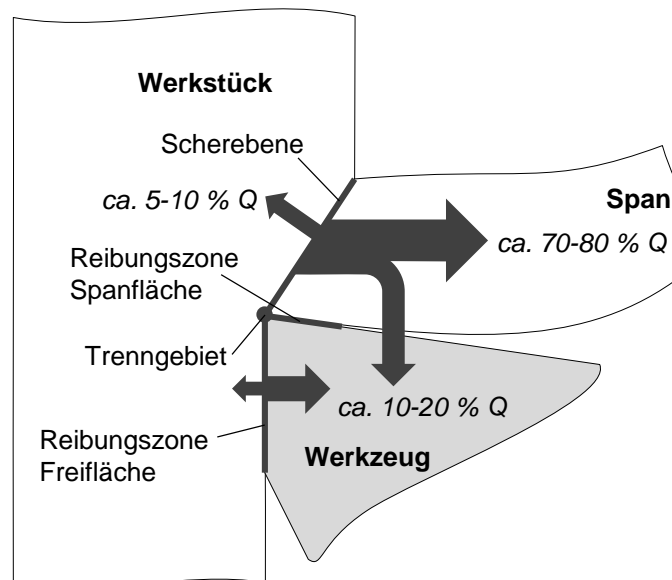


Abbildung 3.1: Wärmeverteilung bei der Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide nach [KK05] in Anlehnung an [VIER59, KRON54]

Um dem Wärmeeintrag in Werkzeug und Werkstück entgegenzuwirken und Wärme sowie Späne aus dem Schnittbereich abzuführen, werden in der spanenden Bearbeitung (insbesondere von Metallen) KSS eingesetzt [DIN13, PAUC08, KUCH12, KISS06].

Schmierende Komponenten der KSS reduzieren die auftretenden Schnittkräfte, was Schneidenbelastung und Wärmeentstehung verringert und zu einer erhöhten Lebensdauer von Werkzeug und Werkzeugmaschine (WZM) beiträgt [KK05]. Zudem dienen sie der Vermeidung von Aufbauschneidenbildung und der Verbesserung der Oberflächengüte [MALD08, VDI07]. Unter Aufbauschneidenbildung wird das Aufstauen harter, kaltverfestigter Schichten im Bereich der Scherspanbildung verstanden, die zum Teil die Funktion der Schneide übernehmen [FRIT07].

Kühlende Komponenten dienen neben der Wärmeabfuhr der gleichmäßigen Temperierung von Werkzeug, Werkstück und WZM. So vermiedene temperaturbedingte Ausdehnungen oder unerwünschte Veränderungen des Materialgefüges insbesondere in den Randzonen erhöhen die Maßgenauigkeit des Fertigungsprozesses. [KK05, WEIN99]

Die Abfuhr von Spanmaterial aus dem Bearbeitungsbereich ist eine weitere Aufgabe der KSS. Transporteigenschaften und Spülvermögen des KSS werden einerseits durch seine Viskosität und grenzflächenaktive Substanzen (etwa Additive) und andererseits von der Art der Späne (Werkstoff, Gestalt, Größe) beeinflusst. Auch die geometrischen Umgebungsbedingungen am Werkstück und dem Bearbeitungsraum wirken sich auf die Transporteigenschaften aus. [VDI07] Des Weiteren binden KSS entstehende Stäube und Partikel und dienen als Korrosionsinhibitoren [PAUC08, SMIT08, DÖPP96].

3.1.1 Arten von KSS

Das *Deutsche Institut für Normung e.V.* (DIN) und der *Verein Deutscher Ingenieure e.V.* (VDI) unterteilen KSS für die Metallbearbeitung in nichtwassermischbare, wassermischbare und wassergemischte. Für Schmierstoffe aus dem Bereich der MMS gelten die gleichen Kategorien (vgl. Abbildung 3.2).

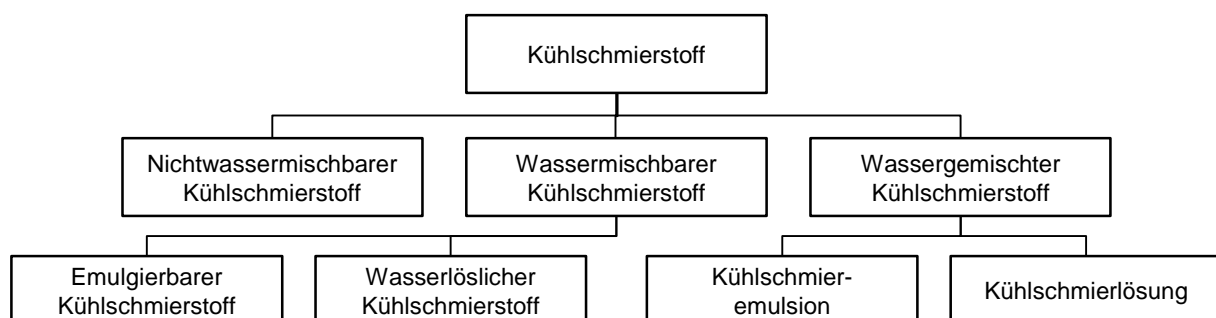


Abbildung 3.2: Unterteilung der für die Metallbearbeitung relevantesten Kühlschmierstoffe nach [DIN13, VDI07, KK05]

Nichtwassermischbare KSS sind üblicherweise Basisöle (etwa Mineralöle, Esteröle oder Polyglykole) mit oder ohne Zusatz von chemisch aktiven und/oder schmierfilmbildenden Wirkstoffen [VDI07]. Durch gezielten Einsatz dieser Additive lassen sich unter anderem Druckfestigkeit, Temperaturbeständigkeit, Korrosionsschutz, Schmier Eigenschaften und Standzeit des KSS erhöhen und Schaumbildung entgegenwirken [PAUC08, MD07, FORM07, WALT01, KASS94]. Ein Vorteil nichtwassermischbarer KSS im Vergleich zu wassermischbaren ist ihre Resistenz gegen Bakterienbefall, die einen geringeren Pflegeaufwand verursacht und höhere Standzeiten ermöglicht. Dies sowie strenge Auflagen bezüglich der Lagerung und Behandlung von Schmierstoffen führen in Deutschland zu einem Trend hin zu nichtwassermischbaren KSS. [BAFA13, BRIN08, WEIN99, MFO98]

Bei wassermischbaren KSS wird zwischen emulgierbaren und wasserlöslichen unterschieden. Die Verdünnung dieser als Konzentrat angebotenen Substanzen mit bis zu 99 Prozent Wasser ergibt Emulsionen oder Lösungen, folglich wassergemischte KSS. Durch die im Vergleich zu Ölen höhere Wärmekapazität des Wassers weisen sie eine deutlich stärkere Kühlwirkung auf. Insbesondere beim Zerspanen mit bestimmter Schneide ist der Einsatz von Emulsionen weit verbreitet, als Basisöle dienen ebenfalls Mineral- oder Esteröle. Zusätzlich zu den bereits genannten Additiven finden bei wassermischbaren KSS Emulgatoren, Lösungsvermittler und Biozide wie Fungizide oder Bakterizide Anwendung. [DIN13, VDI07, KK05, WEIN99] Stoffe der letztgenannten Gruppe erhöhen die Standzeit wassergemischter KSS durch Vermeidung des Befalls mit Mikroorganismen. Zudem reduzieren sie die von organischem Material ausgehenden Gesundheitsrisiken für das unmittelbar betroffene Personal. Aufgrund der chemischen und physikalischen Wirkung ihrer Komponenten sind KSS und ihre Additive allerdings für Mensch und Umwelt potenziell gefährlich. [BGHM12, BMU09, LUTH01]

3.1.2 Einsatz von KSS in der zerspanenden Metallbearbeitung

Um ihre Wirkung in der Kontaktfläche zwischen Werkzeug, Werkstück und Span zu entfalten, werden KSS möglichst nah an den Schnittbereich geführt. Der Transport des Mediums durch Kühlkanäle innerhalb des Werkzeugs wird als Innenkühlung bezeichnet, die äußere Zuführung durch Düsen als Außenkühlung. Die möglichen Konstellationen sind in Abbildung 3.3 dargestellt. [MFH01]

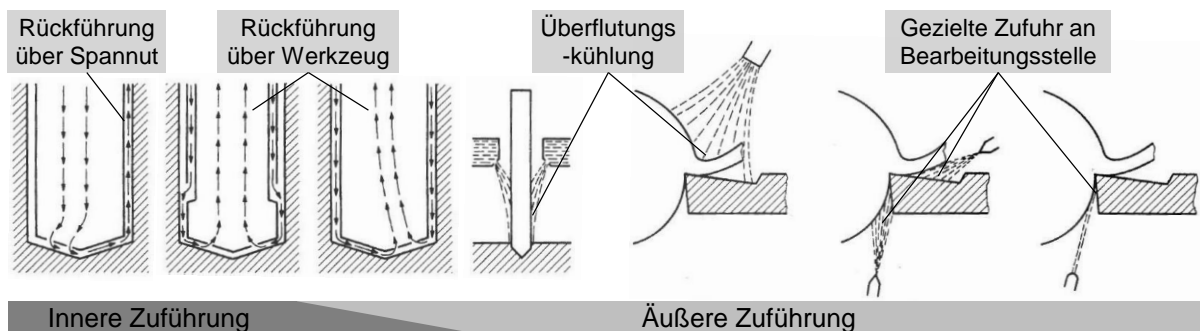


Abbildung 3.3: Arten der Kühlschmierstoffzufuhr in Anlehnung an [MFH01]

3.2 Abgrenzung von Nass-, MMS- und Trockenbearbeitung

Die Technologie der MMS wird in Literatur und industrieller Praxis auch als Minimalmengenkülschmierung, Mindermengenschmierung oder Mindermengenkülschmierung bezeichnet und als energieeffiziente Alternative zur „herkömmlichen Nassbearbeitung“ dargestellt. [KG98, DGUV10, KLOC95, VDI07] Insbesondere im industriellen Umfeld wird bisweilen der Begriff der Trockenbearbeitung (TB) gleichbedeutend eingesetzt. [KUTT01, KONO02] Dieses Kapitel erläutert und differenziert die genannten und weitere Begriffe im Kontext MMS. Als Basis dient der aktuelle

Stand von Literatur und Normung sowie im Rahmen der vorliegenden Arbeit und in deren Verlauf betreuter Abschlussarbeiten durchgeführter Experteninterviews aus den Jahren 2012-2014 mit relevanten Autoren aus dem Bereich MMS und Teilnehmern des Verbundprojekts Technologienetz Trockenbearbeitung (Details s. Anhang A). [EIME14, VÁRA13, TT02]

3.2.1 Nassbearbeitung

Spanende Bearbeitung, bei der die Bearbeitungsstelle mit KSS überflutet wird, wird laut DIN 69090-1 als Nassbearbeitung, der angewandte Kühlprozess Paucksch zufolge auch als Überflutungskühlung bezeichnet [DIN11, PAUC08, KK05]. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird zur Abgrenzung von der MMS auch der Begriff KSS-Bearbeitung verwendet. Heutige Bearbeitungszentren (BAZ) für die spanende Metallbearbeitung in der Automobilindustrie weisen je nach Anwendungsfall KSS-Bedarfe auf, die durchschnittlich über 200 l/min liegen [KUHR11, GREB11, SS98]. Einmal durch den Bearbeitungsprozess geleitete KSS werden folglich nicht entsorgt, sondern aufbereitet und wiederverwendet [VDI08]. Die Wiederaufbereitung beinhaltet folgende Teilprozesse [MÖLL86]:

- Abtrennen fester Fremdstoffe, etwa Metallpartikel, abrasive Teilchen, ausgefällte Salze, biologische Abbauprodukte oder Reaktionsprodukte
- Abtrennen von Fremdöl etwa aus Leckagen von Schmier- und Hydraulikkreisläufen
- Temperierung des aufbereiteten KSS
- Späneaufbereitung und –entsorgung

Abbildung 3.4 zeigt mögliche Varianten der genannten Teilprozesse:

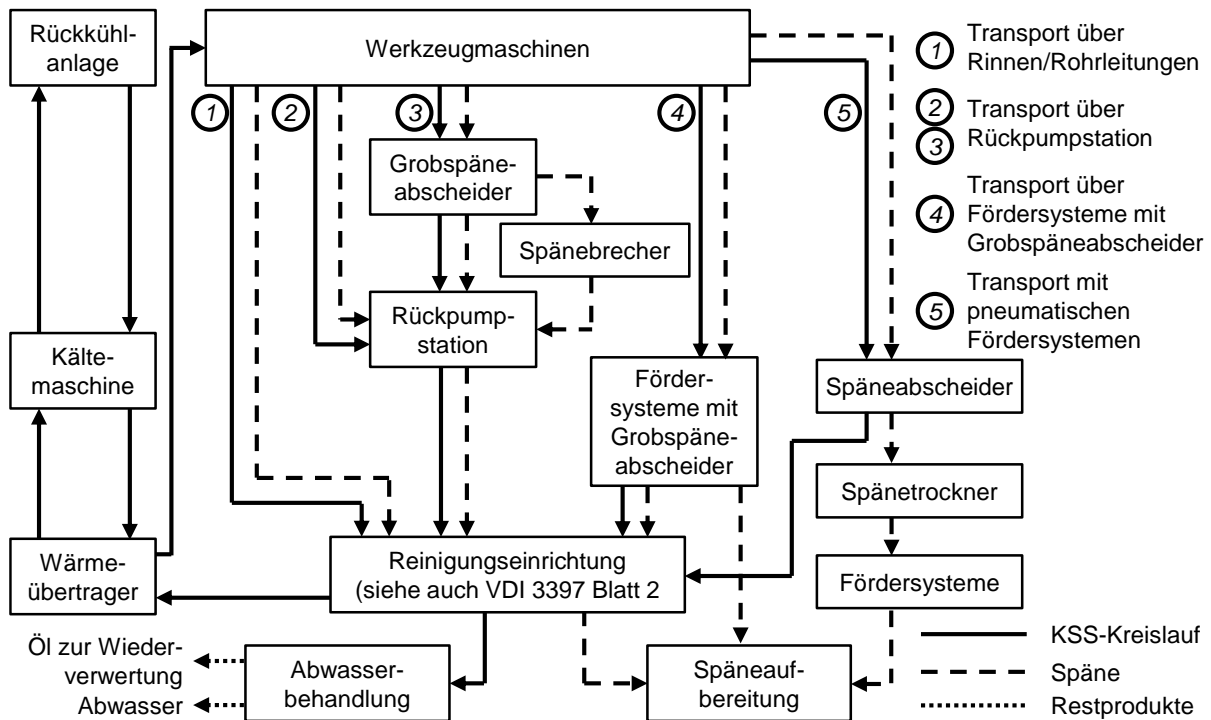


Abbildung 3.4: Varianten der KSS-Aufbereitung und des Spänetransports in Anlehnung an [VDI08] und [BAUM13]

In den Werken der BMW Group sind vorrangig die Varianten 1 und 2 im Einsatz. Eine detaillierte Betrachtung bietet Abbildung 3.5.

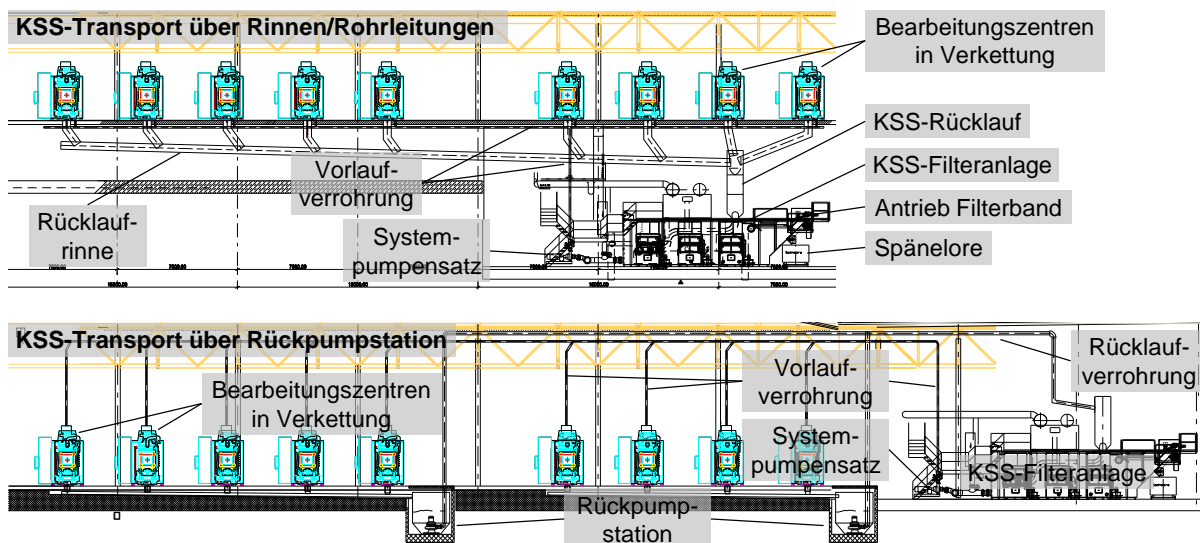


Abbildung 3.5: In der Motorenfertigung der BMW Group vorrangig eingesetzte Varianten der KSS-Versorgung [BMW11]

Die Vorstellung der erforderlichen Teilsysteme und anfallender Kosten im Lebenszyklus dieser erfolgt in den Kapiteln 5.2.1.7 und 7.1.

3.2.2 Trockenbearbeitung

In der industriellen Praxis wird der Begriff der Trockenbearbeitung bisweilen gleichbedeutend mit dem der MMS eingesetzt [KONO02, KUTT01]. DIN 69090-1 definiert Trockenbearbeitung als „Bearbeitung ohne Schmiermedium“, Weinert, Klocke et al.

und Paucksch als Verzicht auf KSS im Bearbeitungsprozess, wobei der Einsatz von Druckluft bei letzteren nicht ausgeschlossen wird [DIN11, PAUC08, KK05, WEIN99].

Da bei TB-Prozessen im Produktionsumfeld der BMW Group auch Druckluft als Kühlmedium eingesetzt wird, gilt im Rahmen der vorliegenden Arbeit die Definition der TB von Weinert, Klocke et al. und Paucksch.

3.2.3 MMS

Die Literatur im Kontext der Einsparung von KSS nennt unter anderem Begriffe wie Minimalmengenschmierung, Minimalmengenkühl schmierung, Quasi-Trockenbearbeitung, Mindermengenschmierung oder Mindermengenkühl schmierung [DGUV10, WL03, KLOC00, WEIN99, KG98].

Die VDI-Richtlinie 3397 bezeichnet Kühl schmierv erfahren mit kurzzeitigem Maximaldurchsatz von KSS unter 150 ml/h bei durchschnittlich weniger als 50 ml/h als Minimalmengenschmierung. Verfahren mit durchschnittlichen Durchsätzen unter 2 l/h unter dem Begriff Mindermengenschmierung zusammengefasst. [VDI07]

DIN 69090-1 definiert MMS als „Einsatz von MMS-Medium, das sich in der Bearbeitung nahezu vollständig verbraucht.“ und merkt an, dass die eingesetzte Menge des Mediums sich nach dem Prozess richtet. Im Gegensatz zur Nassbearbeitung ist die MMS-Bearbeitung eine Verlustschmierung. Ein MMS-Medium ist als „Öl-Luft-Gemisch (z. B. Aerosol), das an die Werkzeugwirkstelle zugeführt wird“ definiert. Somit setzt das DIN bei MMS-Nutzung den Einsatz von (Druck-)Luft voraus. [DIN11]

Da insbesondere Arbeiten neueren Datums die Bezeichnung *Minimalmengenschmierung* (engl.: *Minimum Quantity Lubrication*) verwenden, gilt im Rahmen der vorliegenden Arbeit der vom DIN definierte Begriff [ABEL12b, BOUB12, DGUV10, KALH08, DHK05].

Analog zur Nassbearbeitung wird auch bei MMS innere von äußerer Zufuhr unterschieden. Beim Transport des Mediums sind derzeit zwei unterschiedliche Technologien im Einsatz: Bei der 1-kanaligen Zufuhr wird das Aerosol vorab gemischt und mittels Drehdurchführung durch die Werkzeugspindel geführt. Beim 2-kanaligen Konzept wird die Luft durch die Drehdurchführung und das Öl durch eine Lanze innerhalb dieser gefördert. Erst vor der Werkzeugaufnahme werden beide Stoffe gemischt und ein Ölfilm durch die Kühlkanäle des Werkzeugs transportiert (vgl. Abbildung 3.6). [BIEL13, GÜHR12, KK05] Zur Anwendung kommt hierbei das Venturi-Prinzip [SPUR10]. Der Hersteller *bielomatik Leuze GmbH + Co. KG* (bielomatik) ist derzeit der einzige Anbieter von 2-Kanal-MMS-Technologie am Markt [JÄKE10].

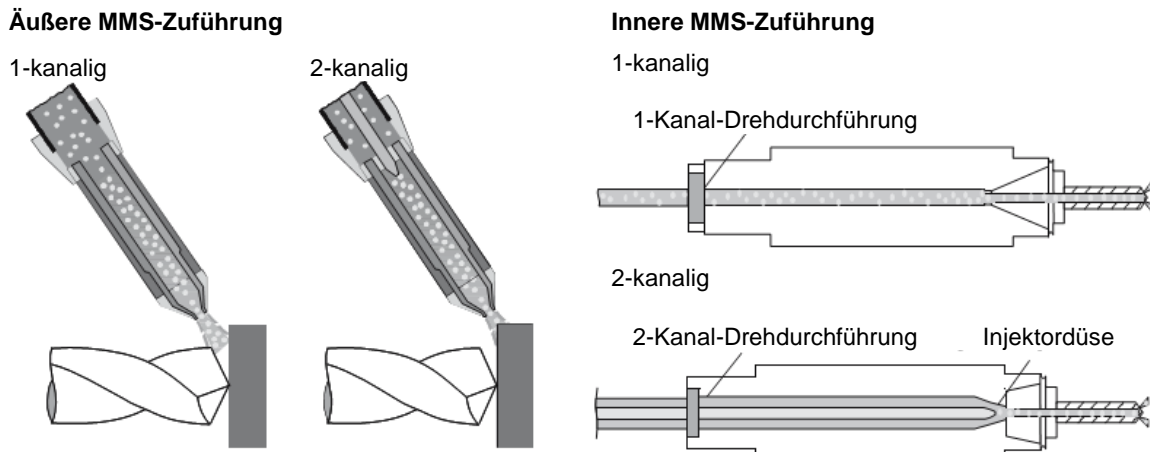


Abbildung 3.6: Äußere und innere Zuführung von MMS-Medium [KK05]

Die genannten Zufuhr- und Transportvarianten kommen abhängig von Anwendungsfall zum Einsatz. Tabelle 3.1 und Tabelle 3.2 stellen die Vor- und Nachteile jeweils gegenüber. Die äußere Zufuhr eignet sich insbesondere zum Nachrüsten in vorhandene WZM, weist jedoch im Prozess Nachteile gegenüber einer Zufuhr durch das Werkzeug auf. So ist eine Einbindung in einen automatisierten Prozess mit wechselnden Werkzeuglängen und -durchmessern aufgrund der starren externen Düsen nur mit erhöhtem Aufwand möglich. Zudem ist sie mit Sprüh- und Streuverlusten verbunden. [SUN05, WISW04] Die im Vergleich zu drehenden oder fräsenden Verfahren erschwerte Spanabfuhr erfordert bei Bohrbearbeitung zusätzlich (oder ausschließlich) innere Zufuhr eines Minimalmengenkühlschmierstoffs [DGUV10, WEIN99]. Zur Optimierung der Aerosolströmung bei innerer Zufuhr hat sich eine kegelförmige Gestaltung des Werkzeugchaftendes durchgesetzt. In Verbindung mit einem als entsprechendes Gegenstück geformten Übergaberohr werden geometrische Toträume, die zu lokaler Ansammlung von MMS-Medium führen, weitgehend eliminiert. [HG03b]

Tabelle 3.1: Vergleich von äußerer und innerer Zufuhr nach [DGUV10]

Kriterium	Äußere Zufuhr	Innere Zufuhr
Kosten	+ Geringere Investitionskosten + Kein Einsatz spezieller Werkzeuge erforderlich	– Höhere Investitionskosten – Einsatz spezieller Werkzeuge erforderlich
Nachrüstbarkeit	+ Geringer Nachrüstaufwand an konventionellen WZM	– Höherer Nachrüstaufwand sofern grundsätzlich an WZM möglich
Automatisierung	– Begrenzte Einstellmöglichkeiten an versch. Werkzeuglängen und -durchmesser – Schwer zugängliche Bearbeitungsstellen nicht schmierbar	+ Schmierung der Bearbeitungsstelle für jedes Werkzeug anpassbar + Schmierung auch an schwer zugänglichen Bearbeitungsstellen möglich
Wirkung	– Mögliche Streuverluste und Abschattungseffekte des Sprühstrahles	+ keine Streu- oder Sprühverluste

Tabelle 3.2: Vorteile 1- und 2-kanaliger MMS-Zufuhr nach [BIEL13, GÜHR12, ABEL12b, DGUV10]

Vorteile 1-Kanal-Systeme	Vorteile 2-Kanal-Systeme
+ Einfachere Installation und Bedienung	+ Geringere Reaktionszeit, da Aerosolmischung in WZ-Aufnahme, hochdynamische Prozessanpassung
+ Geringerer Nachrüstaufwand an konventionellen WZM	+ Prozessspezifisch einstellbare Ölmengen unabhängig vom Luftdurchsatz
+ Verwendung konventioneller Drehdurchführungen (trockenlaufgeeignet) und Werkzeugaufnahmen möglich	+ Keine Verschmutzung von Fixierflächen & Spindel bei WZ-Wechseln durch getrennte Medienzufuhr
+ Einfache Ansteuerung von Werkzeugparametern	+ Ölmenge prozessbegleitend messbar
+ Umschaltung zwischen Nass- und MMS-Bearbeitung möglich	+ Hohe Spindeldrehzahlen ohne Risiko der Entmischung möglich
+ Aufteilen des Aerosolstroms auf mehrere Spindeln möglich	+ Höhere Schmierstoffviskositäten möglich
+ Wartungsarm, da keine Verschleißteile	+ Geringere Werkzeugdurchmesser möglich durch geringere erforderliche Kühlkanalquerschnitte
+ Geringere Anschaffungskosten	

Auch 1-Kanalssysteme sind zum Nachrüsten gut geeignet, da lediglich der Einbau eines Aggregates erforderlich ist [BOUB12, FRÖH10, KK05]. Sie ermöglichen auch die Aufteilung des Aerosolstroms auf mehrere Spindeln und sind bei abwechselndem Betrieb der WZM mit KSS- und MMS-Schmierstoffen einfach zu deaktivieren [ABEL12b]. Nachteilig sind unter anderem die vergleichsweise träge Anpassbarkeit des Aerosolgemisches, die eingeschränkte Schmiermittelauswahl mit Viskositäten bis $\nu = 50 \text{ mm}^2/\text{s}$ und die Gefahr der Aerosolentmischung bei verwinkelten Zufuhrkanälen oder hoher Drehzahl [DGUV10, KONO02]. Ferner gestaltet sich die Messung der Durchflussmenge als aufwändig [SCHN08].

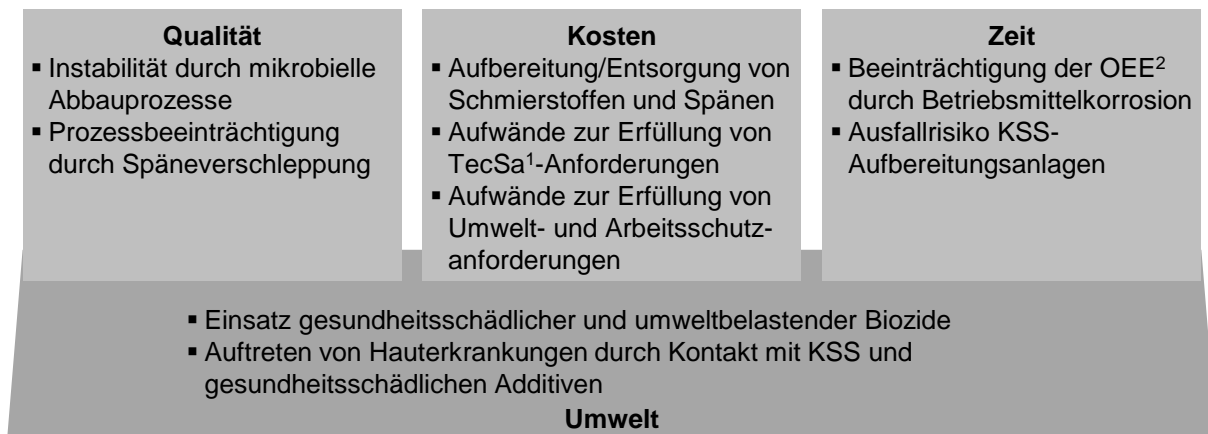
Diese Nachteile werden bei der 2-Kanaltechnologie durch getrennte Zufuhr der Prozessmedien und ihrer Mischung in geringer Entfernung zur Wirkstelle vermieden. Der Aufwand zur Implementierung in eine Werkzeugmaschine ist allerdings vergleichsweise aufwendig und separat je Spindel erforderlich. [ABEL12b, GÜHR12, DGUV10]

3.2.4 Gegenüberstellung der vorgestellten Kühlschmierstrategien

Beim Einsatz von KSS ergeben sich verschiedene Problemfelder, die zu Mehrkosten und -aufwänden führen. Eine Zusammenfassung dieser in Bezug auf Nassbearbeitung gibt Abbildung 3.7.

Die Wiederverwendung aufbereiteter KSS ist demnach mit Kosten für Fläche, Personal, Betriebs- und Hilfsstoffe sowie Betriebsmittel verbunden, birgt Qualitätsrisiken und beeinflusst die Gesamtanlageneffektivität (engl.: *Overall Equipment Effectiveness*, kurz: OEE). Hohe Auflagen bei der Entsorgung nicht wiederverwendbarer KSS und Verluste im Prozess durch Verdunstung und Verschleppung erhöhen den Aufwand zusätzlich. Zudem bieten wassergemischte KSS einen Nährboden für Mikroorganismen, die – neben den konventionellen Bestandteilen der KSS – ein Gesundheitsrisiko für Mitarbeiter darstellen. Infektionsgefährdung geht hauptsächlich von Bakterien aus, Schimmelpilze und Hefen können nach Kontakt mit dem menschlichen Organismus

(Sensibilisierung) Allergien verursachen. Eine Aufnahme der Schadstoffe in den Körper kann nicht nur über Hautkontakt sondern auch inhalativ, über den Magen-Darm-Trakt, durch Verletzungen der Haut oder über Schleimhäute erfolgen. So kann etwa das Abblasen von KSS kurzzeitig zu hohen mikrobiellen Belastungen in der Umgebungsluft führen. [DGUV11a, BMU09] Der Befall mit Mikroorganismen beeinträchtigt außerdem unter anderem die Leistungsfähigkeit von KSS: Folgen des Verzichts auf Biozide sind beispielsweise steigender Werkzeugverschleiß oder die Verstopfung von Filterelementen. [BRIN15, MEYE11] Bei innerer Zufuhr sind im Produktionsumfeld in der Regel Hochdruckpumpen im Einsatz, die Bestandteil der WZM sind und die Leistungsaufnahme der Maschine erhöhen [GREB11]. Eine Senkung des Energiebedarfs ist durch Einsatz von Frequenzumrichtern möglich, aber mit Investitionskosten verbunden [ABEL13].



¹ Technische Sauberkeit ² Overall Equipment Effectiveness

Abbildung 3.7: Problemfelder beim Einsatz von KSS, insbesondere bei Nassbearbeitung. Inhalte nach [VDA14, BOUB12, KUCH12, DGUV11a, KK05, LUTH01, WEIN99].

Die MMS weist in dieser Beziehung Vorteile gegenüber der Nassbearbeitung auf: So sinken etwa Kosten, Personal-, Material-, Flächen- und Energiebedarf durch Entfall von KSS-Aufbereitungsanlagen und -Entsorgung sowie einiger Reinigungs- und Trocknungsprozesse (vgl. Abbildung 3.8).

Der Verzicht auf wässrige Bestandteile reduziert die Betriebsmittelkorrosion sowie die Belastung durch Mikroorganismen und verringert die Gesundheitsrisiken für Mitarbeiter [ABEL12b, DGUV10, WIEL05, WEIN99]. Der Einsatz geringerer KSS-Mengen oder gar der vollständige Verzicht auf diese ist allerdings mit Einschränkungen verbunden: Durch den Wegfall wässriger Komponenten sinkt die Kühlleistung, die Reduzierung des Schmiermitteleinsatzes verringert die Schmierwirkung und durch den gesunkenen KSS-Durchsatz wird die Spanabfuhr erschwert. Das führt zur Zunahme thermischer und mechanischer Belastung der Materialien, was sich nachteilig auf die Werkzeugstandzeit, Bauteil- und Maschinengenauigkeit auswirkt. [KK05, ZIEL96] Detaillierte Ausführungen zu den thermomechanischen Prozessen bei Trockenbearbeitung und MMS liefern Al Jourdi und Biermann et al. [ALJO12, BIER12].

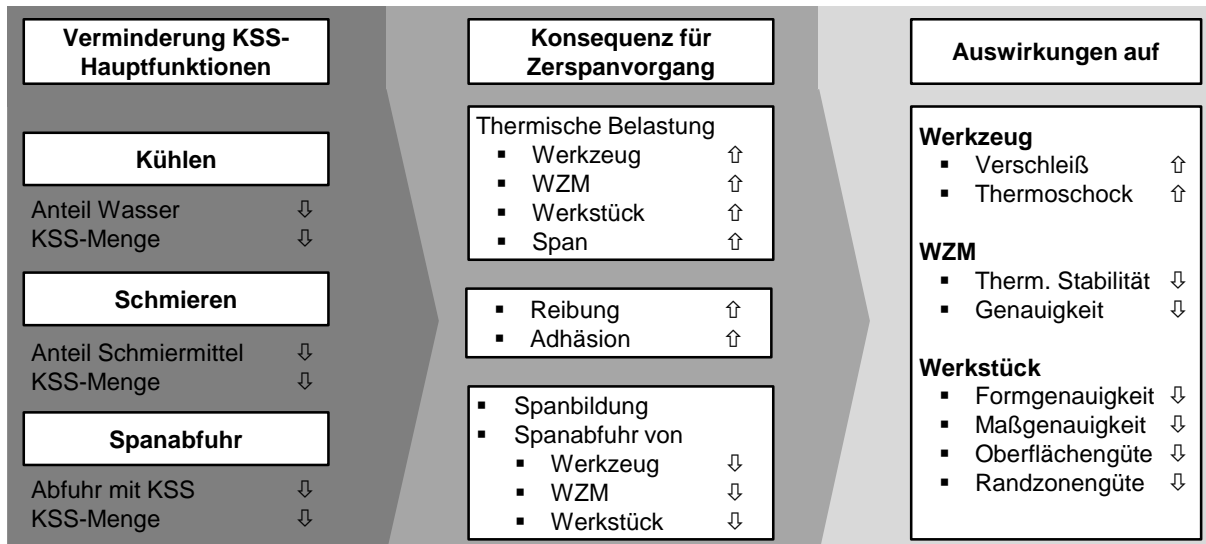


Abbildung 3.8: Auswirkungen der Verminderung der KSS-Hauptfunktionen auf den Zerspanvorgang in Anlehnung an [KG98]

Den genannten Kostenvorteilen stehen erhöhte Werkzeugkosten und Druckluftbedarf, Zusatzaufwände bei der Maschinenreinigung sowie erhöhte Bedienungs- und Überwachungsanforderungen entgegen [ABEL12b, DGUV10, UHLM02]. Die ungenügende Bindung brennbarer Metallspäne und -stäube im Arbeitsraum sowie die Entstehung lungengängiger KSS-Dämpfe und -Aerosole im Arbeitsbereich birgt zudem Brand-, Explosions- und Gesundheitsrisiken [DGUV11b, DGUV10, WEIN99].

Durch entsprechende Gegenmaßnahmen lassen sich diese Nachteile teilweise oder vollständig beseitigen. So vermögen Werkzeugbeschichtungen auf TiN- oder AlN-Basis und MMS-Medien mit erhöhter Schmiereigenschaft die durch Reibungs- und Adhäsionsvorgänge entstehende thermische Belastung an der Zerspanstelle zu verringern. [BIER11, PAUC08, KK05, KLOC00, KG98] Hochgeschwindigkeitszerspannung (engl.: *High Speed Cutting*, kurz: HSC,) senkt den Wärmeeintrag zusätzlich durch Verringerung der Kontaktzeiten an der Wirkstelle. Auch Werkzeugoptimierungen zur Reduzierung der Schnittarbeit vermindern die Temperaturbelastung. [BIER13, FRÖH10, KK05, HG03a, HG03b, WEIN99, WEIN96] Alternative Möglichkeiten zur Spanabfuhr über Späneleitbleche, Späneförderer, Absaugung oder Druckluft sind mittlerweile Stand der Technik. Der Einsatz von Späneförderern gestaltet sich im Bereich kurzer Strecken energieeffizienter als die Nutzung pneumatischer Systeme. [DGUV10, WIEL05, HEIS04, KONO04, STOL02, WECK96]

3.2.5 Anwendungsgebiete der MMS bei spanender Bearbeitung von Aluminiumwerkstoffen

Tabelle 3.3 zeigt die Anwendungsgebiete für den Einsatz von MMS bei spanender Bearbeitung von Aluminiumlegierungen und die nach Stand der Technik zum Einsatz kommenden Beschichtungstypen.

So ist die Prozessfähigkeit der MMS-Technologie für das Drehen, Sägen, Fräsen, Bohren, Tieflochbohren und weitere im Motorenbau zum Einsatz kommende Verfahren mit definierter Schneide bestätigt worden [PAUC08, KK05, TT02, WESS01, WEIN99]. Verfahren mit geometrisch undefinierter Schneide und Bohroperationen mit Durchmessern unter 2 mm und Werkzeuglängen über dem 75-fachen Durchmesser weisen der MMS-Technologie derzeit die Grenzen auf [ABEL12b].

Aufwände und Wirtschaftlichkeit des MMS-Einsatzes sind fallspezifisch zu bewerten: Obgleich zahlreiche Praxisbeispiele das Potenzial der Technologie aufzeigen [KALH08, BOUB12, TT02], schränken Umsetzungshemmnisse die Verbreitung insbesondere bei sogenannten kleinen und mittleren Unternehmen ein. Neben den genannten Nachteilen beim Einsatz der MMS sind in diesem Zusammenhang insbesondere ungenügendes Wissen, höherer Engineering-, Qualitätssicherungs- und Wartungsaufwand zu nennen. [ABEL12b, MARK08, KALH06, MOSE05]

Tabelle 3.3: Anwendungsgebiete der MMS-Technologie bei Aluminiumwerkstoffen nach [KALS11, PAUC08, ALLE08, KK05, WESS01, CEME12]

Werkstoff	Aluminiumgusslegierungen		Aluminiumknetlegierungen	
	Schmierung	Beschichtung	Schmierung	Beschichtung
Drehen	MMS, TB	TiB ₂	MMS, TB	TiN, TiB ₂
Sägen	MMS	TiN	MMS	TiN
Fräsen	MMS, TB	TiN + MoS ₂ , TiB ₂	MMS	–
Bohren	MMS	TiN, TiB ₂ , AlN	MMS	–
Tieflochbohren	MMS	TiN, TiB ₂ , AlN + MoS ₂	MMS	
Gewinde-schneiden	MMS	TiN	MMS	–
Gewinde-formen	MMS	CrN, WC/C (Wolframcarbid/ Kohlenstoff)	MMS	–
Reiben	MMS	TiN, AlN + PKD (polykristalliner Diamant)	MMS	–
Räumen	–	–	MMS	–
Wälzfräsen	–	–	–	–

Bereits in frühen Phasen können z. B. folgende Fragestellungen zu einer Entscheidungsfindung hinsichtlich des MMS-Einsatzes beitragen [EIME14, TT02]:

- Sind alle Arbeitsgänge auf einer Maschine trocken realisierbar?
- Sind Bestandsmaschinen mit evtl. bestehender KSS-Versorgung vorhanden?
- Welche Auswirkungen hat MMS-Einsatz auf Bearbeitungszeit, Werkzeugstandzeit und Qualität?
- Sind zusätzliche (Reinigungs-)Prozessschritte erforderlich?

In der Automobilindustrie ist MMS bereits in diversen Produktionslinien für Zylinderköpfe, Kurbelgehäuse, Pleuel, Kurbelwellen, Radträger, Getriebegehäuse und weitere

Bauteile im Einsatz. Bei den deutschen Standorten haben die *Volkswagen AG* (Volkswagen), die *Daimler AG* (Daimler) und die *Ford Motor Corporation* die Vorreiterrolle inne. [EMUG13, FORD13, ABEL12b, MAPA12, KORN10, FSA07, SSK05, STOL04]

3.3 Einfluss der Werkstoffeigenschaften von Aluminiumgusslegierungen auf den Zerspanprozess mit MMS

Seit 1990 ist die durchschnittlich verbaute Menge von Aluminium in PKW aus europäischer Produktion von 50 kg auf über 140 kg angestiegen, einzelne Fahrzeuge aus dem Premiumsegment wie Audi A8, Jaguar XJ oder Range Rover weisen Anteile von über 500 kg auf. Komponenten des Antriebsstrangs machen hierbei im Schnitt 36 Prozent des Mengenanteils aus (vgl. Abbildung 3.9). [EAA13]

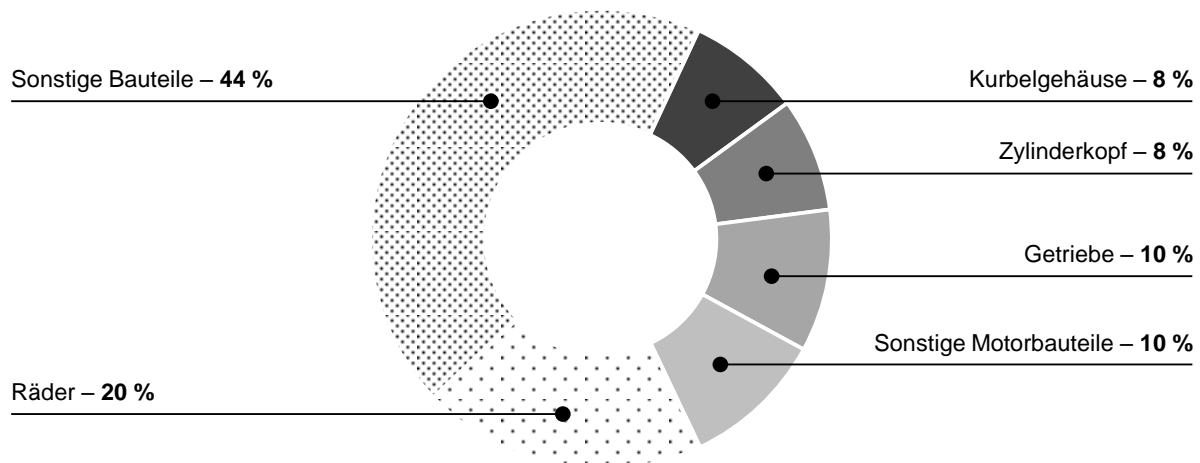


Abbildung 3.9: Mengenverteilung von Aluminium in Fahrzeugen aus europäischer Fertigung in Anlehnung an [EAA13]

Grund für den zunehmenden Einsatz von Aluminiumkomponenten sind u.a. Bestrebungen zur Erhöhung der Energieeffizienz durch Gewichtseinsparung, um die je nach Staat bis 2020 bzw. 2025 stark reduzierten CO₂-Ausstossgrenzwerte zu erreichen (vgl. Abbildung 3.10) [ICC14, EAA13, OSTE07].

Wie [SCHÖ03] zeigt, wirken sich Gewichtsreduktionsmaßnahmen bei PKW verglichen mit LKW bis zu zehnfach auf den Kraftstoffverbrauch aus und sind bei diesen Produkten daher entsprechend verbreitet.

Auch bei hochbeanspruchten Motorbauteilen wie Zylinderköpfen oder Kurbelgehäusen kommt Aluminium zum Einsatz. Verwendet werden vorwiegend Gusslegierungen der Legierungsgruppen Al-Si-Mg und Al-Si-Cu. Hintergrund sind eine gute Vergießbarkeit, günstige thermophysikalische Eigenschaften und gute statische Werkstoffkennwerte wie Zugfestigkeit und Duktilität bei geringerem Bauteilgewicht im Vergleich zu Graugusswerkstoffen. [TFKL07, KLAN04] Als nachteilig erweisen sich ungünstigere mechanische Eigenschaften und ein suboptimales Dämpfungsverhalten,

welche durch Variation von Legierungsanteilen kompensierbar sind. Die Eigenschaften komplexer Bauteile aus Al-Si-Legierungen hängen in hohem Maße vom Herstellungsprozess und der thermischen Beanspruchung ab, weshalb die Auslegung anhand komplexer Modelle erfolgt. [MICH12, DEMI09, TFKL07] Derzeit sind die Materialien AlSi7MgCu0,5 und AlSi6Cu4 im Motorenbau stark verbreitet [KHT08].

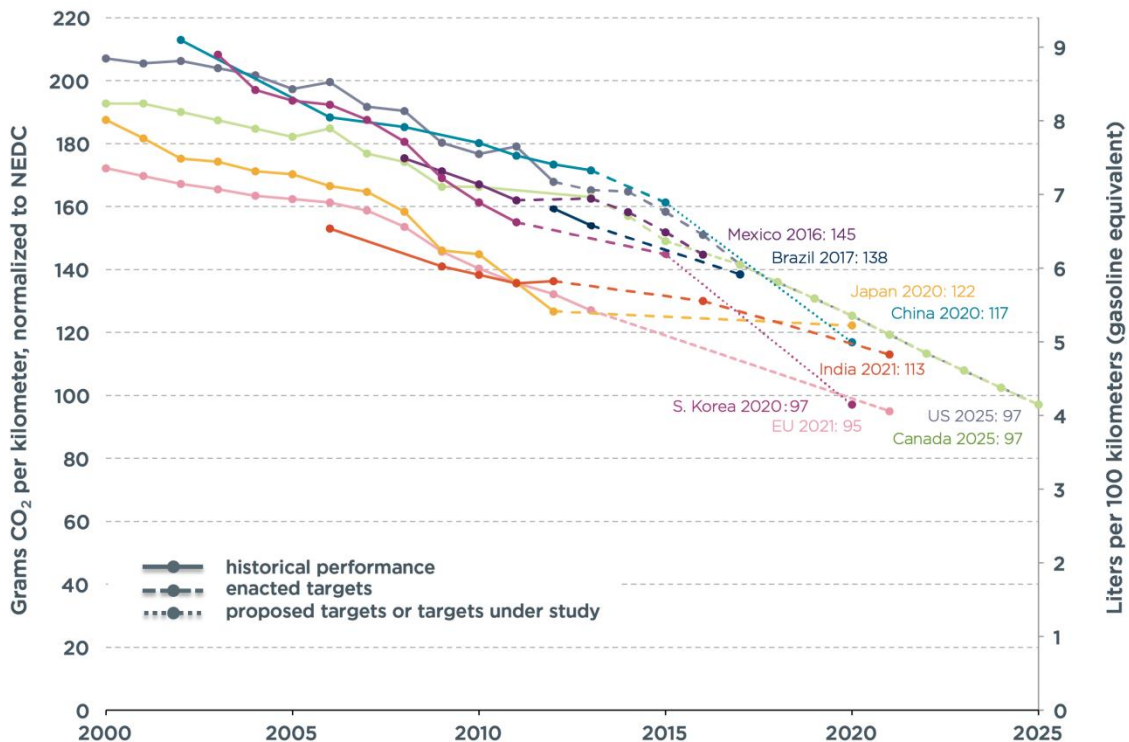


Abbildung 3.10: Entwicklung von CO₂-Emissionen und Kraftstoffverbrauch von PKW im NEFZ (engl. NEDC) [ICC14]

Ihre spannende Formgebung zeichnet sich verglichen mit Stahlwerkstoffen im Allgemeinen durch geringe Schnittkräfte und hohe Werkzeugstandzeiten bei hohen Schnittgeschwindigkeiten und somit hoher Produktivität aus [OSTE07]. Aluminium weist im Vergleich zu Stahl eine etwa zweifache Wärmeausdehnung und spezifische Wärmekapazität, zwei- bis dreifache Wärmeleitfähigkeit sowie einen deutlich niedrigeren Schmelzpunkt bei ca. 660°C (Stahl: ca. 1.450°C) auf. Das führt bei erhöhter thermischer Beanspruchung an der Bearbeitungsstelle zu Scheinspannbildung. [DUBB14, OSTE07] Häufigste Ursachen für den Verschleiß der verwendeten Schneidstoffe sind Abrieb durch Hartpartikel des Gefüges, die Bildung von Aufbauschneiden und Verklebungen mit dem Werkzeug (vgl. Abbildung 3.11) sowie das Auftreten langer Spanformen [SONG11, ROY09, OSTE07, TASH06, YH99]. Abhilfe schafft der Einsatz geeigneter KSS und Schneidenbeschichtungen (vgl. auch Tabelle 3.3) [KK05, ZIMM98, BART96].

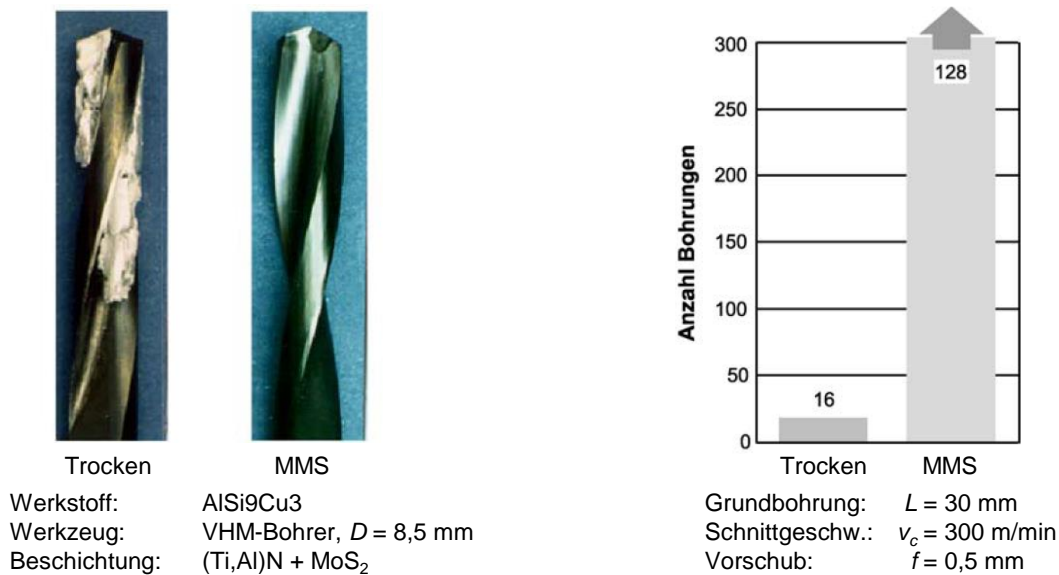


Abbildung 3.11: Bohren von Aluminium mit und ohne MMS [KK05]

3.4 Anforderungen flexibler Fertigungssysteme für Aluminiumbauteile an den Einsatz der MMS

FFS für die spanende Produktion sind Mehrmaschinensysteme, in denen die Bearbeitung in numerisch gesteuerten, lose verketteten Einzelmaschinen erfolgt (vgl. Abbildung 3.12).

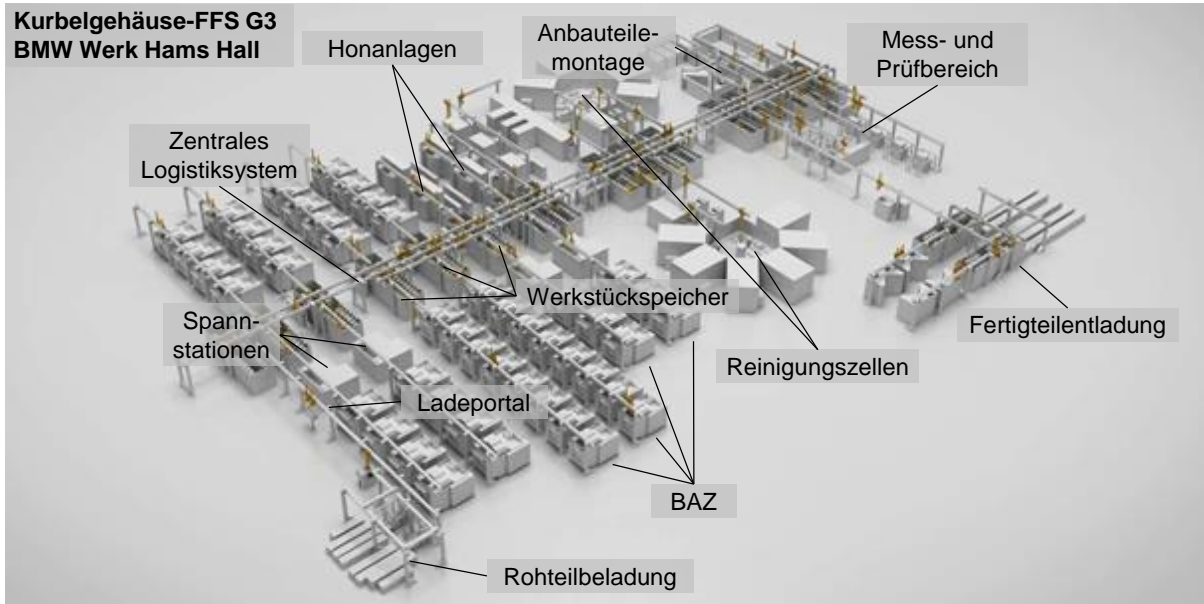


Abbildung 3.12: FFS der BMW Group mit automatisiertem Werkstück- und Werkzeugfluss
(Bildquelle: Felsomat GmbH & Co. KG)

Flexibilität beschreibt in diesem Kontext die Fähigkeit, sich schnell und mit geringem finanziellem Aufwand an Veränderungen anzupassen. Diese werden durch vorgehaltene Maßnahmen ermöglicht und von planungsseitig definierten Korridoren begrenzt. [ABEL06] Nach dieser und weiteren Quellen lassen sich folgende Flexibilitätsarten zusammenfassen [RAUC13, SLAM04, WITT03, SCHM92]:

- Variantenflexibilität: Fähigkeit zur Bearbeitung mehrerer Varianten
- Stückzahlflexibilität: Fähigkeit der Anpassung der Ausbringungsmenge
- Technologieflexibilität: Fähigkeit zum Einsatz mehrerer Technologien
- Nachfolgefähigkeit: Fähigkeit zur Bearbeitung neuer/überarbeiteter Varianten
- Interne/externe Flexibilität: Möglichkeit der Umstellung des Systems ohne Variierung von Systemkonfiguration (intern; z.B. Programmierung) oder Systemkomponenten (extern; z.B. Bearbeitungsmaschinen)

Die Bearbeitungsstationen innerhalb des Systems können sich hinsichtlich der Fertigungsaufgabe ersetzen oder ergänzen. Sich ersetzende, redundante Maschinen erfüllen ein identisches Spektrum an Bearbeitungsaufgaben und reduzieren so die Auswirkungen von Störungen einzelner Stationen auf das Gesamtsystem. Sich ergänzende Maschinen erweitern das Spektrum möglicher Bearbeitungsaufgaben um weitere Aufspannlagen, Werkzeuge oder durch abweichende Arbeitsraumdimensionen. In der Regel kommen mit BAZ Einzelmaschinen zum Einsatz, die durch ihre hohe Technologieflexibilität eine erhöhte interne und externe Flexibilität ermöglichen. Sie werden in der Regel durch eine geeignete Peripherie zur automatisierten Versorgung mit Werkstücken und Werkzeugen sowie zur Reinigung, Messung oder Bauteilspeicherung ergänzt. Die einzelnen Systemkomponenten werden von einem Zentralrechner für Werkstück- und Werkzeugtransportsysteme sowie NC- und Betriebsdatenhandhabung bzw. -erfassung (BDE) gesteuert. Dieser wird als Fertigungsleitsystem oder Produktionssteuerungssystem (PSS) bezeichnet. Im Gegensatz zu (flexiblen) Transferstraßen (vgl. Tabelle 3.4) ist ein ungerichteter Transport innerhalb der Fertigungslinie möglich: Bearbeitungseinrichtungen lassen sich unabhängig von der räumlichen Anordnung in beliebiger, nichtlinearer Reihenfolge ansteuern. Flexible Spannmechanismen wie z. B. der Einsatz von Adapterplatten ermöglichen die automatische Spannung einer Vielfalt an Werkstückvarianten, die durch die geometrischen Bedingungen der Bearbeitungsmaschinen und ihre Bestückbarkeit mit Werkzeugen begrenzt werden. Dies resultiert in einer erhöhten Varianten-, Nachfolge- und Stückzahlflexibilität: Eine Produktion variabler Losgrößen bis hin zur Grenzlosgröße eins wird möglich. FFS kommen somit zum Einsatz, wenn aufgrund von großem Bauteilspektrum, hoher Bauteiländerungsrate und stark variierendem Produktionsprogramm erhöhte Flexibilität gefordert ist. [WEST07, WECK06a, WECK05, TEMP93]

Je nach Ausbaustufe weisen FFS folgende, zusätzliche Einrichtungen auf [WEST07]:

- Werkstück- und Palettenwechselsysteme
- Werkzeug- und Werkzeugmagazinwechsler
- Puffer- und Lagersysteme
- Automatisierte Werkstückreinigung und -messung sowie Fehlererkennung
- On-Line-Betriebsdatenerfassung

- Rechnergestützte Steuerung von Transporten und Gesamtsystem sowie Kapazitäts- und Terminierungsrechnung
- Hilfsstoffver- und Entsorgung, Späneförderung

Eine Gegenüberstellung der möglichen Ausprägungen von Mehrmaschinensystemen mit Fokus auf FFS zeigt Tabelle 3.4.

Tabelle 3.4: Gegenüberstellung der Ausprägungen von Mehrmaschinensystemen in Anlehnung an [WEST07, WECK05]

Mehrmaschinensystem	Transferstraße	Flexible Transferstraße	Flexibles Fertigungssystem
Materialfluss	Gerichtet, linear	Gerichtet, parallel	Ungerichtet
Verkettungsart	Starr	Kombination von Lose und Starr	Lose
Arbeitsfortschritt	Getaktet	Nicht getaktet	Nicht getaktet
Spezialisierungsgrad der WZM	Hoch, Einzweckmaschinen	Gering, mehrachsige BAZ	Gering, mehrachsige BAZ
Position der Arbeitsräume	Unmittelbar im Materialfluss	An den Materialfluss gekoppelt	An den Materialfluss gekoppelt
Produktivität	Hoch, kurze Transportwege	Mittel, zusätzl. Wege durch Parallelfertigung	Mittel, zusätzl. Wege durch Parallelfertigung
Flexibilität	Gering, hoher Spezialisierungsgrad	Mittel, Werkstückänderungen und Anlagenerweiterungen möglich	Hoch, Maschinenredundanz und ungerichteter Materialfluss

Hohe Prozessfähigkeit und Zuverlässigkeit der Maschinen, hohe Verfügbarkeit, geringstmögliche Haupt-, Neben und Rüst- bzw. Span-zu-Span-Zeiten und Betriebskosten sind Kernanforderungen heutiger Produktionssysteme. Die Prozessfähigkeit einer WZM basiert auf der Maschinenfähigkeit. Sie erfordert geometrisch stabiles Verhalten mit hoher Unempfindlichkeit gegenüber Änderungen des Betriebszustandes und äußerer Einflüsse auch bei betrieblicher Nutzungsdauer über mehrere Jahre. [HODA97] Beim Einsatz von MMS ist daher schnelle und vollständige Späne- und Metallstaubbefreiung aus dem Arbeitsraum entscheidend: Späneansammlungen z. B. an Werkstücken und Spannvorrichtungen können durch erhöhten Wärmeverzug zu Maßungenauigkeiten sowie Form- und Lagefehlern am Werkstück führen. Dies kann durch steil angeordnete Wandungen mit mindestens 35° zur Horizontalen, glatte und unlackierte Oberflächen, Vermeidung von Hinterschneidungen, Ecken und waagerechten Flächen vermieden werden. Auch eine thermische Entkopplung von Innenraumverkleidung und Maschinengestell vermindert einen thermischen Verzug der Maschine. Eine Überkopfbearbeitung des Werkstücks oder die Nutzung von Werkstückschwenkachsen zum Auskübeln verbleibender Späne ist ebenfalls von Vorteil. Komponenten der Maschine und Dichtungen sind resistent gegenüber Metallstäuben und den eingesetzten MMS-Medien auszulegen. [DGUV10, SSK05, REIC02]

Der mit geringem Personaleinsatz einhergehende hohe Automatisierungsgrad von FFS erfordert zudem automatisierte Maschinenfunktionen wie Werkzeugstandzeitüberwachung, Werkzeugbruch- und Werkzeugverschleißüberwachungssysteme. Die Qualitätssicherung erfolgt u.a. durch automatisierte Werkstückmessung nach Gesichtspunkten der statistischen Prozesslenkung (engl.: *Statistical process control*, kurz: SPC) in Kombination mit der Bauteilrückverfolgungsfunktion des PSS. Das ermöglicht eine automatische Sperrung von Bearbeitungsstationen, die von einem negativen SPC-Messergebnis betroffen sind und sämtlichen Bauteilen, die auf dieser bearbeitet wurden. Um Schäden an Maschinen und damit verbundene zeitaufwändige und kostspielige Systemausfallzeiten zu vermeiden, sind Diagnosesysteme zur Maschinenzustandserfassung mit Teleservice hilfreich: Störungen können auf diese Weise schnell und kostensparend durch die betriebseigene Instandhaltung oder Servicetechniker des WZM-Herstellers behoben werden. [WECK06a, WECK06b, WECK05]

Die prozesssichere Verwendung von MMS erfordert bei FFS zudem eine automatisierte, werkzeug- und werkstückspezifische Anpassung von Schmiermittelmenge, Luftdruck und Zeitpunkt der Medienverfügbarkeit an der Zerspanstelle sowie eine kontinuierliche, unterbrechungsfreie Zufuhr des Schmierstoffmediums. Die Systemzuverlässigkeit kann durch automatisierte Überwachung von MMS-Mittelfüllstand, Medien-transport und Druckluft weiter erhöht werden. [DGUV10, HORN97]

4 Wissensbasierte Systeme in der Neuplanung spanender Fertigungssysteme

Wissensmanagementansätze gewinnen in der Fabrikplanung zunehmend an Bedeutung [CLAU13, TIED05]. Dies spiegelt sich u.a. in ihrer expliziten Erwähnung in der VDI-Richtlinie 5200 wider. [VDI11] Als Grundlage zur Diskussion der verschiedenen Ansätze werden zunächst die zentralen Begriffe des Wissensmanagements erläutert. Anschließend erfolgt eine Betrachtung ausgewählter Wissensmanagementmethoden, die in wissensbasierten Systemen zur Anwendung kommen. Den Abschluss bildet die Vorstellung wissensbasierter Systeme im Kontext von Fabrikplanung und Produktion.

4.1 Grundlagen des Wissensmanagements

Das Wissensmanagement ist Gegenstand verschiedenster Wissenschaftsdisziplinen. Daher sind die in der Literatur verfügbaren Beiträge entsprechend breit gefächert. [HÖHN11, ML94] Nachfolgend werden zentrale Begriffe des Wissensmanagements definiert und die in der Fachliteratur gebräuchlichsten Ansätze diskutiert.

4.1.1 Begriffe

Das zentrale Element des Wissensmanagements ist der Begriff des **Wissens**, der in Literatur und Praxis teilweise kontrovers verwendet wird [ML94]. Obwohl er mittlerweile neben Arbeit, Boden und Kapital als wesentlicher Produktionsfaktor gilt, fehlt in der Organisations- und Managementlehre eine eindeutige Begriffsdefinition [FREY13, TIED05]. Umgangssprachlich findet eine synonyme Verwendung der Begriffe „*Information*“ und „*Kenntnis haben*“ statt [DENK05].

Rehäuser und Krcmar grenzen die Begriffe informationstheoretisch ab: Die Grundlage ihres Ansatzes bilden **Zeichen**, die sich aus einem definierten Zeichenvorrat ergeben. Durch Ablegen dieser in geordneter Struktur (Syntax), entstehen **Daten**, die eingebunden in einen Kontext und mit entsprechender Bedeutung versehen (Semantik) zu Informationen führen. Wissen definieren sie als die Verknüpfung von **Informationen**. [RK96] North führt diesen Ansatz mit seinem vielzitierten [FREY13, JASP08] Konzept der Wissenstreppe bis hin zur Wettbewerbsfähigkeit eines Unternehmens fort und stellt es in einen Kontext zum Wissensmanagement (vgl. Abbildung 4.1). [NORT11, NORT05]

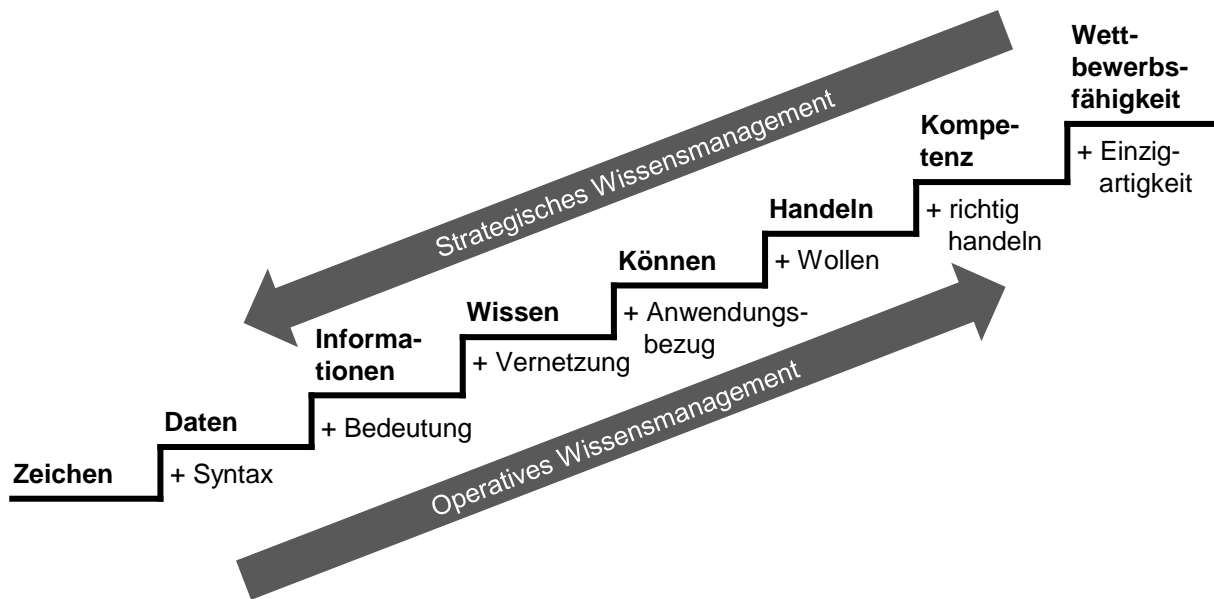


Abbildung 4.1: Wissenstreppe nach [NORT11, NORT05]

Nonaka und Takeuchi differenzieren den Wissensbegriff weiter und unterscheiden zwischen implizitem und explizitem Wissen. Einen Überblick bietet Tabelle 4.1. [NT97]

Tabelle 4.1: Implizites und explizites Wissen in Anlehnung an [NT97] und [FREY13]

Implizites Wissen Personenbezogen	Explizites Wissen Nicht personenbezogen
Erfahrungswissen (Körper)	Verstandswissen (Geist)
Gleichzeitiges Wissen (hier und jetzt)	Sequentielles Wissen (da und damals)
Analoges Wissen (Praxis)	Digitales Wissen (Theorie)

Probst et al. greifen die genannten Ansätze auf und definieren Wissen als „Gesamtheit der Kenntnisse und Fähigkeiten, die Individuen zur Lösung von Problemen einsetzen. Dies umfasst sowohl theoretische Erkenntnisse als auch praktische Alltagsregeln und Handlungsanweisungen. Wissen stützt sich auf Daten und Informationen, ist im Gegensatz zu diesen jedoch immer an Personen gebunden. Es wird von Individuen konstruiert und repräsentiert deren Erwartungen über Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge.“ [PROB10] Diese zusammenfassende Definition findet im Rahmen der vorliegenden Arbeit Verwendung.

Analog zum Begriff des Wissens ist auch das **Wissensmanagement** nicht eindeutig definiert. Neben dem bereits erwähnten Ansatz von North existieren in der Fachliteratur zahlreiche Ausführungen. Willke bezeichnet es etwa als die „Gesamtheit korporativer Strategien zur Schaffung einer „intelligenten“ Organisation.“ [WILL01, WILL05] Ziel des Wissensmanagements ist laut Frey-Luxemburger die effiziente und effektive Schaffung (Generierung und Entwicklung), Verteilung (Kommunikation), Nutzung (inkl. Suche) und Bewahrung (inkl. Repräsentation) der Ressource Wissen [FREY13]. An Stelle einer weiter detaillierten Abgrenzung der bestehenden Auffas-

sungen werden in den nachfolgenden Abschnitten die im Kontext der vorliegenden Arbeit relevanten Ansätze vorgestellt und erläutert.

4.1.2 Zentrale Ansätze

Auf der bereits dargestellten Differenzierung von explizitem und implizitem Wissen basiert das 1997 von Nonaka und Takeuchi vorgestellte Modell der **Wissensspirale**: Es beschreibt eine stetige Transformation von implizitem zu explizitem Wissen und umgekehrt. Die Autoren unterscheiden dabei vier Phasen (vgl. Abbildung 4.2).

nach von	Implizit	Explizit
Implizit	Sozialisierung Expertenverzeichnisse Telekommunikation Empfehlungssysteme Wissensgemeinschaften	Externalisierung Informationserfassung Dokumentenmanagement Wissensakquisition Experience Factory
Explizit	Internalisierung Visualisierung Exploration Information Retrieval and Querying E-Learning Expertensysteme	Kombination Schlussfolgern Workflow Data Mining Dokumentations- und Contentmanagement

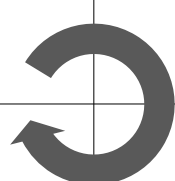


Abbildung 4.2: Wissensspirale nach Nonaka und Takeuchi [NT97] in Anlehnung an [CLAU13, STAA02]

Während der **Sozialisierung** erfolgt der interpersonelle Erfahrungsaustausch ohne Sprache: Die Umwandlung von implizitem in implizites Wissen, etwa das Lernen durch aufmerksame Beobachtung ohne direkte Anweisungen. Unter dem Begriff **Externalisierung** ist die Konvertierung von implizitem zu explizitem Wissen zu verstehen: Sie umfasst die „*Artikulation von implizitem Wissen in expliziten Konzepten*“ [NT97], z. B. das Niederschreiben impliziten Erfahrungswissens anhand von Metaphern, Analogien, Modellen und Hypothesen. Durch Verbindung verschiedener Quellen expliziten Wissens – der **Kombination** (Übertragung expliziten in expliziten Wissens) – entstehen neue Wissenskomplexe. Die **Internalisierung** schließlich beschreibt die Transformation von explizitem in implizites Wissen: Die Verinnerlichung von objektivem Wissen durch ein Individuum, etwa durch „*learning by doing*“. [NT97, JASP08]

Durch die kontinuierliche Abfolge der genannten Teilprozesse wird eine stetige Erweiterung des Wissens gewährleistet, das mit jedem Durchlaufen des Zyklus auf eine höhere Ebene übertragen wird, d.h. vom Individuum auf die Gruppe und schließlich auf das gesamte Unternehmen. Voraussetzung für den Erfolg dieses Zyklus sind den Autoren zufolge fünf zentrale Merkmale:

- Intention: Strategische Verankerung der Schaffung von Wissen
- Autonomie der Individuen

- **Fluktuation:** Auflösung von Routine
- **Redundanz:** Existenz von Wissen der Individuen über deren operative Aufgabe hinaus
- **Vielfalt:** Abbildung der komplexen Umwelt in den Unternehmensstrukturen

Auf dieser Basis empfehlen Nonaka und Takeuchi ferner die Schaffung einer wissensfördernden Organisationsform zur Verbindung der Wissensschaffung von unten (Sozialisation und Externalisierung) und von oben (Kombination und Internalisierung) durch den aktiven Einsatz von Mittelmanagern. [NT97, CLAU13]

Auf einem vergleichbaren Ansatz fußt der ebenfalls erstmals 1997 vorgestellte Kreislauf der **Bausteine des Wissensmanagements** (vgl. Abbildung 4.3) von Probst et al., der in der Fachliteratur weite Verbreitung [JASP08] findet [PROB10].

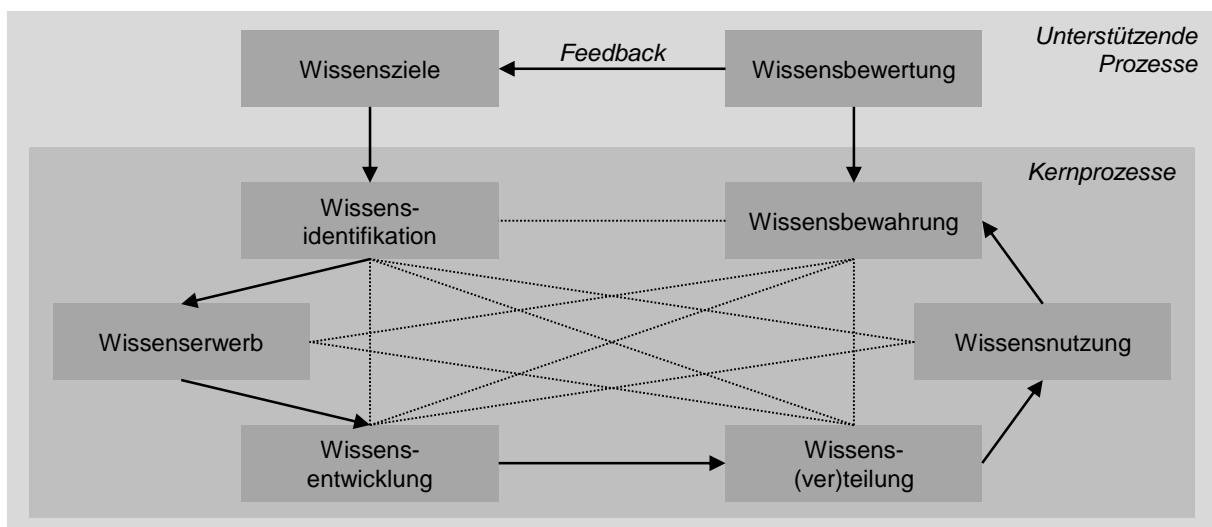


Abbildung 4.3: Bausteine des Wissensmanagements nach [PROB10]

Die sechs in der Erstauflage genannten Kernprozesse des Wissensmanagements werden demnach durch eine steuernde Rückkopplungsschleife mit zwei weiteren Bausteinen ergänzt. Der Kreislauf beginnt mit der Aufstellung von **Wissenszielen**: Sie legen fest, auf welchen Ebenen welche Fähigkeiten aufzubauen sind und schaffen somit die Voraussetzung für ein effektives Wissensmanagement. Unterschieden wird zwischen normativer (Unternehmenskultur), strategischer (langfristige Ausrichtung) und operativer (Aktivitäten und Maßnahmen zur Umsetzung) Ebene. Die **Wissensidentifikation** zeigt auf, welches Wissen an welcher Stelle im Unternehmen vorhanden ist und macht dieses den Mitarbeitern zugänglich. Ist Wissen erforderlich, aber im Unternehmen nicht vorhanden, bestehen die Möglichkeiten des externen Bezugs (**Wissenserwerb**) oder des internen Aufbaus (**Wissensentwicklung**). Wissenserwerb ist beispielsweise über Wettbewerber, Kooperationspartner, Kunden, Lieferanten, Rekrutierung von Experten sowie den direkten Erwerb von „Wissensprodukten“ [JASP08] (z. B. Informationsmedien, Trainings etc.) möglich. Wissensentwicklung umfasst die Schaffung neuer Fähigkeiten und Produkte sowie leistungsfähigerer Prozesse durch (Markt-)Forschung, Entwicklung und Förderung der Kreativität von Mitarbeitern. Vorhandenes Wissen

wird durch den Baustein **Wissens(ver)teilung** gemäß dem ökonomischen Prinzip der Arbeitsteilung im richtigen Umfang, zum richtigen Zeitpunkt am richtigen Ort im Unternehmen zur Verfügung gestellt. Die Aufgabe der **Wissensnutzung**, der produktive Einsatz theoretisch vorhandenen Wissens zum Nutzen des Unternehmens, ist gleichzeitig auch das Ziel des Wissensmanagements. Der Abbau von Barrieren, die eine Nutzung fremden Wissens behindern (etwa ein „*Gesichtsverlust*“ [JASP08]), ist ebenfalls Bestandteil dieses Bausteins. Inhalt der **Wissensbewahrung** ist die Sicherstellung der gezielten und strukturierten Speicherung von Wissen, um einen Zugriff an einem späteren Zeitpunkt zu ermöglichen. Dazu ist zu beurteilen, ob und in welchem Maße identifiziertes Wissen zu einem späteren Zeitpunkt benötigt wird. Die **Wissensbewertung** schließt den Managementkreislauf ab und wirkt als regelnde Komponente: Kern ist die Bewertung von vorhandenem und zu beschaffendem Wissen sowie ein Soll-Ist-Vergleich zwischen aufgebautem Wissen und vorgegebenen Wissenszielen. [PROB10, JASP08]

Stelzer zufolge ergibt sich aus der Wirtschaftsinformatik u.a. die Anforderung, betriebliches Wissensmanagement durch rechnerbasierte Informationssysteme zu unterstützen. Als Beispiele für diese wissensbasierten Systeme führt er Data-Warehouse-Systeme, Online Analytical Processing-Mechanismen, Data-Mining-Verfahren, Dokumenten-Management-Systeme, Groupware-Systeme oder **Expertensysteme** (XPS) an. [STEL06] Aufgrund ihrer traditionell hohen Bedeutung in der Fertigungsplanung [SCHN10] werden letztere im Folgenden näher beschrieben. Als grundlegende Bestandteile eines XPS gelten allgemein [BEIE08, ZH00, BUSC94, OEMI91, PUPP86] (vgl. auch Abbildung 4.4):

- **Wissensbasis:** Grundlage des Systems, beinhaltet Fakten und Regeln
- **Wissenserwerbs- und Veränderungskomponente:** Unterstützt den Aufbau der Wissensbasis durch Hinzufügen oder Verändern von Fakten und Regeln
- **Problemlösungskomponente:** Sucht und verknüpft Fakten und Regeln nach vorgegebener Strategie und leitet Schlussfolgerungen und Ergebnisse ab
- **Erklärungskomponente:** Erläutert dem Anwender, wie eine Schlussfolgerung zustande gekommen ist
- **Dialogkomponente** für Endnutzer: Benutzerschnittstelle zur Kommunikation des Endanwenders mit dem XPS
- **Schnittstelle für Expertenzugriff:** Dient dem Expertenteam zu Aufbau und Weiterentwicklung des Systems

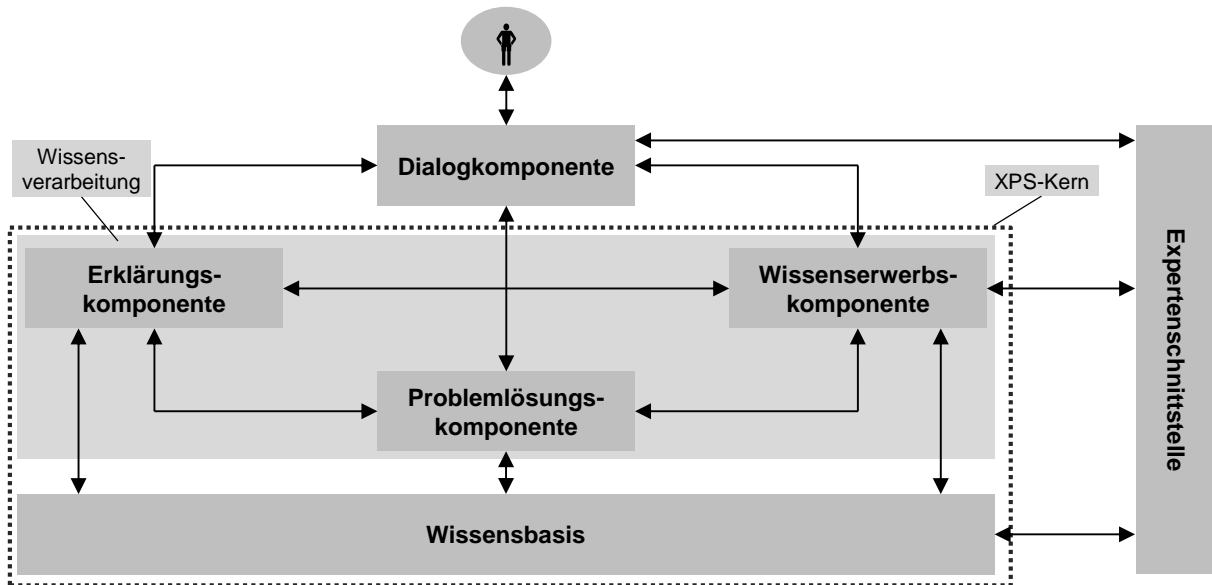


Abbildung 4.4: Schematischer Aufbau eines Expertensystems in Anlehnung an [BEIE08, ZH00, BUSC94, OEMI91, PUPP86]

Expertensysteme unterscheiden sich von reinen relationalen Datenbanken, indem sie keine Daten verarbeiten, sondern Schlüsse anhand der Regeln und Fakten innerhalb der Wissensbasis ziehen. Zum Teil erfolgt dies mittels heuristischer Methoden. Zudem sind sie lernfähig und durch die Erklärungskomponente selbsterklärend. [ZH00] Neben dem Wissenserwerb ist die Wissensrepräsentation, d. h. die anforderungsgerechte Darstellung des Wissens, Kernaufgabe bei der Modellierung von XPS [SCHN10]. Mögliche Methoden der Wissensrepräsentation in wissensbasierten Systemen sind Inhalt des folgenden Abschnitts.

4.2 Wissensrepräsentationsmethoden zur Modellierung wissensbasierter Systeme

Wie bereits in Abschnitt 4.1.2 dargestellt, bildet die Wissensbasis das Kernstück eines wissensbasierten Systems. Sie repräsentiert anwendungsspezifisches Wissen in einer Form, die Schlussfolgerungen durch die Problemlösungskomponente ermöglicht. Schwerpunkt der Methoden zur Wissensrepräsentation ist folglich die Formalisierung von Wissen zur Optimierung der rechnergestützten Verarbeitung. [BEIE08, SCHA08] Für alle Methoden der Wissensrepräsentation werden Beierle et al. zufolge die Aspekte Syntax und Semantik unterschieden: Die Syntax legt demnach fest, wie die Sätze einer Wissensrepräsentationssprache aufgebaut sind. Die Semantik hingegen beschreibt, auf welche Begriffe der zu repräsentierenden Welt sich die Sätze beziehen und gibt ihnen somit eine Bedeutung. Morris bezeichnet die Semantik daher als die „Studie der Bedeutung“. [MORR38, BEIE08]

Im Folgenden werden die im Rahmen der vorliegenden Arbeit relevanten Methoden vorgestellt.

4.2.1 Prädikatenlogik

Aufbauend auf der Aussagenlogik bietet die Prädikatenlogik die Möglichkeit, atomare Aussagen zu verknüpfen und logische Schlussfolgerungen zu ziehen [HS99].

Mit Prädikatenlogik lassen sich folgende Details beschreiben [BEIE08, HS99]:

- Aussagen (analog Aussagenlogik)
- Objekte (z. B. Menschen, Zahlen, Farben)
- Funktionen auf den Objekten (z. B. Nachfolger, Anzahl von Proben etc.)
- Eigenschaften von Objekten (z. B. groß, blau, positiv)
- Relationen zwischen Objekten (z. B. Vater von, kleiner als)

Dazu sind ein Alphabet, eine formale Sprache, Axiome und Schlussfolgerungsregeln erforderlich. Fakten werden nicht direkt, sondern indirekt über ihren Wahrheitswert abgefragt. Aus wahren Aussagen sind wiederum neue Aussagen ableitbar, dies wird auch als *Schließen* bezeichnet. Die relevantesten Schlussfolgerungsverfahren sind der *Modus Ponens* (wahre Aussage folgt aus wahrer Prämisse), der *Modus Tollens* (negierte Prämisse folgt aus negierter Aussage) und die *Resolution* (algorithmischer Test für die Unerfüllbarkeit einer Formel). [HS99, SCHN10]

Trotz der erweiterten Möglichkeiten gilt die Logik als ungeeignet zur Repräsentation von technischem Wissen, was auf ihre begrenzte, auf Mathematik zugeschnittene Beschreibungsmöglichkeiten zurückzuführen ist [HS99].

4.2.2 Regelbasierte Systeme

Die Syntax von Regeln bilden formalisierte Konditionalsätze der Form

wenn X , dann Y . 4.1

Die Aussagen, im Beispiel X und Y , sind mit den booleschen Operatoren *wahr* und *falsch* belegt. Als Bedeutung ergibt sich in diesem Fall daher:

Prämisse: wenn $X = \text{wahr}$ (erfüllt, bewiesen) ist, 4.2

Konklusion: dann schliesse, dass auch $Y = \text{wahr}$ ist.

Regeln sind ein Kompromiss zwischen Verständlichkeit der Wissensdarstellung und formalen Ansprüchen. Sie repräsentieren Zusammenhänge zwischen Objekten oder Objektmengen. Dazu ist jedes Objekt zuvor durch eine endliche Menge diskreter Werte zu beschreiben. In den Kognitionswissenschaften werden Regeln als elementare Bestandteile von informationsverarbeitenden Prozessen angesehen. Regelbasierte Systeme weisen daher eine Nähe zum menschlichen Denken auf [BEIE08] und werden in der Literatur häufig als Expertensysteme bezeichnet. [DECK02]

Grafische Darstellungsmöglichkeiten sind etwa der Entscheidungsbaum oder die Entscheidungstabelle nach ISO 5806 [ISO84]. Bei der Abarbeitung von Regeln existieren zwei Alternativen: die Vorwärtsverkettung (*forward-reasoning*) und die Rückwärtsverkettung (*backward-reasoning*). Erstere ist eine Ursache-Wirkungs-Analyse, bei der Schlussfolgerungen aus einer vorgegebenen Datenmenge gezogen werden. Sie wird

daher auch als datengetrieben bezeichnet. Ein Beispiel ist die Abfrage eines Entscheidungsbaums von der Wurzel bis zu der letzten Verästelung. Die Rückwärtsverkettung stellt eine Wirkung-Ursache-Analyse dar, die als Abfrage eines Entscheidungsbaums von einer Verästelung bis zur Wurzel zu verstehen ist. Bei dieser zielorientierten Vorgehensweise ist das Erfragen neuer Fakten möglich, wenn ein Parameter einer Aussage unbekannt ist. [BEIE08, DECK02]

4.2.3 Semantische Technologien

Semantische Technologien basieren auf dem bereits in der Einleitung zu Abschnitt 4.2 erwähnten Konzept der Semantik [MORR38, NEUM01]. Sie werden im Bereich der Informationstechnologie zur expliziten Abbildung der Bedeutung von Daten eingesetzt. Auf diesen Technologien aufbauende Softwaresysteme speichern Daten um maschinenverständliche Kontextinformationen ergänzt ab: sogenannte Metadaten als „Daten über Daten“. Metadaten sind maschinenlesbare sowie maschinenbearbeitbare Markierungen zur Verknüpfung mit Dateninhalten wie Wörtern, Abschnitten, Bildern oder anderen Objekten. Sie ermöglichen die Beschreibung, Suche und Verknüpfung von Informationsressourcen. [PB06, ZAPP14, JV11]

Gängige semantische Technologien wie etwa automatische Texterschließung, Semantic Web oder semantische Netze bzw. Ontologien kommen bereits heute insbesondere in interdisziplinären, wissens- und kommunikationsintensiven Arbeitsumfeldern zum Einsatz. Das Erarbeiten von Lösungen aus einer vorgegebenen Problemstellung im Sinne von Kapitel 1 ist nur in Verbindung mit weiteren Wissensrepräsentationsmethoden möglich. [PB06]

4.2.4 Fallbasiertes Schließen

Erstmals im Jahr 1982 von Roger Schank an der Yale University erwähnt [SCHA82], basiert das Prinzip des fallbasierten Schließens (engl.: *case-based reasoning*, kurz: CBR) auf dem Vergleich eines neuen Problemfalls mit bereits vorhandenen Fällen (engl.: *cases*) und dem Ableiten einer Lösung. Die primäre Wissensbasis besteht nicht aus generischen Regeln oder Logiken, sondern aus in Fällen gespeicherten früheren Erfahrungen. Bei der Konfrontation des Systems mit einem bisher unbekanntem Problem wird die Lösung des relevantesten Falls aus der Falldatenbank herausgesucht und auf das neue Problem übertragen. Anschließend wird dies als neuer Fall mit neuer Lösung abgespeichert. Der Ansatz gilt daher als erinnerungsbasiert und fußt auf der Annahme, dass ähnliche Problemstellungen ähnliche Lösungen aufweisen. Analog zu regelbasierten Systemen weisen auch CBR-Systeme eine Nähe zu menschlichen Lösungsfindungsprozessen auf. [BEIE08, AP94] Aus diesem Grund ist das fallbasierte Schließen einer der häufigsten Schlussfolgerungsmechanismen künstlicher Intelligenzen [STEL06, HYUN08].

Bereits 1994 gliederten Aamodt und Plaza den Prozess des fallbasierten Schließens im „*CBR-Zyklus*“ (vgl. Abbildung 4.5) in vier Teilprozesse [AP94, CLAU13]:

- **Retrieve:** Indizierung des Problemfalls in eine systemlesbare Form, Identifikation mindestens eines ähnlichen Falls aus der Wissensbasis, Bewertung der Ähnlichkeit der beiden Fälle mittels Distanzfunktion
- **Reuse:** Adaption der zugehörigen Lösung an das neue Problem
- **Revise:** Verifikation und gegebenenfalls Korrektur der angepassten Lösung etwa anhand von Simulationsläufen oder realer Anwendung
- **Retain:** Ablage des neuen Problems und seiner verifizierten Lösung in der Fallbasis

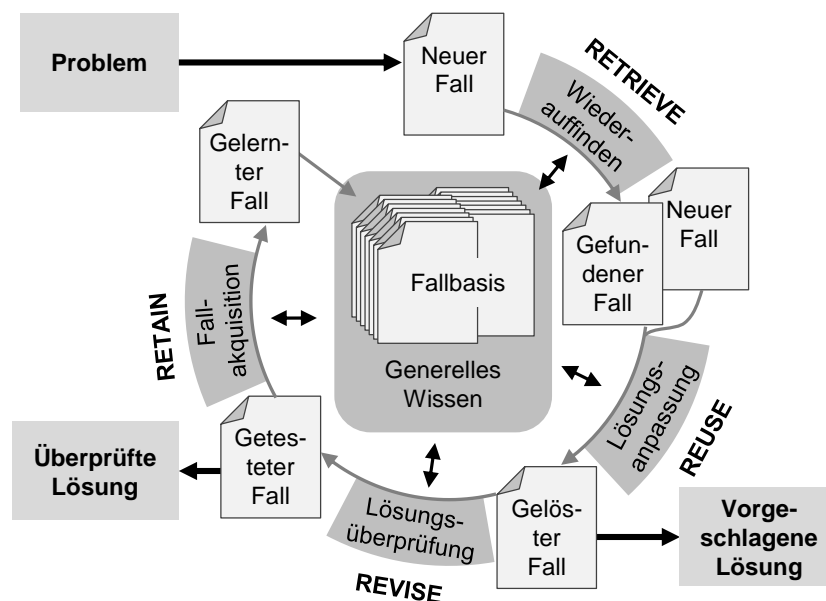


Abbildung 4.5: CBR-Zyklus [CLAU13] in Anlehnung an [AP94]

Zur Diskretisierung der Problemfälle nutzen CBR-Systeme in der Regel Indizierfunktionen. Diese heben die Charakteristika (sogenannte *Deskriptoren*) eines Falles und ihre jeweilige Ausprägung hervor, deren Werte für den Anwendungsfall von besonderer Bedeutung sind. Die Indizierung ist ein komplexer Prozess der Identifikation relevanter Informationen, erleichtert dem System jedoch die Such- und Vergleichbarkeit der Einzelfälle und die Berechenbarkeit der Distanzfunktion. [BEIE08]

4.2.5 Fuzzy-Theorie

Die erstmals 1965 von Zadeh erwähnten *Fuzzy Sets* (engl.: *fuzzy* = unscharf) ermöglichen die mathematische Abbildung der Vagheit und geringen Präzision der Sprache. Sie fußen auf drei wesentlichen Bestandteilen: linguistischen Variablen, Fuzzy-Mengen mit Zugehörigkeitsfunktionen und Operatoren auf den Zugehörigkeitsfunktionen. [ZADE65]

Linguistische Variable bilden sprachliche Konstrukte bzw. Terme wie etwa *klein*, *schnell*, *alt* oder *hell* ab (vgl. Abbildung 4.6). Diese Begriffe sind per Definition un-

scharfe linguistische Konzepte, die im üblichen Sprachgebrauch nicht klar abgegrenzt, aber allgemein verständlich sind. [BEIE08, KBKM11]

Diese Unschärfe lässt sich in der klassischen, booleschen Logik nicht darstellen. An Stelle der in dieser zur Anwendung kommenden Aussagen *wahr* (0) und *falsch* (1) kommt in der Fuzzy-Logik daher ein Kontinuum zur Anwendung, das in der Regel durch das Intervall [0,1] dargestellt wird. Der Zugehörigkeitsgrad eines Elements zu einer Fuzzy-Menge kann somit reelle Werte zwischen 0 und 1 annehmen: Die Menge wird dann als unscharf bezeichnet. Typische Zugehörigkeitsfunktionen sind Dreiecks-, Exponential- und Trapezfunktionen sowie Glockenkurven. [DECK02, KBKM11]

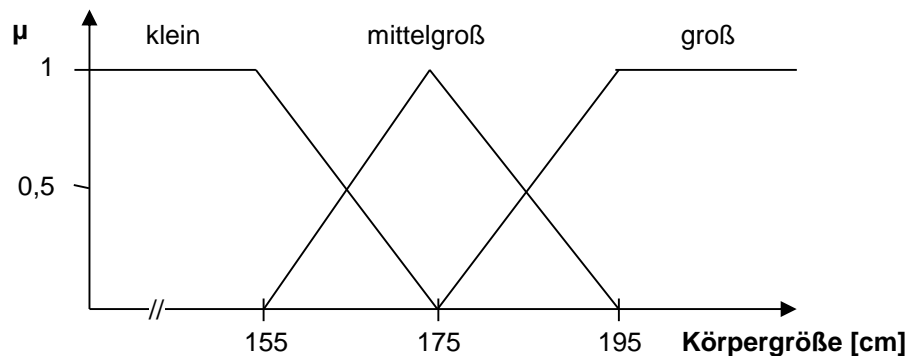


Abbildung 4.6: Fuzzy-Mengen und linguistische Variablen

Systeme auf Basis von Fuzzy-Logiken dienen der Darstellung vager sprachlicher Ausdrücke oder gradueller Abstufungen und kommen z. B. in Expertensystemen, graphischer Datenverarbeitung oder Messwertaufbereitung zum Einsatz [BEIE08].

4.2.6 Künstliche neuronale Netze

Angelehnt an die Funktionsweise eines Gehirns ermöglichen künstliche neuronale Netze (KNN) die Darstellung komplexer Zusammenhänge, die mit gewöhnlichen mathematischen Methoden, Algorithmen und Programmiersprachen nicht beschreibbar sind [KINN94, KBKM11].

Grundelemente eines KNN sind – analog zum Gehirn – parallel arbeitende **Neuronen**: Komponenten mit mehreren möglichen Eingängen und nur einem möglichen Ausgang. Sie sind durch gewichtete Verbindungen (**Synapsen**) miteinander vernetzt (vgl. Abbildung 4.7). [YEGN99, KBKM11]

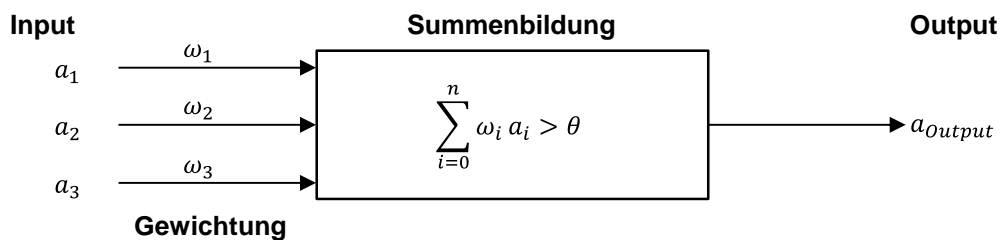


Abbildung 4.7: Darstellung eines Neurons in Anlehnung an [KINN94, YEGN99]

Die Synapsen agieren, ähnlich wie ihre neurobiologischen Vorlagen, als verstärkende oder hemmende Elemente: Jeder Eingangswert wird vor Erreichen des Neurons fakto-

riell gewichtet. Übersteigt die Summe der gewichteten Einzelwerte den Schwellwert Θ , „*feuert*“ das Neuron, d.h. der Ausgangswert a_{Output} wird auf 1 gesetzt. Bei Unterschreitung des Schwellwerts bleibt das Ausgangssignal a_{Output} unverändert bei 0. [KINN94]

Die Arbeitsweise künstlicher neuronaler Netze wird durch drei Größen beeinflusst: Netzwerkarchitektur, Verschaltungsart und Trainingsmethodik. Die Architektur des Netzwerks kann ein- oder mehrschichtig aufgebaut, die jeweiligen Schichten ein- oder zweidimensional ausgeprägt sein. Die Neuronen einer Schicht weisen ähnliche Aktivierungs- und Ausgangsfunktionen auf. Die Verschaltungsart variiert von totaler bis zur zufälligen Verschaltung, ihre Richtung kann ein- oder bidirektional ausgeprägt sein. Möglich sind auf diese Weise z. B. *Feedforward*-, *Feedback*-, *Top-Down*- oder *Bottom-Up*-Netzwerke (vgl. Abbildung 4.8). [DECK02, YEGN99]

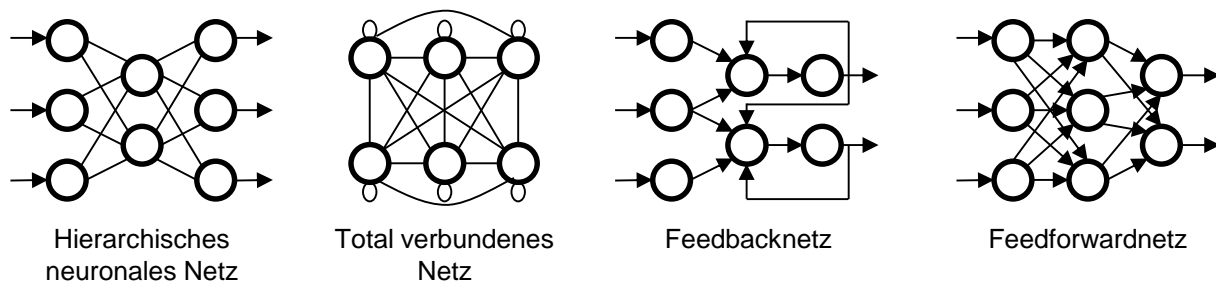


Abbildung 4.8: Mögliche Netzwerkarchitekturen und Verschaltungsarten nach [KINN94, DECK02, YEGN99]

Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Methoden der Wissensrepräsentation werden KNN über ein iteratives Training eingestellt. Im Rahmen dessen werden die Synapsengewichte so lange angepasst, bis bei jedem Eingangsmuster das gewünschte Ausgangsmuster erzeugt wird. [DECK02, KINN94] Wird dieser Lernprozess während des Einsatzes eines KNN nicht unterbrochen, so passt sich das Netz selbstständig an die sich ändernden Umweltbedingungen an. Bei graduellen Veränderungen werden somit keine Programmänderungen wie bei anderen Methoden erforderlich. [HEUE97]

Die Stärken von KNN liegen im Bereich der MIMO-Systeme (*Multiple Input Multiple Output*), daher werden sie verstärkt bei steuerungs- und regelungstechnischen Anwendungen, Sensorik, Optimierungsaufgaben oder Prognosen eingesetzt. Nachteilig wirken sich die Fehleranfälligkeit im Betrieb nach Fehlinterpretationen im Training sowie die fehlende Nachvollziehbarkeit von Ergebnissen aus. [HEUE97, KINN94]

4.2.7 Evolutionäre Algorithmen

Evolutionäre oder auch genetische Algorithmen (engl.: *evolutionary algorithms*, kurz: EA) sind Optimierungsverfahren, die auf den Prinzipien der biologischen Evolution aufbauen: **Selektion** und **Variation**. Analog zum biologischen Vorbildprozess erfolgt der Ablauf in Iterationsschleifen, die Menge an sogenannten Lösungskandidaten wird stetig verbessert. Kern dieses Verfahrens ist die Definition einer Fitnessfunktion, die eine graduelle Optimierung generierter Varianten an die Problemstellung ermöglicht.

Um den Lösungsprozess zu verkürzen, ist der Selektionsdruck so zu modellieren, dass ähnliche Lösungen (Individuen) ähnliche Fitnesswerte erhalten. Voraussetzung für die Einsetzbarkeit evolutionärer Verfahren ist, dass die Güte der Lösungen über einen einzigen Wert (Fitness) beschreibbar ist. Ausgehend von einer zufällig erzeugten Startlösung (Startpopulation) werden die einzelnen Individuen anhand der Fitnessfunktion bewertet und solche mit einer geringen Fitness eliminiert (Selektion). Individuen mit hoher Fitness werden im Anschluss genetisch verändert: Die Variation erfolgt über die genetischen Operatoren **Mutation** und **Crossover**. Während unter Mutation die zufällige Veränderung einzelner Gene eines Individuums verstanden wird, stellt der Crossover eine Rekombination der Gene von mindestens zwei Individuen der Population dar. Ein definiertes Abbruchkriterium bestimmt nach jeder Iteration, ob eine erneute Generation erstellt werden soll. [KBKM11, DECK02]

In der Literatur weicht die Benennung der einzelnen Prozessschritte teilweise voneinander ab, die grundsätzliche Vorgehensweise ist jedoch identisch [KBKM11, WEIC07, DECK02, NISS97]. Abbildung 4.9 stellt den Ablauf evolutionärer Algorithmen in Anlehnung an Nissen schematisch dar.

Unter der Voraussetzung, dass Fitnessfunktion und Parameter zielführend gewählt wurden, lösen EA Optimierungsprobleme im Vergleich zu klassischen Algorithmen schneller [WEIC07]. Sie werden daher bei Problemen eingesetzt, für die kein effizienterer Lösungsalgorithmus bekannt ist. Das Finden einer optimalen Lösung ist in der Regel allerdings nicht garantiert. [KBKM11, NISS97] Ungünstig gewählte Optimierungsparameter beeinflussen die Ergebnisse zudem teils erheblich und führen – neben dem Aufwand der Parametrierung zu Beginn und vergleichsweise hoher Rechenzeit – mitunter zu Zeitverlusten [WEIC07, NISS97].

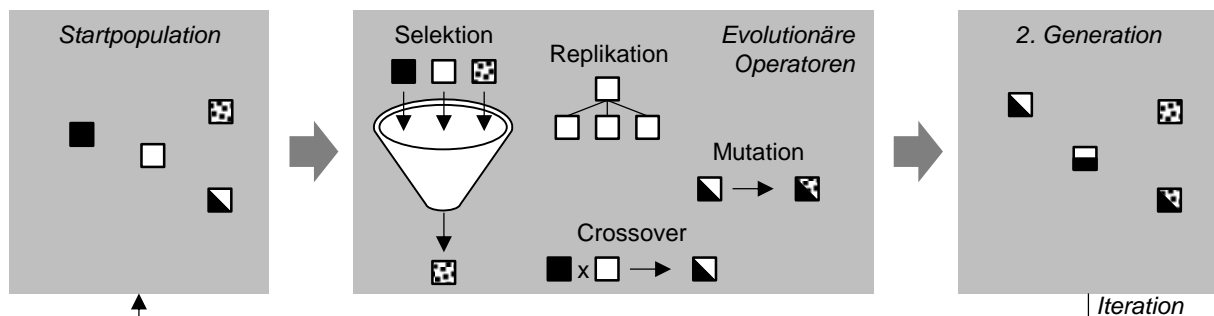


Abbildung 4.9: Schematische Darstellung des Ablaufs Evolutionärer Algorithmen in Anlehnung an [NISS97]

4.3 Wissensbasierte Systeme im Produktionsumfeld

Die Bedeutung wissensbasierter Systeme in der Industrie wurde bereits eingehend erläutert. Im Folgenden werden einige ausgewählte Ansätze der automatisierten Verarbeitung von Wissen im Produktionsumfeld vorgestellt.

4.3.1 Lösungsansätze für die Fabrikplanung

Meierlohr entwickelt ein Konzept zur rechnergestützten Integration der Gebäude- in die Produktionssystemplanung mit dem Ziel, dem Produktionsplaner bereits in frühen Planungsphasen Informationen zum Gebäude zur Verfügung zu stellen. Neben der Bereitstellung des Wissens in einer objektorientierten Datenbank sind regelbasierte Funktionen zur Unterstützung bei gestaltenden und bewertenden Planungsaufgaben vorgesehen. [MEIE03]

Eine weitere Methodik zur wissensbasierten Unterstützung der Fabrikplanung stellen **Dombrowski und Tiedemann** vor. Sie vernetzt die vier Kernelemente Unternehmensleitung, Fachbereich Fabrikplanung, Produktionsnetzwerk sowie externe Bereiche bzw. Partner in einer semantischen Datenbank. In Anlehnung an die Wissensspirale von Nonaka und Takeuchi [NT97] wird eine Externalisierung von explizitem Wissen angestrebt, das im Rahmen der Planungsaufgaben von internen Mitarbeitern und externen Partnern zur Verfügung gestellt wird. Die Wissensbasis ist dem Fachbereich Fabrikplanung zugeordnet und auf einem Referenzmodell gemäß dem Wissensmanagementkonzept von Probst [PROB10] aufgebaut: Während die Unternehmensleitung die Wissensziele steuert, identifiziert, erwirbt und entwickelt der Fachbereich das Wissen selbstständig, verteilt und nutzt es in der Planungsphase bedarfsgerecht und stellt seine Bewahrung in einer lernfähigen Planungssoftware sicher. [TIED05, DT04]

Zur bewertungsorientierten Auswahl der im Rahmen eines Projekts einzusetzenden Werkzeuge der Digitalen Fabrik entwickelt **Schack** ein regelbasiertes Expertensystem in einer Tabellenkalkulationssoftware. Der Fokus liegt auf der Bewertung von wirtschaftlichem Nutzen und Aufwand der jeweiligen Werkzeuge auf Basis projektspezifischer Informationen über Produkt, Fertigungsprozess, vorhandene Betriebsmittel und Umfang der Planungsaufgaben. [SCHA07]

Schady stützt sein Konzept zur wissensorientierten Fabrikmodellierung auf ein Referenzmodell einer Fabrik, das er mittels semantischer Technologien abbildet. Es besitzt Vorlagencharakter, ist auf eine Vielzahl von Fällen übertragbar und dient bei der Neuplanung einer Fabrik oder eines Fabrikbereichs primär der Unterstützung bei der Planung des grundlegenden Aufbaus. Es ist ferner dazu geeignet, Erfahrungswissen zu hinterlegen und bietet die Möglichkeit der schnellen Einarbeitung neuer Fabrikplaner anhand des zugrundeliegenden semantischen Relationenmodells. Das Werkzeug ermöglicht die Abbildung und die stetige Konkretisierung der geplanten Fabrik sowie die gezielte Abfrage von Informationen über das konkrete Fabriksystem. Aufgrund der Vielzahl der Funktionen kommt es auch im Änderungsmanagement und Fabrikbetrieb zum Einsatz. [SCHA08]

Ebenfalls auf semantischen Technologien fußt das von **Heinen** 2007 vorgestellte *Fabrikplanungs-Wiki*. Basierend auf einem Prozessmodell der Fabrikplanung, das die Phasen Grundlagenermittlung, Konzept- und Detailplanung vorsieht, leitet es den Nutzer

entlang des Standardprozesses schrittweise durch die unterschiedlichen Haupt- und Nebenaufgaben der Planung. Insbesondere unerfahrene Fabrikplaner werden auf diese Weise zu einer effizienten Projektabwicklung befähigt. Die *Wiki*-Komponente dient der konsequenten Speicherung des erarbeiteten Wissens und seiner Vernetzung im Prozessmodell. [HEIN07]

Eine fallbasierte Methode zur situationsspezifischen Auswahl geeigneter Web 2.0-Werkzeuge für die Fabrikplanung beschreibt **Clauß**. Grundlage bilden zwei morphologische Kästen, mit denen die möglichen Fabrikplanungssituationen und existierende Web 2.0-Werkzeuge abgebildet werden. Diese zweigeteilte Fallbasis („*duplex modelling*“) ermöglicht eine differenzierte Beschreibung und Betrachtung des Problem- (Planungssituation) und Lösungsraums (Web 2.0-Werkzeug). Die Bewertung der Lösungsfälle erfolgt anhand von Vorgaben, die der Nutzer vorab in einem Zielsystem festlegt. [CLAU13]

4.3.2 Lösungsansätze für die Fertigungssystemplanung

Auch in der Fertigungssystemplanung finden wissensbasierte Systeme seit Jahren Anwendung. So stellt etwa **Gerken** bereits 2000 ein Assistenzsystem für die Arbeitsplanung in der Großserienfertigung von Zylinderköpfen vor. Auf Grundlage eines *featurebasierten* CAD-Modells (ein *Feature* entspricht einem Bearbeitungsmerkmal [SK00, ANDE99]) des zu fertigenden Werkstücks unterstützt es den Planer bei der Optimierung von Bearbeitungsreihenfolgen, Werkzeugen und Schnittparametern. Die Empfehlung erfolgt mittels der Methode des fallbasierten Schließens. Die Datenbasis ist bereits mit zahlreichen Planungsbeispielen bestückt. [GERK00]

Auch **Fu** konzipiert ein System zur Unterstützung der Arbeitsplanung, das auf einer featurebasierten Beschreibung des zu fertigenden Werkstücks aufbaut. Ergänzend zum von Gerken vorgestellten Planungswerkzeug ist dieses auch zur fertigungsgerechten Konstruktion einsetzbar. Sogenannte Planungsarbeitsräume, die Wissen in Form technischer Elemente enthalten, dienen der Betrachtung der jeweiligen Bearbeitungs- bzw. Konstruktionsaufgabe. Die zugrundeliegenden Elemente sind sowohl geometrisch als auch logisch klassifiziert, sodass sie gleichermaßen von Konstrukteuren wie Arbeitsplanern genutzt werden können. [FU03]

Eine Methodik zum Einsatz expliziten Wissens zur generierenden Planung von Prozessketten im Werkzeug- und Formenbau stellt **Jurklics** vor. Den Kern bildet ein XPS, dessen Wissensbasis aus händisch definierten Kosten-, Qualitäts- und Zeitregeln sowie einer integrierten Faktendatenbank besteht. Durch die Zerlegung der Bearbeitungsaufgabe in einzelne Bearbeitungselemente, denen mögliche Fertigungstechnologien zugeordnet werden, erfolgt die Ableitung möglicher Lösungen in Form von Prozesskettenvarianten. Die potenziellen Fertigungstechnologien werden anhand von hinterlegten Regeln bewertet und im Rahmen einer multikriteriellen Nutzwertanalyse wird anschließend die optimale Prozesskette bestimmt. [JURK04]

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt **Leimer** mit seinem objektorientierten XPS zur sicherheitstechnischen Auslegung verfahrenstechnischer Anlagen [LEIM01]. Ein weiteres Beispiel für XPS-Lösungen in der Fertigungssystemplanung ist das von **Willms** entwickelte System zur halbautomatischen Auslegung kostenoptimaler und prozessstabiler Fertigungsverkettungen. Ausgehend von Feature- und Bearbeitungsdaten bietet es eine detaillierte Berechnung der Kosten der vorgeschlagenen Prozesskettenvarianten. [WILL08]

Semantische Technologien kommen etwa beim vom **Konrad** [KONR12] entwickelten Verfahren zum Anlagenanlauf von Montagesystemen zum Einsatz.

Ein Beispiel für die Nutzung regelbasierter Algorithmen auf Grundlage mathematischer Modelle ist die Arbeit von **Behrendt**: Ziel seiner Planungsmethode ist die Identifikation des optimalen Maschinenkonzepts für jede vom Nutzer vorgegebene Teilefamilie. Sein technischer Lösungsraum berücksichtigt Bearbeitungszentren, Sonder- und Reihenmaschinen sowie die Charakteristika der konzeptspezifischen Fertigungssysteme. Die Analyse deckt die Prüfung der technischen Machbarkeit und Flexibilität, die Dimensionierung des Fertigungssystems sowie die Taktzeit- und Wirtschaftlichkeitsberechnung ab. Als Eingangsdaten dienen Bauteilinformationen in Form eines Featuremodells. Die Wissensbasis besteht aus mathematischen Modellen zur konzeptspezifischen Taktzeitberechnung und Informationen zu Investitions- und laufenden Kosten der Konzeptvarianten. [BEHR09] Ein ähnliches Ziel hat die Arbeit von **Krauss**: Sein Konzept zur zustandsgeregelten Dimensionierung von Produktionssystemen basiert auf einer iterativer Bewertung von Lösungsvarianten bis zum Erreichen der optimalen Lösung. Diese wird anhand der vom Nutzer vorgegebenen Flexibilitäts-, Wandlungsfähigkeits- und Kostenkriterien ermittelt. [KRAU12]

4.3.3 Lösungsansätze für die Technologieplanung

Die im Bereich der Technologieplanung üblicherweise zur Anwendung kommenden Schnittwertdaten aus Herstellerkatalogen, firmenspezifischen und -übergreifenden Schnittwertsammlungen und Tabellenbüchern sowie Berechnungsalgorithmen bieten einen Fundus an Datensätzen, der sich hervorragend zur Nutzung in wissensbasierten Systemen eignet [NEST99]. Entsprechend zahl- und facettenreich sind die verfügbaren Systeme zur technologie- und fallspezifischen Bestimmung von Schnittdaten.

Der Ansatz von **Fichtner et al.** etwa greift auf eine Wissensdatenbank mit Schnittdaten für Fräsbearbeitungen aus den genannten Quellen zurück, anhand derer KNN trainiert werden. Es ermöglicht die Schnittwertbestimmung für systemseitig bislang unbekannte Werkzeuge oder Bearbeitungsaufgaben ohne vorherige Versuchsdurchführung und verringert somit den Planungsaufwand. [FICH99] Ähnliche, zudem lernfähige Ansätze zeigen **Kaldos et al.** und **Dagiloke et al.** [DAGI95a, DAGI95b, KALD99], deren Ergebnisse u.a. von **Maropakis** weiterentwickelt werden. [MARO99] **Wegner**

kombiniert den Einsatz künstlicher neuronaler Netze mit evolutionären Algorithmen zur Optimierung der Wissensakquise bei Schleifprozessen. [WEGN07]

Die Wissensbasen in den Systemen zur erfahrungsbasierten NC-Programmierung von **Pudig** (Fräsbearbeitung) [PUDI98] und **Hyun** (Bohrbearbeitung) [HYUN08] hingegen basieren auf Real-Prozessdaten. Statt KNN setzen sie bei gleicher Funktionalität das vergleichsweise transparentere Konzept des fallbasierten Schließens (vgl. Kap. 4.2.4) ein.

Das System zur wissensbasierten Fertigungsplanung für komplexe Bohrprozesse von **Papsch** nutzt wiederum regelbasierte Algorithmen zur Wissenserfassung. Sein Konzept der 80/20-Teilautomatisierung mit Differenzierung von *Pre-*, *In-* und *Post-*Prozess bietet den Vorteil der direkten Integration in vorhandene CAD/CAM-Software. [PAPS11]

4.3.4 Lösungsansätze für den Produktionsbetrieb

Ein Beispiel für wissensbasierte Systeme zur Optimierung des Produktionsbetriebs ist das Konzept von **Scholz-Reiter et al.** Es kombiniert die Methoden des fallbasierten Schließens und künstlicher neuronaler Netze zur Regelung der Pufferbestände von Arbeitsstationen eines Produktionssystems. Pro Werkstück an jeder Arbeitsstation wird ein KNN trainiert, um den Idealbestand vor der Station zu regeln. Die vollständige Produktionsregelung mittels KNN und deren Konfiguration für bestimmte Produktionssituationen bedeuten hohe Aufwände in der Datenvorverarbeitung. Daher werden im genannten Konzept je nach Produktionssituation geeignete und entsprechend vorkonfigurierte KNN mittels fallbasiertem Schließen ausgewählt. Dem Nutzer wird neben einer Lösungsbeschreibung auch eine Erklärung zur Verfügung gestellt. [SCHO05]

Ein System zur automatisierten Akquisition und Standardisierung von Fertigungswissen bei der Bearbeitung von Freiformgeometrien im Werkzeug- und Formenbau entwickelt **Schneider**. Basierend auf maschinellen Lernverfahren entlastet es den Programmierer von Routineaufgaben wie der Wahl von Werkzeug oder Schnittparametern. Als Datenbestand dienen Dokumentationsdateien eines CAM-Systems zur werkstatorientierten Programmierung, deren Informationen in Gestalt von Attribut-Wert-Paaren vorliegt. Nach dem Einlesen in die Falldatenbank werden sie automatisch in Regelwissen überführt: Basierend auf letzterem werden dem Nutzer beim Programmierprozess aktiv featurespezifisch häufig gewählte (Standard-)Werkzeuge oder Schnittwerte empfohlen. [SCHN10]

Zur Unterstützung von Mitarbeitern im Produktionsbetrieb entwickelt **Zapp** ein semantisches Wissensmanagementsystem. In Form eines *Wiki*-Systems stellt es dem Nutzer Fertigungswissen zur Verfügung. Komplexere Arbeitsabläufe können durch zusätzliche Anwendungsmodule abgebildet und in das System integriert werden. Die Wissensbasis ist semantisch aufgebaut, als Ontologie implementiert und umfasst for-

malisiertes maschinenverständliches Expertenwissen in Form von Regeln. [ZAPP14] Ein ähnlicher Ansatz wird von **Wenzel und Lorenz** zur Durchführung von Energieeffizienzanalysen und -bewertungen an Produktionssystemen verwendet. [WL11] Auch **Rühmann** nutzt semantische Netze in ihrem System zur Optimierung von Produktionsanläufen. [RÜHM06]

4.4 Zwischenfazit

Die im vorangegangenen Abschnitt genannten Beispiele belegen die Verbreitung der in Abschnitt 4.2 vorgestellten wissensbasierten Technologien im Bereich der Fabrikplanung: Zahlreiche Systeme bieten dem jeweiligen Fachplaner Unterstützung bei Fabrik-, Fertigungssystem- und Technologieplanung sowie dem Betrieb von Produktionssystemen.

Die nachfolgenden Tabellen zeigen auf, dass die in Kapitel 2.3 gestellten Anforderungen von den betrachteten Forschungsansätzen teilweise erfüllt werden. Bei ähnlichen Ansätzen wurden jene mit der höchsten Bewertung herangezogen.

Tabelle 4.2: Bewertung betrachteter Forschungsansätze in der Fabrikplanung

Ansatz	Anwendungsübergreifende Anforderungen				Anwendungsspezifische Anforderungen				
	Verarbeitung von Eingangsdaten aus der Zielfestlegungsphase	Automatische rechnergestützte Problemlösung und Bewertung	Auf Planungspersonal zugeschnittene Dialog- und Erklärungskomponente	Expertenseitig modifizier- und erweiterbare Lösungsdatenbank	Modul zur Fertigungssystemplanung	Modul zur Technologieplanung	Ökonomische Bewertung	Ökologische Bewertung	Machbarkeit & Kritikalität MMS
Meierlohr	◆	◆	◆	◆	◇	◇	◇	◇	◇
Dombrowski & Tiedemann	◆	◇	◆	◆	◆	◇	◇	◇	◇
Schack	◆	◆	◇	◇	◇	◇	◆	◇	◇
Schady	◆	◇	◇	◆	◇	◇	◇	◇	◇
Heinen	◇	◇	◆	◆	◇	◇	◇	◇	◇
Clauß	◆	◆	◆	◆	◇	◇	◇	◇	◇

◆ Anforderungen erfüllt

◇ Anforderungen teilweise erfüllt

◇ Anforderungen nicht erfüllt

Tabelle 4.3: Bewertung betrachteter Forschungsansätze in der Fertigungssystemplanung

Ansatz	Anwendungsübergreifende Anforderungen				Anwendungsspezifische Anforderungen				
	Verarbeitung von Eingangsdaten aus der Zielfestlegungsphase	Automatische rechnergestützte Problemlösung und Bewertung	Auf Planungspersonal zugeschnittene Dialog- und Erklärungskomponente	Expertenseitig modifizier- und erweiterbare Lösungsdatenbank	Lösungsraum auf Basis einer modularen Referenzstruktur eines FS	Zielekatalog- und werkstückabhängige Dimensionierung des FS	Ökonomische Bewertung	Ökologische Bewertung	Machbarkeit & Kritikalität MMS
Gerken	◇	◇	◆	◆	◇	◇	◇	◇	◇
Fu	◇	◇	◆	◆	◇	◇	◇	◇	◇
Jurklies	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◇	◇
Leimer	◆	◆	◆	◆	◇	◇	◇	◇	◇
Willms	◆	◇	◆	◆	◇	◆	◆	◇	◇
Konrad	◇	◆	◆	◆	◇	◇	◇	◇	◇
Behrendt	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◆	◇	◇
Krauss	◆	◆	◆	◆	◇	◇	◇	◇	◇

Tabelle 4.4: Bewertung betrachteter Forschungsansätze in der Technologieplanung

Ansatz	Anwendungsübergreifende Anforderungen				Anwendungsspezifische Anforderungen				
	Verarbeitung von Eingangsdaten aus der Zielfestlegungsphase	Automatische rechnergestützte Problemlösung und Bewertung	Auf Planungspersonal zugeschnittene Dialog- und Erklärungskomponente	Expertenseitig modifizier- und erweiterbare Lösungsdatenbank	Lösungsraum auf Basis historischer Daten	Werkstückabhängige Kritikalitätsbewertung	Aufzeigen entscheidungsrelevanter Bearbeitungsmerkmale zur Aufwandsminimierung	Ökonomische Bewertung	Machbarkeit & Kritikalität MMS
Fichtner	◇	◆	◆	◇	◇	◇	◇	◇	◇
Wegner	◇	◇	◆	◇	◇	◇	◇	◇	◇
Pudig	◇	◇	◆	◆	◆	◇	◇	◇	◇
Hyun	◇	◆	◆	◆	◆	◇	◇	◇	◇
Papsch	◆	◇	◆	◆	◇	◇	◇	◇	◇

Die vorgestellten Ansätze weisen teilweise Funktionstiefen auf, die deutlich über das vorliegende Anforderungsprofil hinausgehen, etwa die Ausplanung ganzer Fertigungsprozessketten auf Basis von Eingangsdaten wie Featureparametern und jährlichem Produktionsvolumen.

Die Notwendigkeit der Entwicklung einer neuen Methode zur wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung der Minimalmengenschmierung in flexiblen Fertigungssystemen ergibt sich daraus, dass kein Ansatz sämtlichen Anforderungen genügt. So weist keiner der Ansätze eine Funktionalität zur ökologischen Bewertung der Lösungsvarianten auf. Auch die Technologie der Minimalmengenschmierung findet bei den wenigsten Ansätzen Berücksichtigung, mitunter auch wegen ihrer erst beginnenden Verbreitung [ABEL12b, FRIC10, GÖTZ98]. Konkrete Erwähnung findet sie lediglich in der Arbeit von Behrendt, wobei Technologie-, Prozess- und Kostendaten nicht spezifiziert werden [BEHR09]. Zur Beantwortung der Forschungsfragen F1.1, F1.2 und F1.3 sind folglich detailliertere Untersuchungen erforderlich. Deren Ergebnisse werden im Rahmen von Kapitel 5 beschrieben.

5 Experimentelle Untersuchung des Einsatzes von MMS in flexiblen Fertigungssystemen

In Kapitel 3 wurden die technischen Grundlagen und Prämissen für den Einsatz von MMS in der Aluminiumzerspanung und die Anforderungen von FFS erläutert. Zur Beantwortung der Forschungsfrage F1.1 sind diese Informationen jedoch nicht ausreichend.

Zu untersuchen sind daher zunächst die Umsetzbarkeit der Einführung von MMS in spanenden FFS für Aluminiumbauteile sowie die erforderlichen technischen und organisatorischen Maßnahmen. Des Weiteren sind in Vorbereitung zur Beantwortung der Forschungsfrage F1.3 auch die unmittelbaren Auswirkungen der Maßnahmenumsetzung auf den Energiebedarf des FFS zu ermitteln. Dies erfolgt mittels der Methode der Energiewertstromanalyse.

Da der Einsatz flüssiger KSS derzeit in der Industrie als Stand der Technik gilt (vgl. Kapitel 3), erfolgt die Beschreibung der Einführung von MMS in FFS auf Basis der technischen Unterschiede zu konventioneller Kühlschmierstrategie.

5.1 Analyse der Werkstückeignung hinsichtlich des Einsatzes von Minimalmengenschmierung

Bereits in Kapitel 3.2 wurde aufgezeigt, dass das Werkstück einen maßgeblichen Einfluss auf die Umsetzbarkeit von MMS-Bearbeitung in der spanenden Fertigung darstellt. So ist der Einsatz von MMS bei der Aluminiumzerspanung derzeit mit Einschränkungen technisch möglich: Bohroperationen mit Durchmessern unter 2 mm und Werkzeuglängen über dem 75-fachen Durchmesser sowie Verfahren mit geometrisch undefinierter Schneide wie etwa Schleifen oder Honen weisen der MMS-Technologie die Grenzen auf. [ABEL12b]

Folglich bildet die Untersuchung der Eignung der in Kapitel 2.1 genannten Bauteile Kurbelgehäuse und Zylinderkopf für die Einführung von MMS den Grundstein der Machbarkeits- und Auswirkungsanalyse in Bezug auf FFS. Das Ergebnis einer Analyse der Verteilung von Werkzeugen mit geometrisch bestimmter Schneide bei FFS für Aluminium-Kurbelgehäuse der BMW Group zeigt Abbildung 5.1. Bohrwerkzeuge dominieren das Feld bei einem Anteil von 57 Prozent. Ein ähnliches Bild ergibt sich bei Zylinderköpfen. Aus diesem Grund und wegen der eingangs erwähnten Grenzen der MMS-Technologie liegen Bohrprozesse im Fokus der Untersuchung der Bauteileignung für den Einsatz von MMS.

Dazu wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit und der in deren Verlauf betreuten Abschlussarbeit von Eimer [EIME14] Experteninterviews mit zahlreichen Lieferanten für Zerspanungswerkzeuge und MMS-Systeme durchgeführt. Zudem wurden Zerspanversuche mit 1- und 2-Kanal-MMS-Systemen mit dem im Motorenbau verbreiteten

(vgl. Abschnitt 3.3) Werkstoff AlSi7MgCu0,5 T6 durchgeführt. Untersuchungsobjekte waren Zylinderköpfe, Kurbelgehäuse und Versuchswerkstücke aus dem genannten Material.

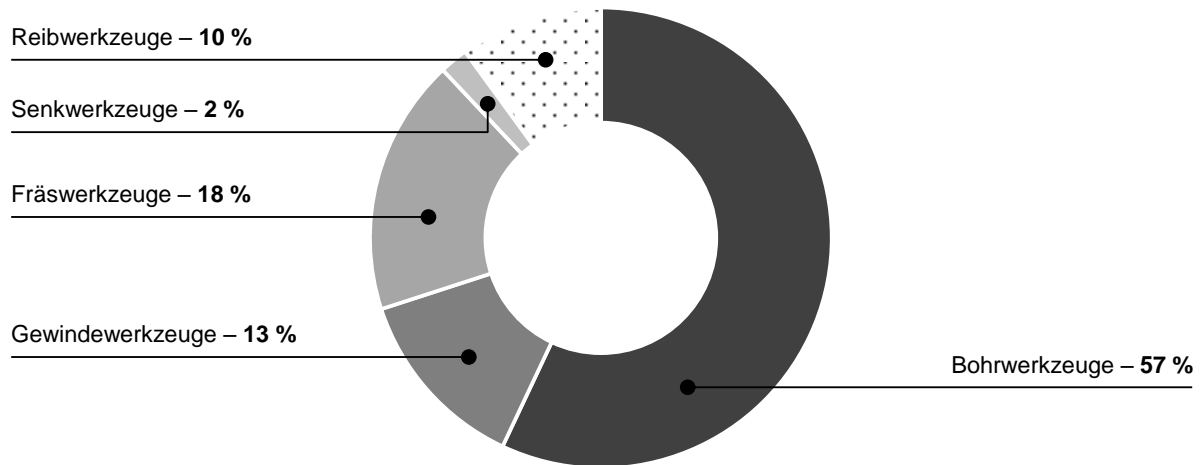


Abbildung 5.1: Häufigkeitsverteilung der Werkzeuge mit geometrisch bestimmter Schneide bei flexiblen Fertigungssystemen für Aluminium-Kurbelgehäuse der BMW Group [GREB16]

5.1.1 Identifikation entscheidungsrelevanter Parameter

Die Umsetzbarkeit des MMS-Einsatzes und der damit verbundene Aufwand wird maßgeblich von den Eigenschaften des Werkstücks bestimmt (vgl. Kapitel 3.3). Daher wird im Folgenden eine Analyse zu Einfluss und Entscheidungsrelevanz einzelner Parameter durchgeführt.

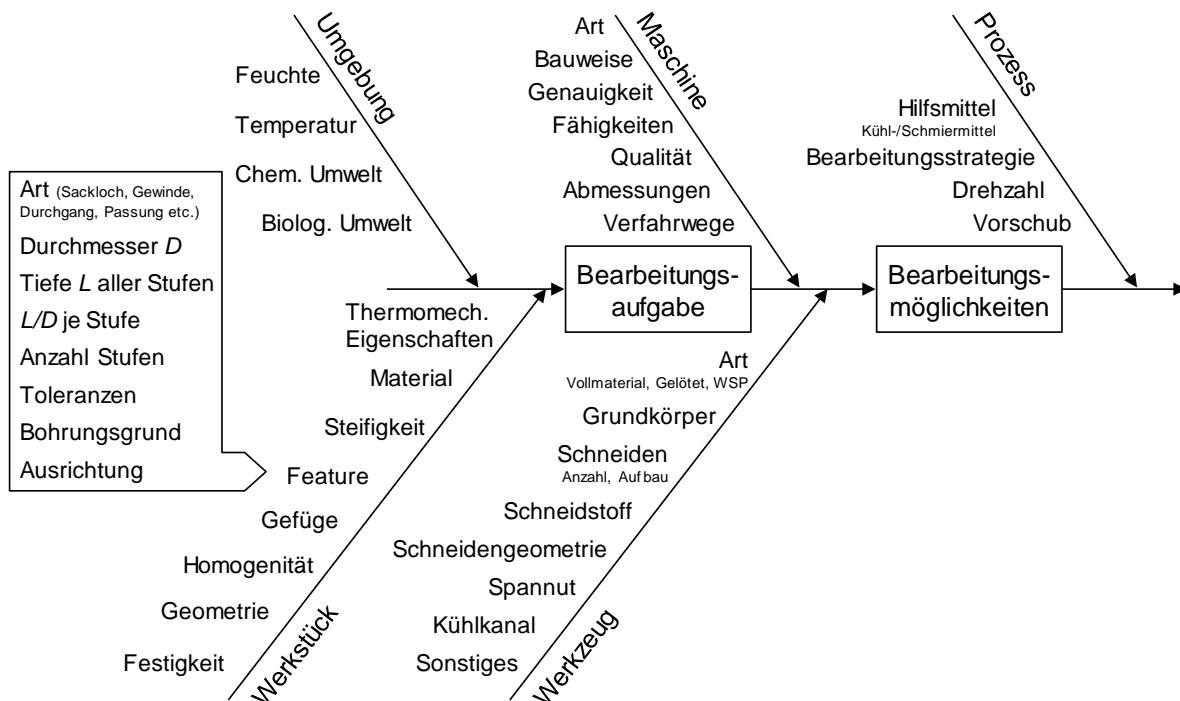


Abbildung 5.2: Die Bearbeitungsaufgabe als Eingangsparameter der Technologieplanung

Abbildung 5.2 gibt einen Überblick über die Werkstückparameter: Durch Beschränkung auf den Werkstoff AlSi7MgCu0,5 T6 sind im betrachteten Fall lediglich die Merkmale der Bearbeitungsfeatures sowie des lokalen Materialgefüges variabel. Die Featureparameter werden in Tabelle 5.1 näher erläutert und um in der Praxis relevante Wertebereiche ergänzt. Analysen der Bauteile im Fokus ergeben zudem einen „Kernbereich“ von Features mit einer Bohrtiefe bis zu 200 mm und einem Durchmesser bis zu 20 mm, in dem 95 Prozent aller Features liegen.

Tabelle 5.1: Betrachtete Featureparameter von Bohrungen in Anlehnung an [PAPS11]

#	Bezeichnung	Beschreibung	Wertebereich
1	Durchmesser D	Durchmesser des Features	0,5...20 mm
2	Bohrungstiefe L	Tiefe der Bohrung über alle Stufen	0,5...500 mm
3	L/D_{Stufe}	L -zu- D -Verhältnis einer Stufe	0...100
4	N_{Stufen}	Anzahl an positiven Stufen	0...5
5	$N_{Gewinde}$	Anzahl an Gewinden in einem Feature	0...2
6	$N_{Passungen}$	Anzahl an Passungen in einem Feature	0...2
7	Gewindetypen	Metrisches ISO-Regelgewinde (M), metrisches ISO-Feingewinde (MF), UNC, UNF, NPT, nicht dichtendes zylindrisches Rohrgewinde (G)	
8	Toleranzen	Form- und Lagetoleranzen	
9	Passungen	ISO-Passung	
10	Oberflächenrauheit	Meist allgemeine Rauheiten, nur selten spezifische Oberflächensymbole	
11	Ausrichtung / Eintauchvarianten	Ausrichtung der Bohrung und senkrecht, schräg oder in eine nicht ebene Fläche eintauchend	
12	Besondere Formen	Stock Finish, RTJ-Nut, Flanschflächen, konstruktionsbedingte Komplexitäten	

Zur Identifikation der Featureparameter, die von entscheidender Bedeutung für die Umsetzbarkeit von MMS-Prozessen sind, erfolgt im ersten Schritt eine erfahrungsbasierte Bewertung des relativen Mehraufwandes bei der Entwicklung und Herstellung von MMS-Werkzeugen im Vergleich zur Nassbearbeitung. Tabelle 5.2 stellt das Resultat der mit Unterstützung der Werkzeughersteller *Gühring KG*, *Mapal Dr. Kress KG*, *Schwegler Werkzeugfabrik GmbH & Co. KG* und *Kennametal Deutschland GmbH* durchgeführten Analyse dar [GREB16].

Den befragten Werkzeugherstellern zufolge haben vergleichsweise hohe Stufensprünge, Bohrtiefen über 200 mm und Durchmesser unter 5 mm den größten Einfluss auf den Aufwand, wohingegen vorgegebene Toleranzen, Passungen oder Gewindetypen keinen nennenswerten Zusatzaufwand bedeuten. Auffällig sind die Analogien bei der Anzahl von Gewinden und Passungen sowie bei Toleranzen und Oberflächenrauheit. Hauptursächlich für Mehrkosten von MMS-Werkzeugen seien laut Aussagen der Hersteller zusätzliche Maßnahmen zur Gewährleistung der Spanabfuhr wie etwa polierte

Spannuten sowie Aufwände zur Sicherstellung der Schmierstoffzufuhr in den Kühlkanälen. Anpassungen von Schneide oder Grundkörper seien demnach nur selten erforderlich und haben keinen signifikanten Einfluss auf die Werkzeugkosten.

Tabelle 5.2: Relativer Mehraufwand im Vergleich zur Nassbearbeitung [GREB16]

#	Bezeichnung	Relativer Mehraufwand					Bemerkung
		Grundkörper	Schneide	Spanabfuhr	Kühlkanäle	Weitere Maßnahmen	
	Gewichtung	0,25	0,25	1	1	1	Gesamtaufwand
1a	Großer Durchmesser D	0	0	+	+	++	+ > 20 mm
1b	Kleiner Durchmesser D	+	0	+	+	++	++ < 5 mm
2	Große Bohrungstiefe L	+	0	+	++	+	++ > 200 mm
3	Hohes L/D_{Stufe}	+	0	+	++	+	++ > 15
4	N_{Stufen}	0	0	+	++	++	++ ≥ 3
5	$N_{Gewinde}$	0	0	+	0	+	+
6	$N_{Passungen}$	0	0	+	0	+	+
7	Gewindetypen	0	0	0	0	0	0
8	Toleranzen	0	0	++	+	+	++
9	Passungen	0	0	0	0	0	0
10	Oberflächenrauheit	+	+	++	+	+	++
11	Ausrichtung / Eintauchvarianten	0	0	+	0	+	+
12	Besondere Formen	0	+	+	+	+	+

Legende: ++ hoher Mehraufwand + mittlerer Mehraufwand 0 kein Mehraufwand

Ausgehend von der erfahrungsbasierten Bewertung erfolgt die Ableitung und Gewichtung der acht einflussreichsten Featureparameter anhand des Analytischen Hierarchieprozesses (AHP) nach Saaty. Im Gegensatz zur klassischen Nutzwertanalyse findet ein Paarvergleich zwischen allen Alternativen statt. Der damit einhergehende erhöhte Durchführungsaufwand resultiert in präziseren und objektiveren Bewertungsläufen. Zur Vermeidung und Korrektur subjektiver Entscheidungen dient zudem der Inkonsistenzfaktor, der Widersprüche in den Paarvergleichen aufzeigt. Die Positionen der Untersuchungsteilnehmer werden einzeln abgefragt und mittels Bildung des geometrischen Mittelwerts zusammengeführt. Bewertet werden die Alternativen nach der Saaty-Skala (vgl. Tabelle 5.3), anschließend erfolgt die Gewichtung anhand der Eigenwertmethode. [SAAT90, RIED06]

Tabelle 5.3: Bewertungsskala nach Saaty [SAAT90], übersetzt aus dem Englischen nach [RIED06]

Skalenwert	Definition
1	Gleiche Bedeutung der Elemente n und m
3	Etwas größere Bedeutung des von n gegenüber m
5	Erheblich größere Bedeutung von n gegenüber m
7	Sehr viel größere Bedeutung von n gegenüber m
9	n ist gegenüber m absolut dominierend
2, 4, 6, 8	Zwischenwerte

Neben der Durchführung stellt auch die Berechnung einen signifikanten Mehraufwand im Vergleich zur Nutzwertanalyse dar und ist manuell nur bei geringer Anzahl zu vergleichender Elemente durchführbar [RIED06]. Am Markt existieren daher zahlreiche IT-Lösungen zur Unterstützung des AHP und der automatisierten Berechnung des Eigenwerts. Die Bewertung wurde mit Hilfe eines von Goepel beschriebenen AHP-Tools durchgeführt [GOEP13]. Eine Übersicht über die abgeleiteten Featureparameter sowie das Ergebnis der Gewichtung zeigt die folgende Tabelle 5.4.

Tabelle 5.4: Paarvergleich des Einflusses von Featureparametern auf den Mehraufwand bei Entwicklung und Fertigung von MMS-Bohrwerkzeugen in Relation zu Werkzeugen für die Nassbearbeitung [GREB16] in Anlehnung an Saaty [SAAT90]

#	Element	1	2	3	4	5	6	7	8	Gew.
1	Durchmesser D	1	0,69	1,71	0,41	7,11	4,16	7,11	3,98	18,9 %
2	Bohrungstiefe L	1,44	1	3,00	0,34	5,59	5,94	6,80	3,98	23,0 %
3	L/D_{Stufe}	0,58	0,33	1	0,58	4,64	3,00	4,22	2,29	12,5 %
4	N_{Stufen}	2,47	2,92	1,71	1	4,48	3,91	3,98	2,29	26,4 %
5	$N_{Gewinde}$ bzw. $N_{Passungen}$	0,14	0,18	0,22	0,22	1	0,33	1,00	0,33	3,0 %
6	Oberflächenrauheit / Toleranzen	0,24	0,17	0,33	0,26	3,00	1	3,00	1,00	5,9 %
7	Ausrichtung / Eintauchvarianten	0,14	0,15	0,24	0,25	1,00	0,33	1	0,20	2,9 %
8	Besondere Formen	0,25	0,25	0,44	0,44	3,00	1,00	5,00	1	7,5 %

Abbildung 5.3 fasst die Ergebnisse der durchgeführten Studie zusammen. Aus der Grafik geht die Dominanz der Parameter Stufenanzahl, Bohrungsdurchmesser und --tiefe deutlich hervor. Ihr Einfluss auf den Bohrbearbeitungsprozess mit MMS beträgt den befragten Herstellern zufolge im Mittel zusammengenommen über 68 Prozent. Das L/D -Verhältnis je Stufe und besondere Formen sind demnach mit insgesamt durchschnittlich 20 Prozent erheblich weniger relevant. Der Einfluss der übrigen bewerteten Parameter ist laut Aussagen der Werkzeughersteller vernachlässigbar gering.

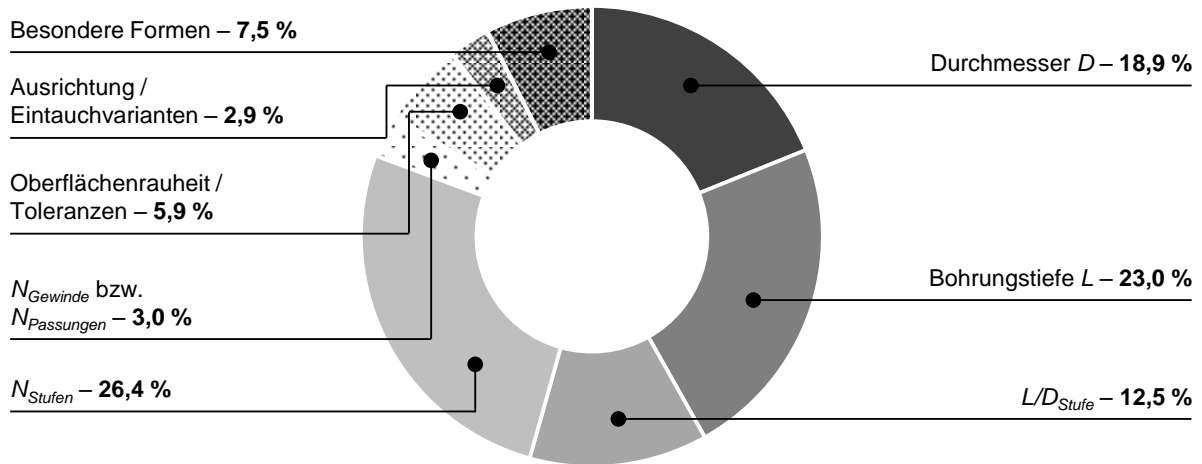


Abbildung 5.3: Einfluss von Featureparametern auf den Mehraufwand bei Entwicklung und Fertigung von MMS-Werkzeugen [GREB16]

Begleitend zur Parametergewichtung war auch der Einfluss der Ausprägung von Durchmesser und Bohrungstiefe auf den Mehraufwand bei Entwicklung und Fertigung von MMS-Werkzeugen Bestandteil der Studie. Untersucht wurden Bohrungen mit Durchmessern bis 20 mm und Bohrungstiefen bis 200 mm.

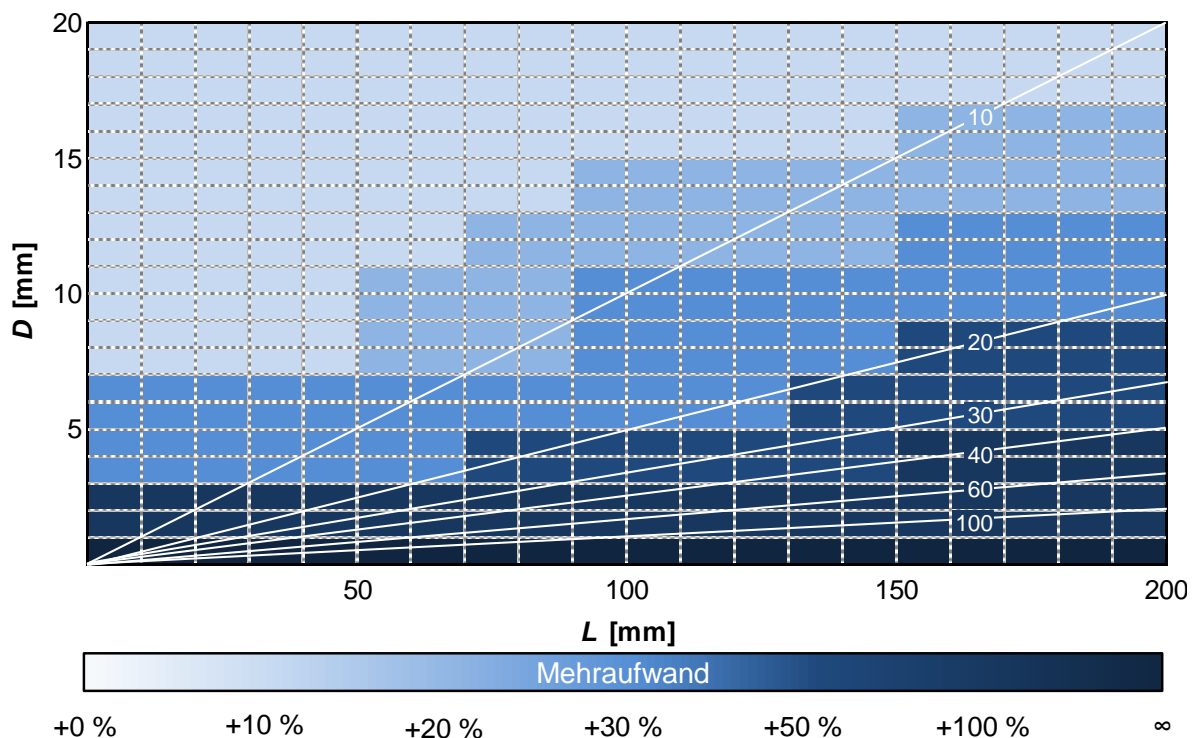


Abbildung 5.4: Ergebnis der Experteninterviews im Rahmen einer betreuten Arbeit zu Mehrkosten bei Entwicklung und Fertigung von MMS-Werkzeugen auf Basis von Bohrungsdurchmesser und -tiefe [GREB16]

Abbildung 5.4 zeigt das Ergebnis der Befragung. Dargestellt sind die über alle teilnehmenden Werkzeughersteller hinweg gemittelten geschätzten Mehrkosten für Entwicklung und Fertigung von MMS-Werkzeugen in Relation zu herkömmlichen Werkzeugen für die Nassbearbeitung. Die Farbskala ist aus Gründen der Lesbarkeit nichtli-

near. Hilfslinien gleichen L/D -Verhältnisses (Weiß) zeigen den Einfluss von diesem bei Bohrungstiefen zwischen 70 und 150 mm auf. Bei allen befragten Herstellern führen höhere Bohrungstiefen insbesondere in Verbindung mit geringeren Durchmessern zu erhöhten Mehrkosten, während größere Durchmesser tendenziell geringere Mehrkosten verursachen. Durchmesser unter einem Millimeter sind den Befragten gemäß technologisch derzeit nicht umsetzbar (s. auch [ABEL12b]): Diese Unsicherheit resultiert für diesen Bereich in einem erhöhten Risikoaufschlag für Versuchsdurchführungen oder die Unterteilung in mehrere Teilprozesse.

In der Recherche wurde ebenfalls deutlich, dass die Bewertung des zusätzlichen Aufwands für Entwicklung und Fertigung von MMS-Werkzeugen je nach Hersteller variiert. Als Gründe sind etwa unterschiedliche Fertigungsprozesse, Forschungs- und Entwicklungsstände sowie verschiedene technologische Ansätze bei der Werkzeugauslegung zu nennen. Während ein Hersteller die Konstruktion MMS-gerechter Kühlkanäle als größten Kostentreiber nennt, sieht ein anderer den Schwerpunkt auf der Oberflächenqualität der Spannuten. Dies führt auch zu einer uneinheitlichen Bewertung der Mehrkosten der Optimierungsmaßnahmen. Eine allgemeingültige Definition der Wirkzusammenhänge zwischen Mehrkosten und betrachteten Parametern auf Basis der Experteninterviews ist daher nicht durchführbar. Dennoch ermöglichen die Resultate eine grobe Darstellung der Grenzbereiche, die durch weitere Untersuchungen zu validieren sind. Auf diese wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

5.1.2 Ableitung zu untersuchender entscheidungsrelevanter Bearbeitungsfeatures

Im vorangegangenen Abschnitt wurden mit Stufenanzahl, Bohrungstiefe und Durchmesser die drei Featureparameter mit dem größten Einfluss auf den Mehraufwand bei Entwicklung und Fertigung von MMS-Werkzeugen identifiziert. Ausgehend von diesem Ergebnis erfolgt die Analyse der Featurekritikalität der Untersuchungsobjekte.

Wie in Kapitel 2.1 erläutert, findet die Untersuchung an Zylinderköpfen und Kurbelgehäusen der BMW Group statt. Exemplarisch werden der Zylinderkopf N20 und das Kurbelgehäuse B48 gewählt, da sie in großen Stückzahlen in flexiblen Fertigungssystemen produziert werden und dort die jeweils längste Bearbeitungszeit aller Vierzylinder-Bauteile aufweisen (vgl. Abbildung 5.5). Beide sind Bestandteile von Vierzylinder-Ottomotoren.

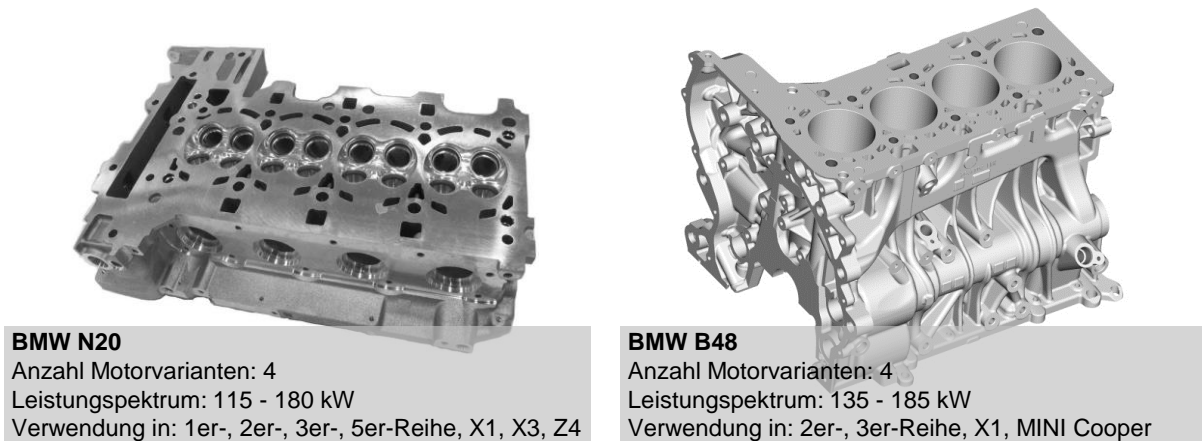


Abbildung 5.5: Untersuchte Werkstücke Zylinderkopf N20 und Kurbelgehäuse B48 der BMW Group

Bei beiden Bauteilen sind nach den in Abschnitt 5.1.1 ermittelten Kriterien Fluidkanäle und mehrstufige Features zur Montage von Anbauteilen als entscheidungsrelevant einzustufen. Das Feature mit dem höchsten L/D -Verhältnis ist der Hauptölkanal auf der Einlassseite des Zylinderkopfes N20 mit $L/D = 50,3$ bei $L = 405$ mm (vgl. Abbildung 5.6). Darüber hinaus erweisen sich bei diesem Bauteil Features wie etwa Injektor-, Zündkerzen- oder Ventilfehrungsbohrung mit bis zu sieben Stufen als entscheidungsrelevant im Sinne der durchgeführten Studie.

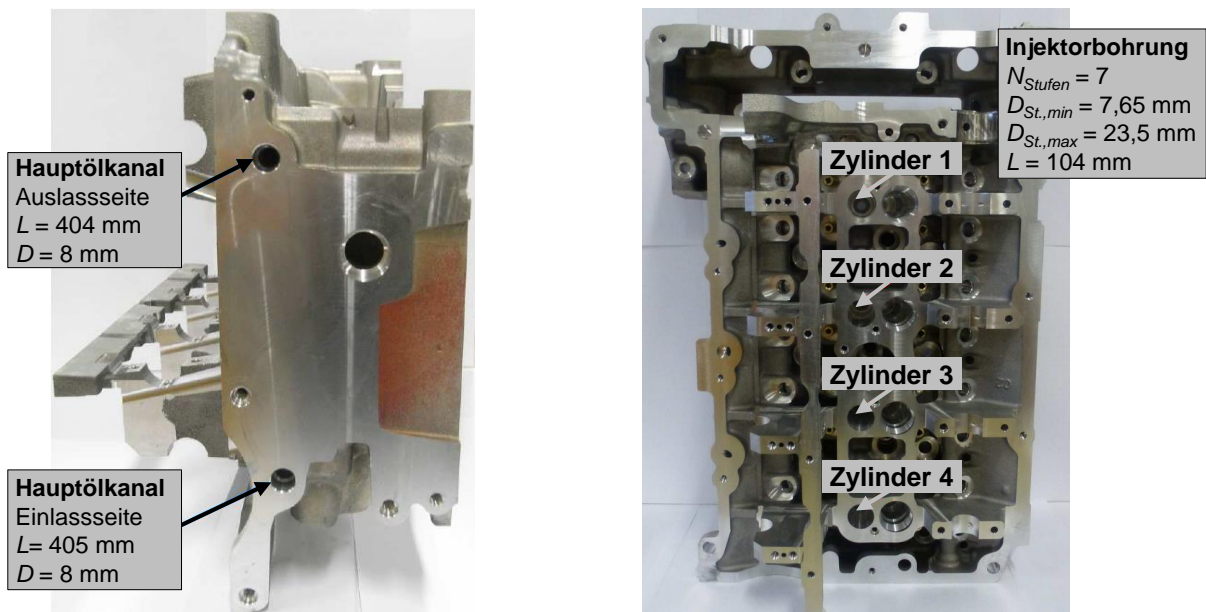


Abbildung 5.6: Hauptölkanäle und Injektorbohrungen im Zylinderkopf N20

Beim Kurbelgehäuse resultiert der Mehraufwand vorrangig aus Tiefbohrfeatures: Öl- und Wasserkanäle sowie *Blow-By*-Bohrungen mit L/D -Verhältnissen bis zu 32,2 (vgl. Abbildung 5.7) und Durchmessern ab 3,5 mm sind teilweise mehrfach je Zylinder vorhanden.

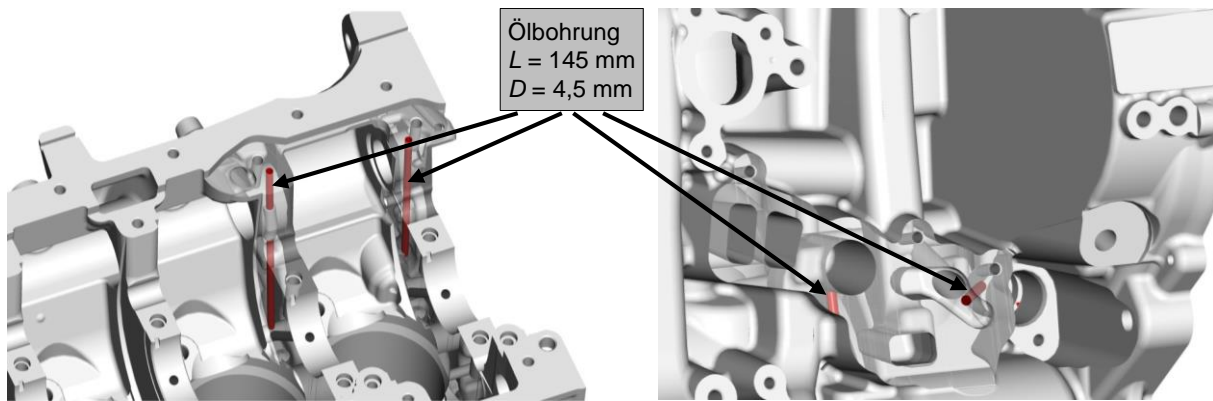


Abbildung 5.7: Ölbohrung im Kurbelgehäuse B48

Die Ergebnisse der Bauteilanalyse sind in Tabelle 5.5 und Tabelle 5.6 zusammengefasst.

Tabelle 5.5: Zur Untersuchung ausgewählte Features des Zylinderkopfes N20. Grau hinterlegt sind die als kritisch eingestuft Featureparameter.

#	N_{Stufen}	$D_{\text{St.,min}}$ [mm]	$D_{\text{St.,max}}$ [mm]	L [mm]	Max. L/D	Beschreibung
1	2	8,0	$9,4^{+0,01}_{-0,14}$	405,0	50,3	Hauptölkanal
2	4	4,0	$13,0_{\pm 0,1}$	23,5	2,0	Hydraulischer Ventilspielausgleich (HVA)
3	7	10,8	30,0	$118,8_{\pm 0,1}$	3,3	Zündkerzen- und Valvetronic-Bohrung
4	7	$7,65^{+0,022}$	$23,5_{\pm 0,1}$	104,0	2,1	Injektorbohrung
5	5	$14,5_{\pm 0,05}$	42,0	$148^{+0,5}$	0,8	Stellmotorbohrung
6	5	$5,01_{-0,003}$	31,5	68	3,6	Ventilsitz und -führung (Einlass)
7	5	$6,01_{\pm 0,003}$	28,6	78	4,2	Ventilsitz und -führung (Auslass)

Tabelle 5.6: Zur Untersuchung ausgewählte Features des Kurbelgehäuses B48. Grau hinterlegt sind die als kritisch eingestuft Featureparameter.

#	D [mm]	L [mm]	L/D	Beschreibung
1	$3,5_{\pm 0,1}$	$41_{\pm 0,3}$	11,7	Stegkühlungsbohrung Wasserraum
2	$4,5_{\pm 0,1}$	$145_{\pm 0,3}$	32,2	Ölbohrung Druckölraum
3	$6_{\pm 0,1}$	110^{+1}	18,3	Ölbohrung Druckölraum
4	$7_{\pm 0,2}$	$158,5^{+0,5}$	22,6	Blow-By-Bohrung
5	$8_{\pm 0,2}$	$148^{+0,5}$	18,5	Ölbohrung Druckölraum
6	$9_{\pm 0,2}$	140_{-1}	15,6	Ölbohrung Druckölraum

Abbildung 5.8 veranschaulicht den monetären Mehraufwand zur Umsetzung von MMS bei den genannten Tiefbohrfeatures beider Bauteile. Während die Stegkühlungsbohrung im Kurbelgehäuse mit 3,5 mm den geringsten Durchmesser hat, weist der einlassseitige Hauptölkanal mit 405 mm die größte Bohrtiefe auf. Aus Gründen der

Übersichtlichkeit sind mehrstufige Features und solche mit geringer Entscheidungsrelevanz nicht dargestellt.

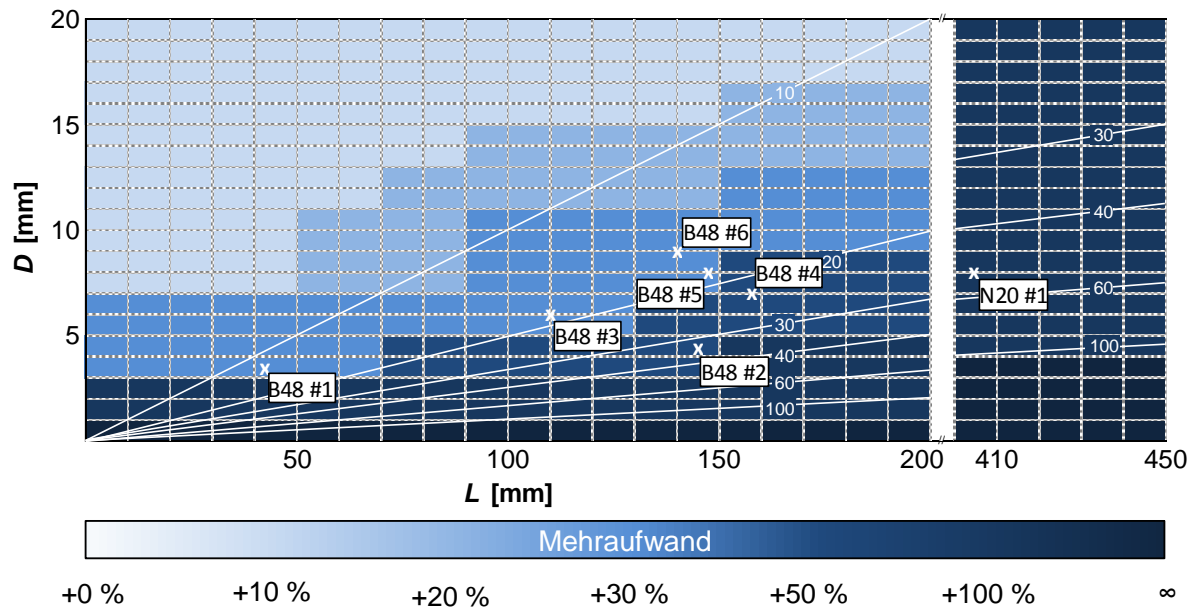


Abbildung 5.8: Einordnung der nach L/D -Verhältnis als entscheidungsrelevant eingestuften Features der analysierten Bauteile ZK N20 und KG B48

5.1.3 Experimentelle Untersuchung entscheidungsrelevanter Bearbeitungsfeatures

Die experimentelle Untersuchung des Einsatzes von MMS zur Bearbeitung der im vorangegangenen Abschnitt ausgewählten Features erfolgte an mehreren Standorten: Während die Zylinderkopffeatures im Versuchsfeld zweier Werkzeughersteller untersucht wurden, wurde die Untersuchung der Kurbelgehäusefeatures in den Versuchsfeldern des *Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen (PTW)* der *Technischen Universität Darmstadt*, des BMW Group-eigenen Technologiezentrums sowie der beiden bereits beim Zylinderkopf involvierten Werkzeughersteller durchgeführt. Da sich die Versuchsergebnisse decken, wird im Bereich des Zylinderkopfs auf die Ergebnisse eines Werkzeugherstellers und beim Kurbelgehäuse auf die des PTW zurückgegriffen. Diese werden im Folgenden beschrieben. Auf namentliche Nennung der am Versuch beteiligten Werkzeughersteller wird aus Gründen der Geheimhaltung verzichtet, sie werden im Folgenden als „Werkzeughersteller A“ (WZA) und „Werkzeughersteller B“ (WZB) bezeichnet.

5.1.3.1 Versuchsumgebung und Messeinrichtungen

Beim Werkzeughersteller A kam als Versuchsmaschine eine vierachsige Ex-Cell-O XHC 241 zum Einsatz, beim PTW eine fünfachsiges Grob G350 – beide sind Horizontal-Bearbeitungszentren (vgl. Abbildung 5.9).



Abbildung 5.9: Versuchsmaschinen im Versuchsfeld des Werkzeugherstellers A (links) und des PTW der TU Darmstadt (rechts).

Während das BAZ des Werkzeugherstellers A ein Serienmodell ist, ist die Maschine des PTW ein Prototyp: Sie wurde 2010 auf der internationalen Ausstellung für Metallbearbeitung AMB vom Hersteller *Grob-Werke GmbH & Co. KG* (Grob) als weltweit erstes Bearbeitungszentrum ohne Hydraulik vorgestellt. Statt mit hydraulischen Systemen erfolgt die Spannung von Werkzeugen und Werkstücken durch Servomotoren. Dies soll dem Hersteller zufolge die Geräuschentwicklung beim Lösen der Werkzeuge sowie Nebenzeiten reduzieren und die Energieeffizienz der Maschine erhöhen. [GROB15, MAV10]

Beide Versuchsträger wurden für den Einsatz mit MMS umgerüstet. Das Modell von Grob ermöglicht die Nutzung von 1-Kanal-MMS-Systemen, bei dem BAZ der *Ex-Cell-O GmbH* (Ex-Cell-O, mittlerweile Teil der *MAG IAS GmbH*, kurz: MAG) ist auch ein 2-Kanal-MMS-System einsetzbar. Als 1-Kanal-System wurde ein Aerosolmaster 4000 der *Rother Technologie GmbH & Co. KG* (Rother) verwendet, bei Werkzeughersteller A kam zusätzlich das 2-Kanal-System des Herstellers *bielomatik* zur Anwendung. Beide MMS-Systeme sind für den Betrieb mit Luftdrücken zwischen 5 und 10 bar ausgelegt. Um im Versuchsfeld des Werkzeugherstellers einen Luftdruck von bis zu 10 bar gewährleisten zu können, wurde eine Druckerhöhungseinheit vom Typ *DVE40-40A/N-59* der *SMC Corporation* mit 40 l Tankvolumen und einem maximalen Luftdurchsatz von 1900 l_n/min genutzt. Da das MMS-System des Herstellers Rother bauartbedingt keine direkte Messung der Schmiermittelmenge erlaubt, wird im Rahmen der Versuchsdurchführung statt letzterer der Mischdruck bei der Aerosolzeugung $p_{Luft,Misch}$ angegeben. Die technischen Daten der Versuchsmaschinen sind im Anhang B (vgl. Tabelle 10.1) zusammengefasst.

Neben den Versuchsbauteilen Zylinderkopf und Kurbelgehäuse wurden insbesondere zu Beginn der Experimente einfache Versuchswerkstücke verwendet, um Zeitverluste durch Werkstückwechsel und Kosten zu minimieren. Während das Werkstückgefüge am Hauptölkanal des Zylinderkopfes N20 durch ein Rohr annähernd nachgebildet wurde, war dies beim Kurbelgehäuse durch einen einfachen Block mit 50 mm Höhe möglich (vgl. Abbildung 5.10).

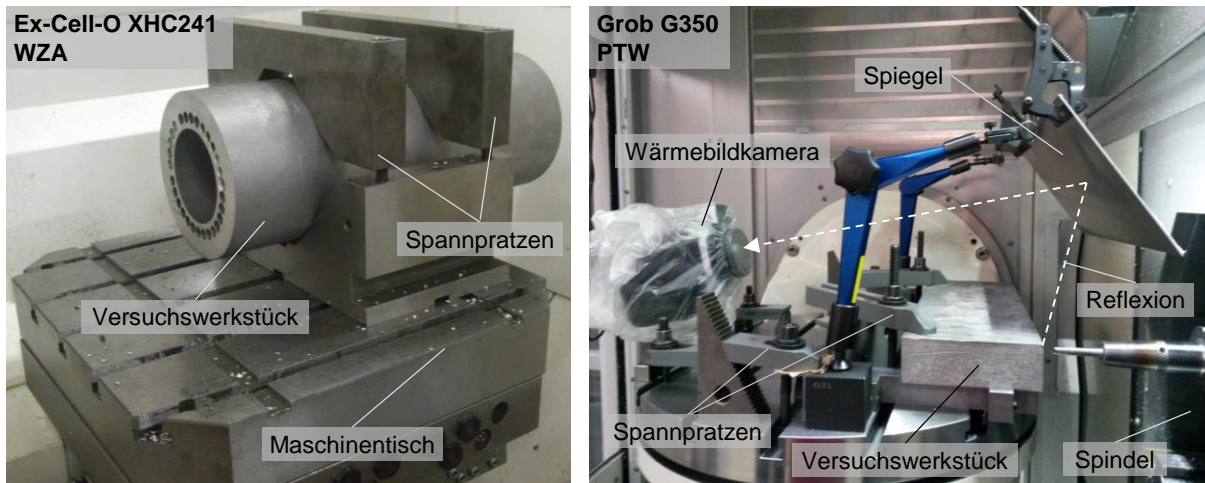


Abbildung 5.10: Aufspannsituation der Versuchswerkstücke bei WZA und PTW

Für Thermographieaufnahmen wurde eine Kamera des Typs InfraTec VarioCam HD verwendet, die zu ihrem Schutz am Maschinentisch hinter dem Versuchswerkstück befestigt und mit einer Schutzfolie versehen wurde. Ein Edelstahlblech fungierte als Spiegel zur Reflexion der Wärmestrahlung in Richtung des Objektivs. Zur präziseren Messung der Oberflächentemperatur wurde das Versuchswerkstück vor jeder Messung mit einem matten Ofenlack lackiert und mit einem Temperaturmessgerät des Typs Greisinger GHM3250 punktuell gegengeprüft.

Im Rahmen der Versuche wurde auch der Einfluss verschiedener Schmierstoffe auf den Bearbeitungsprozess untersucht. Eine detaillierte Auflistung bietet Tabelle 10.2 im Anhang B. Bei WZA wurden die Produkte Zeller+Gmelin MultiCut Micro SP51 und Fuchs Ecocut Mikro Plus 20 HP2 verwendet, die im Folgenden als „MultiCut“ und „Ecocut“ bezeichnet werden. Trotz unterschiedlicher Viskosität ließen sich die Schnittwerte und Ölmengen aus den Versuchen mit Multicut ohne Einschränkungen auf Ecocut übertragen.

Im Versuchsfeld des PTW standen zunächst je ein Produkt auf Basis von Fettalkohol (Blaser „Vascomill“ MMS FA 12) und von Esteröl (Menzel „Induoil“ HL25) im Fokus. Nach Abschluss der Versuchsreihe wurden zusätzliche Zerspanversuche mit Zeller+Gmelin „ATS AL“ 20 (Fettalkohol) und Oemeta „Microtol“ EC32 (Esteröl) durchgeführt. Diverse weitere Alternativen des Herstellers *Oemeta Chemische Werke GmbH* (Oemeta), wie z. B. Microtol FA12 und Microtol EC46, wurden nach mäßigen Ergebnissen und Werkzeugbrüchen verworfen.

Während die Versuche bei WZA größtenteils am Zylinderkopf N20 erfolgten, wurden die Bohrfeatures des Kurbelgehäuses B48 beim PTW an Blockmaterial aus identischem Material (AlSi7MgCu0,5 T6) durchgeführt. Letzteres Vorgehen bot ein optimales Verhältnis aus Übertragbarkeit und Wirtschaftlichkeit, indem eine große Anzahl an Versuchsbohrungen ohne Werkstückwechsel ermöglicht wurde.

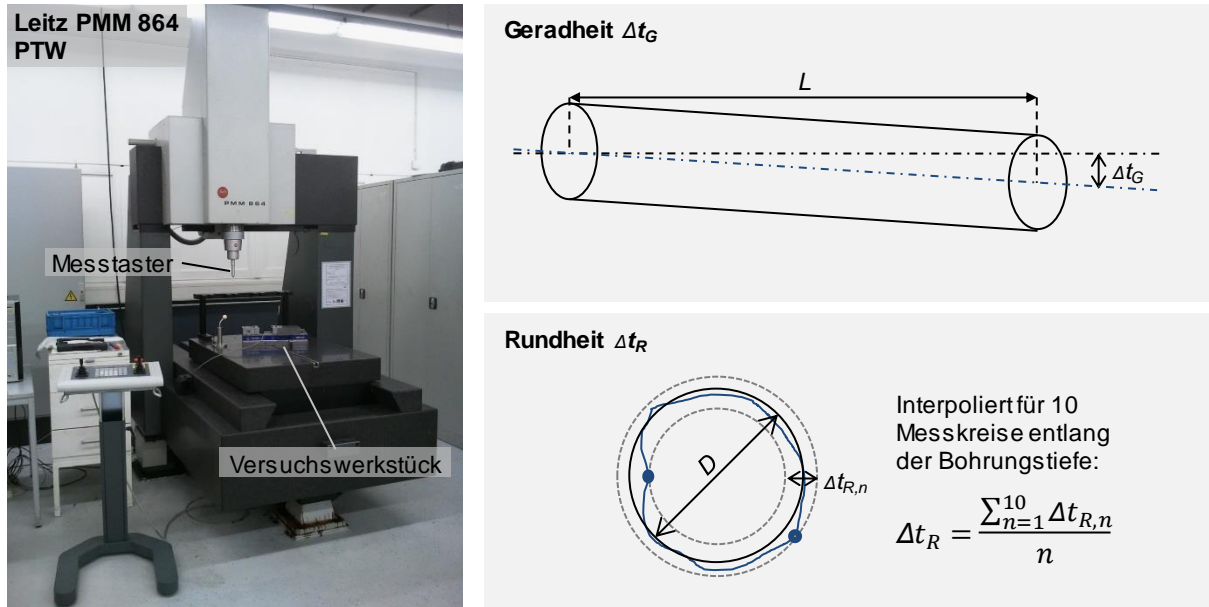
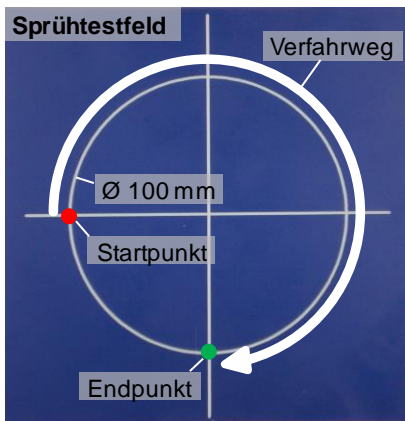


Abbildung 5.11: Links: Eingesetzte Koordinatenmessmaschine Leitz PMM 864 im Versuchsfeld des PTW (TU Darmstadt), Rechts: Am PTW gemessene Qualitätskriterien

Neben einer ersten Einschätzung der Bearbeitungsgüte anhand von Spanbildung, Geräuschpegel, Werkzeugverschleiß oder -beschädigung wurden die bearbeiteten Werkstücke in Koordinatenmessmaschinen vermessen. Im Versuchsfeld des PTW kam ein Modell des Fabrikats Leitz PMM 864 (vgl. Abbildung 5.11) zur Anwendung. Versuchswerkstücke von WZA wurden auf einer Koordinatenmessmaschine des Typs Zeiss CenterMax im Versuchsfeld der BMW Group vermessen. Am PTW wurden sowohl Geradheit als auch Rundheit der Bohrungen, bei BMW zusätzlich die Positionsgenauigkeit gemessen.

Vor Auslieferung an den Kunden unterlagen alle einzusetzenden Werkzeuge einem je nach Werkzeughersteller variierenden dynamischen Sprühtest. Dieser dient der Sicherstellung der Funktion aller Kühlkanäle: So wurde die Verzögerungszeit zwischen dem Einschalten der MMS-Versorgung und dem gleichmäßigen Austreten des Aerosols aus dem Werkzeug sowie die Kontinuität des Sprühbildes gemessen. Vorrichtung und Prozessabfolge für einstufige Bohrwerkzeuge von WZA sind in Abbildung 5.12 dargestellt. Messungen zu Beginn der Versuchsreihe wurden nach leicht abweichendem Schema durchgeführt. Mangels entsprechender Freiheitsgrade in der Werkzeugmaschine wurde ein gerader statt einem kreisförmigen Verfahrenweg herangezogen.

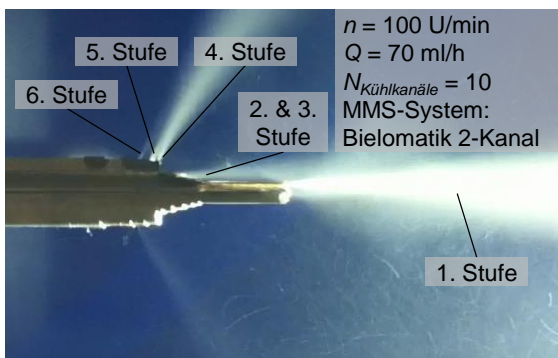


Prüfprozess

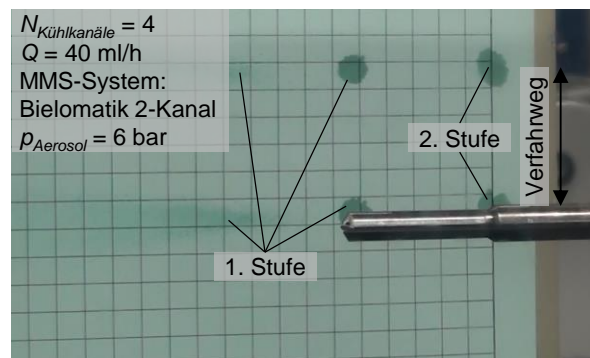
1. Einwechseln Werkzeug
2. Anfahren Startpunkt
3. Aktivieren MMS-System (Ohne Luftzufuhr)
4. Startpunkt: Öffnung Luftzufuhr und Start Vorschub
Vorschubgeschwindigkeit $v_f = 2356 \text{ mm/min}$
Verfahrzeit $t_{\text{Sprüh}} = 6 \text{ s}$
5. Endpunkt: Ende NC-Programm, Deaktivierung MMS-System, Schließen Luftzufuhr

Abbildung 5.12: Prozessabfolge beim dynamischen MMS-Sprühtest für einstufige Bohrwerkzeuge von WZA

Mehrstufige Werkzeuge sind an einzelnen Stufen häufig zusätzlich mit Kühlkanälen versehen, deren Funktion mit dem beschriebenen Sprühtest nicht eindeutig messbar ist. Aus diesem Grund kamen bei beiden Werkzeugherstellern eigens für MMS entwickelte Prüfstände mit integrierter Spindel und MMS-System zum Einsatz. Während WZB das Sprühbild im MMS-Prüfstand mit Gegenlicht sichtbar macht und per Video mit anschließendem Sprühtest auf einem Löschblatt dokumentiert, weist WZA die Funktionalität der Kühlkanäle über Sprühtests lediglich auf einem Löschblatt nach. Beide Verfahren sind in Abbildung 5.13 dargestellt, sie werden im weiteren Verlauf als statische Sprühtests bezeichnet. Aus Gründen der Geheimhaltung wird auf eine detailliertere Darstellung der Prüfstände verzichtet.



PKD-Stufenbohrer
Injektor Vorbearbeitung 2, Zylinderkopf N20
Werkzeughersteller B



VHM-Stufenbohrer
Zuganker Tieflochbohren, Kurbelgehäuse B48
Werkzeughersteller A

Abbildung 5.13: Angewandtes stationäres Verfahren zur Prüfung des Sprühbildes mehrstufiger Werkzeuge

5.1.3.2 Versuchswerkzeuge

Die 13 (7x ZK N20, 6x KG B48) entscheidungsrelevanten Features beider Bauteile werden bei Nassbearbeitung in mehreren Schritten mit verschiedenen Werkzeugen bearbeitet. In der Regel dient ein steifes und relativ zum Feature kurzes Pilotierwerkzeug der präzisen Positionierung, während das sogenannte Finish-Werkzeug anschlie-

ßend die eigentliche Zerspanung zu Ende führt. Insbesondere bei großen L/D -Verhältnissen dient die vom Pilotierwerkzeug gesetzte Pilotbohrung der Lagerung des Finish-Werkzeugs mit Hilfe von Führungsleisten, die auftretende Biegung einschränkt. Insgesamt 29 Werkzeuge werden im Serienprozess mit Nassbearbeitung bei der Zerspanung der entscheidungsrelevanten Features eingesetzt.

Auf Basis dieser bereits vorliegenden Werkzeuge entwickelten WZA und WZB MMS-Versuchsprototypen, die im Laufe der Experimente gezielt optimiert wurden. Bei gleichbleibender Werkzeuganzahl wurde die Verteilung einzelner Fertigungsschritte zur Prozessoptimierung zum Teil zwischen Vor- und Endbearbeitung verschoben. Alle eingesetzten MMS-Werkzeuge wurden an den Schaftenden mit einer 45° -Fase zur optimalen Verbindung mit dem Übergaberohr versehen (vgl. Kapitel 3.2.3).

Aufgrund der hohen Anzahl eingesetzter Werkzeuge wird im Folgenden detailliert auf ausgewählte Werkzeugvarianten eingegangen. Wegen der vergleichsweise hohen L/D -Verhältnisse werden die Werkzeuge zur Bearbeitung des Hauptölkanals des ZK N20 und des Ölkanals mit $D = 4,5$ mm im KG B48 näher beschrieben.

Zylinderkopf N20: #1 Hauptölkanal

Im Serienbetrieb wird der Prozess in zwei Schritten mit spiralisierten Vollhartmetallwerkzeugen (VHM) durchgeführt. Da Hersteller WZA bis zum Zeitpunkt des Auftrags lediglich Bohrungen mit L/D -Verhältnissen unter 30 erfolgreich und prozesssicher mit spiralisierten MMS-Bohrwerkzeugen umgesetzt hat, das Feature jedoch ein Verhältnis von 50,3 erreicht, wurden von Beginn an zwei Varianten des Finish-Werkzeugs entwickelt: Basierend auf Erfahrungswerten des Herstellers setzte dieser einen gerade genuteten VHM-Einlippenbohrer als eine prozesssichere Variante mit erhöhter Bearbeitungszeit ein. Als eine dem Serienwerkzeug nähere Version wurde zudem ein spiralisierte, zweischneidiger VHM-Tieflochbohrer angefertigt. Als Pilotierwerkzeug kam für beide Varianten ein spiralisierte VHM-Bohrer zur Anwendung, mit dem auch die Stufe und eine Fase erzeugt werden.

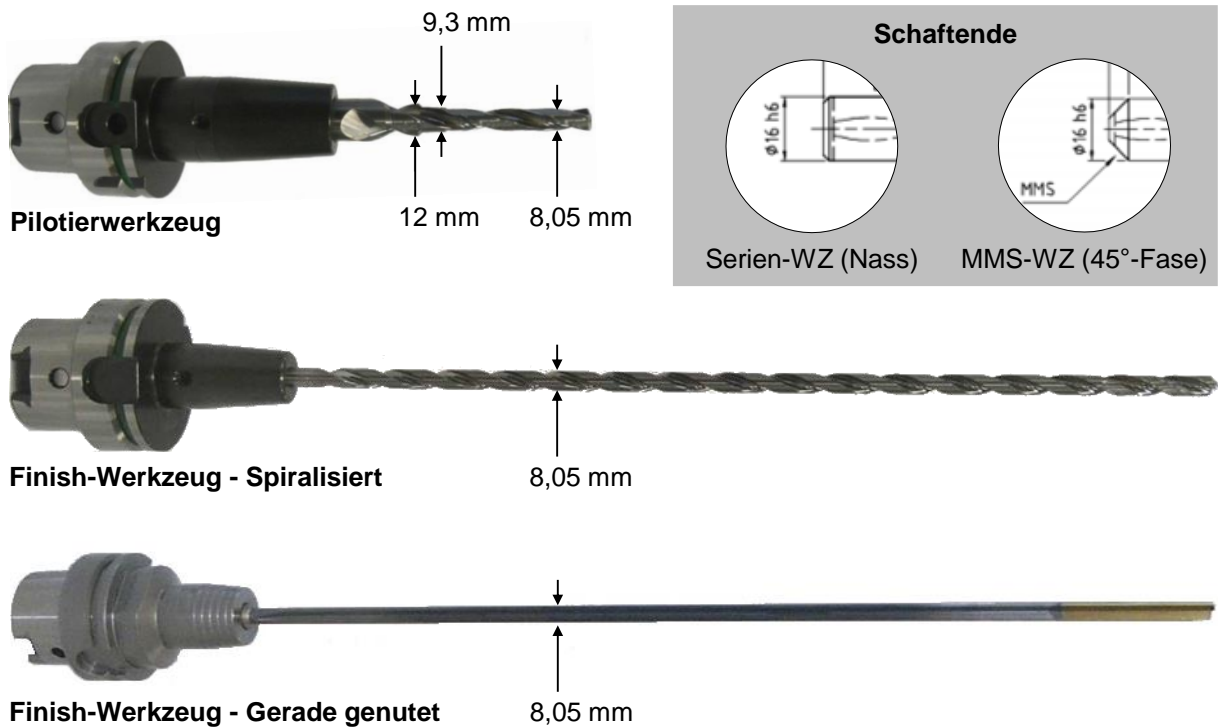


Abbildung 5.14: Finaler Stand der MMS-Werkzeuge für die Bearbeitung des Hauptölkanals im ZK N20

Zylinderkopf N20: #4 Injektorbohrung

Im Serienprozess wird die Bearbeitung der sieben Stufen der Injektorbohrung (vgl. Abbildung 5.15) auf zwei Werkzeuge aufgeteilt. Die Kegelform der dritten Stufe (30° zur Bohrachse) wird mit fünf Stufen vorbearbeitet. Das Vorbearbeitungswerkzeug für die Nassbearbeitung weist insgesamt acht Stufen auf, da zusätzlich auch die erste, vierte und fünfte Stufe vorbearbeitet werden.

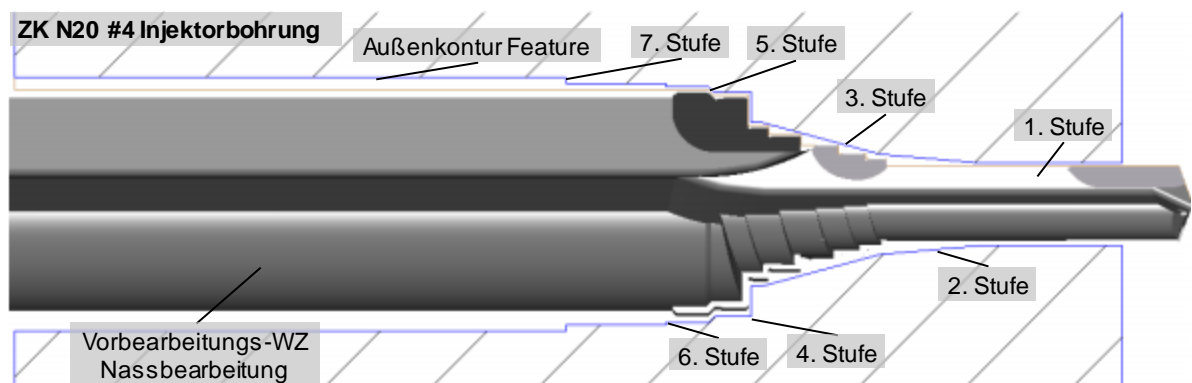


Abbildung 5.15: Featurekontur der Injektorbohrung des ZK N20 (Außenkontur), im Vordergrund das Vorbearbeitungswerkzeug aus dem Serienprozess

Die durch die vergleichsweise hohe Anzahl an Stufen entstehenden Späne werden durch den Kühlschmierstoff zunächst nach hinten aus der Bohrung transportiert. Nach dem Durchbruch der ersten Stufe erfolgt die Abfuhr der verbleibenden entstehenden Späne mehrheitlich nach vorn. Da die Spanabfuhr bei Einsatz von MMS wegen des geringeren KSS-Durchflusses erschwert ist, wurde zur Umsetzung des Prozesses mit MMS ein zusätzliches Vorbearbeitungswerkzeug eingeführt (vgl. Abbildung 5.16).

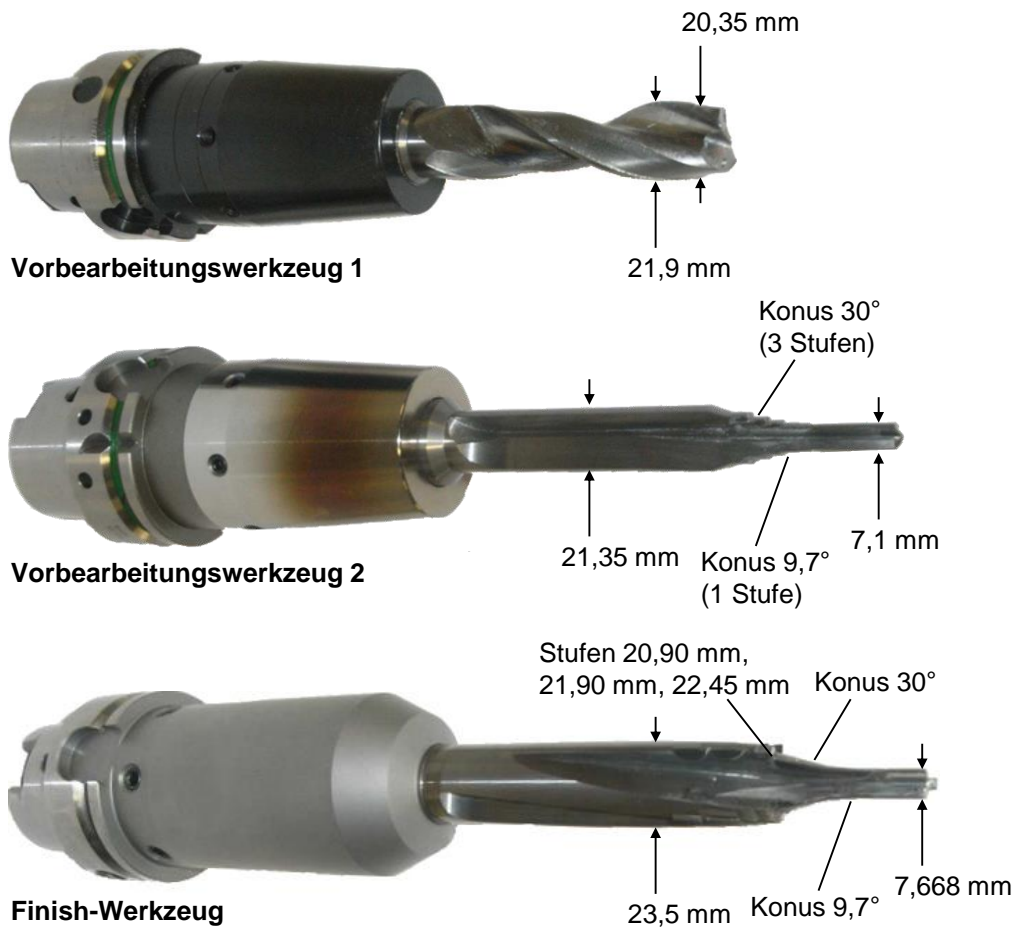


Abbildung 5.16: Finaler Stand der MMS-Werkzeuge zur Bearbeitung der Injektorbohrung im ZK N20

Tabelle 5.7 gibt einen Überblick über den finalen Stand der verwendeten Werkzeuge zur Bearbeitung der entscheidungsrelevanten Features des ZK N20. Die Daten der übrigen entscheidungsrelevanten Werkzeuge sind in Tabelle 10.3 in Anhang B zusammengefasst.

Tabelle 5.7: Daten der Werkzeuge zur Bearbeitung der Features #1 und #4 am ZK N20

# Feature	Prozessschritt	Material Schneide	$N_{\text{Schneiden}}$	D [mm]			Bemerkung
				Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	
1 Haupt- ölkanal	Pilot	VHM	2	8,05	9,3	12	
	Finish	VHM	2	8,05	-	-	
4 Injektor- bohrung	Vorbearbeitung 1	PKD	2	20,35	21,9	-	
	Vorbearbeitung 2	PKD	2	7,1	11,0	21,35	Monoblock-WZ
	Finish	PKD	2	7,668	15,2	23,5	Monoblock-WZ

Kurbelgehäuse B48: #2 Ölkanal Ø4,5 mm

Da bei sämtlichen betrachteten Bohrungen des KG B48 analog zur Serie die Aufteilung des Prozesses in Pilotieren und Finish-Bearbeitung vorherrscht, zeigt Abbildung

5.17 exemplarisch die Werkzeuge zur Bearbeitung des Ölkanals mit einem Durchmesser von 4,5 mm.

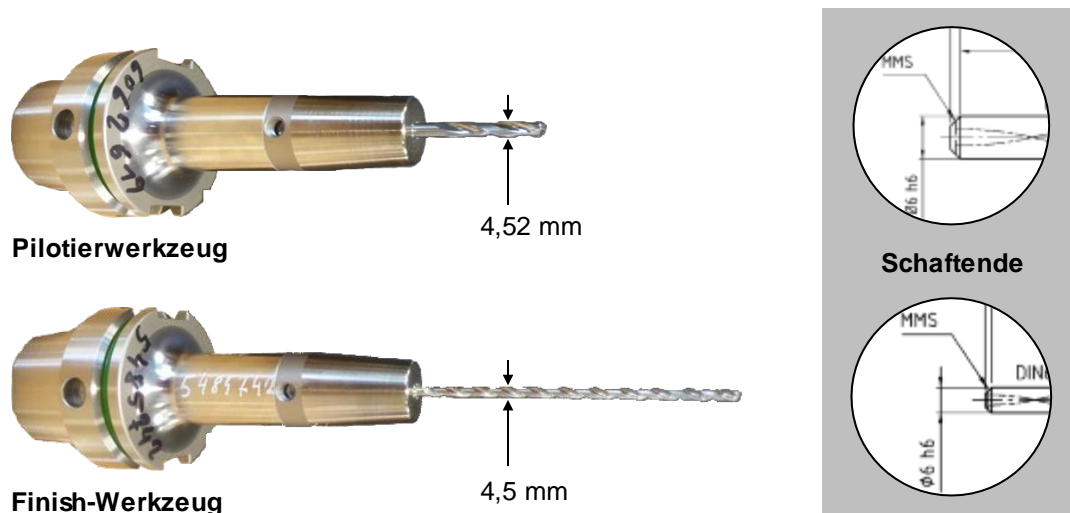


Abbildung 5.17: Finaler Stand der MMS-Werkzeuge für die Bearbeitung der Ölbohrung mit $D = 4,5$ mm im KG B48

Einen Überblick über den finalen Stand des zur Bearbeitung des entscheidungsrelevanten Features #4 am KG B48 verwendeten Werkzeugs bietet Tabelle 5.8. Die Daten der übrigen entscheidungsrelevanten Features sind im Anhang B dargestellt (vgl. Tabelle 10.4)

Tabelle 5.8: Daten des Werkzeugs zur Bearbeitung des Features #4 und #4 am KG B48

#	Feature	Prozessschritt	Material Schneide	$N_{\text{Schneiden}}$	D [mm]	L [mm]
2	Ölbohrung Druckölraum	Pilot	VHM	2	4,52	15,0
		Finish	VHM	2	4,5	145,0

5.1.3.3 Versuchsplanung und -durchführung

Während die Werkzeughersteller für die Bearbeitung der einstufigen Features des Kurbelgehäuses mit L/D -Verhältnissen von bis zu 32,2 auf Erfahrungswerte aus früheren Projekten zurückgreifen konnten, war dies für die bauteilspezifischen mehrstufigen Features des Zylinderkopfs sowie den Hauptölkanal mit $L/D = 50,2$ nur eingeschränkt der Fall.

In den Versuchsreihen bei WZA (Zylinderkopf N20) und PTW (Kurbelgehäuse B48) kamen daher unterschiedliche Untersuchungsstrategien zur Anwendung. Die Prototypenwerkzeuge zur Zylinderkopfbearbeitung wurden zu Beginn mit verringerter Bohrungstiefe und vergleichsweise konservativen Schnittwerten erprobt und sukzessive an seriennahe HSC-Bedingungen herangeführt. Vor der Versuchsdurchführung am Kurbelgehäuse im Versuchsfeld des PTW wurden sämtliche Prototypen durch die Hersteller geprüft und mit empfohlenen Schnittwerten (WZA) bzw. Schnittwertbereichen (WZB) ausgeliefert.

Bei anhaltendem Auftreten von Materialaufschweißungen, mangelnder Spanabfuhr oder Werkzeugbrüchen im Rahmen der Versuche unterlagen die Werkzeuge verschiedenen Optimierungsmaßnahmen. Diese reichten von der Politur der Spannut über nachträgliche Schneidenbeschichtung bis zur vollständigen Neukonstruktion.

Aufbauend auf den empfohlenen Schnittwerten wurde die Versuchsreihe am PTW zunächst nach den Grundsätzen statistischer Versuchsplanung (engl.: *Design of Experiments*, kurz: DoE) geplant. Ziel war eine Verringerung des Versuchsaufwands und Ableitung des Effekts einzelner Faktoren auf die Bearbeitungsgüte über statistische Auswertung der Ergebnisse. Als Effekt wird im Rahmen der DoE-Methodik die „mittlere Veränderung eines Qualitätsmerkmals in Folge einer Stufenvariation“ bezeichnet [SIEB10]. Ein Effekt eines Faktors ist demnach dann signifikant, wenn die sogenannte Nullhypothese, der Effekt sei nicht vorhanden, in Versuchen eindeutig widerlegt werden kann. Dies ist dann der Fall, wenn die Wahrscheinlichkeit des Einflusses eines Zufalls einen vorher definierten Schwellwert nicht überschreitet. In diesem Zusammenhang ist der Signifikanzwert bzw. der sogenannte p -Wert eines Versuchsausgangs definiert als die statistische Irrtumswahrscheinlichkeit. Diese bezeichnet jene Wahrscheinlichkeit, ein solches oder noch extremeres Versuchsergebnis zu erhalten, obwohl die Nullhypothese wahr ist. Die maximal zulässige Irrtumswahrscheinlichkeit wird durch das Signifikanzniveau α vorgegeben. In der Statistik sind α -Werte zwischen 1 und 10 Prozent verbreitet. (vgl. ebd.)

Da der p -Wert einzelner Haupt- und Wechselwirkungseffekte nach ersten Ergebnissen weit über den akzeptablen 10 Prozent lag und somit keine eindeutigen Aussagen über die Signifikanz von Wechselwirkungen zwischen Faktoren getroffen werden konnten, wurde ein vollfaktorieller Versuchsplan ausgearbeitet. Nichtsdestotrotz wurden DoE-Methoden zur Versuchsauswertung herangezogen.

Ausgangsbasis bildeten die bereits in Abbildung 5.2 genannten Parameter. Als sogenannte Faktoren in den Versuchsplan aufgenommen wurden Drehzahl n , Vorschub f , Schmiermittelart S_{MMS} und Schmiermittelmenge Q_{MMS} . Die Ausprägung der Faktoren, im Rahmen der DoE als Stufen bezeichnet, erfolgte auf Basis der empfohlenen Schnittwerte und in Abstimmung mit Herstellern für Schmierstoffe und MMS-Systeme. Abbildung 5.18 zeigt die Faktoren und die Unterteilung der Stufen, die wie im DoE-Bereich üblich mit (+), (0) und (-) kodiert wurden. Drehzahl und Vorschub wurden in jeweils drei unterschiedlichen Stufen zwischen konservativ (-) und progressiv (+) untersucht, bei der Schmiermittelmenge wurden zur Reduzierung der Versuchsanzahl nur zwei Stufen gewählt. Als Schmiermittel kamen wie in Abschnitt 5.1.3.1 beschrieben Induoil (+) und Vascomill (-) zum Einsatz.

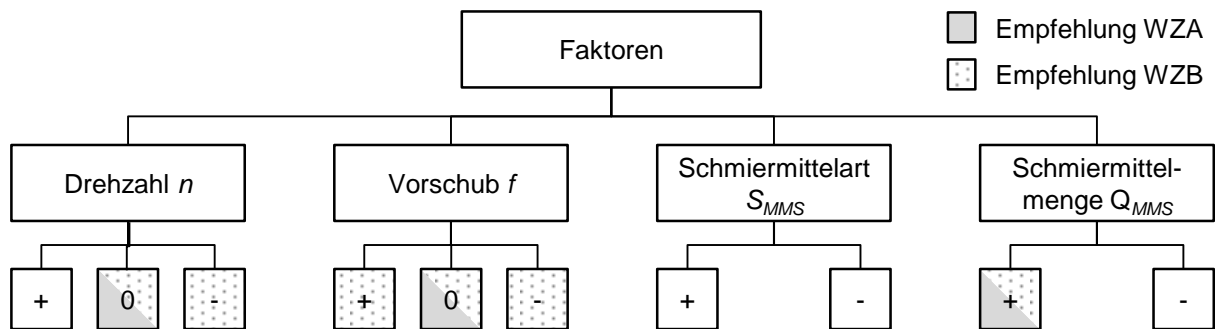


Abbildung 5.18: Stufen der Faktoren im Rahmen der statistischen Versuchsplanung für die Bearbeitung der Features am Kurbelgehäuse B48

Somit ergibt sich ein Versuchsaufwand n_r von 36 Versuchen, um jede mögliche Kombination zu durchlaufen:

$$n_r = 2^2 \cdot 3^2 = 36 . \quad \mathbf{5.1}$$

Zur Verringerung des Einflusses lokaler Streuung von Werkstoffeigenschaften des Versuchswerkstücks beinhaltet jeder Versuchsdurchlauf einer Faktorkombination zwei Bohrungen mit demselben Werkzeug an unterschiedlicher Stelle: Dazu wurde das Werkstück entlang einer vertikalen Trennachse in zwei Hälften in X-Richtung unterteilt und je Versuchsdurchlauf eine Bohrung in jeder Hälfte gesetzt (vgl. Abbildung 5.19).

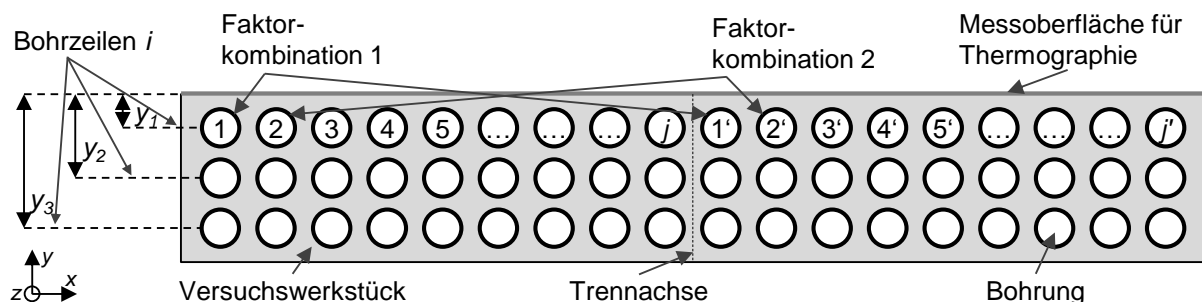


Abbildung 5.19: Im Versuchsfeld des PTW verwendetes Versuchswerkstück in Frontalansicht

Um die Beeinflussung durch fehlerhafte Werkzeugprototypen auszuschließen, wurde jede mögliche Kombination zudem mit drei Werkzeugen des gleichen Typs und Entwicklungsstands durchgeführt. Insgesamt wurden je Werkzeugtyp eines Herstellers 216 Bohrungen zerspant.

Am PTW wurden sämtliche vor Ort zerspanten Versuchswerkstücke anschließend an einer Koordinatenmessmaschine hinsichtlich der Formtoleranzen Geradheit und Rundheit vermessen (vgl. Kapitel 5.1.3.1) und Haupt- sowie Wechselwirkungseffekte der Faktorstufen bestimmt. Schließlich wurde die ideale Faktorkombination als jene bestimmt, mit der die geringsten Abweichungen von den Formvorgaben erreicht wurden.

Zur abschließenden Bewertung des Einflusses des Werkzeugherstellers auf die Bauteilerwärmung während des Prozesses wurde je eine Bohrreihe eines Versuchswerkstückblocks je Werkzeugtyp vollständig und ohne Unterbrechung mit idealer Faktorkombination zerspant. Diese Versuchsreihe wurde durch Thermographieaufnahmen

und Temperaturmessung im Bohrungsgrund (vgl. Kapitel 5.1.3.1) ergänzt. Da die durch Wärmeleitung übertragene Wärmeleistung \dot{Q} nach dem Fourierschen Gesetz

$$\dot{Q} = \frac{\lambda}{y} \cdot A \cdot \Delta T \quad 5.2$$

proportional vom Abstand y zwischen Wärmequelle und Messpunkt abhängt, wurden vergleichende Messungen zwischen zwei Werkzeugtypen unterschiedlicher Hersteller im gleichen Abstand y_i , also der gleichen Bohrreihe i durchgeführt (vgl. Abbildung 5.19). Während die Wärmeleitfähigkeit des Werkstücks λ und seine Oberfläche A im Rahmen einer Thermographiemessung als konstant angenommen wurden, wurde die stetige Änderung von ΔT messtechnisch erfasst. Der Messbereich erstreckte sich über die Oberfläche auf der Oberseite des Versuchswerkstücks.

5.1.3.4 Versuchsergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der durchgeführten Versuchsreihen diskutiert. Analog zum Abschnitt 5.1.3.2 wird auf ausgewählte Features näher eingegangen.

5.1.3.4.1 Zylinderkopf N20

Feature #1 Hauptölkanaal

Während der Sprühversuch mit dem Pilotierwerkzeug erfolgreich verlief, wurden bei den Varianten des Finish-Werkzeugs Unterschiede deutlich. Bei einem Luftdruck von 6 bar weist der Einlippenbohrer mit gerader Nut ein gleichmäßig verteiltes, der spiralisierte Bohrer ein ungleichmäßiges Sprühbild auf. Erst bei einem Luftdruck von 10 bar ergibt sich ein Sprühbild, das eine durchgängige Kühlschmierstoffversorgung der Schneide aufzeigt (vgl. Abbildung 5.20).

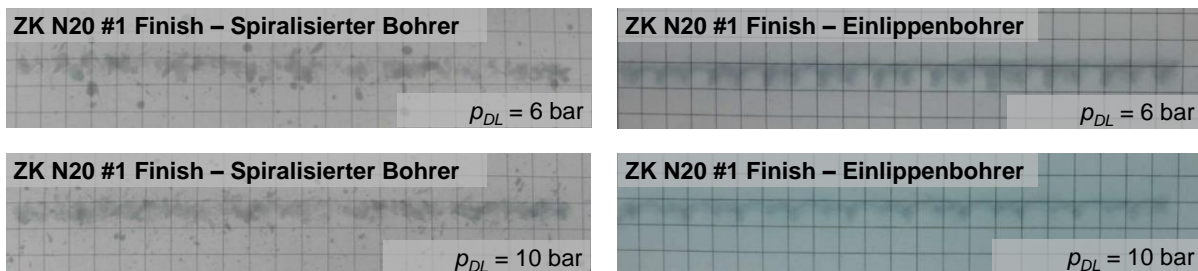


Abbildung 5.20: Ergebnisse des dynamischen Sprühtests beider Varianten des Finish-Werkzeugs für den Hauptölkanaal des ZK N20 mit unterschiedlichen Luftdrücken

Neben der hohen Werkzeuggesamtlänge von 465 mm ist die Beschaffenheit der Kühlkanäle entscheidend für den Transport des Aerosols: Beim spiralisierten Bohrer beeinträchtigt die Spiralform der Kühlkanäle den ungehinderten Transport des Mediums. Der Einlippenbohrer mit geradem Kühlkanal hingegen ermöglicht bei gleichem Luftdruck deutlich höhere Druckluftdurchsätze (vgl. Abbildung 5.21). Durch die fehlende Spiralform erweist sich die Spanabfuhr beim Einlippenbohrer jedoch als aufwändiger: Mangels aktiver mechanischer Förderung in der Nut ist ein vollständiger Abtransport des Spanmaterials bei einem Luftdruck von 6 bar nicht durchgängig gewährleistet. Aus

diesem Grund wurden die Versuche bei beiden Varianten mit einem Luftdruck von 10 bar durchgeführt.

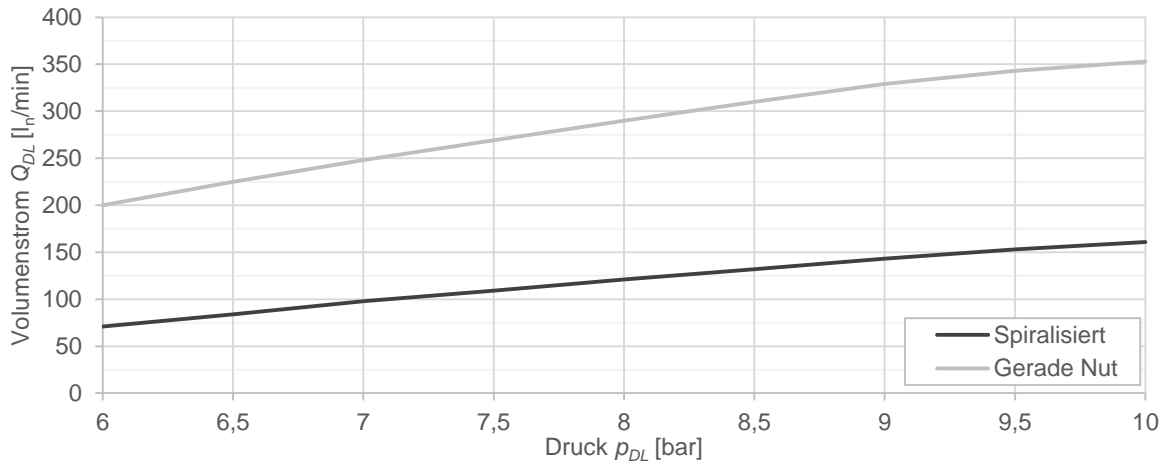


Abbildung 5.21: Druckluft-Volumenstrom bei den eingesetzten Werkzeugvarianten für den Hauptölkkanal des ZK N20 in Abhängigkeit vom am MMS-System anliegenden Luftdruck

Für das Pilotierwerkzeug lassen sich die Schnittdaten sowie die Eingriffstiefe von 73 mm aus dem Serienprozess mit Nassbearbeitung ohne Einschränkung übertragen (vgl. Tabelle 5.9 am Ende der Versuchsbeschreibung). Bereits mit einer Schmiermittelmenge von 40 ml/h bei einem Luftdruck von 6 bar bietet sich ein Spänebild, das dem Serienprozess entspricht (vgl. Abbildung 5.24 am Ende der Versuchsbeschreibung).

Das spiralisierte Finish-Werkzeug lässt sich nicht ohne Weiteres mit seriennahen Schnittwerten einsetzen: Bei einer Drehzahl von 8.000 min^{-1} und einer Vorschubgeschwindigkeit von 1.800 mm/min kommt es bereits ab einer Eingriffstiefe von 300 mm zu reproduzierbaren Werkzeugbrüchen. Die Ursache ist ein Verschweißen der Späne in der Spannut, das den Spanabtransport behindert (Abbildung 5.22). Dies ist auf einen Temperaturanstieg in der Zerspanzone zurückzuführen, der durch die vergleichsweise hohe Gesamteingriffszeit von 11,1 s bei geringer Kühlwirkung der MMS bedingt ist. Resultat ist eine Temperaturerhöhung des Werkstücks um 35°C .

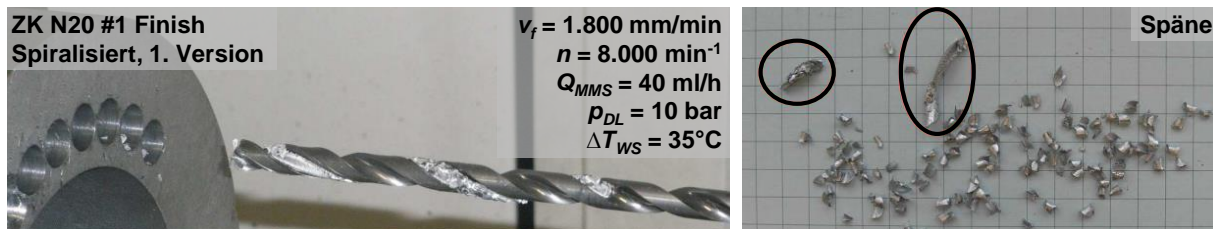


Abbildung 5.22: Erste Version des spiralisierten Finish-Werkzeugs für den Hauptölkkanal des ZK N20 mit verschweißten Spänen in der Spannut (links) und Späne nach Zerspannung mit Schnittwerten aus Serienprozess (rechts)

Nach mehrfachen Werkzeugbrüchen bei bis auf 11.000 min^{-1} erhöhter Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu 3.740 mm/min wurde die ursprünglich seriennahe Werkzeuggeometrie überarbeitet. Zur Verringerung der Reibung wurde außerdem eine Schneidenbeschichtung auf TiB_2 -Basis aufgebracht. Mit polierten und steile-

ren Spannuten ist eine Bearbeitung bis zur geforderten Tiefe von 405 mm mit einer erhöhten Schmiermittelmenge von 100 ml/h möglich. Dabei stellen sich nach schrittweiser Erhöhung zunächst eine Drehzahl von 15.000 min^{-1} und eine Vorschubgeschwindigkeit von 6.600 mm/min als ideal hinsichtlich des Zerspangeräusches und Spänebildes heraus. Bereits nach zehn Bohrungen zeigen sich allerdings Materialanhaftungen in der Spannut und an den stirnseitigen Freiflächen des Werkzeugs (vgl. Abbildung 5.23, linke Seite).

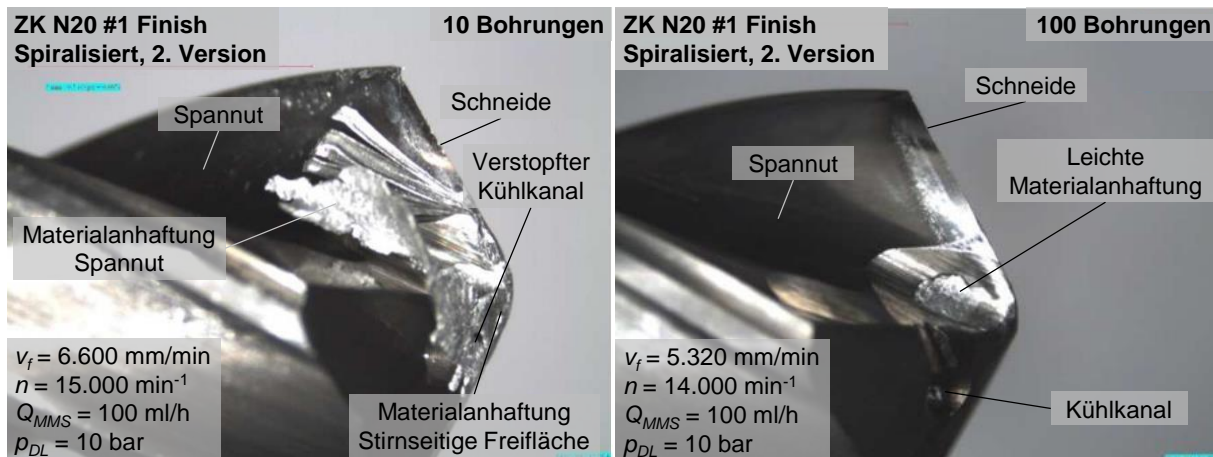


Abbildung 5.23: Mikroskopaufnahmen der Schneiden der zweiten Version des spiralisierten Finish-Werkzeugs für den Hauptölkanal des ZK N20 mit unterschiedlichen Schnittwerten

Zur Reduzierung der Schnittkräfte werden bei gleichbleibender Schmiermittelmenge und Luftdruck die Drehzahl auf 14.000 min^{-1} und die Vorschubgeschwindigkeit auf 5.320 mm/min gesenkt (vgl. Tabelle 5.9). Nach 100 Bohrungen sind im Zentrum geringe Materialanhaftungen, jedoch kein ungewöhnlicher Verschleiß erkennbar (vgl. Abbildung 5.23, rechte Seite). Die Bearbeitungszeit beträgt $3,75 \text{ s}$ und liegt damit deutlich unter dem Wert im Serienprozess ($11,1 \text{ s}$). Die kurzen Späne weisen keinerlei Verklebungserscheinungen auf (vgl. Abbildung 5.24).

Tabelle 5.9: Schnittparameter bei der Bearbeitung des Hauptölkanals vom ZK N20 mit bestem Zerspanungsergebnis

# Feature	Prozessschritt	n [min^{-1}]	v_f [mm/min]	v_c [m/min]			f [mm]	Q_{MMS} [ml/h]	p_{DL} [bar]
				Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3			
1 ZK N20 Hauptölkanal	Pilot	10.000	2.500	253	292	377	0,25	40	6
	Finish Spiralisiert	14.000	5.320	354	-	-	0,38	100	10
	Finish Gerade Nut	6.320	1.260	160	-	-	0,20	40	10

Aufgrund der fehlenden Spiralisierung gestaltet sich die Spanabfuhr beim Finish-Werkzeug mit gerader Nut zunächst schwierig: Trotz reduzierter Schnittwerte bilden sich lange Späne, die den Materialabtransport verhindern. Erhöhte Schnittwerte führen zu Schwingung des Werkzeugs und anschließendem Bruch. Bei einer Drehzahl von 6.320 min^{-1} und einer Vorschubgeschwindigkeit von 1.260 mm/min reicht eine Schmiermittelmenge von 40 ml/h aus, um die Bearbeitung bis zur maximalen Bohrtiefe

fe abzuschließen (vgl. Tabelle 5.9). Mit 15,8 s liegt die Bearbeitungszeit allerdings über 40 Prozent über dem Wert im Serienprozess.



Abbildung 5.24: Späne nach Bearbeitung des Werkstücks mit den in Tabelle 5.9 genannten Prozessparametern

Feature #4 Injektorbohrung

Wie in Kapitel 5.1.3.2 einleitend erläutert, wurde im Vergleich zum Serienprozess ein zweites Vorbearbeitungswerkzeug eingesetzt, um die Spanabfuhr zu gewährleisten (vgl. Abbildung 5.16). Im Versuchsverlauf wurden allein bei WZA fünf Konzepte zur Vorbearbeitung und vier zur Finish-Bearbeitung erprobt. Während letztere stets auf ein Werkzeug zugeschnitten wurde, kamen bei der Vorbearbeitung je nach Konzept zwischen einem und drei Werkzeugen zum Einsatz.

Als größte Herausforderung stellt sich die Abfuhr der durch die verschiedenen Stufen erzeugten Späne heraus. Mit der Nassbearbeitung vergleichbare Vorbearbeitungskonzepte mit einem Werkzeug sind auch nach diversen Optimierungen nicht prozesssicher einsetzbar. Nach hinten geöffnete Spanräume, in Rotationsrichtung zueinander versetzte Schneiden unterschiedlicher Stufen sowie Nachrüstung von Führungsleisten ermöglichen zwar eine Vorbearbeitung bis auf Endtiefe, das Schwingen des Werkzeugs hinterlässt jedoch deutlich sichtbare Rattermarken (vgl. Abbildung 5.25, linke Seite). Diese führen bei der anschließenden Finish-Bearbeitung – auch bei Variation der Schnittparameter – zu weiteren Schwingungen, die eine Überschreitung der Oberflächentoleranz zur Folge haben.

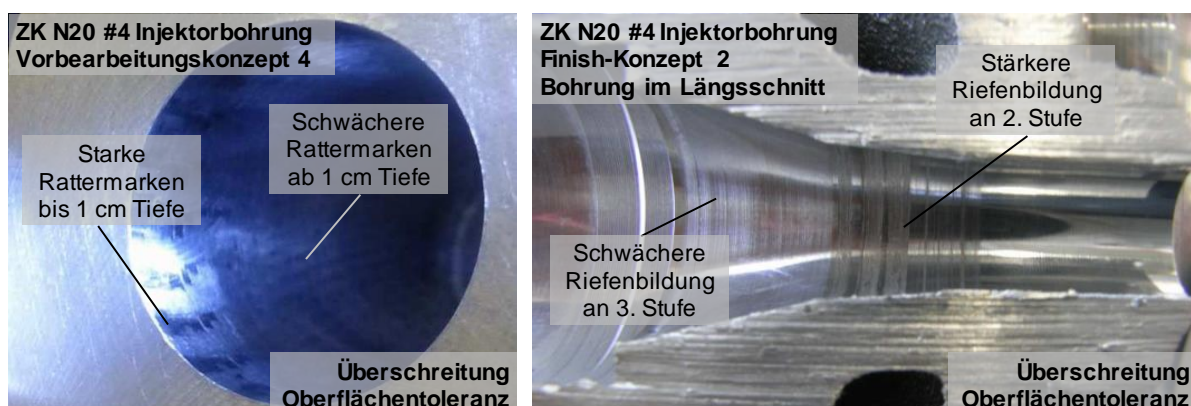


Abbildung 5.25: Qualitätsmängel verschiedener Bearbeitungskonzepte der Injektorbohrung des ZK N20 nach Abschluss der Vorbearbeitung (links) und Finish-Bearbeitung (rechts)

Einen weiteren Schwerpunkt der Untersuchungen stellen die Stufen mit Kegelform dar. Die fünf Stufen des Vorbearbeitungswerkzeugs aus der Nassbearbeitung (vgl. Ka-

pitel 5.1.3.2) erzeugen feine Späne, die bei MMS-Einsatz mangels KSS-Durchfluss nach vorne in die Bohrung laufen. Das daraus resultierende Zusetzen des Bohrungsgrunds mit Spänen führt bei Versuchen stets zu Werkzeugbrüchen. Optimale Ergebnisse erreicht WZA mit einer auf drei Stufen reduzierten Vorbearbeitung des 30°-Kegels und einer auf eine Stufe erhöhte Vorbearbeitung des 9,7°-Kegels.

Auch bei der Finish-Bearbeitung steht die Spanabfuhr im Bereich der Kegel im Fokus. Ein aus dem Serienwerkzeug für die Nassbearbeitung abgeleitetes Konzept führt zu Riefen im Bereich der Kegel (vgl. Abbildung 5.25, rechte Seite). Optisch und messtechnisch einwandfreie Oberflächen werden erst durch Umsetzung mehrerer Maßnahmen erzielt: das Anbringen von Führungsleisten und einem Rückspülzapfen, teilweiser Aufteilung der Schneiden für die ersten drei Stufen, axialer Verdrehung der Schneiden zur Bearbeitung der beiden Kegel sowie Integration von Kühlkanälen unterhalb dieser (vgl. Abbildung 5.26).



Abbildung 5.26: Detailaufnahme des Finish-Werkzeugs für die Injektorbohrung des ZK N20

Da nach Abschluss des Bearbeitungsprozesses Späne in der Bohrung verbleiben, ist ein Schwenken der A-Achse des BAZ zum Auskübeln der Späne nach Bearbeitungsende notwendig. Einen Überblick über die optimalen Prozessparameter gibt Tabelle 5.10.

Tabelle 5.10: Prozessparameter bei der Bearbeitung der Injektorbohrung vom ZK N20 mit bestem Zerspanungsergebnis

# Feature	Prozessschritt	n [min ⁻¹]	v_f [mm/min]	v_c [m/min]			f [mm]	Q_{MMS} [ml/h]	P_{DL} [bar]
				Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3			
ZK N20 4 Injektorbohrung	Vorbearbeitung 1	4.550	2.000	291	313	-	0,44	70	6
	Vorbearbeitung 2	6.000	2.000	134	276	402	0,33	85	6
	Finish	6.000	1.200	145	287	443	0,20	300	6

Übrige entscheidungsrelevante Bearbeitungsfeatures

Zur Bearbeitung der HVA-Bohrung wurden zwei Vorbearbeitungskonzepte miteinander verglichen. Eines mit gerade genutetem, dem Serienwerkzeug aus der Nassbearbeitung nahen Werkzeug und eines mit spiralisiertem Werkzeug. Letzteres verursacht

zwar eine geringere Werkstückerwärmung (2 bis 2,5°C, bei gerade genutetem Werkzeug ca. 1°C höher), hinterlässt jedoch Späneansammlungen in den Bohrungen. Das Finish-Werkzeug wurde im Vergleich zur Serienvariante lediglich um das Schaftende für MMS sowie eine für das Aerosol optimierte Kühlkanalführung ergänzt.

Auch das Fräswerkzeug zur Vorbearbeitung der Zündkerzen- und *Valvetronic*-Bohrung wurde im Vergleich zur Serie nur geringfügig im Bereich der Kühlkanäle geändert. Da die dem Serienwerkzeug nahe erste MMS-Variante des Finish-Werkzeugs für die Zündkerzenbohrung mit gerader Nut zu Temperaturerhöhungen am Werkstück von bis zu 15°C führt, wurde eine zweite Version mit Spiralnut erprobt. Durch den vorhandenen Spanwinkel werden Späne besser abgeführt und die Temperaturerhöhung des Werkstücks nach Bearbeitung von 4 Bohrungen auf ca. 5°C gesenkt. Eine Messung der Werkstücke ergibt eine Überschreitung der Positionstoleranz um 83 Prozent. Dies resultiert aus einem einseitigen Anschnitt mit der dritten Stufe, da ihr Durchmesser über dem des Vorbearbeitungswerkzeugs liegt. Durch Verringerung der Eingriffstiefe des vorbearbeitenden Fräswerkzeugs wird der Anschnitt auf die zweite Stufe gelegt und der Verlauf der Bohrung um 73 Prozent auf einen Wert innerhalb der Toleranzgrenzen gesenkt. Während das gerade genutete Werkzeug die Positionstoleranz lediglich um 25 Prozent ausreizt, nutzt die spiralisierte Variante im Mittel 50 Prozent. Wegen der Auswirkungen von Werkstücktemperaturerhöhungen auf Folgeprozesse wird das Werkzeug mit spiralisierten Nut vorgezogen. Bei der *Valvetronic*-Bohrung wurde das MMS-Werkzeug zur verbesserten Spanabfuhr mit einem positiven Achswinkel, also einer axialen Verdrehung gegen die Drehrichtung versehen.

Das Vorbearbeitungswerkzeug für die Stellmotorbohrung wurde ebenfalls um einen positiven Achswinkel ergänzt, dessen positive Wirkung auf die Spanabfuhr durch einen Rückspülzapfen an der Werkzeugspitze ergänzt wurde. Das Finish-Werkzeug wurde lediglich im Bereich der Kühlkanäle angepasst.

Einen Überblick über die empfohlenen Prozessparameter für die aufgeführten entscheidungsrelevanten Bearbeitungsfeatures zeigt Tabelle 10.5 im Anhang B.

Zusammengefasst wurden im Laufe der Versuchsreihe für sämtliche entscheidungsrelevanten Bearbeitungsfeatures prozesssichere Werkzeuge entwickelt und geeignete Parameter ermittelt. Aus Gründen der Geheimhaltung ist eine Nennung der Prozessdaten und Werkzeugkosten aus der Nassbearbeitung nicht möglich. Die Unterschiede in der Bearbeitungszeit liegen jedoch im Bereich von etwa -20 bis +20 Prozent.

5.1.3.4.2 Kurbelgehäuse B48

Im Rahmen der Vorversuche bei den Werkzeugherstellern wurde der geringe Änderungsbedarf sämtlicher Pilotierwerkzeuge für die Versuchsreihe deutlich. Neben dem Nachrüsten von MMS-gerechten Schaftenden wurden lediglich die Kühlkanäle optimiert. Auch eine Übernahme der Schnittparameter aus dem Serienprozess ist uneingeschränkt möglich. Konstruktive Änderungen im Vergleich zum Serienwerkzeug wer-

den beim Finish-Werkzeug für die Ölbohrung mit einem Durchmesser von 4,5 mm notwendig: Zur besseren Spanabfuhr ist der Winkel der Spannutt von $23,4^\circ$ auf $32,1^\circ$ zu erhöhen.

Den durchgeführten dynamischen Sprühtests zufolge ergeben sich abhängig von Werkzeuglänge und Kühlkanaldurchmessern unterschiedliche Verzögerungszeiten zwischen Einschalten der MMS-Versorgung und Austritt des Mediums. Gleichmäßiger Austritt von Schmierstoff ist bei Pilotwerkzeugen ab einer Verzögerungszeit von 0,1 bis 0,3 s zu verzeichnen, bei Finish-Werkzeugen liegt der Zeitraum zwischen 0,5 und 1,0 s. Um bei Beginn der Zerspanung eine ausreichende Schmierstoffversorgung zu gewährleisten, ohne den Bearbeitungsvorgang zu verlängern, wird die MMS-Zufuhr im Versuch mit Finish-Werkzeugen direkt nach Einwechseln des Werkzeugs eingeschaltet. Zudem wird aus den Sprühtests deutlich, dass die vorübergehende Deaktivierung der Schmierstoffzufuhr während Rückzugs- und Positionierbewegungen bei Werkzeugen mit Kühlkanaldurchmessern unter 0,8 mm zu ungleichmäßigem Sprühbild führt. Dazu zählen etwa jene Werkzeuge zur Bearbeitung der Features mit $D \leq 6$ mm. Werkzeuge mit größeren Kühlkanaldurchmessern sind von diesem Effekt nicht betroffen.

Tabelle 5.11: Angewandte Stufen der Faktoren für die Finish-Bearbeitung der Features am Kurbelgehäuse B48

#	Feature	Prozessschritt	n [min^{-1}]			f [mm]			$Q_{MMS,Rother}^1$ $p_{DL,Misch}$ [bar]	
			-	0	+	-	0	+	-	+
1	Stegkühlungsbohrung Wasserraum $D = 3,5$ mm	Finish WZA	13.642	16.000	18.000	0,20	0,25	0,30	6,5	7,0
		Finish WZB	10.913	12.732	14.551	0,16	0,18	0,20	6,7	7,0
2	Ölbohrung Druckölraum $D = 4,5$ mm	Finish WZA	10.681	14.218	17.755	0,19	0,24	0,29	6,5	7,0
		Finish WZB	8.488	10.610	12.732	0,15	0,20	0,25	6,7	7,0
3	Ölbohrung Druckölraum $D = 6$ mm	Finish WZA	10.610	13.263	15.915	0,19	0,24	0,29	6,5	7,0
		Finish WZB	7.958	10.610	13.263	0,20	0,25	0,30	6,7	7,0
4	Blow-By-Bohrung $D = 7$ mm	Finish WZA	9.231	11.505	13.778	0,23	0,28	0,33	6,5	7,0
		Finish WZB	6.821	9.095	11.368	0,20	0,25	0,30	6,0	6,5
5	Ölbohrung Druckölraum $D = 8$ mm	Finish WZA	7.998	9.987	11.976	0,27	0,32	0,37	6,5	7,0
		Finish WZB	5.968	7.958	9.947	0,20	0,25	0,30	5,0	5,3
6	Ölbohrung Druckölraum $D = 9$ mm	Finish WZA	7.215	8.983	10.752	0,31	0,36	0,41	6,5	7,0
		Finish WZB	5.305	7.074	8.842	0,20	0,25	0,30	5,3	5,8

¹ Bei Rother Aerosolmaster 4000 in Form des Luftdrucks bei Aerosolmischung

S_{MMS} versuchsübergreifend: + Induoil
- Vascomill

Aus dem in Kapitel 5.1.3.3 erläuterten und auf Herstellervorgaben basierenden vollfaktoriellen Versuchsplan (vgl. Tabelle 5.11) geht hervor, dass die Werkzeughersteller WZA und WZB auf unterschiedliche Strategien setzen. WZA empfiehlt für alle Werkzeuge höhere Drehzahlen und Vorschübe bei in der Regel erhöhter Schmiermittelmengen, WZB rät zu defensiveren Werten bei geringerer Schmiermittelzufuhr.



Abbildung 5.27: Auswahl an Werkzeug- und Werkstückschäden im Rahmen der Versuche

Trotz vorheriger Erprobung der Werkzeuge durch die Werkzeughersteller verlief die Versuchsdurchführung am PTW nicht ohne teils massive Schäden an Werkzeug und Werkstück (vgl. Abbildung 5.27). Neben Aufschmierungen kam es zu Werkzeugbrüchen und in einem Einzelfall zu einem Aufreißen des Versuchswerkstücks. Ein vollständiges Abarbeiten des vollfaktoriellen Versuchsplans war aus diesem Grund bei WZA nur für die Werkzeuge mit $D \geq 7 \text{ mm}$ (Features #4, #5, #6) und bei WZB nur für das Werkzeug zur Bearbeitung des Features #4 möglich.

Auf Basis der statistischen Auswertung der Versuchsreihe lässt sich nicht für alle Faktoren eine eindeutige Aussage treffen. Als werkzeugübergreifend überwiegend signifikant stellt sich der Einfluss von Schmiermittelart und Schmiermittelmengen heraus (vgl. Abbildung 5.28). Die Finish-Werkzeuge des Herstellers WZA zur Bearbeitung der Features #4 und #6 erreichen bei Einsatz von Vascomill um 14 bis 25 Prozent geringere Abweichungen von der Geradheit, beim Finish-Werkzeug zur Bearbeitung von Feature #5 werden mit Induoil um 17,5 Prozent bessere Ergebnisse erzielt. Zum Feature #5 ist bei Werkzeugen von WZB wegen eines Signifikanzwerts von 22,5 Prozent (Erläuterung und Grenzwerte s. Kapitel 5.1.3.3) keine Aussage möglich.

Als bedeutendste Einflussgröße auf die Rundheit der Bohrung erweist sich die Schmiermittelmengen. Beim Feature #5 wird mit dem Werkzeug von WZA eine um 18,6 Prozent geringere Abweichung bei höherem Schmiermitteleinsatz erreicht (Signi-

fikanzwert 8,1 Prozent), mit jenem von WZB wird die Abweichung um 47,6 Prozent verringert (Signifikanzwert 0,001 Prozent).

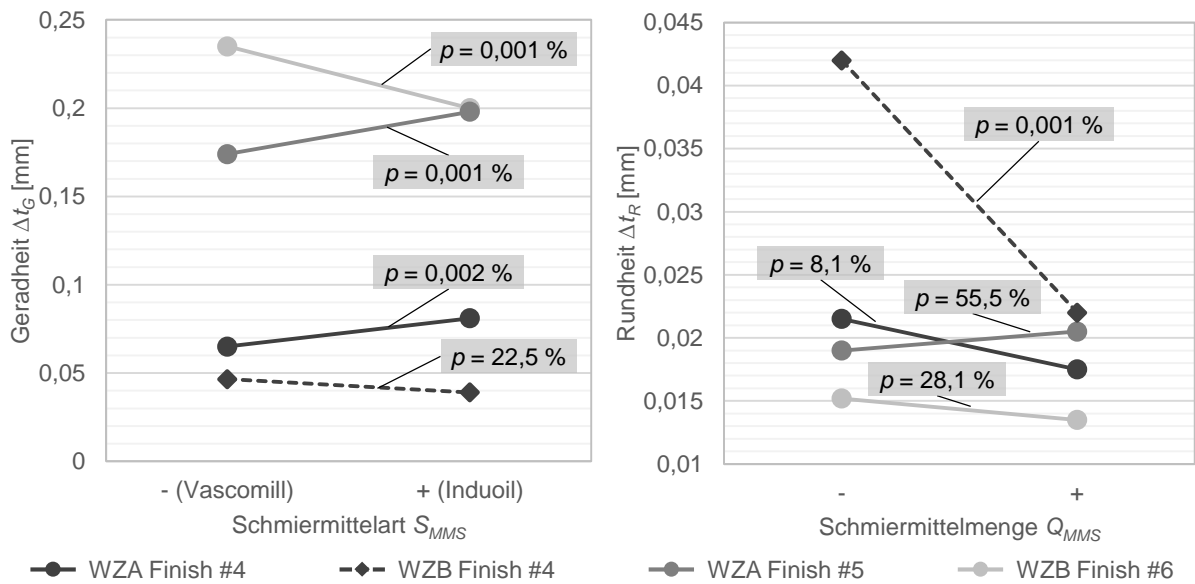


Abbildung 5.28: Effekt der Schmiermittelart auf die Geradheit und Schmiermittelmenge auf die Rundheit bei unterschiedlichen Werkzeugen

Beim Feature #4 ist der Effekt des Vorschubs auf Geradheit und Rundheit erkennbar (vgl. Abbildung 5.29). Bei WZA bewirkt ein höherer Vorschub eine Reduzierung der Rundheitsabweichung um 32 Prozent (Signifikanzwert 1,7 Prozent), bei WZB eine Verschlechterung der Geradheit um bis zu 27 Prozent (Signifikanzwert 5,8 Prozent).

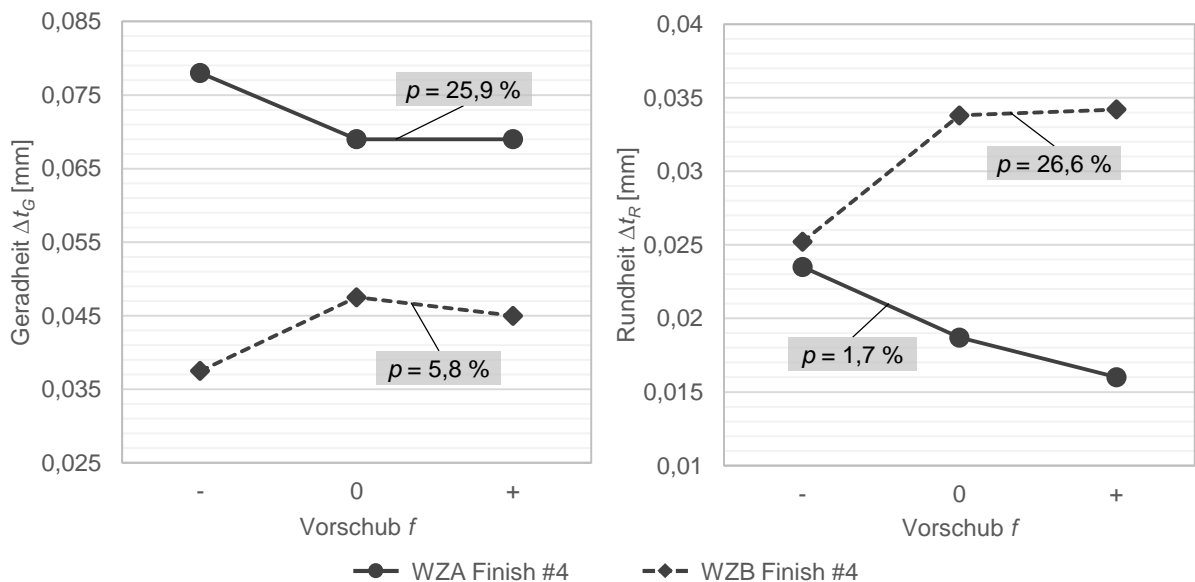


Abbildung 5.29: Effekt des Vorschubs auf Geradheit und Rundheit beim Finish-Werkzeug zur Bearbeitung des Features #4

Die in Abbildung 5.29 aufgezeigten Verläufe sind zwar jeweils annähernd spiegelverkehrt, wegen der geringen Signifikanzniveaus (25,9 Prozent bzw. 26,6 Prozent) der Vergleichswerte aber nicht aussagekräftig.

Signifikante Wechselwirkungseffekte sind bei den Werkzeugen von WZA zur Bearbeitung der Features #5 und #6 nachweisbar. So wirkt sich eine hohe Schmiermittelmenge bei mittlerem und hohem Vorschub positiv auf die Geradheit von Feature #5 aus, während die höchste Geradheit bei geringem Vorschub mit niedriger Schmiermittelmenge erzielt wird (vgl. Abbildung 5.30, linke Seite). Der Signifikanzwert liegt bei 4,8 Prozent.

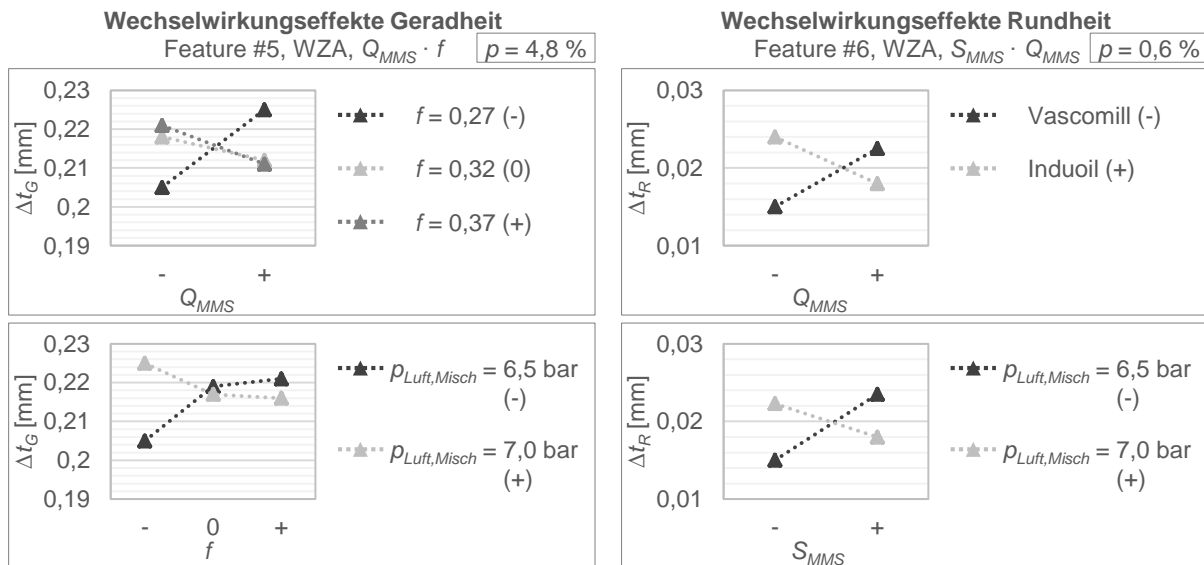


Abbildung 5.30: Signifikante Wechselwirkungseffekte bei den Werkzeugen zur Bearbeitung der Features #5 und #6

Die Analyse der Daten von Feature #6 macht die Unterschiede der beiden Schmiermittel deutlich: Beim Einsatz von Vascomill ist die Abweichung von der Rundheit bei geringem Durchfluss 33 Prozent geringer als bei hohem Durchfluss. Bei Induoil stellt sich der gegenteilige Effekt ein – höhere Durchflussmengen begünstigen den Rundheitswert um 25 Prozent im Vergleich zu Versuchsdurchläufen mit geringen Durchflussmengen (vgl. Abbildung 5.30, rechte Seite). Das Signifikanzniveau liegt bei 0,6 Prozent.

Im Rahmen der Versuche wurden Parameter zur prozesssicheren Bearbeitung aller entscheidungsrelevanten Features ermittelt. Bei Anwendung der jeweils idealen Faktorkombination nach Kapitel 5.1.3.3 wurden – trotz teils erhöhter Geräuschpegel während des Prozesses – die geringsten Abweichungen von den Formvorgaben festgestellt. Mit Werten unterhalb der Vorgaben des vollfaktoriellen Versuchsplans sind beim Werkzeugkonzept von WZA zur Bearbeitung von Feature #2 bessere Ergebnisse erzielbar. Prozesssicher einsetzbar sind die Werkzeuge von WZB für die Features #1 und #2 erst nach einer Neukonstruktion. Einen Überblick bietet Tabelle 5.12.

Tabelle 5.12: Gegenüberstellung der idealen Faktorkombinationen und Herstellervorgaben für die entscheidungsrelevanten Bearbeitungsfeatures des Kurbelgehäuses B48

# Feature	Prozessschritt	n [min ⁻¹]		f [mm]		$p_{DL,Misch}$ [bar]	S_{MMS}
		Empfehlung	Vorgabe	Empfehlung	Vorgabe		
1 Stegkühlungsbohrung Wasserraum $D = 3,5$ mm	Finish WZA	13.642	16.000	0,25	0,25	7,0	Vascomill
	Finish WZB ¹	12.732	10.913-12.732	0,16	0,16-0,20	7,0	MultiCut
2 Ölbohrung Druckölraum $D = 4,5$ mm	Finish WZA	7.000	14.218	0,20	0,24	5,8	Vascomill
	Finish WZB ¹	9.500	8.488-10.610	0,18	0,15-0,25	7,0	MultiCut
3 Ölbohrung Druckölraum $D = 6$ mm	Finish WZA	12.000	13.263	0,25	0,24	7,0	Vascomill
	Finish WZB	10.610	7.958-10.610	0,30	0,20-0,30	7,0	Microtol
4 Blow-By-Bohrung $D = 7$ mm	Finish WZA	11.505	11.505	0,28	0,28	7,0	Vascomill / Microtol
	Finish WZB	6.821	6.821-9.095	0,30	0,20-0,30	6,5	Keine Präferenz
5 Ölbohrung Druckölraum $D = 8$ mm	Finish WZA	9.987	9.987	0,37	0,32	6,5	Induoil
	Finish WZB	6.500	5.968-7.958	0,25	0,20-0,30	5,3	MultiCut
6 Ölbohrung Druckölraum $D = 9$ mm	Finish WZA	8.983	8.983	0,36	0,36	7,0	Keine Präferenz
	Finish WZB	7.074	5.305-7.074	0,25	0,20-0,30	5,8	Induoil

¹ Vom Hersteller nachgebesserte Werkzeuge

Aus der Analyse der Versuchsdaten geht hervor, dass höhere Schmiermittelmengen geringere Abweichungen von den Formvorgaben begünstigen (vgl. Abbildung 5.31). Auch der Vorteil beim Einsatz von Vascomill (-) ist deutlich erkennbar. Bei Drehzahl und Vorschub ergibt sich ein weniger eindeutiges Bild: Tendenziell wirken sich mittlere und hohe Vorschübe bei niedrigen bis mittleren Drehzahlen positiv auf die Bohrungsqualität aus.

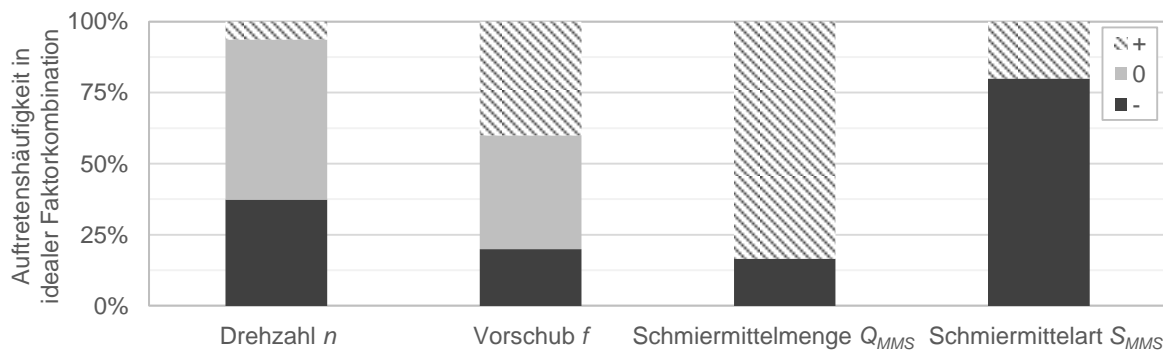


Abbildung 5.31: Verteilung der Auftretenshäufigkeit der Stufen einzelner Faktoren in der idealen Faktorkombination

Die anschließenden Thermographieaufnahmen mit der jeweils idealen Faktorkombination verdeutlichen die Abhängigkeit der Werkstückerwärmung von der Bearbeitungsreihenfolge. Eine Analyse der Temperaturverteilung zeigt auf, dass die Temperatur ausgehend vom Bereich des Werkzeugeingriffs graduell abnimmt. Trotz der in Kapitel 5.1.3.3 beschriebenen Unterteilung des Werkstücks in zwei Hälften herrscht nach Versuchsende je nach Werkzeug ein Temperaturgradient von mehreren Grad Celsius zwischen dem Bereich der ersten und dem der letzten Bohrung (vgl. Abbildung 5.32).

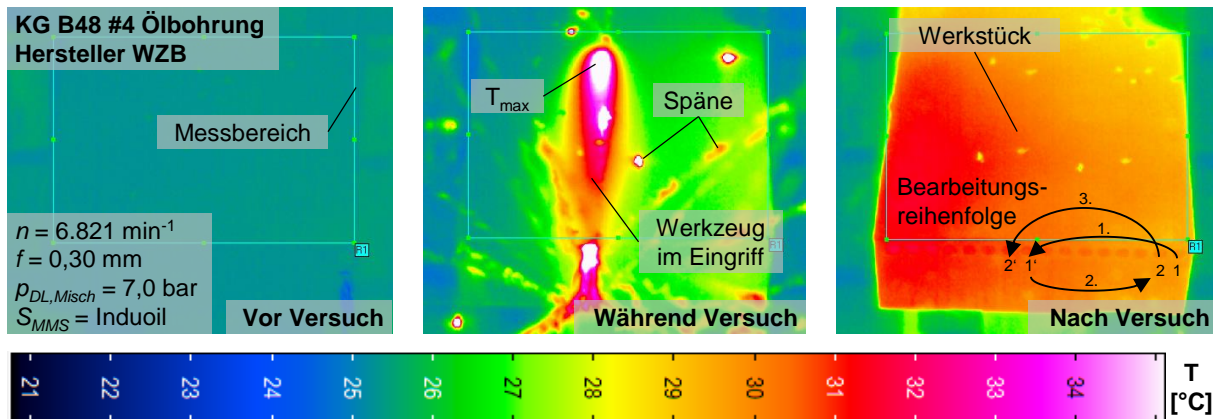


Abbildung 5.32: Chronologie einer Thermographieaufnahme

Neben der Bearbeitungsreihenfolge beeinflussen die Schnittparameter den Wärmeeintrag in das Werkstück. Sind die Temperaturunterschiede zwischen den Werkzeugkonzepten der beiden Hersteller beim Feature #6 mit $0,3^{\circ}\text{C}$ noch vergleichsweise marginal (vgl. Abbildung 5.33), treten sie beim Feature #4 mit $2,0^{\circ}\text{C}$ deutlich hervor (vgl. Abbildung 5.34). Liegt die Drehzahl bei WZA bei ersterem noch 27 Prozent über dem Wert von WZB, beträgt der Unterschied bei Feature #4 bereits 69 Prozent.

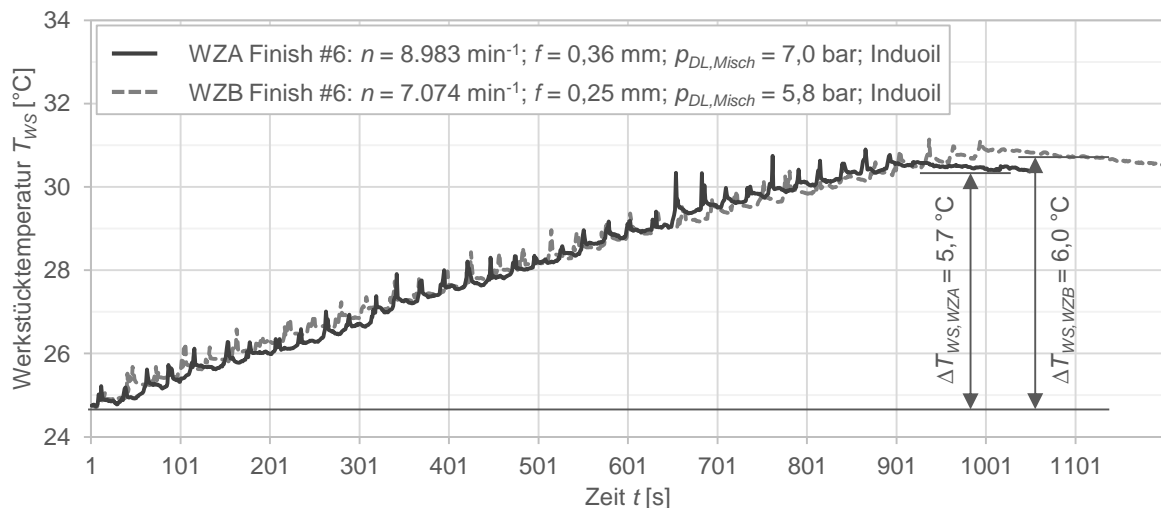


Abbildung 5.33: Temperaturverlauf bei der Zerspanung von 34 Bohrungen mit den Finish-Werkzeugen der Hersteller WZA und WZB für Feature #6

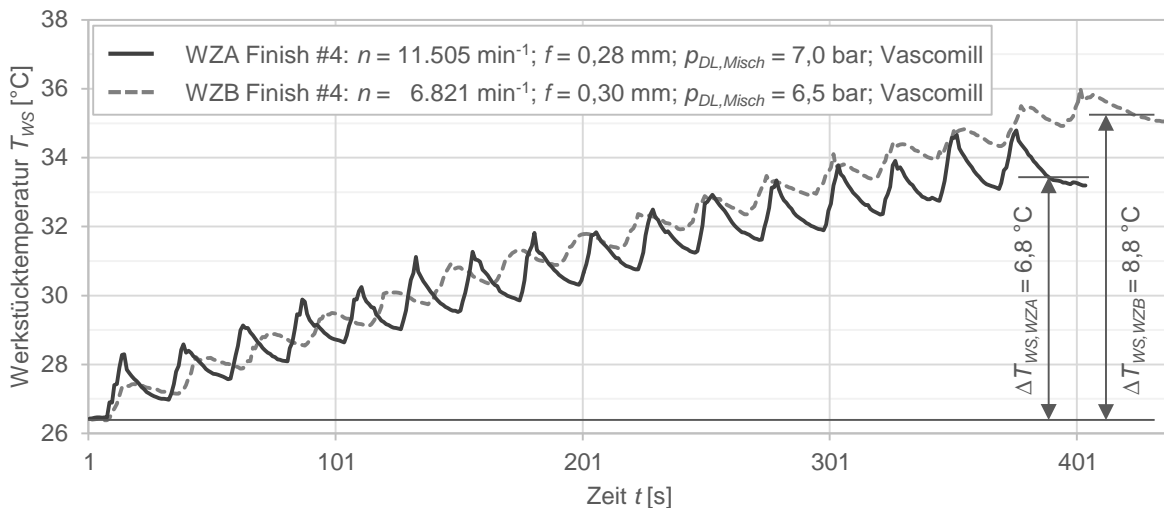


Abbildung 5.34: Temperaturverlauf bei der Zerspaltung von 16 Bohrungen mit den Finish-Werkzeugen der Hersteller WZA und WZB für Feature #4

Ein Vergleich der nachträglich untersuchten Schmierstoffe ATS AL und Microtol bei Feature #1 belegt ihren geringen Einfluss auf die Werkstücktemperatur trotz ihrer unterschiedlichen Eigenschaften (vgl. Abbildung 5.35).

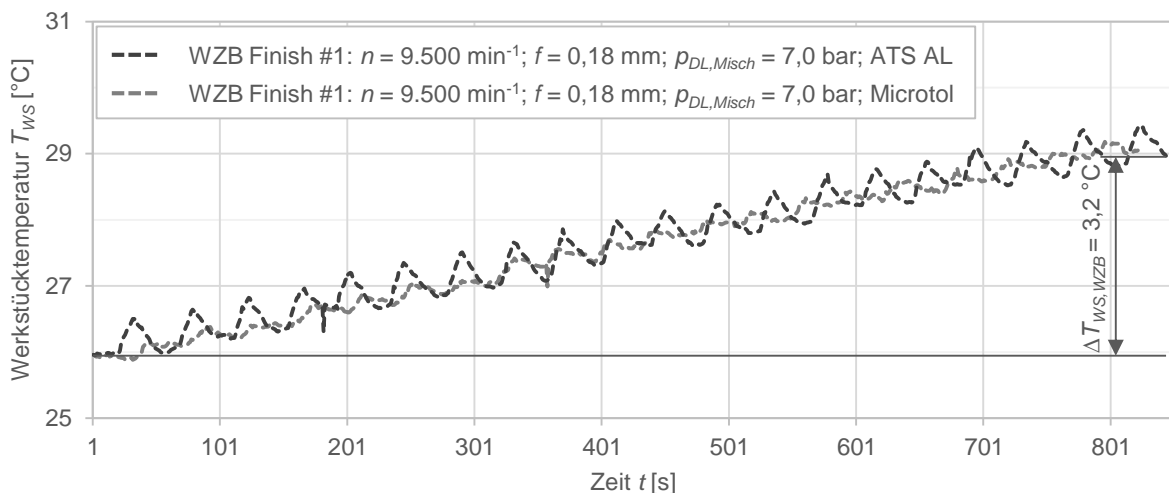


Abbildung 5.35: Temperaturverlauf bei der Zerspaltung von 20 Bohrungen mit den Finish-Werkzeugen des Herstellers WZB für Feature #2 bei Schmierung mit ATS AL und Microtol

Analog zur Versuchsreihe zur Untersuchung des Zylinderkopfs N20 ist auch bei dieser Untersuchung aus Gründen der Geheimhaltung keine Nennung der Prozessdaten und Werkzeugkosten aus der Nassbearbeitung möglich. Die Unterschiede in der Bearbeitungszeit liegen im Bereich von etwa -15 bis +20 Prozent, sofern die MMS-Zufuhr kurz nach Einwechseln des Werkzeugs aktiviert wird.

5.2 Analyse flexibler Fertigungssysteme für Aluminiumbauteile mit herkömmlicher Kühlschmierstrategie

Nach dem Nachweis der Einsetzbarkeit von MMS bei der Bearbeitung der betrachteten Bauteile ZK N20 und KG B48 im vorangegangenen Kapitel folgt nun die Beschreibung der betrachteten flexiblen Fertigungssysteme mit konventioneller Kühl-

schmierstrategie und die Analyse ihres Energiebedarfs mittels der Methode der Energiewertstromanalyse. Aus Gründen der Geheimhaltung ist eine detaillierte Betrachtung der Kostenseite hinsichtlich Einmalaufwänden und Betriebskosten nur eingeschränkt möglich. Eine diesbezügliche Bewertung wird in Kapitel 7.1 exemplarisch anhand fiktiver, realitätsnaher Daten durchgeführt.

Diese Untersuchungen dienen als Basis zur Ableitung der erforderlichen Maßnahmen zur erfolgreichen Einführung von MMS (Beantwortung F1.1) sowie in Vorbereitung zur Bewertung der Auswirkungen der Einführung von MMS (Beantwortung F1.3). Die gewonnenen Erkenntnisse fungieren zudem als Datengrundlage für das zu entwickelnde wissensbasierte System.

5.2.1 Struktur und Systemelemente

Aufbau und Struktur der betrachteten Produktionssysteme folgen der bereits in Kapitel 3.4 beschriebenen Definition von flexiblen Fertigungssystemen und sind im BMW Group Referenzsystem der mechanischen Fertigung [BMW11] als modularer, skalierbarer Standard dokumentiert. Kern der von der BMW Group eingesetzten FFS ist das sogenannte Zentrale Logistiksystem (ZLS). Es ermöglicht den ungerichteten Teiltransport zwischen den Arbeitsfolgen (AFO) und besteht aus Portalrobotern sowie lokalen Werkstückspeichern. Sämtliche dieser lokalen Entkopplungsspeicher, auch als Logistikmodule (LM) bezeichnet, sind über längs verlaufende Logistikladeportale (LLP) verbunden. Bis auf einzelne Arbeitsfolgen sind sämtliche Maschinen über quer zum ZLS verlaufende Maschinenladeportale (MLP) an das ZLS angebunden. Die Anbindung der übrigen Arbeitsfolgen erfolgt über Verkettungsbänder. Neben der Pufferfunktion etwa bei Störungen in nachgelagerten Fertigungsschritten dienen die Werkstückspeicher der Bildung von Werkstückgruppen. Diese Funktion ist zur höheren Auslastung von Maschinen hilfreich, welche die gleichzeitige Bearbeitung mehrerer Bauteile identischen Typs ermöglichen.

Bauartbedingt ist die Variantenflexibilität nicht beschränkt, bei der BMW Group ist eine Werkstückvariantenanzahl zwischen 5 und 15 üblich. Zwar erlaubt der Einsatz von Bearbeitungszentren theoretisch, mehrere Werkstückarten wie etwa Zylinderköpfe, Kurbelgehäuse und Kurbelwellen gleichzeitig auf einem FFS zu fertigen, in der Praxis werden die Fertigungslinien aber sortenrein betrieben. Hintergrund ist mangelnde Rentabilität aufgrund des daraus resultierenden erhöhten logistischen, technischen und monetären Aufwands. Die Aufhebung der Sortenreinheit erforderte ein Vielfaches der derzeit verwendeten Werkzeuge je spanender Maschine sowie erhöhte technische Maßnahmen zur Aufspannung der unterschiedlichen Werkstückarten. Das Bauteilspektrum innerhalb eines FFS reicht vom 3- bis 6-Zylinderbauteil für Diesel- und Benzinmotoren in diversen Leistungsstufen. Sonderwerkstücke oder solche mit geringen Stückzahlen lassen sich in Losgröße eins produzieren.

Abbildung 5.36 zeigt den schematischen Aufbau ein FFS für Aluminiumkurbelgehäuse bei der BMW Group.

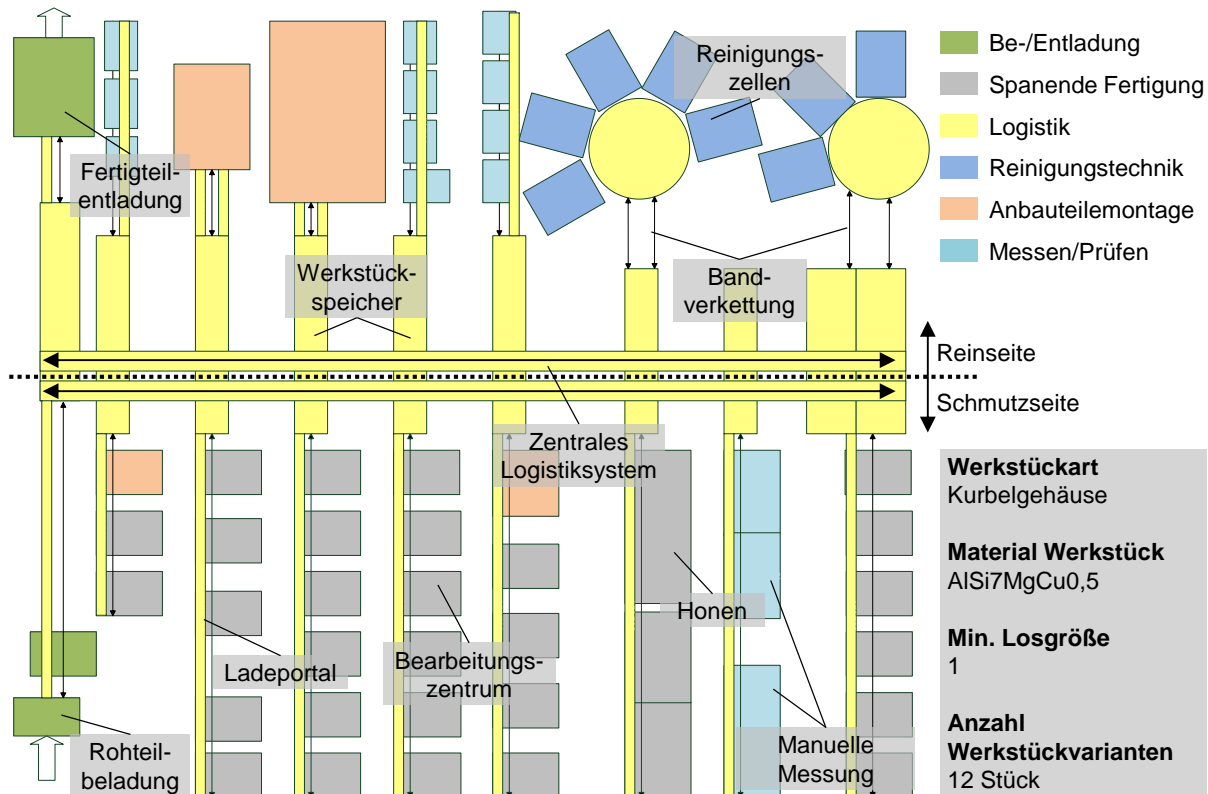


Abbildung 5.36: Schematische Darstellung eines flexiblen Fertigungssystems für Aluminiumkurbelgehäuse bei der BMW Group

Die Steuerung von Angebot und Nachfrage innerhalb des ZLS, resultierend aus dem festgelegten Standardablauf der Fertigungsschritte sowie Sonderabläufen wie SPC-Prüfungen, erfolgt durch das bereits in Kapitel 3.4 erläuterte Fertigungsleitsystem PSS. In den betrachteten FFS kommt ein Teil der im Kapitel 3.4 erwähnten Systemelemente zur Anwendung. Eigenschaften, Funktion und Besonderheiten werden im Folgenden beschrieben.

5.2.1.1 Be- und Entladung

Im weltumspannenden Produktionsnetzwerk der BMW Group steht der Transport von Motorkomponenten aus der spanenden Fertigung in Motormontagelinien auf anderen Kontinenten an der Tagesordnung. Roh- und Fertigteile werden daher typenrein in werkstückspezifischen Transportbehältern an- und abgeliefert. Diese gewährleisten auch bei Transport in widrigen Verhältnissen eine Einhaltung der Vorgaben an die technische Sauberkeit der Bauteile.

Die Systemdimensionierung basiert auf der Gesamtanlagenausbringung und Stückzahlflexibilität. Eine Be- und Entladung ist wahlweise automatisiert oder manuell möglich.

5.2.1.2 Spanende Fertigung

Ein Großteil der spanenden Bearbeitung erfolgt auf redundant angeordneten Bearbeitungszentren. Zur Anwendung kommen neben den klassischen einspindligen Varianten (Einspindler, kurz: ES) auch solche mit zwei Spindeln (Doppelspindler, kurz: DS) zur gleichzeitigen Bearbeitung zweier identischer Werkstücke (vgl. Abbildung 5.37).

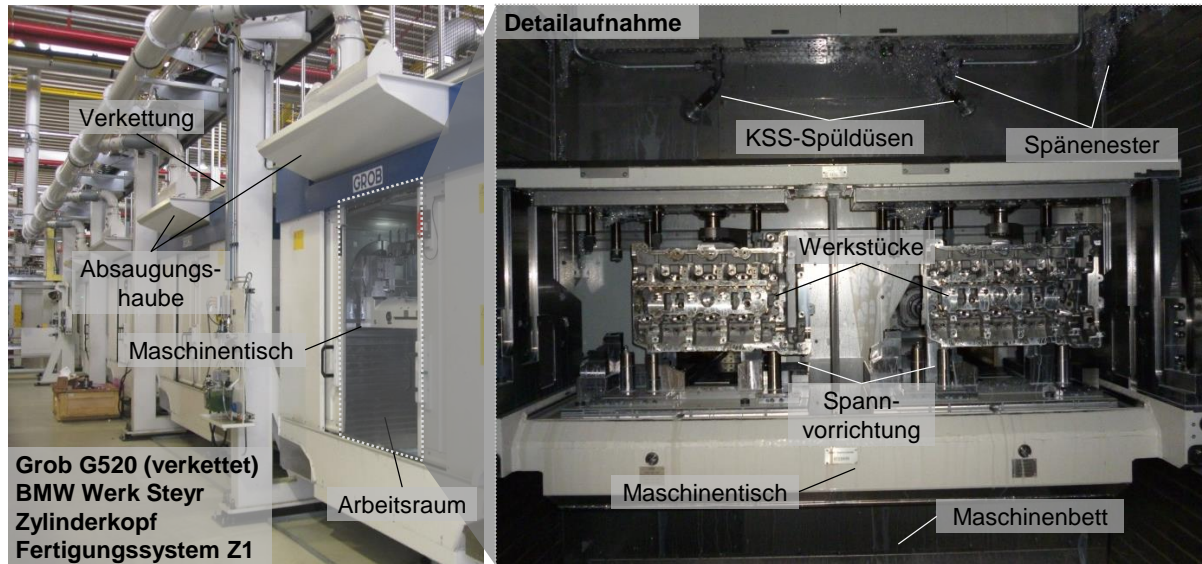


Abbildung 5.37: Untersuchte, verkettete Bearbeitungszentren und Werkstückaufspannung im BMW Werk Steyr, Fertigungssystem Z1

Spezifikationen von Spindeln, Achsen, Werkzeugmagazinen, Arbeitsraum und Kühlschmierstoffversorgung richten sich nach Art der Bearbeitung und Variantenflexibilität. Bei Zylinderkopf- und Kurbelgehäusebearbeitung liegt der Arbeitsbereich bei $600 \cdot 600 \cdot 500 \text{ mm}^3$, die Achsenanzahl variiert zwischen vier und fünf. Linearantriebe gewährleisten zudem hohe Achsbeschleunigungen. Wegen des hohen Automatisierungsgrads der betrachteten FFS sind die BAZ mit Schneid- und Rundlaufkontrollen zur vollautomatischen Prozessüberwachung ausgestattet. Neben den BAZ sind Sondermaschinen zur Bearbeitung einzelner Features wie etwa Honanlagen im Einsatz. Auch diese sind stets redundant angeordnet.

Jede spanende Werkzeugmaschine ist an eine Kühlschmierstoffanlage angebunden und bezieht Emulsion in bis zu zwei Qualitätsstufen. Zur Arbeitsraumspülung wird Emulsion mit Feinheiten von $50 - 70 \mu\text{m}$ verwendet, zur Werkzeuginnenkühlung kommt in BAZ zudem ein feinfltriertes Produkt mit Feinheiten von $25 - 30 \mu\text{m}$ zum Einsatz. Letzteres wird innerhalb des BAZ mit Hochdruckpumpen durch die Spindel direkt an die Bearbeitungsstelle befördert und daher als Hochdruckemulsion (HD) bezeichnet. Zur Abgrenzung von dieser wird für die Emulsion zur Arbeitsraumspülung im weiteren Kontext der Begriff Niederdruckemulsion (ND) verwendet.

Näher untersucht wurde die Entstehung von Spänenestern sowie ihre Vermeidung bei gleichzeitig geringerem KSS-Einsatz in früheren Arbeiten des Autors sowie der von diesem betreuten Abschlussarbeit von Buff. Trotz des Einsatzes rotierender KSS-

Spüldüsen (vgl. Abbildung 5.37, rechte Seite) sind Spänenester gerade bei flach abfallenden Leitblechen und sichtbaren Verschraubungen nicht zu vermeiden (vgl. Abbildung 5.38). [GREB11, BUFF12]

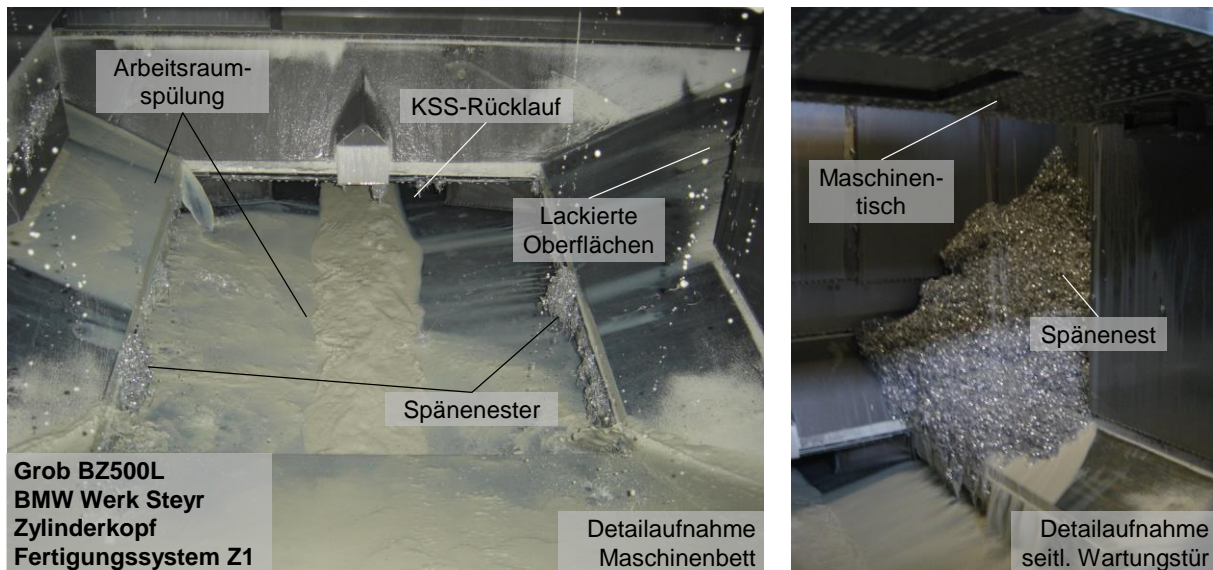


Abbildung 5.38: Detailaufnahmen des Arbeitsraums eines untersuchten BAZ des Typs Grob BZ500L und entstandener Spänenester im BMW Werk Steyr, Fertigungssystem Z1

Bei der Fertigung von Kurbelgehäusen sind zudem Honanlagen im Einsatz. Sie sind als Transfermaschinen konstruiert und werden zur Feinbearbeitung der Oberflächen der Zylinderlaufbahn und der Kurbelwellenlagerkasse verwendet. Wegen der engen Prozesstoleranzen werden Honanlagen von einer proprietären KSS-Filteranlage versorgt. Als Medium kommt eine Emulsion mit vergleichsweise höherer Feinheit zum Einsatz, Hochdruckpumpen werden nicht verwendet. In Abhängigkeit von der Zylinderlaufbahntechnologie des Werkstücks sind unterschiedliche Honanlagen vonnöten. Kommt bei der Zylinderlaufbahn einer Werkstückvariante die Beschichtungsmethode des Lichtbogen-Draht-Spritzens (LDS) statt einer Graugussbuchse zum Zuge, entfällt das Fügen der Buchsen. Daher werden auf LDS-Bearbeitung spezialisierte Honanlagen eingesetzt, die bei Bedarf auch zur Bearbeitung von Graugussbuchsen ausrüstbar sind.

5.2.1.3 Logistik

Das bereits eingangs beschriebene ZLS ist über Ladeportale und Verkettungsbänder an einzelne Maschinen angebunden. Je nach Ausprägung der Maschine sind die Lader für den Transport eines oder zweier Werkstücke ausgelegt, die Beladung erfolgt von oben. Unterhalb von Ladern und Verkettungsbändern sammeln Ölwanne von Werkstücken eingeschleppte KSS- und Spänemengen.

5.2.1.4 Reinigungstechnik

Zur Beseitigung von anhaftendem Schmutz, Chemikalien und Spänen vor Prozessschritten mit erhöhten Anforderungen an die technische Sauberkeit wie etwa Messung,

Prüfung, Honbearbeitung, Anbauteilemontage oder Fertigteilverpackung werden die Werkstücke in vollautomatisierten Universalreinigungsanlagen behandelt. Unterschieden werden Warmreinigungsvorgänge mit Reinigungsmitteltemperaturen zwischen 50 und 55°C und Vorreinigungsprozesse mit KSS.

Sternförmig und redundant um eine Beladeinheit herum angeordnet, behandeln Reinigungsmaschinen Werkstücke einzeln in den Teilprozessen Injektionsflutwaschen, Hochdruckreinigen, Spülen und Abblasen. Abhängig von der Anforderung sind werkstückspezifische Zwischen-, Prüf- oder Endreinigungsvorgänge mit anschließendem Trocknungsprozess möglich. Durch die Möglichkeit des ZLS zu ungerichteten Transporten sind die Waschkammern in einem Bereich der Fläche konzentriert, was eine Überwachung durch Betriebspersonal erleichtert.

5.2.1.5 Anbauteilemontage

Anbauteile wie Zylinderlaufbuchsen, Ventilsitzringe und -führungen oder Lagerschalen, deren spanende Bearbeitung am Werkstück erfolgt, werden in Montagestationen verbaut. Neben Aluminium kommen u. a. die Materialien Stahlguss und Messing zum Einsatz.

In Abhängigkeit von der Bauart eines Kurbelgehäuses variieren die benötigten Montageanlagen. Ist eine *Bedplate*, also ein einteiliges Kurbelgehäuseunterteil vorhanden, wird die Montage einzelner Lagerdeckel durch eine *Bedplate*-Montageanlage ersetzt.

5.2.1.6 Mess- und Prüfeinrichtungen

Während und nach der Bearbeitung wird das Werkstück auf Einhaltung der vorgegebenen Toleranzen hin überprüft. Ein Teil wird als 100-Prozent-Prüfung, ein anderer in festgelegten Intervallen oder nach Werkzeugwechseln durchgeführt. Größtenteils erfolgen die Analysen vollautomatisch, einzelne Stichproben werden teilweise mit Handprüfmitteln untersucht.

Zu den vollautomatisierten Prüfumfängen zählen die Drallprüfung, eine Ermittlung des ventilhubabhängigen Luftstroms im Brennraum, die Dichtprüfung, taktile Oberflächen-, Form- und Lagemessungen sowie die kameragestützte Prüfung von Oberflächen wie der Brennraumfläche, der Zylinderlaufbahn oder anderen Bohrungen. Sind LDS-beschichtete Werkstückvarianten Teil des Produktportfolios eines FFS, dienen Zylinderinspektionsanlagen der Prüfung der LDS-Schicht.

Zum Nachweis der Dichtheit einzelner Räume und Kanäle im Werkstück wird jedes unterschiedlichen Dichtprüfmethode unterzogen. Dichtprüfzellen sind wie Bearbeitungszentren redundant angeordnet und bestehen aus mehreren Stationen, in denen Werkstücke parallel geprüft werden. Wegen der komplexen Dichtkonturen ist die Variantenflexibilität einzelner Stationen limitiert, höhere Variantenzahlen erfordern daher eine erhöhte Anzahl an Stationen.

5.2.1.7 Nebenbetriebe und Gebäude

Jedes FFS ist an mindestens eine Kühlschmierstoffanlage angeschlossen. Prozesse mit Zusatzanforderungen an den Kühlschmierstoff wie etwa Honen oder Schleifen erfordern separate KSS-Anlagen. Bei FFS mit Ausbringungen ab ca. 300.000 Einheiten pro Jahr sind mehrere KSS-Anlagen parallel im Einsatz. Ihre Umwälzleistung beträgt durchschnittlich 20.000 l/min bei einem Gesamtvolumen im Bereich von 100 bis 200 m³. Abhängig von der Bauart sind einer oder mehrere Sätze redundant ausgeführter Pumpen installiert. Kühlaggregate gewährleisten eine konstante Kühlschmierstofftemperatur im Vorlauf im Bereich von 20 - 24°C. [GREB11]

Die Rückführung und Aufbereitung der Kühlschmierstoffe erfolgt nach den bereits in Abbildung 3.4 aufgezeigten Varianten 1 und 2. Erstere, der Transport über Rinnen und Kanäle, kommt in KSS-Filteranlagen zum Einsatz, die für gewöhnlich in einem Geschoss unterhalb des FFS in lokaler Nähe zu den KSS-Verbrauchern positioniert sind. KSS werden von der Schwerkraft über Rinnen und Kanäle zum Vorabscheider transportiert, von einem oder mehreren Pumpensätzen durch die Filter und anschließend zurück zu den Verbrauchern gefördert. Variante 2, der Transport über eine Rückpumpstation, findet bei KSS-Filteranlagen Anwendung, die im gleichen Geschoss wie die KSS-Verbraucher oder oberhalb dieser angeordnet sind (vgl. Abbildung 3.5). Im Vergleich zu Variante 1 ist sie wegen der zusätzlichen Pumpen weniger wirtschaftlich und energieeffizient. Daher sind ebenerdige KSS-Filteranlagen bei der BMW Group nur in Ausnahmefällen im Einsatz. Fertigungshallen sind zumindest in Teilbereichen der Fertigungslinien unterkellert. Für voll ausgebaute FFS, wie die betrachteten G2 und Z2, erfordert die KSS-Versorgung inkl. Verrohrung, Späneaufbereitung und Tanks zum Lagern von Betriebs- und Hilfsstoffen einen Flächenbedarf von ca. 1.600 m². Bei der BMW Group werden KSS-Anlagentypen mit (Unter-)Druckbandfilter eingesetzt. Unterdruckbandfilteranlagen (vgl. Abbildung 5.39) weisen einen Filtersystempumpensatz auf, der die Emulsion durch das Filterband saugt und an die KSS-Verbraucher befördert. Druckbandfilteranlagen besitzen einen Filterpumpensatz zum Fördern des KSS durch den Filter und einen separaten Systempumpensatz zum Transport des KSS an die Verbraucher. Wegen des zusätzlichen Pumpensatzes sind Druckbandfilteranlagen teurer und erfordern mehr Energie und Fläche als Unterdruckbandfilteranlagen. Vorteile gegenüber dem Unterdruckprinzip sind bessere Skalierbarkeit, flexiblere Anordnung durch geringere Bauhöhe und schnellere Filtrierung durch höheren Druck.



Abbildung 5.39: Untersuchte KSS-Unterdruckbandfilteranlage im BMW Werk Steyr

Mikro- und Ultrafiltrations- sowie Umkehrosmoseverfahren in der Abwasserbehandlung dienen der Trennung von öligen, wässrigen und sonstigen flüssigen und festen Komponenten der KSS-Emulsion.

Im BMW Werk Steyr ist das Druckluftversorgungsnetz als Ring aufgebaut, der aus mehreren sogenannten Druckluftzentralen mit verschiedenen Kompressoren gespeist wird (vgl. Abbildung 5.40).



Abbildung 5.40: Untersuchte Druckluftkompressoren im BMW Werk Steyr

5.2.2 Energiebedarf

In Vorbereitung zur Beantwortung des ökologischen Teils der Forschungsfrage F1.3 nach den Auswirkungen der Einführung von MMS wird im Folgenden der Energiebedarf der Systemelemente der vorgestellten flexiblen Fertigungssysteme bestimmt.

5.2.2.1 Methodik

Zur vollständigen Erfassung des Energiebedarfs der Systemelemente eines Produktionssystems ist die Betrachtung aller verwendeten Medien inkl. der elektrischen Energie erforderlich. Die von Erlach [ERLA09] und Reinhart et al. [REIN10, REIN11] beschriebene Energiewertstrommethode zur Erhöhung von Energieeffizienz und Produktivität bietet mit der Energiewertstromanalyse eine Vorgehensweise zur strukturierten

Ermittlung dieser Prozessdaten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit findet eine an diese angelehnte Methode Anwendung, die im Folgenden näher beschrieben wird. Nach Festlegung der Systemgrenzen erfolgt für jedes Systemelement die Messung von Leistungsaufnahme und Medienverbräuchen. Anschließend werden die Systemelemente anhand von arbeitsfolgenspezifischen Tabellen entlang des Wertstroms visualisiert, mit den jeweils erforderlichen Medienversorgungselementen verknüpft und der Materialfluss aufgetragen. Abweichend zur von Erlach und Reinhart et al. beschriebenen Analyseverfahren werden zudem die Betriebszustände der Maschinen und Anlagen während der Messung dokumentiert. Dies ist erforderlich, um eine Unterscheidung der drei Zustandsklassen wertschöpfende (Bearbeitung/Produktion), nicht-wertschöpfende (Wartezeiten, Störungen) und nicht-wertschöpfende, aber notwendige Tätigkeiten (Transporte, Reparatur, Instandhaltung) zu ermöglichen (vgl. Abbildung 5.41). Die an den Umfang der vorliegenden Arbeit angepasste Methodik wurde im Rahmen der vom Autor betreuten Abschlussarbeit von Suthe ausgearbeitet [SUTH12] und in der Folge weiter für den Anwendungsfall optimiert.

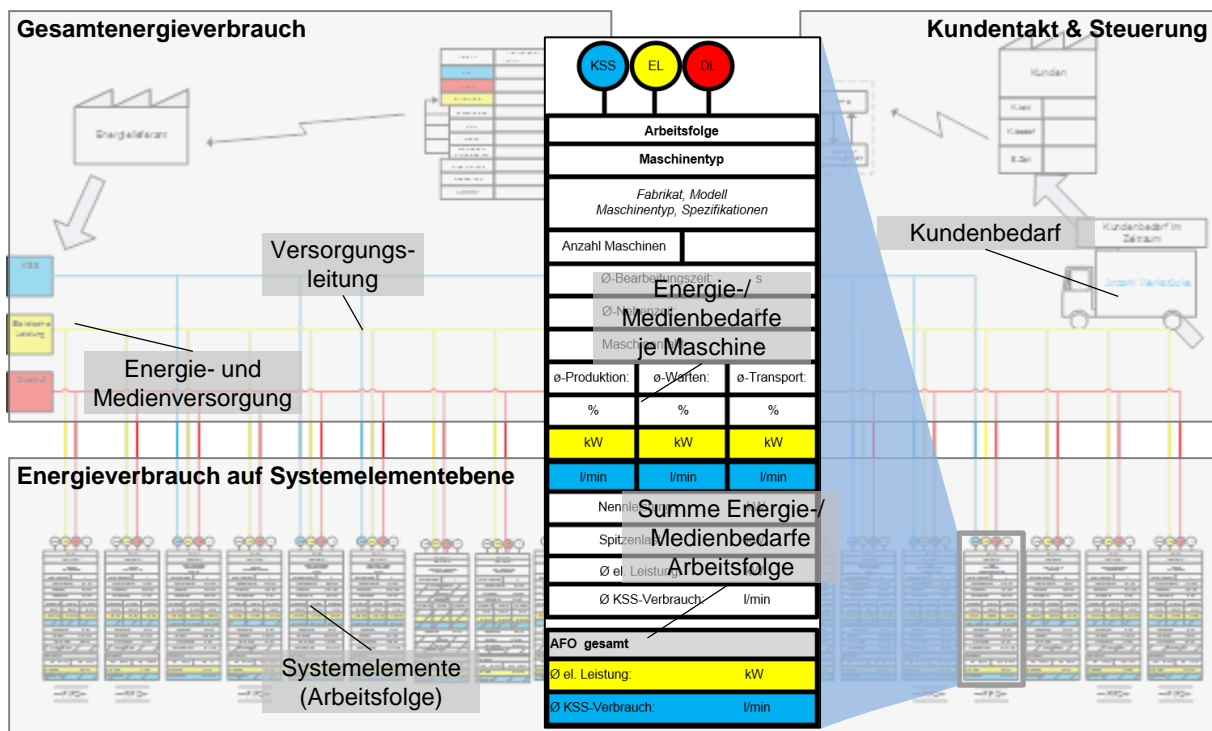


Abbildung 5.41: Elemente eines Energiewertstroms, Visualisierung in Anlehnung an [ERLA09, REIN10, SUTH12], erweitert um Zustandsklassen Produktion, Warten, Transport

An die Definition der Zustandsklassen lehnt sich auch die zeitlich nach Durchführung der Energiewertstromanalyse veröffentlichte VDMA-Richtlinie 34179 an, in welche die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit eingeflossen sind. Der dort verwendete Begriff „Energiezustand“ und seine Ausprägungen finden im Rahmen dieser Arbeit keine Anwendung. [VDMA15] Abhängig von der Auslastung der Produktionssysteme variiert der Zeitanteil dieser Zustände. Daher wird die Verteilung über die Zeitspanne ei-

nes Jahres gemittelt. Die gemessenen Parameter werden je Maschine und Zustandsklasse gemittelt und je Arbeitsfolge in den Tabellen erfasst und summiert.

5.2.2.2 Vorgehensweise

Im Fokus der Betrachtung stehen Maschinen- und Anlagentechnik der Produktionssysteme sowie die zugehörige Peripherie zur Energie- und Medienversorgung. Beleuchtungs-, Klima-, Belüftungs- und Heiztechnik werden im weiteren Verlauf daher nicht untersucht (vgl. Abbildung 5.42).

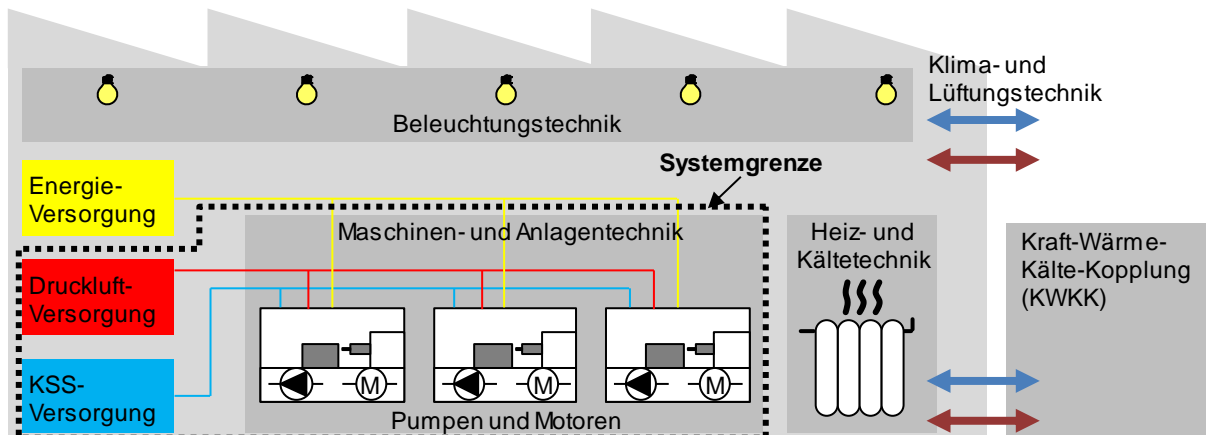


Abbildung 5.42: Schematische Darstellung der Teilsysteme einer Fabrik und Abgrenzung des Betrachtungsrahmens

Neben der Systemgrenze ist auch die Detailtiefe der Untersuchung festzulegen: Maschinen und Anlagen sind ihrerseits Systeme mit Teilsystemen und Aggregaten. Vergleichende Messungen der summierten Wirkleistungsaufnahme einzelner Aggregate eines BAZ mit der dort eingespeisten Wirkleistung ergaben eine Diskrepanz, die aus maschineninternen Einspeisungs- und Rückspeisungsvorgängen resultiert (vgl. Abbildung 5.43). Da die eingespeiste Wirkleistung die abrechnungsrelevante Größe ist, wird diese im Zuge der Untersuchungen messtechnisch erfasst und im weiteren Verlauf als elektrische Leistung $P_{\text{Elektrisch}}$ oder Wirkleistung bezeichnet.

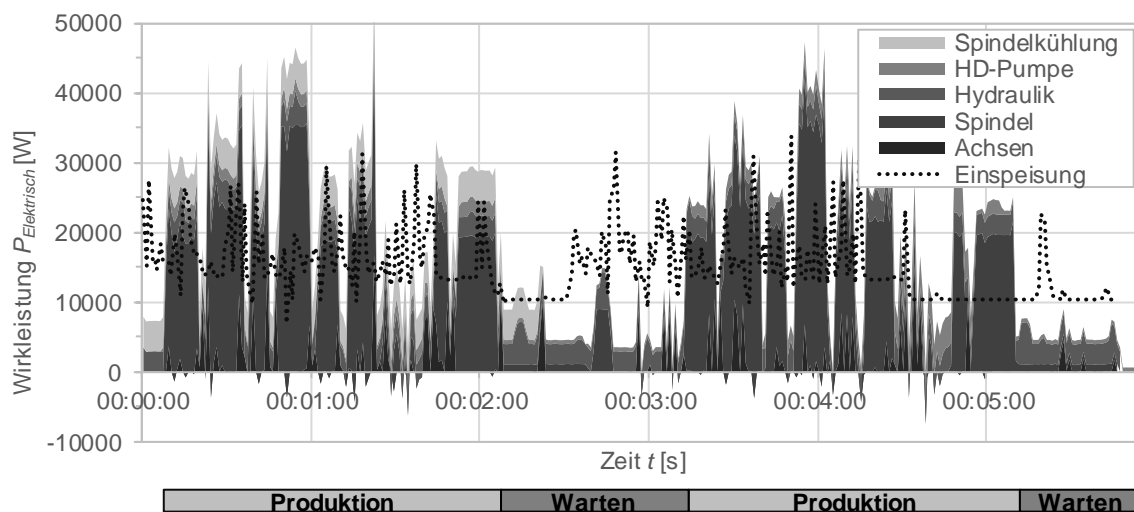


Abbildung 5.43: Vergleich der Wirkleistungsaufnahme einzelner Aggregate eines BAZ mit der eingespeisten Wirkleistung

Um den Messaufwand zu reduzieren, erfolgt die Messung der Medienbedarfe repräsentativ an einer Maschine einer jeden Arbeitsfolge. Anschließend werden die Messwerte je Zustandsklasse gemittelt und auf die anderen Maschinen der AFO übertragen. Prämisse bei der Durchführung der Messungen ist die geringstmögliche Beeinträchtigung des Produktionsbetriebs. Daher wird hauptsächlich auf eingriffsfreie *Clamp-On*-Messgeräte zurückgegriffen. Elektrische Leistung wird mit Messgeräten des Typs C.A 8352 und PEL 103 des Herstellers *Chauvin Arnoux S.A.S.* erfasst. Strom wird hierbei je Leiter über Rogowskispulen gemessen (Messwertabweichung laut Hersteller < 1 Prozent), Magnetspitzen dienen der Spannungswandlung (Messwertabweichung laut Hersteller < 0,5 Prozent, [CHAU12]). Der Druckluftvolumenstrom wird mit dem eingriffsfreien *Clamp-On*-Ultraschall-Durchflussmessgerät Fluxus G601 des Herstellers *Flexim GmbH* gemessen (Messwertabweichung laut Hersteller < 3 Prozent, [FLEX13]). Als Messprinzip fungiert das Laufzeitdifferenzverfahren. Ebenfalls auf diesem Verfahren beruht die Messung des KSS-Volumenstroms mit den Geräten Portaflow X und Portaflow C des Herstellers *Fuji Electric Co., Ltd.* (Messwertabweichung laut Hersteller < 2 Prozent, [FUJI06]; Untersuchung der Messgenauigkeit vgl. Anhang C). Bei Messung von Kühlschmierstoffen ist zu beachten, dass BAZ sowohl Niederdruck- als auch Hochdruckemulsion nutzen, die separat eingespeist werden (vgl. Abbildung 5.44).

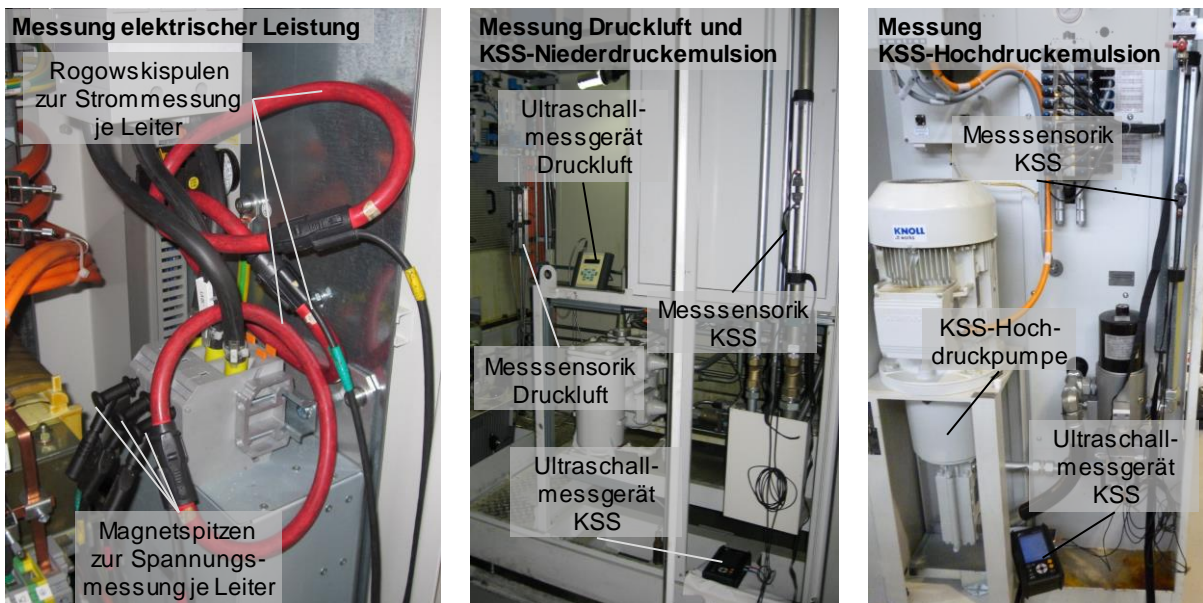


Abbildung 5.44: Messung von elektrischer Energie, Druckluft- und KSS-Volumenströmen im BMW Werk Steyr

Zur Erreichung ausreichender Signalstärken stellen die genannten *Clamp-On*-Messgeräte Anforderungen an die Geradheit (ein fünf- bis zehnfaches des Rohrdurchmessers) und Beschaffenheit (möglichst arm an Schmutz- und Lackschichten) der Messstrecke, die insbesondere bei Druckluft nicht an jeder Maschine gegeben sind. In diesen Fällen erfolgt die Messung des Volumenstroms an den Vorlauf-Hauptleitungen einer Arbeitsfolge.

Bei der zeitparallelen Messung der Medienbedarfe stellte sich die Zusammenfassung in einem Diagramm als Herausforderung heraus: Eine exakte Synchronisation der Zeitstempel auf den Messgeräten ist aufwendig und häufig nur über Umwege praktikabel. Zudem drohen die Geräte im Einsatz beschädigt zu werden, da die wenigsten Maschinen den Platz bieten, sie gefahrlos und abseits des Fahrweges anzubringen, wie im Beispiel aus Abbildung 5.44. Aus diesem Grund wurde ein Energiemesswagen entwickelt, in dem sämtliche Messgeräte fest oder temporär einbaubar sind. Die Messwerterfassung erfolgt mit einer Frequenz von 1 Hz. Details und Bilder zum Messwagen sind in Anhang C zusammengefasst (vgl. Abbildung 10.1).

Zur anschließenden Auswertung der Messergebnisse wurde eigens eine Software auf Basis von *Microsoft Excel* und *Visual Basic for Applications* entwickelt (vgl. Abbildung 5.45). Sie dient primär der korrekten und teilautomatisierten Verarbeitung der Daten der über 120 Messreihen je Fertigungssystem anhand eines festgelegten Prozesses: Zunächst werden die Betriebsdaten der gesamten Arbeitsfolge aus dem PSS und jene der tatsächlich gemessenen Maschine aus der Messsoftware eingelesen. Anschließend werden die Medienbedarfe den PSS-Betriebszuständen zugewiesen, den bereits erwähnten Zustandsklassen Produktion, Warten und Transport zugeordnet und über den jeweiligen Zeitraum gemittelt. Da die untersuchten FFS verschiedene Werkstückvarianten fertigen, erfolgt die Mittelwertbildung je Variante für die untersuchte Maschine. Anhand einer Auswertung der Betriebsdaten der AFO über eine mehrmonatige Periode wird die mittlere zeitliche Auftretenshäufigkeit der Zustandsklassen berechnet und mit den jeweiligen durchschnittlichen Medienbedarfen verknüpft. Auf Basis dieser Werte wird der durchschnittliche Medienbedarf jeder Maschine der AFO für diesen Zeitraum berechnet.

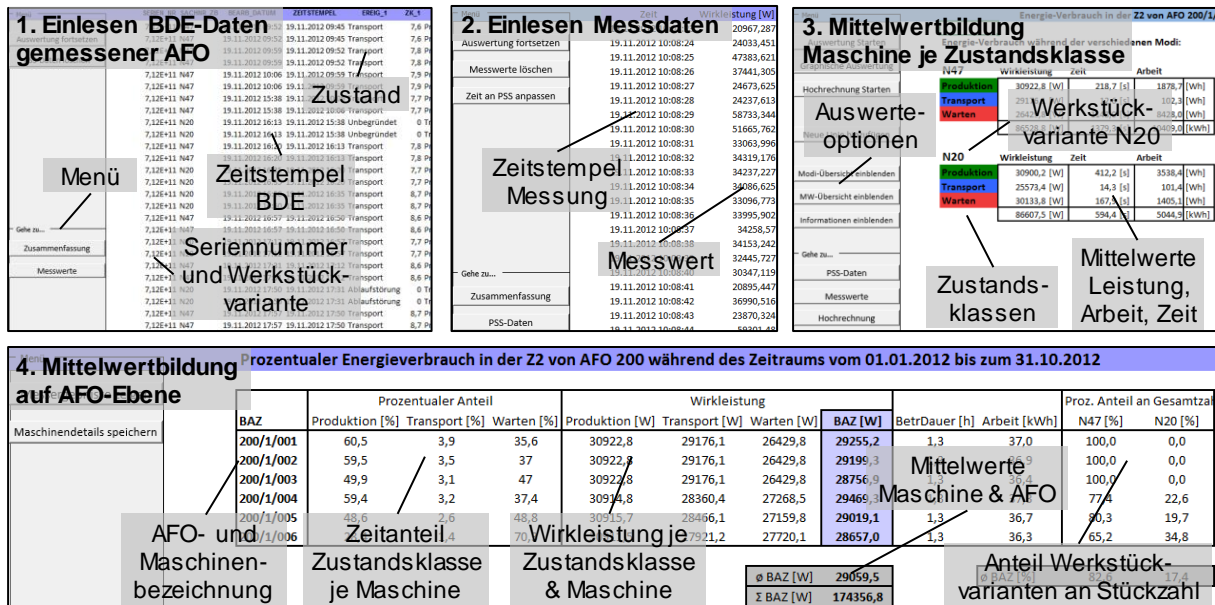


Abbildung 5.45: Entwickelte Messauswertungssoftware und Vorgehensweise bei Auswertung am Beispiel der elektrischen Energie

Zur Ermittlung des gesamten Leistungsbedarfs des FFS werden abschließend sämtliche Medienverbräuche in elektrische Leistung umgerechnet. Dies erfolgt anhand eines fertigungssystem- und medienpezifischen Faktors, der aus dem Quotienten der durchschnittlichen Leistungsaufnahme der Medienversorgung und des mittleren Gesamtvolumenstrom des Mediums in allen Verbrauchern des FFS bestimmt wird:

$$c_{KSS} = \frac{P_{KSS,Gesamt}}{Q_{KSS,Gesamt}} [kWh/m^3], \quad 5.3$$

$$c_{DL} = \frac{P_{DL,Gesamt}}{Q_{KSS,Gesamt}} [kWh/m_n^3]. \quad 5.4$$

5.2.2.3 Ergebnisse der Analyse

Im Rahmen der Analyse wurden das flexible Kurbelgehäusefertigungssystem G2 und das flexible Zylinderkopffertigungssystem Z2 im Werk Steyr detailliert untersucht. Ergänzende Messungen fanden an einzelnen Maschinen des Zylinderkopffertigungssystems Z5 im Werk München statt. Aufgrund der Vielzahl der Messergebnisse werden im Folgenden lediglich die relevantesten Daten hervorgehoben und anschließend eine Übersicht über die Leistungs- und Medienbedarfe der beiden FFS G2 und Z2 präsentiert.

Als einzige Systemelemente erfordern die Maschinen und Anlagen zur spanenden Fertigung während des Prozesses einen Einsatz sämtlicher betrachteten Medien: elektrische Leistung, Kühlschmierstoffe in beiden Qualitätsstufen (vgl. Kapitel 5.2.1.2) und Druckluft. In Abbildung 5.46 ist der Leistungs- und Medienbedarf eines Doppelspindel-BAZ im Betrieb dargestellt. Während der KSS-Volumenstrom hauptsächlich während der Produktionsphase erhöht ist, liegt der Grundlastanteil bei elektrischer Leistung und Druckluft deutlich über 50 Prozent. Warmhalteprozesse in Folge von Wartezeiten ab einer Dauer von ca. 15 min (nicht dargestellt) erhöhen den KSS-Bedarf allerdings auch in den Nebenzeiten. Der Anstieg des ND-KSS-Volumenstroms vor Produktionsbeginn ist auf das Spülen der Werkstückauflage vor dem Spannen der neuen Werkstücke zurückzuführen.

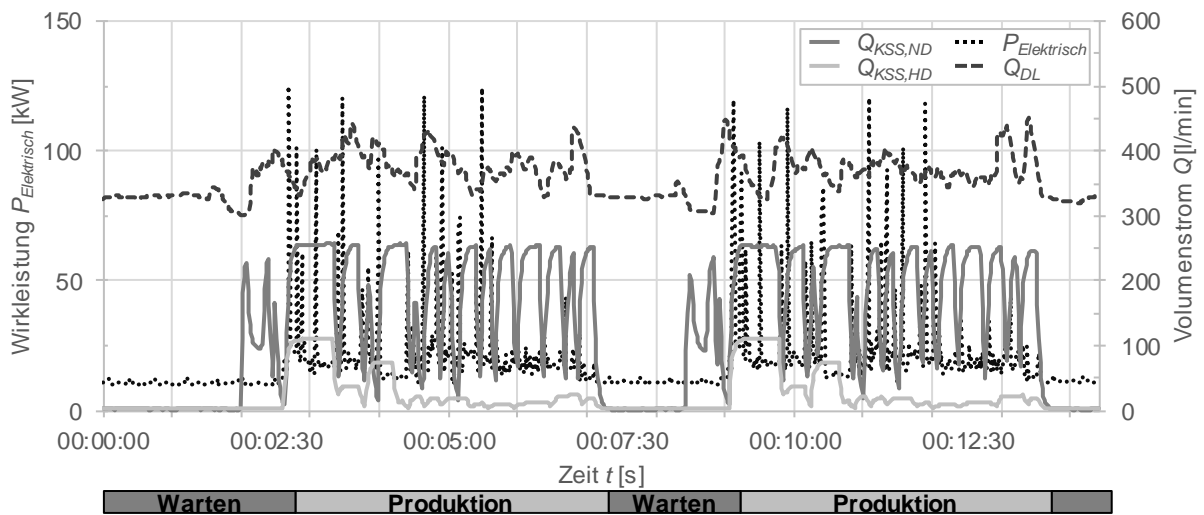


Abbildung 5.46: Leistungs- und Medienbedarf eines Doppelspindel-BAZ des Typs MAG Specht Duo L in der AFO 130 des FFS für Kurbelgehäuse G2 im BMW Werk Steyr

Im gezeigten Beispiel ist der Einsatz eines Frequenzumrichters (vgl. Kapitel 3.2.4) am niedrigen Hochdruck-KSS-Volumenstrom in der Wartezeit erkennbar. Untersuchungen im Zylinderkopffertigungssystem Z5 zeigen, dass der Durchfluss von HD-KSS ohne Frequenzumrichter in Warte- und Transportzeiten steigt, während er beim Werkzeugeingriff sinkt. Hintergrund dieses Effekts ist der konstante Betriebspunkt des eingesetzten Pumpenmotors: Bei Werkzeugeinsatz wird die Hochdruckemulsion durch das Werkzeug geleitet, dessen Kühlkanäle in der Regel deutlich geringere Durchmesser haben als das Bypassventil. Durch letzteres wird – auch in eingriffsfreien und Wartezeiten – im drucklosen Umlauf die nicht benötigte Menge abgeführt, was höhere Volumenströme verursacht (vgl. Abbildung 5.47). [GREB11]

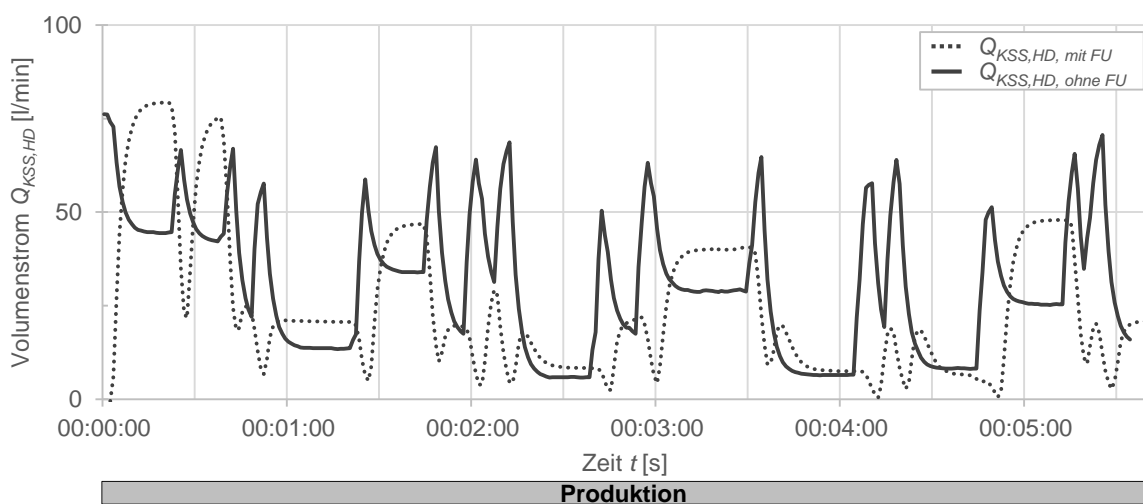


Abbildung 5.47: Volumenstrom des Hochdruck-KSS ohne und mit Einsatz von Frequenzumrichter in einem Einspindel-BAZ des Typs Ex-Cell-O XHC 241 des Zylinderkopffertigungssystems Z5 im BMW Werk München, nach [GREB11]

Mit der reduzierten Fördermenge geht eine verringerte Leistungsaufnahme einher. Sie ist abhängig von der Anzahl der zu versorgenden Spindeln im BAZ, den eingesetzten Werkzeugen und dem Anteil der Zustandsklasse Produktion an der Betriebsdauer des

BAZ. In den untersuchten Fertigungssystemen ergeben sich die in Abbildung 5.48 genannten durchschnittlichen Einsparungen von 43 Prozent bei Einspindlern und 49 Prozent bei Doppelspindlern. Aus diesem Grund gehören Frequenzumrichter zur Grundausstattung neu angeschaffter BAZ der BMW Group und sind Bestandteil sämtlicher BAZ in den untersuchten FFS.

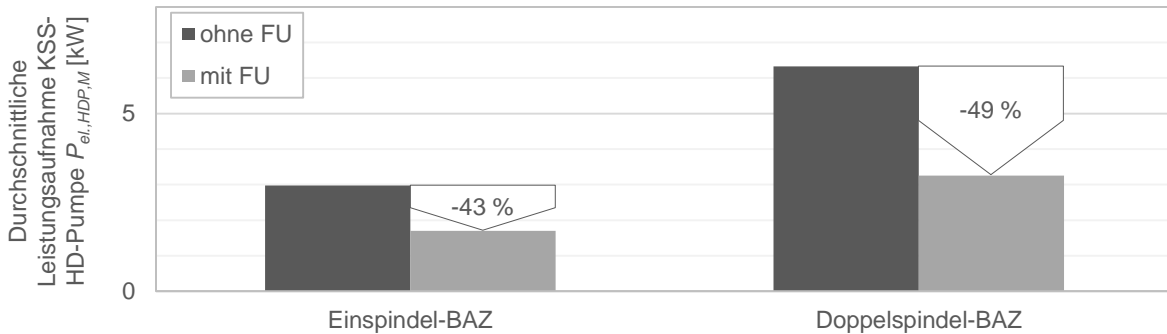


Abbildung 5.48: Einfluss von Frequenzumrichtern auf die Leistungsaufnahme der KSS-HD-Pumpen von Ein- und Doppelspindel-BAZ

Analysen im Rahmen der vorliegenden Arbeit und der in deren Verlauf betreuten Abschlussarbeit von Xie zeigen, dass der hohe Grundlastanteil (im gezeigten Beispiel ca. 88 Prozent, werksübergreifend ca. 90 Prozent) beim Druckluft Einsatz in Bearbeitungszentren durch Sperrluft hervorgerufen wird. Sie ist der einzige Verbraucher in Wartezeiten und dient der Abdichtung von Spindeln und Achsen. Aus der in Abbildung 5.49 dargestellten pneumatischen Wartungseinheit eines untersuchten BAZ im Zylinderkopffertigungssystem Z5 im BMW Werk München geht hervor, dass der Eingangsdruck bei 6,3 bar liegt, der benötigte Druck innerhalb der Maschine jedoch max. 3,5 bar beträgt. Das Medium wird folglich um ca. 44 Prozent entspannt. Sperrluft als Hauptverbraucher erfordert noch geringere Drücke zwischen 1 und 3 bar. Da das bestehende Druckluftnetz auf Verbraucher im Bereich von 5 bis 6 bar ausgelegt ist, ist ein Senken des Eingangsdrucks nur mit separatem Netz oder bedarfsgerecht verteilten Druckerhöhungsstationen möglich. Dieses Optimierungspotenzial ist bis dato noch nicht ausgeschöpft. [XIE12]

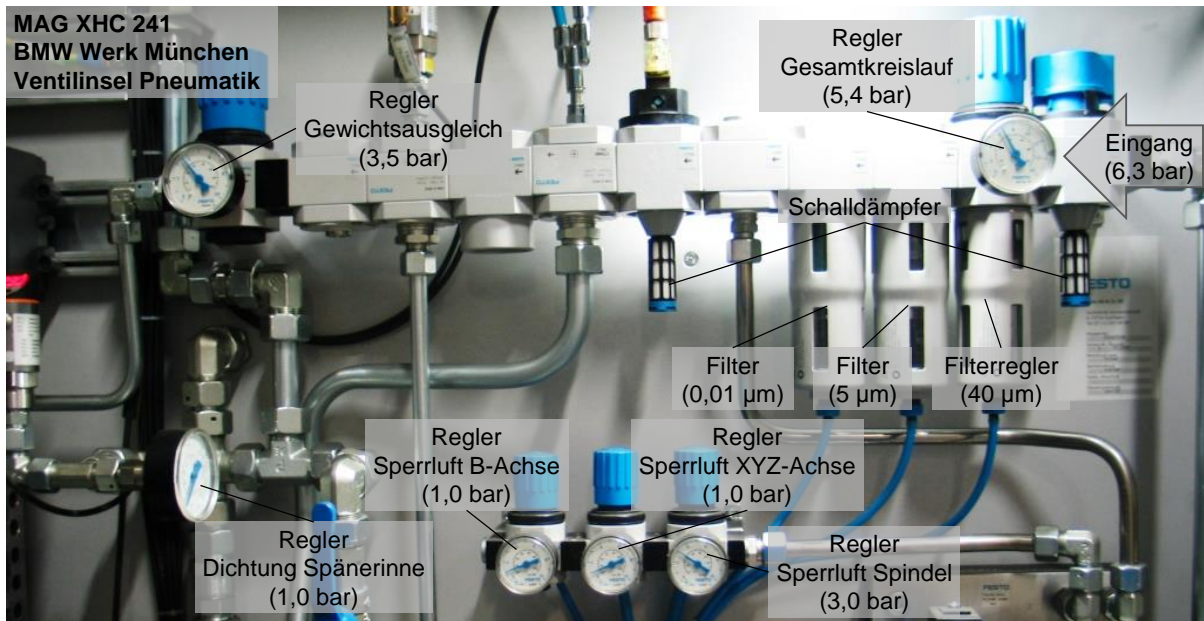


Abbildung 5.49: Pneumatische Wartungseinheit eines untersuchten BAZ des Typs Ex-Cell-O XHC 241 des Zylinderkopffertigungssystems Z5 im BMW Werk München: Eingangs- und tatsächlich benötigter pneumatischer Druck in Anlehnung an [XIE12]

Einen Grundlastanteil unter 50 Prozent zeigt der elektrische Leistungsbedarf von Reinigungszellen des Typs Dürr Ecoclean auf (vgl. Abbildung 5.50). Als größte Verbraucher stellen sich die Hochdruckpumpen heraus. Diese heizen das Reinigungsmittelbad zusätzlich auf, so dass das Medium erst bei Wartezeiten ab mehreren Stunden zusätzlich aufgeheizt werden muss, um die geforderte Reinigungsmitteltemperatur zu erreichen.

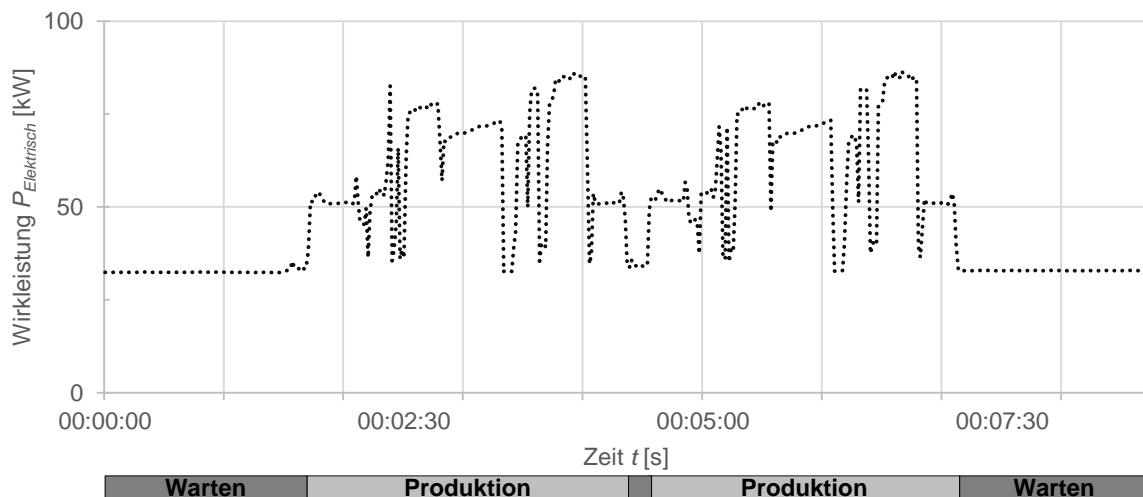


Abbildung 5.50: Leistungsbedarf einer untersuchten Reinigungszelle des Typs Dürr Ecoclean des FFS für Kurbelgehäuse G2 im BMW Werk Steyr

Die ermittelten Leistungs- und KSS-Bedarfe des FFS G2 und der Nebenbetriebe Druckluft- und KSS-Versorgung sind im Anhang C zusammengefasst (vgl. Tabelle 10.6). Da die Druckluftmessung aufgrund der Restriktionen des Messgeräts nicht flächendeckend durchführbar war, ist eine Aufschlüsselung in die Zustandsklassen nicht möglich.

Aus den aufgenommenen KSS- sowie den je Arbeitsfolge bestimmten Druckluftverbräuchen lassen sich gemäß den Formeln 5.3 und 5.4 folgende Umrechnungsfaktoren für die FFS G2 (Kurbelgehäuse) und Z2 (Zylinderkopf) berechnen:

$$c_{KSS,G2} = \frac{131,0 \text{ kW}}{405,6 \text{ m}^3/\text{h}} = 0,32 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}, \quad c_{KSS,Z2} = \frac{125,7 \text{ kW}}{187,5 \text{ m}^3/\text{h}} = 0,67 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}, \tag{5.5}$$

$$c_{DL,G2} = \frac{49,7 \text{ kW}}{1753 \text{ m}_n^3/\text{h}} = 0,028 \frac{\text{kWh}}{\text{m}_n^3}, \quad c_{DL,Z2} = \frac{39,8 \text{ kW}}{1336 \text{ m}_n^3/\text{h}} = 0,030 \frac{\text{kWh}}{\text{m}_n^3}. \tag{5.6}$$

Während sich das Verhältnis von Leistungsaufnahme zu Volumenstrom bei der Druckluftversorgung beider Fertigungssysteme ähnelt, beträgt der Koeffizient für die KSS-Versorgung der Z2 das doppelte des G2-Werts. Dieser Unterschied resultiert aus unterschiedlichen Voraussetzungen in der KSS-Versorgung, wie etwa dem Einsatz von Frequenzumrichtern, sowie am geringeren Bedarf an Hochdruck-KSS im FFS G2: 17 Prozent des KSS-Bedarfs entfallen auf Honanlagen, die lediglich mit Niederdruck-KSS versorgt werden.

Beim Vergleich der gesamten Leistungsaufnahme beider FFS nach Systemelementklassen (vgl. Abbildung 5.51) ergibt sich ein weitgehend übereinstimmendes Bild.

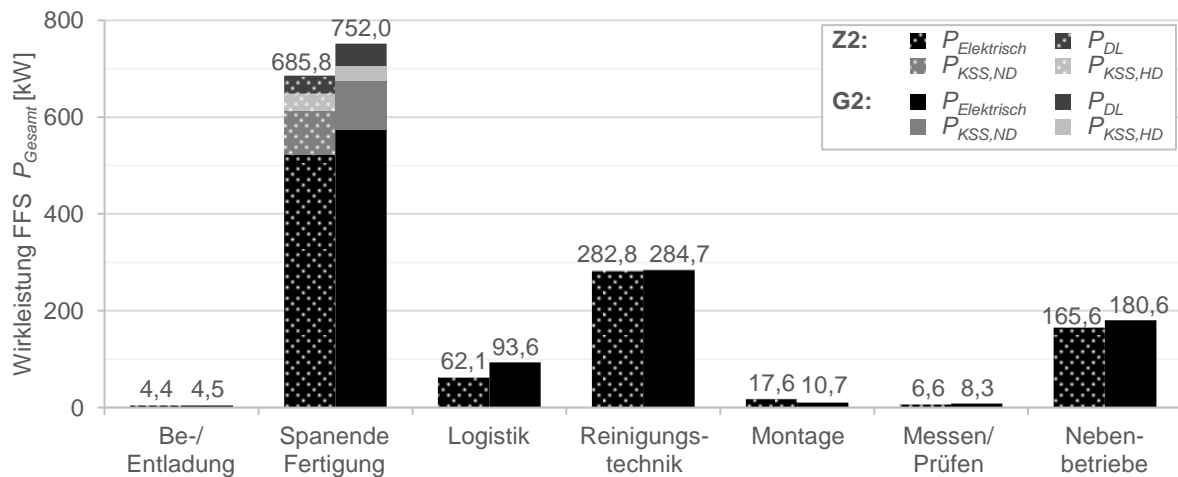
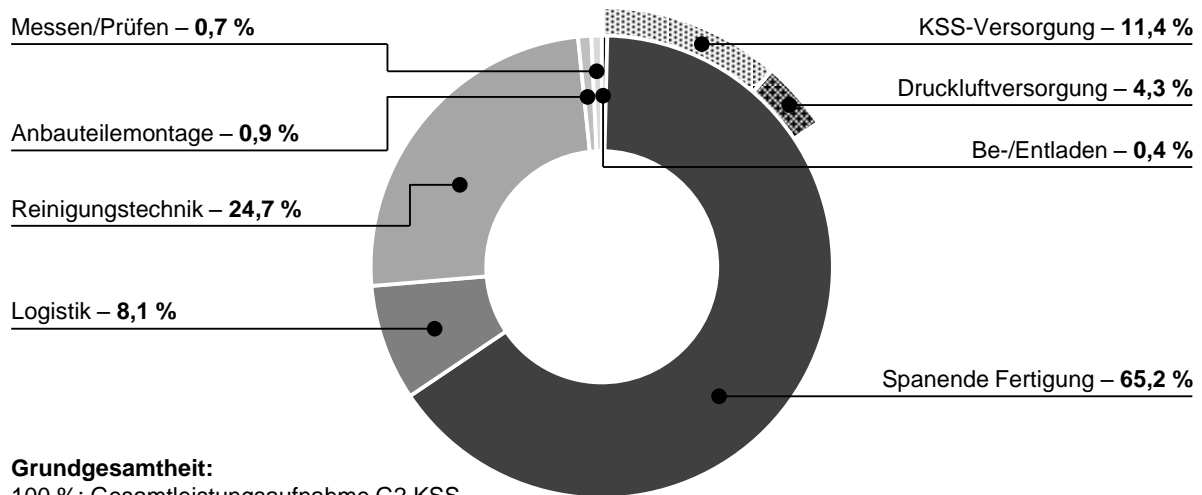


Abbildung 5.51: Leistungs- und Medienbedarfe der FFS für Zylinderköpfe (Z2) und Kurbelgehäuse (G2) im BMW Werk Steyr nach Systemelementklassen

Wesentliche Unterschiede sind im Bereich von spanender Fertigung, Montage und Logistik erkennbar. Der bei spanender Fertigung um ca. 9 Prozent geringere Leistungsbedarf des Z2-Systems resultiert aus dem geringeren Umfang spanender Bearbeitung in diesem – ein größerer Fokus liegt dort auf der Montage von Anbauteilen, deren Leistungsbedarf ca. 64 Prozent über dem des G2-Systems liegt. Die Unterschiede in der Leistungsaufnahme der Logistik sind durch die um ca. 50 Prozent höhere Masse

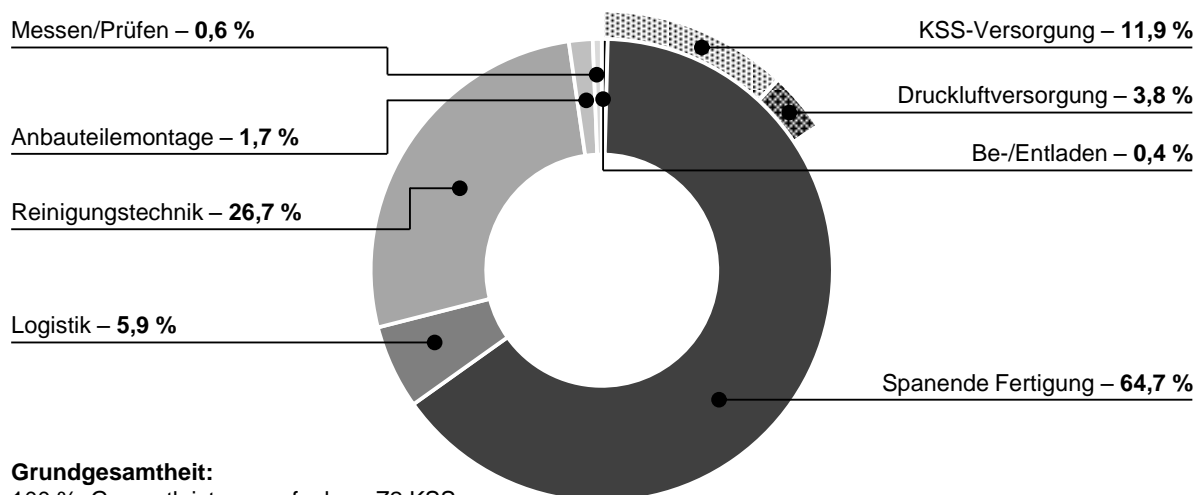
der Kurbelgehäuse erklärbar. Vakuumtrocknungsstationen im Logistiksystem zur Abkühlung der Teile nach Reinigungsprozessen weisen zudem eine erhöhte Leistungsaufnahme aufgrund der höheren abzuführenden Wärmemenge auf.

Die folgenden Grafiken geben Aufschluss über die Verteilung des Leistungsbedarfs in den betrachteten FFS und belegen die soeben beschriebenen Unterschiede (vgl. Abbildung 5.52 und Abbildung 5.53). Der Einfluss von spanender Fertigung und Reinigungstechnik auf den Energiebedarf ist mit insgesamt ca. 90 Prozent maßgeblich.



Grundgesamtheit:
100 %: Gesamtleistungsaufnahme G2 KSS
(ohne Nebenbetriebe)

Abbildung 5.52: Gesamtleistungsaufnahme FFS für Zylinderköpfe Z2 im BMW Werk Steyr nach Systemelementklassen; Gesamtleistungsaufnahme der Nebenbetriebe separat ausgewiesen



Grundgesamtheit:
100 %: Gesamtleistungsaufnahme Z2 KSS
(ohne Nebenbetriebe)

Abbildung 5.53: Gesamtleistungsaufnahme des FFS für Kurbelgehäuse G2 im BMW Werk Steyr nach Systemelementklassen; Gesamtleistungsaufnahme der Nebenbetriebe separat ausgewiesen

Eine Betrachtung der Leistungs- und Medienbedarfe auf Maschinenebene im FFS G2 hebt den Einfluss dieser beiden Systemelementklassen hervor (vgl. Abbildung 5.54). Während der höchste Energiebedarf von Einzelmaschinen im Bereich der Reinigungs-

systeme liegt, wird der dominierende Einfluss der BAZ auf den Druckluft- und HD-KSS-Bedarf deutlich. Innerhalb der spanenden Fertigung lassen sich Unterschiede zwischen Ein- (erste beiden AFO-Stränge rechts neben der Rohteilbeladung) und Doppelspindel-BAZ (übrige BAZ-Stränge) sowie zwischen einzelnen Maschinen einer AFO (erkennbar bei $P_{Elektrisch}$ und $Q_{KSS,HD}$) feststellen. Letzteres folgt aus der inhomogenen Auslastungssituation innerhalb einer AFO, die in der der Beladungslogik des ZLS begründet ist: Zur Vermeidung von Taktzeitverlusten wird stets das nächstgelegene freie BAZ beladen. Die eingangs erwähnten Honanlagen sind zudem die größten Einzelverbraucher von ND-KSS (vgl. Abbildung 5.52, Ausschnitt unten links).

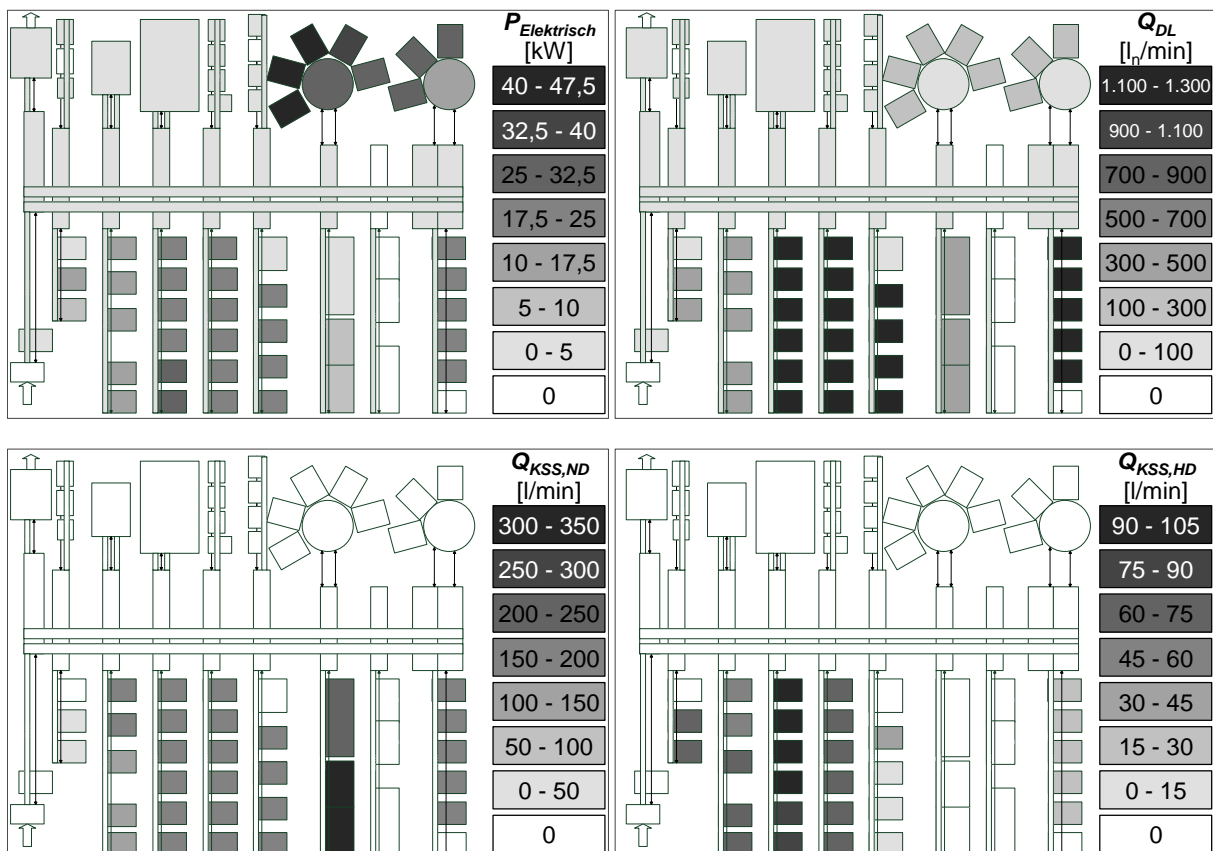


Abbildung 5.54: Darstellung der Leistungs- und Medienbedarfe einzelner Maschinen des flexiblen Kurbelgehäusefertigungssystems G2 im BMW Werk Steyr

Eine zusammenfassende Darstellung des Gesamtleistungsbedarfs des FFS G2 bietet Abbildung 5.55. Auch hier werden die beschriebene Inhomogenität der Leistungsaufnahme innerhalb einer AFO und die Dominanz von spanender Bearbeitung und Reinigungstechnik ersichtlich. Vollständig weiß gehaltene Blöcke im Layout sind Flächenvorhalt oder rein manuelle Stationen ohne Energieversorgung.

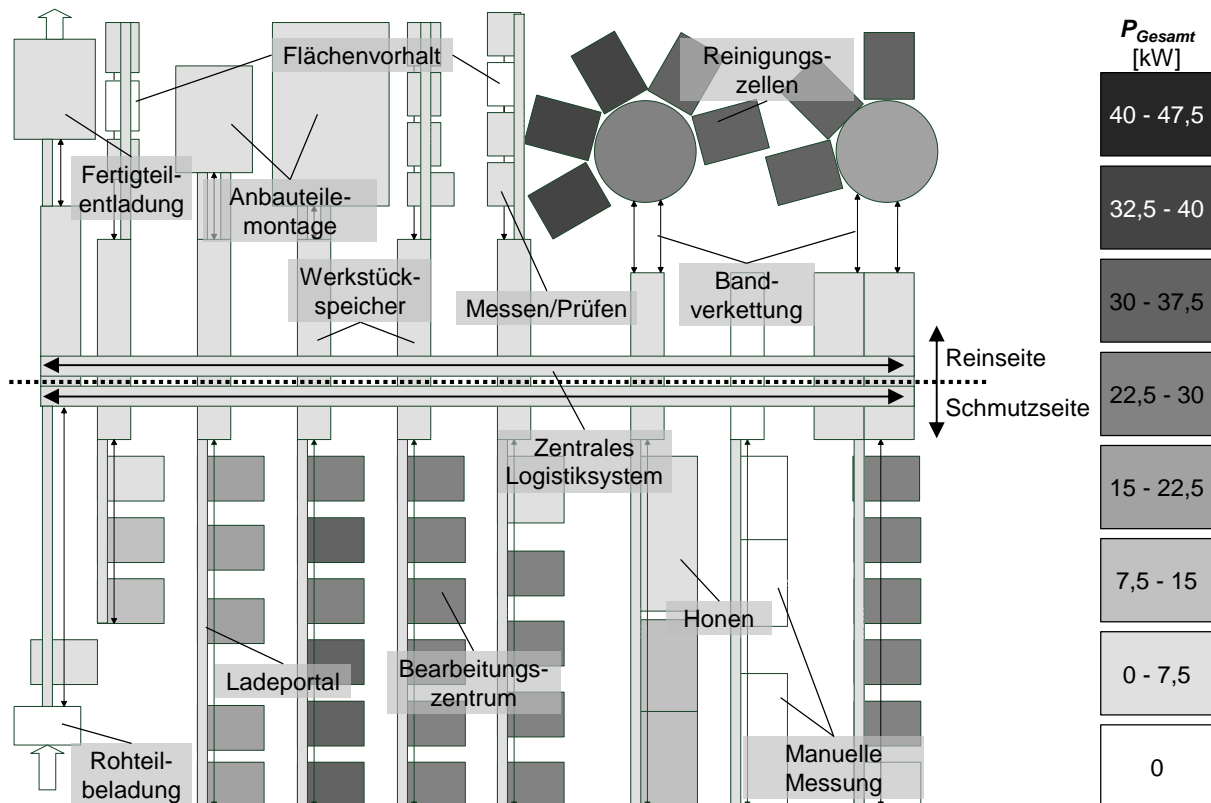


Abbildung 5.55: Darstellung des medienübergreifenden Leistungsbedarfs einzelner Maschinen des flexiblen Kurbelgehäusefertigungssystems G2 im BMW Werk Steyr

5.2.3 Lebenszykluskosten

Wie eingangs erläutert, ist die Betrachtung der Kostenseite aus Gründen der Geheimhaltung nur eingeschränkt möglich. Im Folgenden werden daher die grundlegende Produktaufbruchstruktur und Kostenelemente nach DIN EN 60300 [DIN04] erläutert. Die Detailanalyse wird auf die Betriebskosten beschränkt. Betriebsinterne Materialkosten wie beispielsweise für Rohteile oder Transportbehälter bleiben hierbei unberücksichtigt.

5.2.3.1 Kostenarten und Produktaufbruchstruktur

Nach [VDI05, DIN04] ergeben sich innerhalb des in Kapitel 2.2 festgelegten Betrachtungsrahmens Beschaffungskosten und Betriebskosten. Entsorgungskosten für Maschinen und Anlagen, die nach der Nutzungsphase in Form von Außerbetriebnahme- und Verwertungskosten entstehen, werden durch den Einsatz von MMS-Technologie nicht beeinflusst und sind daher nicht Bestandteil der vorliegenden Arbeit. Entsorgungskosten für Betriebsmittel, Betriebs- und Hilfsstoffe im Rahmen der Betriebsphase, die im direkten Zusammenhang mit Kühlschmierstoffen stehen, werden nach dem Verursacherprinzip innerhalb der jeweiligen Kostenart erfasst.

Kosten, die vor der Nutzungsphase im Zuge der Beschaffung anfallen, werden gesamthaft als Investitionskosten verrechnet. Unter die Betriebskosten fallen solche für Anschaffung und gegebenenfalls Entsorgung von Betriebs- und Hilfsstoffen, Be-

triebsmittel sowie für Instandhaltung und Bedienungspersonal. Einen Überblick gibt Abbildung 5.56.

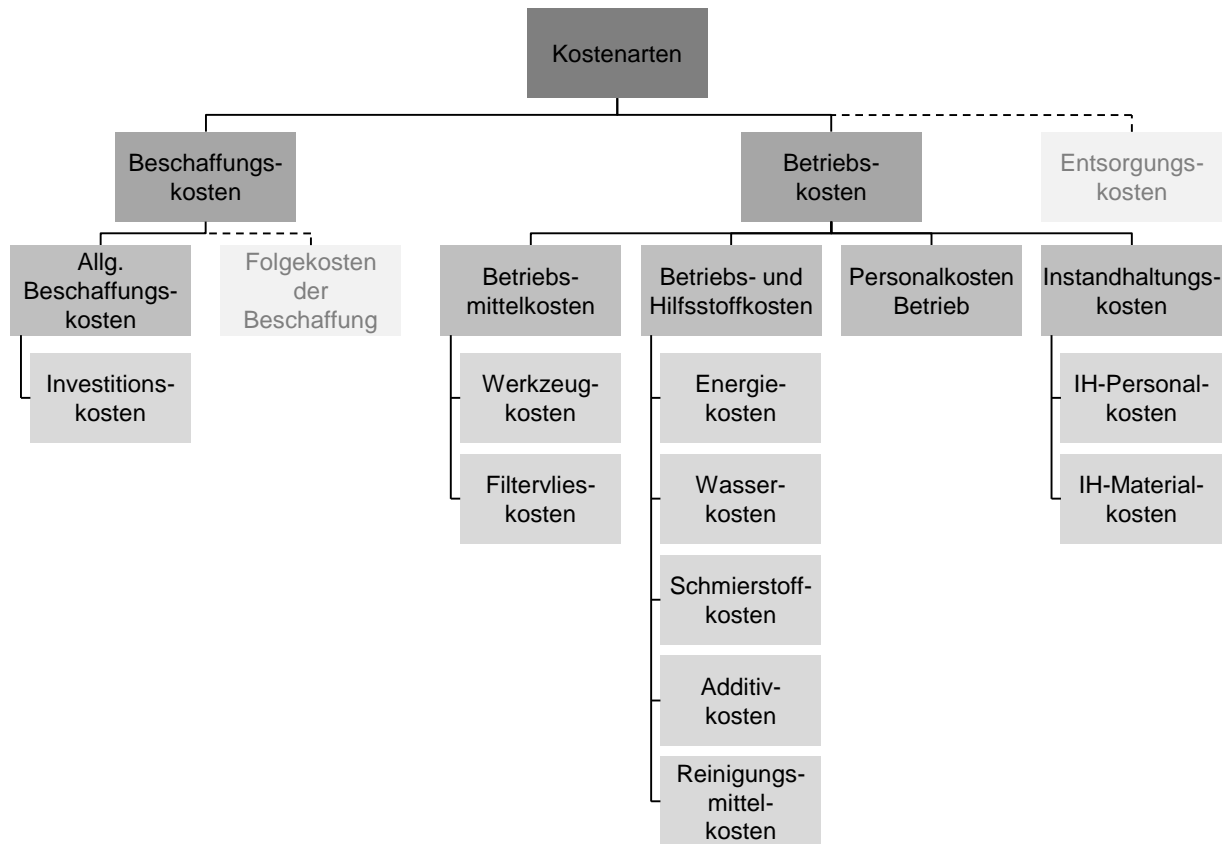


Abbildung 5.56: Betrachtete Kostenarten der untersuchten flexiblen Fertigungssysteme

Die Produktaufbruchstruktur nach [VDI05, DIN04] ergibt sich aus den Systemelementklassen des betrachteten BMW Group Referenzsystems der mechanischen Fertigung und den ihnen zugeordneten Maschinen- und Anlagenarten. Neben den bereits in Kapitel 5.2.1 beschriebenen Bestandteilen werden auch die Nebenfunktionen Einrichtungs- und Steuerungstechnik betrachtet (vgl. Abbildung 5.57). Die Einrichtungstechnik umfasst Baumaßnahmen innerhalb des Fertigungssystems, etwa die Errichtung von Medientrassen, Arbeitsbühnen oder Absaugungsanlagen. Bestandteile der Steuerungstechnik sind die Vernetzung der Maschinen, Anbindung des Produktionssteuersystems und Verschaltung visueller Echtzeit-Kontrolleinrichtungen.

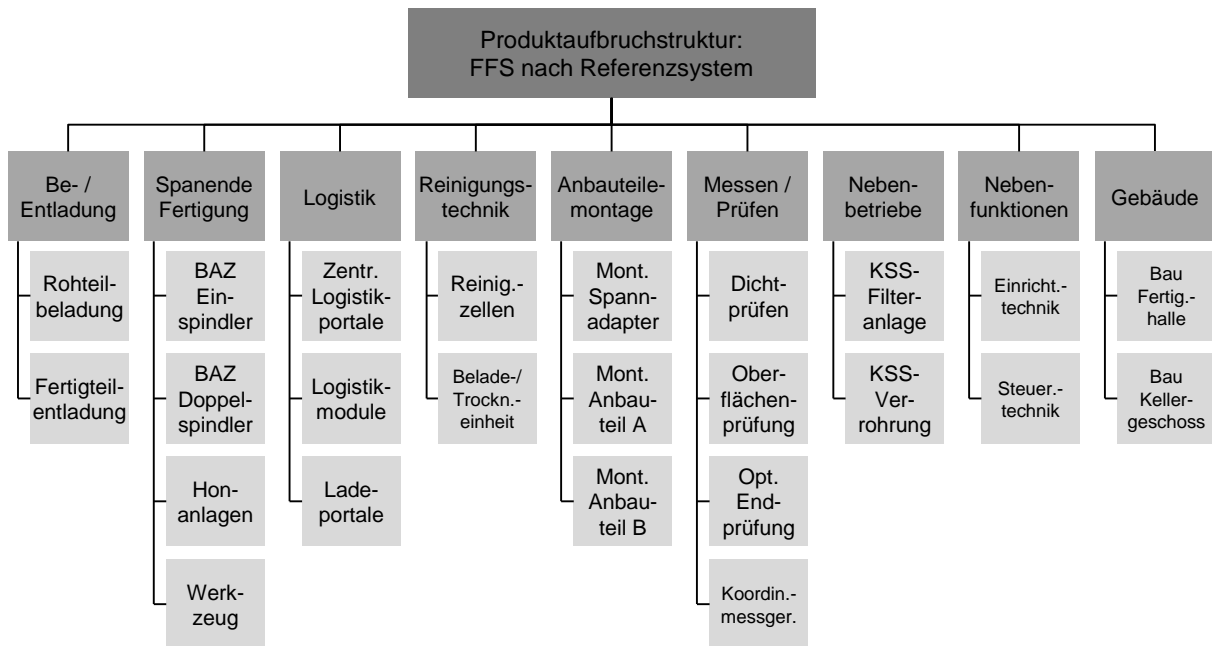


Abbildung 5.57: Produktaufbruchstruktur der betrachteten flexiblen Fertigungssysteme

5.2.3.2 Betriebskosten

Das Ergebnis einer Betriebskostenanalyse der betrachteten FFS im BMW Werk Steyr ist in Abbildung 5.58 dargestellt. Mit ca. 58 Prozent sind die Personalkosten der mit Abstand größte Posten: Sie setzen sich aus den Löhnen des im Schichtsystem am Betrieb des Fertigungssystems beteiligten Bedienungspersonals zusammen. Kosten für Instandhaltung des FFS schlagen mit ca. 11 Prozent zu Buche – sie beinhalten Aufwendungen für Material zu Reparatur- und Wartungszwecken sowie die separat zum Bedienungspersonal geführten Löhne der IH-Mitarbeiter. Die Berechnung der Energiekostenanteile (ca. 10 Prozent) basiert auf dem Strompreis für Industrieverbraucher im ersten Halbjahr 2015 ohne Steuern und Abgaben in Höhe von 0,0809 €/kWh [EURO15]. Werkzeugkosten umfassen die Ausgaben zur Wiederaufbereitung von Werkzeugen sowie zur Beschaffung von Ersatz bei Bruch oder Verschleiß dieser. Einmalaufwände zur Erstausrüstung mit Werkzeugen bei Neuaufbau des Fertigungssystems oder der Einführung neuer Werkstücktypen sind kein Bestandteil der Betriebskosten. Jegliche Aufwendungen in Verbindung mit der KSS-Versorgung, etwa anteilige Energie-, Personal- oder Instandhaltungskosten sind in der Position KSS-Versorgung berücksichtigt. Diese sind mit 6,3 Prozent vergleichsweise gering. Noch geringer sind die Betriebskosten für Reinigungsmittel: Sie sind der Position sonstige Betriebsmittel, Hilfs- und Betriebsstoffe zugerechnet und betragen lediglich 0,4 Prozent.

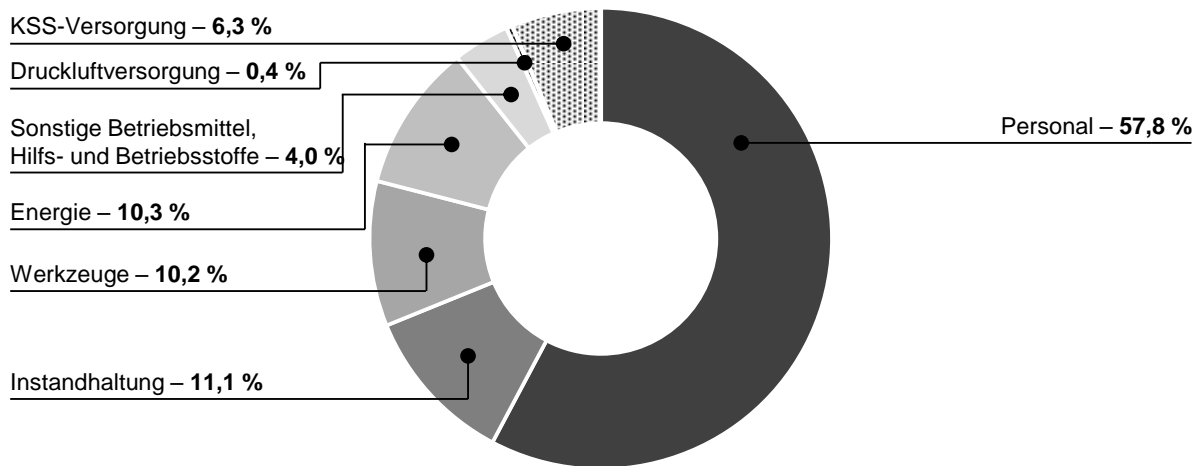


Abbildung 5.58: Durchschnittliche Betriebskosten der betrachteten FFS; Aufwände für KSS-Versorgung inkl. zugehörigem Anteil an Energie- und weiteren Kosten

Betriebs- und Hilfsstoffe sind bei KSS-Einsatz aufgrund von Verdunstung und Verschleppung (vgl. Kapitel 3.2.4, detaillierte Analyse in [GREB11]) regelmäßig nachzusetzen. Eine Aufschlüsselung der Kostenposition KSS-Versorgung zeigt Abbildung 5.59.

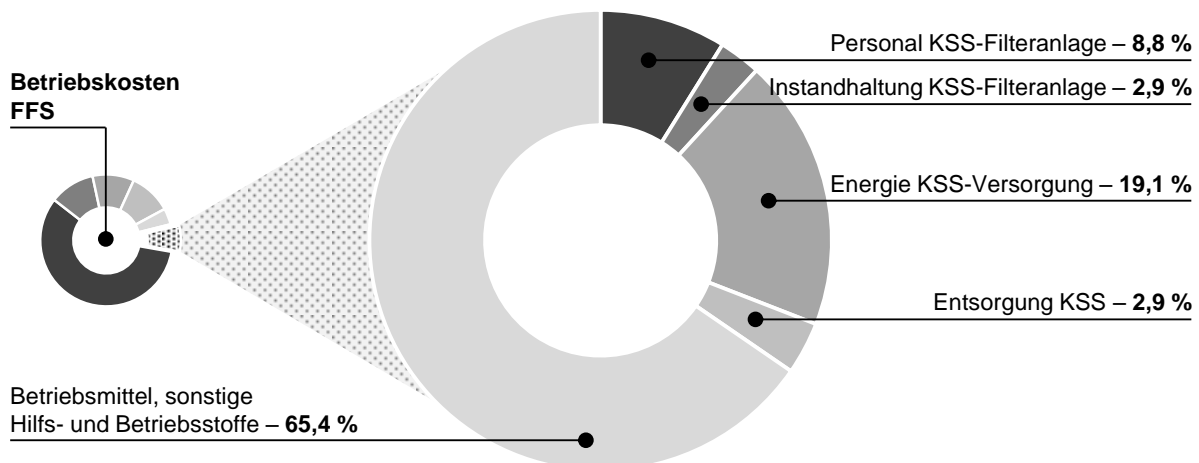


Abbildung 5.59: Durchschnittliche Betriebskosten der betrachteten FFS für KSS-Versorgung

Mit ca. 65 Prozent machen Aufwendungen für Betriebsmittel und sonstige Betriebs- und Hilfsstoffe (ohne Energie) den größten Anteil aus. Sie beinhalten die Kosten für Schmierstoffe, Wasser, Additive und Filtervlies. Aufgrund ihrer relativen Höhe sind die Energiekosten (ca. 19 Prozent) gesondert aufgeführt.

Einmalaufwendungen in Verbindung mit Betriebsmitteln, Betriebs- und Hilfsstoffen werden im Rahmen von Kapitel 7.1 exemplarisch anhand fiktiver, realitätsnaher Beispieldaten näher erläutert.

5.3 Integrationsmöglichkeiten der Minimalmengenschmierung in flexible Fertigungssysteme für Aluminiumbauteile und Bewertung der Auswirkungen

Zur Integration der Minimalmengenschmierung in Fertigungssysteme bieten sich verschiedene technische Lösungsansätze an (vgl. Kapitel 3.2). Im Rahmen der durchgeführten Versuchsreihen wurden sowohl mit 1-Kanal- (Kurbelgehäuse B48) als auch mit 2-Kanal-Systemen (Zylinderkopf N20) jeweils mit Innenkühlung serientaugliche Ergebnisse erzielt (vgl. Kapitel 5.1.3). Daher werden im Folgenden Möglichkeiten zur Integration der MMS in FFS auf Basis der erprobten Lösungsansätze vorgestellt. Die konkrete Betrachtung erfolgt in Anlehnung an die im vorangegangenen Kapitel betrachteten FFS G2 und Z2 der BMW Group im Werk Steyr.

Erste Ansätze wurden erstmals in der vom Autor betreuten Abschlussarbeit von Várady anhand von Experteninterviews zusammengetragen und veröffentlicht [VÁRA13]. Im weiteren Verlauf wurden entsprechend umzusetzende technische und organisatorische Maßnahmen in Zusammenarbeit mit der Planungsabteilung der BMW Group für mechanische Fertigung und Prozesstechnik sowie Lieferanten ermittelt und in einem Pilotsystem im Werk Steyr realisiert. Zu den befragten und involvierten Unternehmen zählen die Werkzeugmaschinenhersteller Grob und MAG sowie die an der im Kapitel 5.1 vorgestellten Analyse beteiligten Werkzeug-, MMS-System- und Schmierstoff- bzw. Reinigungsmittelhersteller.

Eine Berücksichtigung der Kostenseite hinsichtlich Einmalaufwänden und Betriebskosten ist aus Gründen der Geheimhaltung nicht möglich. Eine diesbezügliche Bewertung wird in Kapitel 7.1 anhand fiktiver, realitätsnaher Daten durchgeführt.

5.3.1 Erforderliche Anpassungen an FFS-Struktur und Systemelementen

Neben den Änderungen an der FFS-Struktur sowie dem Gebäude sind auch einzelne Systemelemente anzupassen, um einen Einsatz von Minimalmengenschmierungstechnologie zu ermöglichen. Zu treffende Maßnahmen werden im Folgenden erläutert.

5.3.1.1 Be- und Entladung sowie Logistik

Von der Einführung von MMS-Technologie sind die Systeme zur Be- und Entladung sowie das Logistiksystem nicht direkt betroffen, da sich weder die Transportwege noch das Werkstück an sich ändern. Ein Nebeneffekt des MMS-Einsatzes ist die Verringerung der Verschmutzung der Werkstückspeicher, Ladertrassen und Verkettungsbänder mit Öl und Emulsion. Dies resultiert aus den geringeren Schmierstoffmengen bei MMS. Ein Verzicht auf Ölwannen in den Portalen und Anlagen ist aufgrund der möglichen Verschleppung von Spänen (vgl. Kapitel 5.1.3.4.1) nicht empfehlenswert.

5.3.1.2 Spanende Fertigung

Mit Entfall der KSS-Versorgung von BAZ wird je Maschine ein dezentrales MMS-System benötigt, das je nach Fabrikat innerhalb oder in unmittelbarer Nähe dieser installiert wird. Neben den im Zuge der Vorversuche erprobten Geräten der Hersteller bielomatik und Rother sind verschiedene Wettbewerbsprodukte am Markt verfügbar, wobei bielomatik derzeit der einzige Anbieter von 2-Kanalsystemen ist (vgl. Kapitel 3.2.3). Wegen des erfolgreichen Einsatzes bei den Technologieversuchen an den Bauteilen ZK N20 und KG B48 werden im weiteren Verlauf die 1- und 2-kanaligen Lösungen der genannten Hersteller berücksichtigt.

Systembedingt sind beim Einsatz von 1-Kanal-MMS die zu versorgenden Motorspindeln der Werkzeugmaschine trockenlauffähig auszuführen, also ohne Schmierung. Die Integration eines 2-Kanal-Systems stellt sich aufwändiger dar: Jede zu versorgende Motorspindel ist mit einer speziellen Lanze auszuführen, durch die der MMS-Schmierstoff (innen) und die Druckluft (außen) transportiert werden, bevor sie im Werkzeughalter zum Aerosol vermischt werden (vgl. Abbildung 5.60). (vgl. Kapitel 3.2.3)

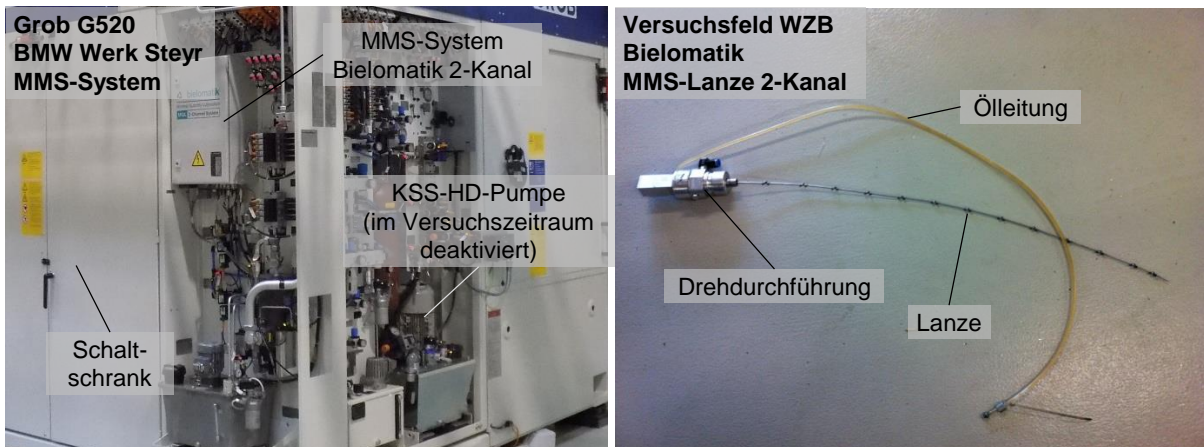


Abbildung 5.60: MMS-System an einem untersuchten BAZ im Pilotsystem im BMW Werk Steyr und Lanze für ein 2-Kanal-MMS-System

Um die Anhaftung von Spänen im Arbeitsraum zu vermeiden, wird dieser mit Edelstahl ausgekleidet. Unlackiert weist die Oberfläche des korrosionsbeständigen Materials geringe Haft- und Gleitreibungseigenschaften auf, welche den Spanabtransport begünstigt. Dieser Effekt wird durch eine steilere Neigung sämtlicher Leitbleche einschließlich des Abwurftrichters (ca. 60° im Vergleich zu üblichen ca. 30° bei Nassbearbeitung) und eine Verringerung sichtbarer Schraubverbindungen verstärkt (vgl. Abbildung 5.61).

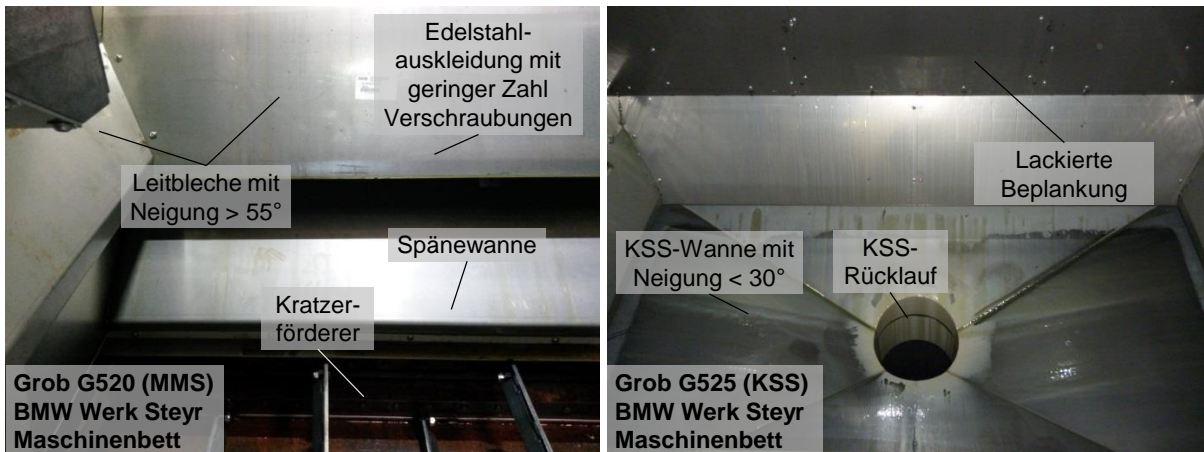


Abbildung 5.61: Vergleich der Ausführung des Maschinenbetts untersuchter BAZ mit MMS und KSS im BMW Werk Steyr

Zur Beseitigung von Spänen im Bereich der Spindel vor Werkzeugwechseln empfiehlt der Hersteller Grob zudem den Einbau einer pneumatisch betriebenen, mit Düsen versehenen Abblasleiste. Auch die Referenzbuchsen zur pneumatischen Überprüfung der korrekten Aufspannung von Werkstück oder Adapterplatte sind anfällig für Spänefall (vgl. Abbildung 5.62). Um diese vor dem Werkstückwechsel von Spänen zu befreien, wird ebenfalls auf die ohnehin integrierte Druckluft zurückgegriffen.

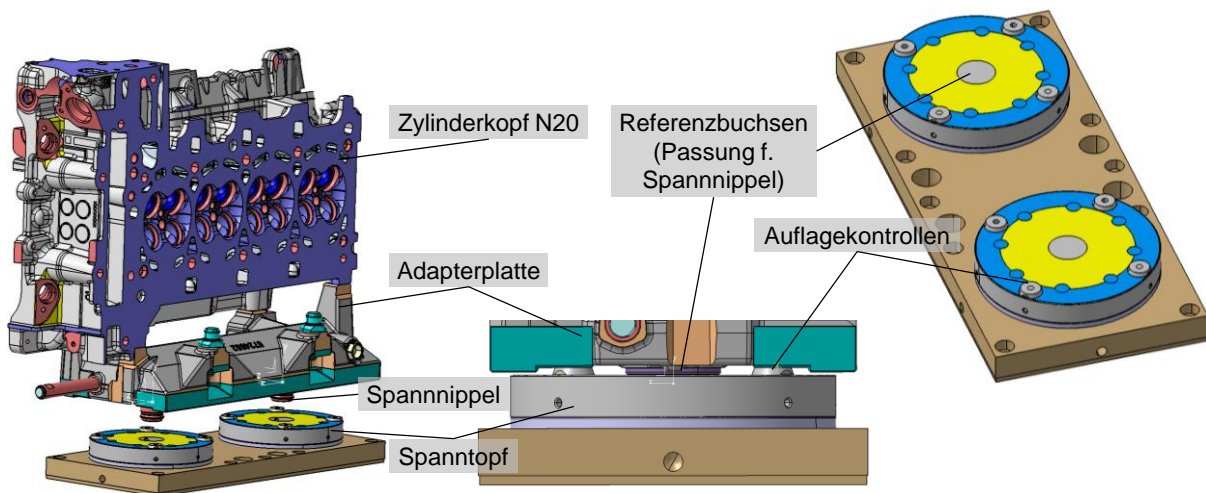


Abbildung 5.62: Aufspannsituation in Bearbeitungszentren bei Einsatz von Adapterplatten

Weiter lässt sich die Anhaftung von Spänen durch Abschaltung der Aerosolzufuhr bei Bewegung der Achsen im Eilgang reduzieren. Werkzeugmaschinenhersteller bieten dazu (teil-)automatisierte Softwarelösungen an. Die geringere Benetzung des Bauteils und der Arbeitsraumflächen mit Schmierstoff verhindert das Verkleben mit Spänen und senkt darüber hinaus Schmierstoff- und Druckluftbedarf. Zu berücksichtigen ist hierbei die im Kapitel 5.1.3 beschriebene Verzögerungszeit zwischen dem Einschalten der MMS-Versorgung und dem gleichmäßigen Austreten des Aerosols aus dem Werkzeug.

Bereits in Kapitel 5.1.3.4.1 wurde aufgezeigt, dass die MMS-Technologie bei 6 bar-Druckluftnetzen teilweise an ihre Grenzen stößt (vgl. Abbildung 5.21). Sollte dies pro-

zessbedingt erforderlich sein, bietet sich die Möglichkeit zur Installation eines Druckboosters. Wie bereits erwähnt, sind angebotene Modelle in der Lage, eine temporäre Druckerhöhung auf 10 bar zu erzeugen. Dies ist empfehlenswert, wenn besonders lange Werkzeuge oder solche mit geringen Kühlkanaldurchmessern im Einsatz sind (vgl. Kapitel 5.1.3.4.1). Eine weitere Möglichkeit ist die flächendeckende Anbindung des FFS an ein 10 bar-Druckluftnetz. Aufgrund des hohen Grundlastanteils im Bereich von 3 bar (ca. 90 Prozent bei Nassbearbeitung, vgl. Kapitel 5.2.2.3) ist die Wirtschaftlichkeit dieser Maßnahme jedoch zu hinterfragen. Um einer Bildung zündfähiger Gemische (vgl. Kapitel 3.2.4) vorzubeugen, wird die Absaugeinrichtung der Bearbeitungszentren um einen Strömungswächter sowie eine Klappe ergänzt, welche den abgesaugten Volumenstrom aus dem Arbeitsraum reguliert (vgl. Abbildung 5.63).



Abbildung 5.63: Arbeitsraum und Absaugvorrichtung eines untersuchten, verketteten MMS-BAZ im Pilotsystem im BMW Werk Steyr

Wegen der Möglichkeit des Auftretens temperaturbedingter Prozessschwankungen (vgl. Kapitel 3.2.3 und 5.1.3.4) werden BAZ um Vorrichtungen zur prozessnahen Messung erweitert. Diese erfassen den Wärmegang der Maschine und ermöglichen in Verbindung mit einer ebenfalls zu integrierenden Achsenkompensation einen automatischen Ausgleich auftretender Temperaturverzüge. Hierzu sind Infrarotsensoren vorzusehen und die Kompensationsalgorithmen in die Maschinensteuerung zu integrieren. Vorherrschende Substitute für die Funktion des Spanabtransports aus dem Arbeitsraum sind Kratzerförderer im Maschinenbett und Spanabsaugungsanlagen, wobei erstere in den betrachteten FFS energieeffizienter einsetzbar sind (vgl. Kapitel 3.2.4).

Im Vergleich zu BAZ in der Nassbearbeitung entfallen neben der KSS-Verrohrung die KSS-Hochdruckpumpe mit zugehöriger Filter- und Frequenzumrichtereinheit sowie die Spülpistole zur Reinigung des Arbeitsraums.

Bereits in Kapitel 5.1 wurde der erhöhte Aufwand im Bereich der Werkzeugherstellung aufgezeigt, der aus verschiedensten Optimierungsmaßnahmen zur Gewährleistung zur Nassbearbeitung vergleichbarer Prozesssicherheiten, Bearbeitungszeiten und Standwege resultiert.

Wie im Kapitel 3.2.5 dargestellt, sind spanende Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide, etwa das Honen, nach aktuellem Stand der Technik nicht mit MMS durchführbar. Zum Betrieb von Honanlagen bei der Fertigung von Kurbelgehäusen ist somit nach wie vor eine KSS-Versorgung erforderlich. Tabelle 10.6 zufolge beträgt der Anteil des KSS-Bedarfs honender Arbeitsfolgen am Gesamtbedarf ca. 13,5 Prozent – die im MMS-Betrieb des FFS zu installierende KSS-Filteranlage ist somit dementsprechend zu dimensionieren.

5.3.1.3 Reinigungstechnik

Die im Abschnitt 5.1.3 beschriebenen Versuche haben gezeigt, dass auch bei Einsatz von MMS Verschmutzung mit Spänen, Öl und Stäuben auftritt (vgl. Abbildung 5.64).

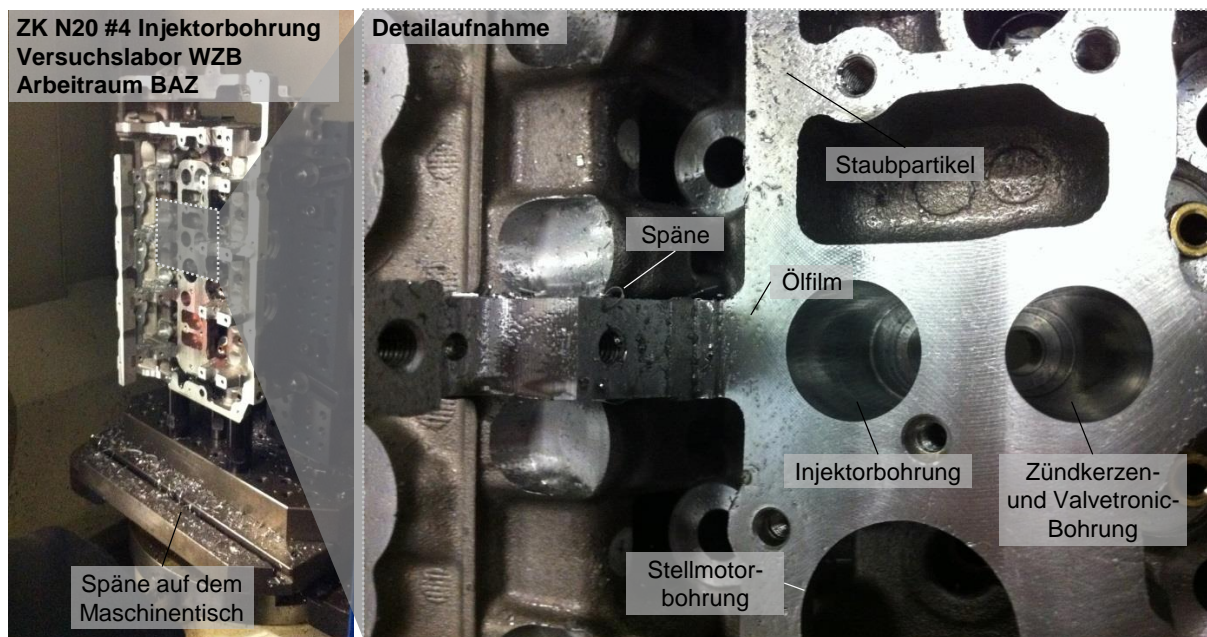


Abbildung 5.64: Werkstück- und Maschinenverschmutzung beim Einsatz von MMS

Anforderungen hinsichtlich technischer Sauberkeit und Prozesssicherheit erfordern daher die Reinigung von Bauteilen etwa vor Montage-, Hon- oder Prüfprozessen (vgl. Kapitel 5.2.1.4). Dazu eignen sich die im Kapitel 5.2.1.4 genannten Reinigungsanlagen und -prozesse.

Nach Aussage befragter Wettbewerber und Hersteller ist eine höhere Badwechselrate – also eine kürzere Standzeit von Reinigungsmittel und Filter – möglich. Aufgrund des geringen Anteils der Aufwendungen für Reinigungsmittel an den Betriebskosten (0,4 Prozent, vgl. Kapitel 5.2.3.2) wird dies nicht weiter untersucht.

5.3.1.4 Anbauteilemontage, Mess- und Prüftechnik

Da der Einsatz von MMS keine relevanten Änderungen am Werkstück zur Folge hat, bleiben Montage-, Mess- und Prüfprozesse unbeeinflusst.

5.3.1.5 Nebenbetriebe und Gebäude

Einführung von MMS hat den Entfall der KSS-Filteranlage für BAZ und der zugehörigen Verrohrungen im Vor- und Rücklauf zur Folge. Zur Entsorgung der Späne ergeben sich verschiedene Möglichkeiten. Für Fertigungssysteme mit geringem Automatisierungsgrad oder hoher Personalverfügbarkeit bietet sich eine regelmäßige Abfuhr je Maschine oder Arbeitsfolge über eine Lore an. Systeme mit hohen Automatisierungsgraden in Hochlohnländern, wie die betrachteten FFS, erfordern eine ebenfalls weitgehend automatisierte Spanabfuhr. Stand der Technik ist die Abfuhr über mechanische Fördersysteme oder Absaugung. Aus Gründen der Energieeffizienz (vgl. Kapitel 3.2.4 und 5.3.1.2) wird bei der BMW Group ein System aus Kratzerförderern favorisiert (vgl. Abbildung 5.65).

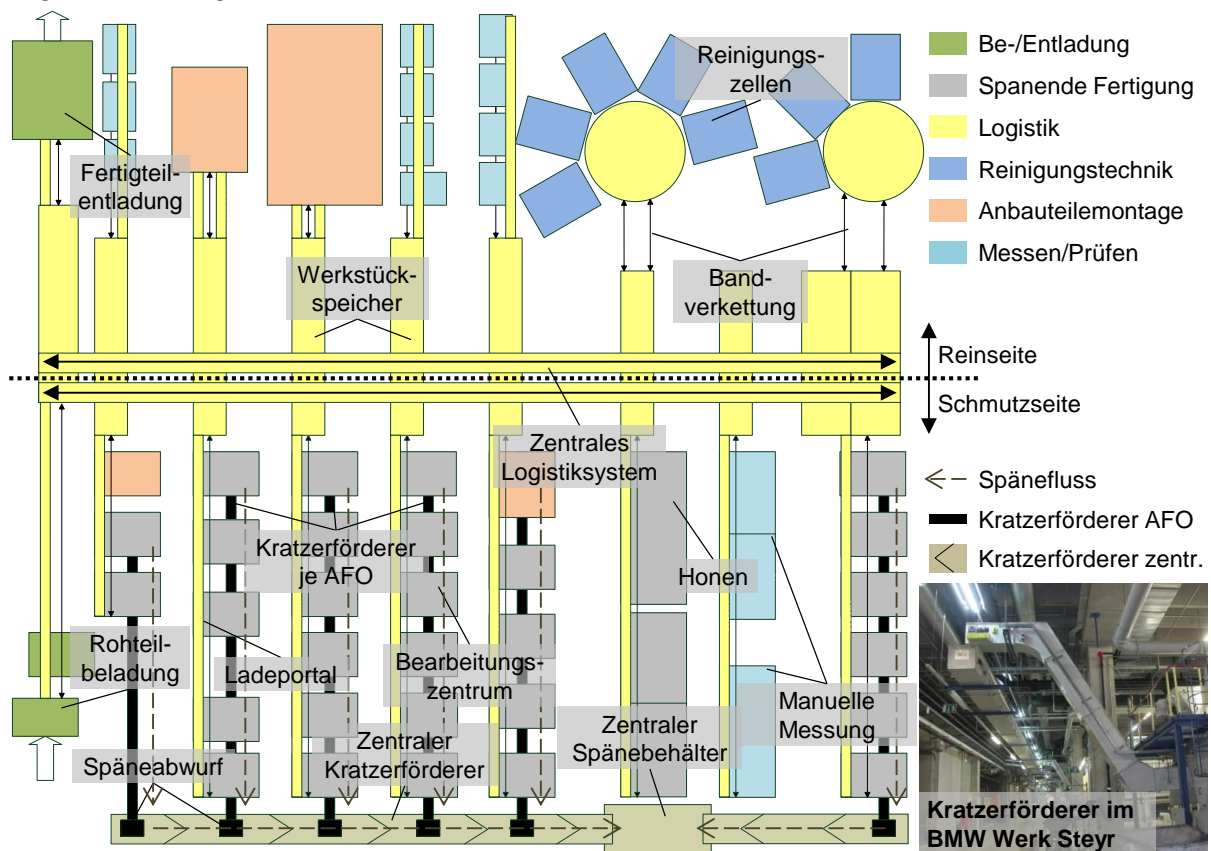


Abbildung 5.65: Späneentsorgungskonzept mit Kratzerförderern für betrachtete FFS

Bei Systemen in Parallelanordnung bietet sich die Installation eines durchgehenden Kratzerförderers je Arbeitsfolge an, der die Späne direkt aus dem Arbeitsraum (vgl. Abbildung 5.61) zu einem Abwurf je AFO transportiert. Zur Verringerung der Anzahl sich füllender Spänebehälter dienen zentrale Kratzerförderer, die die Späne an einem oder mehreren Punkten sammeln. Diese Strategie findet auch bei Systemen mit mehreren KSS-Filteranlagen Anwendung, um den logistischen Aufwand bei der Späneentsorgung zu verringern (vgl. Abbildung 5.65, unten rechts).

Die während der Zerspaltung verrichtete mechanische Arbeit wird fast vollständig in Wärmeenergie umgewandelt, die zu großen Teilen über den Span abgeführt wird (vgl.

Kapitel 3.1). Aus diesem Grund ist eine rasche Entfernung der Späne – und somit potenzieller Wärmequellen – aus dem Arbeitsraum zur Vermeidung temperaturbedingter Verzüge empfehlenswert. Sofern ein Geschoss unterhalb des Fertigungssystems existiert, ist eine Abfuhr der Späne in dieses Stockwerk möglich (vgl. Abbildung 5.66). Durch die unmittelbare räumliche Trennung wird auch der Einfluss auf die Hallentemperatur verringert. Bei nicht unterkellerten Fertigungssystemen ist eine rasche Abfuhr der Späne beispielsweise in eine benachbarte Räumlichkeit oder den Außenbereich vorzuziehen.

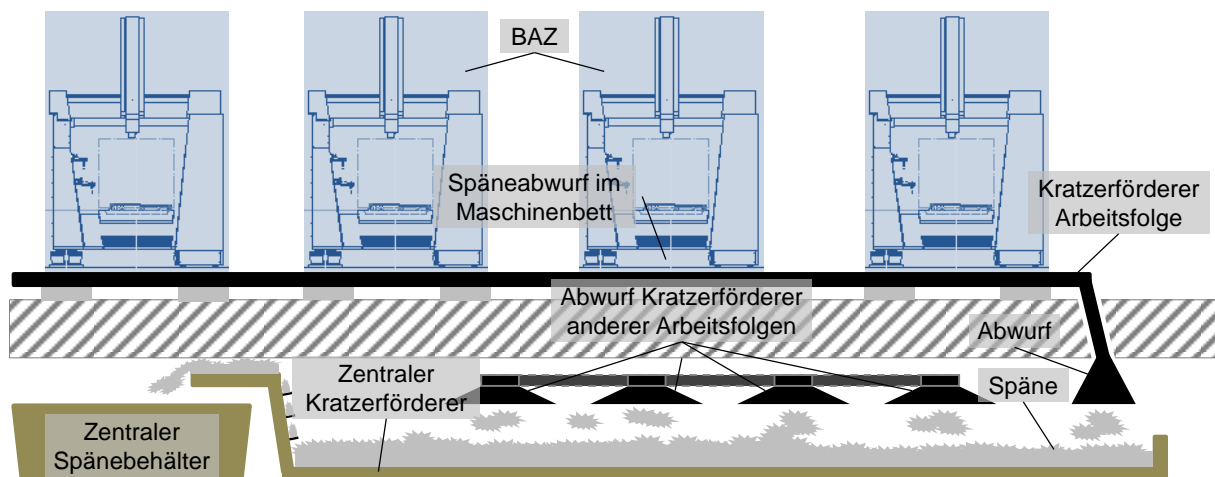


Abbildung 5.66: Späneentsorgungskonzept in niedriger gelegenes Geschoss bei MMS-Betrieb

5.3.2 Bewertung der Auswirkungen auf Energiebedarf und Lebenszykluskosten des FFS

Zur Beantwortung der Forschungsfrage F1.3 nach den ökonomischen und ökologischen Auswirkungen der Einführung von MMS werden im Folgenden Energiebedarf und Lebenszykluskosten der vorgestellten FFS bei Einsatz von MMS analysiert. Wie in den vorherigen Abschnitten ist auch in diesem Fall aus Geheimhaltungsgründen keine detaillierte Aufschlüsselung der Kostenseite möglich. Sie wird im Rahmen von Kapitel 7.1 exemplarisch anhand fiktiver, realitätsnaher Daten betrachtet.

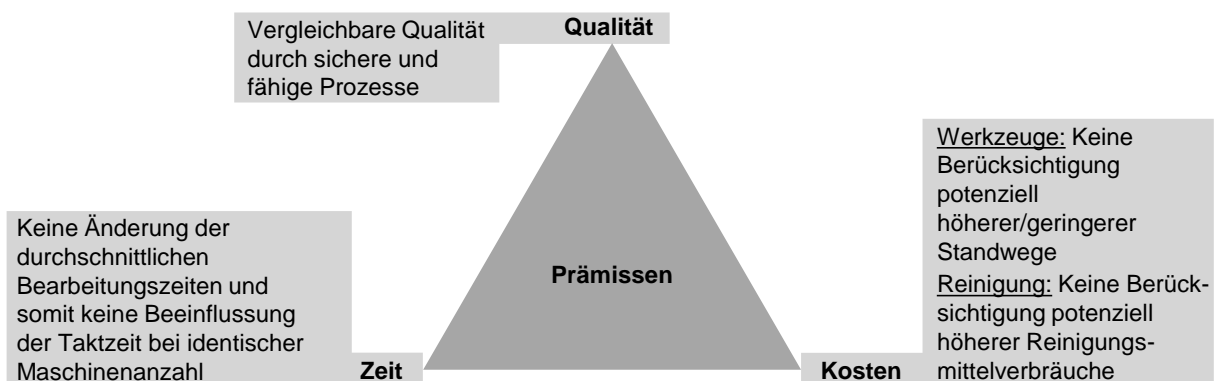


Abbildung 5.67: Der Bewertung zugrundeliegende Prämissen

Gemäß den durchgeführten Untersuchungen hinsichtlich Qualität und Zeit (vgl. Kapitel 5.1.3) sowie den getroffenen Annahmen zu Kosten (vgl. ebd. und Kapitel 5.3.1.3) ergeben sich für die Bewertung die in Abbildung 5.67 dargestellten Prämissen.

Daraus resultieren bei Einsatz von MMS im Vergleich zur Auslegung mit Nassbearbeitung sowohl eine gleichbleibende Anzahl an Bearbeitungsmaschinen als auch identische Ausschussraten.

Ausgehend von den in den Abschnitten 5.1.3 und 5.3.1 beschriebenen erforderlichen Anpassungen lassen sich bei FFS mit MMS-Technologie im Vergleich zu solchen mit herkömmlicher Kühlschmierstrategie Kostenunterschiede in den Phasen vor und während der Nutzung des Fertigungssystems ableiten. Abweichungen bei den Entsorgungskosten in der Phase nach der Nutzung sind nicht feststellbar. Damit fallen sie nicht unter die in Kapitel 2.2 getroffene Definition der im Sinne der Problemstellung relevanten Kosten und werden nicht weiter untersucht.

Aufgrund der Sensibilität der Daten zu Beschaffungskosten werden die Unterschiede zwischen FFS mit Nass- und MMS-Bearbeitung an Fallbeispielen im Rahmen von Kapitel 7.1 quantifiziert. Der folgende Abschnitt gibt Aufschluss über die Abweichungen in Energiebedarf und Kosten im Rahmen der Betriebsphase.

Zum Zeitpunkt des Verfassens der vorliegenden Arbeit stand kein vollständig mit MMS betriebenes FFS im Motorenbau der BMW Group zur Verfügung. Daher erfolgten die entsprechenden Untersuchungen am MMS-Pilotsystem im Werk Steyr (vgl. Abbildung 5.68) analog zu den bereits in Kapitel 5.2.2 beschriebenen und durchgeführten Messungen. Dieses im Folgenden beschriebene Pilotsystem wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit geplant und in Betrieb genommen. Bestandteil des Systems sind drei DS-BAZ des Typs Grob G520, die den in Kapitel 5.2.1.2 genannten Spezifikationen gemäß ausgestattet und entsprechend Kapitel 5.3.1.2 für den MMS-Einsatz ausgerüstet wurden. Zur Erhöhung der Flexibilität bei Versuchsläufen sind sie sowohl mit einem 2-Kanalsystem von bielomatik als auch mit dem Rother Aerosolmaster 4000 ausgestattet – jenen MMS-Systemen, die bereits erfolgreich bei den Vorversuchen eingesetzt wurden (vgl. Kapitel 5.1.3). Das 2014 neu errichtete FFS für Kurbelgehäuse G7 entspricht dem in Abbildung 5.36 beschriebenen Aufbauschema von FFS der BMW Group. Da es geeignete Freiflächen aufwies, bot sich die Möglichkeit der temporären Integration der MMS-Versuchs-BAZ in drei spanende Arbeitsfolgen. Da die übrigen, bis auf die Anpassungen zum MMS-Einsatz baugleichen BAZ der jeweiligen Arbeitsfolgen für Nassbearbeitung ausgelegt sind, wurde kein durchgehender Kratzerförderer (vgl. Abbildung 5.66) installiert. Jedes MMS-BAZ wurde mit einem separaten Kratzerförderer ausgestattet, der Späne über eine Bohrung neben der Maschine in die KSS-Rinne fördert. Diese Konstruktion wurde im Zuge der von Beginn an geplanten Rückrüstung auf KSS nach Ende der MMS-Versuchsläufe demontiert.



Abbildung 5.68: Untersuchtes MMS-BAZ in verketteter Arbeitsfolge im MMS-Pilotsystem im BMW Werk Steyr

Aus den am Pilotsystem und weiteren MMS-BAZ durchgeführten Messungen von Energie- und Medienbedarfen und dem Vergleich zu den im Kapitel 5.2.2.3 bestimmten Werten wurden Unterschiede zwischen beiden Kühlschmierstrategien abgeleitet und auf die bereits vorgestellten FFS G2 und Z2 hochgerechnet. Diese Vorgehensweise wird im Folgenden näher erläutert.

Durchschnittlich wurden bei einspindligen MMS-BAZ um 1,6 kW, bei doppelspindligen um 3,2 kW geringere Leistungsaufnahmen gemessen. Zurückzuführen ist dies auf den Wegfall der KSS-Hochdruckpumpe: Diese erfordert durchgeführten Messungen zufolge bei Einspindlern ca. 1,7 kW, bei Doppelspindlern ca. 3,3 kW (vgl. Abbildung 5.48). Hinzu kommen die installierten Kratzerförderer mit Anschlusswerten von 0,37 kW je BAZ, die eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 0,1 kW aufweisen. Zusammengefasst ergeben sich in der spanenden Fertigung um 14 Prozent (G2) bzw. 11 Prozent (Z2) verringerte Leistungsbedarfe.

Bei Einsatz von MMS steigt der Druckluftbedarf mit durchschnittlich ca. 20 m³/h pro Spindel an (vgl. auch Kapitel 3.2.4), was im Falle der untersuchten FFS G2 und Z2 Aufschläge zwischen 57 und 100 Prozent ausmacht. Insgesamt erhöht sich der Leistungsbedarf der Druckluftversorgung um 58 Prozent (G2) bzw. 54 Prozent (Z2).

Durch Entfall der KSS-Versorgungsstruktur im FFS Z2 bzw. der Reduzierung dieser auf die Honanlagen im FFS G2 und Aufbau eines zentralen Kratzerfördersystems ergeben sich Einsparungen im Bereich von 83 Prozent (G2) bzw. 96 Prozent (Z2). Für den zentralen Kratzerförderer wurde auf Erfahrungswerten basierend eine durchschnittliche Leistungsaufnahme von 5 kW herangezogen, die sich auch auf den Bedarfswerten der im FFS G7 installierten Fördersysteme der MMS-Versuchs-BAZ orientiert.

Abbildung 5.69 fasst die Ergebnisse der Berechnung zusammen.

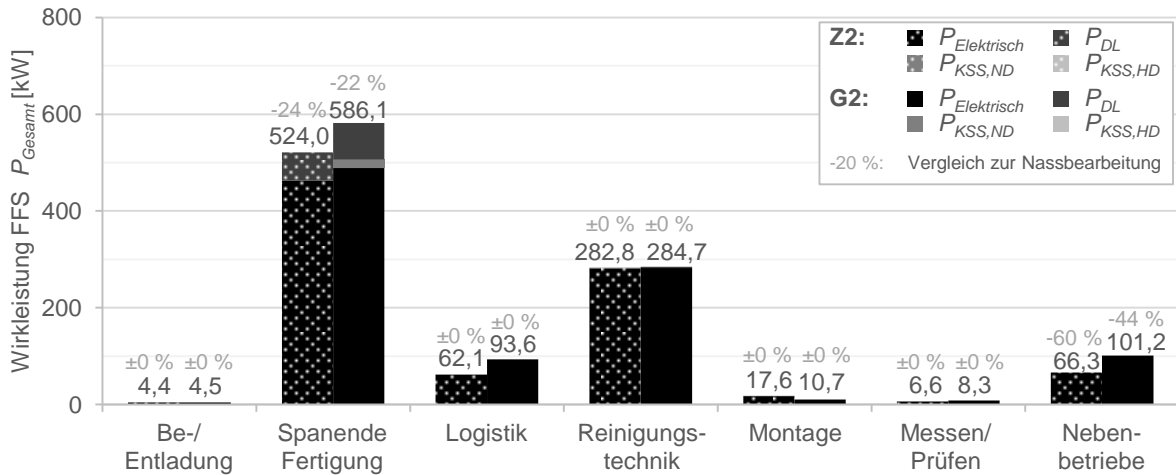


Abbildung 5.69: Berechnete Leistungs- und Medienbedarfe der FFS für Kurbelgehäuse G2 und Zylinderköpfe Z2 im BMW Werk Steyr nach Systemelementklassen bei Einsatz von MMS

Aus den genannten Werten lassen sich analog zu Kapitel 5.2.2.3 Verteilungen der Leistungsbedarfe einzelner Systemelementklassen ableiten (vgl. Abbildung 5.70 und Abbildung 5.71). Deutlich erkennbar sind die reduzierten Anteile der spanenden Fertigung und KSS-Versorgung an der Gesamtleistungsaufnahme bei gleichzeitig erhöhtem Bedarf der Druckluftversorgung.

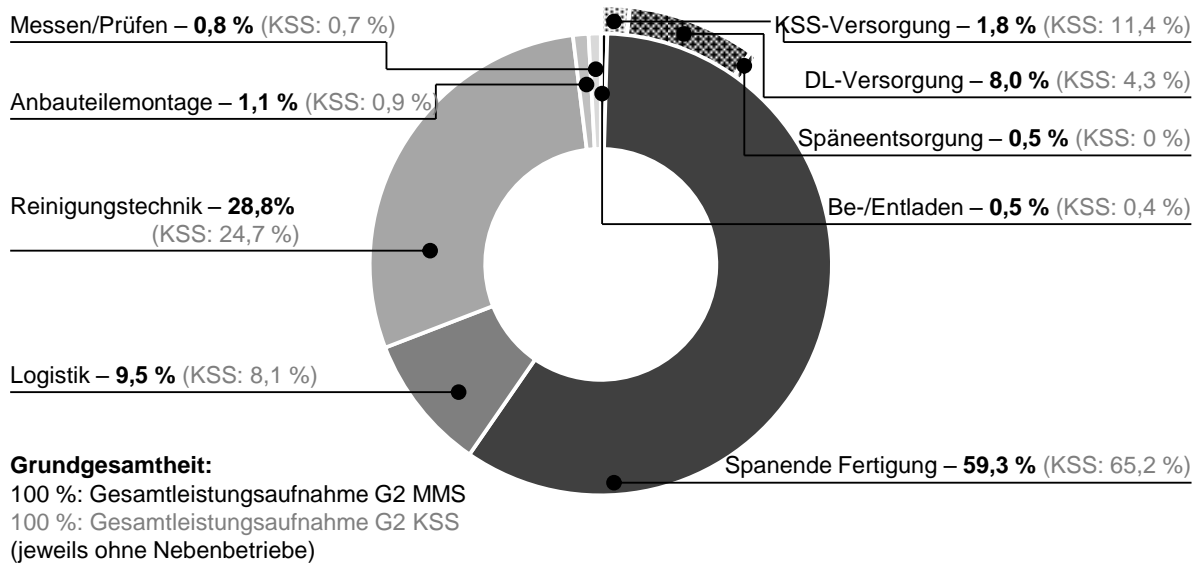


Abbildung 5.70: Berechnete Gesamtleistungsaufnahme des FFS für Kurbelgehäuse G2 im BMW Werk Steyr nach Systemelementklassen bei Einsatz von MMS

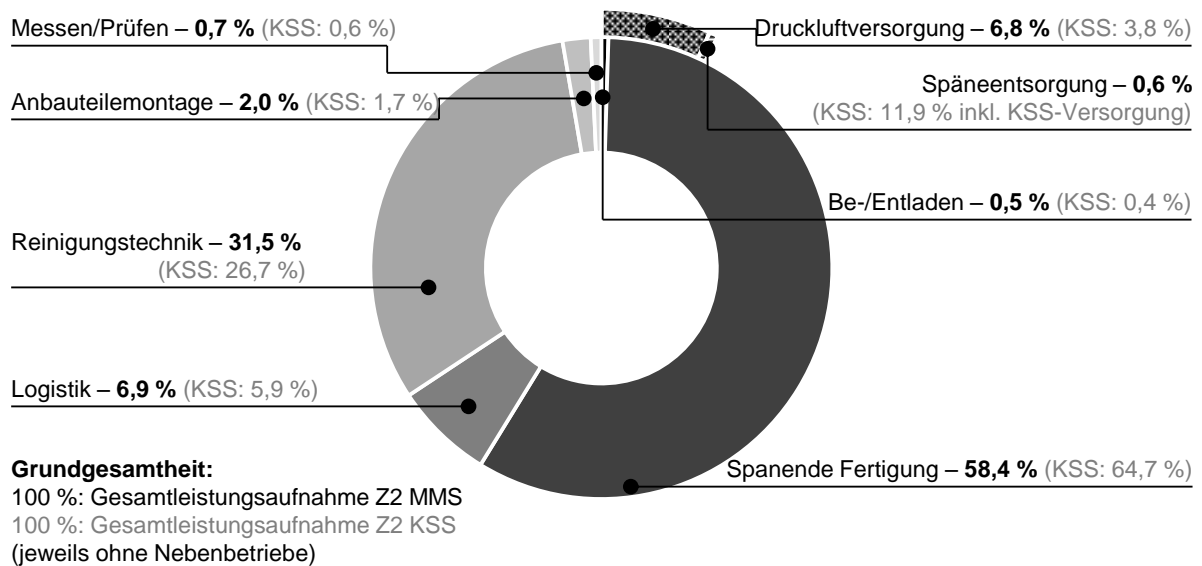


Abbildung 5.71: Berechnete Gesamtleistungsaufnahme des FFS für Zylinderköpfe Z2 im BMW Werk Steyr nach Systemelementklassen bei Einsatz von MMS

Abbildung 5.72 fasst die über beide FFS gemittelten Ergebnisse der Analyse zusammen. Deutlich wird der identische Leistungsbedarf aller Systemelementklassen mit Ausnahme der spanenden Fertigung. Durch den Einsatz von MMS werden bei letzterer Einsparungen von durchschnittlich 23 Prozent erzielt. Dies ist auf die im vorangegangenen Kapitel 5.3.1 beschriebenen erforderlichen Anpassungen zurückzuführen. Insgesamt liegt der berechnete Leistungsbedarf der betrachteten FFS G2 und Z2 im MMS-Betrieb im Durchschnitt 15 Prozent unter dem der Nassbearbeitung.

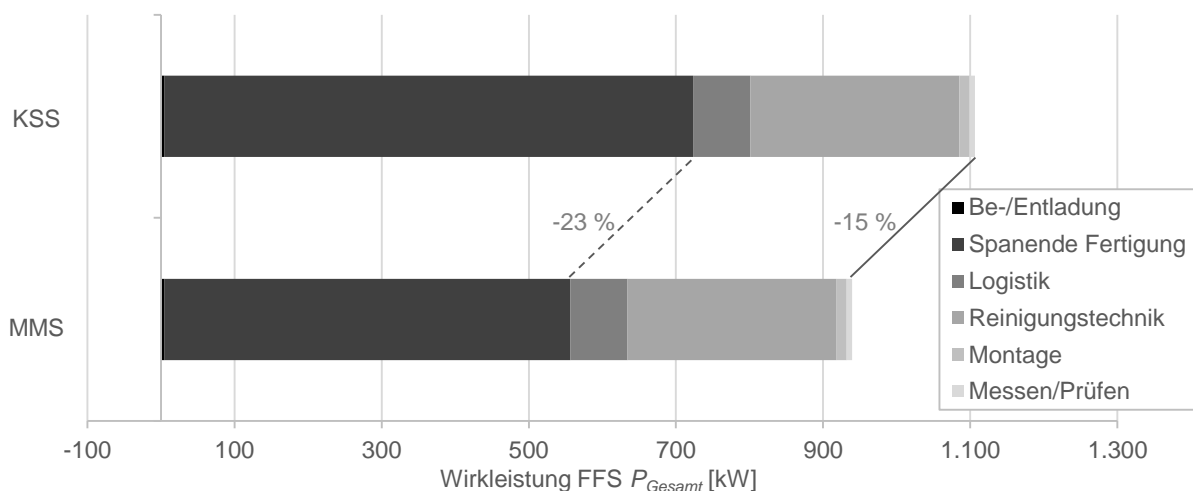


Abbildung 5.72: Vergleich der durchschnittlichen Leistungsbedarfe der betrachteten FFS bei Einsatz von KSS und MMS

Zur Ermittlung der Betriebskosten der betrachteten flexiblen Fertigungssysteme bei Einsatz von MMS wird auf den im Kapitel 5.2.3 erläuterten Betriebsaufwendungen der FFS G2 und Z2 aufgesetzt. Neben den in diesem Zusammenhang beschriebenen Aufwendungen ergeben sich Erträge aus dem Recycling des Spanmaterials. Aus der Differenz dieser ergeben sich die Netto-Betriebskosten des FFS im KSS-Betrieb. Um eine Wahrung der Geheimhaltung zu gewährleisten, werden die Kosten auf 100 Prozent

normiert, wobei 100 Prozent den Netto-Betriebskosten des KSS-FFS entsprechen (vgl. Abbildung 5.73).

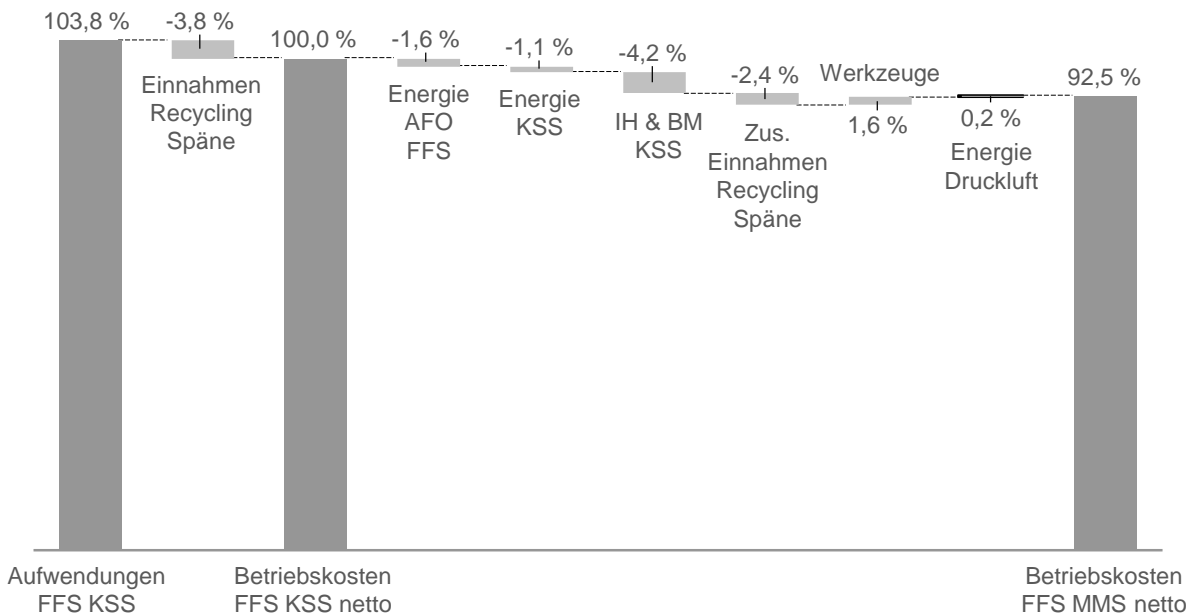


Abbildung 5.73: Überleitung der Betriebskosten der betrachteten FFS bei Einsatz von KSS und MMS

Aus den oben genannten Einsparungen bei der Wirkleistungsaufnahme der Arbeitsfolgen des Fertigungssystems und der zugehörigen KSS-Versorgung ergeben sich auf Basis der in Kapitel 5.2.3.2 genannten Strompreise Kostenreduzierungen um insgesamt 2,7 Prozent.

Durch Entfall der KSS-Filteranlagen mit Ausnahme jener zur Versorgung der Honmaschinen bei FFS für Kurbelgehäuse (vgl. Kapitel 5.3.1.2) ergeben sich verringerte Instandhaltungsaufwände. Zudem sinken die Bedarfe an KSS-bezogenen Betriebsmitteln, Betriebs- und Hilfsstoffen. Dem entgegen stehen Stückkosten für MMS-Schmierstoffe $K_{Schmier,FM}$. Diese wurden aus in Kapitel 5.1.3 gewonnenen Erkenntnissen berechnet. Diese sind Schmiermittelmengen der eingesetzten Werkzeuge $Q_{MMS,M}$ (30-300 ml/h), den in den genannten FFS vorherrschenden durchschnittlichen Bearbeitungszeiten der Werkstücke $t_{Bearb.,M}$ abzüglich der mittleren eingriffsfreien Zeiten $t_{eing.frei,M}$ sowie der Einkaufspreis des Schmierstoffs $k_{Schmier}$:

$$K_{Schmier,FM} = Q_{MMS,M} \cdot (t_{Bearb.,M} - t_{eing.frei,M}) \cdot k_{Schmier,MMS} \text{ [€]} \quad 5.7$$

Insgesamt werden die Kosten somit um weitere 4,2 Prozent reduziert.

Aufgrund des geringeren Öl- und Wassergehalts von Spänen aus der MMS-Bearbeitung lassen sich am Markt höhere Erlöse für das Spanmaterial erzielen. Diese schlagen mit weiteren 2,4 Prozent zu Buche.

Höhere Betriebskosten sind bei Werkzeugen und Druckluftversorgung zu berücksichtigen. Bei ersteren resultieren sie aus im Schnitt ca. 15 Prozent höheren Anschaffungskosten der in Kapitel 5.1.3 untersuchten Werkzeuge, bei letzterer aus dem erhöhten

Druckluftbedarf der BAZ. Insgesamt ergeben sich in diesen beiden Positionen Mehrkosten von 1,8 Prozent.

Zusammengefasst liegen die unter Berücksichtigung der getroffenen Annahmen berechneten Betriebskosten der betrachteten FFS bei Einsatz von MMS im Schnitt 7,5 Prozent unter den Referenzwerten bei Nassbearbeitung.

Abbildung 5.74 zeigt die Verteilung der berechneten durchschnittlichen Betriebskosten. Aufwendungen für Personal weisen einen Anteil von ca. 61 Prozent auf, jener von IH, Werkzeugen und Energie beträgt 33 Prozent. Betriebskosten zur KSS-Versorgung und Späneentsorgung sinken von vormals 6,7 Prozent (vgl. Abbildung 5.58) auf 1,2 Prozent der Betriebskosten. Zu beachten ist hierbei die unterschiedliche Basis der prozentualen Angaben.

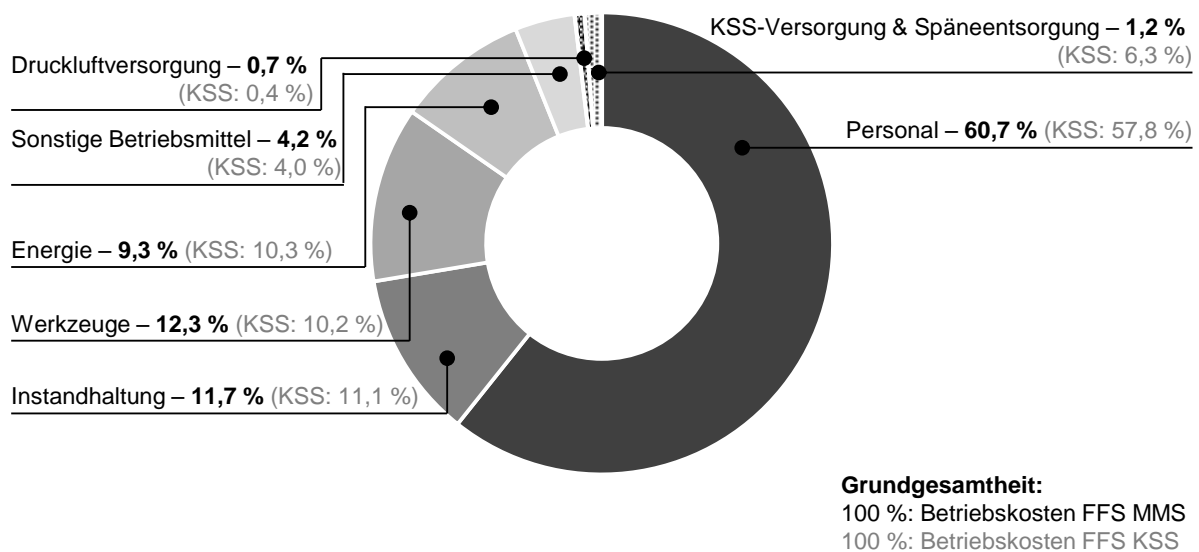


Abbildung 5.74: Berechnete durchschnittliche Betriebskosten der betrachteten FFS bei Einsatz von MMS; Aufwände für KSS-Versorgung inkl. zugehörigem Anteil an Energie- und weiteren Kosten

6 Entwicklung eines wissensbasierten Systems zur wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung der MMS in der Planung flexibler Fertigungssysteme

Nachdem das vorangegangene Kapitel die Umsetzbarkeit der betrachteten Fertigungsprozesse mit MMS-Technologie bestätigt, Aufschluss über die erforderlichen Anpassungen flexibler Fertigungssysteme gegeben (F1.1) und einen ersten Ausblick auf die wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen gewährt hat (F1.3), widmet sich das folgende Kapitel der Beantwortung der Forschungsfragen zum wissensbasierten System. Zunächst sind aus den in Kapitel 4.2 vorgestellten Methoden jene auszuwählen, die zum Einsatz in den Modulen des zu entwickelnden wissensbasierten Systems geeignet sind. Dazu werden Kriterien aus den in Kapitel 2.3 festgelegten Anforderungen abgeleitet und zur Bewertung der Methoden herangezogen (F2.1). Anschließend erfolgt die Konzeption des wissensbasierten Systems auf Basis der ausgewählten Methoden (F2.2). Im Zuge der Systementwicklung ist zudem die Frage nach geeigneten ökologischen und ökonomischen Bewertungsparametern zu klären (F1.2).

6.1 Auswahl geeigneter Methoden des Wissensmanagements

In den folgenden Abschnitten werden die in Kapitel 2 genannten Prämissen und Anforderungen in eine Systemumgebung überführt, Auswahlkriterien zur Bewertung der wissensbasierten Lösungsansätze abgeleitet und geeignete Methoden ausgewählt.

6.1.1 Konkretisierung der Systemumgebung

Maßgeblichen Einfluss auf die Eignung einer Wissensrepräsentationsmethode zur Lösung einer Problemstellung ergibt sich aus der unmittelbaren Systemumgebung sowie den Anforderungen an die Eingangs- und Ausgangsdaten (vgl. Kapitel 4.2).

Abbildung 6.1 stellt die Einordnung des zu entwickelnden Systems in die spätere Anwendungsumgebung dar. Benachbarte Systeme zur Informationsversorgung bzw. -weiterverarbeitung existieren nicht: Eingangsdaten werden direkt vom Nutzer händisch eingegeben, Ausgangsdaten von diesem interpretiert.

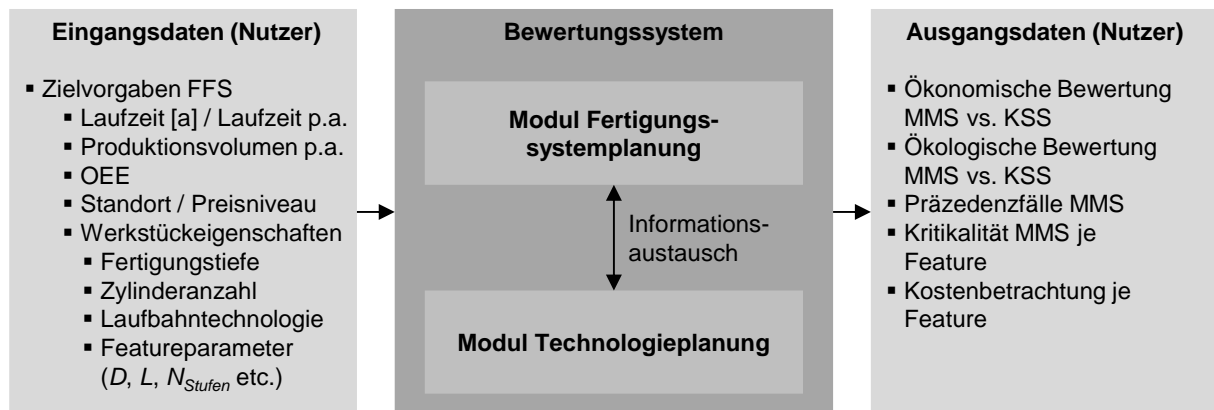


Abbildung 6.1: Einordnung in die Systemumgebung

Erstere umfassen die Vorgaben des Zielekatalogs an das FFS wie etwa die verfügbare jährliche Produktionszeit (Schichtmodell, OEE), das Produktionsvolumen und die Anzahl zu fertigender Werkstückvarianten. Konjunkturelle oder lokale Einflüsse auf das Berechnungsergebnis werden über die Angabe von Preisniveau und Produktionsstandort abgebildet. Neben Detailinformationen zum Werkstück in Form der bereits unter Kapitel 5.1 beschriebenen Featureparameter sind auch übergeordnete Angaben zur Zylinderanzahl, Laufbahntechnologie oder zur relativen Fertigungstiefe möglich.

Die Ausgangsdaten umfassen gemäß Kapitel 2 zwei der Problemstellung entsprechend dimensionierte FFS-Varianten, die hinsichtlich der Kühlschmierstrategie wirtschaftlich und ökologisch bewertet werden. Dazu werden für den Ansatz mit MMS und KSS je eine Lösungsvariante generiert und Lebenszykluskosten sowie ökologische Auswirkungen beider Varianten gegenübergestellt. Auf Basis der Featureparameter werden zudem für jedes Feature die Umsetzbarkeit mit MMS-Technologie und die qualitative Kritikalität bewertet und entsprechende Kosten auf Featureebene abgeleitet. Ein geeignetes Maß zur qualitativen Bewertung der featurespezifischen Kritikalität auf Basis der in Kapitel 5.1 beschriebenen Analyseergebnisse wird in Abschnitt 6.2 ermittelt. Zielgruppe des Systems sind Fachplaner der Disziplinen Fertigungssystem- und Technologieplanung. Eingewiesenen Experten ist zudem eine Pflege- und Wartungsmöglichkeit zu gewähren.

6.1.2 Auswahlkriterien

Aufgrund der nur allmählich steigenden Akzeptanz der MMS-Technologie [KENN11, ABEL04] ist ein transparenter und **nachvollziehbarer Lösungsweg** essentiell. Die Glaubwürdigkeit wissensbasierter Systeme hängt maßgeblich von der Existenz einer Erklärungskomponente ab, die das Ergebnis in einen für den Nutzer verständlichen Kontext setzt. [YETI90] Sie erleichtert dem Planer, die Lösung zu beurteilen.

Fertigungstechnologisches Fachwissen entwickelt sich stetig weiter [FRIE14], etwa in Form neuer Bearbeitungsmaschinen, Werkzeuge, Schneidstoffe und ihrer Einsatzmöglichkeiten. Zum stetigen Aktualisieren und Erweitern des hinterlegten Wissens ist da-

her eine Möglichkeit zur **Pflege der Wissensdatenbank** vorzusehen. Aus Gründen der Akzeptanz ist der Aufwand beim Eingriff in diese möglichst gering zu halten.

Der Prozess der Eingabe von Daten in die Wissensbasis wird als **Wissensakquisition** bezeichnet und ist eng mit dem Pflegeaufwand der Datenbank verbunden. Auch dabei ist der Aufwand gering zu halten.

Auf die Implementierungsphase entfällt der **Aufwand der Systemmodellierung**. Da er lediglich einmalig entsteht, ist die Priorität dieses Kriteriums geringer als die der bislang genannten. Bei gleichwertigem Ergebnis ist eine Lösung mit geringerem Implementierungsaufwand einer mit höherem Aufwand vorzuziehen.

Für das Modul zur Bewertung des MMS-Einsatzes im Zuge der Technologieplanung sind auf Basis der unter Kapitel 2.3 genannten Anforderungen weitere Kriterien abzuleiten. So ist die Möglichkeit der Übertragung von bereits vorliegenden bzw. noch zu generierenden **historischen Fallbeispielen** in die Wissensdatenbank und das Aufzeigen **verschiedener Lösungsalternativen** vorzusehen.

6.1.3 Gegenüberstellung der Methoden und Auswahl geeigneter Ansätze

Bereits in den Kapiteln 4.2.1 und 4.2.3 wurde aufgezeigt, dass die Methoden der Prädikatenlogik und semantischer Technologien nicht ohne Weiteres auf die Problemstellung der vorliegenden Arbeit übertragbar sind. Sie werden daher im weiteren Verlauf nicht berücksichtigt.

Regelbasierte Systeme weisen den Vorteil der Nähe zum menschlichen Denkprozess auf (vgl. Kapitel 4.2.2). Bei geringer Anzahl an Interdependenzen im Regelwerk sind die Aufwände bei der Systemmodellierung, Wissensakquisition und Datenbankpflege im Vergleich zu den anderen vorgestellten Methoden begrenzt. Die Nachvollziehbarkeit der Lösungsfindung lässt sich über das Aufzeigen der Schlussfolgerungen innerhalb des Regelwerks gewährleisten. Mit steigender Korrelation zwischen Regeln, etwa jenen zur Bewertung des Einflusses von Featureparametern auf Kritikalität und Kosten eines Features, erhöht sich der Implementierungs- und Wartungsaufwand. Eine wachsende Anzahl an Regeln verringert zudem die Transparenz des Lösungsweges aufgrund der Fülle an Informationen. Darüber hinaus erfordert der Aufbau des Regelwerks präzise Informationen zum Einfluss verschiedener Faktoren auf die Zielgrößen, die im Bereich der Technologieplanung nach aktuellem Stand nicht lückenlos verfügbar sind (vgl. Kapitel 5.1). Die Übertragung von Fallbeispielen in die Datenbasis ist zwar möglich, aber mit Aufwand verbunden: Vorliegendes Wissen ist aus den Datensätzen zu extrahieren und in das Regelwerk zu übersetzen. Da Regeln nach dem *Wenn-Dann-Prinzip* aufgebaut sind (vgl. Kapitel 4.2.2), sind Lösungsalternativen nicht ohne Weiteres ableitbar.

Wissensbasen fallbasierter Systeme hingegen bestehen aus Datensätzen, die vom System zur Lösungsfindung herangezogen werden. Das Hinterlegen von Beispielfällen ist

somit bei CBR-Lösungen ohnehin erforderlich. Durch einen Vergleich der verschiedenen Fälle und eine Bewertung mittels Distanzfunktion lassen sich auch mehrere, etwa nach Ähnlichkeit priorisierte Lösungsalternativen darstellen. Der dem menschlichen Denken nahe, zugrundeliegende deduktive Ansatz, dass ähnliche Problemstellungen ähnliche Lösungen aufweisen, erhöht die Nachvollziehbarkeit des Lösungsweges. Die Offenlegung und Erläuterung der Distanzfunktion erhöht zudem die Transparenz. Da fallbasiertes Wissen bereits aus den in Abschnitt 5.1.3 beschriebenen Experimenten sowie dem in Kapitel 5.3 vorgestellten Pilotsystem vorliegt, stellt die Wissensakquisition für das Technologieplanungsmodul einen geringen Aufwand dar. Das Einpflegen neuer Daten aus Versuchsreihen oder erfolgreichen Umsetzungen ist durch das Dokumentieren neuer Fälle ebenfalls mit vergleichsweise geringem Aufwand verbunden. Eine Herausforderung in der Systemmodellierung ist hingegen das Bilden einer validen Distanzfunktion. (vgl. Kapitel 4.2.4)

Auf Fuzzy-Logiken gestützte Systeme bieten aufgrund der Verwendung unscharfer linguistischer Konzepte den Vorteil einer dem menschlichen Sprachgebrauch nahen, differenzierten Darstellung von Sachverhalten. Die Ausgabe verschiedener Lösungsalternativen ist somit Grundbestandteil der Methode. Analog zu regelbasierten Systemen bieten auch Fuzzy-Logiken eine Nachvollziehbarkeit der Lösungsfindung, wenn der Bewertungsprozess dokumentiert ist. Zur Bestimmung des Zugehörigkeitsgrades eines Elements zu einer Fuzzy-Menge im Zuge von Wissensakquise und Lösungsfindung ist jedoch eine präzise mathematische Beschreibung der Grenzwerte erforderlich. Das ist für die genannten Problemstellungen insbesondere im Rahmen der Technologieplanung nicht ohne Weiteres möglich. (vgl. Kapitel 4.2.5 und 5.1)

Im Gegensatz zu den bislang vorgestellten Methoden sind künstliche neuronale Netze vor ihrer Anwendung an Trainingsdatensätzen zu trainieren, um die Gewichtung der Synapsen einzustellen. Die zu Beginn der Nutzungsphase geringe Menge an Datensätzen birgt somit für die Technologieplanung das Risiko von Fehlinterpretationen noch vor Beginn der eigentlichen Anwendung. Zudem bieten KNN nur begrenzte Möglichkeiten für Lösungsalternativen, da ihr Lösungsansatz das Zuordnen von Eingangsmustern zu konkreten Ausgangsmustern voraussetzt. Die implizite Abbildung des Wissens anhand der während des Trainings optimierten Synapsengewichte erschwert auch für Experten das Nachvollziehen des Lösungsweges. Zur Erweiterung des Systems in nicht graduellen Schritten, etwa bei Technologiesprüngen, sind außerdem neue Trainingsläufe erforderlich. (vgl. Kapitel 4.2.6)

Auch evolutionäre Algorithmen weisen eine geringe Nachvollziehbarkeit der Lösungsauswahl und die Einschränkung auf eine „optimale“ Lösung je Problemstellung auf. Die Qualität der Lösungsfindung hängt von einer präzisen Formulierung der Fitnessfunktion ab. Dies ist beim TP-Modul aufgrund der bereits erwähnten unvollständigen Faktenlage nur eingeschränkt möglich. Zudem ergibt sich neben dem Aufwand

der initialen Parametrierung aus der iterativen Vorgehensweise der Methode eine vergleichsweise hohe Rechenzeit. (vgl. Kapitel 4.2.7)

Tabelle 6.1 fasst die kriterienorientierte Bewertung zusammen. Für das Modul zur Fertigungssystemplanung bietet sich die Umsetzung des vorliegenden Referenz-FFS als Regelwerk innerhalb eines regelbasierten XPS an. Mit vertretbarem Aufwand, der aus der geringen Anzahl an Interdependenzen zwischen den Systemelementen resultiert, ist so eine nachvollziehbare und einfach zu wartende Lösung möglich.

Tabelle 6.1: Zusammenfassende Gegenüberstellung relevanter Wissensrepräsentationsmethoden

Methode	Modulübergreifende Kriterien				Zusätzliche Kriterien Modul Technologieplanung	
	Nachvollziehbarkeit des Lösungsweges	Geringer Pflegeaufwand (Erweiterung/Modifikation)	Moderater Aufwand zur Wissensakquisition	Moderater Modellierungsaufwand	Übertragbarkeit der Fallbeispiele in Wissensbasis	Alternative Lösungshinweise
Regelbasierte Systeme	◆	◆ ¹ /◆ ²	◆ ¹ /◆ ²	◆	◆	◇
Fallbasiertes Schließen	◆	◆	◆	◆	◆	◆
Fuzzy-Logik	◆	◇	◆	◇	◇	◆
Künstliche Neuronale Netze	◇	◆	◆	◇	◆	◇
Genetische Algorithmen	◇	◆	◇	◆	◆	◇

¹ bei geringer Modellkomplexität
² bei hoher Modellkomplexität

Methodenauswahl für FSP-Modul

Methodenauswahl für TP-Modul

- ◆ Anforderungen erfüllt
- ◆ Anforderungen teilweise erfüllt
- ◇ Anforderungen nicht erfüllt

Aufgrund der komplexen Zusammenhänge der Featureparameter und der unvollständigen Faktenlage zu ihrem Einfluss auf die Umsetzbarkeit der MMS-Technologie ist ein regelbasiertes System kein valider Lösungsansatz für die vorliegende Problemstellung in der Technologieplanung. CBR-Algorithmen hingegen greifen die bereits vorhandene Wissensbasis auf und lassen eine Akquise weiteren Wissens aus Folgeversuchen und Umsetzungen zu. Da sie mittels Ähnlichkeitsfunktion auch die Ausgabe verschiedener gewichteter Lösungsalternativen ermöglichen, fällt die Wahl beim TP-Modul auf diese Wissensrepräsentationsmethode.

6.2 Ableitung des Systemmodells

Nach der Festlegung geeigneter wissensbasierter Methoden (F2.1) werden im Folgenden zunächst das grundlegende Systemmodell und seine Teilsysteme konzeptionell erläutert. Eine detaillierte Ausarbeitung des Modells findet in den Kapiteln 6.3 und 6.4 statt.

6.2.1 Grundfunktionalität

Wie bereits in Kapitel 2.3 geschildert, laufen Fertigungssystem- und Technologieplanungsprozesse im Projekt nicht vollständig parallel ab und werden von unterschiedlichen Planungsteams durchgeführt. Aus diesem Grund wird beiden Benutzergruppen je ein eigenständig verwendbares Modul bereitgestellt. Bei Bedarf lassen sich Resultate aus dem Bewertungslauf während der Technologieplanung in die Wissensbasis des prozesseitig übergeordneten FSP-Moduls überführen (vgl. Abbildung 6.2).

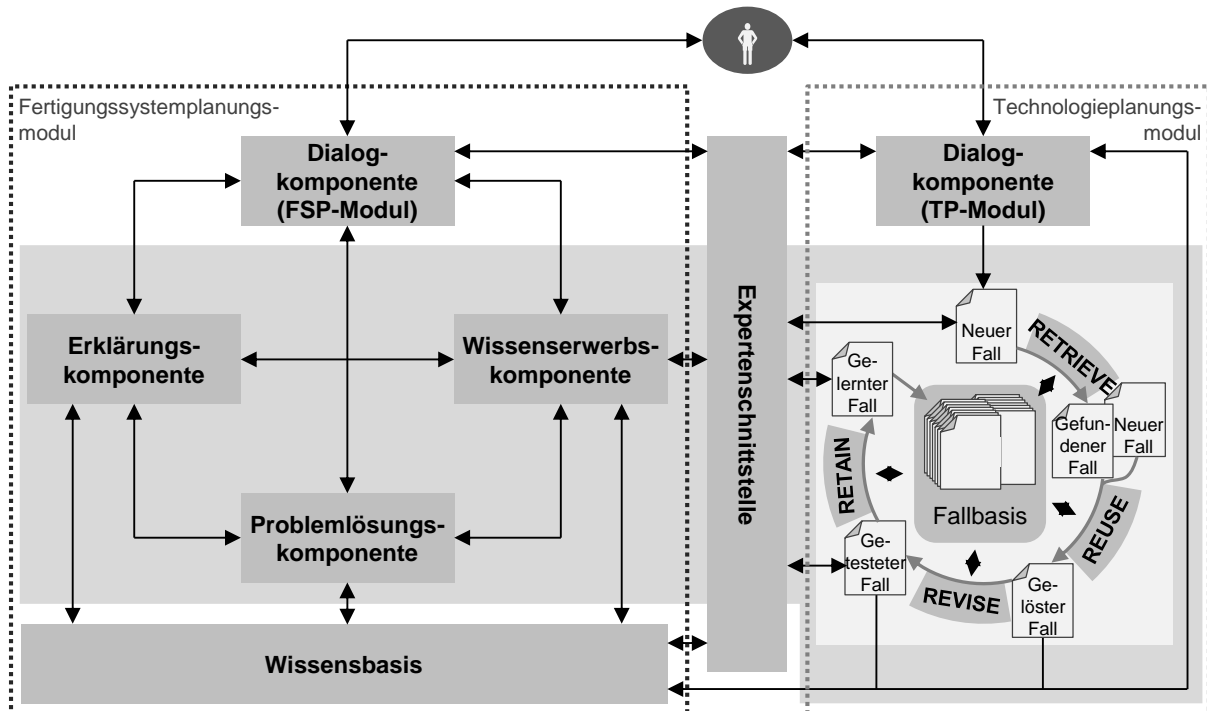


Abbildung 6.2: Systemmodell und Zusammenwirken der beiden Module

Auf diese Weise fließen die Ergebnisse der Feinbewertung der Werkstückfeatures direkt in die monetäre und ökologische Gesamtbewertung des Fertigungssystems ein. Ein weiteres, übergreifendes Dialogmodul wird somit überflüssig.

6.2.2 Bewertungsparameter zur Beurteilung wirtschaftlicher und ökologischer Auswirkungen beim Einsatz von MMS

Zur Beantwortung der Forschungsfrage F1.2 werden im Folgenden Parameter zur Bewertung der wirtschaftlichen und ökologischen Auswirkungen der MMS-Technologie auf den Lebenszyklus von FFS bestimmt.

6.2.2.1 Parameter zur wirtschaftlichen Einflussanalyse

Die Literatur bietet eine Fülle an Kennzahlen zur monetären Bewertung von Investitionen in der Industrie [WO14]. Im Zuge der in Kapitel 2.2 beschriebenen Lebenszykluskostenanalyse lassen sich die unter Abschnitt 5.2.3 definierten Kostenarten der ebenda beschriebenen Produktaufbruchstruktur zuordnen. Dieser Prozess wird nach [DIN04] als Auswahl der relevanten Kostenelemente bezeichnet. Die Komplexität der

Kostenstruktur wird in Abbildung 6.3 deutlich. Bei detaillierter Untersuchung lässt sich der Umfang der Kostenelemente verringern. So verursachen zahlreiche Systemelemente etwa keine Kosten für Betriebsmittel, Wasser oder Reinigungsmittel. Auch die Aufschlüsselung der Bedienpersonal- und Instandhaltungskosten auf einzelne Maschinen und Anlagen ist auf Basis der in Kapitel 5 ermittelten Daten nicht ohne Weiteres möglich. Eine Ausnahme bilden die Nebenbetriebe: Aufgrund separater interner Abrechnung sind diese Daten verfügbar (vgl. Abschnitte 5.2.3.2 und 5.3.2).

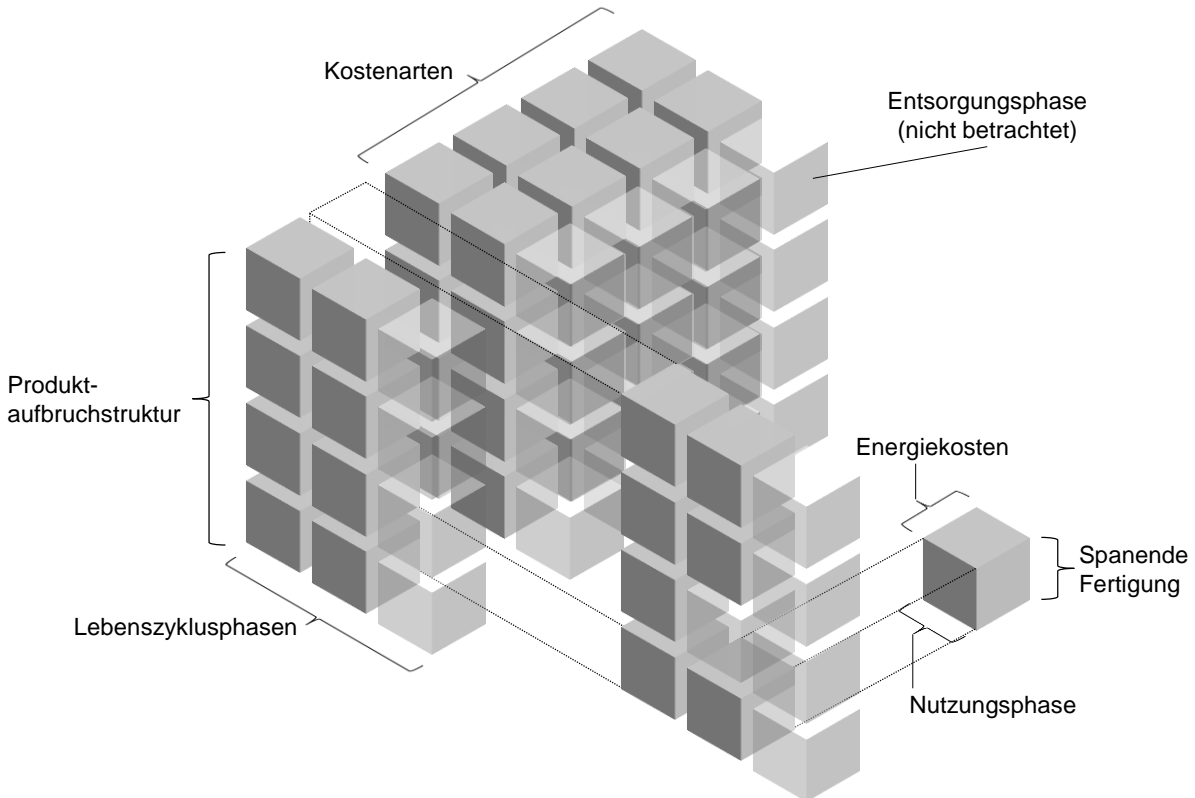


Abbildung 6.3: Schematische Darstellung der betrachteten Kostenelemente in Anlehnung an [DIN04]

Zur Bewertung der Lösungsalternativen des FFS für die Nass- bzw. MMS-Bearbeitung nach Ableitung und Quantifizierung der Kostenelemente bieten sich gemäß [VDI05] die Verfahren der Investitionsrechnung an. Diese werden in statische und dynamische Methoden gegliedert (vgl. Abbildung 6.4).

Dynamische Verfahren unterscheiden sich von den statischen darin, dass die Zeitpunkte von Aus- und Einzahlungen einer Investition Berücksichtigung finden. Durch Auf- bzw. Abzinsung (Diskontierung) werden die Werte sämtlicher Zahlungsströme im Lebenszyklus zu einem vorher festgelegten Bezugszeitpunkt ermittelt. [BLOH12] Statische Verfahren ermöglichen zwar ebenfalls die Berücksichtigung von Ein- und Auszahlungen, zur Anwendung kommt im Rahmen der LCC allerdings ein periodisierter Zeitraum. In dieser fiktiven Durchschnittsperiode werden die etwa während der Nutzungsphase auftretenden Zahlungsströme gemittelt dargestellt. Eine Bewertung der

Zins- und Liquiditätsauswirkungen einzelner Ein- und Auszahlungen ist somit nicht möglich. [VDI05, BLOH12]

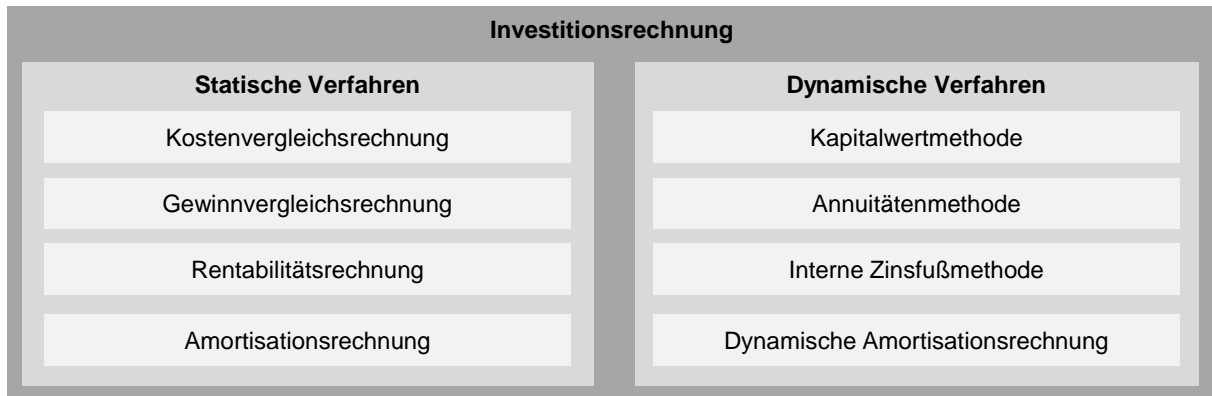


Abbildung 6.4: Einteilung ausgewählter Verfahren der Investitionsrechnung in Anlehnung an [WEBE96, GÖTZ14]

Bei der Kapitalwertmethode wird der Wert aller im Laufe des Lebenszyklus anfallenden Einzahlungen (Σ_j) und Auszahlungen (A_j) auf einen Bezugszeitpunkt auf- oder abgezinst. Häufig wird der Investitionsbeginn ($j = 0$) als Bezug herangezogen. [WÖHE13] Der Kapitalwert zu diesem Zeitpunkt (κ_0) wird berechnet aus:

$$\kappa_0 = -A_0 + \sum_{j=1}^J \frac{\Sigma_j - A_j}{(1 + i_z)^j} \quad 6.1$$

Dabei wird unter J der Betrachtungszeitraum bzw. die Lebensdauer, i_z der Kalkulationszinssatz, j die Periode und A_0 die Anfangszahlung zum Zeitpunkt $j = 0$ verstanden. Ein positiver Kapitalwert bedeutet, dass durch die Investition ein über die festgelegte Verzinsung hinausgehender Überschuss generiert wird. Die Annuitätenmethode als finanzmathematische Variation der Kapitalwertmethode [HOFF08] wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgt.

Eine Erweiterung der Kapitalwertmethode ist die interne Zinsfußmethode: Der interne Zinsfuß ist als jener Zinssatz definiert, bei dem der Kapitalwert gleich Null ist. Er ermöglicht die Bewertung der Rendite über den Vergleich von internem Zinsfuß und kalkulatorischer Zinsen. [WEBE96]

Um den Einfluss des Zeitpunkts des Anfallens von Kosten im Lebenszyklus zu berücksichtigen, wird zur Bewertung der Lösungsvarianten die Kapitalwertmethode herangezogen. Diese Vorgehensweise wird auch in der VDI-Richtlinie 2884 empfohlen [VDI05]. Da die Problemstellung den Vergleich zweier sich gegenseitig ausschließender Investitionsprojekte vorsieht, ist Formel 6.1 so anzupassen, dass der Kapitalwert der Differenzinvestition $\kappa_{FK-FM,0}$ betrachtet wird. Aus den aus Kapitel 5.3.2 hervorgehenden Prämissen, dass das Werkstück sowohl in der Nass- als auch in der MMS-Bearbeitung bei gleicher Qualität in gleicher Taktzeit gefertigt wird und anschließend identische Eigenschaften aufweist, ist zudem ableitbar, dass die Ertragsseite (Summe der Einzahlungen Σ_j) auf die Einnahmen durch den Verkauf des Spanmaterials (vgl.

Kapitel 5.3.2) beschränkt ist. In Anlehnung an Wöhe und Müller werden folglich die Vorzeichen von Ein- und Ausgaben invertiert und der angepasste, „aufwandsorientierte Kapitalwert“ [WÖHE13, MÜLL07] der Differenzinvestition $\kappa_{FK-FM,0}$ definiert als:

$$\kappa_{FK-FM,0} = -(\Lambda_{0,FK} - \Lambda_{0,FM}) + \sum_{j=1}^J \frac{\Lambda_{j,FK} - \Sigma_{j,FK} - \Lambda_{j,FM} + \Sigma_{j,FM}}{(1 + i_z)^j} . \quad 6.2$$

Werte, die einem FFS mit Nassbearbeitung zugeordnet sind, werden in diesem Zusammenhang mit dem Index FK versehen, Werte mit Bezug zu MMS-FFS mit dem Index FM.

Unter den jeweils gegebenen Prämissen und Eingangsparametern lässt sich der Kapitalwert wie folgt interpretieren:

- Ein positiver Kapitalwert $\kappa_{FK-FM,0}$ bedeutet, dass das FFS mit MMS rentabler ist als die Variante der Nassbearbeitung.
- Ist $\kappa_{FK-FM,0}$ gleich Null, weisen beide Varianten eine identische Rentabilität auf.
- Bei einem negativen Kapitalwert $\kappa_{FK-FM,0}$ ist das Fertigungssystem mit herkömmlicher Kühlschmierstrategie aus Rentabilitätsgründen vorzuziehen.

Aufgrund der genannten Vorteile wird der aufwandsorientierte Kapitalwert der Differenzinvestition $\kappa_{FK-FM,0}$ als zentraler ökonomischer Bewertungsparameter herangezogen. Als Periode wird der Zeitraum eines Jahres gewählt, die Betrachtungsdauer J ist vom Nutzer fallspezifisch variierbar.

Zum besseren Verständnis werden dem Anwender zusätzlich die Beschaffungskosten $\Lambda_{0,FK}$, $\Lambda_{0,FM}$ sowie die jeweiligen Betriebskosten eines Jahres bei 100 Prozent Auslastung ausgegeben. Aus den kumulierten Barwerten der Differenzinvestition wird zudem die dynamische Amortisationszeit j_A nach [GÖTZ14] berechnet. In diesem Zusammenhang gibt j_{A^*} die Periode (bzw. in diesem Fall das Jahr) an, in der letztmalig ein negativer kumulierter Barwert bzw. nutzungszeitabhängiger Kapitalwert auftritt:

$$\begin{aligned} &\text{wenn für } j = j_{A^*} \text{ gilt: } \kappa_{FK-FM}(j_{A^*}) < 0, \text{ und} \\ &\text{wenn für } j = j_{A^*} + 1 \text{ gilt: } \kappa_{FK-FM}(j_{A^*} + 1) \geq 0, \text{ dann gilt:} \end{aligned} \quad 6.3$$

$$j_A = j_{A^*} + \frac{\kappa_{FK-FM}(j_{A^*})}{\kappa_{FK-FM}(j_{A^*}) - \kappa_{FK-FM}(j_{A^*} + 1)} .$$

6.2.2.2 Parameter zur ökologischen Einflussanalyse

Wackernagel und Kane schlagen eine „ökologische Buchführung“ mittels Ressourcenbilanzen anhand ökologischer Fußabdrücke vor. Letztere werden je Stoff berechnet, indem jedem Stoffstrom die ökologisch produktive Fläche entgegengestellt wird, die

erforderlich ist, um den Strom aufrechtzuerhalten. Die öffentliche Aufmerksamkeit richtet sich in diesem Zusammenhang häufig auf den CO₂-Fußabdruck. [WK10]
 Auf Grundlage der EG-Verordnung Nr. 1221/2009 empfiehlt das Gemeinschaftssystem für das freiwillige Umweltmanagement (engl.: *Eco-Management and Audit Scheme*, kurz: EMAS) die ökologische Bewertung von Organisationen und Betrieben anhand von „Kernindikatoren [...] für die Umweltleistung“. Diese Indikatoren werden auf Umweltauswirkungen in sechs Schlüsselbereichen heruntergebrochen (vgl. Tabelle 6.2). [EGV09]

Tabelle 6.2: Schlüsselbereiche und Maßeinheiten für Kernindikatoren nach [EGV09]

Schlüsselbereich	Definition	Einheit
Energieeffizienz	Jährlicher Gesamtenergieverbrauch	MWh oder GJ
	Gesamtverbrauch an erneuerbaren Energien	MWh oder GJ
Materialeffizienz	Jährlicher Massenstrom der verschiedenen Einsatzmaterialien	t
Wasser	Jährlicher Wasserverbrauch	m ³
Abfall	Jährliches Abfallaufkommen nach Abfallart	t
	Gesamtes jährliches Aufkommen an „gefährlichen“ Abfällen	kg oder t
Biologische Vielfalt	Flächenverbrauch bebauter Fläche	m ²
Emissionen	Jährliche Gesamtemissionen von Treibhausgasen (mind. CO ₂ , Hydrofluorkarbonat, Perfluorkarbonat, SF ₆)	t CO ₂ -Äquivalent
	Jährliche Gesamtemissionen in die Luft (mind. SO ₂ , NO _x , PM)	kg oder t

Neben diesen absoluten Kennzahlen wird von teilnehmenden Unternehmen im Rahmen des EMAS auch die Angabe relativer Kenngrößen gefordert. Die herangezogene Bezugsgröße variiert in Abhängigkeit von der Art des Unternehmens und Produkts. Produzierenden Branchen wie der im Kontext der Problemstellung betrachteten Automobilindustrie wird wahlweise die Angabe der Gesamtbruttowertschöpfung in Millionen Euro oder die Gesamtausbringungsmenge in Tonnen empfohlen. Allerdings werden auch branchenübliche Bezugsgrößen wie Liter, Quadratmeter oder Produkteinheiten akzeptiert. [BMU13]

Deutsche Automobilkonzerne nehmen am EMAS teil und weisen in ihren Geschäfts- und Nachhaltigkeitsberichten sowie standortspezifischen Umwelterklärungen unterschiedliche Kennzahlen aus, die sich an die vom EMAS vorgegebenen Größen anlehnen (vgl. Tabelle 6.3). Auf Konzernebene werden Umweltauswirkungen meist auf die Anzahl produzierter Fahrzeuge bezogen, auf Standortebene werden produzierte Einheiten herangezogen. Während sowohl die *Daimler AG* (Daimler) als auch die *Volkswagen AG* (Volkswagen) letztere in produzierte Tonnen umrechnet, zieht die BMW Group etwa im Werk Steyr die hergestellten Motoren heran. [BMW15a, BMW15b, DAIM15a, DAIM15b, VOLK15a, VOLK15b] Der von Daimler und Volkswagen verfolgte, eng an die genannte EG-Verordnung angelehnte Ansatz der Umrechnung der

Produkte in Masse beinhaltet keine Informationen über die fertigungstechnologische Komplexität des Bauteils. Bei der BMW Group hingegen bleibt unberücksichtigt, dass der Standort auch Komponenten aus anderen Werken bezieht und das Produktionsnetzwerk selbst mit Werkstücken beliefert. Ein direkter Vergleich zweier Komponentenwerke ist anhand der genannten Kennzahlen nicht möglich.

Tabelle 6.3: Berichtete und beziente Umweltkennzahlen ausgewählter Automobilkonzerne und zugehöriger Motoren- und Komponentenwerke [BMW15a, BMW15b, DAIM15a, DAIM15b, VOLK15a, VOLK15b]

Unternehmen Werk	Berichtete und beziente Umweltkennzahlen							
	Energieeffizienz	Wasser	Abwasser	Abfälle zur Beseitigung	Abfälle zur Verwertung	Emissionen VOC ¹	Emissionen CO ₂	Bebaute Fläche
BMW Group	MWh / Fahrzeug	m ³ / Fahrzeug	m ³ / Fahrzeug	kg / Fahrzeug	--	kg / Fahrzeug	t / Fahrzeug	--
Werk Steyr (Motoren)	MWh / Motor	l / Motor	--	t / prod. t	t / prod. t	kg / prod. t	t / prod. t	m ² / prod. t
Daimler AG	GWh	m ³	--	t	t	kg / Fahrzeug	t / Fahrzeug	ha
Werk Untertürkheim (Motoren, Komponenten)	MWh / prod. t	m ³ / prod. t	--	t / prod. t	t / prod. t	t / prod. t	t / prod. t	m ² / prod. t
Volkswagen AG	kWh / Fahrzeug	m ³ / Fahrzeug	m ³ / Fahrzeug	kg / Fahrzeug	kg / Fahrzeug	kg / Fahrzeug	kg / Fahrzeug	--
Werk Salzgitter (Motoren, Komponenten)	MWh / prod. t	m ³ / prod. t	--	t / prod. t	t / prod. t	t / prod. t	t / prod. t	m ² / prod. t

¹Flüchtige organische Verbindungen (z. B. SO₂, NO_x, PM) / engl.: *Volatile organic compounds*

Zur Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung zieht Reinhardt drei Größen heran: Input-, Output- und Produkt-Ressourcenströme. Als Input werden Ressourcen verstanden, die von der Umgebung in die Fertigungsprozesskette eingehen. Outputströme verlassen die Prozesskette, ohne in das Produkt einzugehen und die wertschöpfenden Produkt-Ressourcenströme gehen in das Werkstück ein. Energieeffizienz definiert sie als Verhältnis der Energieströme zur Erzeugung der geforderten Produkteigenschaften zum Input-Energiestrom, Materialeffizienz als Quotient von Produkt-Materialstrom und der Summe aus Input- und Output-Materialstrom. Die Summe beider Quotienten wird als Ressourceneffizienz bezeichnet. [REIN13] Für den vorliegenden Problemfall ist diese Methodik aus folgenden Gründen ungeeignet:

- Die Berechnung der erforderlichen Energieströme zur Erzeugung der spezifizierten Werkstückeigenschaften bedeutet für die untersuchten Bauteile einen nicht unerheblichen Aufwand.

- Der Eingang von Material in das Produkt in Form von Anbauteilen unterscheidet sich zwischen den bewerteten Prozessvarianten Nass- und MMS-Bearbeitung nicht.
- Eine Messung relevanter Output-Stoffströme, etwa abfließender Kühlschmierstoffe oder Aerosolkomponenten, ist an den betrachteten Fertigungseinrichtungen nur begrenzt möglich und mit hohem Aufwand verbunden.

Angesichts der Teilnahme der deutschen Automobilindustrie am EMAS bietet sich für FFS die Ableitung von ökologischen Kennzahlen an, die sich an der genannten EG-Verordnung Nr. 1221/2009 orientieren. Unter Berücksichtigung der im Kapitel 5 definierten Betriebsstoffe und der zugehörigen elektrischen Leistungsaufnahmen werden daher folgende betriebsstoffspezifische Energiekenngrößen definiert:

$$\varepsilon_{Elektrisch} = \frac{P_{Elektrisch} \cdot t_{Betrieb}}{n_{WS,P}} = \frac{E_{Elektrisch}}{n_{WS,P}}, \quad 6.4$$

$$\varepsilon_{KSS} = \frac{P_{KSS} \cdot t_{Betrieb}}{n_{WS,P}} = \frac{E_{KSS}}{n_{WS,P}}, \quad 6.5$$

$$\varepsilon_{DL} = \frac{P_{DL} \cdot t_{Betrieb}}{n_{WS,P}} = \frac{E_{DL}}{n_{WS,P}}, \quad 6.6$$

$$\varepsilon_{Gesamt} = \varepsilon_{Elektrisch} + \varepsilon_{KSS} + \varepsilon_{DL} = \frac{E_{Gesamt}}{n_{WS,P}}. \quad 6.7$$

Analog zur monetären Kennzahl des aufwandsbezogenen Kapitalwerts der Differenzinvestition (vgl. Kapitel 6.2.2.1) werden auch die ökologischen Bewertungsparameter periodenbezogen betrachtet. Die Periodendauer beträgt ebenfalls ein Jahr. Als Summe der spezifischen Energieumsätze der betrachteten Betriebsstoffe bezeichnet ε_{Gesamt} demnach den spezifischen Energieumsatz (in der Literatur auch vereinzelt als „Energieverbrauch“ bezeichnet) pro Werkstück im Laufe eines Jahres und gilt im weiteren Verlauf als zentrale Energiekennzahl. Als Bezugsgröße dient die innerhalb einer Periode produzierte Anzahl an Werkstücken $n_{WS,P}$. Die Anlagenlaufzeit innerhalb einer Periode $t_{Betrieb}$ stellt in diesem Kontext die Laufzeit des FFS dar und ist abhängig von den Arbeitswochen pro Periode $n_{W,Arbeit}$, der Anzahl an Arbeitsschichten je Arbeitswoche $n_{Schicht,W}$, der Dauer einer Schicht $t_{Schicht}$ und der kumulierten Dauer aller geplanten Produktionsunterbrechungen (PU) t_{PU} in der Periode:

$$t_{Betrieb} = n_{W,Arbeit} \cdot n_{Schicht,W} \cdot t_{Schicht} - t_{PU} \leq 1 a. \quad 6.8$$

In Anlehnung an die monetäre Bewertung ist auch bei der ökologischen eine Differenzbetrachtung erforderlich, um Umweltauswirkungen beider Kühlschmierstoffstrategien direkt vergleichen zu können:

$$\Delta\varepsilon_{Gesamt} = \varepsilon_{Gesamt,FK} - \varepsilon_{Gesamt,FM}. \quad 6.9$$

Neben der Energie sind im vorliegenden Fall weitere Betriebsstoffe relevant. Im Gegensatz zum Energieumsatz werden direkt die Differenzbeträge zwischen der Nass-

und MMS-Bearbeitung herangezogen, um die Datenerfassung auf die im Rahmen der vorliegenden Arbeit relevanten Größen zu beschränken.

Der Wasserverbrauch eines FFS wird maßgeblich durch die Kreisläufe von Kühlschmierstoffemulsionen und Kühlmittel sowie Reinigungsprozesse bestimmt. Den in Kapitel 5 dargestellten Untersuchungen zufolge unterscheiden sich FFS mit Nassbearbeitung und solche mit Einsatz von MMS im Bereich Wasser beim Verbrauch der KSS-Versorgung. In Anlehnung an die Energiekennzahlen wird mit $\Delta\sigma_{Wasser}$ der spezifische Wasserverbrauch abgeleitet:

$$\Delta\sigma_{Wasser} = \sigma_{Wasser,FK} - \sigma_{Wasser,FM} = \frac{\sum_{j=0}^J \frac{\Delta V_{Wasser,j}}{n_{WS,j}}}{J} . \quad \mathbf{6.10}$$

Analog zur ökonomischen Betrachtung bezeichnet J in diesem Fall die Anzahl der Perioden innerhalb der Lebensdauer, $\Delta V_{Wasser,j}$ den Differenzbetrag des Wasserverbrauchs von FFS mit KSS- bzw. MMS-Technologie im Laufe der jeweiligen Periode j und $n_{WS,j}$ die gefertigten Werkstücke während dieser. Diese Mittelwertbetrachtung ist zur Berücksichtigung unregelmäßig anfallender Wasserverbräuche erforderlich. Dazu zählen die Befüllung des Systems bei Erstinbetriebnahme und Badwechsel. Unter letzteren wird der vollständige Austausch des Kühlschmierstoffs bei Erreichen der Badstandzeit verstanden. Sie beträgt im Werk Steyr acht Jahre [BMW15b].

Auch auf Abfälle haben die untersuchten Kühlschmierstrategien gemäß Kapitel 5 unterschiedliche Auswirkungen. Die Filtervliese von KSS-Filteranlagen sind nicht nur kostenseitig relevant (vgl. Kapitel 6.2.2.1), sondern gelten aufgrund der Kontamination mit Schmierstoffen und Additiven als Abfälle zur Entsorgung [BMW15b]. Der spezifische Anfall von Abfällen $\Delta\sigma_{Abfall}$ ist definiert als:

$$\Delta\sigma_{Abfall} = \sigma_{Abfall,FK} - \sigma_{Abfall,FM} = \frac{\Delta m_{Abfall,P}}{n_{WS,P}} = \Delta m_{Abfall,St} \cdot n_{WS,P} . \quad \mathbf{6.11}$$

Der je Periode bzw. Werkstück anfallende Differenzbetrag der Masse an Abfällen zur Entsorgung beim Vergleich von FFS mit Nass- und MMS-Bearbeitung wird in diesem Kontext als $\Delta m_{Abfall,P}$ bzw. $\Delta m_{Abfall,St}$ bezeichnet.

Aus dem höheren Flächenverbrauch von FFS mit Nassbearbeitung aufgrund der erforderlichen KSS-Filteranlage lässt sich auch eine Kennzahl zur biologischen Vielfalt nach EMAS ableiten. Diese bleibt allerdings unbeeinflusst, wenn die Anlage im Keller direkt unterhalb des Fertigungssystems errichtet wird, da dem EMAS gemäß die Fläche des bebauten Landes herangezogen wird [BMU13]. Der spezifische Flächenbedarf $\Delta\sigma_{Fläche}$ leitet sich damit wie folgt ab:

$$\Delta\sigma_{Fläche} = \sigma_{Fläche,FK} - \sigma_{Fläche,FM} = \frac{A_{Bebaut,KSS}}{n_{WS,P}} \cdot C_{EMAS}, \quad C_{EMAS} \in [0,1] . \quad \mathbf{6.12}$$

$A_{Bebaut,KSS}$ beschreibt die für die KSS-Filteranlagen erforderliche Fläche. C_{EMAS} gibt an, welcher Flächenanteil der KSS-Anlage im Sinne des EMAS heranzuziehen ist.

Die vom EMAS geprägten Größen der Materialeffizienz und Emissionen werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt. Dies liegt darin begründet, dass verbrauchte Schmierstoffe und Additive bereits kosten- und abfallseitig berücksichtigt werden und dass bei den betrachteten Kühlschmierstrategien in den untersuchten FFS kein Unterschied in den direkten Emissionen der EMAS-Bezugsgrößen festgestellt wurde. Unterschiede in den indirekten Emissionen von CO₂, die aus Abweichungen im Energieumsatz resultieren, werden im Rahmen der Energiekennzahlen erfasst.

6.2.3 Teilsysteme und Zusammenwirken

Das Modul zur wirtschaftlichen und ökologischen Bewertung der MMS-Technologie in der **Fertigungssystemplanung** basiert auf einem regelbasierten XPS nach Abbildung 4.4. In der **Wissensbasis** wird das in Kapitel 5.2.1 vorgestellte Referenzsystem der mechanischen Fertigung mit seinen Systemelementen, deren Wechselwirkungen und Abhängigkeiten von Eingangsgrößen modelliert. Diesem Referenzmodell der Nassbearbeitung wird ein identisches, um die Erkenntnisse des Kapitels 5.3 ergänztes Modell für die MMS-Bearbeitung gegenübergestellt. Die Wissensbasis dient als Datengrundlage im Bewertungs- und Erklärungsprozess. Sie ist sowohl über eine **Expertschnittstelle** als auch über die **Wissenserwerbskomponente** modifizierbar.

Auf Basis der Eingangsdaten kreiert und dimensioniert die **Problemlösungskomponente** geeignete Varianten der Referenzsysteme für die Nass- sowie MMS-Bearbeitung und bewertet diese nach monetären und ökologischen Gesichtspunkten. Sie greift dabei auf Regelwissen aus der Wissensbasis zurück und appliziert dieses auf den spezifischen Problemfall. Ausgangsdaten werden anschließend an die **Dialogkomponente** ausgegeben. Diese dient der Interaktion mit dem Fertigungssystemplaner. Im ersten Schritt wird diesem nur die monetäre und ökologische Bewertung der Gesamtsysteme und ihrer Systemelemente präsentiert.

Weitere Informationen über die dimensionierten FFS-Varianten sind mithilfe der **Erklärungskomponente** aufrufbar. Dies wird in zwei Stufen ermöglicht (vgl. Abbildung 6.5): Bei Bedarf hat der Nutzer die Möglichkeit, Art und Anzahl der Maschinen und Anlagen einzusehen, die Bestandteil der vorgeschlagenen FFS-Varianten sind. Des Weiteren wird ihm Einsicht in den Lösungsfindungsprozess gewährt, indem die systemelementspezifischen Berechnungen sowie die diesen zugrundeliegenden Prämissen und Zusammenhänge strukturiert erfasst und dargestellt werden.

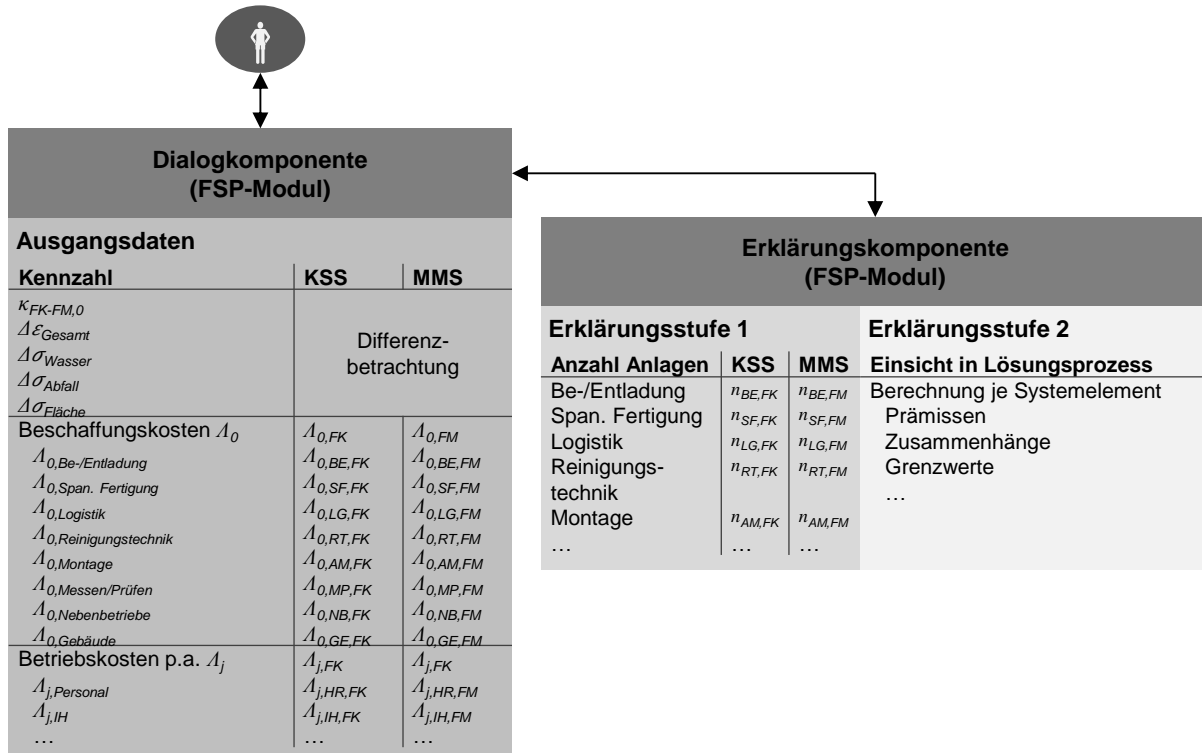


Abbildung 6.5: Schematische Darstellung der Benutzerausgabe des FSP-Moduls

Obwohl die Komponenten zur Erklärung, Problemlösung und Wissensakquisition sowie eine Wissensbasis implizit vorhanden sind, weicht der Aufbau des unabhängig vom FSP-Modul funktionsfähigen, auf CBR-Methoden basierenden Moduls zur **Technologieplanung** vom zuvor beschriebenen ab. Die Nutzereingabe setzt sich aus einer vom Anwendungsfall abhängigen Anzahl an Fällen zusammen, die jeweils ein Feature des zu bewertenden Werkstücks in einer vom System verarbeitbaren Form beschreiben (vgl. Abbildung 6.6).

Für jeden eingegebenen Fall werden in der Wissensbasis Vergleichsfälle gesucht und nach Ähnlichkeit bewertet (**Retrieve**). Sind ähnliche Fälle bereits in MMS umgesetzt worden, gilt eine Machbarkeit als gegeben. Zudem wird auf Basis der in Kapitel 5.1 durchgeführten Untersuchungen ein qualitativer Kritikalitätswert ausgegeben. Bei Adaption der ausgewählten Vergleichsfälle auf den Problemfall (**Reuse**) werden die Werkzeugkosten des MMS-Features berechnet.

Um dem Nutzer die Einschätzung der Lösungsgüte zu ermöglichen und ihm gegebenenfalls eine Korrekturmöglichkeit einzuräumen, wird bei der Berechnung der Werkzeugkosten ein Unsicherheitsfaktor ausgegeben (**Revise**). Durch das Ablegen gelöster oder ergänzender Fälle in der Wissensbasis über die Expertenschnittstelle (**Retain**) ist die Erweiterbarkeit der Lösung gegeben.

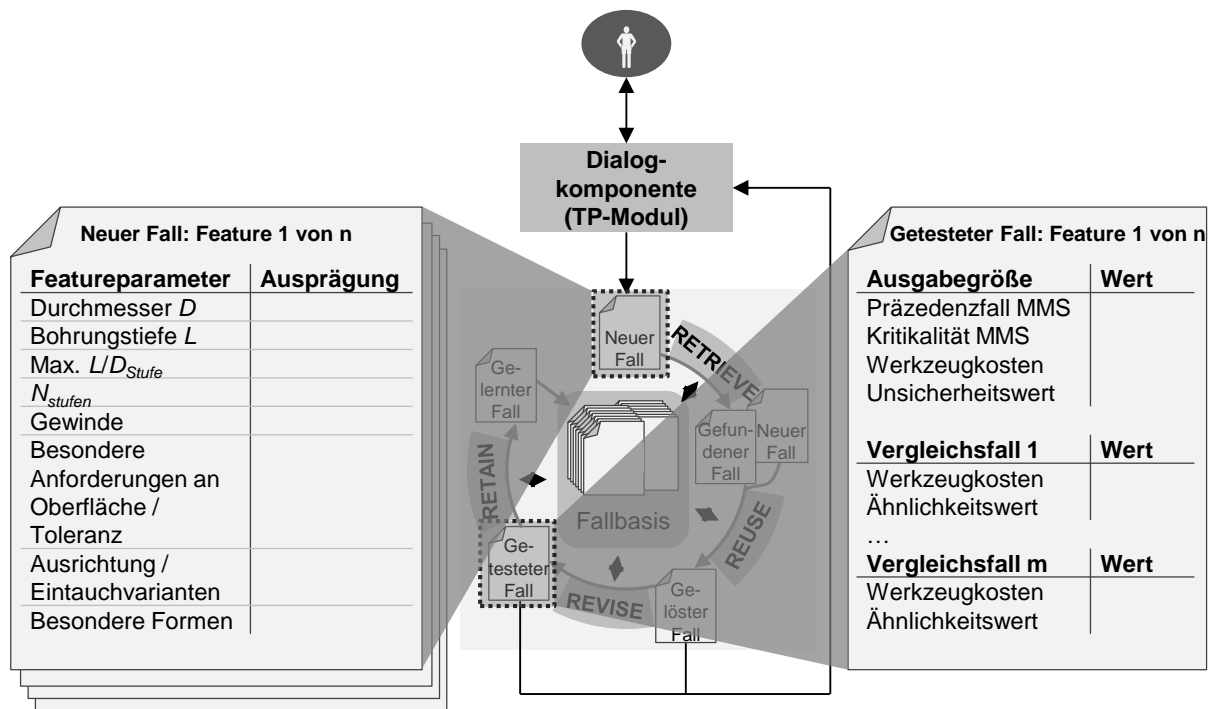


Abbildung 6.6: Schematische Darstellung der Benutzerein- und -ausgaben des TP-Moduls

6.3 Implementierung des Moduls zur Fertigungssystemplanung

Die im Folgenden beschriebene implementierte Version des Moduls zur Fertigungssystemplanung ist als regelbasiertes Expertensystem anhand der Methode der Vorwärtsverkettung (engl.: *forward-reasoning*) aufgebaut. Diese Art der Wissensverarbeitung ermöglicht die Ableitung einer Schlussfolgerung auf Basis vorab vorgegebener Prämissen in Form von Eingangsdaten. (vgl. Kapitel 4.2.2)

Da das System für den Einsatz in der Fertigungssystemplanung der BMW Group entwickelt wird, lehnt es sich in Layout, Aufbau und Kalkulationsprämissen an ein bereits bestehendes, intern verwendetes Tool zur Planung von Investitionskosten an [BMW13]. Auf diese Weise ist dem Planungspersonal ein Arbeiten in weitgehend bekannter und gewohnter Softwareumgebung möglich. Wesentliche Unterschiede zur Bestandslösung sind insbesondere die Unterscheidung der Technologien KSS und MMS, die Betrachtung des Lebenszyklus in den Phasen der Beschaffung und Nutzung sowie die Berücksichtigung der in Kapitel 6.2.2 genannten ökonomischen und ökologischen Parameter.

6.3.1 Wissensbasis

Kernelement der Wissensbasis ist die Modellierung des in Kapitel 5.2.1 vorgestellten Referenzsystems der mechanischen Fertigung samt der zugrundeliegenden Regeln zu Struktur und Aufbau. Ergänzt wird dieses Modell um die in Kapitel 5.3 erläuterten Maßnahmen zur Anpassung eines FFS an den Betrieb mit MMS-Technologie sowie

die ökonomischen und ökologischen Eigenschaften des Systems und seiner Elemente im Laufe des Lebenszyklus.

6.3.1.1 Struktur der Datenbank

Regeln repräsentieren Zusammenhänge zwischen Objekten oder Objektgruppen, die zuvor anhand diskreter Werte zu beschreiben sind (vgl. Kapitel 4.2.2). Dazu wird zunächst die Struktur des Referenzsystems und ihrer Objekte als Datenmodell abgebildet. Zur Anwendung kommt dabei eine relationale Datenbank, die Regeln in Form wechselseitiger Beziehungen zwischen den Objekten erfasst. In relationalen Datenbanken erfolgt die Beschreibung von Objekten anhand von Attributen und ihren Ausprägungen. Relationale Datenbanken stellen Objektgruppen als Tabellen dar, deren Spalten den Objektattributen und deren Zeilen einzelnen Datensätzen entsprechen. Dabei gilt das Gebot der redundanzfreien Datenspeicherung: Einmal in einer Tabelle gespeicherte Informationen sind bei Bedarf in anderen Tabellen über Verweise auf die ursprüngliche Tabelle aufzurufen. Erstes Attribut einer jeden Tabelle ist daher der sogenannte Primärschlüssel (engl.: *primary key*, kurz: PRK). Entspricht ein Attribut einer Tabelle *A* dem PRK einer anderen Tabelle *B*, wird der zugehörige Wert in Tabelle *A* über den sogenannten Fremdschlüssel (engl.: *foreign key*, kurz: FRK) aufgerufen, der auf den PRK der Tabelle *B* referenziert. [SAUE02]

Um die Verarbeitbarkeit eingegebener Daten zu gewährleisten, kommen in Abhängigkeit vom Attribut unterschiedliche Datentypen zum Einsatz. Diese Vorgehensweise verhindert Fehlberechnungen, die auf nicht verarbeitbare Eingabeparameter zurückzuführen sind, und vereinfacht die Pflege des Datenbanksystems. Zu den verwendeten Datentypen zählen natürliche und reelle Zahlen, Texte und der sogenannte Aufzählungstyp. Letzterer ist ein Datentyp mit einer endlichen Wertemenge, deren Elemente zuvor eindeutig zu deklarieren sind. Je Attribut dieses Datentyps wird eine Tabelle angelegt, die sämtliche zulässigen Werte beinhaltet. Ein Sonderfall des Aufzählungstyps ist der logische Datentyp Boolean: Sein Wertebereich umfasst lediglich die Aussagen *wahr* oder *falsch*.

Jeder Berechnungslauf basiert auf einem eindeutigen Eingangsparemeter-, Prämissen- und Stellhebelsatz. Diese werden auf zwei *FFS* appliziert: eines mit MMS-Technologie, das andere auf Basis der Nassbearbeitung. Die *Stellhebel*-Tabelle fasst sämtliche Attribute der Art Aufzählungstyp zusammen und stellt die Werte anderen Tabellen zur Referenzierung über den Fremdschlüssel zur Verfügung. Sie bietet außerdem die Möglichkeit, einzelnen Attributen je nach Ausprägung einen Faktor zuzuweisen, der in spätere Berechnungen einfließt. Daher ist sie vor der Nutzung des FSP-Moduls im benötigten Umfang zu befüllen. Die Tabelle *Prämissen* ermöglicht darüber hinaus die Angabe grundlegender Zielwerte bzw. Berechnungsprämissen wie bei-

spielsweise die Gesamtanlageneffektivität. Projektspezifische *Eingangsparameter* gemäß Abbildung 6.1 sind in der gleichnamigen Tabelle anzugeben.

Grundlage jedes FFS sind die Systemelemente. Ein FFS beinhaltet mehrere *Systemelementklassen* wie etwa Logistik und Reinigungstechnik. Zwischen beiden Objektgruppen gilt folglich die Beziehung 1:n. Üblicherweise sind mehrere *Systemelementarten* einer Systemelementklasse zugehörig, so etwa die Arten der Ein- bzw. Doppelspindel-BAZ der Klasse Spanende Fertigung (ebenfalls eine 1:n-Beziehung). Eine Art beinhaltet eine Anzahl an *Systemelementen*, beispielsweise fünf Einspindel-BAZ (Beziehung 1:n). Anzahl und Ausprägung der Systemelemente unterliegen spezifischen Regeln, die im Folgenden unter dem Begriff *Skalierungsart* zusammengefasst werden. Jedes Systemelement ist einer Skalierungsart eindeutig zuordenbar. Eine Skalierungsart kann jedoch mehreren Systemelementen zugeordnet werden. Daher liegt in diesem Fall eine Beziehung der Art n:1 vor. Aus der Skalierungsart lassen sich für jedes Systemelement *Beschaffungskosten* eindeutig ableiten. *Betriebskosten* wiederum sind je nach Typ der Systemelementart (Energiekosten) oder dem FFS (beispielsweise Personalkosten) eindeutig zuzuweisen (vgl. Abbildung 6.7).

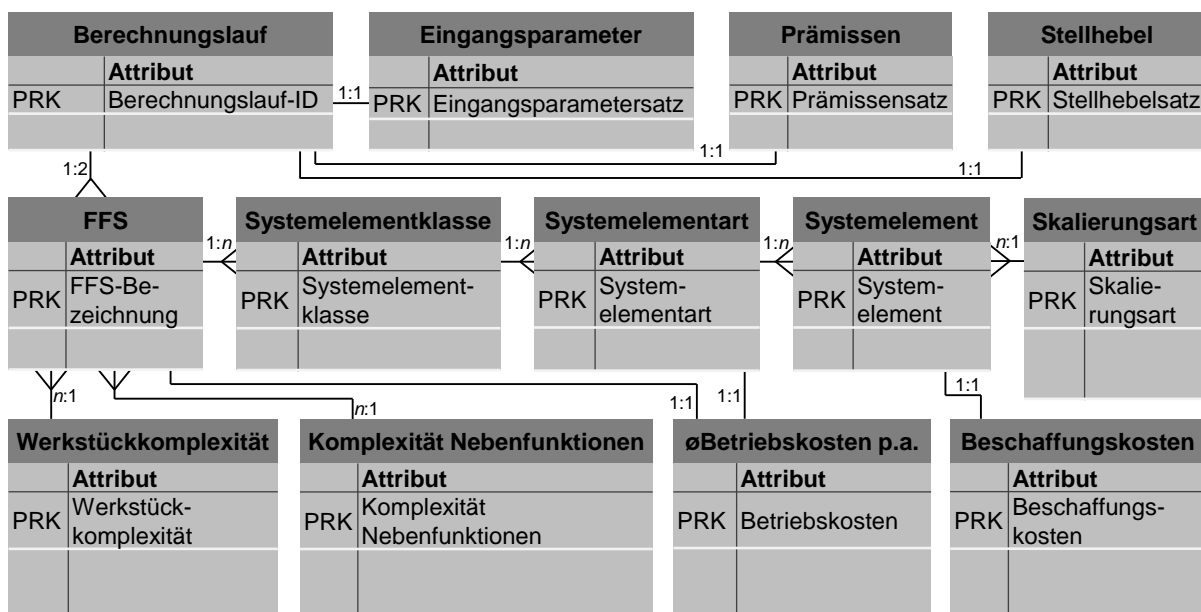


Abbildung 6.7: Schematische Darstellung des entwickelten relationalen Datenbankmodells

Die Komplexität des Werkstücks und der Nebenfunktionen Einrichtungs- und Steuerungstechnik hängt von mehreren Parametern mit eingeschränktem Wertebereich ab. Deren endliche Anzahl an Kombinationsmöglichkeiten wird in zwei separaten Auswahltabellen hinterlegt, wobei jeder Kombination als PRK ein kodierter Text zugewiesen wird. Jedem FFS ist pro Attribut dieser Art jeweils ein eindeutiger Wert zuordenbar, auf den im Datensatz des FFS über den jeweiligen FRK verwiesen wird. Da die PRK von Auswahltabellen im Allgemeinen nicht eindeutig einzelnen FFS-Datensätzen zuordenbar sind, gilt zwischen diesen Objektgruppen stets eine n:1-Beziehung.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde in Abbildung 6.7 auf die Darstellung des Großteils der Auswahltabellen (neben den bereits genannten sind dies beispielsweise Standort, Systemelementklassenbezeichnung etc.) verzichtet.

6.3.1.2 Regeln zwischen Datenbankobjekten

Ein FFS lässt sich durch eine große Anzahl an Attributen beschreiben. Nicht jedes Attribut ist für den Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit von Relevanz: Die Berechnung der im Abschnitt 6.2.2 definierten ökonomischen und ökologischen Bewertungsparameter basiert auf spezifischen Attributen der genannten Objekte und Regeln zwischen diesen. Im Folgenden werden diese genauer erläutert.

6.3.1.2.1 Beschaffungsphase

Zur Bestimmung des aufwandsorientierten Kapitalwerts der Differenzinvestition $K_{FK-FM,0}$ nach Formel 6.2 sind sowohl für ein KSS- als auch ein MMS-FFS die Beschaffungskosten jedes Systemelements und der Nebenfunktionen sowie entsprechende Betriebskosten im Lebenszyklus zu ermitteln. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird im weiteren Verlauf bei Beschreibung der Formeln weitgehend auf eine Differenzierung von FFS für Nass- und MMS-Bearbeitung verzichtet. Die angegebenen Berechnungsschritte sind für beide FFS-Varianten gleichermaßen durchzuführen.

Beschaffungskosten pro Systemelement

Für die Summe der anfallenden Ein- und Auszahlungen einer Periode j gilt für ein FFS mit n_s Systemelementen:

$$\Lambda_j - \Sigma_j = \sum_{s=1}^{n_s} \Lambda_{j,s} - \Sigma_{j,s} . \quad \mathbf{6.13}$$

Folglich sind für jedes Systemelement s eines FFS die je Periode anfallenden Kosten $\Lambda_{j,s}$ und Einnahmen $\Sigma_{j,s}$ zu erfassen. Dabei sind gemäß Formel 6.2 auch gegebenenfalls auftretende Unterschiede zwischen FFS mit Nass- und MMS-Bearbeitung zu berücksichtigen.

In der ersten Periode ($j = 0$) schlagen lediglich die Beschaffungskosten $\Lambda_{0,s}$ zu Buche. Sie variieren in Abhängigkeit von Systemelement- und Skalierungsart. Letztere bildet Regeln zur Bestimmung der Anzahl der Systemelemente einer Art ($n_{a,s}$) und deren Beschaffungskosten ($\Lambda_{0,a,s}$) ab. Das betrachtete Referenzsystem unterscheidet Systemelemente, die einmalig zu beschaffen sind und solche, deren Anzahl von Einflussfaktoren abhängen (vgl. Tabelle 6.4).

Tabelle 6.4: Skalierungsarten im BMW Group Referenzsystem der mechanischen Fertigung in Anlehnung an [BMW13]

Attributswert	Attribute der Tabelle Skalierungsart	
	Anzahl der Systemelemente einer Systemelementart $n_{a,s}$	Beschaffungskosten eines Systemelements einer Systemelementart $\Lambda_{0,a,s}$
1	Einmalige Anschaffung, unabhängig von allen Einflussfaktoren	Fixe Beschaffungskosten je Systemelement
2	Anzahl in Abhängigkeit vom Produktionsvolumen p.a.	Beschaffungskosten in Abhängigkeit von der Zylinderanzahl des Werkstücks
3	Anzahl in Abhängigkeit von anderen Systemelementen	Beschaffungskosten in Abhängigkeit vom Produktionsvolumen p.a.

Dabei gilt für die Beschaffungskosten einer Systemelementart $\Lambda_{0,a}$:

$$\Lambda_{0,a} = \sum_{s=1}^{n_{a,s}} \Lambda_{0,a,s} = \Lambda_{0,a,s} \cdot n_{a,s} \quad \mathbf{6.14}$$

Die Beschaffungskosten aller Systemelemente einer Art haben folglich den gleichen Betrag. Dessen Höhe unterliegt gemäß Tabelle 6.4 folgenden Regeln:

$$\begin{aligned} &\text{wenn } \textit{Skalierungsart}_{\textit{Beschaffungskosten}} = 1 \text{ ,} \\ &\quad \text{dann } \Lambda_{0,a,s} = \Lambda_{0,a,s}(\Lambda_{0,s,fix}) \text{ ,} \\ &\text{wenn } \textit{Skalierungsart}_{\textit{Beschaffungskosten}} = 2 \text{ ,} \\ &\quad \text{dann } \Lambda_{0,a,s} = \Lambda_{0,a,s}(z_{WS}) \text{ ,} \\ &\text{wenn } \textit{Skalierungsart}_{\textit{Beschaffungskosten}} = 3 \text{ ,} \\ &\quad \text{dann } \Lambda_{0,a,s} = \Lambda_{0,a,s}(n_{WS,P,max}) \text{ .} \end{aligned} \quad \mathbf{6.15}$$

$z_{WS} \in \textit{Werkstückkomplexität}$ bezeichnet dabei die Zylinderanzahl des größten Werkstücks, $\Lambda_{0,s,fix} \in \textit{Systemelement}$ das Attribut für die fixen Beschaffungskosten eines Systemelements. Für die in Formel **6.15** letztgenannten beiden Bedingungen ist die Einführung weiterer Attribute erforderlich. Für den Fall, dass die Beschaffungskosten eines Systemelements von z_{WS} abhängig sind, ist in der *Systemelement*-Tabelle für jeden möglichen Wert von z_{WS} ein Attribut für die zugehörigen Beschaffungskosten vorzusehen. FFS der BMW Group fertigen Bauteile für Motoren mit drei, vier und sechs Zylindern. Daher werden die Attribute $\Lambda_{0,s,3Zyl}$, $\Lambda_{0,s,4Zyl}$, $\Lambda_{0,s,6Zyl} \in \textit{Systemelement}$ eingeführt. Im Falle der Abhängigkeit vom jährlichen Produktionsvolumen lassen sich die Beschaffungskosten eines Systemelements berechnen. Unter der Annahme eines proportionalen Verhältnisses zwischen Beschaffungskosten und jährlicher Produktionskapazität gilt:

$$\begin{aligned} \Lambda_{0,a,s}(n_{WS,P,max}) &= \min \left(\Lambda_{0,s,min} + \frac{\Lambda_{0,s,max} - \Lambda_{0,s,min}}{n_{WS,P,S,max} - n_{WS,P,S,min}} \right. \\ &\quad \cdot (\max(n_{WS,P,max}, n_{WS,P,S,min}) - n_{WS,P,S,min}), \Lambda_{0,s,max} \left. \right). \end{aligned} \quad \mathbf{6.16}$$

Dabei werden $n_{WS,P,max} \in \text{Eingangsparameter}$ als das geplante maximale Produktionsvolumen einer Periode im Lebenszyklus definiert, $n_{WS,P,S,min}, n_{WS,P,S,max} \in \text{Systemelement}$ als die geringst- bzw. höchstmögliche Produktionskapazität eines Systemelements innerhalb einer Periode und $\Lambda_{0,s,min}, \Lambda_{0,s,max} \in \text{Systemelement}$ als dessen geringst- bzw. höchstmögliche Beschaffungskosten. Für Systemelementarten, die nur einmalig beschafft werden, deren Beschaffungskosten aber produktionsvolumenabhängig sind, ist auch der Produktionsvolumenvorhalt $n_{WS,P,Vorhalt} \in \text{Eingangsparameter}$ zu berücksichtigen. Unter Vorhalt wird im Folgenden ein jährliches Produktionsvolumen verstanden, um das $n_{WS,P,max}$ bei einem möglichen Ausbau eines FFS nach Anlauf erhöht wird. Um einmalig beschaffte Systemelemente im Falle dieses absehbaren Ausbaus nicht ersetzen zu müssen, werden diese von Beginn an auf das Produktionsvolumen der ausgebauten FFS-Variante

$$n_{WS,P,Ausbau} = n_{WS,P,max} + n_{WS,P,Vorhalt} \quad \mathbf{6.17}$$

ausgelegt:

$$\begin{aligned} \Lambda_{0,a,s}(n_{WS,P,Ausbau}) &= \min \left(\Lambda_{0,s,min} + \frac{\Lambda_{0,s,max} - \Lambda_{0,s,min}}{n_{WS,P,S,max} - n_{WS,P,S,min}} \right. \\ &\quad \cdot (\max(n_{WS,P,Ausbau}, n_{WS,P,S,min}) - n_{WS,P,S,min}), \Lambda_{0,s,max} \left. \right). \end{aligned} \quad \mathbf{6.18}$$

Wie eingangs beschrieben, sind die genannten Berechnungsschritte sowohl für FFS mit Nass- als auch für solche mit MMS-Bearbeitung durchzuführen. Bei Bestimmung der Beschaffungskosten des MMS-FFS ergibt sich im Bereich der spanenden Fertigung ein Sonderfall: Durch Auswahl einer 1- oder 2-kanaligen MMS-Lösung (vgl. Kapitel 5.3.1.2) über das Attribut $\Psi_{M12} \in \text{Eingangsparameter}$ variieren die Kosten der ein- und doppelspindligen Bearbeitungszentren sowie der zugehörigen Werkzeugsätze. Für diese Systemelementarten sind daher für 1- und 2-Kanal-MMS gesonderte Beschaffungskosten $\Lambda_{0,s,1K}, \Lambda_{0,s,2K} \in \text{Systemelement}$ vorzusehen.

Die Initialkosten der Nebenfunktionen Einrichtungs- und Steuerungstechnik bleiben von der Wahl zwischen Nass- und MMS-Bearbeitung unbeeinflusst und gehen daher nicht in den aufwandsorientierten Kapitalwert der Differenzinvestition $\kappa_{FK-FM,0}$ ein. Dennoch werden sie in die Berechnung miteinbezogen, um den Vergleich der FFS-Beschaffungskosten mit historischen Daten zu ermöglichen. In Anlehnung an diese Erfahrungswerte wird die Berechnung als prozentualer Aufschlag auf die übrigen Be-

schaffungskosten durchgeführt. Zu diesem Zweck werden folgende Attribute herangezogen:

- Strukturmaßnahmen $\Psi_{NFS} \in \text{Komplexität Nebenfunktionen}$: Einrichtungstechnikumfänge im Bereich Stahlbau, temporärer Kraninstallationen etc.; Die möglichen Ausprägungen *gering, mittel, hoch* werden über $C_{NFS}(\Psi_{NFS}) \in \text{Stellhebel}$ in prozentuale Aufschläge umgewandelt
- Baumaßnahmen $\Psi_{NFB} \in \text{Komplexität Nebenfunktionen}$: Über Strukturmaßnahmen hinausgehende Baumaßnahmen etwa zur Sanierung vorhandener Flächen; Die möglichen Ausprägungen *ja, nein* werden über $C_{NFB}(\Psi_{NFB}) \in \text{Stellhebel}$ in prozentuale Aufschläge umgewandelt
- Energie- und Medienversorgung $C_{NFEM} \in \text{Stellhebel}$: Fixer prozentualer Aufschlag für Medientrassen und sonstige Versorgungsleitungen
- Objektabsaugung $C_{NFO} \in \text{Stellhebel}$: Fixer prozentualer Aufschlag für Objektabsaugungsanlagen
- Steuerungstechnik $C_{NFST} \in \text{Stellhebel}$: Fixer prozentualer Aufschlag für steuerungstechnische Umfänge

Somit ergeben sich die Beschaffungskosten für Nebenfunktionen in Abhängigkeit von jenen der übrigen Systemelemente des Fertigungssystems als:

$$\Lambda_{0,NF} = \Lambda_{0,ohneNF} \cdot (C_{NFS}(\Psi_{NFS}) + C_{NFB}(\Psi_{NFB}) + C_{NFEM} + C_{NFO} + C_{NFST}) \quad \mathbf{6.19}$$

Daraus folgt für die Beschaffungskosten des gesamten Fertigungssystems:

$$\Lambda_{0,abs} = \Lambda_{0,NF} + \Lambda_{0,ohneNF} \quad \mathbf{6.20}$$

In der Praxis vergehen zwischen An- und Restzahlung des Investitionsbetrags ein bis zwei Jahre, daher sind die Beschaffungskosten auf diesen Zeitraum zu verteilen. Über die Parameter $C_{Split,0}, C_{Split,1} \in \text{Stellhebel}$ hat der Planer die Möglichkeit, den Anteil der Beschaffungskosten in den ersten beiden Jahren festzulegen. Der Restbetrag entfällt auf das dritte Jahr. Daraus folgt:

$$\begin{aligned} \Lambda_0 &= \Lambda_{0,abs} \cdot C_{Split,0} \quad , \\ \Lambda_1 &= \Lambda_{0,abs} \cdot C_{Split,1} \quad , \\ \Lambda_2 &= \Lambda_{0,abs} - \Lambda_0 - \Lambda_1 \quad . \end{aligned} \quad \mathbf{6.21}$$

Durch die daraus gegebenenfalls resultierende Inbetriebnahme des FFS zu einem Zeitpunkt $j > 1$ verschiebt sich auch der Aufsatzpunkt für den Anlauf des Systems: Die Nutzungsphase beginnt im Jahr nach der Restzahlung ($J_R + 1$).

Anzahl der Systemelemente

Neben den Beschaffungskosten eines Systemelements ist auch die Anzahl der Systemelemente einer Art $n_{a,s}$ entscheidend für die Beschaffungskosten der Systemelementart $\Lambda_{0,a}$ (vgl. Formel 6.14). Analog zu Formel 6.15 gelten gemäß Tabelle 6.4 folgende Regeln zur Bestimmung der Anzahl:

$$\begin{aligned}
 &\text{wenn } Skalierungsart_{Anzahl} = 1 , \\
 &\quad \text{dann } n_{a,s} = 1 , \\
 &\text{wenn } Skalierungsart_{Anzahl} = 2 , \\
 &\quad \text{dann } n_{a,s} = \left\lceil \frac{n_{WS,P,max}}{n_{WS,P,s,max}} \right\rceil , \\
 &\text{wenn } Skalierungsart_{Anzahl} = 3 , \\
 &\quad \text{dann } n_{a,s} = n_{a,s}(n_{a,x}) .
 \end{aligned}
 \tag{6.22}$$

Der erste Fall betrifft Systemelementarten, die unabhängig von Zylinderanzahl und jährlichem Produktionsvolumen lediglich einmalig angeschafft werden. Dazu zählen Beladebahnhöfe oder der Endprüfbereich. Gilt für eine Systemelementart der zweite Fall, ist in der *Systemelement*-Tabelle die Angabe des Attributwerts der maximalen Produktionskapazität pro Periode $n_{WS,P,s,max}$ erforderlich. Da die Anzahl als Zählgröße nur positive ganzzahlige Ergebnisse zulässt, wird die Aufrundungsfunktion verwendet. Der dritte Fall wird für Fälle eingesetzt, in denen die Anzahl von der Zahl anderer Systemelemente abhängt, beispielsweise Logistikmodule oder BAZ-Werkzeugsätze (vgl. Abbildung 6.8).

		<i>Skalierungsart</i> _{Beschaffungskosten}		
		1	2	3
<i>Skalierungsart</i> _{Anzahl}	1	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mess-/Prüfplätze Oberfläche ▪ Messmittel 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Prüfplatz Zylinderinspektion* 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Beladebahnhof ▪ Entladebahnhof ▪ Anbauteilemontage* ▪ Optische Endprüfung
	2	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Honanlagen* ▪ LDS-Entschichtung* ▪ ZLS-Portal (quer) ▪ Reinigungszellen ▪ Dichtprüfen ▪ Koordinatenmessgeräte 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Einspindel-BAZ* ▪ Doppelspindel-BAZ* 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ KSS-Filteranlagen
	3	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Logistikmodule ▪ Maschinenladeportale ▪ Beladung/Trocknung Reinigung ▪ BAZ-Werkzeugsätze ▪ Gebäudefläche (Halle/Keller) 		

*Sonderfälle sind zu berücksichtigen

Abbildung 6.8: Zuordnung von Systemelementarten und Skalierungsarten

Für die Anzahl an Maschinenladeportalen n_{MLP} gilt unter Anwendung der Aufrundungsfunktion zur Beschränkung auf ganzzahlige Ergebnisse

$$n_{MLP} = \left\lceil \frac{n_s}{n_{s,MLP,max}} \right\rceil ,
 \tag{6.23}$$

wobei $n_{s,MLP,max}$ die maximale an ein MLP anbindbare Anzahl an Systemelementen angibt. Da MLP direkt mit Logistikmodulen verbunden sind, gilt für letztere unter Berücksichtigung der Höchstgrenze für an LM ankoppelbare MLP $n_{MLP,LM,max}$

$$n_{s,LM} = \left\lceil \frac{n_{s,MLP}}{n_{MLP,LM,max}} \right\rceil . \quad 6.24$$

Die erforderliche Anzahl an Belade- und Trocknungseinheiten im Bereich Reinigungstechnik hängt von der Anzahl an Reinigungszellen n_{RZ} und den je Einheit höchstens anbindbaren Reinigungszellen $n_{RZ,BT,max}$ ab:

$$n_{LM} = \left\lceil \frac{n_{RZ}}{n_{RZ,BT,max}} \right\rceil . \quad 6.25$$

Analog dazu ergibt sich die Anzahl an BAZ-Werkzeugsätzen aus der Anzahl an BAZ unter Berücksichtigung der Spindelanzahl von Ein- und Doppelspindlern:

$$n_{WZS} = n_{BAZ,ES} + 2 \cdot n_{BAZ,DS} . \quad 6.26$$

Eine Erhöhung der Kosten von BAZ-Werkzeugsätzen in Abhängigkeit von der Zylinderanzahl oder Produktionsvolumen ist zwar prinzipiell denkbar, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit aber nicht analysiert. Hintergrund ist das Baukastenprinzip der Motoren der BMW Group, das eine größtmögliche Übereinstimmung der Werkzeuge über Varianten mit unterschiedlichen Zylinderanzahlen hinweg ermöglicht. Da Werkzeugsätze zur Erstausrüstung eines FFS gehören, werden die Kosten eines Satzes nicht durch das jährliche Produktionsvolumen beeinflusst. Vielmehr erhöht sich die Anzahl der jährlich zu beschaffenden Werkzeugsätze: Diese Aufwände fließen in die Betriebskosten ein. Höhere Produktionsvolumina je Periode erhöhen jedoch die Anzahl erforderlicher BAZ, womit nach den Formeln 6.14 und 6.26 die Anzahl der Elemente und somit die Kosten der Systemelementart BAZ-Werkzeugsätze steigen.

Die Fläche der Fertigungshalle $A_{Bebaut,H}$ ergibt sich nach diesem Prinzip aus der Anzahl an Systemelementen und ihrem spezifischen Flächenbedarf $A_{Bebaut,s}$ einschließlich anteiliger Gemeinflächen wie Wege und Freiflächen:

$$A_{Bebaut,H} = \sum_{s=1}^{n_s} A_{Bebaut,s} . \quad 6.27$$

Der Flächenbedarf des Kellergeschosses lässt sich analog dazu ableiten aus der Anzahl n_{KFA} und dem Flächenbedarf $A_{Bebaut,KFA}$ der KSS-Filteranlagen. Sie ist somit bei Ausschluss der in Kapitel 5.2.1.7 genannten Einzelfälle identisch mit der bei Einsatz von KSS zusätzlich zu bebauenden Fläche (vgl. Formel 6.12), sofern der Keller nicht direkt unterhalb des FFS errichtet wird:

$$A_{Bebaut,K} = \sum_{s=1}^{n_{KFA}} A_{Bebaut,KFA} = A_{Bebaut,KSS} . \quad 6.28$$

Die Beschaffungskosten für Fertigungshalle und Keller werden analog zu anderen Systemelementarten anhand Formel 6.14 in abgewandelter Form unter Berücksichtigung von flächenspezifischen Preisen $k_{0,K}, k_{0,H} \in \text{Prämisse}$ n berechnet:

$$A_{0,Gebäude} = A_{Bebaut,K} \cdot k_{0,K} + A_{Bebaut,H} \cdot k_{0,H} . \quad 6.29$$

Der spezifische Flächenbedarf nach Formel **6.12** ergibt sich somit aus

$$\Delta\sigma_{Fläche} = \frac{A_{Bebaut,K}}{n_{WS,P}} \cdot C_{EMAS} \quad . \quad \mathbf{6.30}$$

Auch bei BAZ ergibt sich ein Sonderfall. Ihre Anzahl hängt nicht nur vom jährlichen Produktionsvolumen, sondern auch von der Werkstückkomplexität und einer vom Benutzer vorzugebenden Quote an Einspindel-BAZ $C_{ES} \in \text{Prämissen}$ ab:

$$C_{ES} = \frac{n_{BAZ,ES}}{n_{BAZ,DS} + n_{BAZ,ES}} \quad . \quad \mathbf{6.31}$$

Die bisher verfolgte Vorgehensweise nach dem zweiten Fall von Formel **6.22** ist daher nicht ausreichend. Zur Einbeziehung der *Werkstückkomplexität* werden die in der gleichlautenden Tabelle hinterlegten Attribute Zylinderanzahl z_{WS} und Fertigungstiefe Ψ_{FT} herangezogen. Zur mathematischen Verarbeitung dieser Größen wird jedem möglichen Attributwert in der bereits eingangs erwähnten *Stellhebel*-Tabelle ein Faktor $C_{Zyl}(z_{WS})$ bzw. $C_{FT}(\Psi_{FT})$ zur Quantifizierung des Einflusses auf die Bearbeitungszeit zugewiesen, sodass die Gesamtbearbeitungszeit eines Werkstücks in BAZ $t_{Bearb.,BAZ}$ in Abhängigkeit von der BAZ-Referenzbearbeitungszeit $t_{Bearb.,BAZ,R} \in \text{Prämissen}$

$$t_{Bearb.,BAZ} = t_{Bearb.,BAZ,R} \cdot C_{FT}(\Psi_{FT}) \cdot C_{Zyl}(z_{WS}) = t_{Bearb.,BAZ,R} \cdot C_{WSK} \quad \mathbf{6.32}$$

beträgt.

Um die Anzahl erforderlicher BAZ unter Zuhilfenahme von $t_{Bearb.,BAZ}$ und C_{ES} zu berechnen, eignet sich die Taktzeit des FFS t_{Takt} . Daraus folgt

$$n_{BAZ,ES} = \left\lceil \frac{t_{Bearb.,BAZ}}{t_{Takt}} \cdot C_{ES} \right\rceil \quad \mathbf{6.33}$$

für Einspindel-BAZ bzw.

$$n_{BAZ,DS} = \left\lceil \frac{t_{Bearb.,BAZ}}{t_{Takt}} \cdot (1 - C_{ES}) \right\rceil \quad \mathbf{6.34}$$

für Doppelspindler. Die Taktzeit eines FFS ist grundsätzlich abhängig vom jährlichen Produktionsvolumen und der jährlich verfügbaren Systemlaufzeit $t_{Betrieb}$ nach Formel **6.8**. Neben diesen Kerngrößen werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit weitere Faktoren berücksichtigt, die als Eingangsparameter aus der *Prämissen*-Tabelle in die Bewertung einfließen:

- Ersatzquote C_{EQ} : Außerplanmäßig zu fertigende Austausch- und Ersatzteile [%]
- Flexibilitätsvorhalt C_{Flex} : Kompensationsfähigkeit unterjähriger Produktionsschwankungen [%]
- OEE C_{OEE} : Zielwert der Gesamtanlageneffektivität [%]

Daraus ergibt sich die Taktzeit

$$t_{Takt} = \frac{n_{WS,P,max} \cdot (1 + C_{EQ})(1 + C_{Flex})}{t_{Betrieb}} \cdot \frac{1}{C_{OEE}} \quad . \quad \mathbf{6.35}$$

Einen weiteren Sonderfall stellt die Berechnung der Anzahl von Honmaschinen dar. In Abhängigkeit von der Laufbahntechnologie sind unterschiedliche Maschinentypen notwendig (vgl. Kapitel 5.2.1.2). Daher wird die Berechnung der Anlagenanzahl mit der Abfrage des Parameters $\Psi_{LB} \in \text{Werkstückkomplexität}$ gekoppelt, um bei Ableitung der Lösungsvarianten nur die laufbahnspezifisch erforderlichen Maschinen zu berücksichtigen.

Nach diesem Prinzip erfolgt auch die Bestimmung der Anzahl bauartabhängig erforderlicher Anbauteilemontageanlagen (vgl. Kapitel 5.2.1.5): Weist mindestens eine Werkstückvariante im Produktportfolio eines FFS eine *Bedplate* (vgl. ebenda) auf, ist eine entsprechende Montage- und Demontageeinrichtung notwendig. Werkstücke ohne ein solches Kurbelgehäuseunterteil erfordern Anlagen zur Lagerdeckelmontage. Da Anbauteilemontageanlagen im Rahmen der vorliegenden Arbeit als einmalig zu beschaffende Maschinen gelten, wird die Anzahl der bauartbedingt benötigten Systemelemente in Abhängigkeit von $\Psi_{BP} \in \text{Werkstückkomplexität}$ auf 1 oder 0 gesetzt.

6.3.1.2.2 Nutzungsphase

Die Berechnung der Betriebskosten ist in Anlehnung an Formel 6.2 möglich, sofern alle Kostenarten nach Abbildung 5.56 den in der Produktaufbruchstruktur festgelegten Systemelementarten (vgl. Abbildung 5.57) eindeutig zuordenbar sind. Im vorliegenden Problemfall ist dies nicht vollständig praktikabel, da der Großteil der Betriebskostenarten lediglich auf Fertigungssystemebene vorliegt (vgl. Kapitel 5.2.3.2 und 5.3.2). Für diese Fälle wird auf produktionsvolumen- und werkstückabhängige Kennzahlen zurückgegriffen, die vor der Berechnung in der Tabelle *Prämissen* zu hinterlegen sind. Als Bezug gilt ein Referenzwerkstück gemäß Formel 6.32. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird dabei auf interne Daten der BMW Group zurückgegriffen, die aus Gründen der Geheimhaltung nicht veröffentlicht werden.

Bei dieser Vorgehensweise ist die An- und Hochlaufkurve des Fertigungssystems zu beachten: In der Regel erreicht ein Produktionssystem erst nach mehreren Jahren das geplante maximale jährliche Produktionsvolumen $n_{WS,P,max}$. Über die Parameter $C_{WS,1}$, $C_{WS,2}$, $C_{WS,3} \in \text{Eingabeparameter}$ lässt sich vor dem Berechnungslauf der Anteil der Produktionsvolumina in den ersten drei Jahren angeben in der Form

$$\begin{aligned} n_{WS,1} &= C_{WS,1} \cdot n_{WS,P,max} \ , \\ n_{WS,2} &= C_{WS,2} \cdot n_{WS,P,max} \ , \\ n_{WS,3} &= C_{WS,3} \cdot n_{WS,P,max} \ . \end{aligned} \tag{6.36}$$

Daraus folgt für das gesamte Produktionsvolumen im Lebenszyklus:

$$n_{WS,J} = n_{WS,P,max} \cdot (C_{WS,1} + C_{WS,2} + C_{WS,3} + J - 3) \ . \tag{6.37}$$

Bei der Berechnung des Aufsatzzpunktes für den Anlauf des FFS ist das Jahr der Inbetriebnahme zu beachten: Die Nutzungsphase beginnt im Jahr nach der Restzahlung (vgl. Formel 6.21).

Da sich Fertigungstiefe und Zylinderanzahl auf Bearbeitungszeit und Maschinenanzahl auswirken (vgl. Formel 6.32) und Maschinen die wesentlichen Verbraucher eines FFS darstellen (vgl. Kapitel 5.2.2), sind diese Parameter auch bei der Kalkulation der Betriebskosten einzubeziehen. Unter Berücksichtigung des in Formel 6.32 eingeführten Werkstückkomplexitätsfaktors C_{WSK} folgt für die über den gesamten Lebenszyklus kumulierten Betriebskosten einer Kostenart K :

$$\Lambda_{B,K,kum} = \Lambda_{B,K,kum,R} \cdot C_{WSK} \quad . \quad \mathbf{6.38}$$

Dabei stellt $\Lambda_{B,K,kum,R}$ analog zu Formel 6.32 die kumulierten Betriebskosten der Kostenart K für das Referenzbauteil mit $C_{WSK} = 1$ dar, die auf Basis der Werte aus der *Prämissen*-Tabelle ermittelt werden.

Betriebsmittelkosten

Die Betriebsmittelkosten lassen sich auf periodische Aufwände für Werkzeuge und Filtervlies herunterbrechen. Unter Berücksichtigung des von der BMW Group eingeführten Motorenbaukastensystems mit größtmöglicher Übereinstimmung der Werkzeuge über Varianten mit unterschiedlichen Zylinderanzahlen hinweg erfolgt die Berechnung der Werkzeugkosten im Lebenszyklus in Anlehnung an Formel 6.37 produktionsvolumenabhängig:

$$\Lambda_{B,WZ,kum} = K_{WZ} \cdot n_{WS,J} \cdot C_{WSK} \quad , \quad \mathbf{6.39}$$

wobei $K_{WZ} \in \text{Prämissen}$ die Stückkosten für Werkzeuge angibt.

Analog dazu ergibt sich für Filtervlies unter Beachtung der Stückkosten $K_{Vlies} \in \text{Prämissen}$

$$\Lambda_{B,Vlies,kum} = K_{Vlies} \cdot n_{WS,J} \cdot C_{WSK} \quad . \quad \mathbf{6.40}$$

Betriebs- und Hilfsstoffkosten sowie ökologische Kenngrößen

Einzig für die Energiekosten als Teil der Betriebs- und Hilfsstoffkosten nach Abbildung 5.56 ist eine eindeutige, systemelementartspezifische Zuordnung auf Basis der Messergebnisse von Kapitel 5 durchführbar. Den Formeln 6.7 und 6.8 zufolge lässt sich der spezifische Energieumsatz einer Systemelementart $\varepsilon_{Gesamt,a}$ berechnen aus

$$\varepsilon_{Gesamt,a} = \frac{P_{Gesamt,s} \cdot n_{a,s} \cdot t_{Betrieb}}{n_{WS,P}} \quad . \quad \mathbf{6.41}$$

Dazu ist sowohl für KSS- als auch für MMS-FFS das Attribut $P_{Gesamt,s} \in \text{Systemelement}$ zu hinterlegen. Die über den Lebenszyklus kumulierten Energiekosten $\Lambda_{B,Energie,kum}$ lassen sich daraus in Abhängigkeit der Anzahl an Systemelementarten n_a und der spezifischen Energiekosten pro kWh $k_{Energie} \in \text{Prämissen}$ ableiten zu

$$\Lambda_{B,Energie} = k_{Energie} \cdot n_{WS,J} \cdot \sum_{a=1}^{n_a} \varepsilon_{Gesamt,a} \quad . \quad \mathbf{6.42}$$

Da die Werkstückkomplexität die Bearbeitungszeit beeinflusst und diese Auswirkungen auf die Maschinenanzahl hat, ist sie bereits im letzten Term indirekt berücksichtigt. Der Faktor C_{WSK} ist bei der Berechnung der Energiekosten daher nicht erforderlich.

Die *Systemelementart*-Tabelle für die spanende Fertigung einschließlich der kühl-schmierstoffstrategiespezifischen Leistungsbedarfe zeigt Abbildung 6.9.

Name	BAZ - Einspindler	BAZ - Doppelspindler	LDS-Entschichtungsanlage	Werkzeug (WKZ)
Skalierungsart	Skalierungsart	22	22	21
Preis (Plan)				
minimal	$\Lambda_{0,s,min}$ 1.703.750	$\Lambda_{0,s,max}$ 1.546.300		
maximal	2.173.750	2.448.700		
fest			$\Lambda_{0,s,fix}$ 4.700.000	293.750
KSS	$\Lambda_{0,s}(z_{WS})$			
3-Zylinder	1.703.750	2.350.000		
4-Zylinder	1.762.500	2.350.000		
6-Zylinder	2.173.750	2.820.000		
P_Gesamt,KG [kW]	16,010	26,610	$P_{Gesamt,s,FK}$	
P_Gesamt,ZK[kW]	15,180	37,170		
Grunddaten KSS				
Preismehrung MMS (Plan)				
1-Kanal (System A)	$\Delta\Lambda_{0,s,1K}$ 15,399	70,359		21,40%
1-Kanal (System B)	17,237	$\Delta\Lambda_{0,s,2K}$ 76,117		47,139
2-Kanal	31,727	121,519		47,139
				62,852
P_Gesamt,KG [kW]	11,650	22,530		
P_Gesamt,ZK[kW]	11,770	$P_{Gesamt,s,FM}$ 28,520		
Grunddaten MMS				
Kapazität				
minimal				
maximal				
fest			$n_{WS,P,s,max}$ 450000	
3-Zylinder				
4-Zylinder				
6-Zylinder				
Werte aus Datenschutzgründen verändert				

Abbildung 6.9: Ausschnitt der Systemelementklassen-Tabelle der spanenden Fertigung mit Fokus auf Bearbeitungszentren in Anlehnung an [BMW13]

Zur Bestimmung des spezifischen Wasserverbrauchs der KSS-Versorgung $\Delta\sigma_{Wasser}$ wird die produktionsvolumenabhängige Größe $V_{Wasser,St} \in Prämisse$ herangezogen:

$$\Delta\sigma_{Wasser} = \left(V_{Wasser,St} + \frac{V_{Wasser,AS} \cdot \left[1 + \frac{J-J_R}{J_{AS}} \right]}{n_{WSJ}} \right) \cdot C_{WSK} \quad (6.43)$$

Der zweite Summand berücksichtigt das Wasservolumen $V_{Wasser,AS}$, das bei jedem Neuansatz der KSS-Filteranlage einschließlich der Erstbefüllung in der Anlaufperiode $(J_R + 1)$ verbraucht wird. Der Term $1 + (J - J_R)/J_{AS}$ wird abgerundet, da zwischen dem letzten Neuansatz und der Stilllegung des FFS kein anteiliger Neuansatz über das regelmäßige Nachsetzen von Wasser hinaus erfolgt. $J_{AS} \in Prämisse$ gibt dabei die Anzahl der Jahre an, die zwischen zwei Neuansätzen liegen. Die Wasserkosten über den Lebenszyklus lassen sich daher berechnen durch

$$\Lambda_{B,Wasser,kum} = k_{Wasser} \cdot \Delta\sigma_{Wasser} \cdot n_{WS,J} \quad (6.44)$$

wobei $k_{Wasser} \in Prämisse$ den Kosten pro Liter Wasser entspricht.

Der spezifische Anfall von Abfällen $\Delta\sigma_{Abfall}$ pro Periode wird ebenfalls mittels der Konstante $\Delta m_{Abfall,St} \in Prämisse$ nach Formel 6.11 berechnet. Analog zu den bisherigen Werten lassen sich die Abfallentsorgungskosten im Laufe der Nutzungsphase auf

Grundlage der spezifischen Entsorgungskosten pro Tonne $k_{Abfall} \in \text{Prämissen}$ berechnen:

$$\Lambda_{B,Abfall,kum} = k_{Abfall} \cdot \Delta\sigma_{Abfall} \cdot n_{WS,J} \cdot C_{WSK} \quad \mathbf{6.45}$$

Erlöse aus Spanmaterial $\Sigma_{J,Span}$ sind aufgrund geringerer Restfeuchte bei Einsatz von MMS-Technologie höher als bei Nassbearbeitung (vgl. Kapitel 5.3.2). Sie werden in Abhängigkeit der technologiespezifischen Preise pro Tonne $k_{Span} \in \text{Prämissen}$ und der Spanmasse pro Werkstück $m_{Span,St} \in \text{Prämissen}$ analog Formel **6.45** berechnet:

$$\Sigma_{B,Span,kum} = k_{Span} \cdot m_{Span,St} \cdot n_{WS,J} \cdot C_{WSK} \quad \mathbf{6.46}$$

Schmierstoffkosten werden für FFS mit Einsatz von KSS- und MMS-Technologie unterschiedlich berechnet. Während für FFS mit MMS-Bearbeitung nach der bereits eingeführten Formel **5.7** mit den Größen $Q_{MMS,M}$, $t_{Bearb.,M}$, $t_{eing,frei,M}$, $k_{Schmier,MMS} \in \text{Prämissen}$

$$\Lambda_{B,Schmier,kum,FM} = K_{Schmier,FM} \cdot n_{WS,J} \cdot C_{WSK} \quad \mathbf{6.47}$$

gilt, werden für FFS mit Nassbearbeitung die Faktoren $V_{Schm.,St,FK}$, $k_{Schmier,KSS} \in \text{Prämissen}$ herangezogen. Diese beschreiben das verbrauchte Volumen an Schmierstoff pro Referenzwerkstück und die Kosten des Schmierstoffs pro Mengeneinheit:

$$K_{Schmier,FK} = k_{Schmier,KSS} \cdot V_{Schm,St,FK} \quad \mathbf{6.48}$$

Daraus folgt in Anlehnung an Formel **6.43**

$$\begin{aligned} \Lambda_{B,Schmier,kum,FK} &= \left(K_{Schmier,FK} \cdot n_{WS,J} + k_{Schmier,KSS} \cdot V_{Schmier,AS} \right. \\ &\quad \left. \cdot \left[1 + \frac{J - J_R}{J_{AS}} \right] \right) \cdot C_{WSK} \end{aligned} \quad \mathbf{6.49}$$

mit dem je Neuansatz verbrauchten Volumen $V_{Schmier,AS} \in \text{Prämissen}$.

Neben Wasser und Schmierstoffen sind Additive ein Kernbestandteil von KSS-Emulsionen (vgl. Kapitel 3.2). Kosten dieser Art fallen daher nur bei der Nassbearbeitung an. Analog zu den KSS-Schmierstoffen berechnen sie sich nach

$$\Lambda_{B,Add,kum,FK} = \left(K_{Add,FK} \cdot n_{WS,J} + k_{Add,KSS} \cdot V_{Add,AS} \cdot \left[1 + \frac{J - J_R}{J_{AS}} \right] \right) \cdot C_{WSK} \quad \mathbf{6.50}$$

wobei $K_{Add,FK} \in \text{Prämissen}$ die Stückkosten für Additive bezeichnen und $k_{Add,KSS}$, $V_{Add,AS} \in \text{Prämissen}$ die Additivkosten pro Mengeneinheit bzw. das pro Neuansatz verwendete Volumen.

Auch die Reinigungsmittelkosten werden nach diesem Schema anhand der zugehörigen Stückkosten $K_{RM} \in \text{Prämissen}$ ermittelt:

$$\Lambda_{B,RM,kum} = K_{RM} \cdot n_{WS,J} \cdot C_{WSK} \quad \mathbf{6.51}$$

Personal- und Instandhaltungskosten

Wie eingangs beschrieben, werden auch die übrigen Betriebskostenarten auf Basis der in Kapitel 5.2.3.2 und 5.3.2 beschriebenen Untersuchungen produktionsvolumenab-

hängig anhand von Faktoren berechnet, die als Attribute in der *Prämissen*-Tabelle zu hinterlegen sind.

Die Summe der Lohnkosten für das Bedienungspersonal in der Fertigungshalle $\Lambda_{B,HRH,kum}$ ergeben sich aus den zugehörigen Lohnstückkosten $K_{HRH} \in \text{Prämissen}$:

$$\Lambda_{B,HRH,kum} = K_{HRH} \cdot n_{WS,J} \cdot C_{WSK} \quad 6.52$$

Zum Betrieb der KSS-Filteranlagen ergibt sich demnach mit den zugehörigen Lohnstückkosten $K_{HRK} \in \text{Prämissen}$:

$$\Lambda_{B,HRK,kum} = K_{HRK} \cdot n_{WS,J} \cdot C_{WSK} \quad 6.53$$

Aufwände im Lebenszyklus für Instandhaltungsmaßnahmen in der Fertigungshalle lassen sich auf Grundlage der spezifischen Instandhaltungskosten $K_{IHH} \in \text{Prämissen}$ berechnen:

$$\Lambda_{B,IHH,kum} = K_{IHH} \cdot n_{WS,J} \cdot C_{WSK} \quad 6.54$$

Analog dazu ergibt sich für die Instandhaltungskosten der KSS-Filteranlagen

$$\Lambda_{B,IHK,kum} = K_{IHK} \cdot n_{WS,J} \cdot C_{WSK} \quad 6.55$$

mit $K_{IHK} \in \text{Prämissen}$. Den Bereich für die Nutzungsphase in der implementierten Tabelle *Prämissen* zeigt Abbildung 6.10.

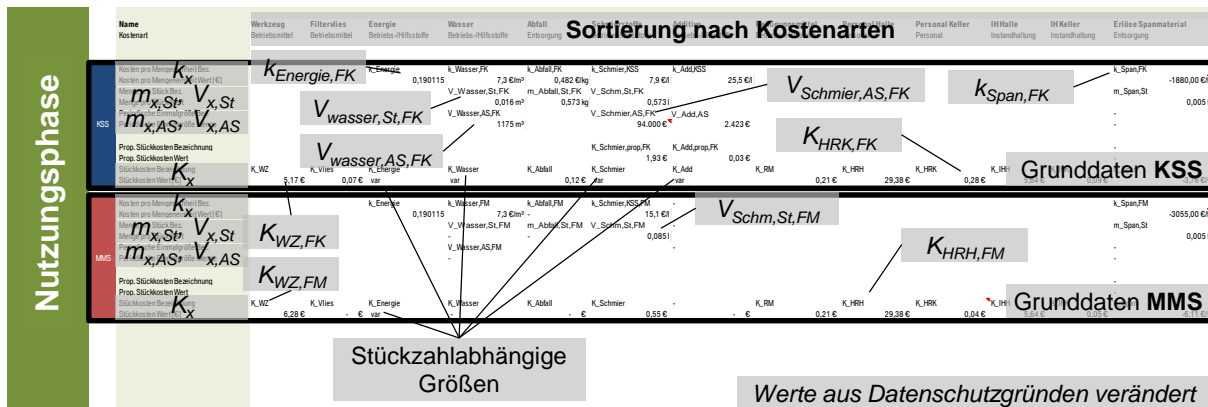


Abbildung 6.10: S Ausschnitt aus der *Prämissen*-Tabelle mit Fokus auf die Nutzungsphase

Unter Umständen auftretende standortbedingte Auf- oder Abschläge auf die gesamten Lebenszykluskosten, die etwa aus lokalen Rabatten, Personal- oder Transportkosten resultieren, lassen sich bei Bedarf über das Attribut $\Psi_{Standort} \in \text{Eingabeparameter}$ mit-einberechnen. Eine Zuordnung standortspezifischer prozentualer Auf- oder Abschläge wird vom Nutzer vor Beginn eines Berechnungslaufs über das Attribut $C_{Standort}(\Psi_{Standort}) \in \text{Stellhebel}$ durchgeführt. Entsprechend lässt sich auch die Marktsituation über $C_{Markt} \in \text{Eingabeparameter}$ als prozentuale Abweichung abbilden, um ein von der Datenbasis abweichendes Kostenniveau etwa in Folge von Konjunkturschwankungen oder Inflation zu berücksichtigen. Für die Lebenszykluskosten folgt daher:

$$\begin{aligned}
 \Lambda_{j,bereinigt} &= \Lambda_j \cdot C_{Standort} \cdot C_{Markt} \\
 \Rightarrow \Lambda_{0,bereinigt} &= \Lambda_0 \cdot C_{Standort} \cdot C_{Markt} \\
 \Rightarrow \Lambda_{B,kum,bereinigt} &= \Lambda_{B,kum} \cdot C_{Standort} \cdot C_{Markt} .
 \end{aligned}
 \tag{6.56}$$

6.3.2 Problemlösungskomponente

Auf Grundlage der vom Planer vorgegebenen Attributwerte in den Tabellen *Eingangsparmeter*, *Prämissen*, *Werkstückkomplexität*, *Komplexität Nebenfunktionen*, und *Stellhebel* sowie dem in der Datenbasis hinterlegten Fakten- und Regelwissen erstellt die Problemlösungskomponente zwei Lösungsvarianten, die anschließend ökonomisch und ökologisch bewertet und gegenübergestellt werden. Abbildung 6.11 zeigt einen Ausschnitt der implementierten Problemlösungskomponente.

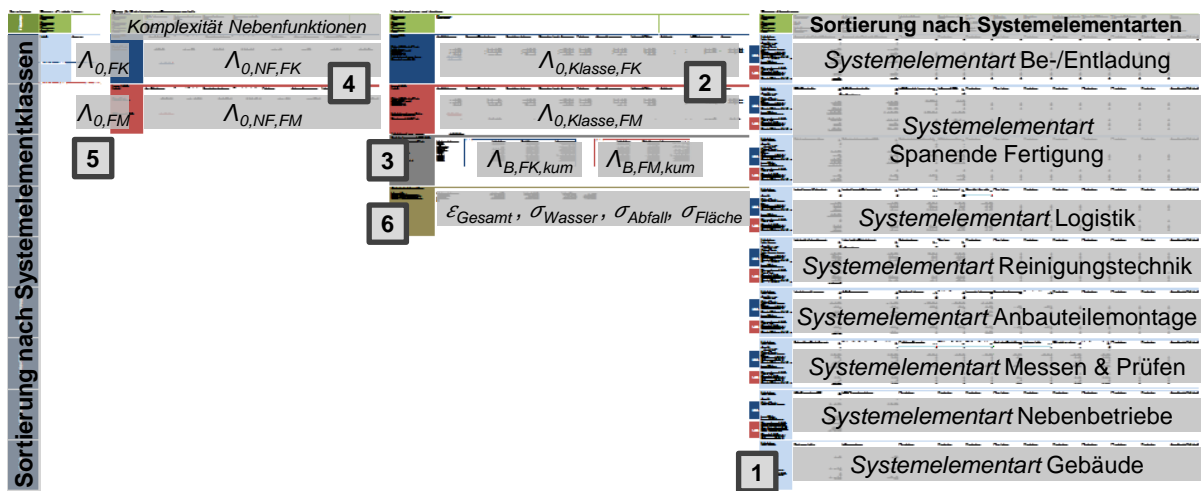


Abbildung 6.11: Screenshot der Haupttabelle der implementierten Problemlösungskomponente in Anlehnung an [BMW13]

Wie aus Abbildung 6.11 hervorgeht, erfolgt die Berechnung der Kosten nach dem *Bottom-Up*-Prinzip: Auf der rechten Seite werden zunächst anhand der im vorangegangenen Abschnitt aufgezeigten Vorgehensweise für jede Systemelementart die Beschaffungskosten und Anzahl je Systemelement ermittelt [1]. Anschließend werden die Beschaffungs- [2] sowie Betriebskosten im Peakjahr [3] der Systemelementklassen summiert. Einmalaufwände für Nebenfunktionen werden davon ausgehend gemäß Formel 6.19 ermittelt [4] und anschließend die gesamten Beschaffungskosten je Lösungsvariante nach Formel 6.20 gebildet [5]. Zudem werden die ökologischen Kenngrößen für beide Systeme sowie die Differenzbeträge errechnet [6].

Aus den in [2] und [3] ermittelten Werten werden anhand der Formeln 6.21 (Verteilung der Beschaffungskosten über die ersten Jahre) und 6.36 (Anlaufkurve) der aufwandsbezogene Kapitalwert der Differenzinvestition K_{FK-FM} und die dynamische Amortisationszeit j_A berechnet. Dies erfolgt in einer separaten Tabelle (vgl. Abbildung 6.12).

Abbildung 6.12: Screenshot der Nebentabelle zur Kapitalwertberechnung

Die in den Schritten [1] bis [6] sowie der Kapitalwertberechnung ermittelten Ergebnisse werden anschließend an die Dialogkomponente übergeben.

6.3.3 Dialog- und Erklärungskomponente

Die Dialogkomponente dient der Interaktion mit dem Fertigungssystemplaner. Die Eingabe der Prämissen und Parameter erfolgt über eine gesonderte Maske (vgl. Abbildung 6.13).

Abbildung 6.13: Screenshot der Eingabemaske

Als Unterstützung bei der Eingabe dienen Auswahlboxen, die einzugebende Attributeprägungen auf die Werte der zugehörigen Auswahltabellen limitieren. Eigens eingerichtete Hilfe-Bereiche dienen der Erläuterung einzelner Parameter (vgl. Abbildung 6.13, rechte Seite).

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse erfolgt in der Ausgabemaske. Neben einem Überblick über ökologische Kenngrößen, Kapitalwert, Beschaffungs- und Betriebskosten sind in ihrem Hauptteil auch die Eingabedaten kompakt dargestellt (vgl. Abbildung 6.14).

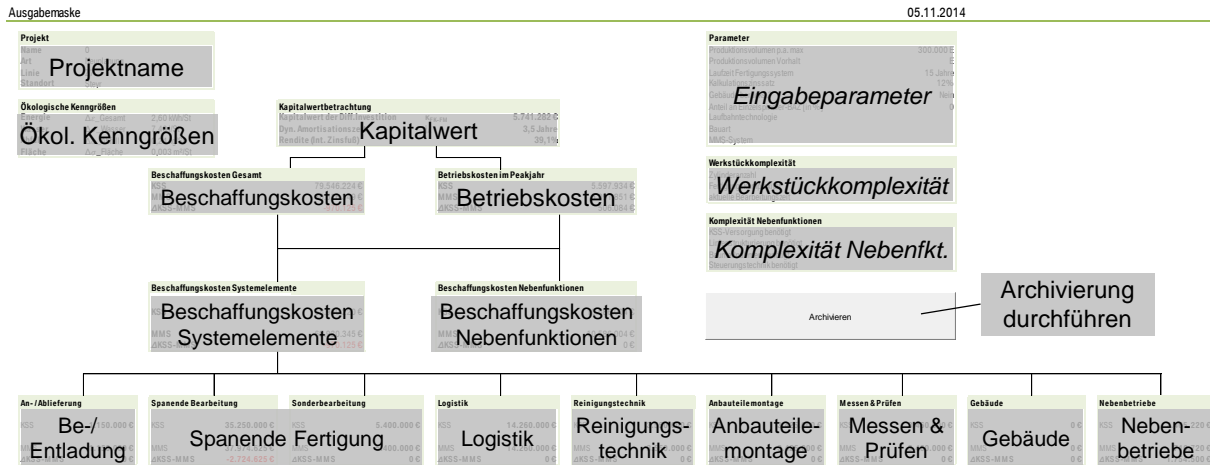


Abbildung 6.14: Screenshot des Hauptteils der Ausgabemaske

Darüber hinaus dient eine detaillierte Übersicht mit Angaben zu Art, Kosten und Anzahl der Systemelemente je Klasse der Erläuterung des Ergebnisses. Bei weiterem Klärungsbedarf ist dem Nutzer auch der schreibgeschützte Zugriff auf die bereits vorgestellte Problemlösungskomponente möglich.

6.3.4 Wissenserwerbskomponente und Expertenschnittstelle

Nach abgeschlossener Bewertung wird dem Planer die Archivierung der Ergebnisse angeboten. Dabei wird das gesamte betrachtete Mengengerüst beider Fertigungssysteme gespeichert. Auf diese Weise sind die Auswertung ganzer Untersuchungsreihen und eine Einsicht in historische Bewertungsergebnisse möglich.

Zur Änderung des Fakten- und Regelwissens in Folge von Technologiesprüngen oder Prämissenänderungen existiert eine passwortgeschützte Expertenschnittstelle. Diese gewährt ausgewählten Planern einen direkten Zugriff auf die Wissensbasis und die Problemlösungskomponente zur Alternierung der zugrundeliegenden Daten.

6.4 Implementierung des Moduls zur Technologieplanung

Die im Folgenden beschriebene Implementierung basiert auf dem in Kapitel 6.2 beschriebenen Systemmodell und ist angelehnt an die gemeinsam mit Eimer entwickelte und im Rahmen seiner vom Autor betreuten Abschlussarbeit veröffentlichte Version des Moduls zur Technologieplanung [EIME14, GREB14]. Wesentliche Unterschiede zur bisher veröffentlichten Vorgehensweise bestehen in der Fallbasis, der Ähnlichkeitsfunktion, den Kosten-, Kritikalitäts- und Unsicherheitsbewertungen, der Einbindung in das Modul zur Fertigungssystemplanung sowie der Expertenschnittstelle. Als Systemumgebung dienen wie beim FSP-Modul Microsoft Excel und Visual Basic for Applications.

6.4.1 Aufbau der Fallbasis

Ein Bearbeitungsfeature weist eine Fülle an Parametern wie z. B. Durchmesser, Bohrungstiefe, Anzahl an Stufen etc. auf (vgl. Abbildung 5.2). Nicht alle sind für die Bewertung des Einflusses der MMS von Relevanz. Im Rahmen der in Kapitel 5.1 dargestellten Untersuchungen wurden daher entscheidungsrelevante Featureparameter für Bohrprozesse identifiziert. Während diese für Technologieversuche eine ausreichende Datengrundlage bieten, sind zur Anwendung im vorliegenden fallbasierten System weitere Kriterien von Bedeutung. So lassen sich Aussagen zu Kostenunterschieden beim Einsatz von MMS nur dann treffen, wenn Informationen zum verwendeten Werkzeug und den zugehörigen Kosten vorliegen. Hinweise auf Art und Bezeichnung des Werkstücks, Fertigungssystem, Featurenummer und Zeichnungsbezug erhöhen die Transparenz und somit die Nachvollziehbarkeit für den Technologieplaner.

Die Fallbasis des TP-Moduls beinhaltet daher organisatorische, technologische, werkzeug- und prozessspezifische Informationen. In Abhängigkeit vom Datenbankfeld kommen unterschiedliche Datentypen zum Einsatz. Diese Vorgehensweise verhindert Fehlberechnungen, die auf unverarbeitbare Eingabeparameter zurückzuführen sind, und vereinfacht die Pflege des Datenbanksystems. Ausschließlich beschreibende Daten, die zur Interpretation des Datensatzes verwendet und nicht verarbeitet werden, werden als Text gespeichert. Dazu zählen beispielsweise die Werkstückart oder der Werkzeughersteller. Sachnummern wie die eindeutig vergebene Fall-ID, Zeichnungs- oder Featurenummern sowie zählbare Attribute wie die Anzahl an Stufen sind als natürliche Zahlen abgebildet. Als Primärschlüssel der Datenbank dient die Fall-ID als eindeutiges Unterscheidungsmerkmal eines Datensatzes. Physikalische Größen wie Durchmesser oder Vorschubgeschwindigkeit, die wie zählbare Merkmale direkt in die Berechnung eingehen, erhalten den Wertebereich reeller Zahlen. Zur Einschränkung der Dateneingabe in bestimmte Felder wird ein Aufzählungstyp mit festgelegter Wertemenge (vgl. Kapitel 6.3.1.1) verwendet. Die Wertebereiche der Attribute Fertigungstechnologie, Besondere Formen und Werkzeugbezeichnung bestehen aus kodierten Einträgen mit einer maximalen Länge von drei Zeichen, um das Datenhandling innerhalb des Systems zu vereinfachen. Eine besondere Art von Aufzählungstyp ist der logische Datentyp Boolean, der bei Attributen zur Anwendung kommt, deren Wertemenge lediglich die Aussagen *wahr* (1) oder *falsch* (0) umfasst. Er kommt bei der MMS-Tauglichkeit des Werkzeugs und jenen Featureparametern zum Einsatz, die den Untersuchungen in Kapitel 5.1 entsprechend einen geringen Einfluss (< 7 Prozent) auf den Mehraufwand bei Entwicklung und Fertigung von MMS-Werkzeugen haben. Um die Datenerfassung auf die relevantesten Angaben zu reduzieren, speichern diese Attribute lediglich, ob Gewinde, schräge Eintauchvarianten oder besondere Anforderungen an die Oberfläche vorhanden sind (vgl. Abbildung 6.15).

Organisatorische Daten		Featureparameter		Werkzeug- und Prozessdaten	
Datenbankfeld	Datentyp	Datenbankfeld	Datentyp	Datenbankfeld	Datentyp
Fall-ID ①	Nat. Zahl	Fertigungstechnologie	Aufzählungstyp	WZ-Sachnummer ⑪	Nat. Zahl
Werkstückart	Text	Durchmesser D ②	Reelle Zahl	WZ-Bezeichnung	Aufzählungstyp
Motorbezeichnung	Text	Bohrungstiefe L ③	Reelle Zahl	WZ-Hersteller	Text
Zeichnungsnummer	Nat. Zahl	Max. L/D_{Stufe} ④	Reelle Zahl	WZ-Preis ⑫	Reelle Zahl
Fertigungssystem	Text	N_{Stufen} ⑤	Nat. Zahl	MMS-Tauglichkeit ⑩	Boolean
Arbeitsfolge	Text	Gewinde ⑥	Boolean	Vorschubgeschwindigkeit	Reelle Zahl
Fall-Datum	Datum	Besond. Anforderungen an Oberfläche/Toleranz ⑦	Boolean	Drehzahl	Reelle Zahl
Featurenummer	Nat. Zahl	Ausrichtung/Eintauchvarianten ⑧	Boolean		
Featurebezeichnung	Text	Besondere Formen ⑨	Aufzählungstyp		
Zeichnungsbezug	Text				

⑩ Index des Attributs im Fallvektor

Abbildung 6.15: Datenfeldstruktur der Fallbasis, verwendete Datentypen und Elemente des Fallvektors

Über das bereits genannte Attribut „Besondere Formen“ ist die qualitative Einstufung der topologischen Featurekomplexität möglich: Der Einfluss benachbarter Features oder weiterer Faktoren auf den Fertigungsprozess lässt sich in vier Stufen darstellen (vgl. Tabelle 6.5).

Tabelle 6.5: Mögliche Ausprägungen des Attributs „Besondere Formen“ in Anlehnung an [EIME14]

Ausprägung	Definition	Beispiel
0	Keine besonders hervorzuhebenden Merkmale	Sacklochbohrung ins Volle
1	Möglicher Auftritt von Spanklemmung	Sacklochbohrung mit innerer Unterbrechung
2	Mögliche Unterbrechung der Aerosolzufuhr	Durchgangsbohrung
3	Möglicher Auftritt von Spanklemmung <u>und</u> Unterbrechung der Aerosolzufuhr	Mehrstufige Durchgangsbohrung mit innerer Unterbrechung

Die Fallbasis besteht aus ca. 1.400 realen Datensätzen, die das vollständige Feature- und Werkzeugspektrum des Kurbelgehäusefertigungssystems G7 im BMW Werk Steyr widerspiegeln. Es wurde ausgewählt, da das MMS-Pilotsystem temporärer Systembestandteil war und Daten zu sämtlichen Features und Werkzeugen sowohl für die MMS- als auch für die Nassbearbeitung vorliegen.

6.4.2 Distanzfunktion und Retrieve-Prozess

Der Prozessschritt Retrieve umfasst die Beschreibung des Problemfalls in vom System verarbeitbarer Form, den Vergleich mit bereits vorhandenen Fällen und die Auswahl einer oder mehrerer Datensätze zur Weiterverarbeitung. Jeder Datensatz bildet hierbei ein Feature als einen Fall ab. Üblicherweise gibt der Nutzer mehrere Features (Fälle) an, da er ganze Werkstücke oder Teilbereiche von diesen untersucht. Diese Fälle wer-

den im entwickelten System nacheinander verarbeitet und bewertet. Im Folgenden wird die Vorgehensweise zur Bewertung eines Features erläutert.

Um die Verarbeitung der Daten zu ermöglichen, wird beim Einlesen eines Falles ein zugehöriger Fallvektor F mit zwölf Elementen gebildet:

$$F = (f_1, f_2, \dots, f_{12}) . \quad \mathbf{6.57}$$

Sie entsprechen den zwölf Attributen, die in die Berechnung eingehen (vgl. Abbildung 6.15), wobei jedes Element f_i die fallspezifische Ausprägung des i -ten Attributes abbildet. Eine vollständige Befüllung sämtlicher Datenfelder ist nicht erforderlich. Auf diese Weise lassen sich auch Fälle bewerten, deren Attribute dem Nutzer nicht in aller Gänze bekannt sind. Um eine fehlerfreie Datenverarbeitung zu ermöglichen, werden vor Beginn der Berechnung die Datentypen jedes Eingabewertes auf Systemkonformität geprüft.

Der Vergleich eines neuen Falls mit einem bereits in der Datenbasis vorhandenen wird als Distanz- bzw. Ähnlichkeitsbewertung bezeichnet und mittels einer Distanz- bzw. Ähnlichkeitsfunktion durchgeführt (vgl. Kapitel 4.2.4). Zu diesem Zweck werden Funktionen der Form

$$dist: \mathbb{D} \times \mathbb{D} \rightarrow \mathbb{R}^+ \quad \mathbf{6.58}$$

$$sim: \mathbb{D} \times \mathbb{D} \rightarrow [0,1] \quad \mathbf{6.59}$$

verwendet, welche die Distanz bzw. Ähnlichkeit zweier Werte aus dem Definitionsbereich \mathbb{D} als positive reelle Zahl bzw. im Intervall $[0,1]$ abbilden. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil eines festen Wertes für die dem Problemfall ähnlichsten (1) sowie distanziertesten bzw. unähnlichsten (0) Fälle. Ähnlichkeiten sind aus Distanzen berechenbar. In Anlehnung an Bergmann werden die Ähnlichkeitsfunktionen nach dem Lokal-Global-Prinzip aufgebaut. [BERG03] Auf globaler Ebene wird die Ähnlichkeit zweier Fälle F^N (neuer Fall) und F^F (gefundenen Fall) als

$$SIM(F^N, F^F) = \frac{\sum_{i=2}^9 w_i \cdot sim_i(f_i^N, f_i^F)}{\sum_{i=2}^9 w_i}, w_i \in [0,1] \quad \mathbf{6.60}$$

definiert, wobei $sim_i(f_i^N, f_i^F)$ die lokalen Ähnlichkeiten der i -ten Elemente der Fälle F^N und F^F darstellt. Berücksichtigung finden hierbei lediglich die Featureparameter, deren Index zwischen zwei und neun liegt. Der spezifische Gewichtungsfaktor w_i entspricht der Gewichtung aus der im Kapitel 5.1.1 beschriebenen Einflussanalyse (vgl. Tabelle 5.4), daher gilt

$$\sum w_i = 1 . \quad \mathbf{6.61}$$

In Abhängigkeit vom Datentyp der zu vergleichenden Attribute f_i^N, f_i^F variiert die Distanz- bzw. Ähnlichkeitsfunktion. Für Attribute mit booleschen Werten, reellen sowie natürlichen, unkodierten Zahlen wird die lineare Distanz

$$dist_i(f_i^N, f_i^F) = |f_i^N - f_i^F| \quad \mathbf{6.62}$$

herangezogen.

Im Fall dieser nicht-kodierten Attribute wird die lokale Ähnlichkeit sim_i auf Basis der genannten Distanzfunktionen $dist_i$ berechnet:

$$sim_i(f_i^N, f_i^F) = g(dist_i(f_i^N, f_i^F)). \quad 6.63$$

Über monoton fallende Ähnlichkeitsfunktionen lässt sich die abnehmende Ähnlichkeit zweier Werte bei zunehmender Distanz darstellen (vgl. Abbildung 6.16). Dazu ist die Distanz zunächst zu normieren. Anschließend ist die Abbildung der Distanz der Ausprägung zweier Attribute auf die lokale Ähnlichkeit im Intervall $[0,1]$ in der Form möglich, dass $g(0) = 1$ und $g(1) = 0$.

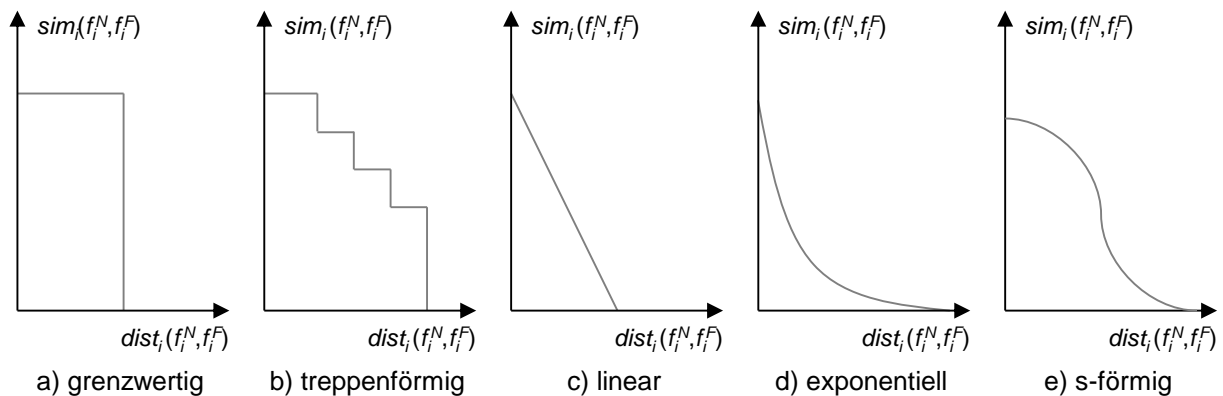


Abbildung 6.16: Ansätze möglicher Ähnlichkeitsfunktionen in Anlehnung an [BERG03]

Zur Bewertung der lokalen Ähnlichkeit von Attributwerten zweier Features schlägt [HYUN08] in seinem bereits in Kapitel 4.3.3 vorgestellten System zur erfahrungsgelernten NC-Programmierung eine lineare Funktion (Formel 6.64 analog Abbildung 6.16c) für proportionale und eine glocken- bzw. s-förmige Funktion (Formel 6.65 analog Abbildung 6.16e) für nichtlineare Zusammenhänge zwischen Distanz und Ähnlichkeit vor:

$$sim_i(f_i^N, f_i^F) = 1 - \frac{dist_i(f_i^N, f_i^F)}{\beta_i}, \quad 6.64$$

$$sim_i(f_i^N, f_i^F) = \frac{1}{1 + \left(\frac{dist_i(f_i^N, f_i^F)}{\beta_i}\right)^2}, \quad 6.65$$

wobei jedem i -ten Attribut ein Beiwert β_i zugeordnet wird. Im linearen Fall ist dieser in der Regel konstant und gibt die maximal mögliche Distanz zweier Werte an. Unproportionale Zusammenhänge zwischen Distanz und Ähnlichkeit lassen sich über eine Gleichung der Form

$$\beta_i = a_i f_i^N + b_i \quad 6.66$$

darstellen. [BERG03] Hyun nutzt diese Form, um die lokalen Ähnlichkeitsmaße von Wertepaaren mit gleichem Differenzbetrag über den Wertebereich zu variieren (vgl. Abbildung 6.17).

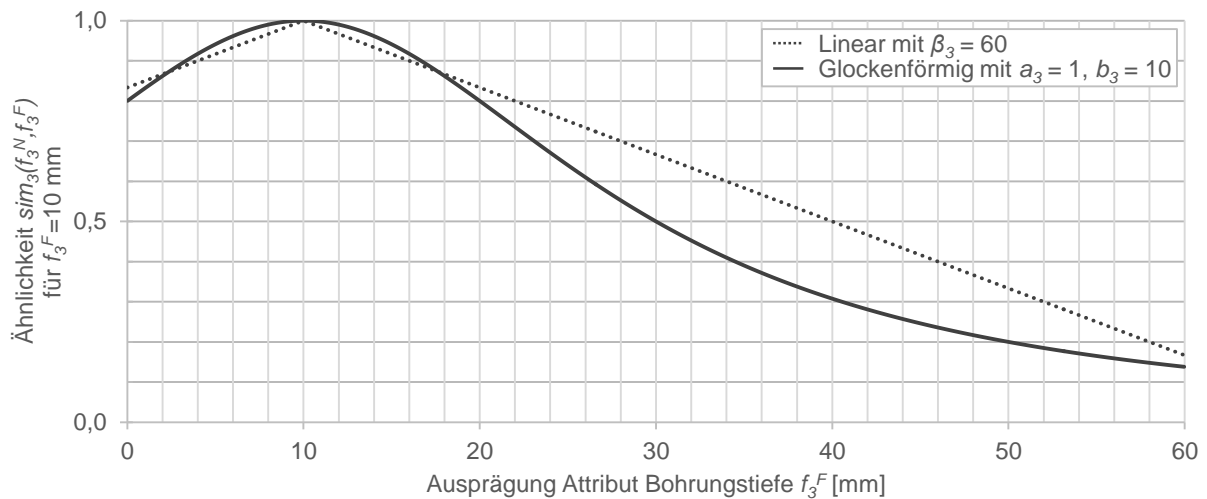


Abbildung 6.17: Vergleich einer linearen und einer glockenförmigen Ähnlichkeitsfunktion

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden den Attributen folgende Ähnlichkeitsfunktionen zugeordnet:

- Wegen des hohen Einflusses von Durchmesser, Bohrungstiefe und L/D -Verhältnis je Stufe auf den technologischen und kostenseitigen Aufwand bei der Einführung von MMS (vgl. Kapitel 5.1) findet bei diesen eine glockenförmige Ähnlichkeitsfunktion nach den Formeln **6.65** und **6.66** Verwendung,
- der Aufzählungstyp Besondere Formen wird anhand der Ähnlichkeitsmatrix in Tabelle 6.6 beschrieben, da sein Wertebereich qualitativer Natur ist und
- die übrigen, weniger einflussreichen Merkmale aus dem Datenbereich Featureparameter werden mit einer linearen Funktion nach Formel **6.64** berechnet.

Die zugehörigen Beiwerte β_i werden attributspezifisch festgelegt, die Werte der Ähnlichkeitsmatrix im Rahmen der Einflussanalyse (vgl. Kapitel 5.1.1) ermittelt.

Tabelle 6.6: Ähnlichkeitsmatrix des Attributs „Besondere Formen“ nach [GREB14, EIME14]

Ausprägung	0	1	2	3
0	1	0,75	0,5	0,25
1		1	0,75	0,5
2			1	0,75
3				1

Anhand dieser lokalen Ähnlichkeiten wird die globale Ähnlichkeit zweier Fälle F^N und F^F gemäß Formel **6.60** berechnet. Ein Beispiel für die Berechnung zeigt Abbildung 6.18.

Neuer Fall F^N			0,941	Gefundener Fall F^F		
②	Durchmesser D	10 mm	0,96	②	Durchmesser D	8,02 mm
③	Bohrungstiefe L	150 mm	0,9996	③	Bohrungstiefe L	148 mm
④	Max. L/D_{Stufe}	15	0,97	④	Max. L/D_{Stufe}	18,5
⑤	N_{Stufen}	1	1	⑤	N_{Stufen}	1
⑥	Gewinde	0	1	⑥	Gewinde	0
⑦	Bes. Anford. Oberfläche/Toleranz	0	1	⑦	Bes. Anford. Oberfläche/Toleranz	0
⑧	Ausrichtung / Eintauchvarianten	0	0	⑧	Ausrichtung / Eintauchvarianten	1
⑨	Besondere Formen	0	0,75	⑨	Besondere Formen	1

i Index des Attributs im Fallvektor

 ⇔ Globale Ähnlichkeit
 ⇔ Lokale Ähnlichkeit

Abbildung 6.18: Beispielhafte Ähnlichkeitsbewertung zweier Bohrfeatures

Abschließend erfolgt die Auswahl der ähnlichsten Features aus der Fallbasis. Dazu werden dem Nutzer die jeweils fünf ähnlichsten Fälle mit Werkzeugen für die Nass- und MMS-Bearbeitung präsentiert. Große Ähnlichkeiten mit Fällen bereits erfolgreich umgesetzter MMS-Technologie bedeuten eine hohe Machbarkeit (und vice versa).

6.4.3 Erklärungsfunktion und Reuse-Prozess

Das Primärziel des Moduls zur Technologieplanung ist die Berechnung der Kosten der Integration von MMS-Technologie in neue Bearbeitungsprozesse. Analog zum FSP-Modul wird der Technologieplaner auch im TP-Modul durch unterschiedliche Erklärungsfunktionen im Planungsprozess unterstützt. Zum einen erhöht die Darstellung der Featureparameter der ausgewählten Fälle und zugehörigen Dokumentenbezüge die Transparenz, zum anderen ist die fallspezifische farbliche Hervorhebung besonders entscheidungsrelevanter Featureparameter bei der späteren Bewertung hilfreich.

Letztere Funktion ermöglicht die Größe der Kritikalität. Analog zur globalen Ähnlichkeit wird auch die Kritikalität eines Features $CRIT(F)$ aus den Einzelkritikalitäten $crit_i(f_i)$ und Gewichtungsfaktoren der Attributausprägungen bestimmt. Kritikalität wird im Folgenden definiert als

$$CRIT(F) = \frac{\sum_{i=2}^9 w_i \cdot crit_i(f_i)}{\sum_{i=2}^9 w_i}, CRIT_i \in [0,1] . \quad 6.67$$

Da die Kritikalität lediglich zur Hervorhebung einzelner Attribute dient und nicht in die weitere Ermittlung der Werkzeugkosten eingeht, wird sie qualitativ dargestellt und zugunsten der Rechenzeit auf ein aufwendiges mathematisches Berechnungsmodell verzichtet. Auf Basis der in Kapitel 5.1.1 beschriebenen Einflussanalyse werden Grenzwerte abgeleitet, innerhalb derer die Kritikalität als gering eingestuft wird (vgl. Abbildung 6.19).

Attribut	Kritikalitätsgrenzwerte		
	gering: $crit_i = 0$ mittel: $crit_i = 0,5$ hoch: $crit_i = 1$		
② Durchmesser D	$D < 4 \text{ mm}$	$4 \text{ mm} \leq D \leq 20 \text{ mm}$	$D > 20 \text{ mm}$
③ Bohrungstiefe L	$L < 150 \text{ mm}$	$L \geq 150 \text{ mm}$	
④ Max. L/D_{Stufe}	$L/D_{\text{Stufe}} < 20$	$L/D_{\text{Stufe}} \geq 20$	
⑤ N_{Stufen}	$N_{\text{Stufen}} = 1$	$N_{\text{Stufen}} = 2$	$N_{\text{Stufen}} \geq 3$
⑥ Gewinde	0	1	
⑦ Bes. Anford. Oberfläche/Toleranz	0	1	
⑧ Ausrichtung / Eintauchvarianten	0	1	
⑨ Besondere Formen	0	≥ 1	
⑩ Index des Attributs im Fallvektor			

Abbildung 6.19: Grenzwerte zur Berechnung der lokalen Kritikalität

Im anschließenden zweiten Schritt des Reuse-Prozesses erfolgt die Adaption der ausgewählten Fälle auf den Problemfall. Dies dient dem Primärziel des Moduls – der Werkzeugkostenbewertung des vom Nutzer vorgegeben Falls. Auf Grundlage der ausgewählten Fälle $F^{F,I}$ sowie der zugehörigen Werkzeugkosten $f_{12}^{F,I}$ und globalen Ähnlichkeiten zum Problemfall $SIM(F^N, F^{F,I})$ werden die Kosten des jeweiligen Werkzeugs K_{WZ}^N wie folgt berechnet:

$$K_{WZ}^N = f_{12}^N = \frac{1}{\sum_{I=1}^{I_{Max}} SIM(F^N, F^{F,I})} \cdot \sum_{I=1}^{I_{Max}} f_{12}^{F,I} \cdot SIM(F^N, F^{F,I}), \quad 6.68$$

wobei I der Index des gefundenen Falls ist und I_{Max} die Anzahl der ausgewählten Fälle.

6.4.4 Unsicherheitsfunktion und Revise-Prozess

Nach automatischer Berechnung der Ähnlichkeit gefundener Fälle (Retrieve) und der Werkzeugkosten des Problemfalls (Reuse) wird im Revise-Prozess die Güte der Berechnung bewertet. Dadurch erhält der Technologieplaner die Möglichkeit, Korrekturen einzuleiten und einzelne Fälle aus der Kostenberechnung auszuschließen.

Wie die Kritikalität dient die auch die Unsicherheit ERR_i dem Hervorheben einzelner Ergebnisse. Dazu prädestiniert erscheint zunächst SIM_i als zentrales Kriterium zur Quantifizierung der Ähnlichkeit zweier Fälle im Rahmen der vorliegenden Arbeit, etwa in Form einer komplementären Beziehung

$$ERR_i = 1 - SIM_i, \quad ERR_i \in [0,1]. \quad 6.69$$

Allerdings hat diese lineare Betrachtung den Effekt, dass die Differenzbeträge der Unsicherheiten von Ähnlichkeitswertepaaren mit gleichem Differenzbetrag über den Definitionsbereich nicht variieren. Um die Relevanz der Unterschiede von Unsicherheiten

im oberen Bereich der Ähnlichkeitsskala zu erhöhen, sind z. B. Exponentialfunktionen geeignet (vgl. Abbildung 6.20).

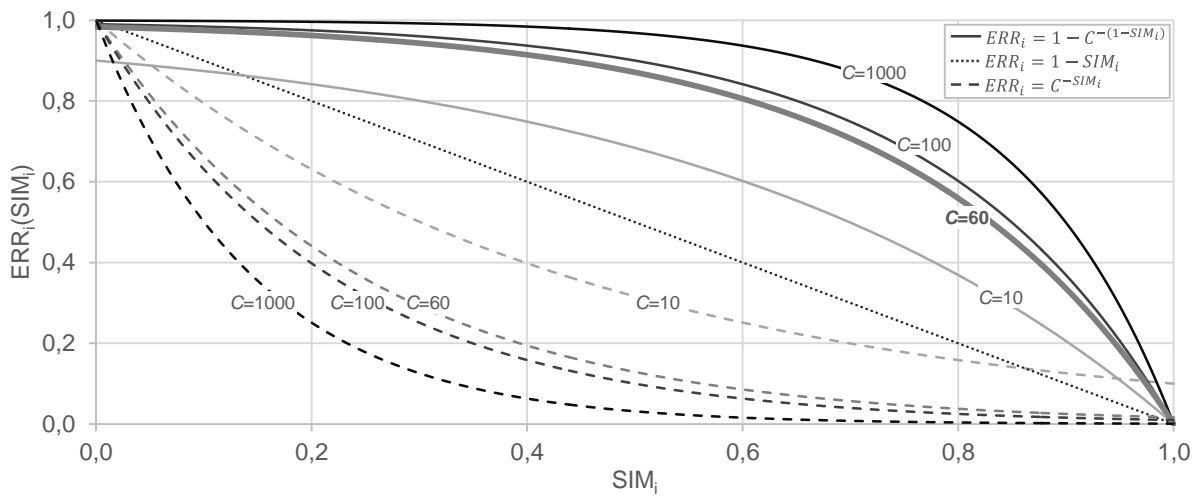


Abbildung 6.20: Auswahl möglicher Funktionen zur Berechnung der Unsicherheit

Aus obiger Abbildung geht hervor, dass Funktionen der Form

$$ERR_i = 1 - C^{-(1-SIM_i)}, \quad ERR_i \in [0,1] \quad \mathbf{6.70}$$

die Relevanz dieser Unterschiede erhöhen. Da die berechnete Unsicherheit – ähnlich der Kritikalität – lediglich als Hinweisgröße an den Nutzer ausgegeben wird und nicht unmittelbar in Folgeberechnungen eingeht, wird sie als qualitative Größe behandelt. Bei der vorliegenden Fallbasis wurde im Planungsbetrieb ein Wert von $C = 60$ als ausreichend identifiziert, um die Unterschiede zwischen hohen Ähnlichkeitswerten hervorzuheben.

Anschließend werden die fünf ähnlichsten Fälle je Feature und ihre Attributausprägungen aufgelistet und absteigend nach Ähnlichkeit sortiert (vgl. Abbildung 6.21). So wird dem Technologieplaner in Abhängigkeit der jeweiligen Daten ermöglicht, die Kostenberechnung durch Abwählen einzelner Fälle nachträglich zu korrigieren.

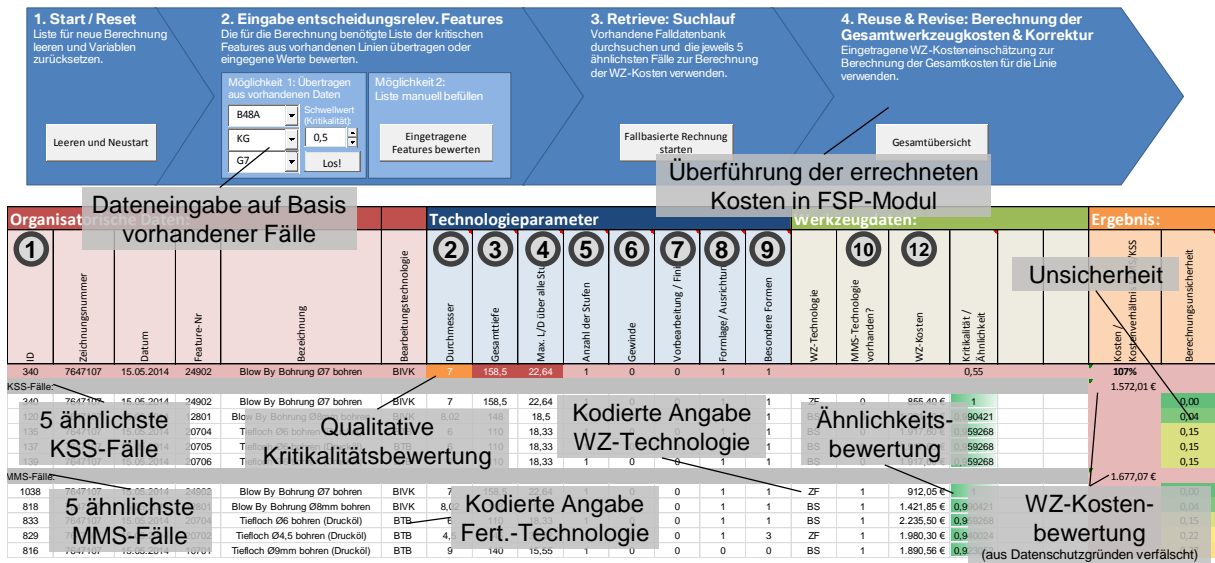


Abbildung 6.21: Screenshotausschnitt der Dialogkomponente des entwickelten TP-Moduls nach Bewertung eines Falls (Kosten und Falldaten aus Datenschutzgründen verfälscht)

6.4.5 Expertenschnittstelle und Retain-Prozess

Der Retain-Prozess von CBR-Systemen sieht in der Regel eine (teil-)automatisierte Überführung erarbeiteter Lösungen in die Falldatenbank vor. Eine wahllose Abspeicherung neuer gelöster Fälle ohne vorherige Prüfung führt auf Dauer zu einer Verfälschung der Datenbasis. (vgl. Kapitel 4.2.4)

Aus diesem Grund erfolgt die Eingabe neuer Datensätze in die Fallbasis über eine Expertenschnittstelle. Nutzer mit Zugang zu dieser Schnittstelle sind befugt, neue Datensätze hinzuzufügen, vorhandene zu verändern und fehlerhafte oder veraltete zu löschen. Zur einfacheren Benutzerführung sind die unterschiedlichen Datenbereiche (vgl. Kapitel 6.4.1) innerhalb der Datenbank farblich abgesetzt (vgl. Abbildung 6.22).

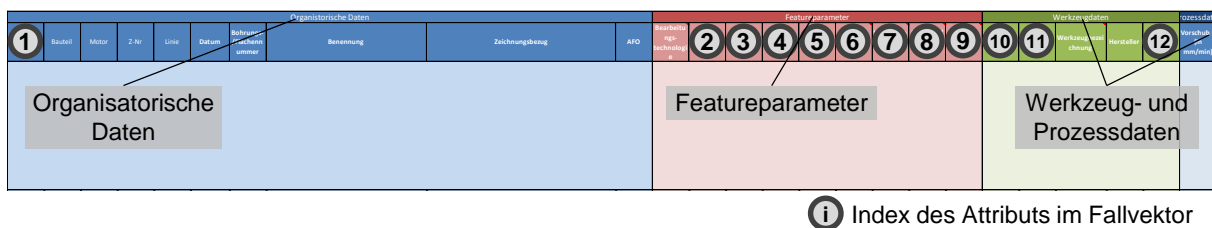


Abbildung 6.22: Aufbau der implementierten Fallbasis

7 Demonstration der Methodik am Fallbeispiel

Nach Entwicklung und Implementierung der Methodik zur Bewertung flexibler Fertigungssysteme hinsichtlich der Kühlschmierstrategie befassen sich die folgenden Abschnitte mit der Anwendung der Planungsmodule. Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse interpretiert und diskutiert. Im Kontext des Stands der Technik und im Hinblick auf die Grenzen des Modells werden allgemeine Handlungsempfehlungen abgeleitet und aufgezeigt.

Aus Gründen der Geheimhaltung entsprechen die Ausprägungen der Stellhebel und Prämissen im FSP-Modul sowie die Datenbasis im TP-Modul nicht den tatsächlichen Gegebenheiten bei der BMW Group: Die Berechnungen beruhen auf verfälschten, aber branchen- und marktüblichen Preisen und Bedingungen. Aufgrund der Sensibilität der Daten wird auf eine detaillierte Darstellung der Datenbasis verzichtet.

7.1 Einsatz in der Fertigungssystemplanung

Zunächst wird die Vorgehensweise im Rahmen der Fertigungssystemplanung vorgestellt. Dabei werden zugrundeliegende Planungsprämissen – mit Ausnahme der oben genannten geheimhaltungspflichtigen und sensiblen Daten – erläutert und die Dimensionierung der Lösungsalternativen für insgesamt 90 fiktive, an reale Bedingungen angelehnte Fallbeispiele dargestellt. Die generierten Fertigungssysteme werden anschließend nach ökonomischen und ökologischen Kriterien gemäß Kapitel 6.2.2 bewertet. Eine Interpretation der Ergebnisse erfolgt im Abschnitt 7.3.

7.1.1 Planungsprämissen

Wie eingangs erwähnt, entsprechen die im Folgenden genannten Planungsprämissen nicht den tatsächlich bei der BMW Group vorzufindenden Gegebenheiten, sie orientieren sich jedoch an branchenüblichen Werten. Um realitätsnahe Ergebnisse zu erhalten, werden die Berechnungsgrundlagen zur Bestimmung der Anzahl von Systemelementen (vgl. Kapitel 6.3.1.2) nicht verfälscht.

Das jährliche Produktionsvolumen, die Bearbeitungszeit pro Werkstück und systemelement- bzw. kostenartspezifische Kostensätze sind wesentliche Treiber für die Dimensionierung und somit die Lebenszykluskosten und Umweltauswirkungen eines FFS (vgl. Kapitel 6.3). Aus diesem Grund werden übergeordnete Prämissen sowie Eingangsparameter ohne direkten Einfluss auf die ökologische und ökonomische Differenzbetrachtung von KSS- und MMS-FFS (z. B. die Komplexität von Nebenfunktionen) für alle Bewertungsläufe konstant gehalten (vgl. Abbildung 7.1). Ebenso wird mit Angaben zur Werkstückkomplexität verfahren, die sich lediglich auf einzelne Anlagen auswirken, wie etwa die Auswahl der Laufbahntechnologie und Bauart. Als Beispielwerkstücke dienen Kurbelgehäuse. Das kostenintensivere 2-Kanalsystem wird als MMS-System verwendet. Die Unterschiede zwischen beiden MMS-

Zufuhrtechnologien werden anhand einer vergleichenden Kapitalwertbetrachtung aufgezeigt. Bei der KSS-Versorgung findet die Methode der Schwerkraftförderung (Variante 1 aus Abbildung 3.4) in Verbindung mit Unterdruckbandfiltertechnologie Anwendung.

Variable Eingangsparameter sind das jährliche Produktionsvolumen und die Anzahl der Zylinder im Werkstück (zur Beeinflussung der Bearbeitungszeit) sowie die Angabe, ob Gebäude und/oder KSS-Filteranlagen bereits vorhanden und in der Berechnung zu berücksichtigen sind. Im Rahmen der Betrachtung steht dabei die Fertigung von drei-, vier- und sechszyindrigen Werkstücken in FFS mit jährlichen Ausbringungen zwischen 150.000 (Minimalausbau) und 600.000 (Vollausbau) Einheiten.

Eingabemaske

Übergeordnete Einstellungen

Steuergröße	Lebenszykluskosten	MaxLaufz	6.800 h/a	Referenz Bearbeitungszeit	2.600 s/E
Art	Projektbezogen	PU	320 h/a	Referenz Arbeitsfolgen	17
Technologie	Antrieb/Motor	AusIOEE	80%	Preisniveau	1
Kostenart	Invest, Budget	FlexVorh	10%	Produktionsvol. im ersten Jahr	60%
		ErsQ	1%	Produktionsvol. im zweiten Jahr	80%
		Prodsteigi	2%	Produktionsvol. im dritten Jahr	100%
			2 a		

Projekt	Datum	05.11.2014	Teilw. variabel: 1-Kanal/2-Kanal	Variabel: Ja / Nein
	Projektname (TAU-Nr.)	B48TÜX	Parameter	
	Planungsart	Neuplanung	Anteil an Einzelspindel-BAZ [in %]	10% Einzelspindel-BAZ
	Linie	G9	Laufbahntechnologie	Grauguss/LDS
	Standort	Steyr	Bauart	bedplate/deepskirt
			MMS-System	2-Kanal
			Werkstückkomplexität	
			Zylinderanzahl	3-Zylinder
			Fertigungskomplexität	mittel
			aktuelle Bearbeitungszeit	2.340 s/E
			Komplexität Nebenfunktionen	
			KSS-Versorgung benötigt	Ja
			Linienstrukturierung benötigt	mittel
			Baumaßnahmen benötigt	Nein
			Steuerungstechnik benötigt	Ja
			Bewertung abgeben	

Projekt
Datum: 05.11.2014
Projektname (TAU-Nr.): B48TÜX
Planungsart: Neuplanung
Linie: G9
Standort: Steyr

Neuplanung
Produktionsvolumen p.a. max: 300.000 E
Produktionsvolumen Vorhalt: E
Laufzeit Fertigungssystem: 15 Jahre
Kalkulationszinssatz: 30%
Gebäude berücks.?: Ja

Teilw. variabel: 1-Kanal/2-Kanal
Variabel: Ja / Nein

Werkstückkomplexität
Zylinderanzahl: 3-Zylinder
Fertigungskomplexität: mittel
aktuelle Bearbeitungszeit: 2.340 s/E

Komplexität Nebenfunktionen
KSS-Versorgung benötigt: Ja
Linienstrukturierung benötigt: mittel
Baumaßnahmen benötigt: Nein
Steuerungstechnik benötigt: Ja

Bewertung abgeben

Abbildung 7.1: Screenshot der Eingabemaske mit konstanten und variablen Eingabeparametern

Da auch die Stellhebel lineare Koeffizienten darstellen, werden sie im Rahmen der Fallstudie konstant gehalten. Die Ausprägung der Faktoren $C_{Zyl}(z_{WS})$ zur Berechnung der BAZ-Bearbeitungszeit in Abhängigkeit der Referenzbearbeitungszeit nach Formel 6.32 ist an reale Bedingungen angelehnt. Zu beachten ist dabei, dass die genannten Werte (vgl. Tabelle 7.1) für einen typischen Mischbetrieb gelten: z_{WS} stellt in diesem Kontext die maximale Zylinderanzahl eines Werkstücks im Produktportfolio des FFS dar. Da die Bearbeitungszeit in der Studie bereits über die Zylinderanzahl variiert wird, wird eine mittlere Fertigungstiefe mit $C_{FT} = 1$ gewählt.

Die Beschaffungskosten werden in den ersten beiden Jahren vollständig abgezahlt. Das Verhältnis beträgt dabei 30 Prozent im ersten ($j = 0$) und 70 Prozent im zweiten ($j = 1$) Jahr. In der dritten Periode ($j = 2$) beginnt der Anlauf des Fertigungssystems mit 60 Prozent des geplanten Produktionsvolumens. Im Laufe der vierten Periode ($j = 3$) werden bereits 80 Prozent erreicht (vgl. Abbildung 7.1, oben rechts). Ab der fünften Periode wird die geplante Ausbringung erzielt. Aufgrund des Kalkulationszinssatzes

von 30 Prozent schlagen sich Einsparungen in späteren Jahren nur sehr gering nieder, die Lebensdauer J des FFS wird im Rahmen der Fallstudie daher konstant auf 15 Jahre beschränkt.

Tabelle 7.1: Ausprägung der relevantesten Stellhebel (weitere Parameter aus Geheimhaltungsgründen nicht dargestellt)

Stellhebel	Index	Ausprägung Ψ	Faktor C
Standort	<i>Standort</i>	Steyr	1,0
		3 Zylinder	0,9
Zylinderanzahl	<i>Zyl</i>	4 Zylinder	1,0
		6 Zylinder	1,12
Fertigungstiefe	<i>FT</i>	Mittel	1,0
Strukturmaßnahmen	<i>NFS</i>	Mittel	
Baumaßnahmen	<i>NFB</i>	Nein	
Steuerungstechnik	<i>NFST</i>	Ja	0,16
Energie- und Medienversorgung	<i>NFEM</i>	--	
Objektabsaugung	<i>NFO</i>	--	
Split Beschaffungskosten $t = 0$	<i>Split,0</i>	--	0,3
Split Beschaffungskosten $t = 1$	<i>Split,1</i>	--	0,7

Tabelle 7.2 gibt einen Überblick über die relevantesten Prämissen im Kontext der Betriebskosten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit gelten für FFS mit Nassbearbeitung die auf zahlreichen Messungen [GREB11, BUFF12, VÁRA13] beruhenden mittleren Verbrauchswerte für Wasser $V_{Wasser,St,FK} = 71$ bzw. Schmierstoff $V_{Schm,St,FK} = 0,2441$ pro Referenzwerkstück. Hinzu kommen die in Abständen von acht Jahren (vgl. Kapitel 6.2.2.2, Referenzwert des BMW Werkes Steyr) erfolgenden KSS-Neuansätze mit durchschnittlichen Referenzvolumina von 500 m^3 Wasser, 40 m^3 Schmierstoffen und ca. 1 m^3 Additiven. Auch diese Werte beruhen auf im Rahmen der vorliegenden Arbeit erhobenen Messungen, die auf ein voll ausgebautes KSS-Versorgungssystem für FFS mit jährlichen Produktionsvolumina von bis zu 600.000 Stück hochgerechnet wurden. Angenommen wurde dabei eine achtprozentige Emulsion.

Die spezifischen Energiekosten basieren auf dem Strompreis für Industrieverbraucher im ersten Halbjahr 2015 ohne Steuern und Abgaben (vgl. Kapitel 5.2.3.2), die Spannmasse je Referenzwerkstück von 2 kg ist an vergleichbare Werkstücke der BMW Group angelehnt. Zur Berechnung der Mehrkosten im Bereich der Werkzeuge wird auch ein spezifischer Aufschlag im Vergleich zu Werkzeugen für die Nassbearbeitung in Höhe von 21,4 Prozent herangezogen. Dieser ist aus Geheimhaltungsgründen abgeändert, konservativ ausgelegt und orientiert sich an Erfahrungswerten aus früheren Projekten.

Tabelle 7.2: Ausprägung der relevantesten Prämissen zur Berechnung der Betriebskosten (weitere Parameter aus Geheimhaltungsgründen nicht dargestellt)

Prämissen	Formel(zeichen)	Wert
Wasserverbrauch je Referenzwerkstück	$V_{Wasser,St,FK}$	7,0 l/St.
Schmierstoffverbrauch je Referenzwerkstück (KSS)	$V_{Schm,St,FK}$	0,244 l/St.
Schmierstoffverbrauch je Referenzwerkstück (MMS)	$V_{Schm,St,FM}$	0,04 l/St.
Wasserverbrauch je KSS-Neuansatz (max. Ausbau)	$V_{Wasser,AS}$	500 m ³
Schmierstoffverbrauch je KSS-Neuansatz (max. Ausbau)	$V_{Schmier,AS}$	40 m ³
Additivverbrauch je KSS-Neuansatz (max. Ausbau)	$V_{Add,AS}$	1,03 m ³
Zeitraum zwischen KSS-Neuansätzen	J_{AS}	8 Jahre
Spezifische Energiekosten	$k_{Energie}$	0,0809 €/kWh
Spanmasse je Referenzwerkstück	$m_{Span,St}$	2 kg/St.
Aufschlag MMS-Werkzeugbeschaffungskosten im Vgl. zu KSS	$(A_{j,WZ,FM} - A_{j,WZ,FK})/A_{j,WZ,FK}$	21,4 %

7.1.2 Dimensionierung der Lösungsvarianten

Nach Eingabe der oben genannten Planungsprämissen werden die Lösungsvarianten anhand der im Kapitel 6.3.1.2 beschriebenen Regeln dimensioniert. Dabei unterscheiden sich die Systemelementarten in der Form der Skalierung (vgl. Abbildung 6.8). Im Folgenden wird für jede zur Anwendung kommende *Skalierungsart* repräsentativ ein Beispiel angeführt.

Die Beschaffungskosten des pro FFS für Werkstücke mit LDS-beschichteten Zylinderlaufbuchsen einmalig erforderlichen Prüfplatzes zur Zylinderinspektion (*Skalierungsart* 12) hängen von der Anzahl der Zylinder ab (vgl. Abbildung 7.2). In der vorliegenden Fallstudie weisen Prüfplätze für drei- und vierzylindrige Werkstücke identische, für sechszylindrige um 20 Prozent höhere Beschaffungskosten auf.

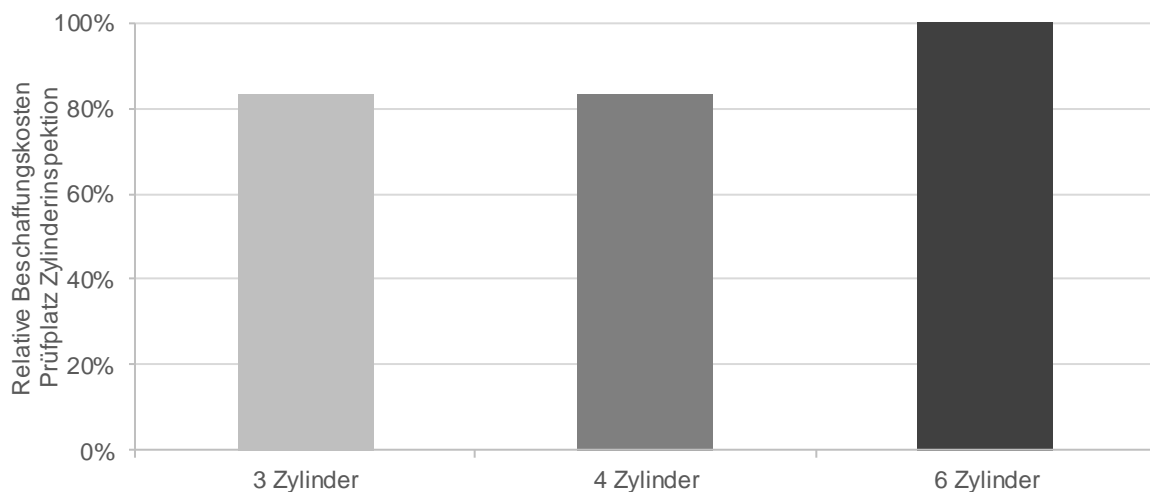


Abbildung 7.2: Relative Beschaffungskosten eines Prüfplatzes zur Zylinderinspektion in Abhängigkeit von der Zylinderanzahl

Unabhängig von z_{WS} hingegen sind die Beschaffungskosten der Be- und Entladeeinrichtungen: Da sie die *Skalierungsart* 13 aufweisen (vgl. Abbildung 6.8), hängen die Beschaffungskosten vom jährlichen Produktionsvolumen ab. Abbildung 7.3 stellt diese für die Rohteilbeladungseinheit dar. Die Basisvariante eines solchen automatischen Rohteilbahnhofs weist eine Kapazität von 200.000 Einheiten pro Jahr auf, die Beschaffungskosten steigen bis zum Maximalwert bei 600.000 jährlichen Einheiten linear an.

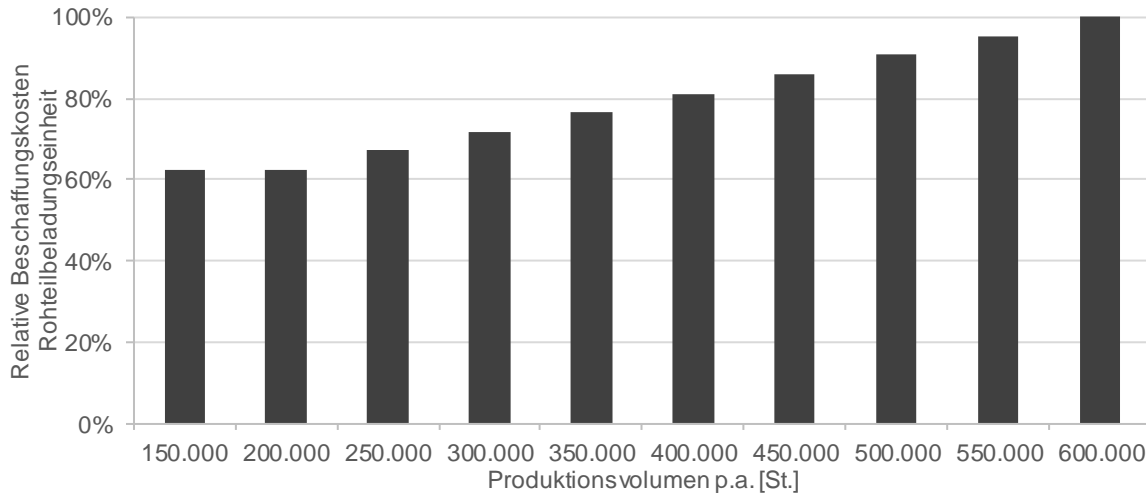


Abbildung 7.3: Relative Beschaffungskosten der Rohteilbeladung in Abhängigkeit vom jährlichen Produktionsvolumen

Im Gegensatz zu den obigen Beispielen der Zylinderinspektion und Rohteilbeladung sind die Beschaffungskosten von Reinigungsanlagen konstant. Ihre Anzahl variiert allerdings in Abhängigkeit vom jährlichen Produktionsvolumen (*Skalierungsart* 21). Die applizierten Skalierungsregeln für Vor- und Endreinigungszellen führen dabei zu einer unterschiedlichen Dimensionierung der beiden Systemelementarten (vgl. Abbildung 7.4). Verglichen mit einem minimal ausgebauten FFS sind in der durchgeführten Fallstudie im Vollausbau 300 Prozent mehr Vor- und 200 Prozent mehr Endreinigungsanlagen erforderlich.

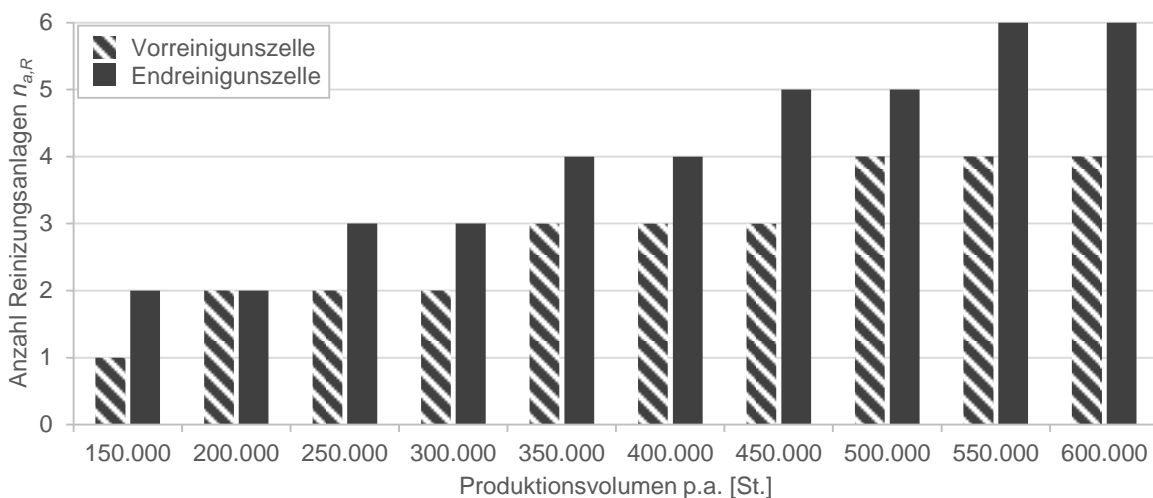


Abbildung 7.4: Anzahl der Vor- und Endreinigungszellen in Abhängigkeit vom jährlichen Produktionsvolumen

BAZ stellen einen Sonderfall dar (vgl. Kapitel 6.3.1.2.1): Während ihre Beschaffungskosten wegen der unterschiedlichen erforderlichen Arbeitsraumgröße lediglich von der Zylinderanzahl abhängen, wird ihre Anzahl durch das jährliche Produktionsvolumen und die Werkstückkomplexität bestimmt (vgl. Formeln 6.33, 6.34). Aufgrund der geringen Einzelspindel-BAZ-Quote von 10 Prozent sind die Effekte im Fallbeispiel insbesondere bei Doppelspindlern erkennbar (vgl. Abbildung 7.5).

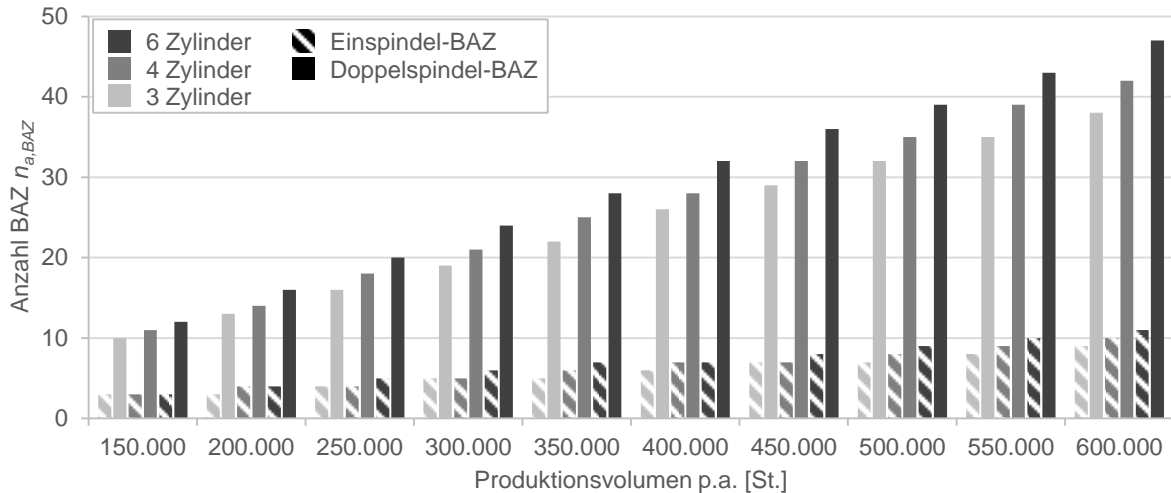


Abbildung 7.5: Anzahl der Ein- und Doppelspindel-BAZ in Abhängigkeit von Zylinderanzahl und jährlichem Produktionsvolumen

Bei einem maximal ausgebauten FFS sind im Vergleich zum Minimalausbau zwischen 280 und 292 Prozent zusätzliche Doppelspindel-BAZ erforderlich. Bei gleicher jährlicher Ausbringung schwankt die zusätzlich erforderliche BAZ-Anzahl zur Fertigung von Werkstücken mit mehr als drei Zylindern je nach Ausbaustufe zwischen 20 und 30 Prozent.

In Anlehnung an das im Kapitel 5.2 vorgestellte FFS sind KSS-Filteranlagen für BAZ in der maximalen Ausbaustufe auf die Versorgung von FFS mit maximal 300.000 Einheiten pro Jahr ausgelegt. Systeme mit höherer Ausbringung erfordern eine zusätzliche Anlage. Wegen der einmaligen Fixkosten von KSS-Filteranlagen, wie etwa der Steuerungseinheit, ergibt sich bei einem jährlichen Produktionsvolumen von 300.000 Werkstücken ein Kostensprung von 20 Prozent (vgl. Abbildung 7.6). Angesichts der auch im Vollausbau vergleichsweise geringen KSS-Fördermenge (vgl. Kapitel 5.2.2.3) bleibt die Anzahl der Filteranlagen für Honmaschinen konstant, lediglich ihre Dimensionierung variiert mit dem Produktionsvolumen.

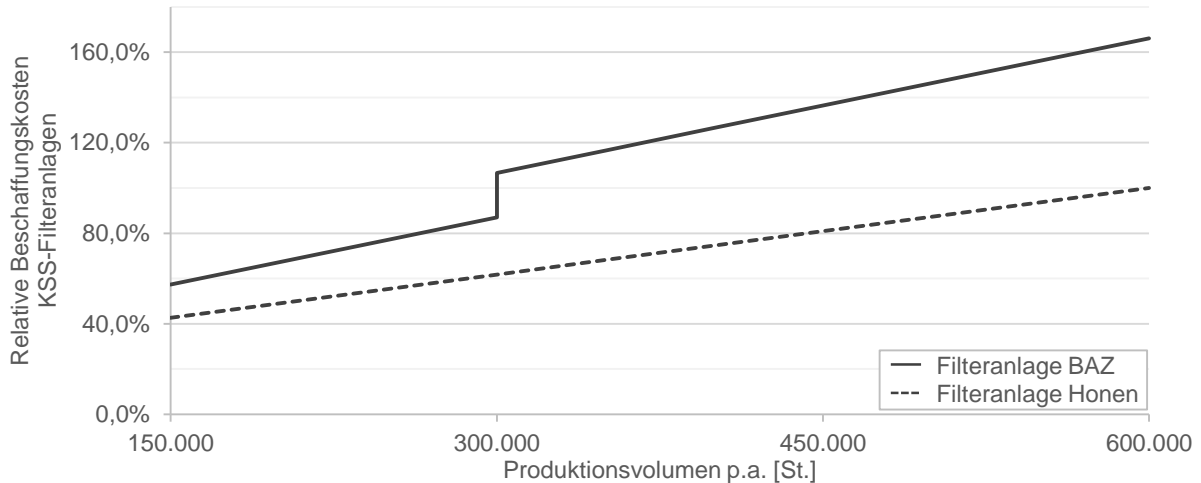


Abbildung 7.6: Relative Beschaffungskosten von KSS-Filteranlagen in Abhängigkeit vom jährlichen Produktionsvolumen

Obwohl zwischen der Anzahl der Systemelemente und jener der Maschinenladeportale ein direkter Zusammenhang besteht, sind im Vollausbau je nach Zylinderanzahl zwischen 55 und 75 Prozent mehr MLP erforderlich (vgl. Abbildung 7.7). Verglichen mit der oben genannten Anzahl der BAZ erscheint der Wert gering. Zu beachten ist jedoch, dass in der Regel mehrere Maschinen an ein Ladeportal angeschlossen sind (vgl. Kapitel 5.2.1). Somit erhöht sich bei einer höheren Anzahl an Systemelementen die erforderliche Portallänge. Da diese sich nur vergleichsweise geringfügig auf die Beschaffungskosten auswirkt, wird sie im Rahmen der vorliegenden Arbeit vernachlässigt.

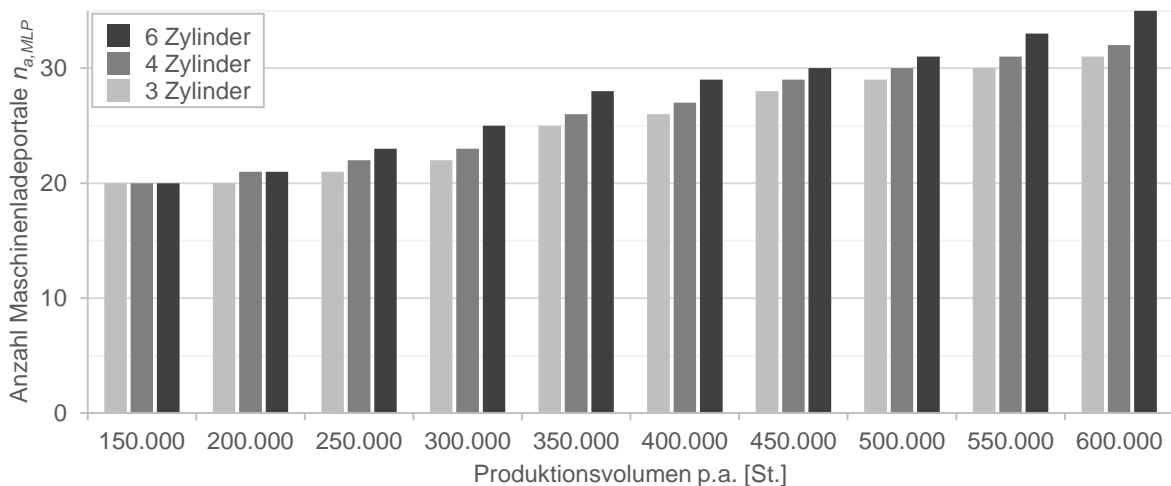


Abbildung 7.7: Anzahl Maschinenladeportale in Abhängigkeit von Zylinderanzahl und jährlichem Produktionsvolumen

7.1.3 Ökonomische Bewertung

Wie in Kapitel 6.2.2.1 ausgeführt, erfolgt die wirtschaftliche Bewertung primär anhand des aufwandsorientierten Kapitalwerts der Differenzinvestition $K_{FK-FM,0}$. Neben dem Kalkulationszinssatz von 30 Prozent wird dieser durch die Ein- und Auszahlungen in den betrachteten Perioden beeinflusst (vgl. Formel 6.2).

Zunächst werden daher die Beschaffungskosten der untersuchten FFS betrachtet. Abbildung 7.8 zeigt die Differenz der Beschaffungskosten der Lösungsalternativen für Nass- und MMS-Bearbeitung in Abhängigkeit von Zylinderanzahl, jährlichem Produktionsvolumen und vorhandener Infrastruktur.

Auffällig ein sprunghafter Anstieg der Beschaffungskosten bei 300.000 Einheiten: Dieser resultiert aus diversen, sich überlagernden Effekten, vor allem aber aus der Anschaffung einer zweiten KSS-Filteranlage zur Versorgung der BAZ im KSS-FFS und zusätzlicher Reinigungsanlagen. Dafür spricht auch das Fehlen eines solchen Sprungs in Fällen eines bereits vorhandenen KSS-Versorgungssystems. Letztere Fälle stellen das für die MMS-Technologie ungünstigste Szenario dar, da den MMS-spezifischen Zusatzinvestitionen in BAZ und Nebenbetrieben bei der Nassbearbeitung keine Ausgaben für die KSS-Versorgung gegenüberstehen.

Von diesem Kostensprung abgesehen, sinkt die Differenz der Beschaffungskosten bei der Lösungsalternativen stetig mit wachsender jährlicher Ausbringung: Lediglich FFS zur Fertigung dreizylindriger Werkstücke weisen eine fast durchgehend positive Differenz auf (Ausnahme bei 300.000 Einheiten pro Jahr), sofern die Beschaffungskosten für das unterkellerte Gebäude und im Falle der Nassbearbeitung jene der KSS-Versorgung berücksichtigt werden. Im Vergleich zur Nassbearbeitung treten geringere Beschaffungskosten für MMS-FFS in der Fallstudie demnach nur in Einzelfällen auf.

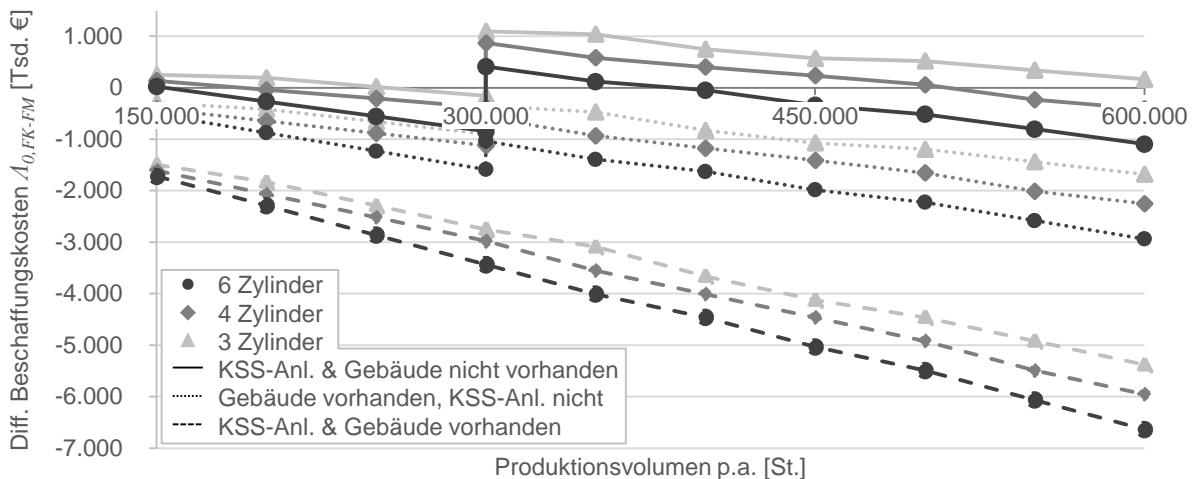


Abbildung 7.8: Differenz der Beschaffungskosten von KSS- und MMS-FFS in Abhängigkeit von Zylinderanzahl, jährlichem Produktionsvolumen und vorhandener Infrastruktur

Mit Blick auf die Differenz der Beschaffungskosten im Verhältnis zu den Kosten für ein FFS mit Nassbearbeitung $\Delta_{FK-FM} / \Delta_{FK}$ wird der verhältnismäßig geringe Einfluss der Kühlschmierstrategie deutlich: Sofern nicht auf eine vorhandene KSS-Versorgung zurückgegriffen werden kann, schwankt die Differenz im Bereich von ca. -2 bis 2 Prozent (vgl. Abbildung 7.9). Ebenfalls erkennbar ist der geringe Effekt der Zylinderanzahl bei Projekten mit bereits vorhandenem Gebäude mit KSS-Versorgung.

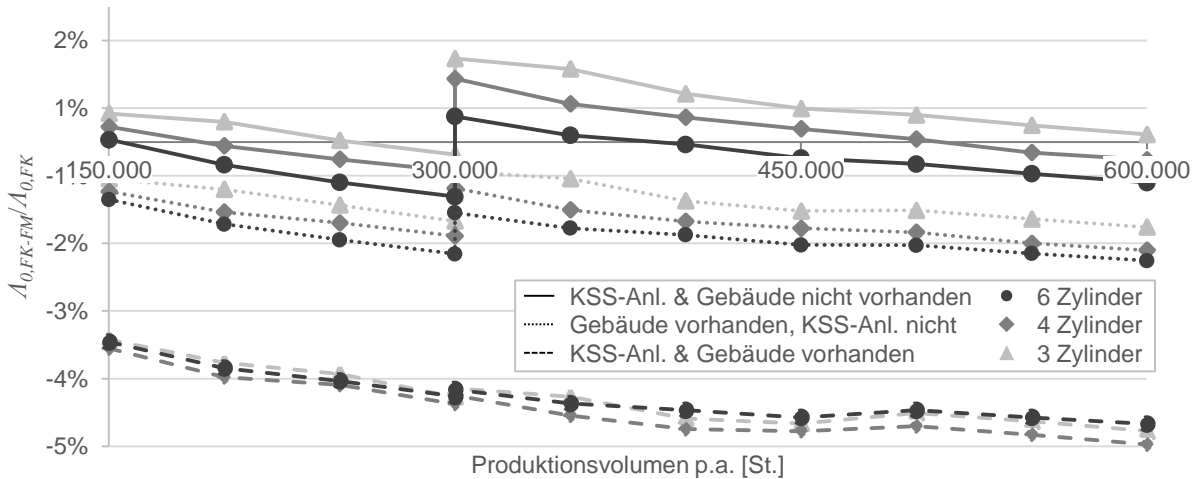


Abbildung 7.9: Differenz der Beschaffungskosten von KSS- und MMS-FFS im Verhältnis zu jenen von FFS mit Nassbearbeitung in Abhängigkeit von Zylinderanzahl, jährlichem Produktionsvolumen und vorhandener Infrastruktur

Unabhängig von der vor Projektbeginn vorhandenen Infrastruktur sind die jährlichen Betriebskosten der FFS. Nach Formel 6.38 werden sie vom Werkstückkomplexitätsfaktor C_{WSK} beeinflusst, der in der vorliegenden Fallstudie lediglich durch die Zylinderanzahl bestimmt wird (vgl. Formel 6.32). Durch die im Kapitel 7.1.1 genannten Faktoren $C_{Zyl}(z_{WS})$ ergibt sich der in Abbildung 7.10 dargestellte lineare Verlauf.

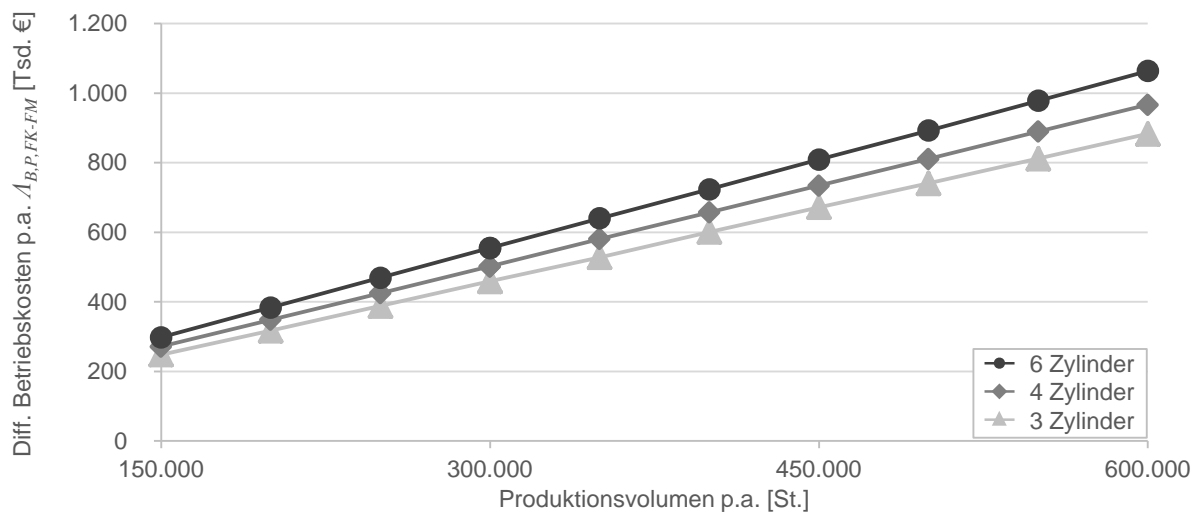


Abbildung 7.10: Differenz der jährlichen Betriebskosten von KSS- und MMS-FFS in Abhängigkeit von Zylinderanzahl und jährlichem Produktionsvolumen

Beim Vergleich der Differenz der Betriebskosten in der Fallstudie fällt auf, dass die FFS mit MMS ca. 8 bis 10 Prozent geringere jährliche Kosten verursachen als die FFS mit Nassbearbeitung (vgl. Abbildung 7.11). Die mit steigender Stückzahl leicht sinkende Tendenz geht aus geringeren Energiestückkosten hervor, die auf Skaleneffekten bei einmalig zu beschaffenden Anlagen beruhen.

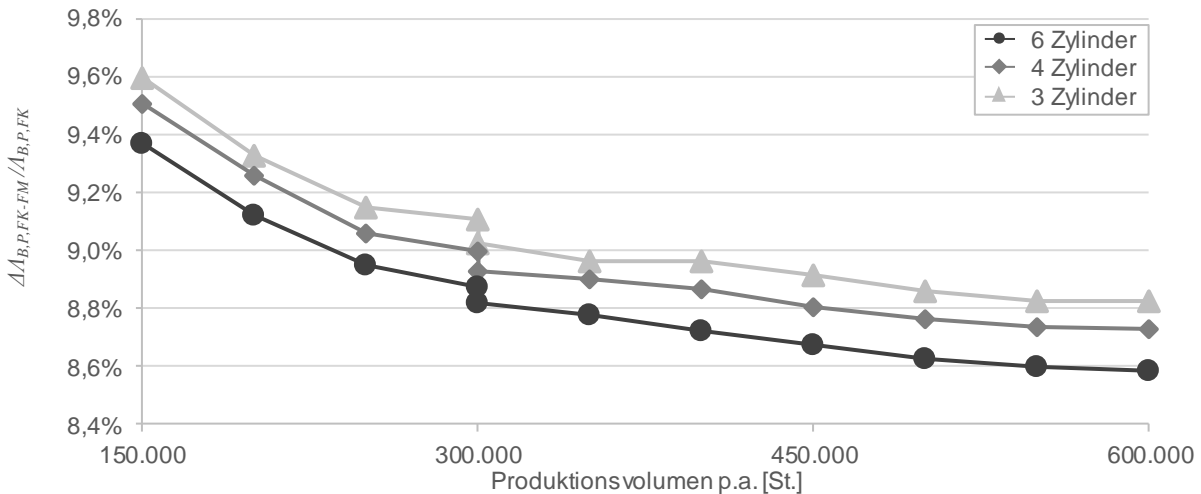
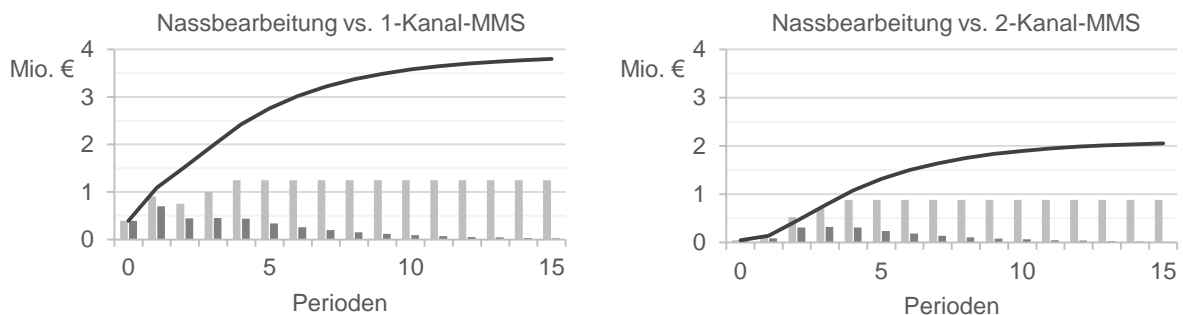


Abbildung 7.11: Differenz der jährlichen Betriebskosten von KSS- und MMS-FFS im Verhältnis zu jenen von KSS-FFS

MMS-Systeme mit 1-Kanal-Technologie sind in der Regel bei Anschaffung und Unterhalt günstiger als 2-kanalige (vgl. Kapitel 3.2.3). Auf Basis einer konservativen Rechnung werden der Nassbearbeitung im Rahmen dieser Untersuchungsreihe FFS mit 2-Kanal-MMS-Technologie gegenübergestellt. Die wirtschaftlichen Vorteile der 1-kanaligen Lösung zeigt Abbildung 7.12: $\kappa_{FK-FM,0}$ von 1-Kanal-MMS liegt ca. 85 Prozent über dem Vergleichswert der 2-kanaligen Lösungsvariante. Ebenfalls ersichtlich ist der geringe Kapitalwert p. a. gegen Ende des Lebenszyklus.



Legende		Prämissen	
■	Saldo Ein-/Auszahlungen pro Periode	Produktionsvolumen:	600.000 St. p.a.
■	Kapitalwert der Diff.-investition p.a. (abgezinst auf $j = 0$)	Zylinderanzahl:	4
—	Kumulierter Kapitalwert der Diff.-investition (abgezinst auf $j = 0$)	KSS-Anlage vorhanden:	Nein
		Gebäude vorhanden:	Nein

Abbildung 7.12: Gegenüberstellung der Kapitalwertberechnung von FFS mit 1- und 2-Kanal-MMS im Vergleich zur Nassbearbeitung

Einen zusammenfassenden Vergleich von $\kappa_{FK-FM,0}$ von FFS mit 2-kanaligen MMS und solchen mit Nassbearbeitung im Untersuchungsbereich zeigt Abbildung 7.13. Aufgrund der bei 300.000 Einheiten pro Jahr sprunghaft ansteigenden Beschaffungskosten für KSS-Filteranlagen weisen die Graphen in diesem Bereich ebenfalls eine Unstetigkeit auf. Für die getroffenen Prämissen wird unabhängig von der Zylinderanzahl des Werkstücks eine positive Rendite von FFS mit MMS im Vergleich zur Nassbearbeitung erreicht, sofern weder eine KSS-Filteranlage noch ein Gebäude vorhanden ist.

Wird ein FFS in ein bereits bestehendes Gebäude integriert, das keine KSS-Versorgung beinhaltet, ist die Wahl von MMS in den meisten Fällen ebenfalls die rentablere. Ausnahmen bilden Systeme mit Ausbringungen von 300.000, 550.000 oder 600.000 sechszylindrigen Werkstücken pro Jahr.

Anders stellt sich die Rentabilität im Fall der Integration in ein Bestandsgebäude dar, das bereits mit einer KSS-Versorgung versehen ist: Aufgrund der Mehraufwände für Spanensorgungseinrichtungen und MMS-Systeme in BAZ ist die Nassbearbeitung stets die rentablere Lösungsvariante.

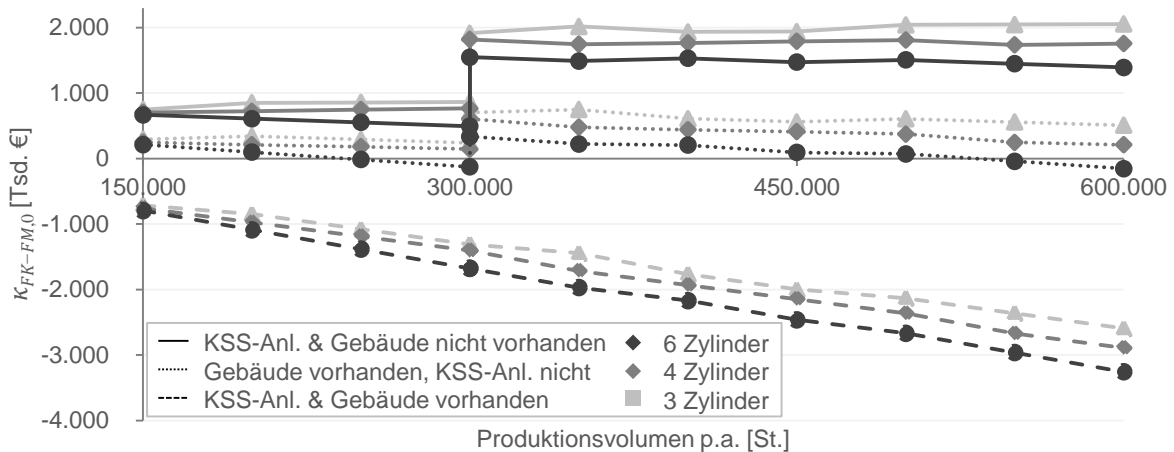


Abbildung 7.13: Aufwandsorientierter Kapitalwert der Differenzinvestition in Abhängigkeit von Zylinderanzahl, jährlichem Produktionsvolumen und vorhandener Infrastruktur

7.1.4 Ökologische Bewertung

Die Erläuterung der Effekte des MMS-Einsatzes auf die im Kapitel 6.2.2.2 definierten ökologischen Bewertungsparameter in den untersuchten FFS ist Bestandteil des folgenden Abschnitts.

Abbildung 7.14 gibt einen Überblick über das Verhältnis der Differenz des spezifischen Energiebedarfs $\Delta \mathcal{E}_{Gesamt}$ zum Wert bei Nassbearbeitung $\mathcal{E}_{Gesamt,FK}$. In den betrachteten Fällen beträgt es ca. 9 bis 11 Prozent, wobei es mit zunehmender jährlicher Stückzahl steigt. Dieser Effekt resultiert insbesondere aus der höheren Gewichtung von BAZ, deren Leistungsaufnahme bei MMS-Einsatz geringer ist (vgl. Kapitel 5.3.2): Bei stagnierender Anzahl zahlreicher Systemelementarten mit identischer Leistungsaufnahme bei KSS- und MMS-Einsatz (vgl. ebd. und Abbildung 6.8) steigt die erforderliche BAZ-Anzahl mit zunehmender jährlicher Stückzahl.

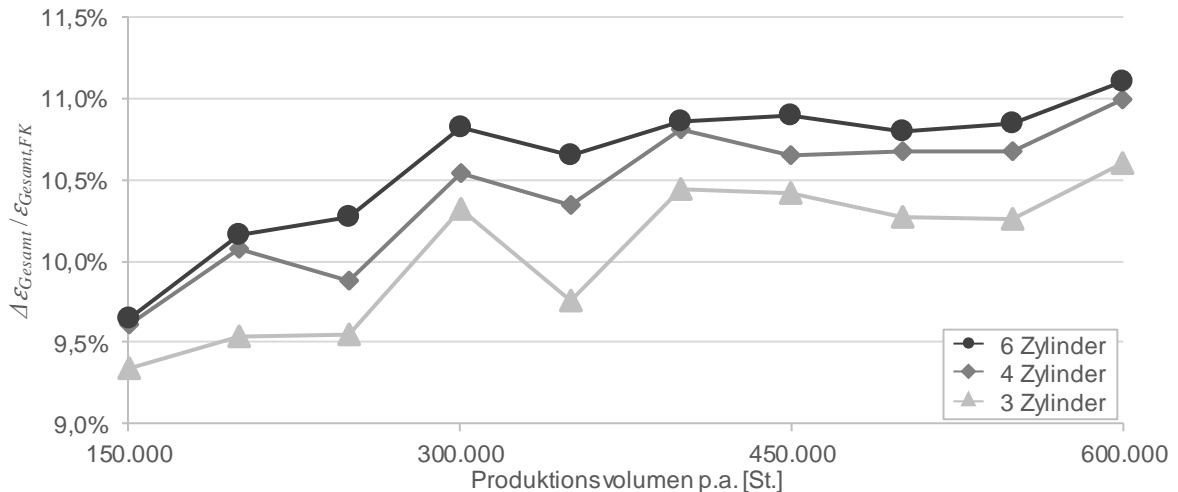


Abbildung 7.14: Differenz des spezifischen Energiebedarfs von KSS- und MMS-FFS im Verhältnis zum spezifischen Energiebedarf bei Nassbearbeitung

Da die Bearbeitungszeit maßgeblich von der Werkstückkomplexität abhängt (vgl. Formel 6.32), die im Fallbeispiel durch die Zylinderanzahl repräsentiert wird, steigt der absolute Wert von $\Delta \mathcal{E}_{Gesamt}$ mit zunehmender Anzahl an Zylindern an (vgl. Abbildung 7.15).

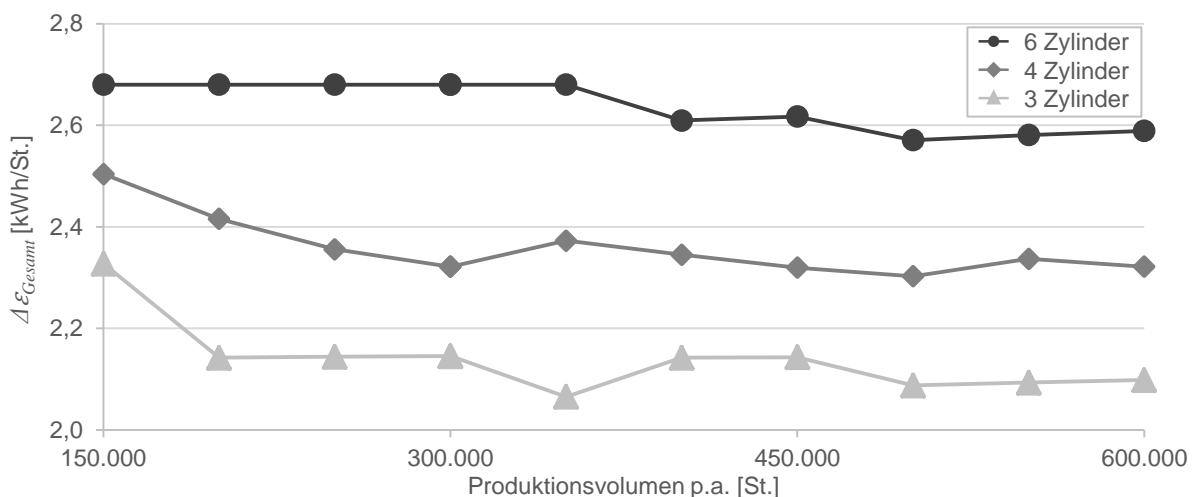


Abbildung 7.15: Differenz des spezifischen Energiebedarfs von KSS- und MMS-FFS in Abhängigkeit von Zylinderanzahl und jährlichem Produktionsvolumen

Infolge des geringeren Einflusses von einmalig zu beschaffenden Systemelementen nimmt der Differenzbetrag mit zunehmendem Produktionsvolumen tendenziell ab. Schwankungen resultieren dabei unmittelbar aus der Dimensionierung des FFS.

Analog zum Energiebedarf steigt auch der Wasserverbrauch pro Werkstück mit zunehmender Zylinderanzahl (vgl. auch Formel 6.43). Wegen des abnehmenden Einflusses der Verbräuche bei Erstbefüllung des KSS-Versorgungssystems und Neuanfang im Laufe des Lebenszyklus sinkt der Differenzbetrag zwischen KSS und MMS mit wachsender jährlicher Produktionsmenge (vgl. Abbildung 7.16).

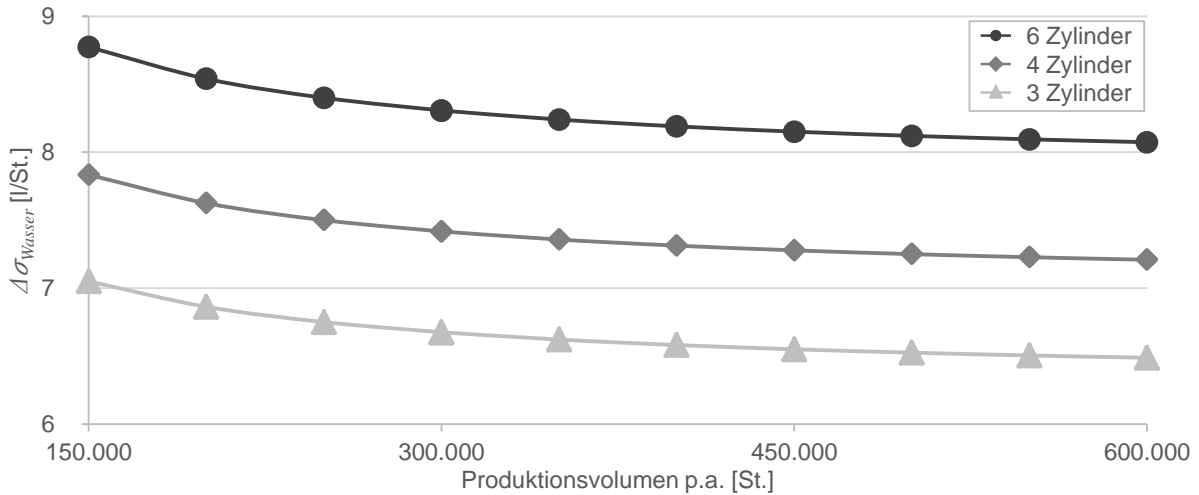


Abbildung 7.16: Differenz des spezifischen Wasserverbrauchs von KSS- und MMS-FFS in Abhängigkeit von Zylinderanzahl und jährlichem Produktionsvolumen

Die Kennzahl zur Bewertung der Abfallmenge $\Delta\sigma_{Abfall}$ stellt sich bei MMS-Einsatz ebenfalls günstiger dar und steigt mit zunehmender Zylinderanzahl (vgl. Abbildung 7.17).

Auslöser ist der steigende Bedarf an KSS, der einen erhöhten Verbrauch von Filtervliesmaterial verursacht. Eine Abhängigkeit von der Stückzahl besteht nicht (vgl. Formel 6.11).

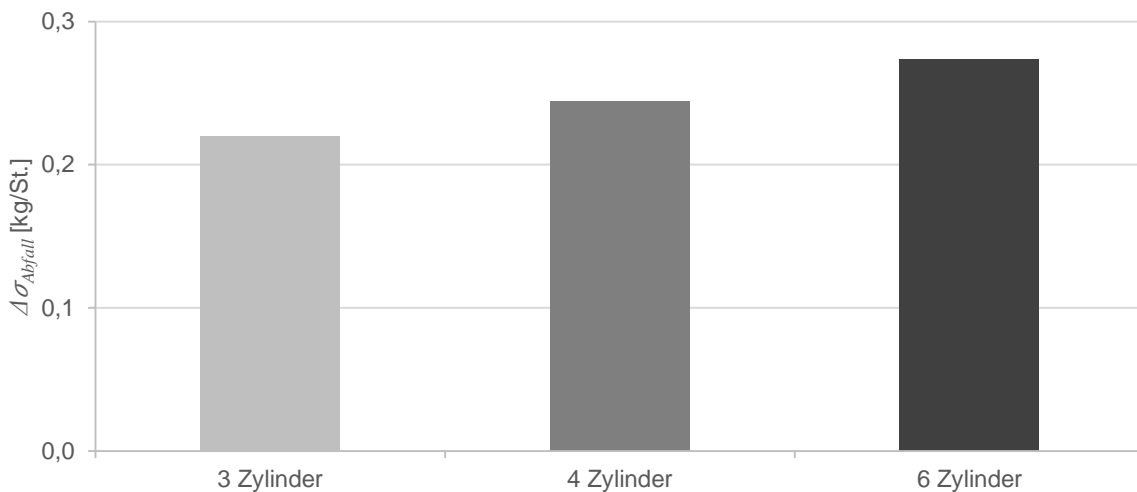


Abbildung 7.17: Differenz des spezifischen Anfalls von Abfall bei KSS- und MMS-FFS in Abhängigkeit von der Zylinderanzahl des Werkstücks

Abbildung 7.18 zeigt, dass der spezifische Flächenbedarf $\sigma_{Fläche}$ bei wachsender jährlicher Ausbringung sinkt, der Wert bei Nassbearbeitung jedoch durchgängig unter jenem bei Einsatz von MMS-Technologie liegt. Ersteres folgt aus dem abnehmenden Einfluss des Flächenbedarfs von Systemelementarten mit stagnierender Anzahl, letzteres aus den für die KSS-Filteranlagen erforderlichen Räumlichkeiten. Wegen der begrenzten Versorgungskapazität ergibt sich die bereits in den vorangegangenen Abschnitten erläuterte Unstetigkeit bei einer Stückzahl von 300.000 Einheiten pro Jahr.

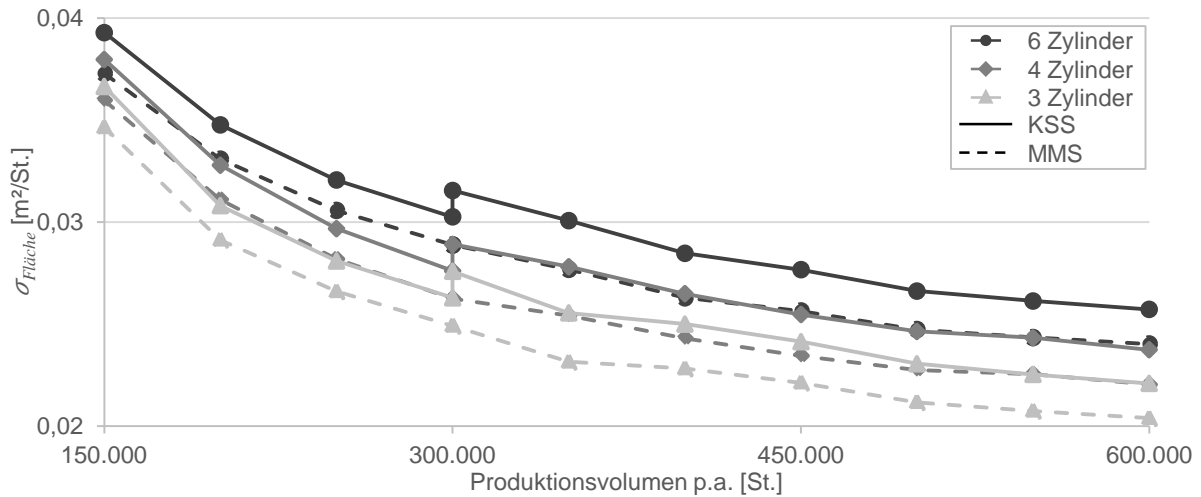


Abbildung 7.18: Spezifischer Flächenbedarf von KSS- und MMS-FFS in Abhängigkeit von Zylinderanzahl und jährlichem Produktionsvolumen

Mit Blick auf die Differenz des spezifischen Flächenbedarfs $\Delta\sigma_{Fläche}$ im Verhältnis zum Wert bei Nassbearbeitung $\sigma_{Fläche,FK}$ wird deutlich, dass der Quotient mit Ausnahme der Unstetigkeit bei 300.000 Einheiten pro Jahr kontinuierlich sinkt (vgl. Abbildung 7.19). Dabei nimmt der Wert bei steigender Zylinderanzahl ab: Dies liegt im wachsenden Anteil der für BAZ genutzten Fläche begründet, die sich unabhängig von der Kühlschmierstrategie gestaltet.

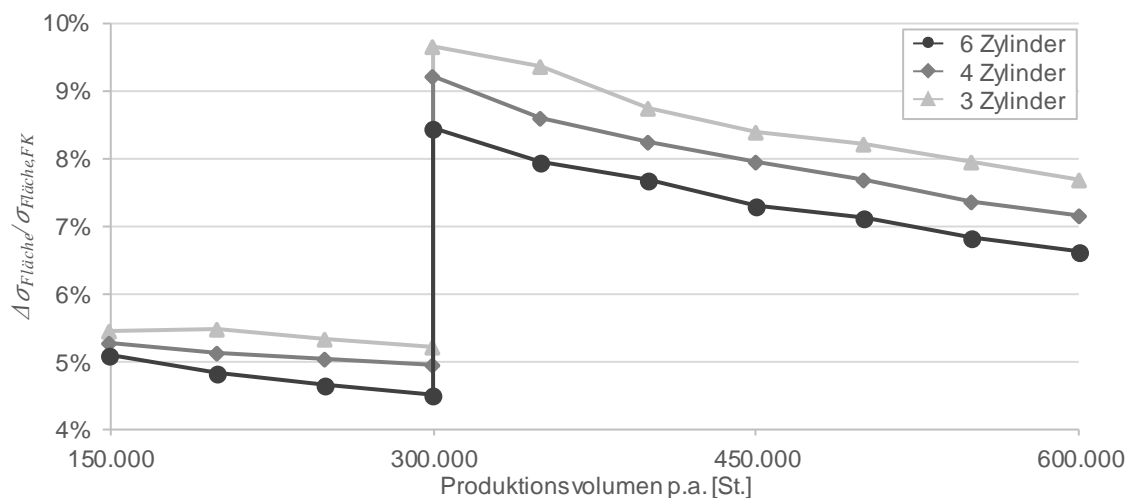


Abbildung 7.19: Differenz des spezifischen Flächenbedarfs von KSS- und MMS-FFS im Verhältnis zum spezifischen Energiebedarf bei Nassbearbeitung

7.2 Einsatz in der Technologieplanung

Im folgenden Abschnitt wird die Anwendung des Moduls zur Technologieplanung anhand von Fallbeispielen erläutert. Zunächst werden diese vorgestellt, anschließend erfolgt ihre ökonomische Bewertung. Eine Interpretation und Diskussion der Ergebnisse schließt sich im Abschnitt 7.3 an.

7.2.1 Untersuchte Fallbeispiele

Um die Möglichkeiten der entwickelten Softwarelösung aufzuzeigen, wird die Analyse anhand verschiedener Fallbeispiele durchgeführt. Da Bohrbearbeitungen aufgrund der Häufigkeit ihres Auftretens in den untersuchten Werkstücken (vgl. Kapitel 5.1) im Fokus der vorliegenden Arbeit stehen, werden die in Abbildung 7.20 dargestellten Bohrungstypen untersucht. Neben Sackloch- und Durchgangsbohrungen sind dies auch solche mit Versackung und mehreren Stufen.

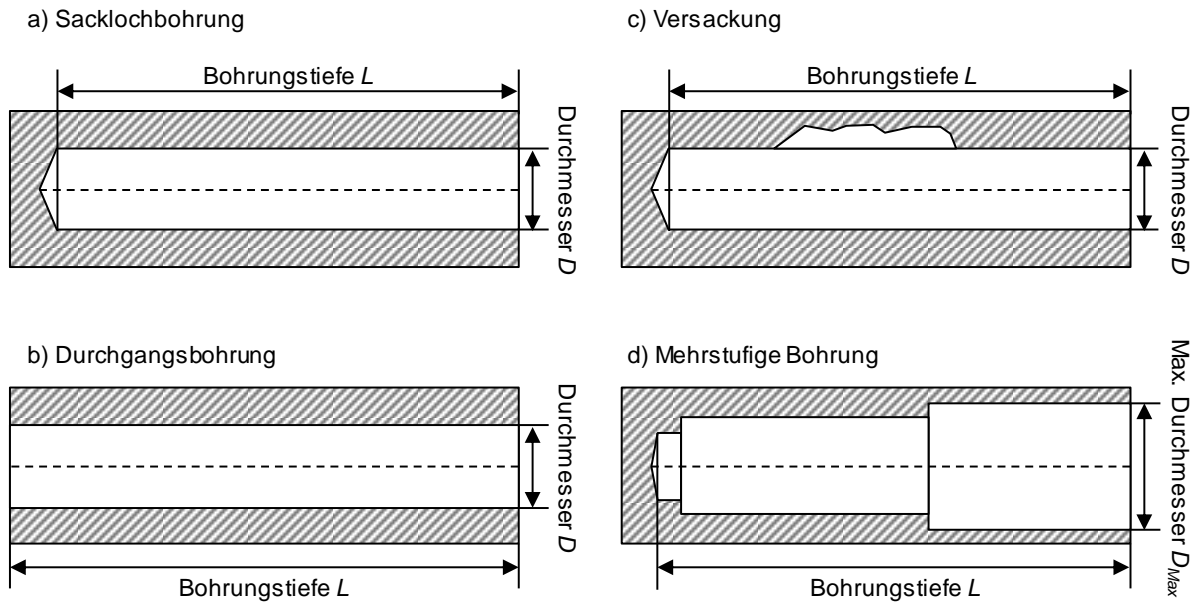


Abbildung 7.20: Untersuchte Bohrungstypen

Dabei werden pro Bohrungstyp je zwei Fallbeispiele herangezogen. Die entscheidungsrelevanten Parameter sind in Tabelle 7.3 zusammengefasst.

Tabelle 7.3: Entscheidungsrelevante Featureparameter der untersuchten Fallbeispiele (vgl. auch Abbildung 6.15)

#	Typ	D [mm]	L [mm]	Max. L/D_{Stufe}	N_{Stufen}	Gewinde	Besondere Anforderungen an Oberfläche/Toleranz	Ausrichtung/ Eintauchvarianten	Besondere Formen
1	a	7,0	160,0	22,85	1	0		0	0
2	a	12,0	300,0	25,00	1	0		0	0
3	b	9,0	250,0	27,78	1	0		0	1
4	b	16,0	350,0	21,88	1	0		0	1
5	c	5,0	90,0	18,00	1	0		0	2
6	c	7,0	180,0	25,71	1	0		0	2
7	d	9,0	150,0	10,00	3	0		0	0
8	d	15,0	130,0	6,00	3	0		0	0

7.2.2 Ökonomische Bewertung

Sowohl hinsichtlich der Kritikalität $CRIT(F)$ (vgl. Formel 6.67) als auch der Werkzeugkosten ergeben sich im Ergebnis starke Unterschiede zwischen den Fallbeispielen (vgl. Abbildung 7.21). Den im Kapitel 6.4.3 definierten Kritikalitätskriterien gemäß sind einzelne Daten im abgebildeten Screenshot rot ($crit_i = 1$) oder orange ($crit_i = 0,5$) markiert. Die Bandbreite der Featurekritikalität $CRIT(F)$ liegt dabei im Bereich von 0,24 bis 0,6.

Bezeichnung Fallbeispiel		②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨		
#	Typ	Durchmesser [mm]	Bohrungstiefe [mm]	Max. L/D über alle Stufen	Anzahl der Stufen	Gewinde	Vorbearbeitung / Finish	Formlage/ Ausrichtung	Besondere Formen	Kritikalität	Kosten / Kostenverhältnis MMS/KSS
1	a	7	160	22,85	1	0	0	0	0	0,45	102%
2	a	12	300	25	1	0	0	0	0	0,45	125%
3	b	9	250	27,78	1	0	0	0	1	0,52	215%
4	b	16	350	21,88	1	0	0	0	1	0,43	137%
5	c	5	90	18	1	0	0	0	2	0,24	61%
6	c	7	180	25,71	1	0	0	0	2	0,6	160%
7	d	9	150	10	3	0	0	0	0	0,59	145%
8	d	15	130	6	3	0	0	0	0	0,26	138%

① Index des Attributs im Fallvektor

Abbildung 7.21: Ausschnitt der Ausgabemaske (vgl. auch Abbildung 6.15)

Während das Kostenverhältnis von MMS- zu KSS-Werkzeugen (letzte Spalte) im Großteil der Beispiele zwischen 102 (Fall 1a, erste Zeile) und 160 Prozent (Fall 6c, sechste Zeile) schwankt, stechen zwei Fälle mit wesentlich davon abweichenden Werten heraus: So ergibt die Berechnung für den ersten Fall der Durchgangsbohrung (Fall 3b, gestrichelter Rahmen) ein Verhältnis von 215 Prozent, für die erste Variante der Bohrung mit Versackung (Fall 5c, punktierter Rahmen) hingegen lediglich eines von 61 Prozent. Diese im Vergleich zu KSS-Werkzeugen ungewöhnlich hohen Mehr- bzw. Minderkosten für MMS-Werkzeuge erscheinen mit Blick auf die im Kapitel 5.1 erläuterten Ergebnisse nicht plausibel. Bei detaillierter Untersuchung der beiden Beispiele wird die Bedeutung der Funktionalitäten zur Erklärung und Unsicherheitsbewertung deutlich.

Im Falle der Versackung ist die Abweichung anhand der gefundenen Vergleichsfälle F^F ableitbar, deren Auflistung von der Erklärungsfunktion ermöglicht wird: Da nicht für alle Features eine MMS-taugliche Werkzeugvariante in der Wissensbasis hinterlegt ist, werden im Beispiel bei MMS-Werkzeugen Fälle mit geringerer Ähnlichkeit als bei der Nassbearbeitung herangezogen (vgl. Abbildung 7.22). Daraus folgt eine erhöhte Unsicherheit, deren Verringerung durch manuelles Löschen der weniger ähnlichen Fälle möglich ist. Auch weitgehend übereinstimmende Einträge für Werkzeuge in der Nassbearbeitung verfälschen das Ergebnis, obschon die Ähnlichkeit im Fallbeispiel in

Relation zu anderen Vergleichsfällen hoch ist. Die multiple Nennung solcher beinahe identischen Features ist auf den Umstand zurückzuführen, dass die implementierte Wissensbasis jedes Feature einzeln speichert, anstatt geometrisch identische Instanzen eines Features in einem Datensatz zu bündeln. Da die in Abbildung 7.22 gestrichelt markierten Fälle lediglich in der Topologie voneinander abweichen, ist die Berücksichtigung eines dieser Vergleichsfälle je Problemfall F^N ausreichend. Bei manueller Korrektur ergibt sich ein Kostenverhältnis von 115 Prozent.

Fallbeispiel c) Versackung		③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨		⑩	⑫			
ID	Durchmesser [mm]	Bohrungstiefe [mm]	Max. L/D über alle Stufen	Anzahl der Stufen	Gewinde	Vorbereitung / Finish	Formlage / Ausrichtung	Besondere Formen	WZ-Technologie	MMS-Technologie vorhanden?	WZ-Kosten [€]	Kritikalität / Ähnlichkeit	Kosten / Kostenverhältnis MMS/KSS	Berechnungsunsicherheit
5 c	5	90	18	1	0	0	0	2				0,24	61%	
KSS-Fälle: Problemfall F^N (Feature 5c)														
	5	84,6	13,42	1	0	0	1	1	S1	0		0,945152	Kosten entfernt	0,20
	6	110	18,33	1	0	0	1	1	BS	0		0,936912	Geheimhaltungsgründen entfernt	0,23
	6	110	18,33	1	0	0	1	1	BS	0		0,936912	Geheimhaltungsgründen entfernt	0,23
	6	110	18,33	1	0	0	1	1	BS	0		0,936912	Geheimhaltungsgründen entfernt	0,23
	6	110	18,33	1	0	0	1	1	BS	0		0,936912	Geheimhaltungsgründen entfernt	0,23
MMS-Fälle:														
	5	84,6	13,42	1	0	0	1	1	S1	1		0,945152	Kosten entfernt	0,20
	6	110	18,33	1	0	0	1	1	BS	1		0,936912	Geheimhaltungsgründen entfernt	0,23
	9	140	15,55	1	0	0	0	0	BS	1		0,897274	Geheimhaltungsgründen entfernt	0,34
	4,5	145	32,22	1	0	0	1	3	ZF	1		0,878285	Geheimhaltungsgründen entfernt	0,39
	4,5	145	32,22	1	0	0	1	3	ZF	1		0,860453	Geheimhaltungsgründen entfernt	0,44
6 c	7	180	25,71	1	0	0	0	2				0,6	160%	
KSS-Fälle: Problemfall F^N (Feature 6c)														
	9	140	15,55	1	0	0	0	0	BS	0		0,944608	Kosten entfernt	0,20
	4,5	145	32,22	1	0	0	1	3	ZF	0		0,943306	Geheimhaltungsgründen entfernt	0,21
	4,5	145	32,22	1	0	0	1	3	ZF	0		0,928504	Geheimhaltungsgründen entfernt	0,25
	8,02	148	18,5	1	0	0	1	1	BS	0		0,922128	Geheimhaltungsgründen entfernt	0,27
	4,5	112	24,89	1	0	0	1	1	BS	0		0,887694	Geheimhaltungsgründen entfernt	0,37
MMS-Fälle:														
	9	140	15,55	1	0	0	0	0	BS	1		0,944608	Kosten entfernt	0,20
	7	158,5	22,64	1	0	0	1	1	ZF	1		0,943306	Geheimhaltungsgründen entfernt	0,21
	4,5	145	32,22	1	0	0	1	3	ZF	1		0,928504	Geheimhaltungsgründen entfernt	0,25
	8,02	148	18,5	1	0	0	1	1	BS	1		0,922128	Geheimhaltungsgründen entfernt	0,27
	6	110	18,33	1	0	0	1	1	BS	1		0,883109	Geheimhaltungsgründen entfernt	0,38

⑩ Index des Attributs im Fallvektor

Abbildung 7.22: Ausschnitt der Ausgabemaske mit Details zum Fallbeispiel c – Versackung (vgl. auch Abbildung 6.15)

Ein ähnliches Bild zeigt sich im Fallbeispiel der Durchgangsbohrung 3b (vgl. Abbildung 7.23). Die vermeintlichen Mehrkosten für MMS-taugliche Werkzeuge (Kostenverhältnis von 215 Prozent) gehen ebenfalls auf unvollständige Angaben in der Wissensbasis zurück: Bei der Berechnung der Kosten für KSS-Werkzeuge wird ein zu geringer Wert ausgegeben, da die Kosten der gestrichelt markierten Vergleichsfälle 4 und 5 in der Datenbank mit 0 € hinterlegt sind. Nach manuellem Löschen dieser Fälle verbleibt ein Kostenverhältnis von 131 Prozent – ein Wert, der innerhalb der Schwankungsbreite der übrigen Beispiele liegt.

Fallbeispiel b) Durchgangsbohrung														Kosten / Kostenverhältnis MMS/KSS	Berechnungsunsicherheit
ID	Durchmesser [mm]	Bohrungstiefe [mm]	Max. L/D über alle Stufen	Anzahl der Stufen	Gewinde	Vorbearbeitung/ Finish	Formlage/ Ausrichtung	Besondere Formen	WZ-Technologie	MMS-Technologie vorhanden?	WZ-Kosten [€]	Kritikalität / Ähnlichkeit			
3 b	9	250	27,78	1	0	0	0	1				0,52		215%	
KSS-Fälle:														Kosten entfernt	
7	158,5	22,64		1	0	0	1	1	ZF	0		0,901238			0,33
8,02	148	18,5		1	0	0	1	1	BS	0	Kosten entfernt	0,88339			0,38
9	140	15,55		1	0	0	0	0	BS	0		0,876584			0,40
4,5	140	15,55		1	0	0	1	3	ZF	0		0,845603			0,47
16	315	10,77		1	0	0	0	0	ZF	0		0,84468			0,47
MMS-Fälle:														Kosten entfernt	
7	158,5	22,64		1	0	0	1	1	ZF	1		0,901238			0,33
8,02	148	18,5		1	0	0	1	1	BS	1	Kosten aus Geheimhaltungsgründen entfernt	0,88339			0,38
9	140	15,55		1	0	0	0	0	BS	1		0,876584			0,40
14	378,6	34,42		1	0	0	0	0	ZF	1		0,845603			0,47
14	378,6	34,42		1	0	0	0	0	ZF	1		0,841084			0,48

$crit_i(f_i^N) = 1$
 $crit_i(f_i^N) = 0,5$
 Problemfall F^N (Feature 3b)
 Kosten in Wissensbasis nicht angegeben (0 €)
 Vergleichsfälle F^F

i Index des Attributs im Fallvektor

Abbildung 7.23: Ausschnitt der Ausgabemaske mit Details zum Fallbeispiel 3b – Durchgangsbohrung (vgl. auch Abbildung 6.15)

7.3 Interpretation und Diskussion der Analyseergebnisse

Im Modul zur Technologieplanung lassen sich auf Grundlage der hinterlegten Wissensbasis durchschnittliche Mehrkosten für die MMS-Tauglichkeit von Werkzeugen von ca. 21 Prozent ableiten. Dieser Wert ist fallbezogen, hängt vom jeweiligen Stand der Technik und nicht zuletzt vom Werkzeuglieferanten ab. Eine generalisierende Aussage ist daher auf Basis der durchgeführten Untersuchungen nicht ohne Weiteres möglich. Vor dem Hintergrund der geringen Unterschiede bei den Betriebs- (Differenzbetrag kleiner als 10 Prozent, vgl. Abbildung 7.11) und Beschaffungskosten (Differenzbetrag kleiner als 2,5 Prozent, vgl. Abbildung 7.9) von FFS mit unterschiedlichen Kühlschmierstrategien ist auch der Einfluss vermeintlich unbedeutender Größen nicht zu vernachlässigen: Da Werkzeugkosten in den Fallbeispielen ca. 10 Prozent der Betriebs- (vgl. auch reale FFS im Kapitel 5.2.3.2) und ca. 5 bis 10 Prozent der Beschaffungskosten ausmachen, wirken sich Mehrkosten für die MMS-Tauglichkeit nicht unerheblich auf die Lebenszykluskosten aus. Eine Verringerung der Mehrkosten für MMS-Werkzeuge durch technologischen Fortschritt oder Skaleneffekte würde die Wirtschaftlichkeit der MMS-Technologie weiter erhöhen.

Aus der durchgeführten Bewertung lassen sich für die untersuchten Fälle in der Fertigungssystemplanung unter Berücksichtigung der definierten Eingangsparameter und Prämissen folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Beim Neubau eines FFS in ein neu zu errichtendes Gebäude ergibt sich stets ein positiver Kapitalwert der Differenzinvestition: Die MMS-Technologie erweist sich trotz höherer Initialkosten als rentabler.
- Bei Integration eines FFS in eine freie Fläche innerhalb eines Bestandsgebäudes ohne vorhandene KSS-Versorgung ist die MMS-Technologie im Großteil der

Fälle die rentablere Wahl: Erst bei jährlichen Stückzahlen über 500.000 Einheiten mit verhältnismäßig hoher Werkstückkomplexität (> 10 Prozent über jener des Referenzbauteils) ist die Nassbearbeitung aus wirtschaftlicher Sicht vorzuziehen.

- Ist ein FFS in einem Bestandsgebäude mit intakter und ausreichend dimensionierter KSS-Versorgung zu errichten, stellt die Nassbearbeitung stets die rentablere Möglichkeit dar: Während Investitionskosten für KSS-spezifische Anlagentechnik durch Bestandsanlagen gering gehalten werden, schlagen die Einmalaufwände für die MMS-Technologie zu Projektbeginn vollständig zu Buche.
- Aus ökologischer Sicht ist die MMS-Technologie der Nassbearbeitung vorzuziehen: In allen definierten ökologischen Kenngrößen weist erstere günstigere Werte auf.

Auf Basis der definierten Eingangsdaten erweist sich die MMS-Technologie sowohl aus ökonomischer als auch ökologischer Perspektive als vorteilhaft, wenn auf keine vorhandene Infrastruktur zur KSS-Versorgung zurückgegriffen werden kann.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Ressourceneffizienz und ökologische Nachhaltigkeit gewinnen zunehmend an Bedeutung für Politik und Wirtschaft. Dies unterstreichen auch die jüngsten Entwicklungen der globalen Klimapolitik und die Verpflichtung der internationalen Staatengemeinschaft zur Einhaltung einer Obergrenze der Erderwärmung von weniger als 2 °C (vgl. Beschluss der 21. UN-Klimakonferenz am 12.12.2015 in Paris). Im Zuge der wachsenden Relevanz ökologisch nachhaltiger Produktion steht unter anderem die Gestaltung effizienterer Metallzerspanungsprozesse im Fokus. Vor diesem Hintergrund wird auch eine Optimierung der Kühlschmierstoffversorgung mit gegenwärtigen Kostenanteilen zwischen 10 und 17 Prozent angestrebt. Als Befähigertechnologie zur Hebung von Kosten- und Ressourceneffizienzpotenzialen erfährt die Minimalmengenschmierung (MMS) daher zunehmende Beachtung. Obwohl die Technologie seit Mitte der Neunzigerjahre Gegenstand diverser Forschungsaktivitäten ist, hat sie sich bislang nicht annähernd flächendeckend durchgesetzt: Ein entscheidender Grund ist die Skepsis von Managern und Fabrikplanern hinsichtlich der Umsetzbarkeit von MMS sowie ihrer erwarteten ökologischen und wirtschaftlichen Vorteile. Dies ist zurückzuführen auf die mangelnde Verfügbarkeit öffentlich zugänglicher, spezifischer Informationen über die Kosten und Risiken dieser Technologie. Zudem erschwert die oftmals auf Erfahrung basierende Fabrikplanungssystematik auf Anwender- und Herstellerseite die Aufnahme neuer Technologien in den Lösungsraum.

Die vorliegende Arbeit behandelt die Bewertung wirtschaftlicher und ökologischer Auswirkungen des Einsatzes von Minimalmengenschmierung in flexiblen Fertigungssystemen (FFS) für Aluminiumbauteile in der Automobilindustrie. Zunächst war die fertigungstechnologische Umsetzbarkeit der Einführung der MMS-Technologie in den Bearbeitungsprozess zu prüfen: Um den Versuchsumfang auf das Wesentliche zu beschränken, wurden in Zusammenarbeit mit Werkzeugherstellern die entscheidungsrelevanten Featureparameter identifiziert. Dazu wurde der Einfluss der möglichen Ausprägung dieser Parameter auf den technologischen und monetären Aufwand bei der Einführung von MMS gemeinsam untersucht und je Parameter Wertebereiche gleichen Aufwands definiert. Anschließend wurden je ein Kurbelgehäuse- und ein Zylinderkopftyp der BMW Group exemplarisch auf entscheidungsrelevante Features hin geprüft.

Der Einfluss der MMS-Technologie auf den Bearbeitungsprozess dieser Features wurde in mehreren Versuchsreihen in den Forschungslaboren zweier Werkzeughersteller sowie des *Instituts für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen* und der BMW Group analysiert. Dabei wurde die prinzipielle Machbarkeit des Einsatzes von MMS im Bearbeitungsprozess für beide Werkstücktypen nachgewiesen.

Aufbauend auf den in der Motorenfertigung der BMW Group eingesetzten FFS wurden Systemelemente identifiziert, die von der Einführung der MMS-Technologie betroffen sind. Daraus wurde ein modifiziertes, MMS-taugliches FFS abgeleitet und prototypisch im BMW Werk Steyr aufgebaut. Durch detaillierte Analyse der Kostenstrukturen und Medienverbräuche von FFS mit herkömmlicher Kühlschmierung via Emulsion und den Vergleich mit dem Prototypensystem konnte der Einfluss der MMS am Praxisbeispiel quantifiziert werden.

Auf Basis der Untersuchungsergebnisse wurde eine Methode entwickelt, welche die ökonomische und ökologische Bewertung der MMS-Technologie von FFS im Rahmen der Fertigungssystem- und Technologieplanung ermöglicht. Zur praktischen Anwendung der Methodik im Planungsprozess wurde sie in Form einer Softwarelösung abgebildet. Das implementierte fallbasierte Modul zur Technologieplanung demonstriert die Vorgehensweise für Bohrprozesse. Es berechnet die jeweils bei Einsatz von MMS und herkömmlicher KSS-Emulsion entstehenden Werkzeugkosten auf Featureebene durch den Vergleich mit ähnlichen Fällen aus der hinterlegten Fallbasis. Die Ähnlichkeit eines Vergleichsfalls mit dem jeweils vom Nutzer vorgegebenen Feature ergibt sich aus den Ähnlichkeiten der einzelnen Featureparameter, die über parameterspezifische Ähnlichkeitsfunktionen berechnet werden.

Das implementierte regelbasierte Modul zur Fertigungssystemplanung ermöglicht die vollständige Dimensionierung von FFS-Lösungsvarianten für die MMS- und Nassbearbeitung auf Grundlage vom Nutzer vorgegebener Eingangsdaten hinsichtlich des Werkstücks, des jährlichen Produktionsvolumens und anderer Charakteristika. Dem Planer wird auf diese Weise frühzeitig eine ökonomische und ökologische Bewertung der beiden Kühlschmierstrategien im jeweiligen Anwendungsfall ermöglicht. Das beispielhaft applizierte Regelwerk zur Skalierung des FFS orientiert sich am von der BMW Group entwickelten „Referenzsystem der mechanischen Fertigung“ – einem Baukastensystem zur Beschreibung des Aufbaus von FFS mit ungerichteten Teiltransport – und ihrer Systemelemente. Prinzipiell sind innerhalb der modular aufgebauten und erweiterbaren Software auch andere Regelwerke anwendbar. Als primäre Kenngrößen zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit werden in diesem Kontext der Kapitalwert der Differenzinvestition für FFS mit MMS bzw. Nassbearbeitung, die Lebenszykluskosten der Lösungsvarianten und der interne Zinsfuß herangezogen. Umweltauswirkungen werden anhand der vom europäischen Gemeinschaftssystem für das freiwillige Umweltmanagement empfohlenen Umweltkenngrößen beurteilt.

Eine mithilfe der entwickelten Softwarelösung durchgeführte Fallstudie auf Basis fiktiver, realitätsnaher Prämissen zeigt die wirtschaftlichen und ökologischen Vorteile von MMS bei Errichtung neuer FFS in Gebäuden ohne vorhandene KSS-Versorgung am Beispiel verschiedener Kurbelgehäuse. Aufgrund des hohen Einflusses von FFS-Struktur und Werkstückeigenschaften auf die Wirtschaftlichkeit beider Kühl-

schmierstrategien ist der Einsatz der MMS-Technologie jedoch stets fallspezifisch zu bewerten.

8.2 Ausblick

Der Fokus der vorliegenden Arbeit liegt auf der Bewertung von FFS zur Herstellung prismatischer Aluminiumwerkstücke am Beispiel von Bohrprozessen. Eine Übertragbarkeit der Methode auf andere Fertigungstechnologien oder rotationssymmetrische Teile ist grundsätzlich denkbar, im Detail aber noch zu prüfen. Weiterer Forschungsbedarf besteht zudem in der Erhöhung der Effizienz des entwickelten Technologieplanungsmoduls. Da jedes vom Nutzer vorgegebene Feature mit allen in der Fallbasis hinterlegten Fällen zu vergleichen ist, nimmt die Rechenzeit sowohl mit wachsender Datenbank als auch mit steigender Anzahl der zu bewertenden Fälle zu. Vorstellbar ist etwa eine mehrstufige Ähnlichkeitsbewertung auf Grundlage weniger, höher gewichteter Parameter, die den Lösungsraum mit jedem Bewertungslauf kontinuierlich verringert. Eine Funktionalität zur effizienten Verarbeitung großer Mengen an Eingangsdaten würde auch die Anbindung an CAD-Systeme ermöglichen: Auf diese Weise könnten die Werkzeugkosten für alle Features eines Werkstücks bestimmt werden, anstatt diese aus wenigen exemplarisch untersuchten, entscheidungsrelevanten Features hochzurechnen.

Auch im Bereich der Fertigungssystemplanung ergeben sich weitere Forschungs- und Optimierungsansätze: Eine halbautomatische Funktion zur Analyse einer Vielzahl ähnlicher Fälle, ähnlich der durchgeführten Studie, würde die Untersuchung der MMS-Technologie in einem größeren Spektrum vereinfachen. Ebenso denkbar ist der Vergleich beider Kühlschmierstrategien in verschiedenen Maschinenkonzepten. Neben den in der vorliegenden Arbeit untersuchten FFS ist beispielsweise eine Anwendung auf (flexible) Transferstraßen möglich. Dazu wäre die Methode zur Berechnung der Bearbeitungszeit zu modifizieren, Beispiele dafür liefert z. B. Behrendt [BEHR09].

Mit Blick auf den stetigen technologischen Fortschritt sind die konzipierte Methodik und die daraus hervorgegangene Softwarelösung regelmäßig auf Aktualität zu prüfen und gegebenenfalls zu überarbeiten. Nicht zu unterschätzen ist das Potenzial zukünftiger Entwicklungen im Bereich des ressourceneffizienten KSS-Einsatzes: Maßnahmen zur Reduzierung des KSS-bezogenen Energie- und Medienbedarfs verringern die ökologischen und ökonomischen Vorteile der MMS-Technologie.

9 Literaturverzeichnis

- [ABEL04] ABELE E.; FEICKERT S. und WEIGOLD M. (2004): *Symposium zum Thema Innovative Zerspanung - effizient und umweltgerecht.* (Abschlussbericht) Darmstadt: TU Darmstadt.
- [ABEL06] ABELE E.; LIEBECK T. und WÖRN A. (2006): *Measuring Flexibility in Investment Decisions for Manufacturing Systems.* In: CIRP Annals - Manufacturing Technology Vol. 55/1. Manchester: Elsevier. S. 433-436.
- [ABEL12a] ABELE E.; SIELAFF T. und BECK M. (2012): *Konfiguration energieeffizienter Werkzeugmaschinen - Energieeffiziente Auslegung von Werkzeugmaschinen und Bearbeitungszentren für die Großserienfertigung.* wt Werkstatttechnik online, 102 (5). S. 292-298.
- [ABEL12b] ABELE E.; PFEIFFER P.; HAUER T. et al. (2012): *Trockene Zeiten stehen an.* Werkstatt und Betrieb (7-8). S. 20-27.
- [ABEL13] ABELE E.; SIELAFF T. und BECK M. (2013): *Schlussbericht zum Projekt Maxiem - Maximierung der Energieeffizienz spanender Werkzeugmaschinen - Gemäß NKBF 98 Nr. 8.2 Anlage 2, Projektnummer 0327488 A.* Darmstadt: Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen, Technische Universität Darmstadt.
- [AGGT87] AGGTELEKY B. (1987): *Fabrikplanung. Werksentwicklung und Betriebsrationalisierung. Band 1: Grundlagen, Zielplanung, Vorarbeiten.* 2. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, ISBN 3-446-14860-4.
- [ALJO12] AL JOURDI A. (2012): *Adaption des Trockenbohrens über thermomechanische Modellierung zur Erhöhung der Fertigungsgenauigkeit.* (Dissertation) Berlin: TU Berlin.
- [ALLE08] ALLEHAUX D.; AUGER S.; DEVILLEZ A. et al. (2008): *Adhesive wear mechanisms in dry machining aeronautical aluminium alloys.* In: Proceedings of the 7th International Conference on High Speed Machining. Darmstadt.
- [ANDE99] ANDERL R. und CLAASSEN E. (1999): *Systemübergreifende Features unterstützen Prozeßketten.* ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 94 (3). S. 115-118.
- [AP94] AAMODT A. und PLAZA E. (1994): *Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches.* AI Communications, 7 (1). S. 39-59.

- [BAFA13] BAFA (2013): *Bundesministerium für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle*. http://www.bafa.de/bafa/de/energie/mineraloel_rohoel/amtliche_mineraloeldaten/, zuletzt geprüft am 21.07.2015.
- [BART96] BARTL R. (1996): *Verbundvorhaben Trockenbearbeitung - Zielsetzung und aktuelle Entwicklungsschwerpunkte*. In VDI Berichte 1240 - Auf dem Weg zur Trockenbearbeitung. Düsseldorf: VDI-Verlag, ISBN 3-180-91240-5. S. 45-66.
- [BAUM13] BAUMANN W. und HERBERG-LIEDTKE B. (2013): *Chemikalien in der Metallbearbeitung: Daten und Fakten zum Umweltschutz*. Springer-Verlag, ISBN 978-3-642-61004-2.
- [BEHR09] BEHRENDT A. (2009): *Entwicklung eines Modells zur Fertigungssystemplanung in der spanenden Fertigung*. (Dissertation) Darmstadt: TU Darmstadt.
- [BEIE08] BEIERLE C. und KERN-ISBERNER G. (2008): *Methoden wissensbasierter Systeme - Grundlagen, Algorithmen, Anwendungen*. 4. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, ISBN 978-3-834-80504-1.
- [BERG03] BERGMANN R. (2003): *Experience Management: Foundations, Development Methodology and Internet-Based Applications*. Berlin: Springer, ISBN 978-3-540-45759-6.
- [BGHM12] Berufsgenossenschaft Holz und Metall (2012): *BGI 5003: Maschinen der Zerspanung*. Mainz.
- [BIEL13] bielomatik Leuze GmbH + Co. KG (2013): *Minimalmengenschmiersysteme in der spanabhebenden Bearbeitung - ressourcenschonend und effizient*. Neuffen
- [BIER11] BIERMANN D.; HEILMANN M.; RANDECKER H. et al. (2011): *Ein Verfahren wird trockengelegt - Minimalmengenschmierung beim Tiefbohren mit kleinen Durchmesserern*. Werkstatt und Betrieb (10). S. 68-71.
- [BIER12] BIERMANN D.; IOVKOV I.; BLUM H. et al. (2012): *Thermal Aspects in Deep Hole Drilling of Aluminium Cast Alloy Using Twist Drills and MQL*. In: 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems. Elsevier B.V. S. 245-250.
- [BIER13] BIERMANN D.; ABRAHAMS H. und FUSS M. (2013): *Angepasste Führungsleisten - Optimierung des tribologischen Verhaltens von Führungsleisten für das BTA-Tiefbohren*. wt Werkstattstechnik online (11/12). S. 888-892.

- [BIJE14] BIJEDIC T. und BRINK S. (2014): *Nutzt der Mittelstand seine Chancen im internationalen Markt? Aktuelle Ergebnisse der Frühlingsbefragung 2014 des BDI/PwC-Mittelstandspanels - eine Online-Mittelstandsbefragung unter 779 Unternehmen*. Berlin: Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.; PricewaterhouseCoopers AG Wirtschaftsprüfungsgesellschaft.
- [BLOH12] BLOHM H.; LÜDER K. und SCHAEFER C. (2012): *Investition: Schwachstellenanalyse des Investitionsbereichs und Investitionsrechnung*. 10. Aufl. München: Vahlen, ISBN 978-3-800-63937-3.
- [BMU09] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2009): *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit - Die Themen*. <http://www.bmub.bund.de/themen/gesundheits-chemikalien/gesundheits-und-umwelt/chemikaliensicherheit/biozide/>, zuletzt geprüft am 15.05.2013.
- [BMU13] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2013): *Umweltkennzahlen in der Praxis - Ein Leitfaden zur Anwendung von Umweltkennzahlen in Umweltmanagementsystemen mit dem Schwerpunkt auf EMAS*. Umweltbundesamt, Dessau
- [BMW11] Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft (2012): *Das TA-Referenzsystem (internes Dokument)*. München
- [BMW13] Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft (2013): *IKO1: Konfigurator zur Investitionsplanung (intern verwendete Software)*.
- [BMW15a] Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft (2015): *Geschäftsbericht 2014*. München.
- [BMW15b] BMW Motoren GmbH (2015): *Umwelterklärung 2014/2015 BMW Group Werk Steyr*. Steyr.
- [BOUB12] BOUBEKRI N. und SHAIKH V. (2012): *Machining Using Minimum Quantity Lubrication: A Technology for Sustainability*. International Journal of Applied Science and Technology, 2 (1). S. 111-115.
- [BRIN08] BRINKSMEIER E.; KOCH T. und WALTER A. (2008): *Wie viel Kühlschmierstoff ist nötig? - Effizienter Einsatz von Kühlschmierstoffen*. In von Gleich A. und Gling-Reisemann S. (Hg.), *Industrial Ecology: Erfolgreiche Wege Zu Nachhaltigen Industriellen Systemen*. Wiesbaden: Springer, ISBN 3-835-19225-6.

- [BRIN11] BRINK S. und WALLAU F. (2011): *BDI-Mittelstandspanel - Ergebnisse der Online-Mittelstandsbefragung - Frühjahr 2011*. Berlin: Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.
- [BRIN15] BRINKSMEIER E.; MEYER D.; HUESMANN-CORDES A.G. et al. (2015): *Metalworking fluids - Mechanisms and performance*. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 64 (2). S. 605-628.
- [BUFF12] BUFF G. (2012): *Ressourceneffizienter Einsatz wassergemischter Kühlschmierstoffe in hochflexiblen Produktionssystemen*. (Diplomarbeit) München: Hochschule München.
- [BUSC94] BUSCH B. (1994): *Systeme für Experten statt Expertensysteme - Von der Folgenforschung zur kompetenzförderlichen Gestaltung wissensbasierter Technik*. 1. Aufl. Berlin: Akademische Verlagsgesellschaft AKA, ISBN 978-3-932-79290-8.
- [CEME12] CemeCon AG (2012): *Titan- und Aluminiumbearbeitung mit CC AluSpeed - Aufbauschneiden abbauen*. FACTS, 37 (März). S. 4-5.
- [CHAU12] Chauvin Arnoux S.A.S. (2012): *Bedienungsanleitung PEL103 - Leistungs- und Energieregistriergerät*. Paris.
- [CLAU13] CLAUß M. (2013): *Methode zum Einsatz von Web 2.0-Werkzeugen in der Fabrikplanung*. (Dissertation) Chemnitz: TU Chemnitz, ISSN 0947-2495.
- [DAGI95a] DAGILOKE I. (1995): *Simulation of high speed machining of aluminium alloys*. (Ph.D. Thesis) Liverpool: Liverpool John Moores University.
- [DAGI95b] DAGILOKE I.; KALDOS A.; DOUGLAS S. et al. (1995): *High speed machining: An approach to process analysis*. Journal of Material Processing Technology, 54. S. 82-87.
- [DAIM15a] Daimler AG (2015): *Nachhaltigkeitsbericht 2014*. Stuttgart: Bechtle Druck + Service, ISSN 2194-5268.
- [DAIM15b] Daimler AG (2015): *Umwelterklärung 2014. Daimler AG Standort Untertürkheim*. Stuttgart.
- [DECK02] DECKERT C. (2002): *Wissensorientiertes Projektmanagement in der Produktentwicklung*. (Dissertation) Aachen: RWTH Aachen.
- [DEMI09] DEMIREL C. (2009): *Experimentelle Untersuchung und Simulation des Abschreckprozesses von bauteilähnlichen Geometrien aus G-ALSi7Mg*. (Dissertation) Berlin: TU Berlin.

- [DENK05] DENKENA B.; APITZ R. und RUDZIO H. (2005): *Werkzeuge für die wissensintensive Produktion von morgen*. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (04). S. 165-168.
- [DGUV10] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) (2010): *BGI/GUV-I 718 Minimalmengenschmierung in der spanenden Fertigung*. (Information) Berlin.
- [DGUV11a] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) (2011): *BGI/GUV-I 762 Keimbelastung wassergemischter Kühlschmierstoffe*. (Information) Berlin.
- [DGUV11b] Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV) (2011): *BGR/GUV-R 143 Tätigkeiten mit Kühlschmierstoffen*. (Regel) Berlin.
- [DHK05] DHAR N.R.; HOSSAIN M. und KAMRUZZAMAN M. (2005): *MQL Application in Grinding of 16MnCr5 Steel: A comparison with wet and dry grinding*. In: Proceedings of the International Conference on Mechanical Engineering. Dhaka, Bangladesh: ICME.
- [DIN04] Deutsches Institut für Normung e.V. (2004): *DIN EN 60300-3-3: Zuverlässigkeitsmanagement - Teil 3-3: Anwendungsleitfaden - Lebenszykluskosten*. Beuth Verlag, Berlin
- [DIN11] Deutsches Institut für Normung e.V. (2011): *DIN 69090-1: MMS-Bearbeitungstechnologie - Teil 1: Begriffe und Definitionen*. Beuth Verlag, Berlin
- [DIN13] Deutsches Institut für Normung e.V. (2013): *DIN 51385: Schmierstoffe - Bearbeitungsmedien für die Umformung und Zerspanung von Werkstoffen*. Beuth Verlag, Berlin
- [DÖPP96] DÖPPER W.; FABRY J. und KAMMERMEIER D. (1996): *Umweltverträgliche Zerspanung aus Sicht eines Werkzeugherstellers*. In VDI Berichte 1240 - Auf dem Weg zur Trockenbearbeitung. Düsseldorf: VDI-Verlag, ISBN 3-180-91240-5. S. 67-92.
- [DT04] DOMBROWSKI U. und TIEDEMANN H. (2004): *Wissensmanagement in der Fabrikplanung*. wt Werkstatttechnik online, 94 (4). S. 137-140.
- [DUBB14] GROTE K.-H. und FELDHUSEN J. (2014): *Taschenbuch für den Maschinenbau mit Tabellen*. 24. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, ISBN 3-642-38890-6.

- [EAA13] European Aluminium Association (2013): *Aluminium in Cars - Unlocking the light-weighting potential*. http://www.alueurope.eu/wp-content/uploads/2013/10/EAA-Aluminium-in-Cars-Unlocking-the-light-weighting-potential_September2013_03.pdf, zuletzt geprüft am 06.04.2015.
- [EGR05] *Richtlinie 2005/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 6. Juli 2005 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energiebetriebener Produkte und zur Änderung der Richtlinie 92/42/EWG des Rates sowie der Richtlinien 96/57/EG und 2000/55/EG des Europäischen Parlaments und des Rates.*
- [EGV09] *Verordnung (EG) Nr. 1221/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. November 2009 über die freiwillige Teilnahme von Organisationen an einem Gemeinschaftssystem für Umweltmanagement und Umweltbetriebsprüfung und zur Aufhebung der Verordnung (EG) Nr. 761/2001, sowie der Beschlüsse der Kommission 2001/681/EG und 2006/193/EG.*
- [EIME14] EIMER D. (2014): *Konzeption eines wissensbasierten Systems zur Einflussanalyse von Minimalmengenschmierung auf Bohrprozesse in der Serienfertigung*. (Masterthesis) München: TU Darmstadt.
- [EMUG13] EMUGE-Werk Richard Glimpel GmbH & Co. KG (2013): *MMS für Zylinderköpfe*. *maschine+werkzeug* (4).
- [ERLA09] ERLACH K. (2009): *Energiewertstrom - Der Weg zur energieeffizienten Fabrik*. Stuttgart: Fraunhofer Verlag, ISBN 978-3-839-60010-8.
- [EUR10] *Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. Mai 2010 über die Angabe des Verbrauchs an Energie und anderen Ressourcen durch energieverbrauchsrelevante Produkte mittels einheitlicher Etiketten und Produktinformationen*
- [EURO15] Eurostat (2015): *Preise Elektrizität für Industrieabnehmer, ab 2007 - halbjährliche Daten*. Datenbankauszug [nrg_pc_205].
- [EVER96] EVERSHEIM W. und SCHUH G. (1996): *Betriebshütte. Produktion und Management*. 7. Aufl. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, ISBN 3-540-59360-8.
- [EXCE05] Ex-Cell-O GmbH (2005): *Datenblatt Ex-Cell-O XHC 240*. (Datenblatt) Eislingen.
- [FAZ15] SCHIPPER L. (2015): *Klimaabkommen von Paris - Das Dokument zur Rettung der Welt*. 12.12.2015. Frankfurter Allgemeine Zeitung.

- [FICH99] FICHTNER D.; NESTLER A. und SCHULZ G. (1999): *Wissensakquisition für Schnittwerte beim Fräsen unter Nutzung von neuronalen Netzen. Ergebnisse eines gleichnamigen Grundlagen-Forschungsprojektes. Fortschritts-Berichte VDI Reihe 20, Nr. 304.* Düsseldorf: VDI-Verlag, ISBN 3-183-30420-1.
- [FLEX13] Flexim GmbH (2013): *FLUXUS F/G601 und F/G608 - Mobile Durchflussmessung von Flüssigkeiten und Gasen im eingriffsfreien Clamp-On-Verfahren.* Berlin.
- [FORD13] Ford Motor Company (2013): *Ford expands near-dry machining.* <https://media.ford.com/content/fordmedia-mobile/fna/us/en/news/2013/10/16/ford-reduces-water-and-oil-use-in-plants-globally-with-expansion.html>, zuletzt geprüft am 01.06.2014.
- [FORM07] Ohne Verfasser (2007): *Kühlen Kopf bewahren.* FORM+Werkzeug (03). S. 58-59.
- [FREY13] FREY-LUXEMBURGER M. (2013): *Wissensmanagement - Grundlagen und Praktische Anwendung.* Wiesbaden: Springer Vieweg, ISBN 978-3-834-80116-6.
- [FRIC10] FRICK W. (2010): *Trockenbearbeitung: „Norm wird Schub für MMS geben“.* fertigung.de. <http://www.fertigung.de/2010/12/norm-wird-schub-fuer-mms-geben/#more-5543>, zuletzt geprüft am 15.07.2015.
- [FRIE14] FRIEDRICH T. (2014): *Planung fertigungstechnologischer Innovation im Produktionsnetzwerk.* (Dissertation) Aachen: RWTH Aachen.
- [FRIT07] FRITZ A.H. (2007): *Fertigungstechnik, 8., neu bearb. Aufl.* Berlin: Springer, ISBN 978-3-540-76695-7.
- [FRÖH10] FRÖHLICH B. (2010): *Einfluss von Minimalmengenschmierung auf Werkzeugstandweg und Zerspantemperatur beim Hochgeschwindigkeitsschichtfräsen von gehärtetem Werkzeugstahl.* (Dissertation) Darmstadt: TU Darmstadt.
- [FSA07] FURNESS R.; SEBASTIAN A. und STOLL A. (2007): *100 Prozent MMS in der Getriebegehäusefertigung.* Werkstatt und Betrieb (9). S. 80-85.
- [FU03] FU J. (2003): *Planungsarbeitsräume als Grundlage zur Arbeitsplanung und fertigungsgerechten Konstruktion.* (Dissertation) Aachen: Shaker.
- [FUJI06] Fuji Electric Systems Co., Ltd. (2006): *Portable Type Ultrasonic Flowmeter Portaflow X - Instruction Manual.* Tokyo.

- [GERK00] GERKEN H.A. (2000): *Management von Erfahrungen mit einem Assistenzsystem für die Arbeitsplanung*. (Dissertation) Karlsruhe: TH Karlsruhe.
- [GOEP13] GOEPEL K. (2013): *Implementing the Analytic Hierarchy Process as a Standard Method for Multi-Criteria Decision Making in Corporate Enterprises*. In: Proceedings of the 12th International Symposium on the Analytic Hierarchy Process for Multicriteria Decision Making. Kuala Lumpur: Library of Congress Publication of Data. ISSN 1556-8296.
- [GÖTZ14] GÖTZE U. (2014): *Investitionsrechnung: Modelle und Analysen zur Beurteilung von Investitionsvorhaben*. 7. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, ISBN 978-3-642-54622-8.
- [GÖTZ98] GÖTZ W. (1998): *Nur in Teilbereichen ist ein Verzicht auf Kühlschmierstoffe möglich*. *Industrieanzeiger*, 120 (9). S. 26-29.
- [GREB11] GREBNER J. (2011): *Ressourceneffizienter Einsatz wassergemischter Kühlschmierstoffe in HSC-Werkzeugmaschinen*. (Diplomarbeit) Darmstadt: TU Darmstadt.
- [GREB14] GREBNER J. (2014): *Analyse des durch Minimalmengenschmierung verursachten Mehraufwands bei der Werkzeugkonzeption und -herstellung - Unveröffentlichte Untersuchungsunterlagen*. München
- [GREB16] GREBNER J.; EIMER D. und ABELE E. (2016): *Minimalmengenschmierung: Featurebasierte Aufwandsanalyse für Bohrprozesse in Aluminiumwerkstoffen*. *wt Werkstatttechnik online*, 106 (5).
- [GROB12] GROB-Werke GmbH & Co. KG (2012): *Datenblatt G350*. (Datenblatt) Mindelheim.
- [GROB15] GROB-Werke GmbH & Co. KG (2015): *Bearbeitungszentren/G-Module: Kundenspezifische Konzeptlösungen durch Optionspakete*. GROB-Werke GmbH & Co. KG. <http://www.grobgroup.com/produktbereiche/systemloesungen/bearbeitungszentren-g-module/options.html>, zuletzt geprüft am 06.08.2015.
- [GRUN12] GRUNDIG C.-G. (2012): *Fabrikplanung. Planungssystematik - Methoden - Anwendung*. 4. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, ISBN 3-446-43250-7.
- [GÜHR12] GÜHRING (2012): *MMS by Gühring*. Albstadt
- [HEIN07] HEINEN T. (2007): *Fabrikplanung leichtgemacht - Anwendungsbezogenes Wissen wird digital verfügbar*. *phi Produktionstechnik Hannover Informiert*, 8 (1). S. 12-13.

- [HEIS04] HEISEL U. und SCHILLO (2004): *Automatisierte Späneerfassung bei der Quasi-Trockenbearbeitung unter Berücksichtigung der thermischen Belange*. Stuttgart.
- [HEUE97] HEUER J. (1997): *Neuronale Netze in der Industrie: Einführung - Analyse - Einsatzmöglichkeiten*. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, ISBN 3-824-46386-5.
- [HG03a] HÄNLE P. und GSÄNGER D. (2003): *Prozesssichere Werkzeuge fürs Bohren mit MMS*. Werkstatt und Betrieb (11). S. 58-61.
- [HG03b] HÄNLE P. und GSÄNGER D. (2003): *MMS-gerechte Gestaltung des Bohrerschaftes*. Werkstatt und Betrieb (9). S. 54-56.
- [HODA97] HODAPP W. (1997): *Die Werkzeugmaschine im heutigen Leistungsumfeld*. In WEINERT K. (Hg.), *Spanende Fertigung*. 2. Aufl. Essen: Vulkan-Verlag, ISBN 3-802-72916-1. S. 406-431.
- [HOFF08] HOFFMEISTER W. (2008): *Investitionsrechnung und Nutzwertanalyse*. 2. Aufl. Berlin: BWV, ISBN 978-3-830-51503-6.
- [HOFF08a] HOFFMANN M.; KAYSER G. und WALLAU F. (2008): *BDI-Mittelstandspanel - Ergebnisse der Online-Mittelstandsbefragung - Herbst 2008*. Berlin: Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.
- [HOFF11] HOFFMANN M. und WALLAU F. (2011): *BDI-Mittelstandspanel - Ergebnisse der Online-Mittelstandsbefragung - Herbst 2011*. Berlin: Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.
- [HÖHN11] HÖHN R. (2011): *Daten-Information-Wissen: eine Auswahl aus prominenten Wissensmanagementkonzepten*. Rundbrief des Fachausschusses Management der Anwendungsentwicklung und -wartung (WI-MAW) (02.). S. 44-76.
- [HORN97] HORN W. (1997): *Hochleistungs-Trockenbearbeitung in der Großserienfertigung*. In WEINERT K. (Hg.), *Spanende Fertigung*. 2. Aufl. Essen: Vulkan-Verlag, ISBN 3-802-72916-1. S. 432-441.
- [HS99] HEINSOHN J. und SOCHER-AMBROSIUS R. (1999): *Wissensverarbeitung: Eine Einführung*. Heidelberg, Berlin: Spektrum Akademischer Verlag, ISBN 3-827-40308-1.
- [HYUN08] HYUN Y.T. (2008): *Erfahrungsgel leitete NC-Programmierung auf Basis einer featurebasierten NC-Programmiersprache (STEP-NC)*. (Dissertation) Aachen: RWTH Aachen.

- [ICC14] International Council on Clean Transportation Europe gemeinnützige GmbH (2014): *Passenger car CO2 emissions and fuel consumption, normalized to NEDC*. <http://theicct.org/global-pv-standards-chart-library>, zuletzt geprüft am 11.April.2015.
- [ISO84] International Organization for Standardization (1984): *ISO 5806:1984 - Information processing -- Specification of single-hit decision tables*
- [JÄKE10] JÄKEL C. (2010): *Einsparpotenziale durch Minimalmengenschmierung (MMS) - Die langjährige Erfahrung, Öl perfekt zu dosieren*. Werkstatt und Betrieb, 4 (Sonderdruck).
- [JASP08] JASPERS W. (2008): *Wissensmanagement heute: strategische Konzepte und erfolgreiche Umsetzung*. München: Oldenbourg, ISBN 978-3-486-58746-3.
- [JURK04] JURKLIES I. (2004): *Generierung und Bewertung von Prozessketten für den Werkzeug-und Formenbau*. (Dissertation) Aachen: Shaker Verlag.
- [JV11] JANEV V. und VRANES S. (2011): *Applicability assessment of Semantic Web technologies*. Information Processing & Management, 47 (4). S. 507-517.
- [KALD99] KALDOS A.; BOYLE A. und SCHULZ G. (1999): *Verification of a high-speed machining model based on neural networks*. In: BRAMLEY A.N.a.o. (Hg.): *Advances in Manufacturing Technology - XIII. Proceedings of the Fifteenth National Conference on Manufacturing Research*. London: Professional Engineering Publishing.
- [KALH06] KALHÖFER E./K.J. (2006): *Euphorie weicht nüchterner Einschätzung*. Werkstatt und Betrieb (7-8).
- [KALH08] KALHÖFER und Eckehard (2008): *Ungenutzte Einsparpotenziale in der Spanenden Fertigung*. Economic Engineering (5). S. 56-58.
- [KALS11] KALSS W. (2011): *Mehr Produktivität beim Spanen durch Beschichten*. ATZ produktion (3). S. 50-55.
- [KASS94] KASSACK J.F. (1994): *Einfluss von Kühlschmierstoff-Additiven auf Werkzeugverschleiß, Zerspankraft und Bauteilqualität*. (Dissertation) Aachen: RWTH Aachen.
- [KBKM11] KRUSE R.; BORGELT C.; KLAWONN F. et al. (2011): *Computational Intelligence - Eine methodische Einführung in Künstliche Neuronale Netze, Evolutionäre Algorithmen, Fuzzy-Systeme und Bayes-Netze*. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, ISBN 978-3-834-81275-9.

- [KENN11] Kennametal Shared Services GmbH (2011): *Neue Norm für MMS-Maschinenwerkzeuge*. <https://www.maschinewerkzeug.de/peripherie/uebersicht/artikel/neue-norm-fuer-mms-werkzeuge-1139934.html>, zuletzt geprüft am 05.11.2013.
- [KETT84] KETTNER H.; SCHMIDT J. und GREIM H.-R. (1984): *Leitfaden der systematischen Fabrikplanung*. München: Carl Hanser Verlag, ISBN 3-446-13825-0.
- [KG98] KLOCKE F./G.K. (1998): *Trockenbearbeitung - Grundlagen, Grenzen, Perspektiven*. In VDI Bericht 1375 - Trockenbearbeitung prismatischer Teile. Düsseldorf: VDI-Verlag. S. 13-51.
- [KHT08] KORES S.; HENNADIY Z. und TONN B. (2008): *Aluminium alloys for cylinder heads*. RMZ - Materials and Geoenvironment, 55 (3). S. 307-317.
- [KINN94] KINNEBROCK W. (1994): *Optimierung mit genetischen und selektiven Algorithmen*. München: Oldenbourg Verlag, ISBN 978-3-486-22697-3.
- [KISS06] KIBLER H. (2006): *Zerspanung per Trockenbearbeitung*. Industriebedarf. S. 10-14.
- [KIBL04] KIBLER H. (2004): *Trockenbearbeitung: Motivation und Hemmnisse bei der praktischen Umsetzung*. (Beitrag auf dem Symposium zum Thema Innovative Zerspanung - effizient und umweltgerecht) Darmstadt: ABAG-itm Gesellschaft für innovative Technologie- und Managementberatung mbH.
- [KK05] KLOCKE F. und KÖNIG W. (2005): *Fertigungsverfahren 1 - Drehen, Fräsen, Bohren*. Berlin ; New York: Springer, ISBN 3-540-34579-5.
- [KLAN04] KLAN S. (2004): *Beitrag zur Evolution von Aluminium-Gusslegierungen für warmfeste Anwendungen*. (Dissertation) Freiberg: TU Freiberg, Fakultät für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie.
- [KLOC00] KLOCKE F./L.D. (2000): *Minimalmengen Kühlschmierung - Systeme, Werkzeuge und Medien*. In VDI Bericht 1532 - Trockenbearbeitung: Drehen, Fräsen, Bohren. Düsseldorf: VDI-Verlag. S. 137-154.
- [KLOC95] KLOCKE F.; KÖNIG W.; LUNG D. et al. (1995):, 38-42.
- [KONO02] KONOLD T. (2002): *Einsatz der Trockenbearbeitung mit der Minimalschmiertechnik in der Serienfertigung*. In: VDI-Wissensforum GmbH (Hg.): *Trockenzerspannung in der Serienfertigung*. Düsseldorf.

- [KONO04] KONOLD T. (2004): *Späne- und Abluftmanagement in Maschine, Zelle und System*. (Präsentation) Cross Hüller Technologietage 2004.
- [KONR12] KONRAD K. (2012): *Verfahrung zum semantisch gestützten Anlagenanlauf von Montagesystemen*. (Dissertation) Stuttgart: Universität Stuttgart, ISBN 978-3-839-60455-7.
- [KORN10] KORN D. (2010): *The Many Ways Ford Benefits from MQL*. 24.09.2010. Modern Machine Shop. <http://www.mmsonline.com/articles/the-many-ways-ford-benefits-from-mql>, zuletzt geprüft am 15.05.2015.
- [KRAU12] KRAUSS A. (2012): *Zustandsgeregelte dynamische Dimensionierung von Produktionssystemen im Kontext des Produktionsmanagements*. (Dissertation) Chemnitz: TU Chemnitz.
- [KRIS08] KRISTOF K. und LEMKEN T. (2008): *Untersuchung der Wirksamkeit des Programms zur Verbesserung der Materialeffizienz: AZ I D 4 - 02 08 15*. Wuppertal / Karlsruhe: Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie.
- [KRON54] KRONENBERG M. (1954): *Grundzüge der Zerspanungslehre: Theorie und Praxis der Zerspanung für Bau und Betrieb von Werkzeugmaschinen - Band 1*. Springer,.
- [KUCH12] KUCHENMEISTER R. (2012): *Minimalmengenschmierung versus Nassbearbeitung - Kosten- und Qualitätsvorteile*. Werkstatt und Betrieb (6). S. 75-77.
- [KUHR11] KUHRKE B. (2011): *Methode zur Energie- und Medienbedarfsbewertung spanender Werkzeugmaschinen*. Darmstadt: epubli, ISBN 978-3-844-21461-1.
- [KUTT01] KUTTKAT B. (2001): *Trockenbearbeitung senkt die Fertigungskosten*. MM - Maschinenmarkt (36). S. 68-73.
- [LEIM01] LEIMER E.-O. (2001): *Ein objektorientiertes und wissensbasiertes System zur sicherheitstechnischen Auslegung verfahrenstechnischer Anlagen*. Fortschritts-Berichte VDI Reihe 3 Verfahrenstechnik. Düsseldorf: VDI Verlag.
- [LUTH01] LUTHER R. (2001): *Lubricants in the Environment*. In MANG T. (Hg.), Lubricants and Lubrication. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. S. 115-164.
- [MALD08] MALDANER J. (2008): *Verbesserung des Zerspanverhaltens von Werkzeugen mit Hartmetall-Schneidelementen durch Variation der Schleifbearbeitung*. (Dissertation) Kassel: Universität Kassel.
- [MAPA12] MAPAL Dr. Kress KG (2012):, 29.

- [MARK08] MARKSBERRY P.W. und JAWAHIR I.S. (2008): *A comprehensive tool-wear/tool-life performance model in the evaluation of NDM (near dry machining) for sustainable manufacturing*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 48, ISSN 0890-6955. S. 878-886.
- [MARO99] MAROPAKIS P. (1999): *An Investigation into Verification and Development of a Computer Model for Process Parameter Selection*. (Ph.D. Thesis) Liverpool: Liverpool John Moores University.
- [MAV10] Konradin-Verlag Robert Kohlhammer GmbH (2010): *MAV - Innovation in der spanenden Fertigung*. Konradin-Verlag Robert Kohlhammer GmbH. http://www.mav-online.de/automation/-/article/46701/30228956/Inno-1010-Grob-Hydraulikfreies-Bearbeitungszentrum/art_co_INSTANCE_0000/maximized/, zuletzt geprüft am 06.08.2015.
- [MCKI09] McKinsey Deutschland (2009): *Wettbewerbsfaktor Energie - Neue Chancen für die deutsche Wirtschaft*. Frankfurt: McKinsey & Company, Inc.
- [MD07] MANG T. und DRESEL W. (2007): *Lubricants and Lubrication*. 2. Aufl. John Wiley & Sons, ISBN 3-527-61033-2.
- [MEIE03] MEIERLOHR C. (2003): *Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung*. (Dissertation) München: TU München, ISBN 3-831-60292-1.
- [MEYE11] MEYER D. (2011): *Online Monitoring of the Chemical and Microbial Properties of Metalworking Fluids - The Electronic Nose*. In: Proceedings of the Fourth Symposium on Metal Removal Fluids. Barcelona, 14-16.09.2011. S. 121-127.
- [MFH01] MANG T.; FREILER C. und HÖRNER D. (2001): *Metalworking Fluids*. In Lubricants and Lubrication. Weinheim: Wiley-VCH Verlag. S. 347-480.
- [MFO98] MANG T. und FREILER C. (1998): *Trockenbearbeitung: Bearbeitung metallischer Werkstoffe ohne Kühlschmierstoffe ; mit 17 Tabellen*. In OPHEY L. (Hg.), Trockenbearbeitung. expert verlag, ISBN 3-816-91518-3.
- [MICH12] MICHELFEIT S. (2012): *Werkstoffgesetze einer AlSi-Gusslegierung unter Hochtemperaturbeanspruchung in Abhängigkeit des Werkstoffzustandes*. (Dissertation) Darmstadt: TU Darmstadt.

- [MILB91] MILBERG J.; AMANN W. und ZETLMAYER H. (1991): *Wissensbasierte Simulation und Regelung von Produktionssystemen*. CIM Management (6). S. 4-9.
- [ML94] MAIER R. und LEHNER F. (1994): *"Wert" des Informationsbegriffs - Vorschlag für eine theoretische Neukonzeption*. In: RAUCH W. (Hg.): *Mehrwert von Information - Professionalisierung der Informationsarbeit*. Proceedings des 4. Internationalen Symposiums für Informationswissenschaft. Graz: Kostanz: Univ.-Verl. S. 33-50.
- [MÖLL86] MÖLLER U. und BOOR I. (1986): *Schmierstoffe im Betrieb*. Düsseldorf: VDI-Verlag, ISBN 3-184-00739-1.
- [MORR38] MORRIS C.W. (1938): *Foundations of the Theory of Signs*. Chicago: Chicago University Press.
- [MOSE05] MOSER S. (2005): *Macht der Gewohnheit kontra Trockenbearbeitung*. technik+EINKAUF (3). S. 44-45.
- [MÜLL07] MÜLLER S. (2007): *Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen*. (Dissertation) München: TU München.
- [NEST99] NESTLER A. (1999): *Entwicklung eines lernfähigen Moduls zur Bestimmung von Einstellparametern bei der Hochgeschwindigkeitsbearbeitung auf der Basis neuronaler Netze*. (Forschungsergebnisbericht) Dresden: TU Dresden.
- [NEUM01] NEUMÜLLER M. (2001): *Hypertext Semiotics in the Commercialized Internet*. (Dissertation) Wien: Wirtschaftsuniversität Wien.
- [NISS97] NISSEN V. (1997): *Einführung in evolutionäre Algorithmen: Optimierung nach dem Vorbild der Evolution*. 1. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, ISBN 978-3-528-05499-1.
- [NORT05] NORTH K. (2005): *Wissensorientierte Unternehmensführung - Wertschöpfung durch Wissen*. 4. Aufl. Wiesbaden: Gabler, ISBN 978-3-834-90082-1.
- [NORT11] NORTH K. (2011): *Wissensorientierte Unternehmensführung - Wertschöpfung durch Wissen*. 5. Aufl. Wiesbaden: Gabler, ISBN 978-3-834-96427-4.
- [NT97] NONAKA I.; TAKEUCHI H. und MADER F. (1997): *Die Organisation des Wissens - Wie japanische Unternehmen eine brachliegende Ressource nutzbar machen*. 1. Aufl. Frankfurt/Main: Campus-Verlag, ISBN 978-3-593-35643-3.

- [OEMI91] OEMIG F. (1991): *Wissensbasierte Textverarbeitung: Schriftsatz und Typographie; Möglichkeiten einer intelligenteren Textverarbeitung*. 1. Aufl. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, ISBN 978-3-824-42020-9.
- [OSTE01] OSTERMANN A.D. (2001): *Neue Ansätze zur gesamtheitlichen Fabriksimulation: Modellkonzept und wissensbasierte Abstraktion*. (Dissertation) Clausthal: TU Clausthal.
- [OSTE07] OSTERMANN F. (2007): *Anwendungstechnologie Aluminium*. Berlin: Springer, ISBN 978-3-540-23882-9.
- [PAPS11] PAPSCH A. (2011): *Wissensbasierte Fertigungsplanung für komplexe Bohrprozesse - Entwicklung einer 80/20-teilautomatisierten NC-Programmierung*. (Dissertation) Aachen: Universität Duisburg-Essen.
- [PAUC08] PAUCKSCH E. (2008): *Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien ; mit 45 Tabellen*. Wiesbaden: Vieweg + Teubner,.
- [PB06] PELLEGRINI T. und BLUMAUER A. (2006): *Semantic Web und semantische Technologien: Zentrale Begriffe und Unterscheidungen*. In PELLEGRINI T. und BLUMAUER A. (Hg.), *Semantic Web: Wege zur vernetzten Wissensgesellschaft*. Berlin Heidelberg: Springer, ISBN 3-540-29324-8. S. 9-26.
- [PROB10] PROBST G.; RAUB S. und ROMHARDT K. (2010): *Wissen managen: Wie Unternehmen ihre wertvollste Ressource optimal nutzen*. 6. Aufl. Wiesbaden: Gabler, ISBN 978-3-834-91903-8.
- [PUDI98] PUDIG C. (1998): *Erfahrungsbasierte NC-Programmierung für komplexe Werkstücke - Ausgabe 460 von Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 2, Fertigungstechnik*. (Dissertation) Hannover: VDI-Verlag, ISBN 978-3-183-46002-1.
- [PUPP86] PUPPE F. (1986): *Expertensysteme*. Informatik Spektrum, 9 (01). S. 1-13.
- [RAUC13] RAUCH E. (2013): *Konzept eines wandlungsfähigen und modularen Produktionssystems für Franchising-Modelle*. (Dissertation) Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Arbeitswissenschaft und Organisation, ISBN 978-3-839-60585-1.
- [REIC02] REICH S. und BÖSWETTER G. (2002): *Trockenbearbeitung - Möglichkeiten und Grenzen einer Technologie*. Thüringer Mitteilungen des VDI und VDE (2). S. 7-11.

- [REIN10] REINHART G.; KARL F.; KREBS P. et al. (2010): *Energiewertstrom - Eine Methode zur ganzheitlichen Erhöhung der Energieproduktivität*. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 105 (10). S. 870-875.
- [REIN11] REINHART G.; KARL F.; KREBS P. et al. (2011): *Energiewertstromdesign - Ein wichtiger Bestandteil zum Erhöhen der Energieproduktivität*. wt Werkstatttechnik online, 101 (4). S. 253-260.
- [REIN13] REINHARDT S.K.C. (2013): *Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung*. (Dissertation) München: TU München.
- [RIED06] RIEDL R. (2006): *Analytischer Hierarchieprozess vs. Nutzwertanalyse: Eine vergleichende Gegenüberstellung zweier multiattributiver Auswahlverfahren am Beispiel Application Service Providing*. In FINK K. und PLODER C. (Hg.), *Wirtschaftsinformatik als Schlüssel zum Unternehmenserfolg*. Wiesbaden: Deutscher Universitäts-Verlag, ISBN 978-3-835-00293-7. S. 99-128.
- [RK96] REHÄUSER J. und KRUMHÖRNER H. (1996): *Wissensmanagement im Unternehmen*. In SCHREYÖGG W. und CONRAD P. (Hg.), *Managementforschung 6 - Wissensmanagement*. Berlin: Walter de Gruyter. S. 1-40.
- [ROY09] ROY P.; SARANGI S.K.; GOSH A.K. et al. (2009): *Machinability study of pure aluminium and Al-12% Si alloys against uncoated and coated carbide inserts*. International Journal of Refractory Metals & Hard Materials, 27 (3). S. 535-544.
- [RÜHM06] RÜHMANN N. (2006): *Steigerung der Effizienz im Produktionsanlauf*. UdZ - Unternehmen der Zukunft. FIR-Zeitschrift für Betriebsorganisation und Unternehmensentwicklung, 7 (2), ISSN 1439-2585. S. 16-19.
- [SAAT90] SAATY T.L. (1990): *Multicriteria Decision Making: The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. 2. Aufl. Pittsburgh: RWS Publications, ISBN 978-0-962-03172-4.
- [SAUE02] SAUER H. (2002): *Relationale Datenbanken - Theorie und Praxis*. Pearson, ISBN 978-3-827-32060-5.
- [SCHA07] SCHACK R.J. (2007): *Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik*. (Dissertation) München: TU München, ISBN 978-3-831-60748-8.

- [SCHA08] SCHADY R. (2008): *Methode und Anwendungen einer wissensorientierten Fabrikmodellierung*. (Dissertation) Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.
- [SCHA82] SCHANK R. (1982): *Dynamic memory : a theory of reminding and learning in computers and people*. Cambridge New York: Cambridge University Press.
- [SCHI10] SCHIEBENER P. (2010): *Abnahmeversuche und Kennfeldbestimmung bei Kreiselpumpen und Wasserturbinen*. München: Hochschule München - Verbundlabor für Aerodynamik, Aeroakustik und Fluidtechnik.
- [SCHM92] SCHMIDT M. (1992): *Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme*. (Dissertation) München: iwB, ISBN 3-540-55025-9.
- [SCHN08] SCHNEEWEIß M.; KÖHLER S.; SCHWARZBURGER R. et al. (2008): *Kühlschmierung bedarfsgerecht dosieren*. Werkstatt und Betrieb (11). S. 54-58.
- [SCHN10] SCHNEIDER T. (2010): *Automatisierte Akquisition von erfahrungsbasiertem Fertigungswissen im Werkzeug- und Formenbau*. (Dissertation) Chemnitz: TU Chemnitz.
- [SCHN12] SCHNELLBACH P.; SCHNEIDER O.; BEISBART U. et al. (2012): *Mobile Energie-Erfassungseinheit (MobEE)*. Productivity Management, 17 (4). S. 58-61.
- [SCHÖ03] SCHÖNFELD F. (2003): *Gußeisenwerkstoffe in NFZ-Dieselmotoren - Werkstoffentwicklung für Wirtschaftlichkeit und Zuverlässigkeit*. In: *Werkstofftechnik V.-G. (Hg.): VDI-Berichte 1718 - Gießtechnik im Motorenbau - Anforderungen der Automobilindustrie*, Tagung Magdeburg, 30. und 31. Januar 2003. Magdeburg: VDI-Verlag. S. 93-105.
- [SCHO05] SCHOLZ-REITER B.; HAMANN T.; GRONAU N. et al. (2005): *Fallbasierte neuronale Produktionsregelung: Nutzung des Case-Based Reasoning zur Produktionsregelung mit neuronalen Netzen*. wt Werkstatttechnik online (4). S. 293-298.
- [SIEB10] SIEBERTZ K.; VAN BEBBER D. und HOCHKIRCHEN T. (2010): *Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE)*. Heidelberg, Dordrecht, London, New York: Springer, ISBN 978-3-642-05492-1.

- [SK00] SORMAZ D.N. und KHOSHNEVIS B. (2000): *Modeling of manufacturing feature interactions for automated process planning*. Journal of Manufacturing Systems, 19 (1). S. 28-45.
- [SL09] SPATH D. und LENTES J. (2009): *Ontologiegestützte kontinuierliche Produktionssystemplanung*. wt Werkstatttechnik online (3). S. 111-116.
- [SLAM04] SLAMA S. (2004): *Effizienzsteigerung in der Montage durch marktorientierte Montagestrukturen und erweiterte Mitarbeiterkompetenz*. (Dissertation) Bamberg: Meisenbach: Universität Erlangen-Nürnberg, ISBN 3-875-25204-7.
- [SMIT08] SMITH G.T. (2008): *Cutting tool technology: industrial handbook*. London: Springer, ISBN 978-1-848-00204-3.
- [SONG11] SONGMENE V.; KHETTABI R.; ZAGHBANI I. et al. (2011): *Machining and Machinability of Aluminium Alloys*. In KVACKAJ T. und BIDULSKY R. (Hg.), *Aluminium Alloys, Theory and Applications*. Rijeka: INTECH Open Access Publisher, ISBN 978-9-533-07244-9. S. 377-400.
- [SPUR10] SPURK J.H. und AKSEL N. (2010): *Strömungslehre: Einführung in die Theorie der Strömungen*. Berlin: Springer, ISBN 978-3-642-13142-4.
- [SS98] SCHILLO E. und STEIBL J. (1998): *Umsetzung der Trockenbearbeitung bei BMW*. In VDI Bericht 1375 - *Trockenbearbeitung prismatischer Teile*. Düsseldorf: VDI-Verlag. S. 113-118.
- [SSK05] SCHNATZ F.; SCHWÄR M. und KISSLER H. (2005): *Produktionsanlage zur Trockenbearbeitung von Aluminiumrädern und -Teilen mit geschlossener Kreislaufführung der Al-Späne*. (Abschlussbericht) Schiltach: Umweltbundesamt.
- [STAA02] STAAB S. (2002): *Wissensmanagement mit Ontologien und Metadaten*. Informatik Spektrum, 25 (03). S. 194-209.
- [STEL06] STELZER D. (2006): *Betriebliches Wissensmanagement*. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb (06). S. 344-347.
- [STOL02] STOLL A. (2002): *Maschinen- und Werkzeuganforderungen zur erfolgreichen Implementierung von Hochleistungsprozessen in der Großserienfertigung*. In: 5. Schmalkalder Werkzeugtagung. Schmalkalden.
- [STOL04] STOLL A. (2004): *Implementierung der Trockenbearbeitung - Entscheidungskriterien und Anforderungen aus Anwendersicht*. (Präsentation) Cross Hüller Technologietage 2004.

- [SUN05] SUN W. (2005): *Hochgeschwindigkeitsfräsen von hochwarmfesten Stählen mit Minimalmengenschmierung*. (Dissertation) Darmstadt: TU Darmstadt.
- [SUTH12] SUTHE M. (2012): *Entwicklung von Energieeffizienzmaßnahmen in der mechanischen Fertigung anhand der Methode der Energiewertstromanalyse*. (Diplomarbeit) München: Universität Paderborn.
- [TASH06] TASH M.; SAMUEL F.H.; MUCCIARDI F. et al. (2006): *Effect of metallurgical parameters on the machinability of heat-treated 356 and 319 aluminium alloys*. *Materials Science and Engineering*, 434. S. 207-217.
- [TEMP93] TEMPELMEIER H. und KUHN H. (1993): *Flexible Fertigungssysteme: Entscheidungsunterstützung für Konfiguration und Betrieb*. Berlin: Springer, ISBN 3-540-56905-7.
- [TFKL07] THALMAIR S.; FICHERSWORRING-BUNK A.; KLINKENBERG F.J. et al. (2007): *Zur thermomechanischen Bewertung hochbelasteter Aluminium-Zylinderköpfe*. *Materials Testing*, 49 (3), doi 10.3139/120.100798. S. 113-117.
- [TIED05] TIEDEMANN H. (2005): *Wissensmanagement in der Fabrikplanung*. (Dissertation) Aachen: TU Braunschweig.
- [TT02] WEINERT K.; SCHMIDT J.; KLOCKE F. et al. (2002): *Technologienetz Trockenbearbeitung*. (Abschlussbericht) Karlsruhe: Institut für Produktionstechnik wbk, ISSN 1610-8213.
- [UBA05] SCHNATZ F.; SCHWÄR M.; KISSLER H. et al. (2005): *Produktionsanlage zur Trockenbearbeitung von Aluminiumrädern und -Teilen mit geschlossener Kreislaufführung der Al-Späne*. (Abschlussbericht Förderprojekt) Herbolzheim: Umweltbundesamt.
- [UHLM02] UHLMANN E.; SPUR G. und ELBING F. (2002): *Mehr als nur ein Reinigungsverfahren - Möglichkeiten des Trockeneisstrahlens*. *Metalloberfläche* : mo 56 (4), ISSN 0026-0797. S. 14-18.
- [UNFC15a] United Nations Framework Convention on Climate Change (2015): *Draft report of the Conference of the Parties on its twenty-first session*. In: Conference of the Parties - Twenty-first session. Paris.

- [UNFC15b] United Nations Framework Convention on Climate Change (2015): *Draft report of the Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto protocol on its eleventh session*. In: Conference of the Parties serving as the meeting of the Parties to the Kyoto Protocol - Eleventh session. Paris.
- [VÁRA13] VÁRADY M. (2013): *Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer MMS-Kühlstrategie in Bezug auf das BMW Group Referenzfertigungssystem für die spanende Fertigung von Aluminiumbauteilen*. (Bachelorthesis) München: RWTH Aachen.
- [VDA14] Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA) (2014): *VDA-Band 19 - Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie - Prüfung der Technischen Sauberkeit*. (Unverbindliche Normenempfehlung) Berlin, ISSN 0943-9412.
- [VDI05] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (2005): *VDI-Richtlinie 2884 - Beschaffung, Betrieb und Instandhaltung von Produktionsmitteln unter Anwendung von Life Cycle Costing (LCC)*. Beuth Verlag, Düsseldorf
- [VDI07] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (2007): *VDI-Richtlinie 3397, Blatt 1 - Kühlschmierstoffe für spanende und umformende Fertigungsverfahren*. Beuth Verlag, Düsseldorf
- [VDI08] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (2008): *VDI-Richtlinie 3035 - Gestaltung von Werkzeugmaschinen, Fertigungsanlagen und peripheren Einrichtungen für den Einsatz von Kühlschmierstoffen*. Beuth Verlag, Düsseldorf
- [VDI11] Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) (2011): *VDI-Richtlinie 5200, Blatt 1 - Fabrikplanung - Planungsvorgehen*. Beuth Verlag, Düsseldorf
- [VDMA15] Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e. V. (VDMA) (2015): *VDMA 34179:2015-03 - Messvorschrift zur Bestimmung des Energie- und Medienbedarfs von Werkzeugmaschinen in der Serienfertigung*. Beuth Verlag
- [VIER59] VIEREGGE G. (1959): *Zerspanung der Eisenwerkstoffe*. 16. Aufl. Verlag Stahleisen.
- [VOLK15a] Volkswagen Aktiengesellschaft (2015): *Nachhaltigkeitsbericht 2014*. Wolfsburg.
- [VOLK15b] Volkswagen Aktiengesellschaft (2015): *Umwelterklärung 2014 - Salzgitter*. Wolfsburg.

- [WALL06] WALLAU F.; ADENÄUER C. und KAYSER G. (2006): *BDI-Mittelstandspanel - Ergebnisse der Online-Mittelstandsbefragung - Herbst 2006 - Langfassung*. Berlin: Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.
- [WALT01] WALTER A. (2001): *Potential von Kühlschmierstoffen gezielt nutzen*. In VDI-Bericht 1635 - Trocken oder nass - Wohin geht die Metallverarbeitung? Düsseldorf: VDI-Verlag.
- [WEBE96] WEBER J. (1996): *Logistik- und Produktionscontrolling*. In EVERSHEIM W. und SCHUH G. (Hg.), *Betriebshütte - Produktion und Management*. 7. Aufl. Berlin: Springer, ISBN 3-540-59360-8.
- [WECK05] WECK M. und BRECHER C. (2005): *Werkzeugmaschinen 1 - Maschinenarten und Anwendungsbereiche*. 6. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, ISBN 978-3-642-38744-9.
- [WECK06a] WECK M. und BRECHER C. (2006): *Werkzeugmaschinen 4 - Automatisierung von Maschinen und Anlagen*. 6. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, ISBN 978-3-642-38747-0.
- [WECK06b] WECK M. und BRECHER C. (2006): *Werkzeugmaschinen 5 - Messtechnische Untersuchung und Beurteilung, dynamische Stabilität*. 7. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, ISBN 978-3-642-38748-7.
- [WECK96] WECK M.; STEINERT T. und BRECHER C. (1996): *Probleme auf dem Weg zur ölfreien Werkzeugmaschine*. In VDI Berichte 1240 - Auf dem Weg zur Trockenbearbeitung. Düsseldorf: VDI-Verlag, ISBN 3-180-91240-5. S. 209-234.
- [WEGN07] WEGNER H. (2007): *Ein System zum fertigungstechnischen Wissensmanagement*. (Dissertation) Aachen: RWTH Aachen.
- [WEIC07] WEICKER K. (2007): *Evolutionäre Algorithmen*. 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, ISBN 978-3-835-10219-4.
- [WEIN96] WEINERT K..T.D. (1996): *Kühlschmierstoffkonzepte für die Bohrungsbearbeitung*. In VDI Berichte 1240 - Auf dem Weg zur Trockenbearbeitung. Düsseldorf: VDI-Verlag, ISBN 3-180-91240-5. S. 111-124.
- [WEIN99] WEINERT K. (1999): *Trockenbearbeitung und Minimalmengenschmierung*. Heidelberg: Springer Verlag, ISBN 3-540-64793-7.
- [WEIZ10] VON WEIZSÄCKER E.U.; HARGROVES K. und SMITH M. (2010): *Faktor Fünf - Die Formel für nachhaltiges Wachstum*. München: Drömer Verlag, ISBN 978-3-426-27486-6.

- [WESS01] WESSEL G. (2001): *Der Technologiesprung von der Minimalmengenschmierung zur Trockenbearbeitung beim spanabhebenden Trennen*. In: Fachhochschule Wedel (Hg.): *Fertigungstechnisches Seminar*. Wedel.
- [WEST07] WESTKÄMPER E.; NIEMANN J. und STOLZ M. (2007): *Fertigungs- und Fabrikbetrieb*. In GROTE K. und FELDHUSEN J. (Hg.), *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*. 22. Aufl. Berlin: Springer, ISBN 978-3-540-49714-1. S. 1319-1332.
- [WIEL05] WIELAND P. (2005): *Ein Beitrag zur Gestaltung der Spanentsorgung bei der Trockenbearbeitung: Berichte aus dem IWU Band 30*. 1. Aufl. Chemnitz: Wissenschaftliche Scripten, ISBN 3-937-52429-0.
- [WIEN01] WIENDAHL H.-P.; REICHHARDT J. und HERNÁNDEZ R. (2001): *Kooperative Fabrikplanung - Wandlungsfähigkeit durch zielorientierte Integration von Prozess- und Bauplanung*. wt Werkstatttechnik Online, 91 (4). S. 186-191.
- [WILL01] WILLKE H. (2001): *Systemisches Wissensmanagement*. 2. Aufl. Stuttgart: UTB, ISBN 978-3-825-22047-1.
- [WILL05] WILLKE H. (2005): *Auf dem Weg zur intelligenten Organisation: Lektionen für Wirtschaft und Staat*. In THOM N. (Hg.), *Wissensmanagement im privaten und öffentlichen Sektor: was können beide Sektoren voneinander lernen?* Zürich: vdf Hochschulverlag, ISBN 978-3-728-12983-3. S. 77-98.
- [WILL08] WILLMS H. (2008): *Methodisches System zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen*. (Disseration) Aachen: RWTH Aachen.
- [WISW04] WEINERT K.; INASAKI I.; SUTHERLAND J. et al. (2004): *Dry Machining and Minimum Quantity Lubrication*. CIRP Annals - Manufacturing Technology.
- [WITT03] WITTE K.-W. und VIELHABER W. (2003): *Flexible und wirtschaftliche Serienmontage : Wege zu zukunftsstabilen Montagesystemen*. 1. Aufl. Aachen: Shaker, ISBN 3-832-21957-9.
- [WK10] WACKERNAGEL M. und KANE K. (2010): *Herausforderung ökologischer Fußabdruck*. In VON WEIZSÄCKER E.U.; HARGROVES K. und SMITH M. (Hg.), *Faktor Fünf - Die Formel für nachhaltiges Wachstum*. München: Droemer, ISBN 978-3-426-27486-6.

- [WL03] WEINERT K. und LOICHINGER A. (2003): *Untersuchung von Minimalmengen-Schmiersystemen*. wt Werkstattstechnik online, 93 (6). S. 478-484.
- [WL11] WENZEL K. und LORENZ S. (2011): *Semantic Web zur Unterstützung der energetischen Analyse und Bewertung von Produktionssystemen*. In: NEUGEBAUER R.; GÖTZE U. und DROSSEL W.-G. (Hg.): *Methoden der energetisch-wirtschaftlichen Bilanzierung und Bewertung in der Produktionstechnik*. Tagungsband, Methodenworkshop der Querschnittsarbeitsgruppe 1, "Energetisch-wirtschaftliche Bilanzierung" des Spitzentechnologieclusters eniPROD. Chemnitz: Verlag Wissenschaftliche Scripten. S. 21-34.
- [WO14] WEBER M. und OBERENDER C. (2014): *Ressourceneffizienz im Fokus der betrieblichen Kostenrechnung*. (Kurzanalyse Nr. 6) Berlin: VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH.
- [WÖHE13] WÖHE G. und DÖRING U. (2013): *Einführung in die Allgemeine Betriebswirtschaftslehre*. 25. Aufl. München: Vahlen, ISBN 978-3-800-64687-6.
- [WRN14] WIENDAHL H.-P.; REICHARDT J. und NYHUIS P. (2014): *Handbuch Fabrikplanung: Konzept, Gestaltung und Umsetzung wandlungsfähiger Produktionsstätten*. München: Carl Hanser Verlag, ISBN 3-446-43702-9.
- [XIE12] XIE S. (2012): *Ressourceneffizienter Einsatz von Druckluft in der Motorenproduktion*. (Diplomarbeit) Aachen: RWTH Aachen.
- [YEGN99] YEGNANARAYANA B. (1999): *Artificial neural networks*. New Delhi: Prentice-Hall of India Private Limited, ISBN 8-120-31253-8.
- [YETI90] YETIM F. (1990): *Hypertext und Erklärung: Überlegungen zu einem pragmatischen Ansatz*. In: *Hypertext und KI, Workshop, FORWISS*. Erlangen.
- [YH99] YOSHIKAWA H. und NISHIYAMA A. (1999): *CVD diamond coated insert for machining high silicon aluminum alloys*. *Diamond and Related Materials*, 8 (8), doi:10.1016/S0925-9635(99)00078-3. S. 1527-1530.
- [ZADE65] ZADEH L.A. (1965): *Fuzzy Sets*. In *Information and Control* 8. Berkeley. S. 338-353.
- [ZAPP14] ZAPP M. (2014): *Semantische Wiki-Systeme in der wandlungsfähigen Produktion*. (Dissertation) Stuttgart: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA, ISBN 978-3-839-60678-0.

- [ZEIT15] BAUER S.; BRANDI C. und CHAN S. (2015).
- [ZH00] ZABEL F. und HEMPEL T. (2000): *Expertensysteme - Seminar zur Didaktik der Informatik*. (Seminar) Greifswald: TU Chemnitz.
- [ZIEL96] ZIELASKO W. (1996): *Trockenzerspannung in der Großserienfertigung*. In VDI Berichte 1240 - Auf dem Weg zur Trockenbearbeitung. Düsseldorf: VDI-Verlag, ISBN 3-180-91240-5. S. 93-110.
- [ZIMM98] ZIMMERMANN H. (1998): *PVD-beschichtete Schneidstoffe für moderne Zerspanungsanwendungen*. Aachen: Mainz, ISBN 978-3-896-53331-9.

10 Anhang

Anhang A: Interviewpartner

Im Rahmen dieser Arbeit und in deren Verlauf betreuter Abschlussarbeiten wurden Experteninterviews mit relevanten Autoren aus dem Bereich MMS und Teilnehmern des Verbundprojekts Technologienetz Trockenbearbeitung durchgeführt [GREB16, EIME14, VÁRA13, TT02]. Hierzu zählen u.a.:

- Dr.-Ing. Klaus Gerschwiler, Gruppenleiter am WZL der RWTH Aachen
- Dr.-Ing. Waldemar Zielasko, Leitung Produktions- und Werkstofftechnik, *Daimler AG*
- Michael Knauf, Gruppenleiter Werkzeugplanung, *Volkswagen AG*
- Josef Lanegger, Gruppenleiter Fluidmanagement, *BMW Motoren GmbH*
- Josef Steibl, Ingenieur Werkzeugplanung, *BMW AG*
- Eckart Schillo, Projektleiter MMS-Zerspanung, *BMW AG*
- Lutfi Bozkurt, Produktmanager Diamantwerkzeuge, *Gühring KG*
- Christian Schmidt, F&E-Ingenieur MMS, *MAPAL Dr. Kress KG*
- Matthias Haug, Leiter Vertriebsaußendienst, *bielomatik Leuze GmbH + Co. KG*
- Reiner und Sigrun Rother, Geschäftsführer der *Rother Technologie GmbH & Co. KG*
- Jos Christoffel, Produktmanager MMS, *Blaser Swissslube AG*

Anhang B: Daten Zerspanungsversuche

Tabelle 10.1: Technische Daten der eingesetzten Versuchsmaschinen [GROB12, EXCE05]

	Ex-Cell-O XHC 241	Grob G350
CNC-Steuerung	Siemens 840D Power Line	Siemens 840 sl Mdynamics
Arbeitspindel	HSK-A63, 16.000 U/min	HSK-A63, 18.000 U/min
Arbeitswege in X-/Y-/Z-Achse [mm]	630 / 630 / 710	600 / 770 / 805
Max. Geschwindigkeit in X-/Y-/Z-Achse [m/min]	120 / 120 / 120	65 / 42 / 90
Span-zu-Span-Zeit nach VDI 2852 [s]	4,5	4,0
Max. Werkstückgewicht [kg]	400	380
Sonderausführung	Manuell umschaltbar zwischen Nassbearbeitung, MMS-1-Kanal und MMS-2-Kanal	Manuell umschaltbar zwischen Nassbearbeitung und MMS-1-Kanal, hydraulikfrei

Tabelle 10.2: Überblick über die eingesetzten Schmierstoffe, unterstrichen sind die Kurzbezeichnungen im Rahmen dieser Arbeit

Hersteller	Bezeichnung	Basis	Viskosität	Einsatzort
Blaser Swisslube AG	<u>Vascomill</u> MMS FA 12	Fettalkohol	32 mm ² /s	PTW
Fuchs Petrolub SE	<u>Ecocut</u> Mikro Plus 20 HP2	Fettalkohol, Esteröl	30 mm ² /s	WZA
Menzel Metallechemie GmbH	<u>Induoil</u> HL25	Esteröl	26 mm ² /s	PTW
Oemeta Chemische Werke GmbH	<u>Microtol</u> EC32	Esteröl	32 mm ² /s	PTW
Zeller+Gmelin GmbH & Co. KG	<u>ATS AL</u> 20	Fettalkohol	20 mm ² /s	PTW
	<u>MultiCut</u> Micro SP51	Esteröl	51 mm ² /s	WZA

Tabelle 10.3: Werkzeugliste zur Bearbeitung der ausgewählten entscheidungsrelevanten Features am ZK N20

#	Feature	Prozessschritt	Material Schneide	$N_{\text{Schneiden}}$	D [mm]			Bemerkung
					Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3	
1	Haupt- ölkanal	Pilot	VHM	2	8,05	9,3	12	
		Finish	VHM	2	8,05	-	-	
2	HVA- Bohrung	Vorbearbeitung	VHM	2	11,25	13,0	-	
		Finish	PKD	3	12,023	-	-	
3	Zündkerzen- und Valve- tronic- Bohrung	Vorbearbeitung	PKD	3	20	-	-	Fräser
		Finish Zündkerze	PKD	2	10,8	19,4	20,5	
		Finish Valvetronic	PKD	2	23,0	25,0	30,0	
4	Injektor- bohrung	Vorbearbeitung 1	PKD	2	20,35	21,9	-	
		Vorbearbeitung 2	PKD	2	7,1	11,0	21,35	Monoblock-WZ
		Finish	PKD	2	7,668	15,2	23,5	Monoblock-WZ
5	Stellmotor- Bohrung	Vorbearbeitung	PKD	2	14,5	23,1	42,0	Monoblock-WZ
		Finish	PKD	6	24,053	42,616	-	Monoblock-WZ
6 + 7	Ventilsitz (VS) und -führung (VF)	Pilot	PKD	2	4,97	5,97	-	
		Stechen Einlass	PKD	2	27,7	-	-	Monoblock-WZ
		Finish Einlass VF	VHM	4	4,8	5,015	-	Einbau in WZ Finish VS
		Finish Einlass VS	PKD	3	29,94	30,4	31,5	Monoblock-WZ
		Finish Auslass VF	VHM	5	5,8	6,014	-	Einbau in WZ Finish VS
		Finish Auslass VS	PKD	4	24,5	26,6	28,6	Monoblock-WZ

Tabelle 10.4: Werkzeugliste zur Bearbeitung der ausgewählten entscheidungsrelevanten Features am KG B48

#	Feature	Prozessschritt	Material Schneide	$N_{\text{Schneiden}}$	D [mm]	L [mm]
1	Stegkühlungsbohrung Wasserraum	Plansenken	VHM	3	4,0	-
		Pilot	VHM	2	3,52	10,0
		Finish	VHM	2	3,5	41,0
2	Ölbohrung Druckölraum	Pilot	VHM	2	4,52	15,0
		Finish	VHM	2	4,5	145,0
3	Ölbohrung Druckölraum	Pilot	VHM	3	6,02	15,0
		Finish	VHM	2	6,0	110,0
4	Blow-By-Bohrung	Pilot	VHM	2	7,02	15,0
		Finish	VHM	2	7,0	158,5
5	Ölbohrung Druckölraum	Pilot	VHM	2	8,02	17,0
		Finish	VHM	2	8,0	148,0
6	Ölbohrung Druckölraum	Pilot	VHM	2	9,02	14,5
		Finish	VHM	2	9,0	140,0

Tabelle 10.5: Empfohlene Prozessparameter für die übrigen entscheidungsrelevanten Bearbeitungsfeatures des Zylinderkopfs N20 (Hauptölkanal s. Tabelle 5.9, Injektorbohrung s. Tabelle 5.10)

#	Feature	Prozessschritt	n [min^{-1}]	v_f [mm/min]	v_c [m/min]			f [mm]	Q_{MMS} [ml/h]	p_{DL} [bar]
					Stufe 1	Stufe 2	Stufe 3			
2	HVA-Bohrung	Vorbearbeitung	6.000	1.200	212	245	-	0,10	30	6
		Finish	8.000	9.000	302	-	-	1,13	100	6
3	Zündkerzen- und Valvetronic-Bohrung	Vorbearbeitung	10.000	2.000	628	-	-	0,2	50	6
		Finish Zündkerze	5.400	1.080 (Anschneiden 10 mm tief)	183	329	348	0,2	150	6
				2.000				0,37		
		Finish Valvetronic	8.000	1.600	578	628	754	0,2	100	6
5	Stellmotor-Bohrung	Vorbearbeitung	15.000	4.500	683	1.089	1.979	0,3	50	6
		Finish	6.125	919	463	820	-	0,15	50	6
6	Ventilsitz + (VS) und 7-führung (VF)	Pilot	6.000	900	113	-	-	0,15	20	6
		Stechen Einlass	1.500	288	131	-	-	0,192	20	6
		Finish Einlass VF	12.200	2.570	191	-	-	0,21	60	6
		Finish Einlass VS	1.500	150	143	-	-	0,1	nur Luft	6
		Finish Auslass VF	10.600	2.120	200	-	-	0,2	60	6
	Finish Auslass VS	1.600	160	143	-	-	0,1	nur Luft	6	

Anhang C: Energiemessung

Anhang C.1: Energiemesswagen

Der entwickelte Energiemesswagen (vgl. Abbildung 10.1, linke Seite) basiert auf einem 2012 von Schnellbach und Schneider für die BMW Group konzipierten Modell [SCHN12], das auf den konkreten Anwendungsfall im Werk Steyr angepasst und hinsichtlich seiner Größe optimiert wurde. Die von Schneider in diesem Rahmen entwickelte Software zur Datenfusion dient der Bündelung aller Messergebnisse mit einem einheitlichen, zum PSS synchronen Zeitstempel in einer Tabelle und bietet Möglichkeiten zur Echtzeitanzeige von Bedarfen und Kosten sowie zum Export in *Microsoft Excel* (vgl. Abbildung 10.1, rechte Seite). Die Messwerverfassung erfolgt mit einer Frequenz von 1 Hz.

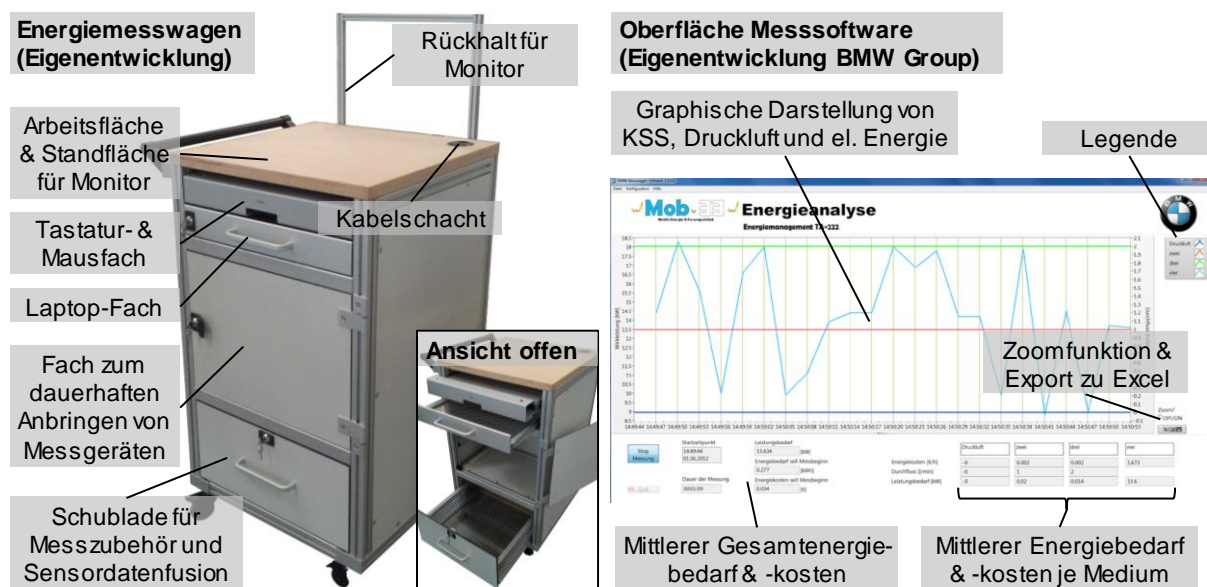


Abbildung 10.1: Eingesetzter Messwagen und verwendete Messsoftware (Entwicklung s. [SCHN12]) zur Erfassung der Energie- und Medienbedarfe

Anhang C.2: Volumenstrommessung KSS: Überprüfung der Messgenauigkeit der verwendeten Ultraschall-Durchflussmessgeräte

Der Hersteller *Fuji Electric Co., Ltd.* gibt für die verwendeten Ultraschall-Durchflussmessgeräte eine maximale Messabweichung von 2 Prozent an (vgl. Kapitel 5.2.2.2). Diese Angabe wurde von Buff an einem Pumpenprüfstand im Verbundlabor für Aerodynamik, Aeroakustik und Fluidtechnik der Hochschule München überprüft. An diesem wird der Volumenstrom von Wasser mithilfe von Differenzdruckmanometern und einer Venturidüse gemessen (vgl. Abbildung 10.2). Der Einbau des Messgeräts Portaflow X erfolgte an einem geraden Rohrabschnitt aus Stahl (Durchmesser 108 mm, Wandstärke 4 mm). Bei der Gegenüberstellung der vom Ultraschall-Durchflussmessgerät generierten Werte mit denen des Prüfstands wurde in drei Versuchsläufen eine Abweichung von 16 – 18 Prozent ermittelt (vgl. Abbildung 10.3). Mit

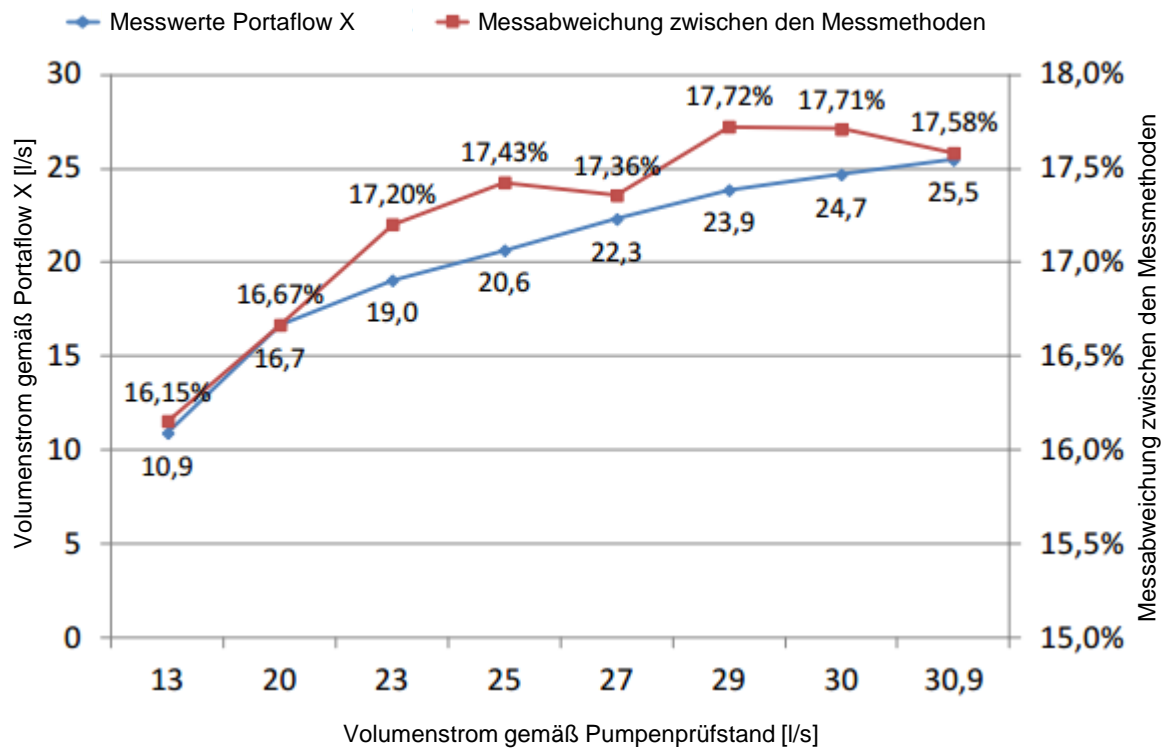


Abbildung 10.3: Messabweichung bei Anwendung des Druckdifferenz- und Ultraschall-Laufzeitdifferenzverfahrens zur Messung des KSS-Volumenstroms (Messstelle aus Stahl) [BUFF12]

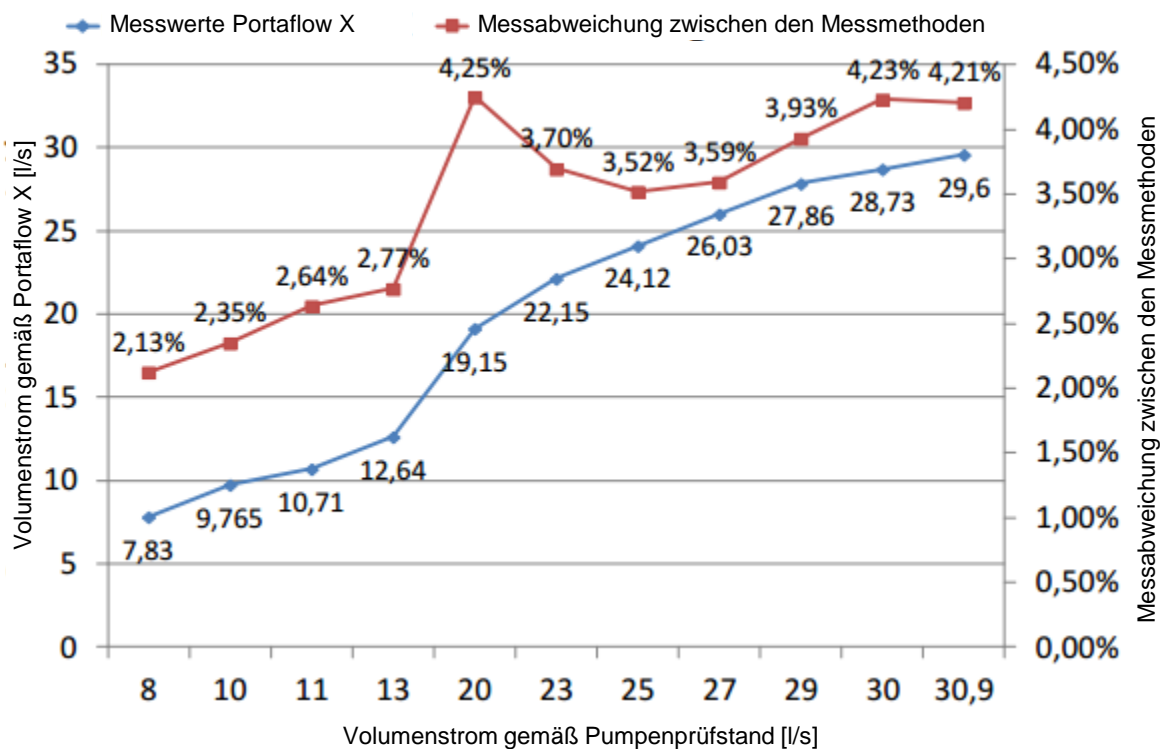


Abbildung 10.4: Messabweichung bei Anwendung des Druckdifferenz- und Ultraschall-Laufzeitdifferenzverfahrens zur Messung des KSS-Volumenstroms (Messstelle aus Plexiglas) [BUFF12]

Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation wurden die in Tabelle 10.7 aufgeführten studentischen Arbeiten im Auftrag der BMW Group verfasst. Sie entstanden unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung des Autors in Kooperation mit verschiedenen Hochschulinstituten und werden, sofern relevant, ausdrücklich zitiert. Darüber hinaus unterstützten zahlreiche Studenten bei Untersuchungen in den Werken der BMW Group und am PTW im Rahmen von Praktika und studentischen Hilfstätigkeiten. Der Autor dankt allen Beteiligten für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Tabelle 10.7: Verzeichnis betreuter Studienarbeiten

Student(in)	Jahr	Titel	Beteiligte Institutionen	Art der Arbeit
BUFF, Guilherme	2012	Ressourceneffizienter Einsatz wassergemischter Kühlschmierstoffe in hochflexiblen Produktionssystemen	BMW Group, Hochschule München	Diplomarbeit
EIMER, Daniel	2014	Konzeption eines wissensbasierten Systems zur Einflussanalyse von Minimalmengenschmierung auf Bohrprozesse in der Serienfertigung	BMW Group, PTW (TU Darmstadt)	Masterthesis
METZGER, Michael	2014	Der Planungsprozess Steuerungstechnik in der Motorenfertigung	BMW Group, PTW (TU Darmstadt)	Bachelorthesis
SUTHE, Marco	2012	Entwicklung von Energieeffizienzmaßnahmen in der mechanischen Fertigung anhand der Methode der Energiewertstromanalyse	BMW Group, Universität Paderborn	Diplomarbeit
VÀRADY, Maria	2013	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer MMS-Kühlstrategie in Bezug auf das BMW Group Referenzfertigungssystem für die spanende Fertigung von Aluminiumbauteilen	BMW Group, RWTH Aachen	Bachelorthesis
XIE, Shengkang	2012	Ressourceneffizienter Einsatz von Druckluft in der Motorenproduktion	BMW Group, RWTH Aachen	Diplomarbeit