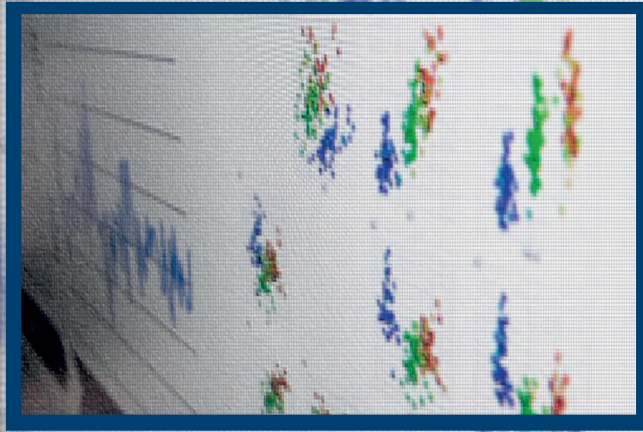




FAU Studien aus dem Maschinenbau 359

Christian Sand

Prozessübergreifende Analyse
komplexer Montageprozessketten
mittels Data Mining

Christian Sand

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten
mittels Data Mining

FAU Studien aus dem Maschinenbau

Band 359

Herausgeber der Reihe:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Christian Sand

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und
Produktionssystematik (FAPS)

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen

FAU University Press

2021

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bitte zitieren als

Sand, Christian. 2021. *Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining*. FAU Studien aus dem Maschinenbau 359. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-399-1.

Das Werk, einschließlich seiner Teile, ist urheberrechtlich geschützt.
Die Rechte an allen Inhalten liegen bei ihren jeweiligen Autoren.
Sie sind nutzbar unter der Creative-Commons-Lizenz BY-NC.

Der vollständige Inhalt des Buchs ist als PDF über den OPUS-Server der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg abrufbar:
<https://opus4.kobv.de/opus4-fau/home>

Verlag und Auslieferung:

FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-398-4 (Druckausgabe)
eISBN: 978-3-96147-399-1 (Online-Ausgabe)
ISSN: 2625-9974
DOI: 10.25593/978-3-96147-399-1

**Prozessübergreifende Analyse komplexer
Montageprozessketten mittels Data Mining**

Der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

zur
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Christian Sand, M.Sc.

aus Fürth

Als Dissertation genehmigt
von der Technischen Fakultät
der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der mündlichen Prüfung: 13. Oktober 2020

Vorsitzender des
Promotionsorgans: Prof. Dr.-Ing. habil. Andreas Paul Fröba

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke
Prof. Dr. habil. Michael Amberg

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS) an der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.

Mein besonderer Dank gilt dem Lehrstuhlinhaber Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke, der mir die Promotion ermöglichte. Das stets entgegengebrachte Vertrauen, die wissenschaftlichen Freiräume und gerade der Rückhalt auch bei neuen Themengebieten haben zum Gelingen dieser Arbeit maßgeblich beigetragen.

Herrn Prof. Dr. habil. Michael Amberg, Leiter des Lehrstuhls für IT-Management, danke ich für die Übernahme des Koreferats bzw. der Mitgliedschaft im Prüfungskollegium. Des Weiteren geht mein Dank an Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartack, dem Leiter des Lehrstuhls für Konstruktionstechnik KTmfk, für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Weiterhin bedanke ich mich bei sämtlichen an der Forschungsarbeit beteiligten Industrieunternehmen für die Gewährung von Einblicken in ihre industriellen Prozesse und sogar deren Problemstellungen. Die Ableitung des Handlungsbedarfs und die Lösungsvalidierung konnten hierdurch anhand industrieller Fallbeispiele erfolgen.

Allen Kolleginnen und Kollegen am Lehrstuhl und den Partnerunternehmen danke ich für die angenehme, konstruktive Arbeitsatmosphäre sowie vielfältige Aktivitäten auch außerhalb der Arbeitszeit. Speziell Dipl.-Ing. Robert Süß-Wolf, M.Eng. Matthäus Brela, M.Sc. Jonas Daberkow, M.Sc. M.Sc. Moritz Meiners, M.Sc. Tim Raffin, M.Sc. Patricia Schuh und M.Sc. Tobias Lechler hatten immer ein offenes Ohr und kreative Gespräche, die eine wesentliche Anregung zum Gelingen dieser Arbeit waren. So haben auch die Vielzahl hochmotivierter und engagierter studentischer Mitarbeiter und Studierender mich während meiner Tätigkeiten am Lehrstuhl unterstützt.

Ein besonderer Dank gilt meiner Familie, Eltern und Freunden, die mich stets unterstützt und gefördert haben sowie meiner Frau Nathalie für die Kreativität und den Rückhalt während der Anfertigung dieser Arbeit.

Nürnberg, im Januar 2021

Christian Sand

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iii
Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis	ix
Bildverzeichnis	xi
Tabellenverzeichnis	xv
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Hintergrund	1
1.2 Zielsetzung.....	4
1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit	6
2 Konventionelle Prozessanalysemethoden sind kaum für komplexe Montageprozessketten (MPK) geeignet	9
2.1 Montagevorgänge und –systeme sind komplex und unterliegen meist unbekannten Störungen	9
2.1.1 Aufgrund der Komplexität der Montage existieren keine standardisierten Prozessmodelle.....	10
2.1.2 Zusätzlich erschweren Interdependenzen zwischen den einzelnen Prozessschritten die Prozessmodellierung	12
2.1.3 Fehleranalysemethoden nutzen primär implizites Expertenwissen.....	15
2.1.4 Unbekannte Störeinflüsse erschweren die Ursachenanalyse in MPK	17
2.1.5 Prozessüberwachung für Einpressen ist in wissenschaftlichen Arbeiten kaum durchdrungen.....	19
2.1.6 Aufgrund der signifikanten Störeinflüsse ist Fügen durch Schrauben besonders interessant.....	22
2.2 Montageprozessketten nutzen viele Datenarten und –quellen als Näherung der Realität.....	23
2.2.1 Maschinen- und Prozessdaten stellen die Grundlage für Ursachenanalysen in MPK	24
2.2.2 Kennwerte und Prozesskurven liefern Informationen auf Prozessebene	25
2.2.3 Qualitätsdaten spiegeln den Funktionserfüllungsgrad und definierte Merkmale	26
2.2.4 Energetische Datenquellen sind in Montageprozessen ungenutzt.....	27
2.2.5 Logistikdaten geben Aufschluss über Zuführteile	27

2.3	Prozessüberwachung in Montageprozessen dient zur Sicherstellung der fehlerfreien Durchführung.....	28
2.3.1	Prozessüberwachung mittels Toleranzgrenzen, Fenster Technik und Hüllkurven liefert nur Teilinformationen.....	28
2.3.2	Prozessstabilität wird anhand der Maschinen- und Prozessfähigkeit sichergestellt	30
2.3.3	Six Sigma und Statistische Prozesskontrolle beachten keine prozessübergreifenden Wechselwirkungen.....	31
2.3.4	Prozessmodellierung von Montageprozessen ist bei hoher Parameteranzahl aufwendig.....	33
2.3.5	Diskussion der konventionellen Prozessüberwachung	34
2.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	35
3	Voruntersuchungen zum Prozessverhalten von komplexen Montageprozessketten	37
3.1	Die untersuchten MPK montieren Aktoren für die Automobilindustrie	37
3.2	In Montageprozessen existiert eine Vielzahl Fehlereinflüsse nach 5M	39
3.3	Das Prozessverhalten in MPK unterliegt Störungen, Wechselwirkungen und Signalfortpflanzung	40
3.4	Zeitreihenbetrachtungen in MPK sind nicht zwingend signifikant in der Ursachenanalyse	46
3.5	Prozesskurven und Kennwerte reagieren auf Material, Werkzeug und Handhabung.....	47
3.6	Einflüsse durch Material zeigen sich nur indirekt bei fehlender Datendurchgängigkeit.....	48
3.7	Änderungen an Werkzeug und Messmittel wirken sich unmittelbar auf den Funktionserfüllungsgrad aus.....	49
3.8	Eingebrachte Störungen sind nur schwer differenzierbar	51
3.9	Fertigungswege in MPK entstehen durch parallelisierte Prozessschritte	52
3.10	Erkennbarkeit von Einfluss- und Störgrößen ist bei Kennwertbetrachtung kaum gegeben	53
3.11	Zusammenfassung und Handlungsbedarf.....	54
4	Data Mining zur Prozess- und Qualitätsanalyse in Montageprozessen und MPK	57
4.1	Data Mining-Fragestellungen und Methoden	58
4.1.1	Visualisierungsmethoden Heatmap und PCP	60

4.1.2	Klassifikationsverfahren Entscheidungsbaum und künstliches Neuronales Netzwerk.....	61
4.1.3	Convolutional Neural Network (CNN)	63
4.1.4	Novelty Detection	65
4.2	Data Mining Anwendungsfelder.....	66
4.2.1	Data Mining in der Produktion	67
4.2.2	Data Mining in Montageprozessen	68
4.2.3	Data Mining in Fertigungsprozessketten	70
4.2.4	Novelty Mining.....	71
4.3	Bewertung und Handlungsbedarf	72
4.4	Ableitung des Forschungsbedarfs.....	74
5	Wissensentdeckung in Montageprozessen mittels der Data Mining-Analysen E ASY-Heat, E ASY-Class und E ASY-Pat	75
5.1	Datengetriebene Aufzeigung von Fehler- und Störeinflüssen in Montageprozessen	76
5.2	Entwicklung einer Analysestrategie für Montageprozesskurven	78
5.2.1	Der gesamte Kurvenverlauf von Montageprozessen kann im Zeit- und Frequenzbereich auf Störungen hindeuten.....	78
5.2.2	E ASY-Heat zur erweiterten Analyse von Montageprozess- und Qualitätskurven.....	79
5.3	E ASY-Class und E ASY-Pat zur maschinell-unterstützten Wissensentdeckung in Montageprozessen	83
5.3.1	Die Modellgenerierung anhand von Montageprozesskurven ist komplex	83
5.3.2	E ASY-Class - Wissensentdeckung in Prozesskurven in der Montage	84
5.3.3	E ASY-Pat zur musterbasierten Aufdeckung von Störeinflüssen in Prozesskurven.....	87
5.4	Zusammenfassung und Bewertung	95
6	E ASY-MPK zur prozessschritt-übergreifenden Analyse verketteter Montageprozesse	97
6.1	Vergleichende Bewertung von Data Mining-Werkzeugen für eine prozessschritt-übergreifende Analyse.....	97
6.2	E ASY-Event und E ASY-Inter zur Identifizierung von Wechselwirkungen und Änderungen	99
6.2.1	E ASY-Inter zur Aufdeckung von Wechselwirkungen.....	99
6.2.2	E ASY-Event - Eventbasierte, prozessübergreifende Prozessüberwachung	103

6.3	E ASY-Curves als prozessschritt-übergreifende 3D-Visualisierung für Montageprozesse	109
6.3.1	Bewertung der Visualisierungsmöglichkeiten von Prozesskurven in der Montage.....	109
6.3.2	E ASY-Curves als 3D-Prozessvisualisierung zur Ursachenlokalisierung in Montageprozessketten	110
6.4	Zusammenfassung und Bewertung.....	113
7	Prototypische Umsetzung sowie Validierung der E ASY-MPK Methoden und Algorithmen	115
7.1	Versuchsumgebung und Aufbau	115
7.2	Abweichungsanalyse und Wissensentdeckung in einzeln betrachteten Montageprozessen	118
7.2.1	Abweichungserkennung durch Visualisierung von Montageprozesskurven mittels E ASY-Heat	118
7.2.2	Validierung der Methode E ASY-Class zur maschinell-unterstützten Wissensentdeckung in Montageprozessen	121
7.2.3	Vergleichende Bewertung der musterbasierten Wissensentdeckung mittels E ASY-Pat	126
7.3	Evaluierung der prozessübergreifenden Analyse komplexer Montageprozessketten	129
7.3.1	Validierung von E ASY-Inter zur Aufdeckung von Wechselwirkungen	129
7.3.2	Validierung der Methodik E ASY-Event zur Erkennung schadhafter Prozessveränderungen.....	130
7.3.3	Validierung der prozessschritt-übergreifenden 3D-Visualisierung E ASY-Curves.....	133
7.4	Zusammenfassung und Bewertung.....	134
8	Zusammenfassung und Ausblick	137
9	Summary.....	141
	Literaturverzeichnis	145

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Einheit	Bedeutung
(M)ANOVA	-	(Multivariate) Analysis of Variance
μ	-	Reibkoeffizient
A	mm ²	Fläche
BP	-	Backpropagation
C	-	Convolutional Layer, Faltungsebene
CNN	-	Convolutional Neural Network
D _F	mm	Durchmesser der Fügefläche
DoE	-	Design of Experiments, Statistische Versuchsplanung
DWT	-	Discrete Wavelet Transform
EB	-	Entscheidungsbaum
EDA	-	Explorative Datenanalyse
EM	-	Expectation Maximum
F _{AX}	N	Axialkraft
EZ	-	Erzeugnis
FC	-	Fully Connected Layer
FEM	-	Finite-Elemente Methode
FFT	-	Fast-Fourier-Transform
F _N	N	Normalkraft
F _R	N	Reibungskraft
GBP	-	Guided-Backpropagation
Grad-CAM	-	gradient-weighted class activation mapping
I _F	mm	Breite der Fügefläche
iO	-	In Ordnung, Gutteil, erfolgreicher Prozessdurchlauf
K _{x,y}	-	Kennwert x.y
M _G	Nm	Gewindedrehmoment
M _K	Nm	Kopfdrehmoment
MLP	-	Multilayer Perceptron
MPK	-	Komplexe Montageprozesskette
M _{Nen}	Nm	Nenndrehmoment
M _{St}	Nm	Steigungsdrehmoment
MW	-	Mittelwert
nIO	-	Nicht in Ordnung, Schlechtteil

NN	-	Künstliches Neuronales Netzwerk
OSG		Obere Spezifikationsgrenze
P	-	Pooling Layer
p	N/mm ²	Fugendruck
PCA	-	Principal Component Analysis, Hauptkomponentenanalyse
PCP	-	Parallel Coordinate Plot
PK _x		Prozesskurve x
Ppm	-	Parts per million, (Defekt-) Teile pro Million Einheiten
QK _x		Qualitätskurve x
SMS	-	Single Machine System, Einzelanlage
SOM	-	Self-Organizing Map
SPC	-	Statistical Process Control, Statistische Prozessüberwachung
SPS	-	Speicherprogrammierbare Steuerung
SR	-	Rutschsicherheit
StdAbw		Standardabweichung
STFT	-	Short-Time-Fourier-Transform
USG		Untere Spezifikationsgrenze

Bildverzeichnis

Bild 1: Funktionen und Unterteilung der Montage nach VDI 2860 [41] und Miese [42].....	11
Bild 2: Formen der Verkettungsfolge [8]	13
Bild 3: Komplexität und Varianz in der datengetriebenen Analyse von Montageketten [P4].....	18
Bild 4: Zusammenfassung aktueller Stand und Ziele.....	19
Bild 5: Fügen durch Einpressen.....	20
Bild 6: Fügen durch Schrauben mit selbstschneidendem Gewinde.....	23
Bild 7: Arten von Betriebsdaten [102]	24
Bild 8: Prozessüberwachung mittels Fenstertechnik (links) und Hüllkurve (rechts) [120].....	29
Bild 9: Prozessüberwachung mit (links) Toleranzfenstern, (Mitte) Prozessstreuung und Defektkurve, (rechts) nicht- funktionierendem Erzeugnis.....	30
Bild 10: Zeitreihe und Histogramm.....	31
Bild 11: Prozessperformance normal (links), optimiert (Mitte) und nach erfolgter Streuungsreduzierung (rechts)	32
Bild 12: Prozessmodelle in der Fertigungstechnik [125]	33
Bild 13: Montageprozesskette AKTOR ₁	38
Bild 14: Montageprozesskette AKTOR ₂	38
Bild 15: Nicht-erschöpfendes Ishikawa-Diagramm für Montageprozesse am Beispiel Fügen durch Einpressen	39
Bild 16: Signalfortpflanzung innerhalb der Montageprozesskette AKTOR ₁ mit hervorgehobenen Änderungen.....	42
Bild 17: Regressionsanalyse bei schadhaftem Prozesszustand	43
Bild 18: Bekannte und direkte (oben) sowie interne und übergreifende Ursache-Wirkungsbeziehungen in MPK	44
Bild 19: BoxPlot-Darstellung von Einpressversuchen unter Störeinfluss.....	45
Bild 20: Zeitreihenanalyse eines Kennwerts	47

Bild 21: Prozesskurven mit lockerem Werkzeugsegment (links), Zuführteilen mit abweichender Geometrie (Mitte) und Orientierungsfehler (rechts)	48
Bild 22: Einfluss und indirekte Ermittlung der Materialcharge.....	49
Bild 23: Geändertes Prozessverhalten durch Störung an Werkzeug (links) und Messmittel (rechts).....	50
Bild 24: Streuung guter und gestörter Schraubversuche (links) sowie der durchgeführten Einpressversuche (rechts)	51
Bild 25: Verhalten von parallelisierten Einzelprozessschritten	52
Bild 26: Fertigungspfade in MPK aufgrund parallelisierter Prozessschritte	53
Bild 27: Data Mining nutzt Techniken aus unterschiedlichen Bereichen zur Wissensentdeckung [133][148][134]	57
Bild 28: Problem- und Fragestellungen sowie Problemklassen im Bereich Data Mining [29][133]	59
Bild 29: Heatmap zur kolorierten Darstellung von Daten in Tabellenform.....	61
Bild 30: Paralleler Koordinatenplot von zwei Einträgen über fünf Achsen	61
Bild 31: Entscheidungsbaum und KNN	62
Bild 32: Aufbau des AlexNet zur Objektklassifikation in Bildern [148]	64
Bild 33: Guided Grad-CAM zur Hervorhebung entscheidender Bereiche für die Klassifikationsentscheidung [151]	65
Bild 34: Umfrageergebnis zur Anwendung von Data Mining- Methoden [84]	66
Bild 35: Abweichungsanalyse anhand der Streuung je Stützstelle über viele Prozesskurven	81
Bild 36: Änderungsdetektion anhand der direkten Montageprozessdaten über viele Erzeugnisse	81
Bild 37: Spektrogramm zur Änderungsanalyse in Einzelprozessen mit Rückkopplung der Qualitätsprüfung	82
Bild 38: Vorgehensweisen und Unterschiede der Verfahren	86

Bild 39: Darstellung der Aktivierungsgradienten entlang der Prozessphasen am Beispiel Fügen durch Einpressen	89
Bild 40: Vorgehensweise der geführten Grad-CAM am Beispiel Fügen durch Einpressen mit abweichendem Material.....	90
Bild 41: Merkmalsextraktion in außenliegenden Bereichen	91
Bild 42: Abweichungsanalyse anhand modell-kritischer Merkmale	92
Bild 43: Hochauflösende, lokalisierte Musterhervorhebung für Prozesskurven	93
Bild 44: Plausibilitätsprüfung der prognostizierten Klassen mit Hervorhebung wichtiger Bereiche für die Klassifikationsentscheidung.....	94
Bild 45: Gruppen- und erzeugnisorientierte Abweichungsanalyse anhand funktionierender und nicht-funktionierender Erzeugnisse auf dem Weg durch die Montageprozesskette .	102
Bild 46: Idealisierter Verfügbarkeitsgewinn durch kürzere Zeitbereiche mit erhöhtem Ausschuss durch schnelle Reaktion	104
Bild 47: Ablauf der eventbasierten Änderungsdetektion und -korrelation	105
Bild 48: Dashboard der eventbasierten Überwachung für komplexe Montageprozessketten	107
Bild 49: Verdichtete Darstellung zur Anzeige einer großen Parameteranzahl einer komplexen Montageprozesskette über mehrere Zeitbereiche hinweg.....	109
Bild 50: 2D-Draufsicht auf die betrachtete MPK mit abweichenden Zuführchargen an Prozessschritt 2 und 6.....	110
Bild 51: Visualisierung von BDE/MDE Datensätzen zur Erkennung manueller Änderungen an der Station	111
Bild 52: Versuchsaufbau Fügen durch Einpressen	116
Bild 53: Gewählte Faktoren für die Versuchsdurchführung mit meist geringer Auswirkung auf die Maximalkraft beim Fügen durch Einpressen	118

Bild 54: Vergleich der Darstellungsarten Heatmap und 3D- Visualisierung für einzelne Prozessschritte sowie Frequenzkomponenten	119
Bild 55: Spektrale Energieverteilung mehrerer Prozessabläufe mit Rückkopplung der Funktionsprüfung.....	120
Bild 56: Prozessstreuung der Durchläufe unter Störeinfluss	122
Bild 57: Vergleich der maschinell-unterstützten Wissensentdeckung	127
Bild 58: PCP aufgeteilt nach Fehlerarten und funktionsfähigen Erzeugnissen	130
Bild 59: Sprungdetektion für vier Events in der Funktionsprüfung	132
Bild 60: Draufsicht der Einpress- und Qualitätskurven entlang einer komplexen Montageprozesskette	133
Bild 61: Gekippte Darstellung mit Kolorierung der Fehlerart.....	134

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Modus von Fügen durch Einpressen	21
Tabelle 2: Strukturierte Datenarten und -typen in MPK	25
Tabelle 3: Bewertung von Methoden zur Prozessüberwachung basierend auf eigenen Untersuchungen.....	35
Tabelle 4: Untersuchte Änderungen im Prozessverhalten von einzelnen Prozessschritten und MPK.....	41
Tabelle 5: Bewertung der datengetriebenen Erkennbarkeit unterschiedlicher Einfluss- und Störgrößen anhand eigener Untersuchungen.....	54
Tabelle 6: Vergleich der Ansätze zur Klassifikation von Prozesskurven.....	87
Tabelle 7: Vergleichende Bewertung von Data Mining-Werkzeugen für Fragestellungen anhand eigener Untersuchungen [S1- 48][P1]	98
Tabelle 8: Regelwerk zur Einfärbung einzelner Stationen innerhalb einer überwachten Montageprozesskette	108
Tabelle 9: Klassifikationsgüte Schraubprozess mit und ohne Störeinfluss	123
Tabelle 10: Klassifikation von Störeinflüssen basierend auf unterschiedlichen Datenrepräsentationen mittels EB.....	124
Tabelle 11: Klassifikationsgüte CNN zur Erkennung von Störeinflüssen	125
Tabelle 12: Qualitativer Vergleich der E ASY-Pat Methoden mit EB und NN	128

1 Einleitung

Übergeordnetes Thema dieser Dissertationsschrift ist die prozessschrittübergreifende, datengetriebene Analyse komplexer Montageprozessketten (E|ASY-MPK). Den ersten Forschungsgegenstand bilden die Methoden E|ASY-Heat und E|ASY-Class zur Analyse einzeln betrachteter Prozessschritte mit dem Ziel der Fehlererkennung in Montageprozessen. Die weiteren Methoden E|ASY-Pat, E|ASY-Inter, E|ASY-Event und E|ASY-Curves stellen den zweiten Schwerpunkt der Arbeit zur prozessschrittübergreifenden Betrachtung komplexer Montageprozessketten dar.

1.1 Motivation und Hintergrund

Montagesysteme sind integraler Bestandteil des verarbeitenden Gewerbes, vor allem im deutschen Fahrzeug- und Maschinenbau. Dieser Bereich erwirtschaftet mit über zwei Millionen Beschäftigten in Deutschland rund 190 Milliarden Euro Bruttowertschöpfung [1]. Auch die Umsatzentwicklung von 5,8 Mrd. Euro in 2013 auf 7,6 Mrd. Euro in 2017 der Anlagenbauer im VDMA-Bereich Integrated Assembly Solutions zeigt die hohe Kompetenz im Bereich Montage- und Handhabungstechnik [2]. Effektiv realisiert das Fügen der Einzelteile die angestrebte Gesamtfunktion des Produkts, weshalb die Montage im Rahmen der Produktionstechnik eine entscheidende Rolle spielt. [3] Montage- und Prüfsysteme sind zweckorientiert gebaute, produktgebundene Spezialsysteme mit hohem Automatisierungsgrad. [4] Aufgrund individueller Kundenwünsche und zunehmender Funktionsintegration steigen die Anforderungen an Erzeugnisse (EZ) und deren Montage, wodurch komplexe Montageprozessketten (MPK) entstehen. In solchen Systemen kommt es zu Herausforderungen in der Qualitätssicherung durch Verkettung und Unübersichtlichkeit der Montageprozesse. Zusätzlich unterliegen sie einer gesteigerten Sensibilität gegenüber Störungen [10] sowie hohen Anforderungen durch das Ziel einer Null-Fehler-Produktion. Daher existieren Ereignisse in MPK, die zu Ausschuss führen, obwohl jeder Einzelprozess und deren Kennwerte hervorragend innerhalb der Toleranz- und Warngrenzen liegen. Im Fokus dieser Arbeit stehen komplexe Montageprozessketten in der Großserienfertigung, die in jedem einzelnen Prozessschritt gegebenenfalls mit mehreren Parametern in engen Prozessfenstern definiert sind und dort sehr robust liegen. Dennoch treten Serienfehler auf, die nur sehr schwer zu entdecken sind.

Einerseits liegen alle Parameter entlang der MPK innerhalb der Grenzen und weisen einen guten bis sehr guten Cp-Wert auf. Andererseits fehlt eine definierte Vorgehensweise zur Ursachenidentifizierung.

Im Kontext zunehmender Montagekomplexität, Prozessvielfalt und Funktionsintegration sowie der Integration von Maschinen verschiedener Hersteller in unterschiedliche Produktionssystematiken ist eine einheitliche, effiziente und durchgängige Analyse komplexer Montageprozessketten von hoher Relevanz. Während Prozesstoleranzen meist für einzelne Prozessphasen [14] festgelegt werden, sind Toleranzketten für automatisierte Produktionssysteme [14][15] oder gar eine Prozessanalyse entlang einer MPK selten. Einerseits ist der Vorgang der Tolerierung komplex [16], andererseits beeinflussen sich Toleranzen gegenseitig [17]. Gerade in Bezug auf die geforderte Erzeugnisqualität und niedrige, angestrebte Fehlerkosten ist ein optimales Verständnis komplexer Montageprozessketten von Bedeutung, da nicht verstandene Wirk- und Fehlerzusammenhänge mit hohen Kosten für Qualität, Material und Energie einhergehen. Konventionelle, deterministische Lösungsansätze, wie Simulation und analytisch-physikalische Methoden arbeiten mit vereinfachten Modellen [14], welche optimale Prozessbedingungen oder praktisch nur schwer erfassbare Randbedingungen und Wechselwirkungen [18] voraus setzen [14][19]. Zusätzlich erfordern diese Vorgehensweisen entsprechend hohen Mehraufwand je Ausprägungsvariation der zu berücksichtigenden Störeinflussgrößen [14], weshalb meist nur Extremfälle neben dem Idealfall Einzug in die Berechnung finden. Gleichzeitig ist auch die Simulation gesamter Fertigungsketten noch nicht üblich und entsprechend schwer zu realisieren. [20] Aus diesen Gründen gewinnen daten- und modellgetriebene multivariate Prozessanalysen zunehmend an Bedeutung, auch wenn sie einen vergleichsweise hohen Versuchsaufwand für die empirische Modellbildung [19] benötigen. Anhand von im Feld gewonnenen Daten und einer optimalen Auswahl von Analysewerkzeugen wird dieser Aufwand stark reduziert. Hierdurch wird ein erweitertes Prozessverständnis aufgebaut und schadhafte Zustände im laufenden Produktionsbetrieb abgestellt.

Kritisch sind jedoch Fälle, in denen einerseits Prozesskurven zwar Toleranzgrenzen einhalten oder Prozessfenster definiert eintreten und verlassen. Andererseits aber Abweichungen von der optimalen, im Vorfeld definierten Idealkurve zu Defekten am Bauteil oder der Funktion führen. In jedem Prozess auftretende und unvermeidbare minimale Prozessschwankungen [21] können bereits zu einem kompletten Ausfall des Bauteils führen. [19] So werden bereits in der Entwicklung und Prozess-

auslegung bestimmte Annahmen getroffen, in Simulationen übernommen und in die Toleranzfestlegung des Prozesses eingepflegt. Alternative, in der Montage aber auftretende Einflüsse durch Vorprozesse [19][22], Anlagenzustand [23], Werkzeugzustand, Parameteranpassungen, Änderungen an der Werkstück- oder Werkzeugaufnahme und Zuführteilen [24] werden kaum berücksichtigt. Die Methode Six Sigma [25] zielt auf die Reduzierung der Varianz und die Realisierung einer Null-Fehler-Produktion ab, indem robuste Prozesse mit einer dauerhaften Prozessüberwachung generiert und kontrolliert werden. Dieser Ansatz verwendet definierte, aussagekräftige Prozesskennwerte, welche meist mittels statistischer Versuchsplanung (engl.: Design of Experiments, DOE) systematisch ermittelt werden. [14][27] Jedoch findet hierbei immer eine starke und verlustbehaftete Komprimierung von Prozesskurven auf einzelne Kennwerte [25] statt, wodurch ungeplante und unerwartete Effekte meist ungesehen Auswirkungen auf den Prozess oder gar die Bauteilfunktionalität haben. Mit dem Ziel der einfachen Handhabbarkeit und den zum Entstehungszeitpunkt vorhandenen Einschränkungen einer geringen Rechenleistung sowie teils manueller Kennwernerfassung, entstanden so seit 1924 effektive Prozessregelkarten.

Heutzutage erzeugen jedoch einzelne Maschinen und komplette Produktionssysteme automatisiert riesige Datenmengen, die als wertvoller Rohstoff vorhanden sind und in einer zukünftigen, volldigitalisierten Fertigungsumgebung essentiell sind. Bereits jetzt werden solche Datensätze zwar erfasst, bleiben aber aufgrund zeitaufwendiger Auswertung oft ungenutzt. Neue Technologien in der Datenspeicherung und -verarbeitung ermöglichen alternative Lösungsansätze. Aufgrund der kostengünstig verfügbaren Rechenleistung heutiger IT-Systeme sind erweiterte Analysewerkzeuge und Datensätze mit vollem Informationsgehalt, anstelle ausgewählter Prozesskennwerte, zur Prozessanalyse einsetzbar. Es gilt jedoch zu beachten, dass die anfallende Datenflut mittels einer geeigneten Methodenauswahl in handhabbare, wissensgenerierende Pakete zu verarbeiten ist. Gleichzeitig fehlt eine methodische Vorgehensweise, um Fehler zu finden, bei denen alle Kennwerte innerhalb der Toleranz- und Hinweisgrenzen liegen. Daher ist deren Auftreten noch nicht methodisch unterstützt, wodurch lange Produktionsphasen mit reduzierter Qualität und Stückzahl auftreten.

Eine vielversprechende Möglichkeit zur effizienten und effektiven Ursachenanalyse ist die Anwendung multivariater Analysemethoden aus dem Bereich des Data Mining. [29] Diese ermöglichen eine dynamische Analyse der aktuell laufenden Montageprozesse und Erzeugnisse.

Geeignet aufgezeichnet, gespeichert, verarbeitet und berücksichtigt bei der Prozessanalyse, erlauben die expliziten Prozesskurven, Kennwerte und Qualitätsergebnisse auch Rückschlüsse über den Zustand komplexer Montageprozessketten und deren Erzeugnisse. Zur erweiterten Informationsgewinnung ohne zusätzliche Sensorik ist es möglich, prozessführende Akteure indirekt als Messmittel zu verwenden. [4] Dieser Ansatz ist auch als „Verlängerung der Messkette“ [4] bekannt und kann genutzt werden, um Einflüsse wie schadhafte Werkzeugzustände, suboptimale Zuführteile und weitere qualitätsbeeinflussende Merkmale zu identifizieren. Vorteilhaft ist die potenzielle Steigerung der Prognosegüte multivariater Methoden, sofern die verlängerte Messkette signifikant zur Bewertung der Prozesseigenschaften isoliert betrachteter Montageprozesse beiträgt.

Im Rahmen der aufkommenden Analyse von Prozessketten in der industriellen Produktion anstelle von einzelnen Prozessschritten existieren Hürden, aber auch großes Potenzial zur erweiterten Prozess- und Qualitätsanalyse. [30] Parallele und sequentielle Verarbeitungsstufen in teilweise gemischter Reihenfolge, welche unterschiedliche Datentypen und Skalen aufweisen, sind Kennzeichen solcher Systeme. Weiterhin erfolgen Fehlerfortpflanzungen nicht einfach additiv. [30] Speziell in komplexen Montageprozessketten haben Verkettungen von nicht signifikanten Wechselwirkungen einen erheblichen negativen Effekt auf den Funktionserfüllungsgrad der Erzeugnisse. Im Rahmen der Datenverarbeitung bieten moderne Steuerungen für Montageprozesse zwar Schnittstellen zum Datenexport [31][32], jedoch nicht für den Import von Qualitätsergebnissen externer Anlagen. Gleichzeitig weisen sie eine geringe anlagenspezifische Rechenkapazität und Arbeitsspeicher auf, weshalb sie taktzeitbedingt für erweiterte Berechnungen im multidimensionalen Raum nicht geeignet sind. Daher ist die Auslagerung von rechen- und speicherintensiven Analysemethoden auf externe, universelle Recheneinheiten zielführend. Gleichzeitig liegt in dieser Arbeit die Entdeckung von Wissen über Veränderungen im Fokus, anstelle der ursprünglichen Prozessmodellierung trotz Veränderungen [33].

1.2 Zielsetzung

Zielsetzung dieser Arbeit ist die Erforschung von Methoden und Vorgehensweisen zur flexiblen Ursachenanalyse von Qualitätsmängeln mit Ursprung in den herstellenden Montagesystemen. Der Fokus liegt hierbei auf der prozessschritt-übergreifenden, datengetriebenen Auswer-

tung komplexer Montageprozessketten. Speziell die Betrachtung der Signalausbreitung in MPK sowie die Nutzung des vollen Informationsgehalts von Prozesskurven zur Wissensentdeckung führen zu einem besseren Verständnis von Prozessketten in der Montage. Anhand von Montageprozessen, die für den Zusammenbau von Erzeugnissen aus dem Elektromaschinenbau für Automobilkomponenten essentiell sind, werden die Ergebnisse dieser Arbeit validiert.

Ein zentrales Ziel ist die Erforschung der Methodensammlung E|ASY-MPK für die Prozessanalyse in komplexen Montageprozessketten, welche weite Teile einer MPK überblickt und einzelne Prozessschritte mit hohem Detailgrad über eine große Anzahl Erzeugnisse auswertet. Hierbei wird deren Systemarchitektur erforscht, entwickelt und umgesetzt. Zur Steigerung der Universalität für unterschiedliche Montageprozesse und die einfache Adaptierbarkeit an komplexe Montageprozessketten, ist eine flexible Datenverarbeitung durch skalierbare Achsen und parametrisierbare Auswertungen zu ermöglichen.

Den ersten Forschungsgegenstand bilden drei rein datengetriebene Methodiken zur erweiterten Analyse einzeln betrachteter Prozessschritte, mit dem Ziel der Fehlererkennung in Montageprozessen anhand von Montageprozesskurven. Im Rahmen von E|ASY-Class und E|ASY-PAT ist die Generierung von Wissen aus vorliegenden Prozesskurven adressiert und die erweiterte Prozessvisualisierung E|ASY-Heat erlaubt dem Maschinenbediener eine laufende Änderungsanalyse des Prozessverhaltens durchzuführen, um auftretende Abweichungen und Fehler schneller zu entdecken und zu beheben. Im Hinblick auf das Forschungsziel der effizienten Ursachenanalyse ist daher, zusätzlich zum adressierten analytischen Ansatz, eine Visualisierung zur Aufdeckung von Änderungen im Prozessverhalten notwendig, welche eine differenzierte Diagnostik von defekten Erzeugnissen erst ermöglicht. Entscheidend ist die gleichzeitige Betrachtung von Prozesskurven mit hohem Informationsgehalt über eine sehr große Teileanzahl hinweg, um kritische Veränderungen aufzuzeigen. Die Basis hierfür bildet eine Bewertung unterschiedlicher Zielobjekte und Datenquellen sowie der erstmalige Einsatz von Frequenzanalysen bei Einpressvorgängen für eine frequenzbasierte Bewertung, neben klassischen Daten- bzw. Zeitreihenanalysen von Kennwerten. Zusätzlich sind Methoden der automatisierten Fehlererkennung im Fokus dieser Ausarbeitung, welche sogar die Nachvollziehbarkeit der Entscheidungen von Klassifikatoren und die Zuordnung auf die betroffene Prozessphase ermöglichen.

Eine Methodensammlung zur prozessschritt-übergreifenden Betrachtung komplexer Montageprozessketten stellt den zweiten Schwerpunkt der Arbeit dar. Das Ziel von E|ASY-MPK ist die Übertragung von multivariaten Analysemethoden auf das industrielle Umfeld, speziell auf komplexe Montageprozessketten. Für die rein datengetriebene Analyse von laufenden Prozessketten in der Montage visualisiert E|ASY-Inter komplexe Wechselwirkungen zwischen Montageprozessen und den geprüft defekten Erzeugnissen in der Funktionserfüllung, um deren Fehlerursachen oder zumindest auffällige Effekte zu identifizieren. Spontane Änderungen mit schadhafter Auswirkung auf die Funktionserfüllung des montierten Erzeugnisses erkennt E|ASY-Event anhand der Signalausbreitung entlang des komplexen Montagesystems. Für die Detailanalyse unterstützt E|ASY-Curves mittels 3D-Darstellung die visuelle Auswertung von Prozesskurven von der Montage bis zur abschließenden Funktionsprüfung, um auffällige Muster in den Montageprozesskurven zu entdecken. Entscheidend ist, dass zusätzlich zur konventionellen Zeitreihenanalyse die exakte Kenntnis vorliegt, welche Prozesskurven entlang der komplexen Montageprozesskette zu welchem physikalischen Erzeugnis gehören aufgrund der eindeutigen Seriennummer des Bauteils. Hierdurch werden erzeugnis- und gruppenbasierte Analysen über eine große bis sehr große Anzahl Erzeugnisse mit sehr hohem Detailgrad ermöglicht.

1.3 Vorgehensweise und Aufbau der Arbeit

Nach einer kurzen Einführung in die Grundlagen von Montagevorgängen und Vorstellung ausgewählter Prozesse, wird in Kapitel 2 die Komplexität von MPK dargestellt und anschließend in Kapitel 3 schwerpunktmäßig die Ergebnisse eigener Voruntersuchungen aufgeführt. Diese zeigen, dass einzelne Prozessschritte und komplexe Montageprozessketten dem ständigen Einfluss von Änderungen und Störungen unterliegen, während auftretende Ereignisse von konventionellen Prozessüberwachungen kaum detektierbar sind. Kapitel 4 stellt den Stand der Technik im Bereich Data Mining in Montageprozessen sowie relevante Anwendungen dar. Basierend hierauf wird der Forschungsbedarf abgeleitet.

Aufgrund der zunehmenden Relevanz niedriger Fehlerkosten in Produktion und Montage sind Data Mining-Ansätze im Fokus von Forschungsinstituten, Anlagenbauern und Anwendern. Bekannte Ansätze aus dem Stand der Technik und Forschung haben als Ziel die Beschreibung, Klassifikation und Vorhersage der Produkt- und Prozessqualität.

[29] Kapitel 5 zeigt die Entwicklung von Methoden, die große Datenmengen zur Wissensentdeckung nutzen, speziell in den Dimensionen Anzahl betrachteter Prozessdurchläufe und Stützpunkte je Prozesskurve. Ein wesentlicher Forschungsbereich ist die alternative Handhabung, Betrachtung und Analyse von Prozesskurven in der Montage. Hierbei wird einerseits die Steigerung der Fehlererkennungsrate aufgrund physikalisch bedingter Abweichungen in überwachten und speziell in bisher unüberwachten Bereichen fokussiert. Andererseits sind prozessschritt-übergreifende Auswirkungen auf das hierdurch verringerte Qualitätsergebnis, insbesondere bei ungeplanten und unerwarteten Störeinflüssen thematisiert. Als Lösungsansatz wird die während der Arbeit erforschte Methodensammlung E|ASY-MPK zur Fehlererkennung in komplexen Montageprozessketten anhand von Kennwerten und Prozesskurven in Montageprozessen und der Qualitätsprüfung thematisiert. Durch Anwendung von E|ASY-Heat werden konventionell im Zeitbereich nicht überwachbare Kurvenverhaltensweisen analysierbar, basierend auf einer großen Anzahl Erzeugnisse und hohem Detailgrad der Prozessdaten. Zusätzlich zu der bedienergeführten Methode ist mit E|ASY-Class eine automatisierte Fehlererkennung adressiert, inklusive Rückführung ausschlaggebender Signalfeatures in E|ASY-Pat. Speziell die Auswertung von Prozesskurven mit hohem Informationsgehalt und deren Überprüfung auf grobe und feine Abweichungen erlauben eine gezielte Änderungsanalyse.

Ein vielversprechender Ansatz zur Analyse und Bewertung von Montagevorgängen während der laufenden Produktion ist der Einsatz von Prozessüberwachungssystemen und Prozessregelkarten. Bekannte Systeme weisen jedoch Defizite im Hinblick auf multivariate Wechselwirkungen [34] zwischen Montageprozessen, qualitätsbeeinflussende Störeinflüsse und Universalität auf. Kapitel 6 befasst sich mit einer im Rahmen dieser Arbeit erforschten Methodensammlung E|ASY-MPK zur prozessschritt-übergreifenden Analyse verketteter Montageprozesse mit besonderem Schwerpunkt auf Visualisierung zur Ursachenidentifikation qualitätsbeeinflussender Ereignisse. Ausgehend von Vorgehensweisen und Systemen zur Identifizierung von ursächlichen Prozessen, werden die Methoden E|ASY-Curves zur prozessschritt-übergreifenden 3D-Visualisierung, E|ASY-Inter zur Analyse von Wechselwirkungen und E|ASY-Event zur Änderungsdetektion erläutert.

Die erforschten Methoden zur Fehlererkennung von einzelnen Montageprozessen sowie zur prozessschritt-übergreifenden Analyse komplexer Montageprozessketten werden exemplarisch umgesetzt. In Kapitel 7

werden die Untersuchungsergebnisse der experimentellen Evaluierung der Methoden dargestellt und diskutiert. Im Fokus stehen die Fehlererkennungsraten und Klassifikationsgüte der erforschten Systeme und Algorithmen sowie die Validierung der Anwendbarkeit in der Werkstatt [35].

Abschließend wird die Arbeit in Kapitel 8 zusammengefasst und ein Ausblick auf mögliche Folgearbeiten gegeben.

2 Konventionelle Prozessanalysemethoden sind kaum für komplexe Montageprozessketten (MPK) geeignet

Das Ziel von Prozessketten in der Montage ist die Realisierung einer Null-Fehler-Produktion durch Anwendung einer Vielzahl von Methoden. Ausgehend von einer Prozessüberwachung, die entsprechende Kennwerte für die statistische Prozesskontrolle (SPC) bereitstellt, sind beherrschte einzelne Prozessschritte zu generieren. In komplexen Montageprozessketten sind jedoch die Auswirkungen von Störungen und Wechselwirkungen ein größer werdendes Thema. Konventionelle Prozessanalysemethoden arbeiten kaum datengetrieben und bilden daher die Komplexität von MPK kaum ab. Aufgrund der Rechenleistung moderner IT-Systeme sind nun rechen- und speicherintensive Verfahren zur datengetriebenen Prozessanalyse aus den Bereichen Klassifikation und Visualisierung anwendbar, neben konventionellen Ansätzen mittels Toleranzbetrachtung. Zusätzlich nutzt diese Arbeit Prozess-, Qualitäts-, Maschinen- und Energiedaten als erweiterte Quellen für die datengetriebene Ursachenanalyse.

Nach einer kurzen Darstellung von Montagevorgängen und -systemen zeigt Abschnitt 2.1 die Herausforderungen bei der Analyse von komplexen Montageprozessketten. Speziell unbekannte Störeinflüsse und prozessschritt-übergreifende Wechselwirkungen sind mit implizitem Expertenwissen nur schwer erfassbar. Basierend auf den in Abschnitt 2.2 erläuterten Datentypen kann eine datengetriebene Prozessanalyse erfolgen. Neben reinen Prozessdaten spielen hierbei auch Qualitäts- und Maschinendaten als Kennlinie oder Prozesskurve eine wichtige Rolle. Zur Sicherstellung der fehlerfreien Prozessdurchführung zeigt Abschnitt 2.3 Ansätze zur Überwachung einzelner Prozessdurchläufe und zum Nachweis der Prozessstabilität über die Zeit hinweg. Abschließend wird das Kapitel in Abschnitt 2.4 zusammengefasst.

2.1 Montagevorgänge und -systeme sind komplex und unterliegen meist unbekannten Störungen

Aufgrund ihrer wirtschaftlichen Relevanz sind Montageprozesse und -systeme essentiell, weshalb ein fehlerfreier Betrieb sicherzustellen ist. Jedoch unterliegen komplexe Montageprozessketten dem ständigen

Einfluss von Störungen, die nicht nur ungeplant auftreten, sondern auch aufgrund unzähliger Fehlermodi in der Prozesskette meist neuartig und unbekannt für Experten sind. Als Fehler wird die Nichterfüllung einer Forderung gesehen [111]. Im Speziellen sind damit die effektive Prozessdurchführung von Montageaufgaben und der Funktionserfüllungsgrad von Erzeugnissen gemeint. In dieser Arbeit dienen die Fügeprozesse Einpressen und Anpressen mittels Schrauben zur Illustration verschiedener Problemursachen und der neu entwickelten Methodensammlung E|ASY-MPK.

2.1.1 Aufgrund der Komplexität der Montage existieren keine standardisierten Prozessmodelle

Die Montage als letzter Schritt der Fertigungskette hat starke Auswirkungen auf den Unternehmenserfolg, aufgrund der Erzeugung von funktionellen und qualitativen Eigenschaften im Endprodukt. [36] Sie hat als kostenbestimmender Produktionsprozess im Produktentstehungsprozess einen großen Anteil an den Produktionskosten mit 40 bis 70 % [37][8] und einen Montagezeitanteil von 15-70 % [8] an der Gesamtproduktionszeit. Sie ist jedoch als letzte Stufe im Produktentstehungsprozess den veränderten Rahmenbedingungen am Markt besonders stark unterworfen. [8][38] Explizit sind dies hohe Produktkomplexität und verdeckte Qualitätsmängel [39]. Im Gegensatz zu Fertigungsprozessen weisen Montageprozessketten mehr Einzelschritte auf [40], die komplexen Wechselwirkungen unterliegen. Diese bleiben jedoch unbeachtet, da jeder Montageprozess als autarker Prozessschritt entwickelt und optimiert wird sowie eine große Anzahl von Montagevarianten abdecken muss. Zusätzlich ist in komplexen Montageprozessketten alleine die Anzahl der Zuführteile in Form von Einzelteilen oder Baugruppen je nach Produkt hoch bis sehr hoch. Diesen Gesamtkomplex verdeutlicht Bild 1 durch den Montagefluss, dessen Teilbereiche nicht nur in Vormontage und Endmontage aufteilbar sind, sondern auch jeweils aus einer Vielzahl unterschiedlichster Montagefunktionen bestehen. Daher findet sich die Komplexität im Montagefluss und in der Varianz der Prozesse. Gleichzeitig treten die Verarbeitungsstufen als einzelnen parallelisierte Prozessschritte oder parallele Verkettungen auf.

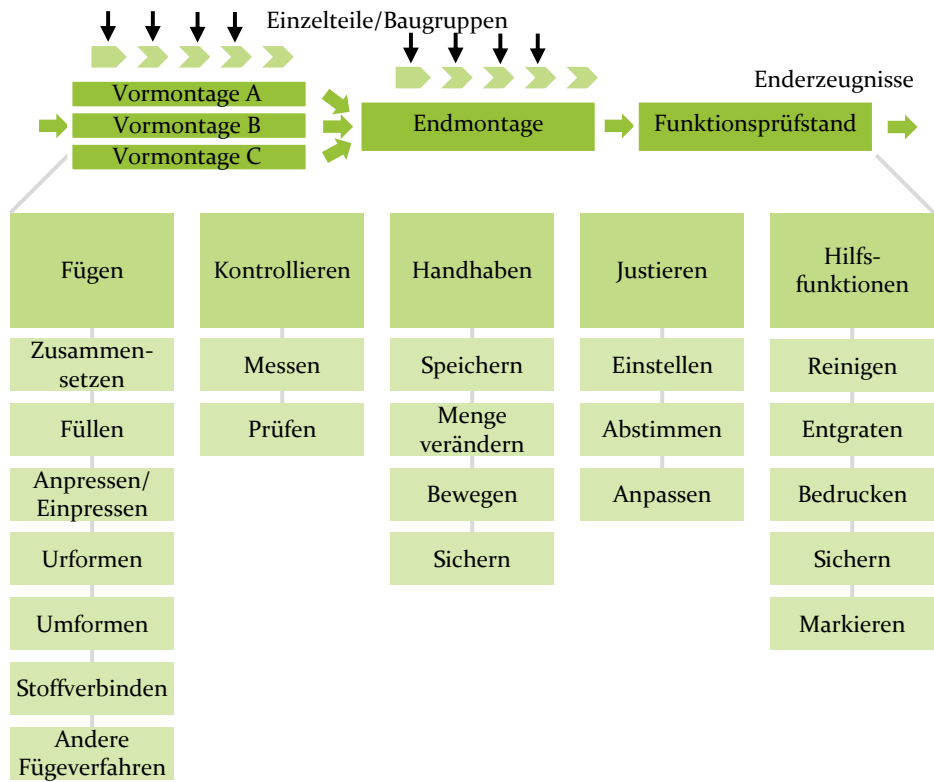


Bild 1: Funktionen und Unterteilung der Montage nach VDI 2860 [41] und Miese [42]

Ziel der Montage ist der Zusammenbau von Baugruppen oder Erzeugnissen aus Einzelteilen zu einem komplexen Produkt [43][44]. Im Rahmen dieser Arbeit wird sie als der effektive, meist mehrstufige Zusammenbau von „technischen Gebilden höherer Komplexität aus solchen mit niedrigerer Komplexität“ [42] mit vorgegebenen Funktionen [45], deren Erfüllungsgrad an Funktionsprüfständen im Rahmen der Qualitätsprüfung erprobt wird, verstanden. Bild 1 zeigt die Unterfunktionen der Montage, wobei Fügen nach DIN 8593 [46] eines der Hauptfertigungsverfahren nach DIN 8580 [47] darstellt. [8][41]

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den Montageverfahren Fügen durch Einpressen und Anpressen mittels Schrauben sowie Prüfen. Letzteres kann als Pre-, In- oder Post-Prozessprüfung auftreten, wobei festgestellt wird, inwieweit ein Prüfobjekt eine Forderung erfüllt. [49] Hervorzuheben ist, dass Fügeverbindungen beinahe ausschließlich zerstörend prüfbar sind. Daher bewerten Prozessüberwachungen die charakteristischen

Prozesskurven. Konventionell wird hierfür eine Idealkurve mit zunehmender erlaubter Streuung über den Prozessverlauf hinweg genutzt. [50] Daher verwenden Ansätze zur indirekten Analyse zwar die Messergebnisse in Prozessdaten, um Qualitätsprüfungen durchzuführen. [18] Jedoch existieren keine standardisierten Prozessmodelle für Montageprozesse. Aufgrund der Beeinflussung der Produktqualität entlang einer Prozesskette durch stets mehrere Prozesse [51] wird im folgenden Kapitel das Thema komplexe Montageprozessketten vorgestellt.

2.1.2 Zusätzlich erschweren Interdependenzen zwischen den einzelnen Prozessschritten die Prozessmodellierung

Prozessketten in der Montage werden im Rahmen der Planung, Entwicklung und Inbetriebnahme in erster Linie wie einzelne Prozessschritte gegebenenfalls mit Transferband betrachtet. Komplexe Montageprozessketten weisen jedoch Besonderheiten auf, wie

- Sequenzielle und teilweise parallele Verarbeitungsstufen mit potenziell gemischter Reihenfolge,
- Prozessdatenspeicherung mit unterschiedlichen Datentypen und Skalen, abhängig von Funktion, Zweck und Realisierung der einzelnen Prozessschritte,
- Komplexe und teilweise geringe Wechselwirkungen,
- Interne und externe Störgrößen in hoher bis sehr hoher Anzahl.

Daher erfolgen Fehlerfortpflanzungen meist nicht einfach additiv, sondern nicht-trivial. [30] Als Vorstufe lässt sich die Fortpflanzung eines Signals entlang einer Montageprozesskette beobachten (Kapitel 3.2), die sich auf folgende Prozessschritte oder Qualitätskennwerte auswirken kann. Hierbei wird als Signalfortpflanzung die messtechnisch erfasste Auswirkung einer Änderung der prozessbeteiligten Objekte auf den Mittelwert oder die Streuung eines Montagekennwertes mit anschließender Veränderung eines folgenden Kennwertes verstanden. Dieser beeinflusste Kennwert kann sich innerhalb desselben Prozessschritts oder in folgenden Prozessschritten befinden.

Eine Prozesskette ist als System zu betrachten und besteht aus einer geregelten, verlaufsorientierten Abfolge von Prozessen [52][53], die sich in dieser Ausarbeitung auf technologische Bearbeitungsprozesse in der Montage beziehen. Die Komplexität von Montageprozessketten ist im Sinne der Systemtheorie zu verstehen, wobei die Anzahl, Verschiedenheit

und Veränderlichkeit der Systemelemente und deren Beziehungen untereinander ausschlaggebend sind. Die Systemgrenze trennt das System von der Umgebung ab, wobei Ein- und Ausgangsgrößen die Schnittstellen bilden. [54] Als Teilsystem ist ein einzelner Montageprozessschritt zu sehen, welcher in einem räumlich definierten Fügeort einen bestimmten Montagevorgang ausführt. [8] Die Verkettung der Teilprozesse kann fest oder flexibel, aber auch starr, elastisch oder lose erfolgen. [55] Neben konventionell manuellen, mechanisierten und automatisierten Montagesystemen sind auch hybride oder teilmechanisierte Realisierungen zu differenzieren. [56] Jedoch unterscheiden sich diese Ausprägungen kaum im Hinblick auf Wechselwirkungen und deren Analysierbarkeit, weshalb nicht näher darauf eingegangen wird.

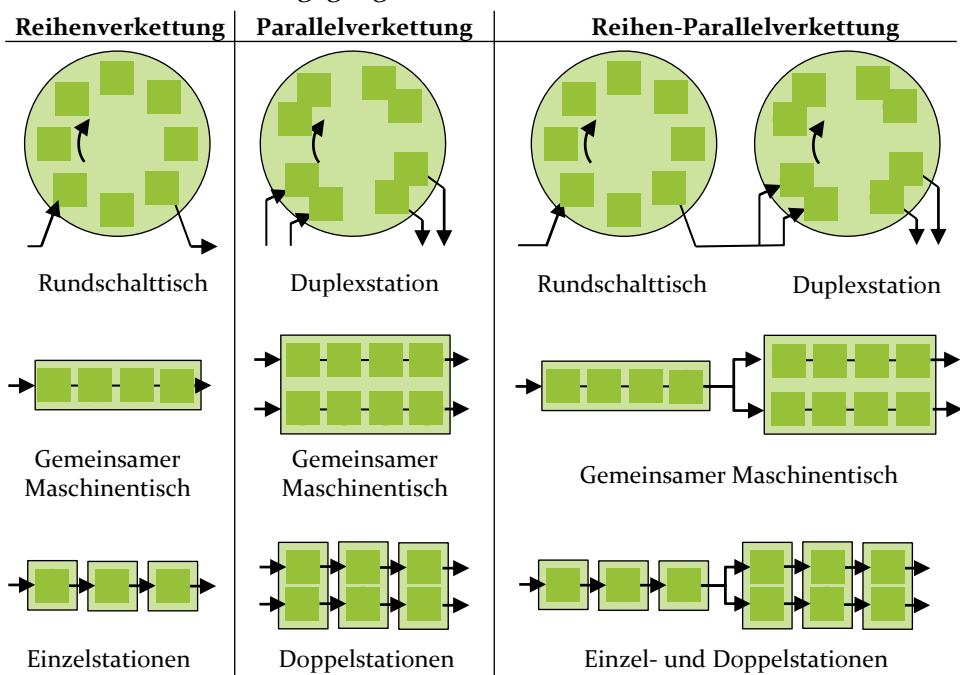


Bild 2: Formen der Verkettungsfolge [8]

Bild 2 zeigt die Realisierungsmöglichkeiten einer MPK mittels Reihenverkettung, Parallelverkettung und die kombinierte Reihen-Parallelverkettung. Ausschlaggebend bei den hier betrachteten komplexen Montageprozessketten (Kapitel 3.1) ist die potenziell mehrfach auftretende Reihen-Parallelverkettung zur Einhaltung des Linientaktes durch Parallelstationen, aufgrund höherer Taktzeit einzelner Prozessschritte. Diese kann an mehreren Stationen entlang des Montageflusses notwendig

sein. Hierdurch ergeben sich nicht nur zwei parallele Verarbeitungswege, sondern auch Kombinationen davon. Dies ist entscheidend, wenn die Ursache von Erzeugnisdefekten in der Verkettung von zwei Anlagenzuständen mit negativer Auswirkung auf die Qualität liegt und daher nur wenige von vielen Verarbeitungswegen eine erhöhte Defektquote aufweisen. Konventionell ist die Betrachtung der gesamten Fehlerquote stark verwässert und kann so nicht mehr zielgerichtet auf die Ursachenkombination hindeuten.

Als weitere Folge der hohen Komplexität steigt die Prozessanfälligkeit gegenüber Störungen generell [10]. Gleichzeitig unterliegen Montageprozesse einer großen Anzahl von Einflussgrößen, die zusätzlich auch prozessschritt-übergreifend auftreten. [58] Im Rahmen der konventionellen Prozessüberwachung werden zwar Toleranzgrenzen für jeden Prozessschritt und -abschnitt definiert, um die geforderten Qualitätskriterien mindestens ausreichend zu erfüllen. Jedoch geschieht die Berücksichtigung von ergebnisbeeinflussenden Wechselwirkungen erst beim Einfahren der Produktionsanlage, anstatt vorab in der Planungsphase [14] und noch seltener während des Serienbetriebs. Weiterhin resultieren viele Einflussgrößen durch die Herstellungsabweichungen der Fügepartner [36]. Zusätzlich verursachen laufende Veränderungen [59] in Montagesystemen [60] ein dynamisches Verhalten der betrachteten Prozesse im Sinne einer sich verändernden Verteilung der Prozesswerte über die Zeit hinweg [4]. Gleichzeitig ist es Aufgabe der Qualitätssicherung, auftretende Störungen schnell zu erkennen. [19] Die Zuordnung von Fehlern und deren Ursachen ist jedoch kaum möglich, weil konventionelle Fehleranalysemethoden meist einen einzelnen Prozess betrachten und damit Wechselwirkungen gänzlich ignorieren. [61]

Die Analyse wissenschaftlicher Veröffentlichungen zeigt, dass Produkte und Montageketten immer komplexer werden [10][40], wobei ein prozessschritt-übergreifender Ansatz zur Betrachtung von Prozessketten sinnvoll [15][62][63] ist. Nur durch Kenntnis qualitätsrelevanter Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge ist eine Optimierung möglich. [64] Entsprechend zielführende Prozesskettenanalysen sind dem Autor in der Batteriefertigung [64] bekannt.

Im Rahmen der Prozessüberwachung führt der geringe Personalbestand, trotz hochqualifiziertem Personal [52], zu einer eingeschränkten oder gar unmöglichen manuellen Überwachung der Montageprozesse. Hierdurch findet nur eine zeitverzögerte Entdeckung und Korrektur von Prozessabweichungen statt. [10] Als Folge resultieren reduzierte (Gut-) Stückzahlen,

ein erhöhter Material- und Energieverbrauch sowie Nacharbeitskosten und erhöhter Planungsaufwand. Weiterhin wird in der Industrie meist ein Prozessschritt innerhalb einer Fertigungskette isoliert betrachtet, wodurch bestimmte Fragestellungen nicht oder nur unzureichend beantwortbar sind. [14] Im Bereich der Montage betrifft dies Wechselwirkungen und Auswirkungen von Prozessänderungen auf die Funktionserfüllung des Erzeugnisses, wobei die Ursache-Wirkungs-Beziehungen zusätzlich zeitabhängig [64] sein können. Potenzielle Lösungsstrategien könnten den Vorteil des Menschen bei der Reaktion auf unvorhersehbare Ereignisse durch seine hohen kognitiven Fähigkeiten nutzen. Seine Auffassungsgabe bleibt jedoch meist unbeachtet. [65] Gleichzeitig fehlt der „gesunde Menschenverstand“ in automatisierten Maschinen [4]. Nicht nur aus den bereits genannten Gründen stellt der nutzbringende Umgang mit Prozessinformationen heutzutage einen entscheidenden Erfolgsfaktor dar. [66] Eine Möglichkeit ist deren Nutzung zur Ursachenanalyse defekter Erzeugnisse und Überwachung der Prozesse.

2.1.3 Fehleranalysemethoden nutzen primär implizites Expertenwissen

Die wirtschaftlichen Auswirkungen von Fehlern in komplexen Montageprozessketten bedingen die Notwendigkeit einer Montageprozessüberwachung und -analyse sowie einer schnellen Fehlererkennung [10]. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Aufdeckung von Ursache-Wirkungs-Beziehungen, die Aufklärung von Struktur, Funktionalität und Vernetzung in Systemen als Analyse verstanden. [62] Hierzu wird im Folgenden überwiegend der datenbasierte Ansatz [62] in empirischen Untersuchungen mittels Feldbeobachtungen [13] verfolgt, um ausschlaggebende Kennwerte und Prozessschritte zu identifizieren. Die Herangehensweise der Fehler-Ursachen-Analyse mit den Werkzeugen Failure-Mode-and-Effects-Analysis (FMEA), Ursache-Wirkungs-Matrix, Ishikawa-Diagramm, 5W-Fragen, Multi Vari Analyse und Logikbäume [67] arbeiten modellgetrieben oder durch Expertenwissen. Die weiteren Methoden 3A- und 8D-Report unterstützen die systematische Abarbeitung. Alle genannten sind jedoch kaum datenbasiert, nutzen die Kenntnisse über alle vorliegenden Prozesskurven entlang einer komplexen Montageprozesskette der einzelnen Erzeugnisse nur in geringen Maße oder sind für eine Analyse der laufenden Produktion ungeeignet.

Im Bereich von Prozessketten in der Fertigung ist die Ursachenidentifikation von verminderten Qualitätsergebnissen durch Auswirkung von

abweichenden Werkstückpositionen durch Versatz beim Spannen in Produktionsmaschinen bereits gut erforscht. In [68] wird eine Vorgehensweise präsentiert, die zunächst ein gemischtes statistisches Modell zur Beschreibung der Ursache-Wirkungs-Beziehung zwischen Prozessfehlern und der Qualität erstellt. Anschließende Hypothesentests zur Fehlerdetektion basieren auf geschätztem Mittelwert und Streuung des Prozesses.

Ein alternatives Verfahren nutzt datengetriebene Methoden zur Kausalitätsanalyse, wobei [69] die multivariate Granger-Kausalität direkt zur Generierung einer Kausalitätskarte verwendet. Diese wird zur Vereinfachung um unkritische Pfade gekürzt.

Illustriert durch einen Warmband-Walzprozess zeigt [70] eine Methode, die mittels Regression und Beitragsdiagramm sowie einer entropie-basierten Kausalitätsanalyse eine Fehlerdetektion und -lokalisierung durchführt. Der Fokus liegt auf der Signalfortpflanzung von Abweichungen durch die Produktionslinie sowie schwer zu modellierenden Wirkbeziehungen. Daher nutzen die Autoren einen datengetriebenen Ansatz.

Grundlegend versuchen die vorgestellten Herangehensweisen eine Übereinstimmung von geänderten Prozesskennwerten und Qualitätsergebnissen basierend auf zeitlich strukturierten Datensätzen zu detektieren. Hierbei kann ein zeitlicher Versatz auftreten, wobei die Signifikanz der erkannten Veränderungen zu bestimmen ist. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Umstand genutzt, dass in den betrachteten komplexen Montageprozessketten jedes Erzeugnis jederzeit durch eine eindeutige Seriennummer identifiziert ist. Hierdurch ist es möglich, auftretende Fehlerzusammenhänge und speziell die Signalfortpflanzung von Fehlern nicht nur anhand der Reihenfolge sondern auch jedem einzelnen Erzeugnis im Sinne einer Kausalitätsanalyse aufzuzeigen. Insgesamt spielen zeitliche Effekte eine sehr wichtige Rolle, weil sie Hinweise auf noch unbekannte Störungen geben.

2.1.4 Unbekannte Störeinflüsse erschweren die Ursachenanalyse in MPK

Neben den bereits erwähnten Herausforderungen, wie hohe Komplexität und unbekannte Wechselwirkungen, spielen unbekannte Störeinflüsse eine wichtige Rolle, welche die Ursachenanalyse erschweren. Gleichzeitig steigt die Relevanz von Störungen im Speziellen in hochautomatisierten Montagesystemen. [71] Sie stellen Ereignisse dar, die unerwartet eintreten [72] und sich zeitlich befristet auf die Wertschöpfungskette und deren Ergebnisse auswirken [73]. Weiterhin weisen sie einen konkreten Eintritts- und Beseitigungszeitpunkt [74][75] auf. Nach DIN IEC 60050-351 [76] handelt es sich bei einer Störgröße um eine „... unerwünschte, unabhängige und meistens unvorhersehbare Eingangsgröße, die von außen auf das System wirkt“. Sie ist messbar, nicht messbar oder unbekannt. Neben Störungen unterliegt das Verteilungszeitverhalten von Prozessen in der Praxis einer Vielzahl von Einflussfaktoren. [4] Um diese Problemstellungen zu adressieren, liegt der Schwerpunkt dieser Arbeit in der Überwachungsphase [77][78] zur reaktiven Fehler- und Störungsbeseitigung, Fehlerisolation sowie der Unterstützung in der Analysephase zur Ursachenidentifizierung.

Entscheidend ist die Berücksichtigung von maschinenbedingten und nicht maschinenbedingten Ursachen, wobei speziell in der Montagetechnik Störungen durch mangelhafte Einzelteilqualität oder Teilehygiene [79] durch Verschmutzung von Einzelteilen [4] entstehen. Gleichzeitig zeigt die Analyse wissenschaftlicher Veröffentlichungen, dass die Montage das Sammelbecken aller Fehler der vorhergehenden Fertigungsschritte [36][45][80] darstellt und die Herstellungstoleranzen der Fügepartner mannigfaltig ausfallen [36] Deswegen ist eine Ursachenanalyse während der Montagedurchführung notwendig.

Die Methoden Statistische Versuchsplanung [27] und Six Sigma setzen einen idealen Zustand meist einmalig fest oder für Simulationen sogar voraus [14] und versuchen durch Prozessregelkarten einen kontrollierten und robusten Prozess zu erzeugen. [25] Hierdurch ist beinahe eine Nullfehlerproduktion [26] möglich. Jedoch üben vereinzelt auftretende und systematische Störungsursachen [24][81] teilweise unentdeckt eine schadhafte Wirkung auf die Bauteilfunktionalität aus. Weiterhin ist die effektiv auswertbare Parameteranzahl bei praktisch durchführbarer Versuchsanzahl stark begrenzt [14][27] und kann bereits die Menge an vorhandenen Prozessparametern in Montageprozessketten kaum abbilden.

Besonders kritisch sind in diesem Zusammenhang Fügeprozesse, weil diese weitgehend nur zerstörend prüfbar sind und deren Qualität nur während des Prozesses beurteilt werden kann. [50][57] Auch Nachbearbeitungsschritte führen nicht immer zum Erfolg, wie bei Pressverbindungen aufgrund der Haltekraftreduktion durch u.a. Oberflächenveränderungen wie im folgenden Abschnitt erläutert. [50]

Erschwerend kommt hinzu, dass komplexe Montageprozessketten einerseits in der Großserienfertigung als starr verkettete Systeme vorkommen, die ein großes Produktionsvolumen und noch größere, generierte Datenvolumina aufweisen. Andererseits ist im Rahmen einer Werkstattfertigung [82] eine dynamische Verkettung unterschiedlichster Maschinen möglich. [P4] In beiden Fällen ist die Vielfalt an Maschinenherstellern, Softwareständen und Datenformaten in Montagesystemen groß.

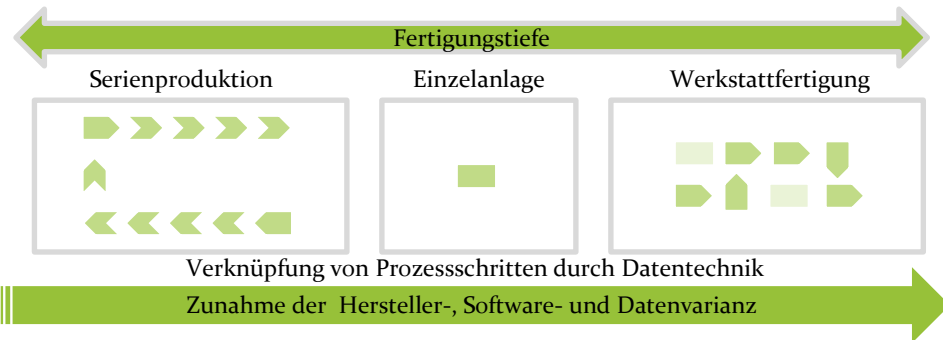


Bild 3: Komplexität und Varianz in der datengetriebenen Analyse von Montageketten [P4]

Bild 3 zeigt unterschiedliche Herausforderungen bei der datengetriebenen Analyse basierend auf eigenen Untersuchungen, wobei Datensätze von Montageprozessketten in der nicht verketteten Werkstattfertigung datentechnisch genauso nutzbar sind wie in der starr-verketteten Serienproduktion. [83]

Insgesamt resultiert daraus, dass die Analyse komplexer Montageprozessketten nicht prozessschritt-übergreifend erfolgt. Meist sind nur einzelne Prozessschritte und Kennwerte Betrachtungsgegenstand. Gerade die sehr hohe Dauer zur Datenakquise und Aufbereitung [84] sehen viele Anwender kritisch, obwohl relevante Prozessdaten generell vorliegen, jedoch nicht in einem direkt auswertbaren Format. Hierdurch bleiben die Abhängigkeiten von Montageparametern unbekannt, auch eine einfache Korrelation mit Qualitätsmerkmalen wird nur bedingt durchgeführt. In

allen Fällen wird der Einfluss von Störungen kaum berücksichtigt und eher labortypische Versuche durchgeführt, anstatt das reale Verhalten komplexer Montageprozessketten zu durchdringen. Resultierend entstehen vermeidbare Fehler- und Ausschusskosten sowie ein gesteigerter Material- und Energieaufwand im Rahmen der Nachbeschaffung. Bild 4 fasst diese Punkte zusammen und nennt Wege und Ziele dieser Arbeit.

IST-Stand	Wege und Ziele
Auswertung und Analyse von einzelnen Prozessschritten und Kennwerten.	Prozessschritt-übergreifende Analyse von komplexen Montageprozessketten und deren Einzelanlagen.
Prozessparameter werden per DoE und Regler eingestellt. Anomalien während der Produktion werden nicht betrachtet.	Auswertung von Ereignissen, die trotz eingehaltener Parameter zu Ausschuss führen.
Korrelationsanalyse anhand der Kombination von Parametern über Prozessschritte hinweg auf die Qualität sind nicht möglich.	Fehlerquellen in MPK lokalisieren. Bei hoher Anzahl Prozessschritte und mittlerer Anzahl Parameter je Prozessschritt.
Vermeidbare Fehler- und Ausschusskosten.	Aufbau effizienter Analysekonzepte für komplexe Montageprozessketten in der laufenden Produktion.

Bild 4: Zusammenfassung aktueller Stand und Ziele

2.1.5 Prozessüberwachung für Einpressen ist in wissenschaftlichen Arbeiten kaum durchdrungen

Das Fügen durch Einpressen stellt, in Anbetracht der Anzahl der Anwendungen, neben dem Schrauben den zweithäufigsten Montageprozess dar und ist in der Industrie weit verbreitet [85]. Es gehört nach DIN 8580 [47] zur Hauptgruppe Fügen, der Gruppe An- und Einpressen und der Untergruppe Fügen durch Presspassung. Im Rahmen dieser Arbeit werden kraftschlüssige, unlösbare Verbindungen betrachtet, die als Längspressverbindung unter unmittelbarer Verbindung des Außen- und Innenteils ausgeführt sind. Letzteres erfolgt als Presspassung durch Übermaß unter elastischer Verformung der Bauteile. Generell wird zwischen kraftbasiertem und thermischem Einpressen unterschieden [86], wobei sich die folgenden Untersuchungen hauptsächlich auf kraftgeführtes Fügen beziehen, wie es in Bild 5 dargestellt ist. Durch eine axiale Kraft wird ein Bolzen in eine Bohrung gleitend gefügt, welche von einer hydraulischen, pneumatischen oder in dieser Arbeit elektro-

mechanischen Presse bereitgestellt wird. Hierbei sind die Hauptparameter Fügekraft, -weg und -geschwindigkeit ausschlaggebend, während die Kraft von wenigen Newton bei kleinen Geometrien bis hin zu mehreren kN bei hoher Pressüberdeckung und großen Teilen reicht. [87] Den größten Einfluss bei gegebenen Fügepartnern stellen Reibungseffekte durch Oberflächenrauigkeit, Adhäsionskräfte und Schmierung. Hierbei ermittelt sich die Reibungskraft F_R als Produkt der Reibungszahl μ und der Normalkraft F_N . [88] Weiterhin wird die Normalkraft F_N durch den Fugendruck p auf die Innenwand des Außenteils durch $F_R = \mu \cdot A \cdot p$ bestimmt. Anschließend kann der Fugendruck durch die Axialkraft F_{AX} , die Rutsicherheit SR sowie Durchmesser D_F und Breite der Fügefläche l_F ausgedrückt werden. Die letzten beiden Faktoren lassen sich durch den Durchmesser des Bolzens und die Einpresstiefe bestimmen. [88]

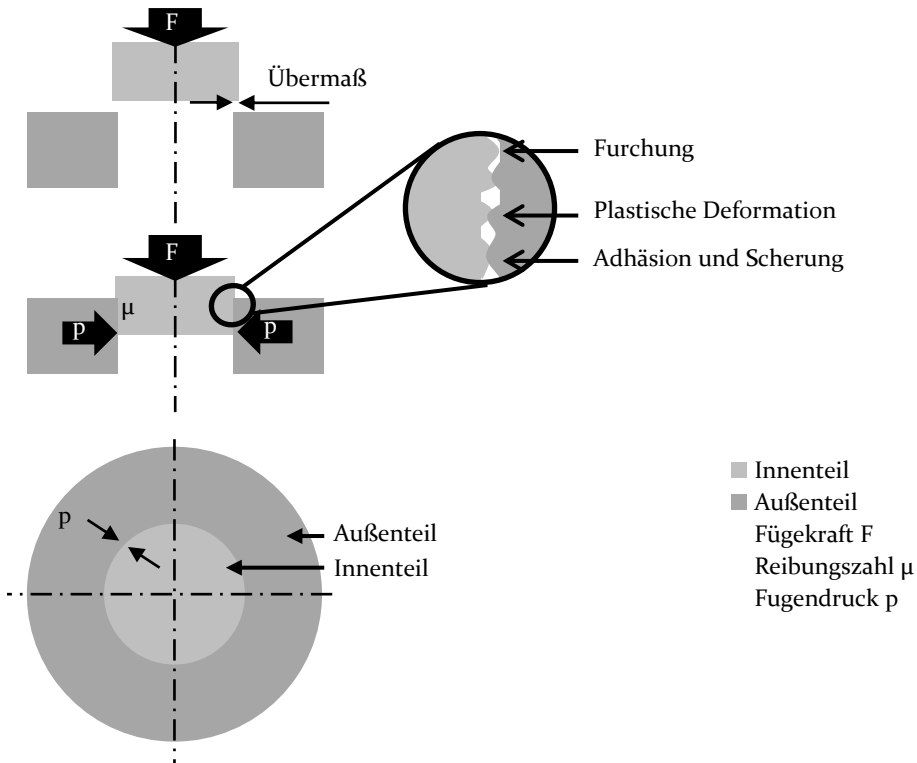


Bild 5: Fügen durch Einpressen

Daher ergeben sich die stärksten Einflüsse auf die Einpresskraft durch veränderte Reibung, Oberflächengüte und Materialkennwerte der Werkstoffe. Gleichzeitig wird die Normalkraft durch die Temperatur und

Maßtoleranzen bestimmt. Aufgrund der vielfältigen Einflüsse wird die Reibungszahl konventionell nur näherungsweise berechnet und muss experimentell für jeden Anwendungsfall bestimmt werden. [88] Zur Protokollierung und Visualisierung sind konventionell Kraft-Weg- und Kraft-Zeit-Kurven verbreitet.

Speziell bei der Betrachtung von Montageprozessen ist neben den reinen Prozessdaten auch die Ansteuerung des Prozesses zu berücksichtigen, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Fügen durch Einpressen kann in den Modi Fügen auf Weg, Fügen auf Kraft oder Fügen auf Block [31][32] erfolgen. Ausgehend von der Art der Datenprotokollierung sind teilweise starke Unterschiede zu verzeichnen, die sich negativ auf durchzuführende Analysen auswirken. Tabelle 1 zeigt die Unterschiede der Modi in Bezug auf die Geschwindigkeit, den Zielparameter der Prozessregelung und den variablen Parameter. Letzterer manifestiert die Streuung während der Durchführung des Fügeprozesses und wirkt sich direkt auf die Synchronisierung von Prozesskurven im Analyseschritt aus.

Tabelle 1: Modus von Fügen durch Einpressen

Modus	Geschwindigkeit	Zielparameter	Variabler Parameter
Fügen auf Weg	Variabel	Position	Zeit und Kraft
Fügen auf Kraft	Konstant	Kraft	Weg
Fügen auf Block	Konstant	Kraft	Zeit

Ausgehend von dem Regelungsaufwand, um den Zielparameter genau zu erreichen, verzerrt der variable Parameter angeschlossene Analysen, die auf dem Kennwert maximale Kraft basieren. Einen Spezialfall stellt Fügen auf Block dar, nachdem die Blockkraft nicht den Fügeprozess selbst, sondern eher die Maschinensteifigkeit beschreibt. Im gleichen Zuge bedeutet ein längerer Einpressweg beim Fügen auf Kraft nicht zwangsläufig geänderte Bauteilabmessungen, sondern gegebenenfalls ein abgebrochenes Werkzeug. Umgekehrt kann ein kürzerer Weg bis zur Erreichung der Zielkraft auf ein verkipptes Bauteil oder Werkzeug hindeuten. Daher ist die Beachtung von horizontalen und vertikalen Verschiebungen der Kraft-Weg- oder Kraft-Zeit-Kurve sowie Mischformen entscheidend.

Aktuelle Forschungsarbeiten spalten sich in die drei Bereiche FEM-Simulation der Einpresskraft zur Ableitung weniger komplexer Formeln [89][90][91][92][93], Entwicklung präziser Einpressanlagen [87][94] und

Haltbarkeitsuntersuchungen [95]. Arbeiten im Bereich der Prozessüberwachung zur Fehlererkennung sind jedoch selten, wie [96] zeigt. Die darin entwickelte Prozessüberwachung mittels Hüllkurve prüft das Einpressen von Zylinderdichtungen im Automobilbau auf schadhafte Einflüsse.

2.1.6 Aufgrund der signifikanten Störeinflüsse ist Fügen durch Schrauben besonders interessant

Das Fügen durch Schrauben stellt in Anbetracht der Anzahl der Anwendungen den häufigsten Montageprozess dar und ist in der Industrie weit verbreitet [85]. Alleine die Automobilindustrie verarbeitet täglich mehr als 100 Millionen Schraubverbindungen. [97] Es gehört nach DIN 8580 [47] zur Hauptgruppe Fügen, der Gruppe An- und Einpressen und der Untergruppe Schrauben. Im Rahmen dieser Arbeit werden formschlüssige, lösbare Verbindungen betrachtet, die zur Verbindung von zwei oder mehreren Teilen unter unmittelbarer Verbindung des Innengewindes und dem Gewindestift mittels Pressen eines selbsthemmenden Gewindes ausgeführt sind. Das notwendige Drehmoment wird meist pneumatisch oder elektro-mechanisch, selten auch hydraulisch von einem Schraubsystem bereitgestellt. Diese Systeme sind durch einfache Handschraubgeräte, handgeführte Mehrfachschrauber oder in dieser Arbeit stationäre Schraubsysteme realisiert. Die Steuerung verfügbarer Anziehsysteme basiert entweder auf dem Drehmoment, Drehwinkel oder der Streckgrenze. Neben Kombinationen der genannten Arten sind auch stromgesteuerte Anziehverfahren durch eine verlängerte Messkette anstelle des Drehmoments möglich. [98] Typische Verschraubungsfehler in der Montage sind meist auf Abweichungen der Schraube, des Bauteils oder die Prozessführung sowie Handhabungsfehler durch den Bediener oder das Schraubsystem zurückzuführen. [99] Im Rahmen dieser Arbeit betrachtet die Analyse in den Kapiteln 3.8 und 7.2.2 nur durchgeführte Schraubabläufe, um fehlerbehaftete Schraubvorgänge zu klassifizieren. Hierbei liegt der Fokus u.a. auf fehlerhaftem Schraubengewinde, beschädigtem Bauteilgewinde, Fremdkörpern im Gewinde und fehlender Beschichtung sowie Winkelversatz.

Zu den stärksten Einflussgrößen auf die Vorspannkraft beim Schrauben zählen die Reibung zwischen den Gewinden, die geometrische Form der Montageteile und die Materialkennwerte. [100] Bild 6 zeigt die Nutzung selbstschneidender Schrauben, wobei sich deren Anwendung durch das zusätzliche Drehmoment für die Gewindeumformung gleichzeitig negativ

auf die Prozessüberwachung und Auswertung weiterer Einfluss- und Störgrößen auswirkt. [101]

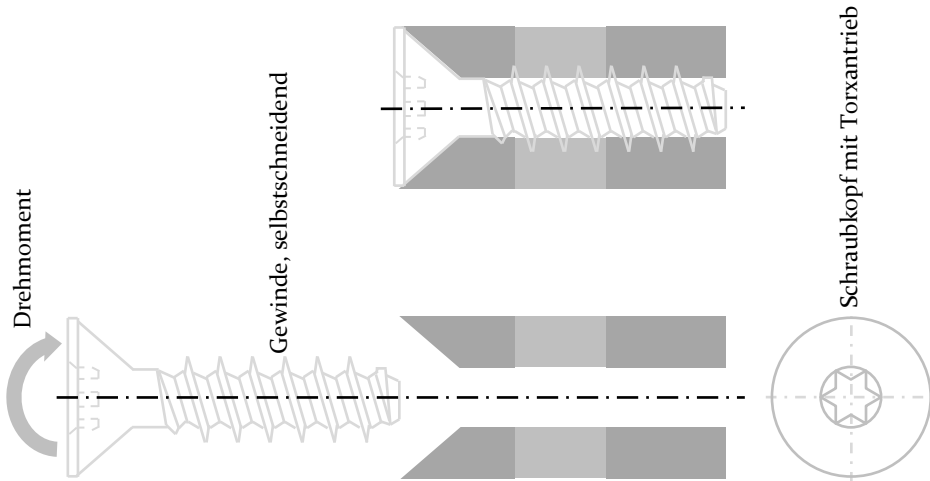


Bild 6: Fügen durch Schrauben mit selbstschneidendem Gewinde

Weil sich die Vorspannkraft einer Schraubverbindung unter Serienbedingungen nicht direkt und ausreichend genau messen lässt, wird zur Bewertung nur das Drehmoment genutzt. Hierbei setzt sich das Nenndrehmoment M_{Nen} aus dem Kopfreibmoment M_K , Gewindereibmoment M_G und dem vorspannungskrafterzeugenden Steigungsdrehmoment M_{St} zusammen. Effektiv entfallen nur 8-16 % des Nenndrehmoments auf die Vorspannung, während der Rest auf die Reibung im Gewinde sowie zwischen Kopf und Kopfauffläche entfällt. [98]

Aktuelle Forschungsarbeiten nutzen FEM-Simulationen zur Berechnung von Drehmoment und -verlauf. [101] Arbeiten zur erweiterten Prozessüberwachung und Fehlerklassifikation sind in Kapitel 4.2.2 beschrieben.

2.2 Montageprozessketten nutzen viele Datenarten und -quellen als Näherung der Realität

Jedes Data Mining-Projekt besitzt inhärent die Problemstellung, dass nicht alle physikalischen Daten der Untersuchungsobjekte vorliegen oder gar erfasst sind. In komplexen Montageprozessketten ergibt sich eine Vielzahl an nicht kontrollierbaren und nicht verfügbaren Einflussgrößen. Alleine der Maschinen- und Werkzeugzustand ist während der Montageoperation nicht exakt bekannt. Dieses Kapitel zeigt Datenquellen und

ableitbare Informationen bestimmter Einflüsse. Gleichwohl sind praktisch nie alle erschöpfbaren Datensätze in Analysen aus unterschiedlichsten Gründen nutzbar.

2.2.1 Maschinen- und Prozessdaten stellen die Grundlage für Ursachenanalysen in MPK

Im Rahmen der Betriebsdatenerfassung (Bild 7) erfolgt die Trennung von organisatorischen und technischen Betriebsdaten. Bei Letzterem sind Maschinen- und Prozessdaten zu unterscheiden. Als zusätzliche Informationsquellen sind in Kapitel 6.3 Meldungen der Maschinensteuerung und in Kapitel 7.2.2 die Energieaufnahme eines Aktors von Relevanz. Bereits erhobene, sensorbasierte Prozessdaten und Kennwerte aus Montageprozessen und Funktionsprüfungen sind die wichtigsten Quellen der folgenden Untersuchungen und Methodenentwicklungen.

Betriebsdatenerfassung			
Technische Betriebsdaten	Maschinendaten		Prozessdaten
	▪ Auslastung ▪ Produktionsmenge ▪ Eingriffe des bedienenden Personals ▪ Meldungen & Störungen ▪ Material- & Hilfsmittelverbrauch ▪ Energieverbrauch		▪ Qualitätskennwerte ▪ Parameter der Prozesse ▪ Einstelldaten
Organisatorische Betriebsdaten	Auftragsdaten		Personaldaten
	▪ Produktionsdaten: Zeit, Anzahl, Gewicht, Qualität, Stückzahl etc. ▪ Arbeitsfortschritt ▪ Auftragsstatus ▪ Rückmeldung		▪ Anwesenheits- & Arbeitszeit ▪ Lohnkosten ▪ Zutrittskontrolle

Bild 7: Arten von Betriebsdaten [102]

Produktqualitätsmerkmale wie Beschaffenheits-, Funktions- und Relationsmerkmale [103] stellen den Fokus dieser Arbeit dar und sind als Produkt- und Prozessinformationen daten- oder messtechnisch erfassbar. Messwerte wie Kraft, Weg oder Temperatur sind erfassbar und übertragbar. Dadurch übermitteln sie im technischen Sinne Information als naturwissenschaftliche, exakt bestimmbare Größe. [104] Prozessdaten bezeichnen alle messbaren Größen, die während der Durchführung eines Montageprozesses messbar sind. [18] Tabelle 2 listet die in dieser Arbeit genutzten strukturierten Datenarten und Typen auf.

Tabelle 2: Strukturierte Datenarten und -typen in MPK

Datenart	Datentyp	Eigenschaft	Beispiel
Kategorisch	String	Diskret	iO/niO, Fehler N
Kennwert	Integer, Float	Kontinuierlich, multinomial	12 kN, Prozessschritt N
Prozesskurven	Array	Kontinuierlich, multidimensional	Kraft-Weg

Solche Datensätze liegen strukturiert, also mit definierter Struktur und Bedeutung wie in relationalen Datenbanken, semi-strukturiert als XML oder als Textdatei vor. [105][106] Diese stehen im Fokus dieser Ausarbeitung, um das Verhalten von MPK anhand deren Kennwerte und Prozesskurven zu verstehen. Unstrukturierte Datensätze die im Produktionsbetrieb von MPK entstehen, manifestieren sich als Bilddaten oder 3D-Scans. Hierbei sind 2D- und 3D-Bilder hauptsächlich in Bildverarbeitungssystemen zur optischen Inspektion, Röntgenanlagen, Akustikkameras, Wärmebild und Mikroskopie anzutreffen. Aufgrund der stark heterogenen Struktur und aufwendigen Modellierung sind diese Datensätze nicht in der engeren Betrachtung. Zur genaueren Darstellung der strukturierten Daten in MPK zeigen die folgenden Kapitel die Unterschiede und Besonderheiten von Datensätzen aus Prozessebene, Qualitätsprüfung, energetischen Messungen und der Logistik auf.

2.2.2 Kennwerte und Prozesskurven liefern Informationen auf Prozessebene

Zur Prozessdurchführung, -regelung und -bewertung erheben Speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) eine Vielzahl an Messwerten, die steuerungsintern als extrahierte Messpunkte oder als diskret abgetastetes Signal vorliegen. Funktionsbausteine zum Datenexport halten frei definierbare Datensätze zunächst im Arbeitsspeicher, um sie anschließend als Datei zu speichern oder als Telegramm zu versenden. [107] Bereits die Vorselektion der zu exportierenden Daten führt zu einer begrenzten, aber im Idealfall ausreichenden Beschreibung des Prozessverlaufs. Prozessdatensätze beinhalten diskrete und kontinuierliche Prozesswerte sowie Prozesskurven mit einer begrenzten Anzahl an Stützstellen. Diskrete Werte stellen das Prozessergebnis Gut/Schlecht oder beliebige wählbare Zustandsbeschreibungen wie 1/o, iO/nIO oder

auch Erfolg/Abbruch/Fehler 1...N dar. Kontinuierliche Prozesswerte sind meist Messwerte mit beliebiger Skala und Einheit, wie Temperatur, Weg oder Kraft zu bestimmten Zeitpunkten, Prozessphasen oder entsprechende Min/Max-Werte. Prozesskurven hingegen beschreiben einen zwei- oder mehrdimensionalen Messwertverlauf, wie bei Einpressprozessen die zugehörige Kraft-Weg-Kurve [108][109][110]. Mit steigendem Abstraktionsgrad sinkt jedoch der Informationsgehalt, während Methoden zur Kenngrößenbildung nur mit Informationsverlust aus einer Prozesskurve einen diskreten oder kontinuierlichen Wert ableiten. [25] Auf Prozessebene sind montageprozesskritische Informationen relevant, um Aussagen über den Prozessverlauf und die Prozessqualität zu treffen. Nicht erhobene oder mittels Sensorik erfasste, aber nicht protokollierte, Datensätze mit signifikanter Auswirkung auf den Prozess oder dessen Qualitätsergebnis erschweren die Analyse und Ursachenfindung.

2.2.3 Qualitätsdaten spiegeln den Funktionserfüllungsgrad und definierte Merkmale

Qualität ist nach DIN EN ISO 9000:2005-12 [111] definiert als die „Gesamtheit von Merkmalen einer Einheit [...] bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen.“ Bei der Qualitätsprüfung wird die zerstörungsfreie [110] 100 %-Prüfung und die Stichprobenprüfung, die gegebenenfalls zerstörend prüft, unterschieden. [112] In dieser Arbeit stehen die Erfüllung respektive der Erfüllungsgrad definierter Funktionen im Vordergrund, die zerstörungsfrei an Prüfständen zu ermitteln sind.

Im Rahmen der Qualitätsprüfung erzeugte diskrete und kontinuierliche Qualitätswerte sowie (Prüf-)Kurven zeigen starke Parallelen zu den Datensätzen auf Prozessebene in Form der Datenrepräsentation als stützpunktbasierte Kurven. Entscheidend ist jedoch der Unterschied im Betrachtungsobjekt. Während Prozessdatensätze eher Prozessverlauf und -güte betrachten, spiegeln Qualitätsdatensätze die Funktionsgüte des Erzeugnisses oder bestimmte Merkmale wieder. Der Ansatz dieser Arbeit nutzt diese Unterscheidung, um unidirektional von der Prozessgüte auf den Funktionserfüllungsgrad und umgekehrt von verminderten Qualitätsergebnissen auf die Ursache zu schließen oder zu prognostizieren.

2.2.4 Energetische Datenquellen sind in Montageprozessen ungenutzt

Energetische Datenquellen wie elektrische Leistungsaufnahme und der Verbrauch von Druckluft, Gas und weiterer Energieträger bieten das Potenzial, Störungen und Abweichungen von Prozessschritten aufzuzeigen, wie auch eigene Voruntersuchungen ergeben haben. [113] Gleichzeitig existieren Arbeiten, die eine direkte oder indirekte Identifizierung der aktuellen Prozessphase durchführen, ausgehend von Datensätzen der Steuerung oder anhand von Energiedaten. [114] Eine durchgeführte Literaturrecherche zeigt, dass die Nutzung dieser Datensätze für Qualitätsbetrachtungen in Montageprozessen bisher unbeachtet ist, solange sie nicht für die direkte Prozessregelung oder Messung in Schweiß- oder Prüfprozessen notwendig sind. Einige Fertigungsprozesse sind zwar effektiv durch eine indirekte Messwerterfassung überwachbar, wie das Motordrehmoment durch Betrachtung der Wirkleistung in CNC-Fräsen [115]. Solche indirekten Messketten sind in Montageprozessen jedoch weitgehend unbekannt.

2.2.5 Logistikdaten geben Aufschluss über Zuführteile

Die Logistik ist die Schnittstelle zwischen montagesysteminternen und -externen Daten und Material. [116] Solche Datensätze geben Aufschluss über Zulieferer, Fertigungsmaschine, Schicht und Charge von zugeführten Bauteilen. Daher eignen sie sich zur Identifikation von systematischer Prozessstreuung, wie eigene Untersuchungen zeigen (Kapitel 3.4 und 3.6). Unabhängig, ob es sich hierbei um firmeninterne oder -externe Produzenten handelt, ist die Rückführung von schadhaften Prozesszuständen bei ausreichender Datenlage potenziell möglich. Im Unterschied zu einer Qualitätsüberwachung anhand von Stichproben verarbeitet ein Montagesystem jedes Erzeugnis einzeln und führt implizit eine 100 %-Prüfung der Zuführteile respektive der Fügepartner gemeinsam durch. Natürlich sind Abweichungen im Montageprozess aufgrund von Zuführteilen zunächst als Indiz und noch nicht als Beweis zu sehen. Jedoch bieten solche Datensätze die Möglichkeit, schadhafte Zustände in vorgeschalteten Prozessschritten aufzuzeigen und somit frühzeitig abzustellen.

2.3 Prozessüberwachung in Montageprozessen dient zur Sicherstellung der fehlerfreien Durchführung

Die fehlerfreie Durchführung von Montageprozessen wird in manuellen und vor allem automatisierten Montagesystemen meist durch Prozessüberwachung attestiert. Hierbei gilt es jedoch, die Funktionsweise und Grenzen unterschiedlicher Techniken zu berücksichtigen. Weiterhin spielen die Beherrschbarkeit durch Nachweis der Maschinenfähigkeit und Sicherstellung einer geringen Fehlerrate durch hohe Prozessstabilität eine wichtige Rolle in der industriellen Montage. Neben den konventionellen Verfahren sind abschließend Möglichkeiten zur modellbasierten Überwachung dargestellt.

2.3.1 Prozessüberwachung mittels Toleranzgrenzen, Fenstertechnik und Hüllkurven liefert nur Teilinformationen

Die toleranzbasierte Überwachung von Montageprozessen ist bereits seit Jahrzehnten Stand der Technik [117]. Konventionelle Prozessüberwachungen im Bereich der Montage nutzen (obere und untere) Toleranzgrenzen einzelner Prozesskenngrößen, Toleranzfenster [57][110] für definierte Prozessbereiche, einfache Hüllkurven [19] und mathematische Formeln, um eine Vielzahl einzelner Stützpunkte der Prozesskurven zu überwachen. [31][32] Ein fehlerhafter Prozessverlauf wird angenommen, wenn der Kraft-Weg-Verlauf die Toleranzgrenzen verlässt oder nicht alle Zielfenster durchläuft. [118] Problematisch ist die Definition der Toleranzbreite, weil ein korrekter Prozessvorgang trotz Störgrößen innerhalb der Grenzen bleiben soll [118], ohne gleichzeitig die Anzahl der Fehlmeldungen zu erhöhen und damit unnötige Prozessunterbrechungen hervorzurufen [119]. Weite Tolerierungen reduzieren jedoch die Genauigkeit und Empfindlichkeit der Prozessüberwachung, die innerhalb der Prozessfenster nicht immer gegeben sind. [119] Pseudofehler und Schlupf gilt es jedoch zu vermeiden. [119] Komplexere Methoden wie die modellbasierte Prozessüberwachung konnten sich wegen des hohen Adaptionaufwands noch nicht durchsetzen [19].

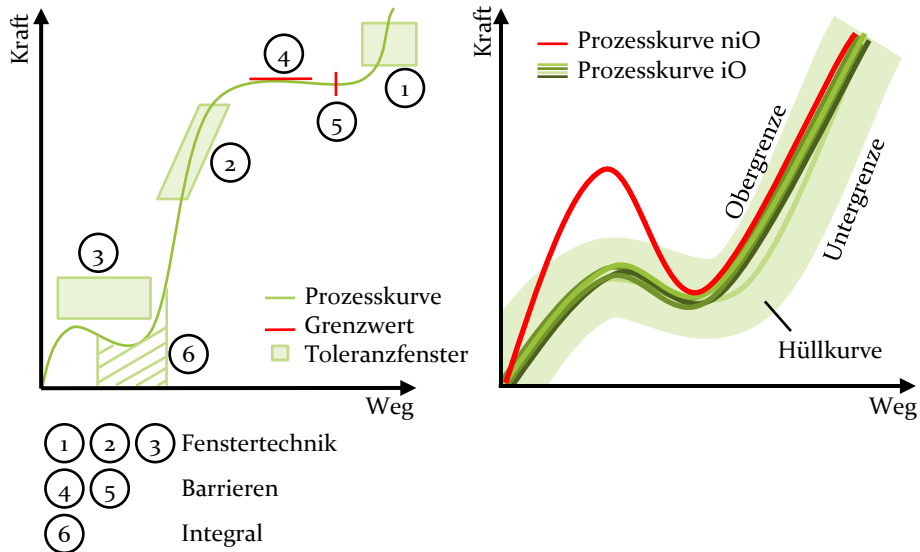


Bild 8: Prozessüberwachung mittels Fenstertechnik (links) und Hüllkurve (rechts) [120]

Der prozessorientierte Bereich Statistical Process Control und Prozessregelkarten erfordern definierte Kennwerte aus Prozessverläufen, welche in einem visualisierbaren Regelprozess überwacht werden. [25] Eine darunterliegende Prozessüberwachung mittels Fenstertechnik (1)(2)(3), Barrieren (4)(5) und Integral (6) sowie Hüllkurve zeigt Bild 8. Im Festlegungsprozess von Kennwerten und den von ihnen überwachten Bereichen wird ein weitgehend störungsfreier Prozess angenommen. Abweichungen eines einzelnen Kennwerts bezüglich einer Änderung des Mittelwerts (MW) oder der Streuung respektive Standardabweichung (StdAbw) sind nur selten in der Prozessüberwachung anzutreffen.

Störungen in überwachten Bereichen bleiben somit systematisch unberücksichtigt, solange die Toleranzbreite eingehalten wird. Gleichzeitig ist der Informationsgehalt von unüberwachten Bereichen, also ohne explizite oder eng anliegende Grenzen, konventionell gänzlich ungenutzt. Zusätzlich resultieren Änderungen der Rahmenbedingungen seit der Auslegungsphase in einer dramatischen Verschlechterung der Erkennungsrate während der Überwachungsphase [21].

Zusammenfassend erkennen konventionelle Prozessüberwachungen mittels Fenstertechnik erfolgreich Abweichungen anhand von Toleranzverletzungen in betrachteten Bereichen. Hierbei modelliert eine

hüllkurvenbasierte Überwachung eher die Prozessstreuung über den gesamten Prozessverlauf. Alternative Prozesscharakteristiken wie in Bild 9 dargestellt, erkennen beide Methoden gut respektive unzureichend. Ausgehend vom Stand der Technik [31][32][118] ist bei der Prozessüberwachung in Montageverfahren die Implementierung von Systemen zur sensiblen Fehlererkennung noch ausstehend.

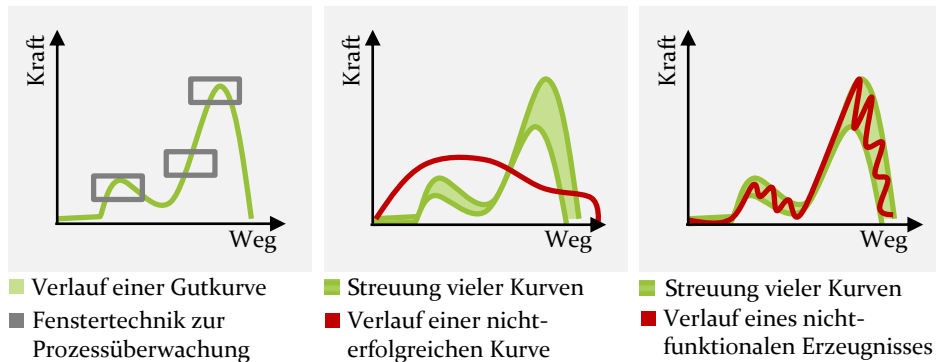


Bild 9: Prozessüberwachung mit (links) Toleranzfenstern, (Mitte) Prozessstreuung und Defektkurve, (rechts) nicht-funktionierendem Erzeugnis

Neben der Einhaltung vorgegebener Prozessabläufe und Toleranzgrenzen bei einzelnen Prozessdurchführungen ist auch die Prozessfähigkeit relevant. So ist nicht nur in der Großserienproduktion auch das Kurz- und Langzeitverhalten von Prozessen zu überwachen und ein stabiler Prozess sicherzustellen.

2.3.2 Prozessstabilität wird anhand der Maschinen- und Prozessfähigkeit sichergestellt

Die Stabilität eines Prozesses wird mittels Regelkarten nachgewiesen [121] und ist die notwendige Voraussetzung für dessen Beherrschbarkeit [122]. Die Darstellung einer Zeitreihe und des Histogramms zur Bewertung der Verteilung zeigt Bild 10. Zur Feststellung der Prozessgüte sind die kurzfristige Maschinenfähigkeit C_m und C_{mk} sowie die langfristige Prozessfähigkeit C_p und C_{pk} [123] in der Industrie stark verbreitet. C_m und C_p setzen die Prozessstreuung σ und Toleranzbreite über die obere und untere Spezifikationsgrenze (OSG, USG) ins Verhältnis, wobei C_{mk} und C_{pk} zusätzlich die Lage der Verteilung über den Mittelwert μ berücksichtigen.

$$C_m = \frac{OSG - USG}{6\sigma} \quad C_{mk} = \frac{\min(\mu - USG, OSG - \mu)}{3\sigma}$$

$$C_p = \frac{OSG - USG}{6\sigma} \quad C_{pk} = \frac{\min(\mu - USG, OSG - \mu)}{3\sigma}$$

Sie verfolgen das Ziel, vertrauenswürdig stabile Prozesse mit geringer Fehlerrate zu realisieren. Fehler entstehen durch die Nichterfüllung einer festgelegten Forderung. [111] Sofern ein Erzeugnis so fehlerbehaftet ist, dass es den ursprünglichen Zweck nicht hinreichend erfüllt, ist es Ausschuss. [61]

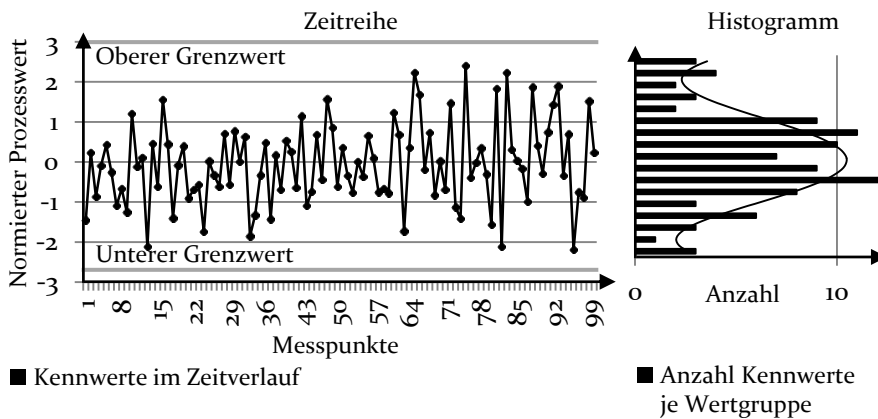


Bild 10: Zeitreihe und Histogramm

2.3.3 Six Sigma und Statistische Prozesskontrolle beachten keine prozessübergreifenden Wechselwirkungen

Six Sigma [25] verfolgt das Ziel, robuste Prozesse mit sehr geringer Fehlerrate von drei ppm (engl.: parts per million) zu realisieren, indem die Varianz von Fertigungsprozessen auf maximal sechs Standardabweichungen um den Mittelwert begrenzt wird. Mittels Kontrollverfahren wie Prozessregelkarten aus dem Bereich SPC soll die Prozessstabilität langfristig erhalten bleiben. Im Speziellen unterscheidet Six Sigma die Veränderung der Prozessstreuung in die beiden Kategorien natürliche und systematische Ursachen (engl. Common und Special Cause). Mittels FMEA, Ursache-Wirkungsmatrix und weiterer Methoden sind systematische Ursachen abzustellen oder abzumildern, da sie einen sehr starken Effekt auf den Prozess haben. [124] Nach erfolgreicher Eindämmung dieser Ursachen bleibt die natürliche Variation als Grundrauschen und

Indikator für einen stabilen, störungsfreien Prozess übrig. Bild 11 zeigt zusätzlich die erfolgreiche Streuungsreduzierung durch entsprechende Maßnahmen. Prozessregelkarten überwachen den Prozessverlauf, um das Auftreten systematischer Ursachen anzuzeigen. Problematisch in realen, komplexen Montageprozessketten sind jedoch die unzähligen, theoretisch möglichen Störeffekte und gleichzeitig die nur begrenzt verfügbare Kapazität zu deren Vermeidung. Daher bleibt immer ein gewisses Restrisiko, dass neue und meist unbekannte Störungen auftreten.

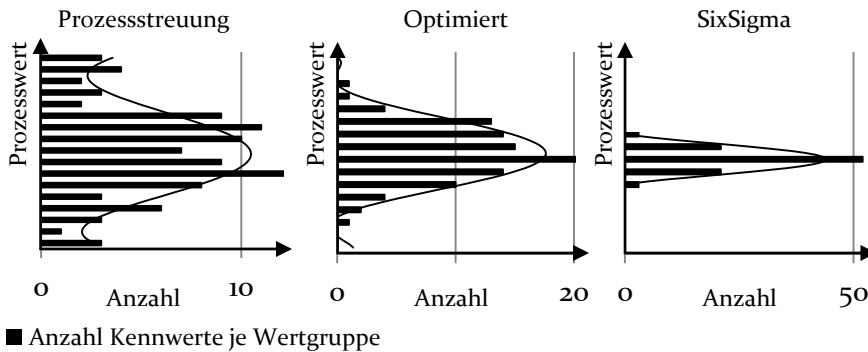


Bild 11: Prozessperformance normal (links), optimiert (Mitte) und nach erfolgter Streuungsreduzierung (rechts)

Die Grenzen und Nachteile der statistischen Prozessüberwachung sind in Forschungsarbeiten bereits diskutiert, wobei sich die folgenden Aspekte vor allem auf den Bereich von komplexen Montageprozessketten beziehen:

- Stichprobencharakter filtert Ausreißer und nutzt nicht alle gesammelten Informationen [19]
- Ableitung der Eingriffsgrenzen aus dem Streuverhalten, anstelle von Korrelationen zu Qualitätsmerkmalen des Produkts [19]
- Einzelparameterüberwachung ist nicht für Wechselwirkungen [19] oder zur Ursachenidentifizierung von Qualitätsschwankungen geeignet [64]
- Keine spezifische Unterstützung bei Prozessketten [62]

2.3.4 Prozessmodellierung von Montageprozessen ist bei hoher Parameteranzahl aufwendig

Im Gegensatz zu konventionellen Prozessüberwachungen, die basierend auf Messdaten einzelne Stützpunkte und Kennwerte auf Einhaltung von Grenzwerten prüfen, existieren modellbasierte Ansätze. Diese nutzen Modelle, um neu anfallende Messdaten auf Einhaltung der Modellparameter zu testen. [125] Bild 12 zeigt hierbei die Unterscheidung in deduktiv und induktiv gewonnene Prozessmodelle. Zur ersten Art der theoretischen Modelle gehören physikalische Grundgesetze und die Finite-Elemente Methode (FEM). In der zweiten Art lassen sich empirische und heuristische Prozessmodelle unterscheiden, die auf Regressionsanalyse [126] oder künstlichen Neuronalen Netzen [127] basieren, respektive Fuzzy-Logik nutzen. [125] Bei einigen Fertigungsprozessen ist die Modellerstellung aufgrund vieler abhängiger Variablen aufwendig, während die Ergebnisse nicht optimal und die Modelle invalid sind. [70] Der Fokus dieser Arbeit liegt auf induktiv gewonnenen empirischen Prozessmodellen, die zur Fehlererkennung und Ursachenanalyse dienen. Diese werden im Sinne von Data Mining (Kapitel 4.1) zur Wissensentdeckung (Kapitel 5.3.2 und 5.3.3) genutzt.

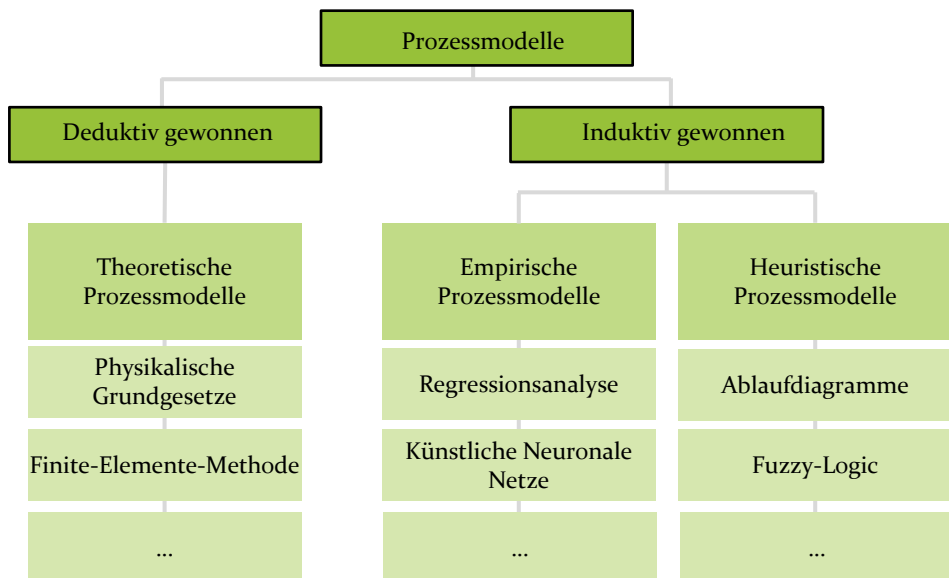


Bild 12: Prozessmodelle in der Fertigungstechnik [125]

2.3.5 Diskussion der konventionellen Prozessüberwachung

Nach einer kurzen Einführung in die Themenbereiche Prozessüberwachung durch Fenstertechnik und Hüllkurve sowie Maschinenfähigkeit, Six Sigma und modellbasierte Ansätze zeigen sich unterschiedliche Ziele und Einsatzgebiete. Tabelle 3 unterstreicht jedoch, dass Defizite in der Fehlererkennung, Unterstützung bei der Ursachenanalyse und vor allem der Sensibilität speziell im Umgang mit detailreichen Prozesskurven bestehen. Hierdurch ist die Verbesserung des Prozessverständnisses erschwert, da enthaltenes Wissen meist systematisch nicht beachtet wird oder nicht extrahierbar ist. Auch die Bewertung einer Prozesskurve anhand der Kurvencharakteristik, wie sie ein menschlicher Experte wahrnimmt, anstelle der vorherrschenden stützpunktbasierten Verfahren, ist weitgehend unbekannt.

Tabelle 3: Bewertung von Methoden zur Prozessüberwachung basierend auf eigenen Untersuchungen

Kriterium/ Methode	Fenstertechnik/ Hüllkurve	CP/ CP _K	SPC	Modell- basiert
Implementierungsaufwand	◐	◐	◐	●
Anpassungsaufwand	◐	◐	◐	●
Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse	●	●	●	◐
Stützpunktbasiert	●	●	●	●
Frequenzanalyse	○	○	○	◐
Musterbasiert	○	○	○	●
Erkennung systematischer Fehler	◐	○	◐	●
Überwachung detaillierter Prozesskurven	◐	○	○	●
Überwachung einzelner Kennwerte	○	●	●	◐
Überwachung innerhalb/außerhalb definierter Bereiche	○	○	○	●
Sensibilität	◐	◐	◐	●
Erkennung von Abweichungen bei Mittelwert oder Standardabweichung	○	○	◐	○
Fehlerklassifikation	◐	○	◐	◐
Unterstützung bei der Ursachenanaly- se	○	○	○	◐
● Hoch/Einfach möglich ● Gut/möglich ◐ Teilweise ◐ Gering/Selten ○ Nicht möglich				

2.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Basierend auf der wirtschaftlichen Relevanz und der starken Auswirkung auf den Unternehmenserfolg spielt die Beherrschung von Montageprozessschritten und komplexen Montageprozessketten eine wichtige Rolle. Aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren und der Anfälligkeit für

Störungen ist jedoch die Durchdringung komplexer Wechselwirkungen erschwert.

Eine Möglichkeit der Prozessbeherrschung ist die Überwachung einzelner Prozessdurchläufe und der Stabilitätsnachweis über die Zeit hinweg. Hierdurch ist eine Prozessdurchführung unter Störeinfluss bei geringer Anzahl fälschlicher Prozessunterbrechungen durch Fehlmeldungen erfolgreich realisierbar. Zusätzlich zum Informationsverlust durch innerhalb und außerhalb der meist manuell definierten Grenzwertbereiche bleiben Störungen mit geringer lokaler Auswirkung aufgrund der reduzierten Sensibilität durch zu groß gewählte Grenzen unentdeckt. Daher besteht großer Handlungsbedarf bei der Bereitstellung geeigneter Vorgehensweisen zur Ursachenanalyse einzelner Prozessschritte und komplexer Montageprozessketten.

Hierbei gestaltet sich die Anwendung konventioneller Methoden zur Ursachenanalyse als schwierig. Press- und Schraubverbindungen sind nicht zerstörungsfrei prüfbar und expertenbasierte Werkzeuge wie FMEA benötigen einen unwirtschaftlich hohen Aufwand zur Modellierung aller Störungsursachen und -auswirkungen von Einzelstationen und komplexen Montageprozessketten. Auch die Nutzung von Systemen zur Prozessüberwachung mittels Toleranzfenstern und Hüllkurven sowie SPC und C_p/C_{pk} adressiert nicht jegliche Einflussgröße und Wirkungskombination, die zu nicht-funktionsfähigen Erzeugnissen führen.

Schlussfolgernd ergibt sich, dass keine datengetriebene Ursachenanalyse existiert, welche eine Unterstützung für komplexe Montageprozessketten bietet. Gleichzeitig sind aktuelle Verfahren zur Prozessüberwachung nicht sensibel genug und berücksichtigen die Charakteristiken von Prozess- und Qualitätskurven nur indirekt und ungenügend. Abschließend ist das Verhalten von komplexen Montageprozessketten noch weitgehend unbekannt. Daher sind im folgenden Kapitel entsprechende Voruntersuchungen notwendig.

3 Voruntersuchungen zum Prozessverhalten von komplexen Montageprozessketten

Aufgrund der wirtschaftlichen Relevanz bei gleichzeitig gesteigerter Störanfälligkeit besteht ein hoher Bedarf für ein optimales Verständnis von komplexen Montageprozessketten. Das Verhalten dieser Systeme ist in der Forschung bisher weitgehend unbekannt. Speziell die Auswirkung von internen und externen Änderungen auf Prozess- und Qualitätsdaten sowie die resultierende Erzeugnisqualität sind jedoch entscheidend für ein hohes Prozessverständnis. Neben Chargeneinflüssen von Zuführteilen sowie Maschinen- und Werkzeugzuständen ist die Aussagekraft von abgeleiteten Kennwerten sowie von Prozess- und Qualitätskurven von hoher Relevanz. Das im Rahmen eigener Voruntersuchungen experimentell ermittelte Prozessverhalten und die Eigenheiten komplexer Montageprozessketten sowie darin eingebundener einzelner Prozessschritte stellen daher den Schwerpunkt dieses Kapitels dar. Unterschiedliche Arten und die Stärke der Auswirkung von externen und werkzeugbedingten Störeinflüssen sowie die Prozesscharakteristiken von Einzel- und parallelisierten Prozessschritten sind Gegenstand der Untersuchungen. Gleichzeitig wird die Relevanz des Fertigungsweges von Erzeugnissen durch komplexe Montageprozessketten verdeutlicht. Weiterhin sind die Möglichkeiten und Grenzen von Zeitreihenanalysen sowie die Aussagekraft von Kennwerten und Prozesskurven zu diskutieren. Insgesamt wird die Frage adressiert, welche kritischen Informationen indirekt und datengetrieben aus den vorhandenen Prozessdaten extrahierbar sind. Die Grundlagen der dargestellten Erkenntnisse sind angelehnt an die vom Autor betreuten und am Lehrstuhl FAPS entstandenen studentischen Arbeiten [S1-22].

3.1 Die untersuchten MPK montieren Aktoren für die Automobilindustrie

Das Ziel der betrachteten Endmontagelinien AKTOR₁ und AKTOR₂ ist der Zusammenbau elektromagnetischer Aktoren in großer Stückzahl für die Automobilbranche. Deren Prozessschrittfolgen sind in Bild 13 und Bild 14 dargestellt. Im Rahmen der Erprobung wird hauptsächlich die Montage von Gehäuse und der Magnetbaugruppe betrachtet, aufgrund deren

Einfluss auf den magnetischen Fluss und damit die resultierende Kraft des Aktors als funktionsrelevantes Merkmal. Ebenso ausschlaggebend ist die Lage und Amplitude der Flusskennlinie. Unter regulären Prozessbedingungen spielen weitere Effekte nur eine untergeordnete Rolle, während sich Abweichungen in Prozess, Lage oder Geometrie auf Luftspalte und damit den magnetischen Fluss auswirken.

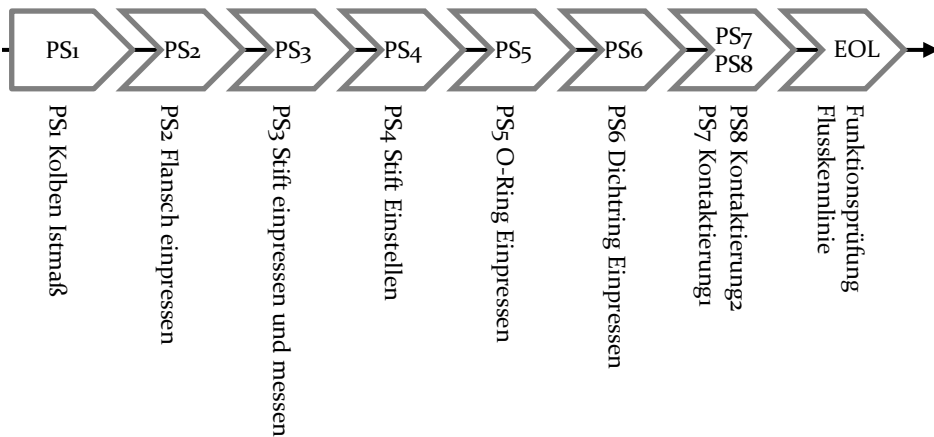


Bild 13: Montageprozesskette AKTOR₁

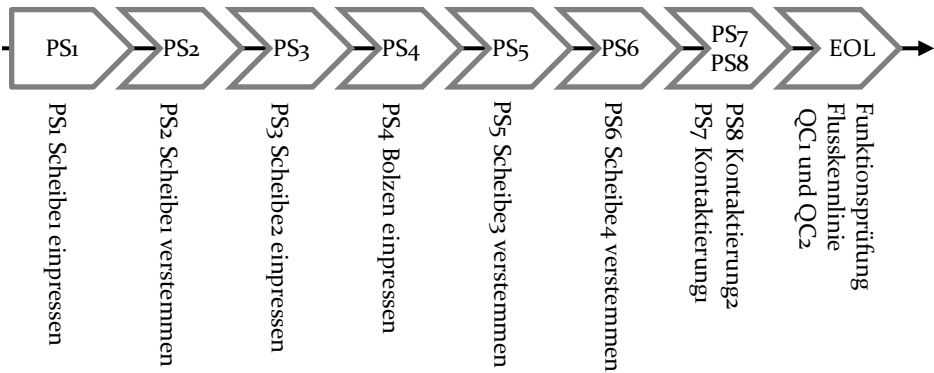


Bild 14: Montageprozesskette AKTOR₂

3.2 In Montageprozessen existiert eine Vielzahl Fehlereinflüsse nach 5M

Neben unzähligen Einflussgrößen auf die Labormesstechnik [159] und die automatisierte Fertigungsmesstechnik [160] durch Umwelt, Bediener, Messgerät und Kalibrierteil ergeben sich zusätzliche, meist unkontrollierbare Störeinflüsse in großer Anzahl [4] durch mangelnde Komponentenqualität, Verschmutzung der Einzelteile und Werkzeugzustand bei der Betrachtung von Montageprozessen. Nicht-trivial zu durchschauende Wechselwirkungen zwischen Eingangsgrößen durch ungeplante Spannungsverteilung im Bauteil und abweichende Geometrien erschweren die Analyse, neben weiteren Effekten durch Bauteiltoleranzen [161], Chargenunterschiede [129] und Prozessabläufe. [4] Weiterhin sind Störungen ein großes Hindernis bei der eigentlichen Ursachenanalyse, wie in Kapitel 2.1.4 beschrieben. Zusätzlich zu berücksichtigen sind zeitliche [59] Veränderungen von Störeinflüssen und bekannten Einflussgrößen, die sich auf Montage- und Messprozesse auswirken sowie zu einer a-posteriori-Verteilung führen [60]. Nachfolgendes, nicht erschöpfendes Ishikawa-Diagramm in Bild 15 verdeutlicht die unüberschaubare Vielzahl an Störfaktoren.

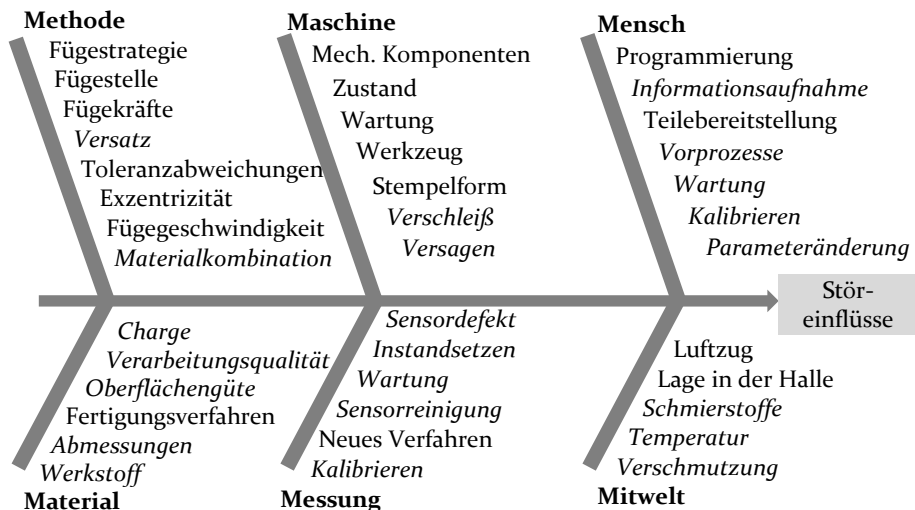


Bild 15: Nicht-erschöpfendes Ishikawa-Diagramm für Montageprozesse am Beispiel Fügen durch Einpressen

3.3 Das Prozessverhalten in MPK unterliegt Störungen, Wechselwirkungen und Signalfortpflanzung

Aufgrund der unüberschaubaren Anzahl an teilweise unbekannten Störquellen stehen MPK einer komplexen Situation gegenüber, während Prozessüberwachungen nur definierte Zustände betrachten und im Sinne von 5M ausschließlich die Durchführung der Methode überwachen. Alle anderen M sind regulär über organisatorische Maßnahmen sicherzustellen. Die qualitätssichernden Prozesswerte und deren Verfahren sind jedoch nicht ausreichend, um unbekannte oder nicht berücksichtigte Fehler in Montageprozessketten aufzudecken. Hierbei handelt es sich um ein systemimmanentes Problem, weil jeder Prozessschritt unter der Annahme voll definiert wird, dass Anomalien detektiert werden. Daher sind Werkzeuge notwendig, die auch in den Bereichen Mensch, Maschine, Mitwelt, Material und Messung erkennen, dass Abweichungen auftreten - gerade wenn die eng tolerierten Eingriffsgrenzen einen erfolgreichen Prozessdurchlauf modellieren.

Ausgangspunkt der Untersuchungen und entwickelten Methoden in dieser Arbeit ist die Nutzung von Änderungen in Datensätzen zur Überwachung und Analyse von einzelnen Prozessschritten und komplexen Montageprozessketten. Kennwertbasierte Prozessänderungen manifestieren sich im Rahmen diskreter Fertigungsprozesse datentechnisch durch Mittelwertänderungen oder -sprünge und Veränderung der Prozessstreuung (Abschnitt 3.5), wobei die Ursachen solcher Änderungen in MPK meist unabhängig [59] voneinander sind. Einzelwerte in einer konventionellen Prozessregelkarte beschreiben das komplexe Prozessverhalten von einzelnen Prozessschritten und komplexen Montageprozessketten daher nur unzureichend. Gerade wenn Prozesse innerhalb der definierten Grenzwerte unerwartetes Verhalten zeigen, wird dies systematisch nicht beachtet (siehe Kapitel 2.3.1). Für die spätere Funktionserfüllung entscheidende, aber für die Prozessüberwachung zu geringe Änderungen deuten auf geänderte Umgebungsbedingungen und Störgrößen hin, wie die folgenden Untersuchungen belegen. So manifestieren sich die Kalibrierung eines Werkzeugs in einer Mittelwertverschiebung und ein Werkzeugwechsel im Streuverhalten. Speziell parallelisierte Prozessschritte in Montage und Funktionsprüfung (Abschnitt 3.9) sowie geänderte Maschinenzustände oder Zuführchargen (Abschnitt 3.6) führen zu einer schwer zu analysierenden zwei- oder mehrgipfeligen Häufigkeitsverteilung (dieser Abschnitt). Hierbei liegen die Prozessergebnisse nicht in einer einzigen Verteilung vor, sondern

weisen zwei oder mehr eigenständige Gruppen innerhalb der multimodalen Verteilung auf. Eine Übersicht der untersuchten Änderungen zeigt Tabelle 4. Kritisch bleiben datentechnisch nicht erfasste Änderungen in einzelnen Prozessschritten mit schadhafter Auswirkung auf die Funktionserfüllung des montierten Erzeugnisses, die jedoch entweder durch erweiterte Sensorik oder den menschlichen Anlagenbediener zu erschließen sind.

Tabelle 4: Untersuchte Änderungen im Prozessverhalten von einzelnen Prozessschritten und MPK

Art	Kenngröße	Änderung	Mögliche Ursache
Kennwert	Mittelwert	Trend	Verschleiß
		Sprung	Werkzeugbruch
	Streuung	Sprung	Zuführcharge
	Häufigkeitsverteilung	zweigipfelig	Zuführcharge, parallelisierter Prozessschritt
		mehrgipfelig	Kombination mehrerer Faktoren
Prozesskurve	Startpunkt	Verschiebung	Kalibrierung, Positionierung
	Amplitude	Zu-/Abnahme	Pressüberdeckung
	Steigung	Zu-/Abnahme	Pressüberdeckung
	Welligkeit	Zu-/Abnahme	Schmierung

Für die Quantifizierung der Änderungshäufigkeit der komplexen Montageprozesskette AKTOR_i dient der Fluss-Kennwert der Funktionsprüfung als Indikator. So sind in einem Jahresverlauf 1.647 schadhafte Events mit erhöhter Fehlerquote aufgetreten. Zu beachten ist auch die geplante Herbeiführung einer Änderung durch Rüsten, Kalibrieren und Parameteranpassung, weil sich diese in den Kennwerten eines einzelnen Prozessschritts manifestieren. Im Fokus dieser Arbeit sind jedoch geplante und ungeplante Veränderungen mit negativer Auswirkung auf den geprüften Funktionserfüllungsgrad der Erzeugnisse. Die Identifikation von Ereignissen mit guten, irrelevanten sowie schadhafte Änderungen

gen auf die Funktionserfüllung des montierten Erzeugnisses erfolgt in Kapitel 6.2.2.

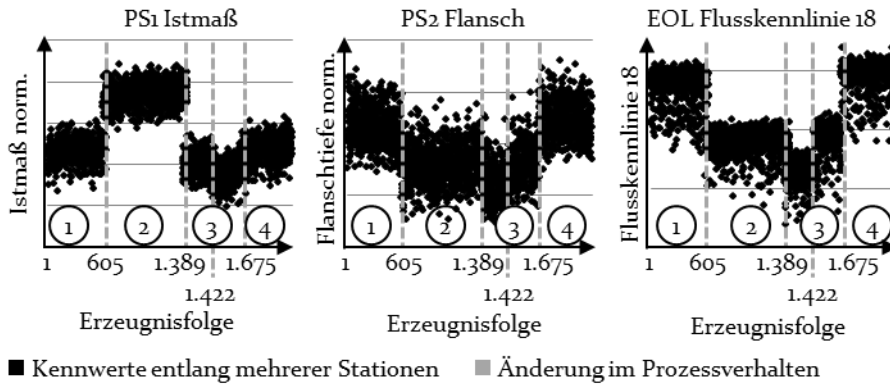


Bild 16: Signalfortpflanzung innerhalb der Montageprozesskette AKTOR₁ mit hervorgehobenen Änderungen

Die Abhängigkeiten und Auswirkungen von Änderungen manifestieren sich zunächst in Kennwerten innerhalb eines Prozessschritts oder prozessschritt-übergreifend. Anschließend wirken sie sich unmittelbar von einem gemessenen Montagekennwert auf ein Funktionsmerkmal oder Fehlerbild aus. Unabhängig von der Signalfortpflanzung sind solche Wirkmechanismen datentechnisch entlang einer komplexen Montageprozesskette aufzuzeigen. Bild 16 zeigt die Fortpflanzung des Signals eines Werkzeugbruchs an Montagestation PS₁ zu Erzeugnisnummer 605 (Abschnitt 2) entlang der betroffenen Montagestationen PS₁ und PS₂ der starr verketteten Montagelinie AKTOR₁, die sich anhand der Erzeugnisreihenfolge auf Kennwert PS₁ Flanschtiefe und den Qualitätskennwert EOL Flusskennlinie 18 auswirkt. Der scheinbare Wirkzusammenhang lässt sich jedoch ausschließlich als Änderung detektieren, weil keine direkte Wirkbeziehung besteht. Bild 17 zeigt hierzu den dramatisch anderen Zusammenhang von Montageprozess PS₁ und dem geprüften Funktionserfüllungskennwert Flusskennlinie 18 anhand einer regulären, nicht-differenzierenden sowie einer abschnittsweise durchgeführten Regressionsanalyse.

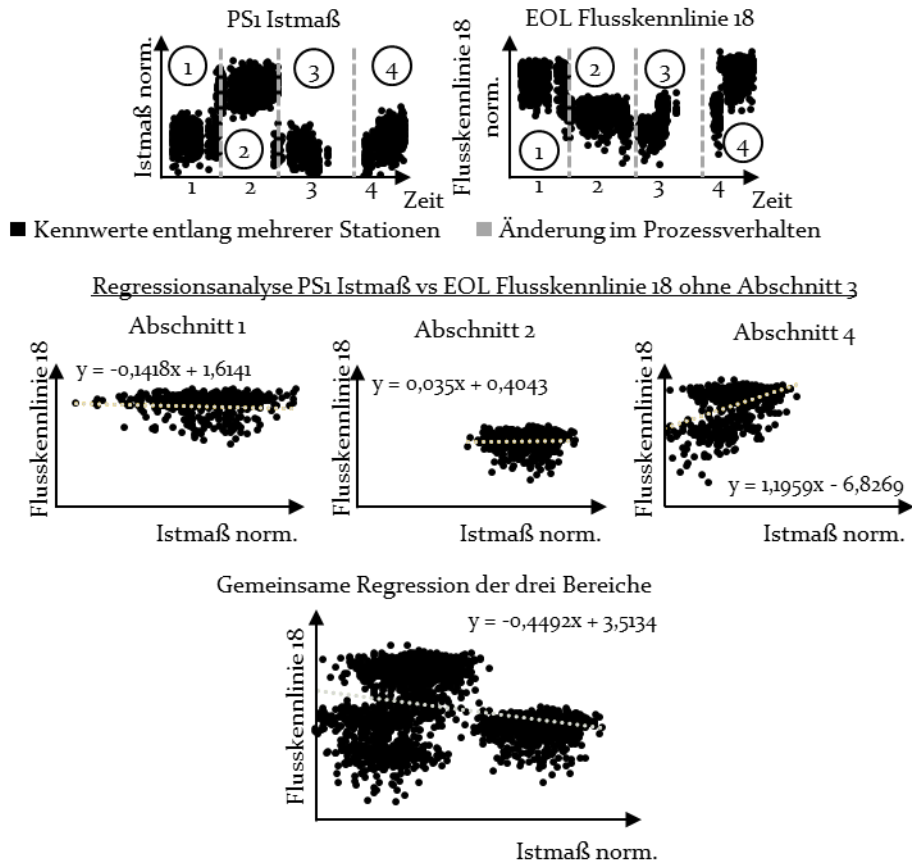


Bild 17: Regressionsanalyse bei schadhaftem Prozesszustand

Schematisch zeigt Bild 18 interne und übergreifende Ursache-Wirkungsbeziehungen, wobei diese auf unterschiedlichste Arten auftreten: Innerhalb des gleichen Prozessschritts, dem Montageabschnitt mit den gleichen beteiligten Komponenten, bereichsübergreifend mit unterschiedlichen Komponenten und von der Montage auf die Funktionserfüllung.

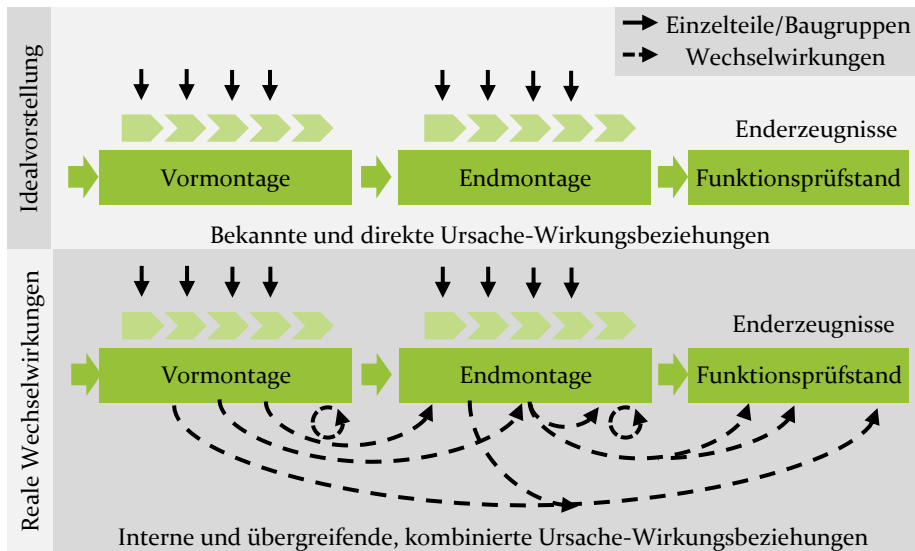


Bild 18: Bekannte und direkte (oben) sowie interne und übergreifende Ursache-Wirkungsbeziehungen in MPK

Einflüsse von eingebrachten Störungen und gleichzeitig aktiven Effekten an einem einzelnen Prozessschritt zeigt Bild 19. Ausgehend von einem geänderten Parameter betreffend Material, Temperatur, Winkel, Oberflächengüte, Beölungszustand und einer eingebrachten Verschmutzung durch Quarzsand ist die Veränderung im Kennwert „Maximale Kraft“ zu sehen. Die durchgeführten Versuche mittels statistischer Versuchsplanung sind in Kapitel 7.1 beschrieben. Aufgrund der starken Überschneidung der Streubereiche ist eine triviale Unterscheidbarkeit nicht immer gegeben, speziell bei geringen Auswirkungen der Faktoren.

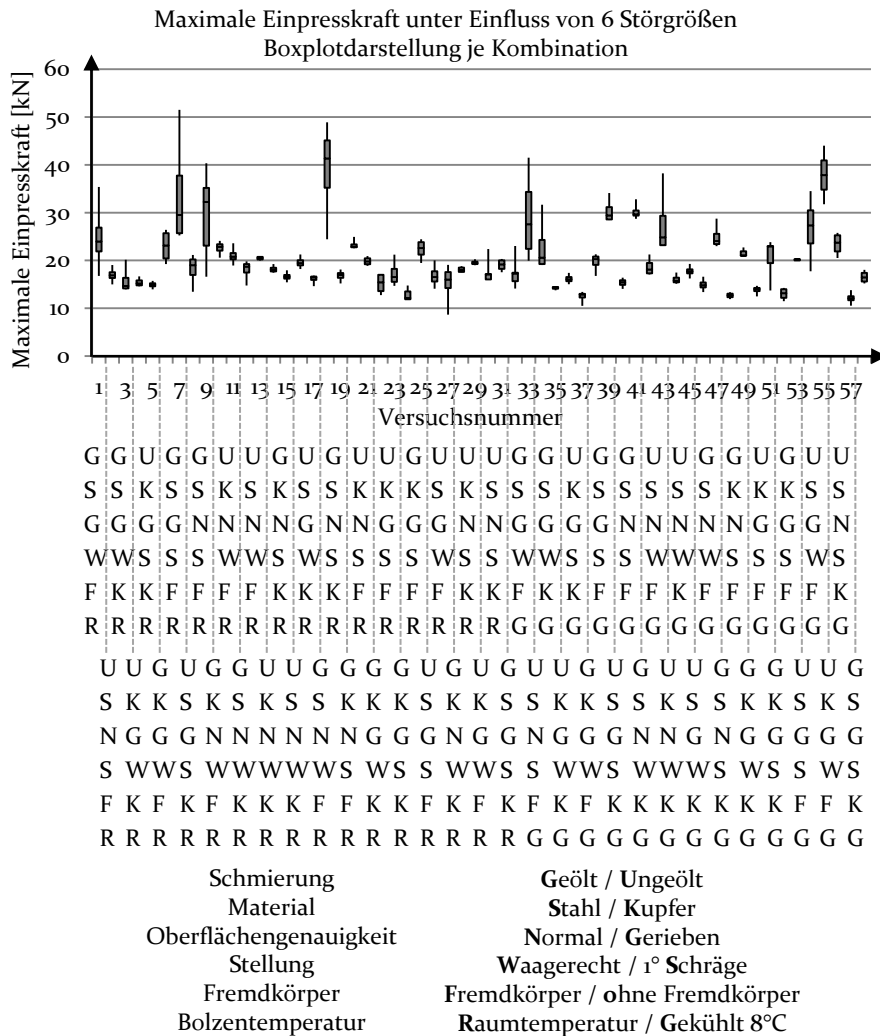


Bild 19: BoxPlot-Darstellung von Einpressversuchen unter Störeinfluss

Besonders zu beachten bei datengetriebenen Analyseansätzen ist, dass Änderungen zunächst nur datentechnischer Natur und daher nicht zwangsläufig physikalisch relevant sind. Ohne eine solche Überprüfung zeigt ein neu kalibriertes Messmittel datenseitig eine Änderung, die jedoch nicht von den Eigenschaften der gemessenen Komponenten begründet liegt. Eine entsprechende, notwendige Datenerhebung und Prüfung gestaltet sich im Produktionsumfeld meist als nicht wirtschaftlich oder sogar technisch nicht realisierbar. Gleichzeitig ist es während der Durchführung der Analyse sinnvoll, anfangs unlogische Muster nicht

zu verwerfen, weil diese einen Hinweis auf bisher unbekannte Störungen und Auswirkungen enthalten. Diesen Umstand adressiert Kapitel 6.2.2.

Aufgrund der hohen Relevanz des zeitlichen Verhaltens von Störungen wird im Folgenden die Effektivität einer Zeitreihenanalyse diskutiert.

3.4 Zeitreihenbetrachtungen in MPK sind nicht zwingend signifikant in der Ursachenanalyse

Zeitreihenanalysen zeigen Trends, Sprünge und anormale Prozessabläufe auf und ermöglichen Vorhersagen des weiteren Prozessverhaltens. [128] Jedoch sind einzelne Prozessschritte in komplexen Montageprozessketten stetig nicht vorhersagbaren Störeinflüssen ausgesetzt, wie in Kapitel 2.1.4 erörtert. Eigene Voruntersuchungen in den MPK AKTOR₁, AKTOR₂ und weiteren Montagelinien zeigen nur temporär stationäres Prozessverhalten, welches rein auf Basis lokal verfügbarer Stations- und Prozessdaten nur selten auf schadhafte Zustände schließen lässt. Speziell bei Änderungen innerhalb der gegebenen Grenzwerte ist deren Projektion auf physikalische Einflüsse meist erfolglos. Prozessregelkarten für einzelne Prozessschritte oder gar einzelne Kennwerte erkennen die meisten Prozessänderungen richtigerweise als konform. Jedoch ist die Erkennungswahrscheinlichkeit von schadhaften Effekten auf die Erzeugnisqualität bei akuten, qualitätsbeeinflussenden Prozessänderungen in der Montage sehr gering bis nicht gegeben.

Bild 20 zeigt den Prozessverlauf des gemessenen Kennwertes Istmaß als Prozessschritt der MPK AKTOR₁, aus dem eine dreimalige Mittelwertverschiebung ersichtlich ist. Die erfassten Werte befinden sich nahezu mittig innerhalb der Grenzwerte und führen normalerweise zu funktionierenden Erzeugnissen. Aufgrund eines falsch beschrifteten Kalibrierteils resultiert jedoch eine sehr hohe Ausschussquote im Rahmen der Funktionsprüfung. Die zweite Veränderung bezüglich der Streuung durch einen Werkzeugwechsel weist keine schadhafte Auswirkung auf die Qualität auf. Auch der letzte Abschnitt mit abweichendem Mittelwert und Streuung zeigt in den Qualitätsergebnissen keinerlei Auffälligkeit. Hier bleibt die Nutzung einer Regelkarte vergebens, sie erkennt zwar Sprünge und weitere Regelverletzungen, jedoch in guten wie schlechten Bereichen gleichermaßen. Daher ergibt sich das Problem, dass Änderungen an den Kennwerten von Montagestationen nicht signifikant für Erzeugnisdefekte sein müssen.

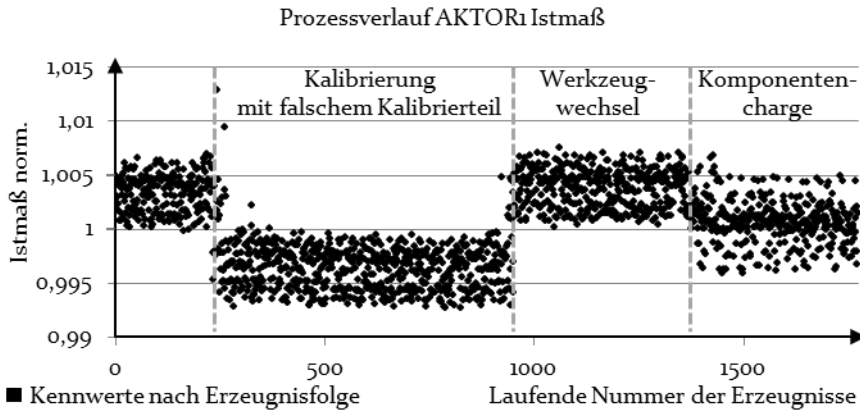


Bild 20: Zeitreihenanalyse eines Kennwerts

Neben dem zeitlichen Verhalten von Prozesskennwerten ist auch die Aussagekraft von Prozesskurven und Kennwerten wichtig. Sie wird im folgenden Abschnitt thematisiert.

3.5 Prozesskurven und Kennwerte reagieren auf Material, Werkzeug und Handhabung

Generell bieten Kennwerte im Rahmen der Prozessüberwachung viele Vorteile, wie eine einfache Auswertung mittels Prozessbetrachtung und gute Erkennbarkeit von Änderungen im Prozessverhalten. Nachteilig ist, dass solche Abweichungen nur erkennbar sind, wenn sie an der richtigen Stelle mit ausreichender Ausprägung auftreten (Kapitel 2). Gleichzeitig ist die Reduktion einer Prozesskurve auf einen oder mehrere Kennwerte meist mit Informationsverlust verbunden. Dagegen erlaubt die Nutzung von Prozesskurven nicht nur die Erkennung feiner Abweichungen innerhalb der Prozessstreuung, sondern auch über den gesamten Prozessverlauf hinweg. Dies kann jedoch zu Informationsüberflutung, Detektion irrelevanter Abweichungen und Bevorratung redundanter Informationen führen.

Prozesskurven in Montageprozessen unterliegen physikalischen Grenzen und Wechselwirkungen mit Methode, Mensch, Mitwelt, Material und Maschine. Hierbei zeigen sich Abweichungen der Kurven in den folgenden Bereichen:

- Start- und Endpunkt sowie Prozesslänge,
- Amplitude und Phase,

- Kurvenverlauf und -merkmale,
- Länge der einzelnen Prozessphasen.

Bild 21 zeigt drei Fehlerfälle an unterschiedlichen Montageprozessen, die auf Zuführteile, Werkzeugdefekt oder falsch positionierte Fügepartner zurückzuführen sind. Aufgrund der stark heterogenen realen Veränderungen und den resultierenden Prozesskurven ist eine erweiterte Prozessanalyse wie in Kapitel 5 beschrieben notwendig.

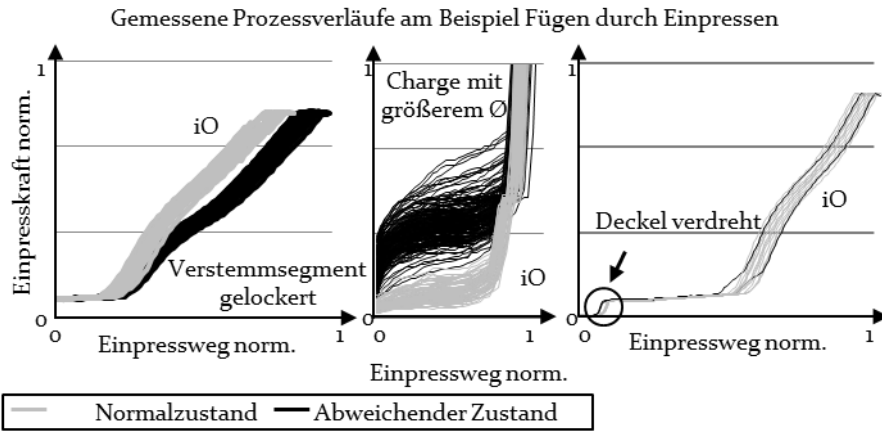


Bild 21: Prozesskurven mit lockerem Werkzeugsegment (links), Zuführteilen mit abweichender Geometrie (Mitte) und Orientierungsfehler (rechts)

3.6 Einflüsse durch Material zeigen sich nur indirekt bei fehlender Datendurchgängigkeit

Die Identifikation von Zuführteilen spielt eine wichtige Rolle bei der Ursachenanalyse von Fehler- und Ausschussteilen, jedoch stellt bereits die sinnvolle Nummerierung von Komponentenchargen eine Herausforderung dar. [129] Aufgrund des erwarteten Einflusses von Komponenten ohne mitgelieferte Messdaten auf den lokalen Montageprozessschritt und die Qualität des finalen Erzeugnisses ist die Frage adressiert, welche Informationen zusätzlich aus Montageprozessen gewinnbar sind. Ausgehend von den Prozessdaten einer Station zeigen zwei unterschiedliche Vorgehensweisen erfolgreich zunächst den Zusammenhang zwischen Charge und Prozessstreuung sowie per Boxplot-Darstellung die Änderung der Komponentencharge an. Bild 22 zeigt, dass es möglich ist, Chargenwechsel entweder zu detektieren oder explizit nachzuweisen, sofern keine weiteren starken Prozessstöreinflüsse in den betrachteten, zeitlich begrenzten Abschnitten vorkommen. Kritisch ist anzumerken, dass die

indirekte Detektion von Chargenwechseln nur als Indiz und nicht als Beweis, wie mittels expliziter Chargenprotokollierung, zu sehen ist. Speziell Wechselwirkungen und geänderte Systemzustände sowie Störeinflüsse verfälschen das Ergebnis stark. Praktisch nutzbar ist die Möglichkeit zur Korrelation zwischen dem Ablieferzeitpunkt aus dem Lager und dem effektiven Einbringen der neuen Komponentencharge in das Montagesystem dennoch, sofern sich Chargenänderungen signifikant durch Änderung der Varianz oder Mittelwertverschiebung äußern. Weiterhin ist sogar die datengetriebene Separierung einer Charge auf unterschiedliche Produktionsmaschinen und veränderte Werkzeugzustände denkbar, sofern die Ladungsträger jeweils von einer Fertigungsmaschine exklusiv befüllt sind oder die Zuführung seriell stattfindet.

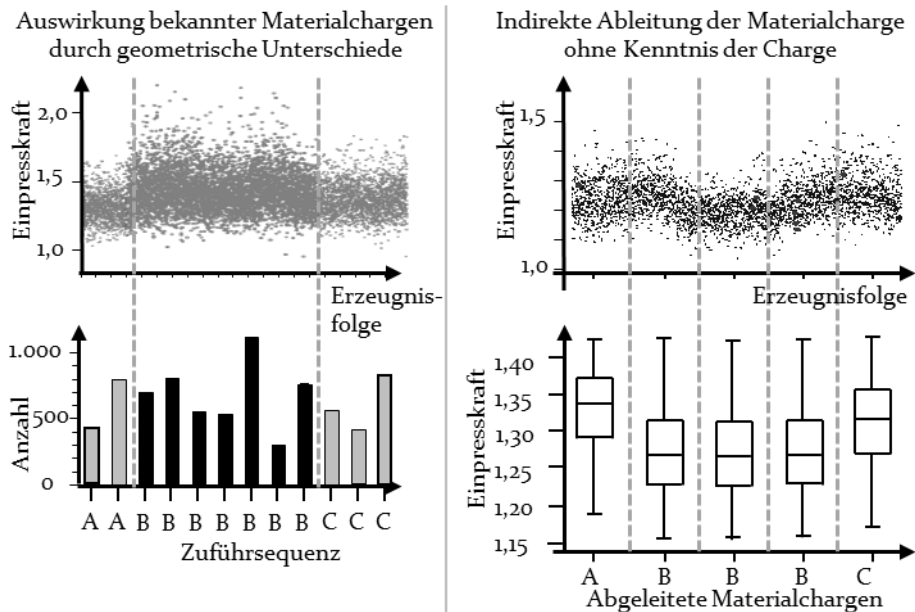


Bild 22: Einfluss und indirekte Ermittlung der Materialcharge

3.7 Änderungen an Werkzeug und Messmittel wirken sich unmittelbar auf den Funktionserfüllungsgrad aus

Im Rahmen dieser Voruntersuchungen durchgeführte Nachforschungen während und nach gelösten Fehlerfällen an mehreren Montagelinien weisen stark unterschiedliche Auswirkungen durch Werkzeug- und Messmitteleinfluss auf. Bild 23 zeigt zwei Fälle von Prozessänderungen

durch Werkzeugbruch und ein Messmittel mit abweichenden Ergebnissen aufgrund eines Staubkorns an der Messspitze. In beiden Fällen zeigt die Darstellung des Prozessverlaufs den jeweils ursächlichen Montageprozess, dessen verändertes Verhalten sehr viele nicht-funktionierende Erzeugnisse (schwarz) generiert, trotz Einhaltung aller Grenzwerte während der Fügeoperation. Problematisch ist, dass beide Einflüsse nicht durch die lokalen Prozessüberwachung aufgrund eingehaltener Toleranzwerte sowie durch eine Prozessregelkarte erkennbar sind. Wegen einer fehlenden Rückkopplung der Qualitätsprüfung auf die Prozesskennwerte ist die Ursachenanalyse stark erschwert.

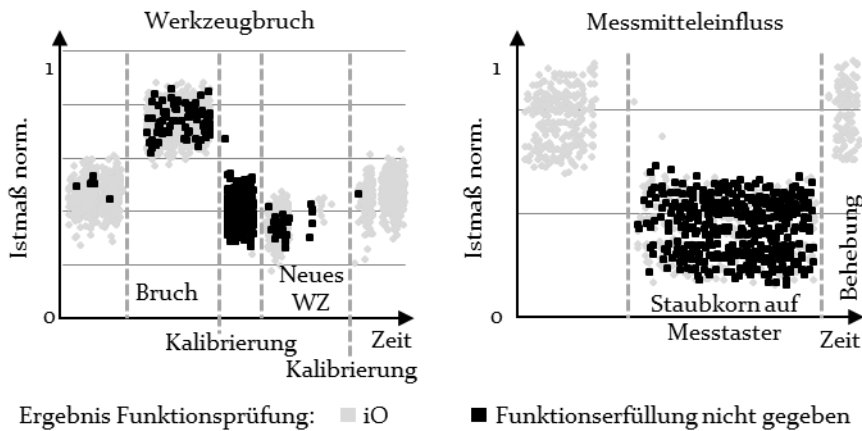


Bild 23: Geändertes Prozessverhalten durch Störung an Werkzeug (links) und Messmittel (rechts)

Als Grundlage für datengetriebene Analysen zur Aufdeckung von Einflüssen durch Werkzeugzustand und Messmittel mit schadhafte Effekten auf die Erzeugnisqualität müssen sich die Veränderungen auf Prozess- und/oder Qualitätsdaten auswirken. Im Rahmen dieser Arbeit steht abweichendes Prozessverhalten speziell innerhalb der Toleranzgrenzen im Fokus. Weitere vom Autor untersuchte Fälle, auf die jedoch nicht weiter im Rahmen dieser Arbeit eingegangen wird, zeigen prozessübergreifende Auswirkungen von einem Montageprozessschritt auf den Werkzeugverschleiß eines nachgeschalteten Fertigungsprozesses [S10]. Weiterhin sind Analysen zu Handhabungsproblematiken in einer Sicherungsfunktion des Bauteils während des Prozessdurchlaufs [S1] sowie starken Auswirkungen von beeinträchtigten Messmitteln auf die Prozessqualität [S1] und die erfolgreiche Detektion eines alternativen Schraubprozessablaufs anhand des Motorstroms [S5] erfolgt.

3.8 Eingebachte Störungen sind nur schwer differenzierbar

Direkt auf Prozessebene ergeben sich alternative Prozessverläufe und qualitätsrelevante Prüfkurven. Einerseits zeigen sich beim Fügen durch Einpressen Kurvenverläufe mit geringem und hohem Kraftniveau. Gleichzeitig treten Abweichungen auch in unterschiedlichen Prozessphasen auf, wodurch die Überlagerung mehrerer Kurven nur die absolute Streuung zeigt und keine Rückschlüsse auf schadhafte Merkmale einer Prozesskurve zulässt. Dies gilt auch für Drehmomentkurven von Schraubvorgängen. Bild 24 verdeutlicht diese Aussage anhand mittels DoE generierter Einpresskurven und feldorientiert gewonnener Schraubverläufe. Einerseits liegen die Drehmomentkurven trotz definiert eingebrachter Störungen innerhalb der natürlichen Streuung von 1.000 regulären Verschraubungen. Andererseits weisen die Einpresskurven eine große Streuung und stark abweichende Verläufe auf. Daher ist in beiden Datensätzen eine triviale Unterscheidbarkeit anhand der einzelnen Kennwerte maximale oder durchschnittliche Kraft/Drehmoment nicht gegeben.

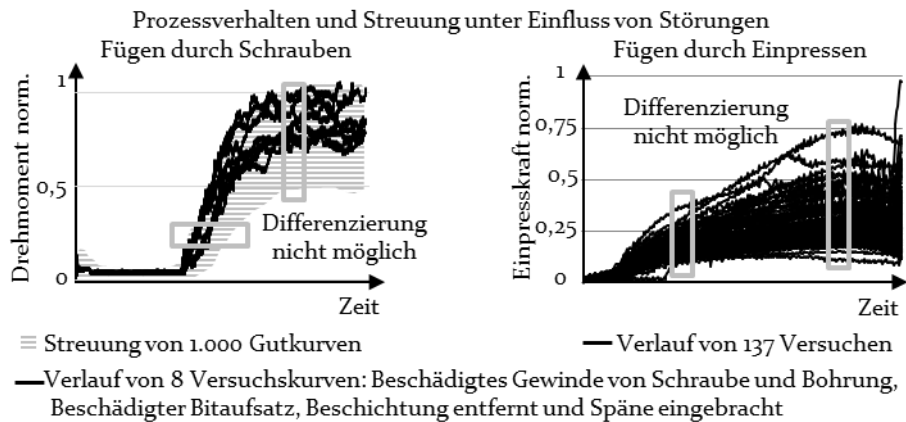


Bild 24: Streuung guter und gestörter Schraubversuche (links) sowie der durchgeführten Einpressversuche (rechts)

Insgesamt besteht das Problem, dass sich verschiedenste Störeinflüsse komplett innerhalb der Prozessstreuung von erfolgreichen Prozessverläufen manifestieren. Zusätzlich ist eine der Ursachen in der Toleranzauslegung des Prozesses zu finden, weil hierbei die maximale Varianz der Fügepartner (Paarung groß/klein, klein/groß) berücksichtigt wird, um einen störungsfreien Ablauf zu gewährleisten. Lösungsvorschläge zur

feinen Unterscheidung von Prozesskurven sind in Kapitel 5.3 vorgeschlagen und diskutiert.

3.9 Fertigungswege in MPK entstehen durch parallelisierte Prozessschritte

Neben Störungen und unbekannten Einflüssen an einzelnen Prozessschritten ergeben sich weitere Problemstellungen durch parallelisierte Prozessschritte und den Fertigungsweg entlang komplexer Montageprozessketten. Durch den Vergleich von Prozessdaten von parallelen Prozessschritten sind Kalibrierfehler und suboptimale Parametereinstellungen sowie unterschiedliche Maschinen- und Werkzeugzustände aufzeigbar. Bild 25 zeigt jedoch, dass dies nicht-trivial erfolgt und durch differenzierte Analyse erst zu erarbeiten ist.

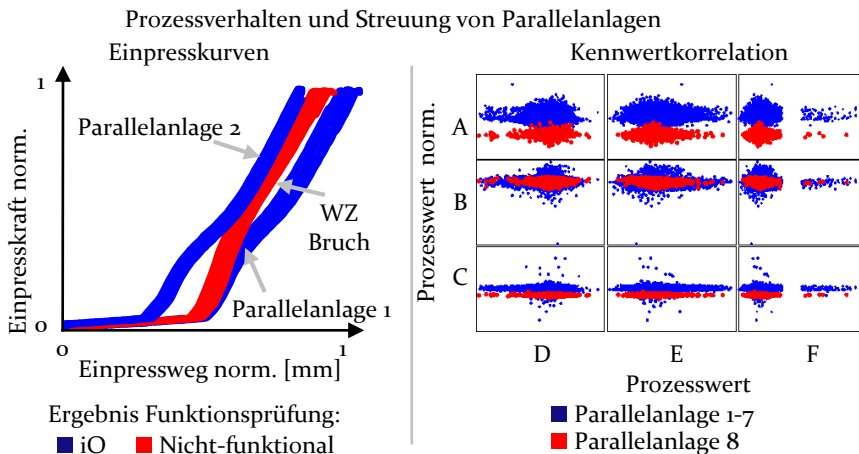


Bild 25: Verhalten von parallelisierten Einzelprozessschritten

Kombinierte Fehlerursachen treten in komplexen Montageprozessketten auf unterschiedliche Arten auf. Einerseits hat die Paarung der Fügepartner einen starken Einfluss auf den Prozessablauf, während geometrische Eigenschaften der Bauteile aus unterschiedlichen Chargen, parallelisierten Prozessschritten, Fertigungsverfahren oder von mehreren Zulieferunternehmen problematisch sind. Andererseits kann der Fertigungsweg von Erzeugnissen durch die Montageprozesskette eine schadhafte Kombination von zwei oder mehreren Faktoren tangieren. So kann ein aufgetretener Werkzeugbruch am ersten parallelen Prozessschritt von den meisten Folgeprozessschritten durch genügend Spiel ausgeglichen werden. Erst

ein Winkelversatz an einem folgenden parallelisierten Prozessschritt verhindert die Erzeugung eines ausreichenden Funktionserfüllungsgrads. Bild 26 zeigt vier parallele Fertigungspfade, die sich bereits durch den Einsatz von nur zwei parallelisierten Prozessschritten ergeben.

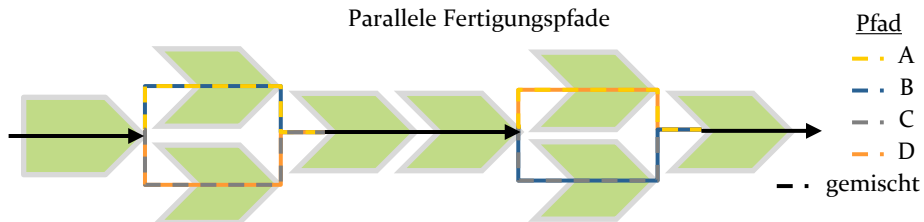


Bild 26: Fertigungspfade in MPK aufgrund parallelisierter Prozessschritte

Problematisch ist hierbei einerseits, dass Vorschädigungen innerhalb der Prozessgrenzen oder gar der Prozessstreuung auftreten. Sie sind daher nur schwer zu entdecken. Andererseits wird die Anzahl von Defektteilen konventionell erst in den Funktionsprüfständen ermittelt, ohne Möglichkeit zur Unterscheidung des Fertigungsweges. Daher ist bereits die Sichtbarkeit der Auswirkung kaum gegeben, weil die Fehlerquote des betroffenen Pfades durch eine Gesamtbetrachtung aller Pfade verwässert wird.

3.10 Erkennbarkeit von Einfluss- und Störgrößen ist bei Kennwertbetrachtung kaum gegeben

Ausgehend von den unterschiedlichsten eingebrachten Änderungen und Störungen zeigt sich, dass sich diese gleichermaßen auf den Mittelwert sowie die Streuung von Kennwerten auswirken. Sofern sie sich im zugrundeliegenden Erkennungsverfahren innerhalb des überwachten Bereichs oder außerhalb kritischer Merkmale befinden, sind detailreiche Prozesskurven vorzuziehen. Entscheidend bleibt jedoch die Frage, welche Einflüsse datengetrieben erkennbar sind. Die vorangegangenen Untersuchungen und die Bewertung in Tabelle 5 zeigen, dass sich einige Effekte stärker auswirken als andere, teilweise auch an unterschiedlichen Stellen des Prozessablaufs. Aufgrund der großen Datenmengen sind jedoch automatisierbare und automatisierte Vorgehensweisen notwendig, welche den Anwender bei der Identifizierung von neuem Wissen in den Datensätzen unterstützen.

Tabelle 5: Bewertung der datengetriebenen Erkennbarkeit unterschiedlicher Einfluss- und Störgrößen anhand eigener Untersuchungen

Einfluss- und Störgrößen	Kennwert	Kennwertverlauf	Prozesskurve
Werkzeugdefekt	●	●	●
Geometrie von Zuführteilen	●	●	●
Zuführteilecharge	●	●	●
Handhabung	●	●	●
Störgrößen	●	●	●
Alternativer Kurvenverlauf	●	●	●
Parallelisierte Prozessschritte	○	●	○
Fertigungsweg	○	○	●
Signal- und Fehlerfortpflanzung	●	●	●
Wirkmechanismen	●	●	●
Erkennung ● Hoch/Einfach möglich ● Gut/möglich ● Teilweise ● Gering/Selten ○ Nicht möglich			

Insgesamt wirken jedoch im realen Betrieb eine unüberschaubar große Anzahl unterschiedlichster Störungen und unbekannter Änderungen auf Montageprozessketten ein. Die hier aufgezeigten Problemstellungen entstehen hauptsächlich in den Kategorien Chargeneinflüsse, Bedienfehler und Maschineneinflüsse. Gleichzeitig wirken sie sich mindestens lokal im betroffenen einzelnen Prozessschritt oder über eine komplexe Montageprozesskette bis hin zur Funktionsprüfung der Erzeugnisse aus. Daher ist die Entwicklung datengetriebener Vorgehensweisen zur Detektion gerade unbekannter Einflüsse entscheidend.

3.11 Zusammenfassung und Handlungsbedarf

Ausgehend von einer hohen Anzahl schadhafter Events und deren wirtschaftlichen Auswirkungen spielt die prozessschritt-übergreifende Ursachenanalyse in Montageprozessketten eine wichtige Rolle. Die Ergebnisse der Voruntersuchungen zeigen, dass aufgrund der unüberschaubar großen Anzahl unterschiedlichster Einflüsse und Störgrößen

durch Methode, Material, Messung, Mitwelt und Maschine bereits Analysen von einzelnen Prozessschritten erschwert sind. Gleichzeitig sind auf Prozessebene meist unbekannte Gruppenzugehörigkeiten in Montage- und Prüfabläufen vorhanden, die erst nach Grenzwertverletzung Beachtung finden. Weiterhin ist in komplexen Montageprozessketten eine differenzierte Analyse von parallelisierten Prozessschritten und Fertigungsweg je Erzeugnis essenziell, um kritische Änderungen richtig zu erkennen, anzuzeigen, einzugrenzen und abzustellen.

Die Ergebnisse einzelner Voruntersuchungen zeigen, dass sich Änderungen von einem Einzelprozessschritt auf nachfolgende Montageprozessschritte oder den Funktionserfüllungsgrad auswirken. Im Sinne der datengetriebenen Analyse ist entscheidend, welcher Datensatz und Parameter die notwendigen Hinweise enthält. So manifestieren sich einige Effekte in den Kennwerten, sofern die Auswirkung in den bereits überwachten Bereichen der Prozessüberwachung stattfindet. Im Gegensatz dazu ermöglicht die genaue Betrachtung der Prozesskurve jedoch stets die Erkennung eines oder mehrerer Merkmale aufgrund der hohen Informationsdichte. Jedoch ist die Gefahr der Informationsüberflutung zu beachten.

Im Rahmen der konventionellen Prozessüberwachung durch Toleranzgrenzen und Hüllkurven sowie Prozessregelkarten ist eine Erkennung schadhafter Änderungen in komplexen Montageprozessketten nicht immer möglich. Auch eine Unterstützung zur datengetriebenen Ursachenanalyse ist nicht gegeben, speziell bei bisher unbekannten Ursache-Wirkungs-Beziehungen sowie der Auswertung von montage-internen und qualitätsrelevanten Auswirkungen von Änderungen.

Hierdurch ergeben sich für einzeln betrachtete Prozessschritte Aufgabenstellungen im Bereich der Prozessvisualisierung mittels E|ASY-Heat (Kapitel 5.2.2) zur Entdeckung von Änderungen und der Wissensentdeckung mittels E|ASY-Class und E|ASY-Pat (Kapitel 5.3).

In komplexen Montageprozessketten ist die Identifizierung von ursächlichen Prozessschritten und Wechselwirkungen mittels E|ASY-Event und E|ASY-Inter (Kapitel 6.2) essentiell, sowie die prozessschritt-übergreifende 3D-Visualisierung E|ASY-Curves (Kapitel 6.3) zur Änderungsanalyse.

Das folgende Kapitel stellt den Stand der Technik und Forschung von Data Mining in Montageprozessen dar und diskutiert relevante Arbeiten,

welche die datengetriebene Analyse komplexer Montageprozessketten adressieren.

4 Data Mining zur Prozess- und Qualitätsanalyse in Montageprozessen und MPK

Der Bereich Data Mining umfasst eine große Werkzeugauswahl, um Fragestellungen zur Vorhersage, über Abhängigkeiten und zu explorativen Untersuchungen zu beantworten. Hierbei erstrecken sich die Anwendungsfelder hauptsächlich über wirtschaftliche und seltener technische Bereiche. Aufgrund ihrer entscheidenden wirtschaftlichen Rolle dürfen die Sektoren Produktion und Montage nicht unbetrachtet bleiben. Speziell in komplexen Montageprozessketten sind der Einsatz neuartiger Methoden sowie die Entwicklung neuer Betrachtungsweisen zwingend notwendig, um den vollen Informationsgehalt zur Wissensgenerierung zu nutzen. So haben die Anforderungen von Data Mining zur Weiterentwicklung konventioneller statistischer Werkzeuge geführt, während parallel neue Bereiche wie Novelty Detection immer mehr Beachtung finden, die sich das dynamische Verhalten von Datensätzen zu Nutze machen. Auch in der künstlichen Intelligenz im Teilbereich des Deep Learnings ist die sehr effektive Methode der Convolutional Neural Networks zur Mustererkennung entstanden.

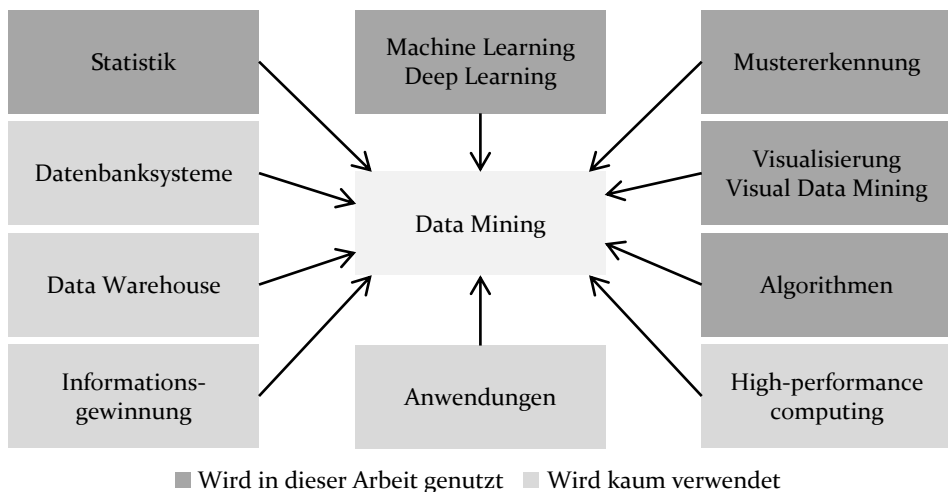


Bild 27: Data Mining nutzt Techniken aus unterschiedlichen Bereichen zur Wissensentdeckung [133][148][134]

All diese Werkzeuge haben großes Potenzial, die prozessschrittübergreifende Analyse und Überwachung komplexer Montageprozessketten zu unterstützen. Parallel dazu erlauben Vorgehensweisen aus dem Bereich des Visual Data Mining eine datengetriebene Analyse und Wissensentdeckung mittels effektiver Prozessvisualisierungen. Den multidisziplinären Ansatz von Data Mining verdeutlicht Bild 27 und zeigt die Hauptfelder für diese Arbeit in Dunkelgrau an. Aufgrund der grundsätzlich strukturiert vorliegenden Datensätze im Rahmen dieser Arbeit (siehe Kapitel 2.2.1) wird der Themenbereich Big Data nicht tangiert. In Abgrenzung zu konventionellen Methoden der Statistischen Versuchsplanung zur Prozessmodellierung für Montageprozesse steht die Nutzung von bestehenden Daten im Vordergrund und nicht explizit deren Generierung. Im Rahmen der Wissensentdeckung ist es dennoch möglich, Datensätze mittels DoE mit minimal notwendigem Aufwand zu generieren und anschließend mit Data Mining Werkzeugen zu analysieren.

Nach Vorstellung der relevanten Forschungsrichtungen werden ausgehend vom aufgezeigten Handlungsbedarf abschließend Forschungsfragen definiert.

4.1 Data Mining-Fragestellungen und Methoden

Der Bereich Data Mining lässt sich grundlegend in die Fragestellungen *Vorhersage*, *Abhängigkeiten* und *Explorativ* gliedern, sowie in die Problemklassen *Klassifikation*, *Regression*, *Abhängigkeitsanalyse*, *Segmentierung* und *Abweichungsanalyse* einteilen. Hierbei sind einige Werkzeuge und Algorithmen für mehrere Einsatzzwecke verwendbar. Ausgehend von den Zielen Überwachung, Optimierung oder Steuerung von Prozessen, sowie Fehleranalysen und -erkennung kann die zu beantwortende Fragestellung auf der Vorhersagbarkeit der Parameter, dem Aufzeigen von Abhängigkeiten oder explorativem Erkenntnisgewinn liegen. Die hierfür notwendigen Algorithmen aus den Bereichen Klassifikation, Abhängigkeitsanalyse, Segmentierung, Regression und Abweichungsanalyse unterstützen die Verarbeitung großer Datenmengen. Aufgrund der traditionellen Untersuchung statischer Datensätze basieren die meisten Data Mining-Verfahren auf der Annahme, dass die betrachtete Domäne zeitlich stabil [33] ist. Dies ist in MPK jedoch nicht immer der Fall, daher liegt ein Fokus dieser Arbeit auf der Nutzung von Änderungen in Datensätzen und deren Mustern. Bild 28 zeigt Fragestellungen und Problemklassen sowie mögliche Einsatzfelder von Data Mining in der Produktion und Montage.

Relevant für diese Arbeit sind die Bereiche Visual Data Mining zur Unterstützung der eher explorativen Analyse sowie Klassifikation zur Fehlererkennung und Unterstützung der Ursachenanalyse.

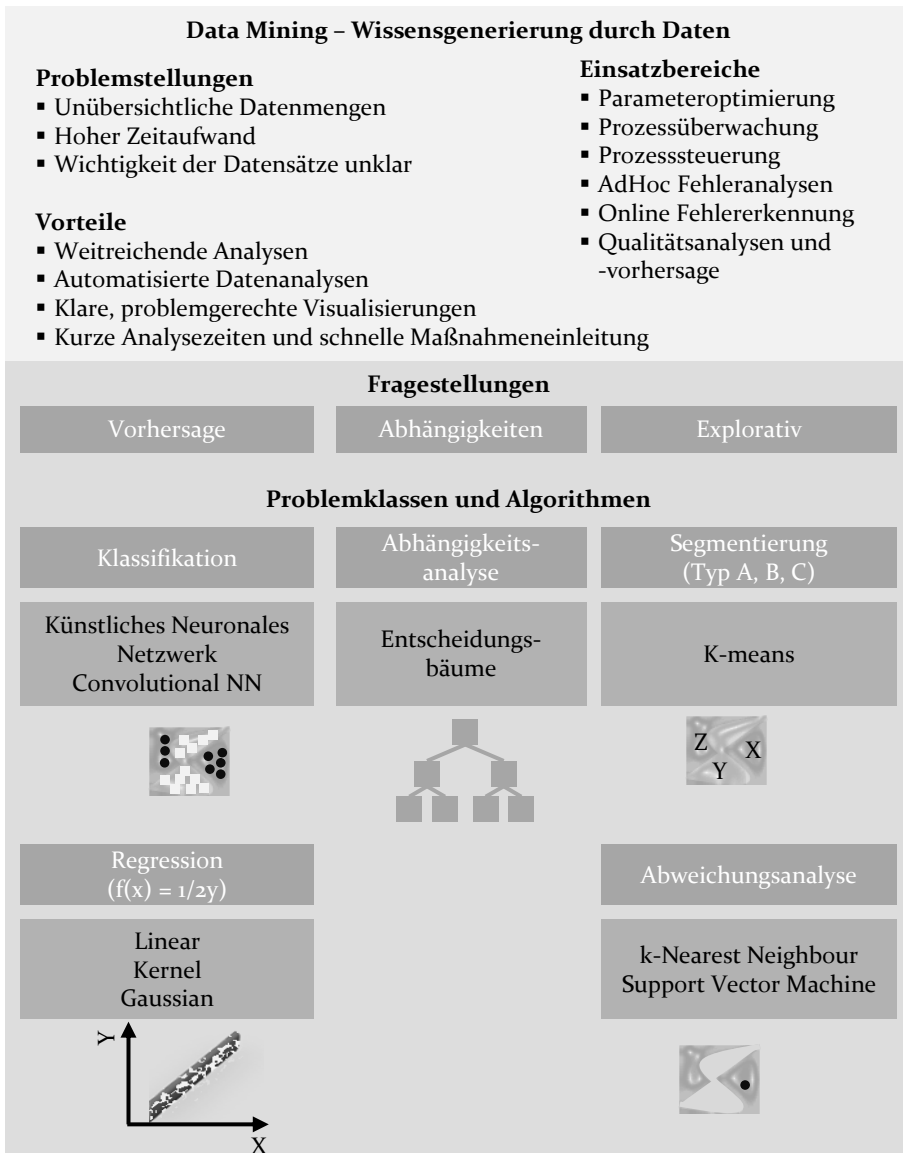


Bild 28: Problem- und Fragestellungen sowie Problemklassen im Bereich Data Mining [29][133]

In Anlehnung an [133] sind für die spätere Methodenentwicklung relevante Verfahren kurz dargestellt:

Klassifikationsverfahren dienen zur Prognose der Zuordnung eines neuen Datensatzes auf meist eine spezifische und bekannte Klasse. Das Modelltraining hierfür basiert dabei auf historischen Daten mit zugeordnetem Label, weshalb von überwachtem Lernen gesprochen wird. Im Rahmen dieser Arbeit sind Entscheidungsbäume und künstliche neuronale Netzwerke (NN) im Einsatz, wobei erstere als White-Box-Ansatz mit ableitbaren Regel arbeiten und mittels einer Knoten-Blatt-Struktur gut visualisierbar sind. Letztere sind meist als Black-Box aufgrund des Hidden-Layer der Neuronen zu betrachten. [133]

Visuelles Data Mining hat als Ziel die vorhandenen Datensätze und Ergebnisse von Algorithmen durch sinnvolle Visualisierung einfach erschließbar und verstehbar für den Anwender zu machen. Das Hauptprinzip gliedert sich in die drei Stufen *große Übersicht*, *Zoom* und *Selektion*. In der Gesamtübersicht sind gegebenenfalls bereits erste Muster erkennbar, durch Zoom und Selektion sind feinere Analysen möglich sowie überlagerte Effekte sichtbar. Im Gegensatz zu konventionellen Visualisierungstechniken, die eher Rohdaten anzeigen, steht meist die Visualisierung von Ergebnissen oder Zwischenergebnissen von Algorithmen im Vordergrund. Auch eine gezielte Steuerung der Visualisierung zur weiteren Wissensgenerierung ist durch den Benutzer möglich. [133][134][135]

Nach der kurzen Darstellung relevanter Verfahren zeigt der folgende Abschnitt die Einsatzgebiete von Data Mining-Analysen.

4.1.1 Visualisierungsmethoden Heatmap und PCP

Die Visualisierungstechnik Heatmap nutzt eine Farbcodierung für die graphische Darstellung numerischer Daten. Die meist in Tabellenform vorliegenden Datensätze sind für Menschen einfacher durchsuchbar als reine Zahlenwerte, wobei der genaue Wert anhand einer Farbskala nur schwer exakt bestimmbar ist. Bild 29 zeigt eine Heatmap von einem Prozessverlauf zur Illustration.

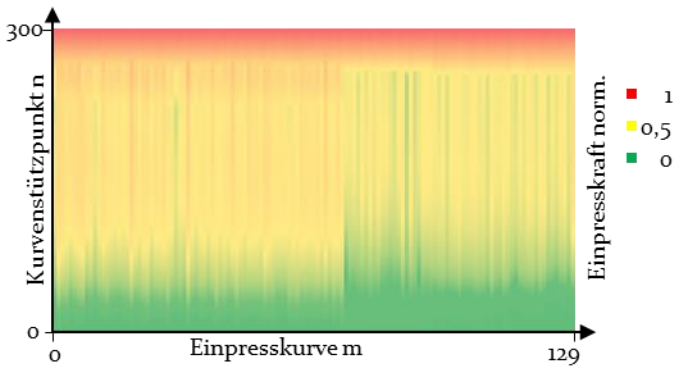


Bild 29: Heatmap zur kolorierten Darstellung von Daten in Tabellenform

Der Parallele Koordinatenplot [133] (engl.: PCP) als Visualisierungstechnik für multidimensionale Daten nutzt je Parameter eine eigene vertikale Achse P_i mit eigener Skala. Basierend auf den einzelnen Einträgen j und dem Parameter P_i ist jeder Datenpunkt genau einem Wert $P_{j,i}$ auf einer Achse zugeordnet. Für jeden Eintrag j wird eine achsenübergreifende Linie P_j gezeichnet, um den Werteverlauf entlang der Parameter aufzuzeigen, wie in Bild 30 dargestellt. Ein PCP eignet sich dazu, Gemeinsamkeiten und Unterschiede in den Wertebereichen von Einträgen aufzuzeigen. Jedoch ist die Interpretation nicht-trivial und anfällig für Ausreiser.

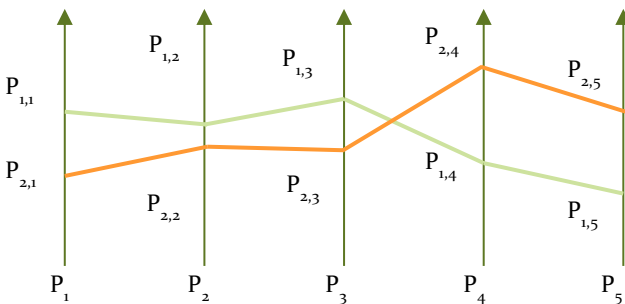


Bild 30: Paralleler Koordinatenplot von zwei Einträgen über fünf Achsen

4.1.2 Klassifikationsverfahren Entscheidungsbaum und künstliches Neuronales Netzwerk

Klassifikation ist ein Prozess zur Modellfindung basierend auf Daten, um darin enthaltene Klassen zu beschreiben und zu unterscheiden. [133] Die

Modelle entstehen aus der Analyse eines Datensatzes mit enthaltenen Trainingsdaten. Im Rahmen des überwachten Lernens sind die Datenobjekte mit bereits bekannter Klasse (engl.: Label) gekennzeichnet. Das trainierte Modell wird anschließend verwendet, um für unbekannte Datensätze eine Klasse vorherzusagen. Die Repräsentation des abgeleiteten Modells kann als Klassifikationsregel, Entscheidungsbaum, mathematische Formel oder künstliches Neuronales Netzwerk erfolgen.

Ein Entscheidungsbaum [133] ist eine Flowchart-ähnliche Baumstruktur, bei der jeder Knoten eine Entscheidung ausgehend von dessen Attribut darstellt, jeder Zweig das Ergebnis repräsentiert und Blätter die Klasse anzeigen. Ausgehend von Kennwerten in Montageprozessen erfolgt die Klassifizierung anhand mehrstufiger, multivariater Prüfungen auf Kennwertbereiche, wie in Bild 31 dargestellt. Die Ableitung von Klassifikationsregeln aus einem Entscheidungsbaum ist einfach möglich.

Ein künstliches Neuronales Netzwerk [133] für Klassifikationszwecke besteht aus einer definierten Anzahl an Neuronen mit Gewichtungsfaktoren zwischen den Einheiten. In der Trainingsphase dient ein bekannter Datensatz als Basis für die Berechnung der Gewichtungen, damit das Netzwerk die richtige Klassenzugehörigkeit klassifizieren kann. Die Schichten des Netzes (engl.: Layer) bestehen aus Input, Output und einem oder mehreren Hidden Layern. Das Training selbst ist meist sehr rechen- und speicherintensiv, während der Black-Box-Charakter eine Regelextraktion erschwert. Aufgrund der Fähigkeit der Netze zur Generalisierung und der Robustheit gegen Rauschen in Datensätzen ist ein weites Anwendungsspektrum möglich.

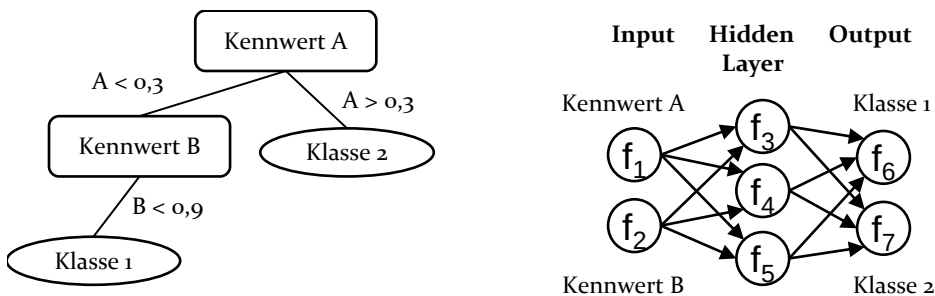


Bild 31: Entscheidungsbaum und KNN

4.1.3 Convolutional Neural Network (CNN)

Die derzeit besten künstlichen Neuronalen Netzwerke (NN) zur Muster- und Objekterkennung in Bildern nutzen einen vorgeschalteten Faltungsprozess (engl.: Convolution) zur filterbasierten Merkmalsextraktion und Dimensionsreduzierung. [148] Hierdurch ist im Gegensatz zur manuellen Merkmalsextraktion ein vollautomatisierter Ansatz möglich. Im Unterschied zu konventionellen NN bieten CNN zwei entscheidende Vorteile bei der Nachvollziehbarkeit des Klassifikationsergebnisses. Erstens sind neben den reinen Filtern auch weitere Bestandteile exportierbar, zweitens existieren Methoden zur visuellen Analyse der Klassifikationsentscheidung. Letztere nutzen Guided-Backpropagation (GBP) oder gradient-weighted class activation mapping (Grad-CAM) zur Visualisierung der Entscheidungsfindung des Modells. Bisher findet das Verfahren Anwendung vor allem zur Bilderkennung, doch mittlerweile sind auch Publikationen mit Fokus auf Fertigungsprozessen entstanden.

Ein Convolutional Neural Network nutzt trainierte Faltungen zur Dimensionsreduktion, um aus dem Dateninput und dem künstlichen Neuronalen Netzwerk ein Modell zu generieren. In dieser Arbeit steht die Fehlerklassifikation im Vordergrund, weshalb als Zwischenergebnis eine Klassenzuordnung und ihr jeweiliger Wahrscheinlichkeitswert entstehen. Als Endergebnis liegt exakt eine Klassenzugehörigkeit vor. Die zweidimensionale Eingabematrix nimmt ein Bild entgegen, wobei der räumlich geordnete 2D-Input wichtige Eigenschaften – in dieser Arbeit – von Prozesskurven aus Montageprozessen abbildet. Die Verarbeitungsstufen eines CNN bestehen aus den drei Basiskomponenten convolutional (C), pooling (P) und fully connected (FC) layer. Der convolutional layer nutzt trainierbare Faltungskernel, um mit diesen Filtern einzelne Teilmuster zu erkennen und als Output zur Verfügung zu stellen. Darauf folgt teilweise ein pooling layer, um durch down-sampling die Bildauflösung für die Ergebnisdarstellung der aktuellen Ebene zu reduzieren. Der FC layer ist durch ein Multilayer Perceptron (MLP) als Unterart der KNN realisiert und stellt in Verbindung mit dem Softmax Layer die Wahrscheinlichkeit der Klassenzugehörigkeit des Inputsamples dar. Letztgenannter wählt die Klasse mit höchster relativer Wahrscheinlichkeit.

Das gesamte CNN besteht aus einer Serienschaltung mit zu definierender Anzahl und Abfolge von convolutional und pooling layern sowie einem oder mehreren FC layern. Das Training erfolgt durch Forward- und Backpropagation, bis das Modell den Testdatensatz mit geringem Modellfehler beschreiben kann. Gefolgt von der Evaluierung durch einen

Testdatensatz ist over- und underfitting aufzuzeigen. [149] Bild 32 zeigt den Aufbau der CNN-Implementierung AlexNet, bei dem die Inputgrafik mit einer definierten Filtergröße über fünf Faltungsstufen und teilweisem Pooling zunächst auf wenige Features komprimiert wird. Die Klassifizierung erfolgt durch drei FC-Stufen mit je 4.096 Neuronen.

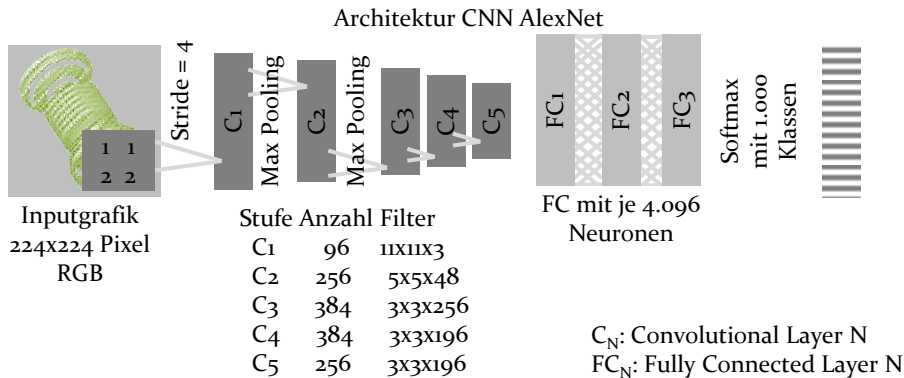


Bild 32: Aufbau des AlexNet zur Objektklassifikation in Bildern [148]

Entscheidend für die Analysierbarkeit des Netzes ist die Verfügbarkeit der Methoden Guided-Backpropagation (GBP) und Guided-GradCAM. [150][151] Zunächst erzeugt die GBP eine Aktivierungskarte anhand der aktuell vorliegenden Aktivierungsgradienten von einem gerade klassifizierten Input. Diese Darstellung ist zwar nicht klassen-spezifisch, liefert aber eine feine Darstellung der erfolgreichen Kantendetektionen. Anschließend generiert die Grad-CAM eine Lokalisierungskarte anhand der Gradienten der Featuremaps von einem gewählten Convolution-Filter für eine gewählte Klasse. Abschließend kombiniert die Guided Grad-CAM dieses spezialisierte Ergebnis für eine gewählte Klasse, indem eine punktweise Multiplikation der GBP und dem Ergebnis der Grad-CAM durchgeführt wird. Durch die in Bild 33 dargestellten Verfahren ist es nun möglich, die Klassifikationsentscheidung eines trainierten CNN-Modells für einen spezifischen Input aufzudecken. Effektiv ist mit der Guided Grad-CAM die expertengeführte Validierung [151] von gut und schlecht trainierten Modellen erstmals möglich. Im Rahmen dieser Arbeit nutzt die Methode E|ASY-Pat zur Wissensentdeckung in Prozesskurven erstmals diesen Visualisierungsansatz für Datensätze abseits von Bildern und Akustiksignalen.

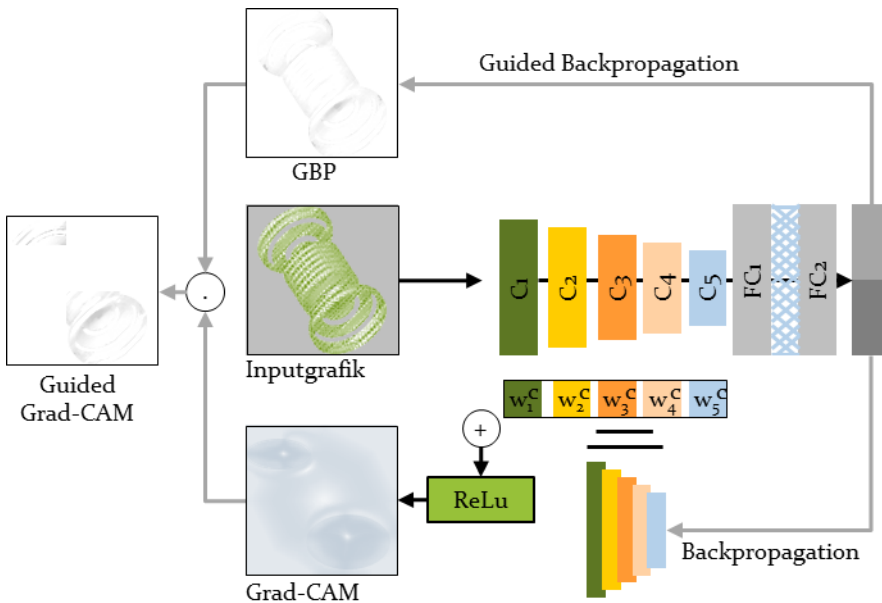


Bild 33: Guided Grad-CAM zur Hervorhebung entscheidender Bereiche für die Klassifikationsentscheidung [151]

4.1.4 Novelty Detection

Als Alternativansatz zur konventionellen Ausreißererkennung nutzen Verfahren des Novelty Mining meist binäre Klassifikatoren, um die beiden Zustände „bekannt“ und „unbekannt“ oder „neu“ zu klassifizieren. [145][146] Dieses meist daten- oder modellgetriebene Vorgehen trainiert ausschließlich mit vorher gekennzeichneten Gut-Datensätzen und nutzt ein parametrisierbares Maß für die Abweichung, um mittels Überschreitung eines definierten Schwellwertes Schlecht-Datensätze zu identifizieren. Dieser Ansatz bietet sich an, wenn alternative Prozessabläufe eher als schadhaft anzusehen sind oder die Datengrundlage groß genug für gute und gering für schlechte Prozessdurchläufe ist, wie meist in der Null-Fehler-Fertigung. Im ersten Schritt wird ein Modell durch historische Trainingsdatensätze mit Label „Gut“ im Sinne des überwachten Lernens trainiert. Im zweiten Schritt sollen vom trainierten Modell abweichende Datensätze zu einer hohen Wahrscheinlichkeit für die Klasse „unbekannt“ oder „neu“ führen. Im Gegensatz zu konventionellen binären Klassifikatoren wird also nur ein Gut-Zustand modelliert,

während ein definiertes Abweichungsmaß durch das Modell für jeden zu klassifizierenden Datensatz berechnet wird.

4.2 Data Mining Anwendungsfelder

Die Anwendung von Data Mining ist in den Bereichen und Sektoren Customer-Relationship-Management, Finanzwesen, Bankenwesen, Gesundheitswesen, Betrugserkennung, Wissenschaft, Einzelhandel, Werbung und Bildung bereits stark fortgeschritten, sowie zur Erkennung von Kreditkartenbetrug und zur Kundensegmentierung. Erst auf Platz 11 von 38 findet sich die Anwendung von Data Mining in der Produktion mit 9 % der 446 befragten KDnuggets-Leser. [136] Dieses Bild spiegelt auch eine andere Umfrage mit hauptsächlich Produktionsverantwortlichen und Fachexperten wieder, wonach selbst die geläufige Regressionsanalyse 50 % der 86 Befragten in Produktionsunternehmen bekannt ist aber immerhin von 15 % angewendet wird, wie Bild 34 zeigt.

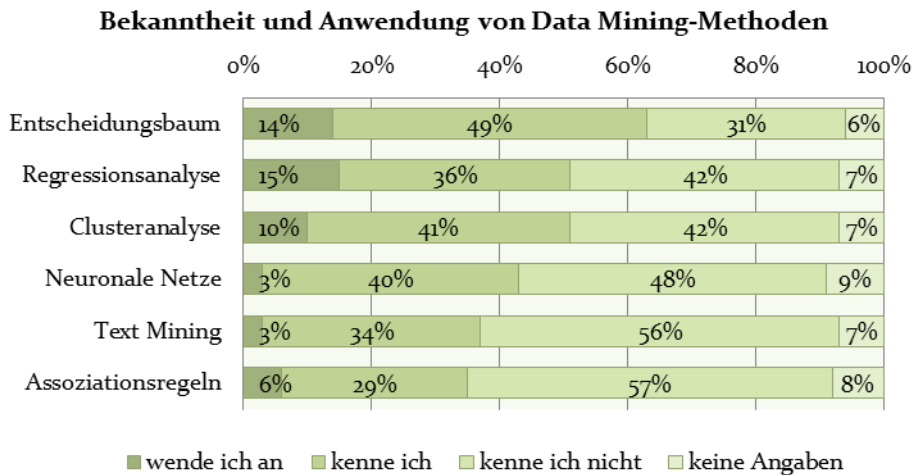


Bild 34: Umfrageergebnis zur Anwendung von Data Mining-Methoden [84]

Noch seltener in der Anwendung sind Entscheidungsbäume (14 %), Clusteranalysen (10 %) und Neuronale Netze (3 %). Trotz der aktuell noch geringen Verbreitung bieten Data Mining-Ansätze großes Potenzial, das heute und zukünftig im Qualitätsmanagement sowie der Produktionsoptimierung gesehen wird. [84]. In diesen beiden Bereichen positioniert sich diese Arbeit, weshalb die folgenden Abschnitte zunächst Data Mining in

der Produktion, Montage und komplexen Montageprozessketten sowie jeweils relevante Arbeiten vorstellen.

4.2.1 Data Mining in der Produktion

Im produktionstechnischen Umfeld sind die Bereiche Fehlererkennung und Fehlerklassifikation [29] sowie die Ursachenanalyse in einzelnen Prozessschritten und komplexen Montageprozessketten relevant für diese Arbeit. In der Literatur finden sich hauptsächlich Anwendungen im Bereich der Metallverarbeitung [29] mit den Fertigungstechniken Drehen, Bohren und Fräsen [137] sowie vereinzelt Montageprozesse. Letztere sind im Fokus des nächsten Abschnitts. Dicht gefolgt stellen die Elektronikproduktion und Halbleitertechnik gemeinsam mit 30 % [29] einen großen Anteil der Veröffentlichungen, wobei speziell die Herstellung von Wafern bereits gut erforscht ist. Aufgrund der Nähe von Fertigungs- und Montageprozessen durch die Verarbeitung von Stückgut sind im Folgenden relevante Arbeiten dargestellt.

In [35] wird neben einer Business-Intelligence-Plattform auch ein Verfahren präsentiert, um mittels Entscheidungsbaum eine Empfehlungsgenerierung für die Parameter des direkt folgenden Prozessschrittes durchzuführen. Am Beispiel der Herstellung von Nockenwellen für LKW-Motoren wird nach den Schritten Härten und Planschleifen eine jeweils eigene Prognose für den Folgeprozess Drehen und Schleifen abgeleitet. Effektiv stellt die Erfüllung eines definierten Kennwerts das Entscheidungskriterium für die Analyse. Hierbei ist nur der abstrakte Kennwert *Ok* oder *nichtOK* ausreichend, ohne Angabe der Fehlergründe oder von Prozesskurven. Zur Fehleridentifikation bei schadhafte Kombinationen sind die Regeln des Entscheidungsbaums einfach zu visualisieren.

Zur Prozessoptimierung durch Werkzeugüberwachung und Parameteranpassung nutzt [138] die Vibration der Spindel eines Fräs- und Bohrzentruns. Ein Entscheidungsbaummodell wird zur Klassifikation von geschädigten Werkzeugen und für Parameterempfehlungen für niedrigere Drehzahlen verwendet, um ein optimales Qualitätsergebnis für die Oberflächengüte sicherzustellen.

[148] beschreibt ein Verfahren zur Klassifikation der drei Prozessmodi Positionieren, stabiles Fräsen und schadhaftes Rattern einer Fräsmaschine. Das von einem Beschleunigungssensor aufgenommene Vibrationssignal wird direkt als 200x200 Pixel Input für das CNN genutzt, bei einer zeitlichen Fensterbreite von 25 ms. Je Datensatz liegen 5.500 bis 17.000

Samples mit Label vor, wodurch effiziente Filter sowie ein gutes Klassifikationsergebnis realisierbar sind.

Eine Vorgehensweise zur Fehlererkennung und Diagnose in der Halbleiterherstellung [151] nutzt ein CNN zur Aufdeckung abweichender, kontinuierlicher Signalverläufe. Aus den multivariaten Sensorsignalen werden mittels gleitendem Fenster abnorme Merkmale aufgezeigt, um anschließend den entscheidenden Parameter und Zeitbereich einer Prozessstörung zu lokalisieren.

Ausgehend von den vielen Forschungsbemühungen im Bereich von Fertigungsprozessen beleuchtet der folgende Abschnitt die Tätigkeiten in der Montage.

4.2.2 Data Mining in Montageprozessen

Vor dem Hintergrund der wirtschaftlichen Relevanz von Montageprozessen in der deutschen Industrie, ist die geringe forschungsseitige Resonanz im Bereich Data Mining verwunderlich. Hierbei sind in der Montage Schweißprozesse mit Abstand am besten erforscht, speziell die Aufgabengebiete Parameteroptimierung, Qualitätssteigerung und -vorhersage. [29][139] Einzelne Arbeiten aus dem Bereich Umformen sind im nachfolgenden Abschnitt beschrieben, während auch Urformprozesse bereits bearbeitet sind [29].

Die folgenden Arbeiten zur Prozessüberwachung nutzen insgesamt stets klassische Toleranzband- oder Fenstertechnik und gegebenenfalls zusätzlich indirekte Messungen durch Körper- und Luftschallemissionen [140]. Im Rahmen der Fehlererkennung wird jeweils ein spezifischer Montageprozess betrachtet.

[141] nutzt ein NN zur Fehlerdetektion in einem Schraubprozess mit selbstschneidenden Schrauben. Ausgehend von der Drehmomentkurve, die aus zehn Messpunkten mit jeweils einem Stützpunkt pro Umdrehung besteht, wird das NN auf sechs Fehlerfälle trainiert. Die resultierende Fehlerrate liegt bei 1 %, wobei die Anzahl der Trainings- und Testdatensätze nicht genannt ist.

[142] nutzt eine SVM und ein NN zur Detektion der Modi *erfolgreicher Ablauf*, *keine Schraube*, *Bohrung nicht getroffen* und *Schraube verkippt*. Basierend auf dem Drehmomentverhalten sowie der geschätzten Schraubenlänge und der maximalen Reaktionskraft ist die Klassifikation erfolgreich.

In [119] wird ein Verfahren vorgeschlagen, das Neuronale Netzwerke zur Erkennung und Klassifikation von Prozessfehlern beim Radialclinchen untersucht. Hierzu wird Expertenwissen zur Merkmalsextraktion genutzt, um markante Punkte aus dem Weg-, Drehzahl- und Drehmomentsignal sowie dem Kraftverlauf zu identifizieren. Zusätzlich wird das Drehmomentsignal in den Frequenzbereich transformiert. Aus 43 untersuchten Merkmalen sind neun manuell selektiert und zwei weitere als Eingangsgrößen für ein neuronales Netzwerk gewählt. Insgesamt ergibt sich eine Gut-/Schlecht-Klassifizierung von 94 %, wobei die 22 Fehlerklassen mit 84,8 % richtig zugeordnet sind. Bei der Versuchsdurchführung ist nur ein Merkmal gleichzeitig aktiv.

Auch am Prozess Clinchen zeigt [118] ein Prozessüberwachungssystem mit Fehlerklassifikation, das auf charakteristischen Unterschieden zwischen der Messkurve mit einer ermittelten Referenzkurve basiert. Diese Datensätze sind durch Versuche und FEM-Simulation zu generieren, um anschließend Regeln abzuleiten. Aufgrund der Kalibrierung von Messkurve und Blechdickenabweichung sind eine feinere Prozessüberwachung und engere Toleranzen möglich, im Gegensatz zu einer Betrachtung ohne Referenzdaten.

In [19] wird ein System vorgestellt, das eine Neuro-Fuzzy-Modellierung zur Prozessüberwachung und Klassifikation des Fügeprozesses Ultraschallschweißen nutzt. Hierbei sind Prozesssignale und Körperschallmessungen zur Zusammenhangsbildung mit der Qualität in Verwendung. Als Erweiterung wird der Ansatz Novelty Detection zur Erkennung unbekannter Zustände genutzt. Insgesamt basiert die Modellbildung auf Versuchsplänen zur Datengenerierung, um modellgetrieben unbekannte und neuartige Zustände zu identifizieren, wobei das Modell durch Neuro-Fuzzy-Modellierung anpassbar ist.

Auch zur Überwachung und Fehlerentdeckung in Schweißprozessen nutzt [140] Körper- und Luftschallmessungen während der Verdampfung des Beschichtungs- und Grundmaterials. Die aufgenommenen Rohdaten sind mittels Short-Time-Fourier-Transformation (STFT) und Mittelwertglättung für ein gesteigertes Signal-Rausch-Verhältnis aufzubereiten. Zur manuellen Merkmalsextraktion dient die Visualisierung der geglätteten STFT, um zunächst das Frequenzband für bestimmte Fehler und anschließend die Amplitude mittels Toleranzband festzulegen.

Zusammenfassend nutzen die meisten Verfahren eine manuelle anstelle einer voll-automatischen Merkmalsextraktion, woraus Anwenderabhängigkeit und hoher manueller Aufwand resultieren. Weiterhin erfolgt die

Datengenerierung eher labortypisch, da keine gleichzeitig aktiven Versuchsmerkmale vorliegen. Abschließend sind entweder manuelle Regeln oder ein Black-Box-Ansatz ohne Plausibilisierungsmöglichkeit für die Klassifikation verantwortlich. Aus der zitierten Literatur wird deutlich, dass ein System mit automatischer Merkmalsextraktion und plausibilisierbarer Entscheidungsfindung benötigt wird. Aufgrund der notwendigen Robustheit sind gleichzeitig aktive Merkmale im Rahmen der Datengenerierung zu berücksichtigen, um keinen Laborzustand zu modellieren.

Neben der Überwachung von einzelnen Prozessschritten spielt die Beherrschung von Prozessketten eine wichtige Rolle für MPK.

4.2.3 Data Mining in Fertigungsprozessketten

Die konventionelle Überwachung von einzelnen Prozessschritten wird im Bereich von Prozessketten erweitert durch die Betrachtung der Ausbreitung eines Signals mit Wirkung auf die Prozessstreuung von Folgeprozessen [24]. Hierbei liegt der Fokus auf der direkten Prozessfolge, meist innerhalb derselben Maschine mit Mehrfachwerkzeugen. Aufgrund der Gegebenheiten betrachten die meisten untersuchten Arbeiten die Stahlverarbeitung.

Am Prozess Heißpressen stellt [24] ein Verfahren vor, um die Signalausbreitung mittel Jump-Markhov-Modellen abzubilden. Hierfür wird zunächst das Auftreten von Störungen durch das nicht-lineare Verhalten der Markhov-Kette erkannt. Anschließend übernimmt eine modellbasierte Prozesssteuerung die Parameteroptimierung.

In [143] wird ein Vorgehen gezeigt, welches kombiniert die Auswirkung von Werkzeugverschleiß auf Folgeprozesse und die resultierende Qualität sowie die Eingangsqualität auf den Werkzeugverschleiß der lokalen Station abbildet. Einerseits wird erhöhter Werkzeugverschleiß durch eine Qualitätsverschlechterung an vorgeschalteten Stationen erklärt. Andererseits sind die Auswirkungen von Werkzeugverschleiß auf Folgestationen und die Qualität des Endprodukts bezogen. Hierdurch steigt die Prognosegüte der verbleibenden Werkzeugstandzeit im betrachteten Umformprozess.

Einen statistischen Ansatz zur frühen Fehlererkennung in Prozessketten beschreibt [144]. Diese Anomalieerkennung verwendet einen kennwertbasierten Vergleich von parallelisierten Prozessschritten und dem Fertigungsweg sowie Korrelationen zwischen Prozess- und Qualitätsin-

formationen der Anlagen und Prüfstände, wobei keine Zwischenprüfungen notwendig sind, sondern die Ergebnisse des Funktionsprüfstands genügen.

In [64] wird eine Methode vorgestellt, die mittels DoE nicht nur Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge konventionell innerhalb eines Prozessschritts betrachtet, d.h. von Stellgrößen auf Zwischenproduktmerkmale. Durch prozessschritt-übergreifende Versuchspläne in der Batteriefertigung wird die Auswirkung von Zwischenproduktmerkmalen auf Qualitätsmerkmale der Endprodukte bezogen, sowie durch die Kombination der beiden Betrachtungsweisen. Dieser Ansatz ist jedoch nur eingeschränkt für eine Serienfertigung anwendbar, da zerstörende Prüfungen notwendig sind.

Zusammenfassend konzentrieren sich die analysierten Beiträge auf die Erkennung von Änderungen oder Werkzeugverschleiß. Im Rahmen dieser Arbeit stellt die Analyse von Montageprozessen mit jeweils unterschiedlichen Wirkmechanismen und bisher unbekannten Schädigungsmechanismen von der Montage auf die Funktionserfüllung des Endprodukts einen Neuigkeitsgrad dar. Die zitierte Literatur zeigt jedoch, dass die Modellierung aller Pfade und Wirkmechanismen aufwendig oder gar bei vielen Schädigungen teilweise nicht möglich ist, da sie noch unbekannt sind. Gleichzeitig sind in komplexen Montageprozessketten unterschiedliche Komponenten und Funktionen in ein Erzeugnis integriert, die ungewollt eine schadhafte Wirkung auf andere Bereiche erzielen. Daher wird ein alternatives Vorgehen zur Überwachung und Fehlererkennung benötigt, um stationsübergreifende Zusammenhänge aufzuzeigen. Aufgrund der Komplexität der betrachteten Montageprozesse ist die Nutzung des vollen Informationsgehalts erforderlich und daher auch eine zielführende Visualisierung in der Werkstatt notwendig.

Neben der gezeigten expliziten Modellierung von Prozessen und -ketten ist auch Novelty Mining zur Erkennung schadhafter Zustände und Prozessabläufe ausgehend von feldorientiert gewonnenen Gutkurven anwendbar.

4.2.4 Novelty Mining

Novelty Mining ermöglicht eine prozessmodell-basierte Überwachung von Prozessen, die überwiegend nur erfolgreiche Durchläufe realisieren und vor allem nur sehr wenige Datensätze für abweichende Zustände generieren.

[19] nutzt Novelty Detection zur Erkennung unbekannter Muster in einem Ultraschall-Schweißprozess und vorgeschalteter Prozessschritte, um die entwickelte Prozesssteuerung robuster zu gestalten. Durch deskriptive Aufdeckung unbekannter Änderungen ist die manuelle Anpassung des Prozessmodells möglich.

In [147] sind die Vibrationssignale eines Laboraufbaus und einer Windkraftanlage zunächst mittels Wavelet-Transformation aufbereitet, um einen guten Zustand durch ein NN zu modellieren. Als Erweiterung ist ein Novelty Index kalkuliert, der erfolgreich unterschiedliche Störungen vom Idealzustand unterscheiden kann.

Der große Vorteil im Umgang mit feldorientiert gewonnenen Prozessdatensätzen in komplexen Montageprozessketten ergibt sich durch das starke Ungleichgewicht von Gut- zu Schlechtteilen. Durch die Verwendung eines binären Klassifikators, der mit einer großen Anzahl guter Prozesskurven trainiert wird, sind die richtigen Features für einen erfolgreichen Prozessverlauf mit guter Funktionserfüllung automatisiert modellierbar.

4.3 Bewertung und Handlungsbedarf

Ausgehend von der Notwendigkeit einer prozessschritt-übergreifenden Analyse sowie den Erkenntnissen aus den durchgeführten Voruntersuchungen zeigen unterschiedliche Vorgehensweisen und Werkzeuge aus dem Bereich Data Mining großes Potenzial zur Unterstützung des Vorhabens. Der bereits erfolgreiche Einsatz datengetriebener Ansätze in Produktion, Montage und Prozessketten unterstreicht deren Relevanz bei der Erkennung von Prozessfehlern, Maschinen- und Werkzeugzuständen. Jedoch untersuchen bisherige Arbeiten entweder einzelne Prozessschritte im Laboreinsatz anstelle einer prozessschritt-übergreifenden Betrachtung der laufenden Produktion oder die Datengrundlage basiert nur auf einzelnen Kennwerten einzelner Prozessschritte. Doch gerade der Einsatz von Prozesskurven, als feldorientiert gewonnene Datensätze mit höchstem Detailgrad und starkem Einfluss von Störgrößen in der Fertigungsumgebung, bietet großes Potenzial. Auch die bisher spärlichen Untersuchungen von Montageprozessen im Gegensatz zu Produktionsprozessen in der Stahlverarbeitung und spanenden Bearbeitung zeigen starken Handlungsbedarf. Speziell die Betrachtung von komplexen Montageprozessketten stellt neben der vollautomatischen Featureerkennung zur Wissensentdeckung sowie der Modellierung guter Prozessdurchläufe zur Erkennung neuer und unbekannter Prozesskurven eine

essentielle Erweiterung der verfügbaren Werkzeuge dar. Bisher erfolgt die Merkmalsextraktion mit hohem manuellem Aufwand und anwenderabhängig. Insgesamt ist es wichtig, Data Mining in Montageprozessketten durch eine erweiterte Datenbasis inklusive Kennwerten, Kennlinien und Prüfkurven, sowie effektive Verfahren als datengetriebene Herangehensweisen in der industriellen Montage verfügbar zu machen.

Zusammenfassend ergeben sich mehrere zentrale Anforderungen an das zu konzipierende System zur prozessschritt-übergreifenden Analyse von Montageprozessketten:

- Hohe Universalität bezüglich Datenrepräsentation der Montageprozesse, Messtechnik und Prozesskettenlänge,
- Größtmögliche Flexibilität hinsichtlich der Erzeugnisart und -varianz,
- Kurze Reaktionsdauer bei gleichzeitig niedriger Fehlalarmquote,
- Standardisierte Datenerhebung, -speicherung und -verarbeitung,
- Einfache Anwendbarkeit.

Entsprechende Methoden werden im Folgenden konzipiert, wobei Kapitel 5 die Verfahren E|ASY-Heat zur Änderungsanalyse von Montageprozess- und Qualitätskurven sowie E|ASY-Class und E|ASY-Pat zur automatisierten Fehlererkennung in einzelnen Prozessschritten thematisiert. Kapitel 6 fokussiert die Methoden und Vorgehensweisen zur prozessschritt-übergreifenden Analyse komplexer Montageprozessketten mit dem Ziel der Erkennung schadhafter Prozessabläufe (E|ASY-Curves), Änderungen im Prozessverhalten (E|ASY-Event) und Identifizierung von ursächlichen Prozessschritten und Wechselwirkungen (E|ASY-Inter). Abschließend folgt in Kapitel 7 eine experimentelle Beurteilung. Grundlagen der entwickelten Vorgehensweisen und Methoden wurden in den Veröffentlichungen [P1], [P2], [P3], [P5], [P6], [P7] sowie [P8] dem internationalen Fachpublikum bereits präsentiert.

4.4 Ableitung des Forschungsbedarfs

Ausgehend von den Voruntersuchungen, der Analyse des Stands der Technik und Forschung sowie dem aufgezeigten Handlungsbedarf sind Forschungsfragen abgeleitet:

- Können Energie- und Prozessdaten von Montageprozessschritten zur Wissensentdeckung und Featureextraktion sowie Änderungsdetektion genutzt werden?
- Welche Data Mining-Methoden können effektiv zur Analyse von komplexen Montageprozessketten genutzt werden?
- Können komplexe Montageprozessketten mittels Data Mining analysiert werden bezüglich Änderungsdetektion, Ursachenidentifikation und Aufdeckung von Wechselwirkungen?

Daher behandelt diese Arbeit zunächst Maßnahmen zur Erkennung von Prozessverläufen mit schadhafter Auswirkung auf die Funktionserfüllung des montierten Erzeugnisses und Zuständen von einzelnen Prozessschritten. Gefolgt von Maßnahmen zur Selektion von geeigneten Analysemethoden ist die Übertragung von multivariaten Analysemethoden auf das industrielle Umfeld im Fokus.

5 Wissensentdeckung in Montageprozessen mittels der Data Mining-Analysen E|ASY-Heat, E|ASY-Class und E|ASY-Pat

Die datengetriebene Fehlererkennung und Ursachenanalyse in einzelnen Prozessschritten von komplexen Montageprozessketten spielen eine wichtige Rolle. Hierfür notwendig sind jedoch die nutzbringende Aufzeigung der vorliegenden Datensätze für den Anwender und eine erweiterte Aufbereitung mittels geeigneter Verfahren. Letzteres erfolgt in Abschnitt 5.2 durch erweiterte Datensätze anhand Prozess- und Prüfkurven mit vollem Informationsgehalt. Jedoch steigt die Wahrscheinlichkeit für Informationsüberflutung, wodurch die Anwenderfreundlichkeit solcher Systeme sinkt. Daher sind Vorgehensweisen notwendig, um eine intuitive Prozessanalyse anhand großer Datensätze zu ermöglichen. Zusätzlich zur Visualisierung im Frequenzbereich erfolgt daher eine Qualitätsrückkopplung, um datengetriebenen Änderungen in Montageprozessschritten mit schadhafter Auswirkung auf die Funktionserfüllung des montierten Erzeugnisses anzuzeigen.

Neben der E|ASY-Heat Visualisierung von Prozesskurven in Abschnitt 5.2 werden E|ASY-Class und E|ASY-Pat als Vorgehen zur Fehlererkennung in Abschnitt 5.3 entwickelt, sowie die folgenden Herangehensweisen in deren Effektivität verglichen. Die regel- und musterbasierten Verfahren Entscheidungsbaum, NN, CNN und manuelle Regeln bewerten die stützpunktbasierten Prozesskurven sowie deren Charakteristik im Frequenzbereich, um gute und schlechte Prozessdurchläufe zu klassifizieren. Abweichungsanalysen im Sinne von Novelty Detection sowie Klassifikation anhand definierter Fehler stehen hierbei im Fokus. Als Ergebnis dient die erzielte Klassifikationsgenauigkeit gleichzeitig als Maß für den Informationsgehalt der Modelle und Datenrepräsentationen. Die prototypische Umsetzung der folgenden Methoden ist angelehnt an die vom Autor beauftragten und am Lehrstuhl FAPS entstandenen studentischen Arbeiten [S23-29].

Der folgende Abschnitt zeigt zunächst Herausforderungen bei Analysen von Fehler- und Störeinflüssen in Montageprozessen auf, um anschließend die Möglichkeit zur datengetriebenen und mittels verlängerter Messkette erweiterten Analyse aufzuzeigen.

5.1 Datengetriebene Aufzeigung von Fehler- und Störeinflüssen in Montageprozessen

Wie bereits in den Kapiteln 2 und 3 aufgezeigt, nimmt die Relevanz von Fehlern und Störungen aufgrund der gesteigerten Komplexität von einzelnen Prozessschritten und Montageprozessketten stetig zu. Um die unüberschaubare Anzahl von Störfaktoren handzuhaben, sind erweiterte Datensätze zu deren Aufdeckung notwendig. Hierzu dienen Prozess- und Qualitätsdaten sowie indirekte Signale im Rahmen einer verlängerten Messkette.

Wie im letzten Abschnitt dargestellt, existieren unzählige Fehlereinflüsse, die in ihrer Gesamtheit nicht mit endlichem Aufwand zu modellieren sind. Daher verfolgt diese Arbeit den Ansatz, Störeinflüsse indirekt und datengetrieben aufzudecken oder anzuzeigen. Dies erfolgt zunächst in diesem Kapitel durch eine gruppenbasierte Betrachtungsweise an einzelnen Prozessschritten und im folgenden Kapitel eventbasiert entlang einer komplexen Montageprozesskette, jeweils anhand der eindeutigen Seriennummer der Erzeugnisse. Hierbei ist die Aufzeigung von Symptomen essentiell, weil sie ein Indiz für Störeinflüsse darstellen. Um einem Experten die Analyse und Interpretation zu erleichtern, sollen einerseits Algorithmen anfallende Datensätze bereits auf signifikante Änderungen prüfen. Andererseits dient die bedienergeführte Mustererkennung anhand der zusätzlichen Visualisierung detaillierter Prozesskurven zur schnellen Ursachenidentifikation.

Wie in Kapitel 3 aufgezeigt, geben Prozessdaten einzelner Montageprozessschritte Hinweise auf Werkzeugzustand, Kalibrierfehler und geometrische Eigenschaften der Erzeugnisse und Fügepartner. Parallel dazu zeigt das dortige Ishikawa-Diagramm sehr gut auf, dass selbst Material eine Geschichte hat, die nicht sichtbar ist und sich aber dennoch auswirkt. Zuführteile von linieninternen oder -externen Vorprozessen enthalten zwar intrinsisch deren Prozessdaten aufgrund der Verarbeitung, jedoch nur auf den einzelnen Prozessschritt und die lokal vorliegenden Bauteileigenschaften wie Maßhaltigkeit und Oberflächengüte bezogen. Je nachdem, ob systematische oder einzelteilspezifische Störungen vorliegen, zeigen sich Auswirkungen auf Prozessdaten in prozessorientierter Sichtweise als Änderung von Varianz oder Mittelwert sowie erzeugnisorientiert als Ausreißer. Natürlich sind diese Effekte gegebenenfalls kleiner als das Grundrauschen oder spiegeln sich physikalisch und prozessbedingt nicht in den Datensätzen während der Montage wieder,

wenn sie messtechnisch nicht erfasst oder protokolliert werden. Daher ist die Verwendung von Prozessdaten sinnvoll, aber noch nicht ausreichend.

Qualitätsdaten von Prüfprozessen hingegen geben Hinweise auf zusätzliche, durch die Bauteileigenschaften definierte Wechselwirkungen auch bei komplexen Störeinflüssen und deren Kombinationen, da sie resultierende Merkmale und den Funktionserfüllungsgrad prüfen.

Für die Gewinnung zusätzlicher Datensätze in komplexen Montageprozessketten bietet sich die kostengünstige Nutzung bereits vorhandener aber unbeachteter Messtechnik oder gar der prozessführenden Aktoren im Rahmen einer verlängerten Messkette an. Letztere sind Gerätekomponenten, die unter Einsatz von Energie eine Veränderung des Systemzustands bewirken. [162] Die Nutzung von Aktoren als Messsystem bedingt jedoch einen Zusammenhang zwischen dem indirekten Messsignal wie der Leistungsaufnahme und einer direkten Prozessänderung. Verwendung findet dies zumeist im Themengebiet Condition Monitoring, weil die Leistungsaufnahme durch Defekte an Elektromotoren, Getrieben und anderen Komponenten verändert wird. [4] Die Nutzung sensorischer Eigenschaften von Aktoren ist im Bereich der spanenden Fertigung in Bohr-, Dreh- und Fräszentren zur Prozessüberwachung und Fehlererkennung [137] bereits weit fortgeschritten, jedoch in Montageprozessen aufgrund der Nutzung von prozessnaher Messtechnik weitgehend unbekannt. Es gilt dennoch stets zu beachten, dass die Streuung des gemessenen Drehmoments kleiner als die des momentbildenden Stroms eines Servomotors ist. [4] Auch die Nutzung weiterer Informationsquellen ist möglich, wobei einzelne Ansätze die zusätzliche Prozessüberwachung durch Luft- und Körperschallemissionen verfolgen. [19][140] Unabhängig von der verwendeten Messtechnik sind die Signale zur Absicherung von Montageprozessen mindestens stützpunktebasiert oder auch durch Kennwerte prozessorientiert überwacht.

Die in diesem Kapitel entwickelten datengetriebenen und explorativen Vorgehensweisen E|ASY-Heat, E|ASY-Class und E|ASY-Pat ermöglichen die Nutzung bisher unbekannter Muster zur Wissensgenerierung, vor allem bei noch unentdeckten und unterschwelligem Wechselwirkungen. Gleichzeitig spielt auch die Aufzeigung aktiver Störeinflüsse eine wichtige Rolle. Neben der Betrachtung von Prozess- und Prüfkurven anhand der gemessenen Stützstellen verfolgt der kommende Abschnitt die Nutzung der Charakteristiken vollständiger Kurven.

5.2 Entwicklung einer Analysestrategie für Montageprozesskurven

Konventionelle Prozessüberwachungen arbeiten meist mit stützpunkt-basierten Toleranzen und Hüllkurven, um fehlerbehaftete Prozessdurchläufe zu erkennen. Wie in den Kapiteln 2 und 3 aufgezeigt, ist diese Vorgehensweise eher grob und bietet keine Unterstützung bei der Ursachenanalyse. Komplexitätsreduzierung und eine feinere Unterscheidbarkeit sind jedoch bei der Betrachtung von feldorientiert gewonnenen Prozesskurven in Montage- und Prüfvorgängen entscheidend. Diese Ziele sind durch eine Visualisierung der spektralen Energieverteilung und der Prozesskurven zur musterbasierten Aufdeckung von Änderungen in Prozess- und Prüfkurven adressiert.

5.2.1 Der gesamte Kurvenverlauf von Montageprozessen kann im Zeit- und Frequenzbereich auf Störungen hindeuten

Vor allem bei prozessführenden Kraft-Weg-Signalen und gemessenen Prüfkurven hat es sich in eigenen vorhergehenden Untersuchungen als zielführend erwiesen, die vorliegenden Datensätze mittels (Fast) Fourier-Transformation in den Frequenzbereich zur weiteren Analyse zu transformieren. Denn die Einzelwerterfassung von Montageprozess- und Qualitätskurven, betrachtet als reine Punkteschar, überwacht durch Toleranzgrenzen oder Hüllkurven, beschreibt das komplexe Prozessverhalten im Montagebereich nur unzureichend. Die Berücksichtigung von Störgrößen ist hierbei nur gegeben, wenn sich diese in überwachten Bereichen manifestieren und stärker auswirken als die lokal maximal verfügbare Toleranzbreite. Der Prozesserfolg ist maßgeblich vom gesamten Kurvenverlauf [119] abhängig, auch wenn anfänglich schadhafte Prozesszustände gegebenenfalls in späteren Prozessphasen geheilt werden. In beiden Fällen ist entscheidend, dass unterschiedliche Kurvenverläufe auf Störeinflüsse hindeuten, jedoch wird diese Informationsquelle nur selten beachtet. Der hohe manuelle Aufwand zur Identifizierung und Separierung alternativer Prozessabläufe im Daten- und Zeitbereich verhindert dies. Visuelle Lösungsansätze sind zwar teilweise praktikabel, jedoch erfordern sie immer eine manuelle Auswahl und Prüfung der Kurven.

5.2.2 E|ASY-Heat zur erweiterten Analyse von Montageprozess- und Qualitätskurven

Der erforschte Lösungsansatz basiert auf der Transformation von Montageprozess- und Qualitätskurven vom Daten- und Zeitbereich in den Frequenzbereich zur explorativen Analyse im Sinne von Visual Data Mining. Die Repräsentation der Kurven erfolgt als Kombination von Schwingungen, respektive deren Frequenzkomponenten anhand Frequenz und Amplitude. Hierfür wird die weit verbreitete diskrete Fourier-Transformation [163] in Form der lauffeucht optimierten Fast-Fourier-Transformation verwendet, aufgrund der Eigenschaften der untersuchten Signale. Entscheidend ist bei der Transformation von zeitdiskreten Signalen, dass die Länge des Abschnitts respektive die Anzahl der Stützstellen eine 2er-Potenz (2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, usw.) darstellen. Mittels Zero-Padding am Ende des Datensatzes kann jede vorliegende Prozesskurve ohne Informationsverlust auf die notwendige Länge angepasst werden. Besonders zu beachten ist, dass unstete Signalverläufe ein unendliches Spektrum erzeugen und somit die Analyse erschweren. Speziell in den untersuchten Montageprozesskurven spielt dieses Verhalten jedoch nur eine sehr untergeordnete Rolle.

Dieses Vorgehen erlaubt eine alternative Betrachtungsweise und Untersuchung der vorliegenden Kurve oder Kurvenschar auf Basis der spektralen Energieverteilung in unterschiedlichen Frequenzbändern, die eine deutlich gesteigerte Informationsdichte im Gegensatz zu berechneten Kennwerten wie einem maximalen Prozesswert aufweist. Hierbei geben Abweichungen im niedrigen, mittleren oder hohen Frequenzbereich respektive die Amplituden bestimmter Frequenzkomponenten Aufschluss über die Einwirkung von Störgrößen [140].

Zweidimensionale Prozess- und Qualitätskurven stellen im Zeitbereich hohe Ansprüche an die Prozessvisualisierung. Für die Darstellung des Kurvenverhaltens über eine größere Anzahl an Erzeugnissen und Prozessschritten hinweg wird eine Darstellung von drei Parametern gleichzeitig vorgeschlagen. Die erste vorgestellte Visualisierungsmethode basiert daher auf der Darstellung des Spektrums des betrachteten Montage- oder Prüfprozesses in einer Heatmap [164], alternativ auch der direkten Prozesskurven oder deren normierten Datensätzen. Im ersten Schritt sind die stützpunktbasierten Prozesskurven entweder als Rohdaten oder Normiert zu transponieren, um anschließend den Prozessverlauf auf der Y-Achse und die Erzeugnisreihenfolge auf der X-Achse abzubilden. Die Codierung der Amplitude erfolgt als Farbinforma-

tion, in steigender Reihenfolge von blau nach grün, orange und gelb. Alternativ erfolgt die Darstellung des Spektrogramm von wenigen Prozesskurven in jeweils untereinander angeordneten eigenen Darstellungen, wobei der Prozessablauf auf der X-Achse fallend und die Frequenzkomponenten steigend auf der Y-Achse dargestellt ist. Zusätzlich zeigt ein Qualitätsfeld oder -pixel auf Höhe der Prozesskurve das Ergebnis der Funktionsprüfung, entweder mit grün/rot oder definierten Farben für bestimmte Fehlerarten. Hierdurch sind auch komplexere Fehlermuster für den Maschinenbediener leichter erkennbar.

Insgesamt sind akute, systematische Änderungen und Abweichungen optisch für menschliche Anwender im zeitlichen Ablauf feststellbar. Die Identifikation signifikant schadhafter, systematischer Prozessänderungen wird durch die visuelle Rückkopplung der Qualitätsdaten erreicht. Hierbei dient eine zusätzliche Farbcodierung anhand der geprüften Funktionsfähigkeit für jede einzelne Prozesskurve bei jedem betrachteten Montageprozessschritt. Ausgehend von einer akuten Änderung in der Prozessvisualisierung in Kombination mit der Qualitätsrückkopplung einer nachgeschalteten Funktionsprüfung für das jeweilige Erzeugnis ist die spontane Verschlechterung der Funktionserfüllung aufzuzeigen. Die folgenden Abbildungen zeigen die gemeinsame Visualisierung von mehreren hundert Einpressvorgängen anhand normierter und direkter Prozesskurven sowie der spektralen Energieverteilung. Zusätzlich ist die Funktionsfähigkeit von funktionierenden (grün) und defekten Erzeugnissen (rot) bezogen auf exakt diese Montageprozessdurchläufe anhand der eindeutigen Seriennummer eingeblendet. Je nach Prozessschritt und Zielsetzung bietet sich die Darstellung von

- direkten Prozessdatensätzen zur groben Abweichungsanalyse,
- normierten Datensätzen im Zeitbereich zur feinen Abweichungsanalyse, oder
- dem abgeleiteten Frequenzspektrum der Prozesskurven zur frequenzbasierten Abweichungsanalyse

an. Alternativ zur Nutzung der X-Achse für die Zeit oder die explizite Erzeugnisreihenfolge ist für detailliertere Betrachtungen auch jeweils ein erzeugnisbasiertes Spektrogramm pro Prozessdurchlauf möglich.

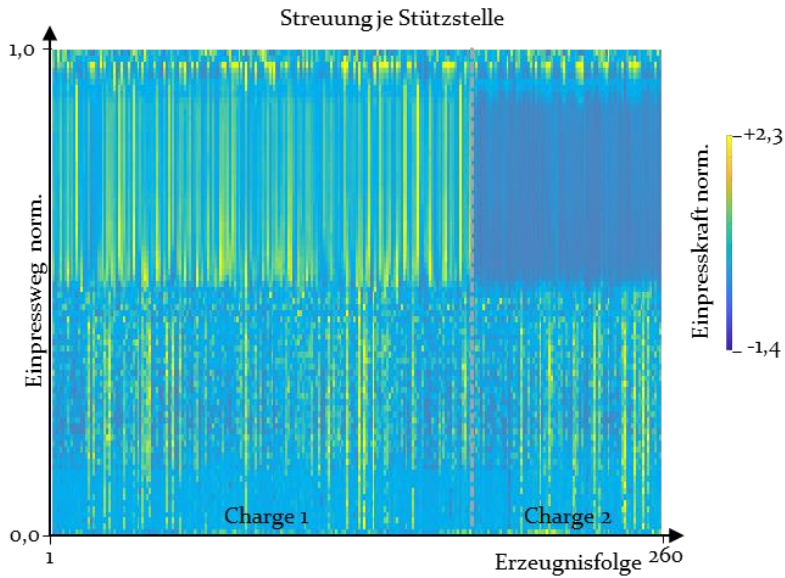


Bild 35: Abweichungsanalyse anhand der Streuung je Stützstelle über viele Prozesskurven

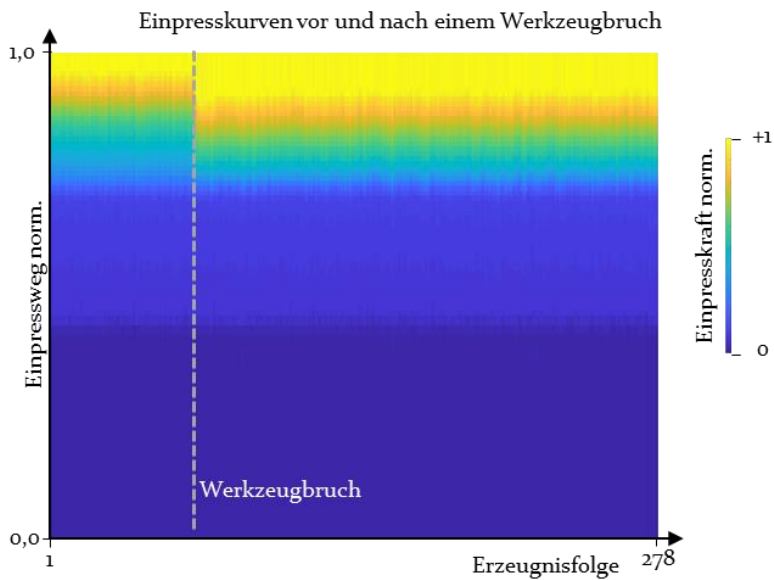


Bild 36: Änderungsdetektion anhand der direkten Montageprozessdaten über viele Erzeugnisse

Zur Illustration zeigt Bild 35 die Prozesskurven von 260 Einpressvorgängen, die anhand der einheitlichen Normierung auf unterschiedliche Chargen aufgrund des abweichenden Musters im Streuungsverhalten am jeweiligen Kurvenstützpunkt hinweist. Generell sind so systematische Änderungen einfach zu detektieren, aufgrund des abweichenden Musters basierend auf einem geänderten Grundrauschen oder einer neuen systematischen Verteilung.

Bild 36 zeigt das Muster von 278 normierten Einpresskurven vor und nach einem Werkzeugbruch. Die ersten Prozessphasen sind von der Änderung nicht betroffen, jedoch sind die maximalen Prozesskräfte viel früher erreicht und halten über einen längeren Weg an.

Die sehr detaillierte Darstellung des Spektrogramms von neun aufeinanderfolgenden Erzeugnissen in Bild 37 zeigt die visuelle Mustererkennung von nicht funktionierenden Erzeugnissen. Im Gegensatz zu funktionierenden Bauteilen weisen diese eine hohe Energiedichte in allen Frequenzen in der letzten Phase des Einpressprozesses auf. Gleichzeitig ist kaum Energie im mittleren und hohen Frequenzbereich bei Gutteilen vorhanden.

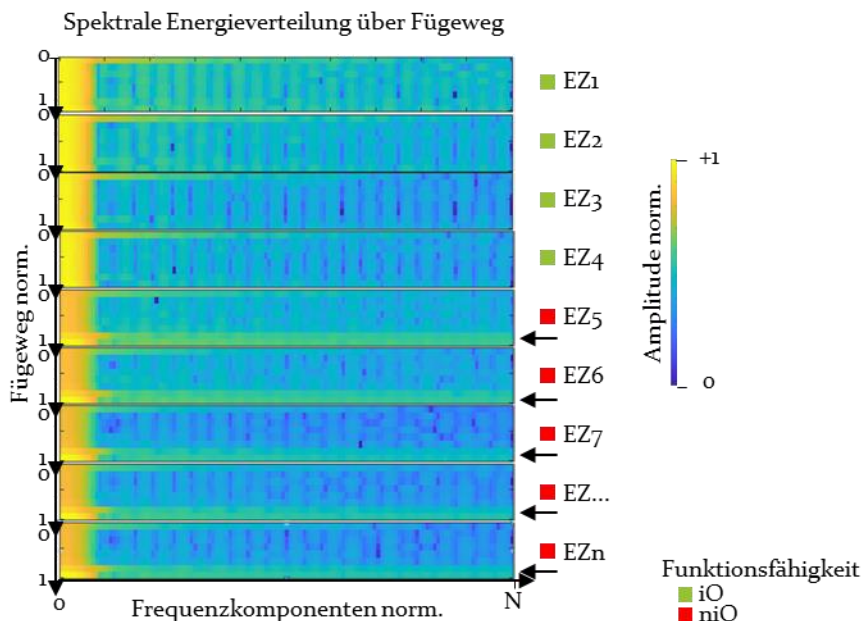


Bild 37: Spektrogramm zur Änderungsanalyse in Einzelprozessen mit Rückkopplung der Qualitätsprüfung

Kritisch anzumerken ist, dass bei Verwendung einer Farbcodierung die Werte nicht exakt visuell bestimmbar sind. [165] Jedoch steht in dieser Vorgehensweise nicht ein einzelner, genauer Wert im Vordergrund, sondern die Änderung ganzer Kurvenscharen.

Um nicht nur sporadische und systematische Änderungen durch die bedienergeführte Auswertung zu erkennen, sondern auch die Wissensgenerierung anhand alternativer Prozessabläufe durch maschinelle Analysen besser zugänglich zu machen, befasst sich der folgende Abschnitt mit der Wissensgenerierung.

5.3 E|ASY-Class und E|ASY-Pat zur maschinell-unterstützten Wissensentdeckung in Montageprozessen

Montage- und Prüfprozesse werden konventionell durch eher statische Toleranzgrenzen und Hüllkurven überwacht. Zur Steigerung des genutzten Informationsgehalts von Prozesskurven zeigt dieser Abschnitt mehrere Verfahren im Rahmen von E|ASY-Class zur automatisierten Wissensgenerierung sowie der musterbasierten Methode E|ASY-Pat zur Aufdeckung von Prozessänderungen mit schadhafter Auswirkung auf die Funktionserfüllung des montierten Erzeugnisses, inklusive neuartiger Visualisierung der entscheidenden Prozessbereiche.

5.3.1 Die Modellgenerierung anhand von Montageprozesskurven ist komplex

Wie bereits in Kapitel 4 angesprochen, ist der Aufwand zur Entwicklung einer automatisierten Fehlererkennung gerade in Montageprozessen groß. Gleichzeitig stellt sich die Frage, ob genau ein Modell zur Erkennung vieler und unterschiedlicher Wirkmechanismen wie Werkzeugbruch, Materialstärke oder fehlende Werkstücke zielführend ist. Auch die Abdeckung einer großen Varianz und Robustheit gegen neuartige und unbekannte Störungen spielt eine entscheidende Rolle. Weiterhin ist eine hohe Sensibilität bei gleichzeitig hoher Klassifikationsgüte notwendig, um wenig Pseudofehler zu generieren. Jedoch weisen die meisten Montageprozesse in der laufenden Produktion einen sehr geringen Anteil fehlerhafter Prozessdurchläufe auf, weshalb Trainings- und Testdatensätze zwangsläufig massiv unausgeglichene sind. Konventionell mittels DoE erzeugte Datensätze reflektieren nur definierte Störeinflüsse und bilden eher einen labortypischen Maschinenzustand ab.

Im Gegenzug ist auch die Anzahl erfolgreicher Prozessdurchläufe im Rahmen einer statistischen Versuchsplanung wirtschaftlich kaum abbildbar, die jedoch notwendig für eine datengetriebene Prozessüberwachung wäre.

Speziell im Bereich von Montageprozessen herrscht die Betrachtung von diskretisierten Prozesskurven anhand der stützpunktbasierten Kraft-Weg- oder Kraft-Zeit-Wertepaare vor. Das bedeutet, dass ähnlich zu abgeleiteten Kennwerten immer nur ein Stützpunkt berücksichtigt wird. Gleichzeitig werden die umliegenden Werte und Kurvenverhaltensweisen nicht beachtet. Im Rahmen der Prozessüberwachung bleiben Änderungen der Prozesscharakteristik solange unberücksichtigt, bis mindestens ein gemessener Wert der Prozesskurve eine meist statische Hinweis- oder Eingriffsgrenze überschreitet. Regelkarten prüfen zwar auf Trends und eine dauerhafte Lage über oder unter dem Mittelwert, jedoch nur auf Basis abgeleiteter Kennwerte. Speziell bei Störungen, die sich nur minimal oder vor allem innerhalb der Grenzen manifestieren, ist eine Klassifikation oder Unterscheidung der Erzeugnisse sowie die Erkennung eines geänderten Zustands nur eingeschränkt möglich. Daher nutzt die folgende Vorgehensweise bis zu vier unterschiedliche Sichtweisen mittels

- manueller Regelableitung anhand des Spektrums der Prozesskurven,
- stützpunktbasierten Regeln anhand des Verlaufs der Prozesskurven und
- stützpunkt- sowie musterbasierte Merkmale der Kurven,

um eine hohe Klassifikationsgüte zu gewährleisten. Hierzu erfolgt die Betrachtung der Prozesskurven anhand deren Rohdaten, spektraler Energieverteilung und enthaltenen Mustern.

5.3.2 E|ASY-Class - Wissensentdeckung in Prozesskurven in der Montage

Die Vorgehensweise E|ASY-Class nutzt zunächst eine stützpunkt- oder frequenzbasierte Repräsentation der Prozessdaten von einzelnen Prozessschritten, um anschließend mehrere Klassifikatoren zu trainieren und zu evaluieren. Hierbei steht die Ermittlung des besten Klassifikationsmodells im Vordergrund, um im Rahmen der Wissensentdeckung wichtige Eigenschaften der Prozesskurven aufzudecken, während parallel die Eignung der Datengrundlage für die automatische Fehlererkennung anhand der generierten Modelle geprüft wird. Die Datensätze für die

spätere Validierung bestehen aus den direkt gemessenen Werten Drehmoment im Schraubprozess und Kraft über Weg oder Zeit sowie dem indirekten Messwert des Motorstroms während dem Einpressprozess. Für den abschließenden Vergleich der Klassifikatoren werden zunächst bis zu drei verschiedene Ansätze genutzt, um erfolgreiche Modelle anhand der Prozesskurven zu generieren:

- Manuelle Regelableitung bei unausgewogenem Datensatz
- Entscheidungsbaum
- Neuronales Netzwerk oder Convolutional Neural Network

Manuelle Regelableitung

Bei unausgewogenen Datensätzen wird versucht, manuell einfache Regeln im Sinne von Novelty Detection aufzustellen, um erfolgreiche Prozessdurchläufe zu modellieren. Hierbei erfolgt die Klassifikation von störungsbehafteten Abläufen durch Ablehnung des Regelwerkes. In diesem Zuge ermöglicht die Nutzung des Frequenzbereichs das Prozessverhalten der gesamten Kurve anhand ihrer spektralen Energieverteilung zu charakterisieren, anstelle der stützpunktbasierten Betrachtung. Für die Regelerstellung wird zunächst die Streuung der Amplitude je Frequenzkomponente von erfolgreichen Prozessdurchläufen visualisiert und es wird versucht auffällige Muster zu entdecken. Hierbei sind markante Amplitudenunterschiede von vorselektierten Frequenzkomponenten als Regel zu formulieren, die mit größer/kleiner-Operatoren gestaltet ist. Zur Feinjustierung und Validierung der einzelnen Regeln dienen ein Datensatz mit erfolgreichen Prozessdurchläufen zur Optimierung der Pseudofehler und ein Datensatz mit bekannt fehlerbehafteter Durchführung zur Optimierung der Fehler-Erkennungsrate.

Entscheidungsbaum

Je Datenrepräsentation und Defektfall wird als Klassifikator ein Entscheidungsbaum trainiert. Hierbei entsteht ein prüfbares Regelwerk mit strikten Kennwertbereichen, das von Experten zu validieren ist. Diese Regeln basieren auf einer konventionell stützpunktbasierten Bewertung des Parameterbereichs, wobei eine weiche Auslegung wie bei Fuzzy-Regeln im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet wird.

NN

Ein binärer Klassifikator als NN wird zur Unterscheidung von guten und schadhaften Prozessdurchläufen anhand der stützpunktbasierten

Prozesskurven trainiert. Basierend auf den gelernten stützpunktbasierten Merkmalen entsteht ein MLP mit BlackBox-Charakter.

CNN

Alternativ zum NN wird ein CNN trainiert und evaluiert. Dieses prüft die Prozesskurven auf einschlägige Muster im Kurvenverlauf, um entscheidende Features zu erkennen. Dessen Ergebnisse sind durch Anwendung der Guided Grad-CAM zu überprüfen, wie folgend in Kapitel 5.3.3 erläutert.

Zusammenführung

Entscheidend ist die Feststellung, welche Kombination aus Datenrepräsentation und Klassifikator die höchste Güte erreicht. Hierbei wird für die Wissensgenerierung abgeschätzt, welche Eigenschaften in den analysierten Prozesskurven für eine manuelle Analyse weiter verfolgt werden. In diesem Zuge deutet eine hohe Klassifikationsgüte der manuell abgeleiteten Regeln auf das gesamte Kurvenverhalten hin. Ein EB erkennt eher explizite Parameterbereiche und einfache Wechselwirkungen, während das NN und CNN musterbasiert prüft. Die beiden letzteren prüfen auf stützpunktbasierte Wechselwirkungen respektive Muster im Kurvenverlauf in den vorliegenden Kurven.

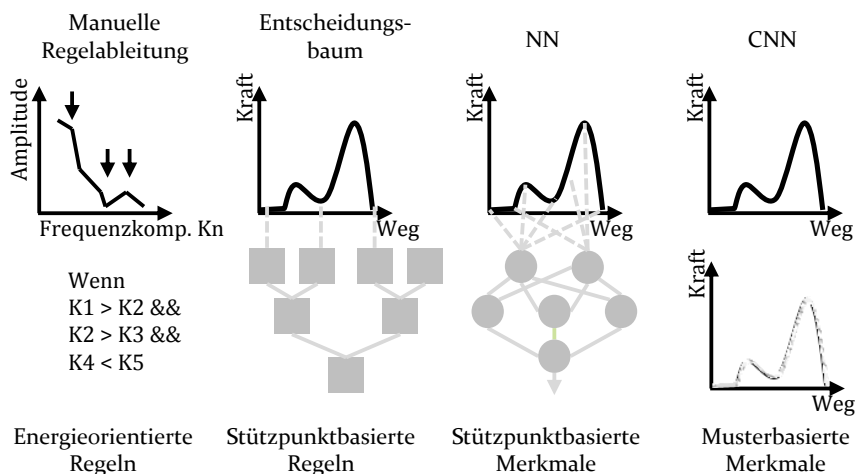


Bild 38: Vorgehensweisen und Unterschiede der Verfahren

Bild 38 und Tabelle 6 zeigen die Unterschiede der Verfahren, wobei als Resultat eine Tabelle (nicht dargestellt) entsteht, in der die Konfusions-

matrizen der Modelle gegenübergestellt sind. Diese Ergebnisse sind in Kapitel 7.2.2 zu finden. Anschließend sollen die Erkenntnisse der jeweiligen Herangehensweisen und Modelle in die Optimierung einfließen.

Tabelle 6: Vergleich der Ansätze zur Klassifikation von Prozesskurven

Kriterium	Manuelle Regeln	Entscheidungsbaum	Neuronales Netzwerk	Convolutional Neural Network
Datenrepräsentation	Spektrum	Stützpunkte	Stützpunkte	2D-Grafik
Modellgenerierung	manuell	automatisch	automatisch	automatisch
Kombinatorik	●	●	●	●
Parameterbereiche	hart/weich	hart	weich	weich
Nachvollziehbarkeit	●	●	○	●
● Hoch/Einfach möglich ● Gut/möglich ● Teilweise ● Gering/Selten ○ Nicht möglich				

Neben der Wissensgenerierung über die Eigenschaften des zugrundeliegenden Datensatzes ist auch die Nutzung seines Inhalts entscheidend. Daher wird im folgenden Abschnitt eine Methode zur Aufdeckung von Störeinflüssen in Montageprozessen anhand von Prozesskurven entwickelt.

5.3.3 E|ASY-Pat zur musterbasierten Aufdeckung von Störeinflüssen in Prozesskurven

Konventionell dienen Convolutional Neural Networks zur Mustererkennung und Klassifikation von Objekten in Bildern. Seit der Entwicklung der Methode Grad-CAM [151] ist es möglich, die Bereiche einer Input-Grafik hervorzuheben, die positiv zur Entscheidungsfindung einer bestimmten Klasse durch das Netzwerk beigetragen haben. Dieses Werkzeug wird nun in mehreren Vorgehensweisen genutzt und erweitert, damit die Anwendungsbreite von CNNs zusätzlich Prozessverläufe aus Montageprozessen umfasst. Hierfür werden die Darstellungen

- der Prozessphase mit Aktivierungsgradienten zur Lokalisierung der entscheidenden Merkmale,

- der Grad-CAM einer betrachteten Prozesskurve zur Merkmalsextraktion,
- des Umfelds der Kurve zur Erkennung außenliegender Bereiche,
- der Kurve des EZ mit prognostiziert reduziertem Qualitätsergebnis im Vergleich zu den vorhergehenden,
- der lokalisierten Grad-CAM zur feinen Merkmalsextraktion und
- der Guided-Backpropagation zur Plausibilitätsprüfung der prognostizierten Klasse

entwickelt. Im Folgenden sind die Herangehensweisen beschrieben.

$E|ASY\text{-}Pat$ -Phase - Entdeckung der Prozessphase mit Differenzierungsmerkmal

Die erste Darstellung nutzt ein Histogramm zur Visualisierung der Aktivierungsgradienten des höchsten Layer entlang der Prozessachse Zeit oder Weg. Die variable Klassenbreite wird anhand der Phasen des betrachteten Prozessschritts oder nach definierten, kritischen Prozessbereichen festgelegt. Die Übergänge der Phasen oder Bereiche sind als Überblendung mit ihrer Bezeichnung auf dem Diagramm anzuzeigen. Aufgrund der Dimensionsreduzierung der Aktivierungsgradienten von der zweidimensionalen Grad-CAM in die vorliegende 1D-Darstellung ist deren Wert je Stützpunkt zu summieren und entlang der Prozessachse als verbundene Linie aufzutragen. Die zusätzliche, hochauflösende Darstellung der aktuell bewerteten Prozesskurve unterstützt die Interpretation des Ergebnisses und hilft bei der Fokussierung auf Prozessbereiche mit Differenzierungsmerkmal. Bild 39 zeigt die konventionelle Darstellung der Grad-CAM (links), erweitert um die Überblendung der Prozesskurve und deren entscheidende Prozessphasen für die Kategorisierungsentscheidung des CNN anhand der Aktivierungsgradienten (rechts). In der Analysephase deuten Bereiche mit hohen Gradienten auf wichtige Merkmale der Prozesskurven hin, die eine Unterscheidung der trainierten Klassen des Modells ermöglichen. Durch den Vergleich der vorliegenden Darstellung mit abweichenden Prozesskurven von nicht funktionierenden Erzeugnissen soll bereits eine Fokussierung auf entscheidende Prozessphasen erfolgen. Die Abbildung zeigt die Prozesskurve und den dazugehörigen Intensitätsverlauf der Grad-CAM, ausgehend von einem Einpressvorgang mit weichem Kupfer als Material. Richtigerweise werden der sanfte Übergang von der

Zentrierphase nach Einpressphase I, sowie der flache Verlauf am Ende von Einpressphase II als wichtige Merkmale für die Klassifikationsentscheidung herangezogen und angezeigt.

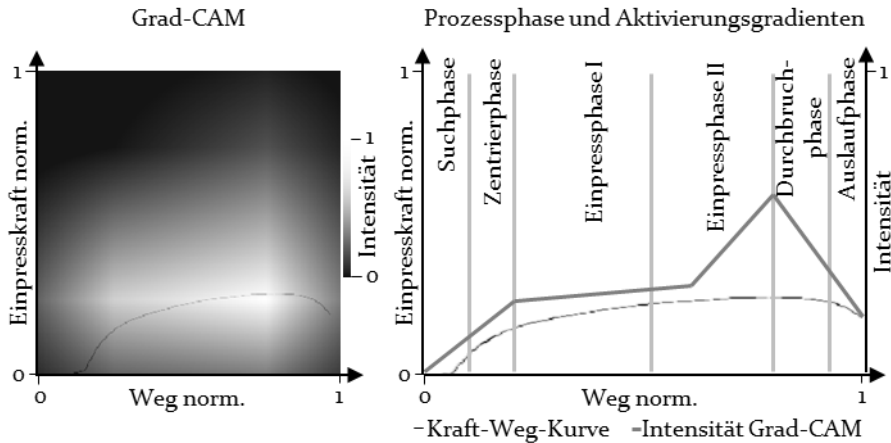


Bild 39: Darstellung der Aktivierungsgradienten entlang der Prozessphasen am Beispiel Fügen durch Einpressen

E|ASY-Pat-Ex - Merkmalsextraktion anhand der Prozesscharakteristik

Für die Entdeckung wichtiger Charakteristiken wird die Matrixmultiplikation von Guided BP und Grad-CAM nur noch auf Bereiche mit vorhandener Kurve angewendet. Hierzu wird die aktuelle Prozesskurve mit einer definierten Hüllkurve versehen, die Außenbereiche genullt und die Innenbereiche mit den Ergebnissen der Guided BP und Grad-CAM kombiniert. Durch Umfassung der aktuell vorliegenden Kurve mit einem definierten Band sind so entscheidende Teilbereiche hervorzuheben und gleichzeitig für die Entscheidungsfindung unwichtige Abschnitte auszublenden. Effektiv wird das Ergebnis der Guided Grad-CAM auf den Bereich der Prozesskurve und nahe, umliegende Bereiche begrenzt. Hierdurch werden Artefakte außerhalb des Verlaufs unterdrückt, um die Informationsmenge für den Anwender auf relevante Bereiche einzugrenzen. Bild 40 zeigt hierzu die einzelnen Prozessschritte und deren Ergebnis auf.

5 Wissensentdeckung in Montageprozessen mittels der Data Mining-Analysen $E|ASY\text{-}Heat$, $E|ASY\text{-}Class$ und $E|ASY\text{-}Pat$

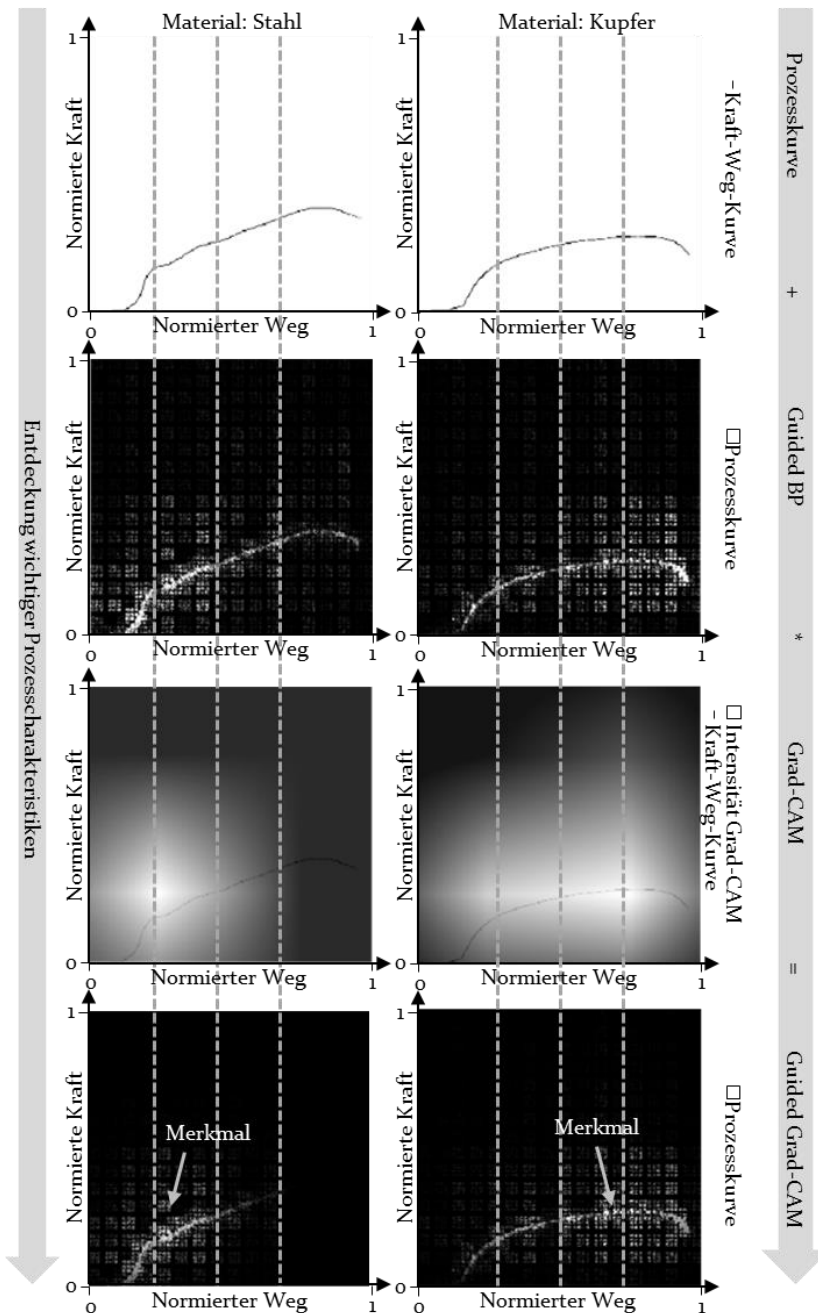


Bild 40: Vorgehensweise der geführten Grad-CAM am Beispiel Fügen durch Einpressen mit abweichendem Material

E|ASY-Pat-Out - Merkmalsextraktion in außenliegenden Bereichen

Neben den kurvennahen Bereichen sind für die Klassifikation gegebenenfalls auch Regionen entscheidend, welche die Prozesskurve nicht beschreibt. In diesem Fall weist das Ergebnis von einem oder mehreren Convolution-Layern keine Schnittmenge mit der Prozesskurve auf. Hier wird die Eigenschaft von CNNs genutzt, dass Features nicht zwingend von dem Ergebnis einer erfolgreichen, konventionellen Kantendetektion abhängen, sondern auch ein leerer Filter treffen kann. Die Datengrundlage basiert auf den Ergebnissen der Guided Grad-CAM für jeden Layer, die durch eine Matrixmultiplikation kombiniert werden. Das Ergebnis für die außenliegenden Bereiche ist ausgehend von der erwarteten Auswirkung als positiv (grün) oder schadhaft (rot) entsprechend einzufärben, wobei ein Experte diese Definition unterstützt. Bild 41 zeigt eine reguläre Kurve, die sich durch fehlende Störeinflüsse auszeichnet, weshalb der Bereich über und unter der Kurve rot dargestellt wird. Im Rahmen der prototypischen Implementierung sind die fünf Convolution-Layer C1-C5 dargestellt, sowie die beiden resultierenden außenliegenden Bereiche. In diesem Fall ergibt sich die Rotfärbung, weil mittels Domänenwissen der hohe Wertebereich eher auf starke Prozesseinflüsse und der niedrige Bereich eher auf einen Prozessdurchlauf ohne Fügepartner hindeutet.

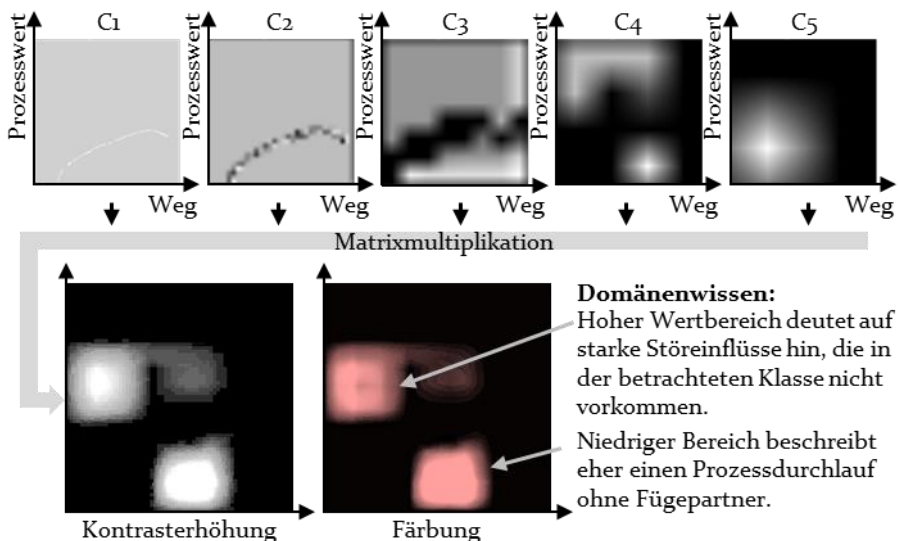


Bild 41: Merkmalsextraktion in außenliegenden Bereichen

$E|ASY\text{-}Pat\text{-}Dev$ - Abweichungsanalyse in der laufenden Produktion

Für die effiziente Entdeckung wichtiger Prozessabweichungen nutzt das folgende Vorgehen das Ergebnis der Guided Grad-CAM des höchsten Layers, ausgehend von einer abweichend klassifizierten Prozesskurve. Den Hintergrund der Darstellung bilden die Teilstücke der betrachteten Kurve, welche für die Klassifikationsentscheidung ausschlaggebend sind. Hierdurch wird der nicht entscheidende Rest der Prozesskurve ausgeblendet. Im Vordergrund werden eine definierte Anzahl vorhergehender, als gut klassifizierte Kurven gezeichnet. Ausschließlich im fokussierten Bereich prüft ein Experte die Abweichungen im Prozessverhalten des aktuellen Samples gegenüber den guten Prozessdurchläufen. Durch den Fokus der Guided Grad-CAM auf kritische Prozessbereiche wird eine genau definierte und eingegrenzte Abweichungsanalyse ermöglicht. Speziell bei systematischen Änderungen und sporadischen Abweichungen im Prozessverhalten erlaubt dieses Vorgehen die effiziente Aufdeckung von schadhaften Änderungen. Bild 42 zeigt die Überlagerung der vorhergehenden Prozesskurven (Vordergrund) auf dem Ergebnis der Guided Grad-CAM (Hintergrund).

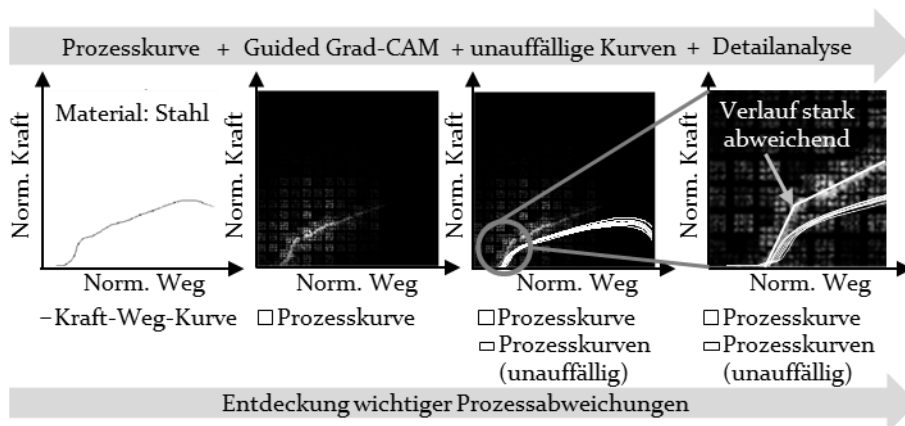


Bild 42: Abweichungsanalyse anhand modell-kritischer Merkmale

E|ASY-Pat-HD - Merkmalsextraktion mit hochauflösender, lokalisierter Grad-CAM

Die vorhergehenden Methoden stützen sich auf die Auswertung der höchsten Featuremap, aufgrund deren Wichtigkeit für die Klassifikation. Hierbei ist jedoch nur eine geringe Auflösung zu erzielen. Ein ähnlicher Ansatz in [166] verfolgt als Ziel, die Steigerung der Auflösung durch Kombination von Featuremaps mit wichtigen, aber niedrig auflösenden und weniger wichtigen, aber hochauflösenden Merkmalen zu realisieren. Als Untersuchungsobjekt dienen dort Kameraaufnahmen aus dem Straßenverkehr, um enthaltene Bildobjekte mit hoher Auflösung anzuzeigen. Im Rahmen dieser Arbeit wird mit Fokus auf Prozesskurven die durchgängige Multiplikation aller Featuremaps genutzt. Hierdurch erfolgt eine wesentlich genauere Lokalisierung der entscheidenden Features und Prozessphasen. Nachteilig sind die Verwässerung und partielle Auslöschung der Ergebnisse des höchsten Layers aufgrund der Matrixmultiplikation über alle Ebenen hinweg. Aufgrund der unterschiedlichen Eigenschaften von Bildern und Prozesskurven sind diese Effekte jedoch als gering einzustufen. Speziell Kurven von Montageprozessen sind stetig, bestehen aus eindeutigen Stützpunkten und haben keine Wechselwirkung mit umliegenden Flächen. Konventionell erfolgt die Auswertung entweder ausschließlich anhand der höchsten Ebene,

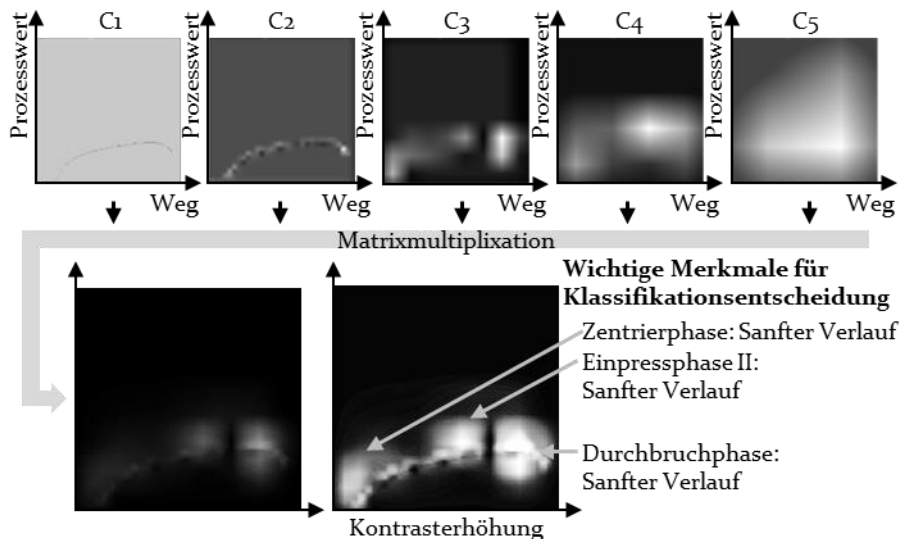


Bild 43: Hochauflösende, lokalisierte Musterhervorhebung für Prozesskurven

aufgrund ihrer Wichtigkeit für die Klassifikation und hohen Lokalisierung. Oder die Analyse betrachtet jede einzelne Ebene getrennt. Im Rahmen dieser Arbeit spielen jedoch speziell feine Abweichungen oder Signalfeatures eine entscheidende Rolle, wie in Kapitel 3 aufgezeigt. Abschließend erfolgt eine manuell geführte Kontrasterhöhung, bis die relevanten Kurvenfeatures gut erkennbar sind. Dies ist notwendig aufgrund der hohen Dynamik in jeder Featuremap und der einhergehenden Dämpfung durch die Matrixmultiplikation der gewählten Layer. Durch dieses Vorgehen wird der Verlauf der Prozesskurve in den Fokus gerückt und entscheidende Prozessphasen hervorgehoben. Bild 43 zeigt den Input und das Ergebnis der entwickelten, lokalisierten Grad-CAM für Prozesskurven.

$E|ASY\text{-}Pat\text{-}Plaus$ - Plausibilisierung der Prognose in der Anwendungsphase

Zur Unterstützung des Anwenders und Überprüfung des trainierten CNN während der Anwendungsphase ist eine Plausibilitätsprüfung der prognostizierten Klasse der aktuell vorliegenden Prozesskurve notwendig. Hierfür wird zunächst das aktuell vorliegende Sample klassifiziert und die Guided Back-Propagation basierend auf der Ergebnisklasse durchgeführt. Für die Überlagerung werden Prozesskurven aus dem ursprünglichen Trainingsdatensatz selektiert, um die Klasse zu repräsentieren. Abschließend prüft der Anwender basierend auf der prognostizierten Klasse des aktuellen Samples, ob entscheidende Features vorliegen und die Prognose den realen Fall beschreibt. Bild 44 zeigt eine mögliche Visualisierung zur Plausibilitätsprüfung der prognostizierten Klasse.

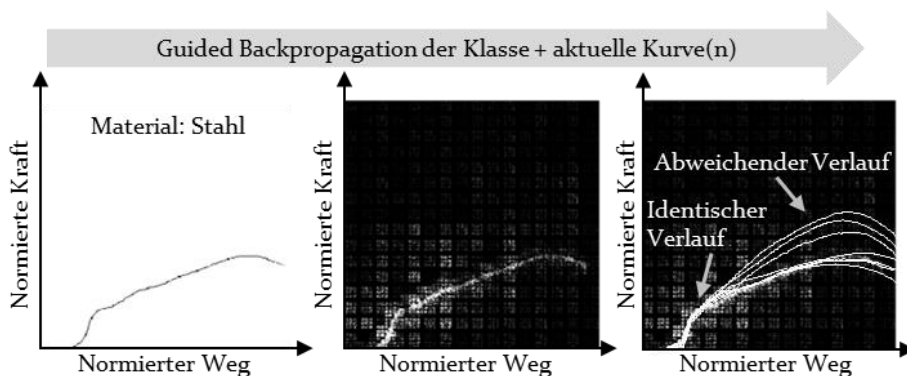


Bild 44: Plausibilitätsprüfung der prognostizierten Klassen mit Hervorhebung wichtiger Bereiche für die Klassifikationsentscheidung

5.4 Zusammenfassung und Bewertung

In den vorangegangenen Ausführungen wurde zunächst das Verfahren E|ASY-Heat zur alternativen, frequenzbasierten Betrachtungsweise von Montageprozess- und Qualitätskurven zur erweiterten Analyse mit dem Ziel einer effektiven, manuellen Prozessanalyse für eine große Erzeugnisanzahl vorgestellt. Die Betrachtung der Kurven im Frequenzbereich erlaubt die Bewertung der spektralen Energieverteilung und des frequenzbasierten Prozessverlaufs zusätzlich zur konventionellen Abbildung anhand von Stützstellen im Zeitbereich in einer Kraft-Weg-Kurve. Konventionelle, zweidimensionale Prozesskurvenvisualisierungen weisen in diesem Kontext Nachteile bei der Betrachtung und Unterscheidung großer Kurvenscharen auf, die mit der vorgestellten Vorgehensweise adressiert sind. Durch die zielführende Darstellung mittels Heatmap sind Änderungen im Prozessverhalten von menschlichen Bedienern einfach erfassbar und über das Qualitätsfeedback der Funktionsprüfung auf schadhafte Störeinflüsse projizierbar. Neben der konventionellen Betrachtung von eingehaltenen Wertebereichen ermöglicht eine frequenzbasierte Prozessanalyse auch die Prüfung auf regulären Prozessverlauf und systematische Abweichungen.

E|ASY-Heat ist unabhängig von der Art des betrachteten Montageprozesses, sofern Prozesskurven oder kurvenähnliche Datensätze vorhanden und sinnvoll in den Frequenzbereich transformierbar sind. Die universelle Einsetzbarkeit ist durch die dynamische Anpassbarkeit der Visualisierungsparameter in nahezu jeder Analysesoftware gegeben. Weiterhin ermöglicht die visuelle Prozessüberwachung zusätzlich die einfache Handhabung von Prozessschritten mit wiederkehrenden Mustern. Einerseits kann die Betrachtungsanzahl groß genug gewählt werden und andererseits findet keine explizite Modellierung statt.

Die im Bereich der maschinell-unterstützten Wissensgenerierung entwickelte Methode E|ASY-Class nutzt mehrere Verfahren und Ansätze, um mittels Entscheidungsbaum, Convolutional Neural Network und dem Novelty Detection-Verfahren mit manuellen Regeln neues Wissen in Datensätzen von Montageprozessen zu entdecken. Unabhängig vom betrachteten Prozess wird aufgezeigt, ob Differenzierungsmerkmale von erfolgreichen und abweichenden Prozessdurchläufen eher im gesamten Kurvenverlauf oder an einzelnen Stützpunkten zu finden sind. Abschließend ermöglicht E|ASY-Pat die musterbasierte Aufdeckung von Störeinflüssen mittels CNN anhand einer neuartigen Prozessanalyse für Montageprozesse. Hierbei wird der Anwender im Analyseschritt visuell

geführt, um die Entdeckung von Merkmalen in den vorliegenden Prozesskurven zu unterstützen. Erstens fokussiert E|ASY-Pat-Phase bestimmte Prozessphasen, die für das Modell wichtig für die Klassifizierungsentscheidung sind. Zweitens zeigt E|ASY-Pat-Ex nur Bildausschnitte der Prozesskurve, wie sie das Modell wahrnimmt. Hierdurch wird der Anwender gezielt auf Prozessphasen und Merkmale hingewiesen. Drittens nutzt E|ASY-Pat-Out Bereiche in der 2D-Grafik zur Wissensentdeckung, die nicht von der Prozesskurve beschrieben werden. Diese können für die Optimierung der bestehenden Prozessüberwachung mittels konventioneller Toleranzgrenzen genutzt werden. Viertens verwendet E|ASY-Pat-Dev zusätzlich die Überblendung von unauffälligen Kurven aus der laufenden Produktion oder dem Trainingsdatensatz, um dem Anwender eine einfache bedienergeführte Merkmalsextraktion mittels visueller Abweichungsanalyse bereitzustellen. Abschließend betrachtet E|ASY-Pat-HD alle Faltungsebenen des CNN durch eine Matrixmultiplikation, um eine hochauflösende Darstellung der Prozesskurve und wichtiger Bereiche für die Klassifikationsentscheidung aus Sicht des Modells zu generieren.

Allen Ansätzen ist gemein, dass die volle Informationsdichte von Prozesskurven aus Montageprozessen genutzt wird. Speziell die Auswertung feiner Signalanteile ermöglicht eine Differenzierung von guten und nicht funktionierenden Erzeugnissen, im Gegensatz zu einer Prozessüberwachung mit starren Toleranzen und definierten Überwachungsbereichen. Systematische Störeinflüsse sind bereits mit geringer Ausprägung und über die gesamte Prozesskurve hinweg identifizierbar, mit anschließender Fehlerlokalisierung. Zusätzlich ist die Eingrenzung auf betroffene Prozessphasen von Änderungen im Prozessverhalten visuell möglich, wodurch Abstellmaßnahmen gezielter ableitbar sind. Im Gegensatz zu konventionellen Vorgehensweisen wie SPC und FMEA ist eine datengetriebene Analyse der laufenden Produktion mit Bezug auf jedes einzelne Erzeugnis und deren vorliegende Prozesskurven möglich.

Nach erfolgter Änderungsdetektion und Wissensgenerierung in einzelnen Montageprozessschritten adressiert das folgende Kapitel komplexe Montageprozessketten.

6 E|ASY-MPK zur prozessschritt- übergreifenden Analyse verketteter Montageprozesse

Dieses Kapitel beschreibt im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methoden, um Qualitätsverschlechterungen auf signifikante Änderungen in komplexen Montageprozessketten zurückzuführen. Basierend auf Prozess- und Qualitätsdatensätzen, die sich in ihrem Detailgrad und der Repräsentation unterscheiden, untersucht diese Arbeit neu entwickelte Verfahren und Darstellungsarten. Diese sollen für die spätere Funktion schadhafte Montageprozesszustände und Kombinationen von Schädigungsmechanismen speziell auch innerhalb von bestehenden Toleranzgrenzen identifizieren. Als Lösungsansatz wird eine gemeinsame Anwendung der vorgeschlagenen E|ASY-MPK Methoden aus Kapitel 5 und 6 verstanden, um effizient bekannte sowie vor allem bisher unbekannte und unerwartete Fehlerursachen aufzudecken. Speziell wird in den folgenden Abschnitten die eventbasierte, prozessübergreifende Prozessüberwachung E|ASY-Event, die Darstellung von Wechselwirkungen E|ASY-Inter und die 3D-Visualisierung E|ASY-Curves für komplexe Montageprozessketten entwickelt. Die Realisierung und Erprobung der folgenden Methoden ist angelehnt an die vom Autor initiierten und am Lehrstuhl FAPS entstandenen studentischen Arbeiten [S26-45].

6.1 Vergleichende Bewertung von Data Mining-Werkzeugen für eine prozessschritt-übergreifende Analyse

Der noch junge Forschungszweig zur Überwachung von Prozessketten unterscheidet sich grundlegend von der konventionellen Betrachtung von einzelnen Prozessschritten, wie in Kapitel 4.2.3 bereits dargestellt. Im Fokus steht die prozessschritt-übergreifende Signalfortpflanzung, welche zu einer größeren Varianz der Kennwerte in Folgeprozessschritten oder Qualitätsergebnissen führt. Aus einem solchen datenbasierten Signal kann eine reale Fehlerfortpflanzung folgen. Speziell die Ursachenidentifikation von Grundursachen, welche zu einer verminderten Qualität führen, wird im Rahmen dieser Arbeit verfolgt. Gleichzeitig beziehen konventionelle uni- und multivariate Analysewerkzeuge, wie Regression, (M)ANOVA und Korrelationsanalysen, keine zeitlichen und zustandsbe-

dingten Änderungen mit ein [33]. Diese spielen jedoch in komplexen Montageprozessketten eine entscheidende Rolle, wie Kapitel 3 zeigt.

Tabelle 7: Vergleichende Bewertung von Data Mining-Werkzeugen für Fragestellungen anhand eigener Untersuchungen [Si-48][Pi]

Methoden/ Fragestellung	Stabiler Prozess	Δ Mittelwert	Δ Streuung	Δ MW Δ Streuung	Trend	Fehlerdichte	Wechselwirkungen	Ursachen Kombinationen	Auflösung zeitlich begrenzter Effekte	Prozessorientiert	Erzeugnisorientiert
Regression	●	○	○	○	●	○	◐	○	○	●	○
Korrelation	●	○	○	○	○	●	◐	○	○	●	○
Student T-Test	○	●	○	◐	◐	●	◐	○	○	●	○
(Multiple) Analysis of Variance (MANOVA)	○	●	●	●	◐	●	◐	◐	○	●	○
Principal Component Analysis (PCA)	○	◐	◐	◐	◐	●	●	●	○	●	○
Entscheidungsbaum (EB)	○	◐	◐	◐	○	◐	●	●	◐	●	●
Clustering	○	◐	●	●	○	●	◐	◐	◐	●	●
Neuronale Netzwerke (NN)	○	○	○	◐	◐	◐	●	◐	◐	●	●
Paralleler Koordina- ten Plot	○	●	●	◐	○	●	●	◐	○	●	●
Histogramm	●	●	◐	◐	○	●	○	◐	○	●	○
Box Plot	●	●	●	●	◐	●	○	◐	◐	●	○
3D-Visualisierung	●	●	◐	●	◐	●	◐	◐	●	○	●
Erkennung ● Hoch/Einfach möglich ◐ Gut/möglich ◐ Teilweise ◐ Gering/Selten ○ Nicht möglich											

Trotz der vielen Ansätze von Data Mining in der Produktion existiert bisher keine vergleichende Bewertung von Werkzeugen für komplexe Montageprozessketten unter Berücksichtigung von temporären und

zustandsbasierten Effekten, wie Werkzeug- oder Maschinenzustand. Im Fokus dieser Arbeit steht die Aufdeckung von akuten Störeinflüssen, die sich jedoch innerhalb der Toleranzgrenzen befinden, aber auf Qualitätsergebnisse auswirken. Deren Datensätze liegen kategorisch oder als Prozesskurven vor. Daher finden auch klassische, univariate statistische Werkzeuge Einzug in die Bewertung in Tabelle 7. Hierbei sind mehrere Faktoren ausschlaggebend und müssen je nach Anwendungsfall oder Auswirkung auf die vorliegenden Prozessdaten anders gewichtet werden. Entscheidend ist auch die Betrachtungsweise, die zumeist entweder prozess- oder erzeugnisorientiert sein kann. Der erzeugnis-anonyme, zeitliche Verlauf von einem abgeleiteten Kennwert im Sinne von SPC unterscheidet sich hierbei stark von der Betrachtung einzelner, eindeutig identifizierter Erzeugnisse anhand der Messdaten entlang der betrachteten Montageprozesskette.

Zusammenfassend existiert nicht ein einzelnes Werkzeug, um alle Problemklassen gleichzeitig in vollem Umfang zu adressieren. Daher wird im Folgenden auf Lösungsansätze mittels kombinierter Werkzeuge eingegangen. Speziell die Aufdeckung von Wechselwirkungen und signifikanten Parametern ist essentiell für die Analyse von komplexen Montageprozessketten, die permanent dem Einfluss meist unbekannter und unvorhergesehener Störeinflüsse ausgesetzt sind.

6.2 E|ASY-Event und E|ASY-Inter zur Identifizierung von Wechselwirkungen und Änderungen

Die während der Montage anfallenden, riesigen Datenvolumina bedingen unterschiedliche Sichtweisen zur gezielten Identifikation von ausschlaggebenden Parametern und deren Auswirkungen auf Montage- und Prüfergebnisse. Daher behandelt dieser Abschnitt Ansätze mit erzeugnis-, prozess- und ähnlichkeitsbasierter Betrachtung, um die vorhandenen Datensätze dem Nutzer für eine effektive Wissensgenerierung darzustellen.

6.2.1 E|ASY-Inter zur Aufdeckung von Wechselwirkungen

Die Kombination aus prozess- und erzeugnisorientierter Analyse mittels Parallelem Koordinatenplot (engl. Parallel Coordinate Plot, kurz PCP) ermöglicht die Betrachtung einfacher und komplexer Wechselwirkungen. [167] Das hier vorgeschlagene Vorgehen E|ASY-Inter zur Erkennung von Wechselwirkungen und Störeinflüssen in komplexen Montageprozessket-

ten zielt auf eine hohe bedienergeführte Detektionsrate von zeitlich diskreten, schadhaften Einflüssen ab. Speziell die explizite Darstellung des Kennwertverlaufs von jedem einzelnen identifizierten Erzeugnis entlang der MPK anhand dessen regulär erfasster Kennwerte während Montage und Funktionsprüfung erlaubt eine gruppen- und einzelteilbasierte Analyse von Wechselwirkungen. Hierbei wird jedes montierte Erzeugnis als eigens durchgeführter Versuch mit einer zufälligen Parameterveränderung im Rahmen der natürlichen Streuung von Montageprozessen betrachtet. Gleichzeitig nutzt die gruppenbasierte Analyse zusätzlich die Streuung der gemessenen Kennwerte anhand einer großen Zahl von Untersuchungsobjekten. Die Zugehörigkeit von Erzeugnissen zu einer Gruppe wird im Rahmen dieser Arbeit meist durch deren Klassifizierung an der Funktionsprüfung (Gut, Defekt) oder seltener anhand von ähnlichen Merkmalen und Parameterbereichen in Montageprozesskennwerten festgelegt. Der Hauptvorteil liegt in der datengetriebenen Untersuchung von Gemeinsamkeiten einer großen Erzeugnisanzahl mit zufälliger Parameterstreuung, im Gegensatz zu einer Einzelteilanalyse. Als erweiterte Datenquelle sind frequenzbasierte Kennwerte von Prozesskurven entlang der betrachteten MPK nutzbar, um Merkmale in Montageprozesskurven mit schadhafter Auswirkung auf die Funktionserfüllung des montierten Erzeugnisses aufzudecken.

Generierung und Eigenschaften der Darstellung

Im ersten Schritt wird ein PCP mit den beiden Hauptachsen Parameter und Wert definiert. Hierbei wird je eine parallele Parameterachse für alle vorhandenen Kennwerte entlang der betrachteten komplexen Montageprozesskette erzeugt, um im späteren Analyseschritt die Auswirkung starker zeitlicher Störeinflüsse [59] wie Werkzeugbruch, Chargenänderungen oder Prozessanpassungen aufzuzeigen. Basierend auf der Zuordnung der Kennwerte der durchlaufenen Einzelprozesse entlang der MPK auf das physikalische Erzeugnis anhand dessen Seriennummer, repräsentiert jede gezeichnete Linie den Prozessverlauf von einem eindeutigen Erzeugnis entlang der betrachteten MPK.

Festlegung des betrachteten Zeitbereichs und Filterung

Als Zeitbereich eignen sich Abschnitte mit erhöhter Fehlerquote in der Funktionsprüfung, um die Fehlerlokalisierung anhand der Kennwertbetrachtung zu unterstützen. Aufgrund der Durchlaufzeit von Erzeugnissen durch eine MPK sowie Ausschuss von unfertigen Bauteilen sollte der Datensatz um unvollständige Einträge bereinigt werden.

Standardisierung der Kennwerte

Die Anpassung der stark unterschiedlichen Wertebereiche je Kennwert und Montageprozessschritt erfolgt durch eine wählbare Normierung, im Rahmen der prototypischen Implementierung anhand der MATLAB-Funktion `z-score`. Diese erzeugt je Kennwert einen standardisierten Datensatz mit Mittelwert 0 und Standardabweichung 1.

Erweiterte Prozessinformationen

Für die zusätzliche Informationsanreicherung durch Prozesskurven kann eine frequenzbasierte Betrachtung anhand selektierter Frequenzkomponenten genutzt werden. Diese werden im Rahmen der prototypischen Implementierung durch die Fourier-Transformation gewonnen. Hierbei kann bereits die Grundschiwingung, respektive das Integral der betrachteten Prozesskurven ausreichen, wie Bild 45 mit einer sehr starken Dimensionsreduzierung der Kurven zeigt.

Die Selektion der Frequenzkomponenten wird iterativ durchgeführt, um eine Informationsüberflutung aufgrund zu großer Parameteranzahl zu vermeiden. Das Vorgehen startet zunächst nur mit dem Integral der betrachteten Montageprozesskurven, um markante Unterschiede in der eingebrachten Prozessenergie aufzuzeigen. Falls hierbei keine prozesseitig relevanten Abweichungen identifizierbar sind, wird die Anzahl der betrachteten Frequenzkomponenten ausgehend von der Grundschiwingung iterativ erweitert.

Analyse akuter Störeinflüsse anhand manueller Unterscheidbarkeit

Der Analyseschritt besteht im Kern aus einer visuellen Abweichungsanalyse, die eine gruppenbasierte Differenzierung von guten und defekten Erzeugnissen vornimmt. Hierbei wird versucht, einzelne Parameter zu identifizieren bei denen ein trennscharfer Schwellwert zur Unterscheidung der gewählten Erzeugnisklassen genutzt werden kann. Aufgrund von Wechselwirkungen in MPK sind auch verkettete Schwellwerte zielführend, wenn speziell die Kombination von Parameterbereichen der betrachteten Kennwerte zu defekten Erzeugnissen führt. Als Ergebnis der Filterfunktion sind für anschließende, tiefgehende Analysen nur noch wenige ermittelte Kennwerte und deren dazugehörige Prozesskurven zu betrachten.

Beispielhaft zeigt Bild 45 die visuelle Abweichungsanalyse, basierend auf der Rotfärbung von nicht funktionierenden Erzeugnissen. Diese kann auch komplexe Wirkzusammenhänge aufzeigen, weil der Kennwertverlauf von jedem einzelnen Erzeugnis entlang der komplexen Montagepro-

zesskette dargestellt wird. Daher sind einerseits ähnliche Verläufe von nicht-funktionierenden Erzeugnissen kritisch zu prüfen. Andererseits sind abweichende Verläufe von funktionierenden und nicht-funktionierenden Erzeugnissen zu untersuchen. Dieser gruppenbasierte Vergleich dient als erste Analysestufe, um potenziell ursächliche Kennwerte zu identifizieren und die Parameteranzahl für weiterführende Analysen zu reduzieren. Als Grundvoraussetzung für dieses Vorgehen müssen die kritischen Kennwerte im Datensatz abgebildet sein. Der dargestellte Fall an der MPK AKTOR₂ zeigt die Auswirkung einer abweichenden Komponentencharge der Kontaktierung. Der zweiadrige Kontakt wird jeweils an den Stationen M7 und M8 gefügt, weshalb deren beide Koordinatenachsen einen geringeren Wert bei der Fügeenergie aufweisen als die vorherige Charge. Die restlichen seriell durchgeführten Fügeprozesse weisen keine Auffälligkeiten auf, aufgrund der anderen Montageinhalte und unterschiedlicher Komponenten. Basierend auf der erfolgreichen Fehlerisolation mittels Gruppenvergleich identifizieren weitere Analysen die Fehlerursache gezielt.

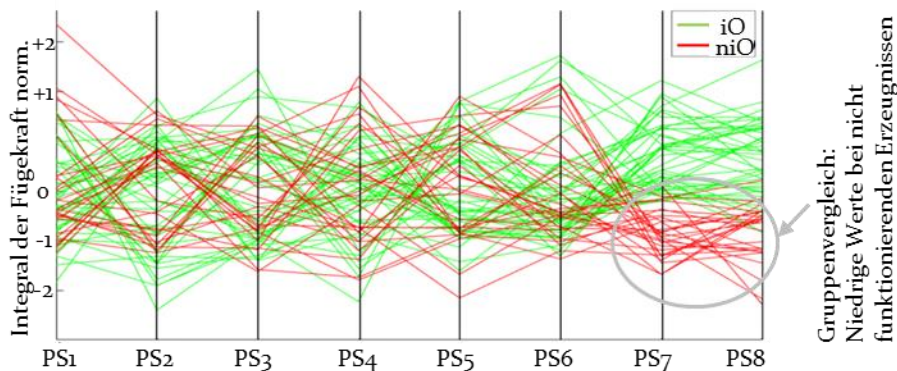


Bild 45: Gruppen- und erzeugnisorientierte Abweichungsanalyse anhand funktionierender und nicht-funktionierender Erzeugnisse auf dem Weg durch die Montageprozesskette

Möglichkeiten und Grenzen des Vorgehens

Die Aufdeckung der Unterschiede im Verlauf von Gutteilen und Schlechtteilen (NIO oder spezifisch anhand des error type) entlang der MPK erlaubt eine sehr einfache Erkennung von potenziell schadhafte prozessschritt-übergreifenden Wechselwirkungen. Zusätzlich ist es in der prototypischen Implementierung möglich, einzelne Erzeugnisse zu selektieren, um deren Prozessverlauf sowie deren Gemeinsamkeiten und

Abweichungen zu bestimmten Gruppen zu analysieren. Die Reihenfolge der Kennwerte im PCP kann einerseits im Gleichlauf mit den Parametern entlang der MPK erfolgen, für ein besseres Verständnis in der Werkstatt. Andererseits empfiehlt sich auch eine produktionstechnologische oder funktionale Sortierung bei bekannten und kritischen Wirkzusammenhängen oder Fügepartnern.

Bei der Anwendung von E|ASY-Inter gilt es jedoch folgende Problematiken zu berücksichtigen. Einerseits ermöglicht die Skalierung mittels z-Score zwar eine einheitliche Darstellung, verzerrt jedoch potenziell Prozessparameter mit sehr geringer und sehr großer Streuung. In diesen Fällen sind andere Beschreibungsmethoden wählbar. Andererseits erschwert der Wegfall der Zeitachse die Unterscheidung von zufälligen und systematischen Störeinflüssen, die in Kapitel 6.3 mittels der prozessschritt-übergreifenden 3D-Visualisierung E|ASY-Curves gelöst wird. Jedoch ermöglicht der fehlende zeitliche Verlauf potenziell die Rückführung scheinbar zufälliger Störungen durch visuelle Prüfung auf eine gemeinsame, systematische Grundursache mit sporadischer Aktivierung.

Als Grenzen zeigen sich die geringe bis mittlere visualisierbare Parameteranzahl aufgrund der Darstellungsbreite und die beschränkte Überblickbarkeit bei großer Parameteranzahl durch den Bediener. Anstelle der hier gezeigten nutzergeführten Ähnlichkeitsbetrachtung bietet sich die Anwendung mathematischer Verfahren für eine mittlere bis hohe Parameteranzahl an.

6.2.2 E|ASY-Event - Eventbasierte, prozessübergreifende Prozessüberwachung

Hochautomatisierte Montagelinien stellen hohe Anforderungen an gut ausgebildetes Personal. Diese Mitarbeiter stehen komplexen Montageprozessketten gegenüber, deren Einzelmaschinen Hinweise zum aktuellen Prozessverlauf und der Qualitätsquote geben. Jedoch ist die Ursachenanalyse meist von Expertenwissen abhängig und erfolgt je nach Methode und Anwender nicht zwangsläufig datengetrieben oder gar prozessübergreifend. Eigene Untersuchungen haben zudem gezeigt, dass die meisten Montageprozessschritte zwar Datensätze speichern, jedoch nicht mit dem Benutzer sinnvoll kommunizieren, um eine Ursachenanalyse zu unterstützen. Jede bestehende, noch unentdeckte Ursache für Qualitätsmängel erzeugt im Schadensfall hohe Kosten für Nacharbeit und Ausschuss sowie Mehraufwand für Nachbezug. Daher ist das Ziel von

E|ASY-Event die einfache und schnelle Informationsbereitstellung zur datengetriebenen Unterstützung der Ursachenanalyse, um kürzere Reaktionszeiten zu ermöglichen. Hierdurch soll die Verfügbarkeit der Maschine, wie in Bild 46 dargestellt, durch eine verkürzte MTTR steigen. Der Schwerpunkt liegt im prozessorientierten Gruppenvergleich, um schadhafte und positive Änderungen eventbasiert aufzuzeigen. Hierbei wird jeder Prozesskennwert anhand Mittelwert und Standardabweichung auf Änderungen im Gruppenverhalten überwacht.

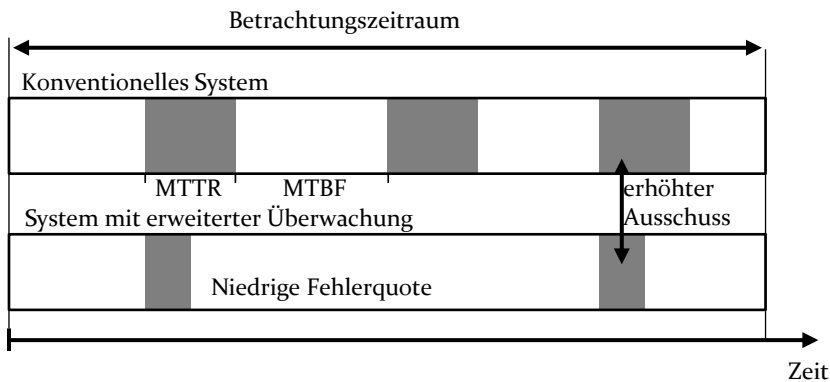


Bild 46: Idealisierter Verfügbarkeitsgewinn durch kürzere Zeitbereiche mit erhöhtem Ausschuss durch schnelle Reaktion

Wie in Kapitel 3.4 beschrieben sind Trends, Sprünge und Anomalien von Kennwerten basierend auf rein lokalen Prozessdaten von einem Prozessschritt nicht zwingend qualitätsrelevant. Der erforschte Ansatz der eventbasierten, prozessschritt-übergreifenden Prozessüberwachung nutzt die Rückkopplung der Qualitätsergebnisse von Funktionsprüfungen, um die schadhafte Auswirkung der Änderung eines Montageprozessschrittes auf die Funktionserfüllung des Endprodukts aufzuzeigen. In Anlehnung an die Überwachung von Prozessketten (Kapitel 4.2.3) wird hier die Signal- und Fehlerfortpflanzung anhand eines erzeugnis- und ähnlichkeitsbasierten Vergleichs mit eventbasierter Betrachtungsweise genutzt. Dazu dient die Erkennung von Änderungen in Qualitätskennwerten und dem Prozessverhalten der vorgeschalteten Montageprozessschritte, sowie deren paralleles Auftreten entlang der Prozesskette an exakt den gleichen Erzeugnissen. Im Unterschied zum Stand der Technik, im Speziellen Six Sigma, wird eine prozessorientierte und zusätzlich eine erzeugnisorientierte Betrachtungsweise gleichzeitig zur Überwachung der laufenden Produktion genutzt.

Die Basis von E|ASY-Event stellt ein Datensatz dar, der je Zeile die eindeutige Seriennummer von einem Erzeugnis und jeden selektierten Kennwert entlang der betrachteten komplexen Montageprozesskette enthält. Neben den Werten aus Montageprozessen sind auch Prüfkennwerte und das Prüfergebnis enthalten. Dieser Datensatz berücksichtigt nur erfolgreiche Prozessdurchläufe, weshalb nur in Sonderfällen die Filterung von Ausreißern notwendig ist. Für jeden Kennwert werden mittels gleitendem Fenster der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet, um das zeitliche Prozessverhalten abzubilden. Davon abgeleitet wird jeweils die Änderung von MW und StdAbw kalkuliert. Ausgehend von Schwellwerten, die für jeden Kennwert einzeln zu definieren sind, wird je Kennwert und Erzeugnis ein Änderungsmarker gespeichert. Empirisch hat sich der Grenzwert i.H.v. $\pm 0,5 \sigma$ für Änderungen ergeben. Erreicht die Quote der Änderungsmarker im betrachteten gleitenden Fenster einen weiteren Schwellwert, wird das Auftreten eines Events erzeugnisbasiert vermerkt. Dieser kennwertbezogene Anker reicht nun über eine entsprechende Anzahl von eindeutig identifizierten Erzeugnissen anhand deren Seriennummer. Abschließend wird für jeden Anker geprüft, ob bei den gleichen Erzeugnissen an einem

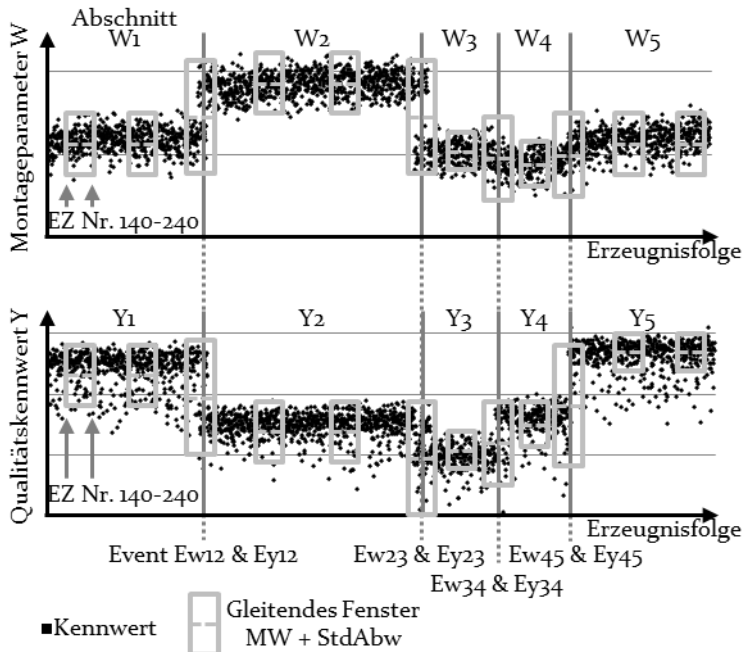


Bild 47: Ablauf der eventbasierten Änderungsdetektion und -korrelation

anderen Kennwert ein oder mehrere Anker vorhanden sind. Hierdurch erfolgt eine eventbasierte Änderungsdetektion und –korrelation, um eine prozessübergreifende Überwachung zu realisieren. Ausgehend von den betroffenen Prozessschritten sind einerseits Wechselwirkungen innerhalb der Montage aufzeigbar. Andererseits sind Änderungen am Funktionserfüllungsgrad auf ursächliche Montageprozesse zurückführbar, sofern diese in der Datengrundlage vorliegen.

Bild 47 zeigt die Methode von E|ASY-Event, bei der jeder selektierte Montageparameter auf Mittelwertabweichungen und die Streuung geprüft wird. Diese Änderungen sind als diskrete Ereignisse auf Erzeugnisebene anhand einer eindeutigen Seriennummer zu handhaben, anstelle der konventionell zeitbasierten Betrachtung.

Neben der Änderungsdetektion an Montageprozessen ermöglicht die gleichzeitige eventbasierte Überwachung von Prüfparametern die Aufdeckung von Änderungen in der Funktionserfüllung, die auch auf schadhafte Abweichungen im Prüfprozess oder des Maschinenzustands hindeuten kann. Effektiv wird eine eventbasierte Korrelation schadhafter Änderungen an den Prüfergebnissen, wie eine erhöhte Fehlerquote einer bestimmten Fehlerart oder sprunghaften Änderung von Qualitätskennwerten, mit Montageereignissen durchgeführt. Die Betrachtung der Ereignisse auf Basis der einzelnen betroffenen Erzeugnisse ist losgelöst von zeitlichen Verzerrungen, wodurch akute, sporadische und systematische Prozessänderungen auflösbar sind. Aufgrund der natürlich begrenzten Eingriffshäufigkeit in Montagesysteme pro Zeiteinheit, wie durch Kalibrieren, neue Komponentencharge zuführen, Parameteranpassung usw. ist dieser Ansatz zielführend, weil die gesamte MPK nur selten oder in überschaubarer Anzahl den Zustand ändert und damit nur wenige Events generiert. Weiterhin erlaubt die visuelle Plausibilitätsprüfung mit Expertenwissen des Maschinenbedieners die erfolgreiche Aufschlüsselung folgender Ausprägungen:

- Isolierte Ursache mit Auswirkung auf einen Wirkmechanismus,
- isolierte Ursache mit Auswirkung auf mehrere Wirkmechanismen,
- kombinierte Ursachen mit Auswirkung auf einen Wirkmechanismus oder
- kombinierte Ursachen mit Auswirkung auf mehrere Wirkmechanismen.

Neben den Auswirkungen von Änderungen in der Montage auf die Funktionserfüllung, fallen hierunter Wechselwirkungen innerhalb der Montageprozesskette sowie verstärkende Ursachenkombinationen.

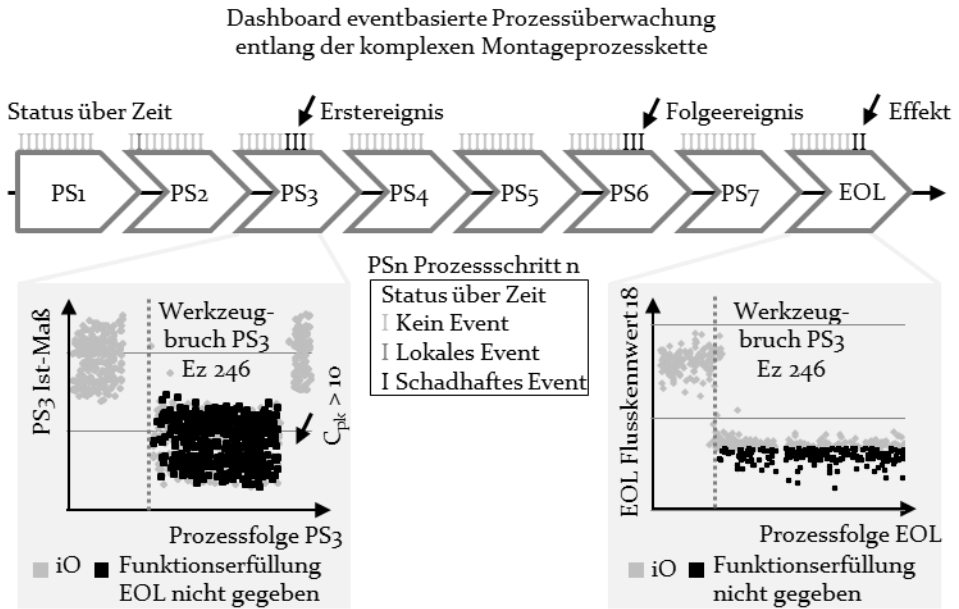


Bild 48: Dashboard der eventbasierten Überwachung für komplexe Montageprozessketten

Für eine effektive Visualisierung der komplexen Montageprozesskette zur prozessübergreifenden Eventdetektion wird zunächst das Layout der betrachteten Montagelinie, wie in Bild 48 dargestellt, nachgebildet. Hierbei wird jede Station durch einen Richtungspfeil mit ihrem Kurznamen dargestellt, um die Prozessschrittrichtung der MPK anzuzeigen. Jeder dazugehörige Prozessparameter wird durch einen Statusbalken repräsentiert, der die Ergebnisse der vorherigen Zeitabschnitte zur Bewertung des Prozessverlaufs über die Zeit anzeigt. Die Dauer der Abschnitte kann frei gewählt werden, ideal ausgehend von der Durchlaufzeit oder der Taktzeit. Alternativ wird in Bild 49 nur die logische Parameterfolge entlang der betrachteten komplexen Montageprozesskette dargestellt, bei sehr großer Parameterzahl. So ist eine schadhafte Veränderung an P2 mit Auswirkung auf P3 sowie erfolgreiche Abstellmaßnahmen in Zeitbereich 4 und eine schadhafte Änderung an P4 dargestellt. Starke Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge, welche die gleichen Erzeugnisse in Montage und Funktionsprüfung betreffen, führen

bei nicht-funktionierenden Erzeugnissen zu einer roten Einfärbung einer Montagestation oder des Parameters. Die Farbe Grün signalisiert einen Zusammenhang des Events mit einer sinkenden Fehlerquote. Starke, jedoch (noch) nicht kombiniert aufgetretene Änderungen nutzen die Farbe Gelb als frühzeitigen Hinweis für den Maschinenbediener. Parameter ohne Änderung sind mit der Farbe Grau visualisiert. Das Regelwerk ist in Tabelle 8 dargestellt.

Tabelle 8: Regelwerk zur Einfärbung einzelner Stationen innerhalb einer überwachten Montageprozesskette

Schritt 1 Änderung an	Schritt 2 Überprüfung	Schritt 3	Farbe Montage- station	Farbe EOL
Qualitätskennwert	In Richtung Eingriffsgrenze	-	-	Gelb
Qualitätskennwert	Änderung Wert	Montagekennwert Abweichung hin zur Eingriffsgrenze	-	Rot
Montagekennwert	-	-	Gelb	-
Montagekennwert	Fehlerquote EOL > X	-	Rot	-
Montagekennwert	Fehlerquote EOL < X	-	Grün	-
Montagekennwert	Änderung Wert	Qualitätskennwert Fehlerquote EOL steigt	Rot	-
Montagekennwert	Änderung Wert	Montagekennwert	-	Gelb

Insgesamt vermeidet diese Vorgehensweise eine überlastende Hinweismeldung an den Nutzer, wodurch die Akzeptanz für das System steigt. Gleichzeitig bietet es eine gute, datengetriebene Darstellung des aktuellen Zustands komplexer Montageprozessketten. Der dashboardorientierte Aufbau unterstützt die schnelle und effektive Fokussierung von der Gesamtübersicht der Linie direkt auf den potenziell ursächlichen Kennwert.

Parameter	Zeit 1	Zeit 2	Zeit 3	Zeit 4	...	Zeit n
Pn						
...						
P5						
P4						
P3						
P2						
P1						
Fehlerquote	1 %	5 %	5 %	2 %	0 %	0 %

Bild 49: Verdichtete Darstellung zur Anzeige einer großen Parameteranzahl einer komplexen Montageprozesskette über mehrere Zeitbereiche hinweg

Im Anschluss an die ähnlichkeitsbasierte Aufdeckung schadhafter Events auf Basis von Kennwerten ermöglicht die folgende 3D-Visualisierung eine Detailanalyse anhand von Prozesskurven entlang der betrachteten MPK.

6.3 E|ASY-Curves als prozessschritt-übergreifende 3D-Visualisierung für Montageprozesse

Im Gegensatz zu den bisherigen Lösungsansätzen wird in diesem Abschnitt die prozessschritt-übergreifende Visualisierung E|ASY-Curves im 3D-Raum entwickelt, um Zugriff auf den vollen Informationsgehalt einer betrachteten Montageprozesskette zu ermöglichen. Zusätzlich zu den bisher betrachteten Kennwerten dienen Prozess- und Prüfkurven sowie Strommessungen und Maschinendaten zur Erschließung der wichtigsten Datensätze. Hierbei soll der Anwender einen Überblick über die betrachtete komplexe Montageprozesskette erhalten, mit Fokus auf das Wesentliche und ohne Irritation durch Informationsüberflutung. Gleichzeitig ist die zeitliche Komponente von Zustandsänderungen zu adressieren. Dies kann mittels geeigneter Werkzeuge konventionell prozessorientiert sowie durch die prozessschritt-übergreifende Beobachtung von einem oder vielen selektierten Erzeugnissen entlang der betrachteten MPK in vollem Detailgrad erfolgen.

6.3.1 Bewertung der Visualisierungsmöglichkeiten von Prozesskurven in der Montage

Die Grundlagen für eine effektive Visualisierung von Montageprozessen bilden die verfügbaren Datensätze und die Auswahl einer geeigneten Visualisierungsmethode. Speziell im Bereich linearer Montageprozesse wie dem Fügen durch Einpressen existieren überwiegend zweidimensio-

nale Darstellungsarten. Je nach Software und Einstellungsmöglichkeiten wird standardmäßig nur die aktuelle Einpresskurve direkt an der Maschinensteuerung visualisiert. Erweiterte Programme stellen bis zu 5.000 Kurven [31] in einer 2D-Grafik überlagert dar. Dieser Ansatz zeigt starke Prozessabweichungen erfolgreich auf, jedoch gehen Detailinformationen und die Zeitachse verloren. Computerprogramme zeichnen fast ausnahmslos Grafiken vom Hintergrund bis zum Vordergrund, daher wird nur der letzte Prozessablauf mit realem Kurvenverlauf und ohne Überdeckungen dargestellt, sofern überhaupt eine gesonderte Kolorierung erfolgt. Bedingt durch die Linienbreite ist kein aussagekräftiger Rückschluss auf die Standardabweichung oder gar das Streuungsverhalten möglich. Bei einer großen Kurvenanzahl mit voller Nutzung der Toleranzbreite sind deskriptive Merkmale wie Mittelwert und Median nicht zu errahnen, weil Informationen über die Dichte verloren gehen. Gleichzeitig ist das zeitliche Prozessverhalten teilweise oder komplett nicht ersichtlich, wodurch spontane Änderungen und Trends nicht oder nur schwer erkennbar sind.

6.3.2 E|ASY-Curves als 3D-Prozessvisualisierung zur Ursachenlokalisierung in Montageprozessketten

Zentrale Aufgabe des entwickelten Systems zur 3D-Prozessvisualisierung von komplexen Montageprozessketten ist die verzerrungsarme, prozess-

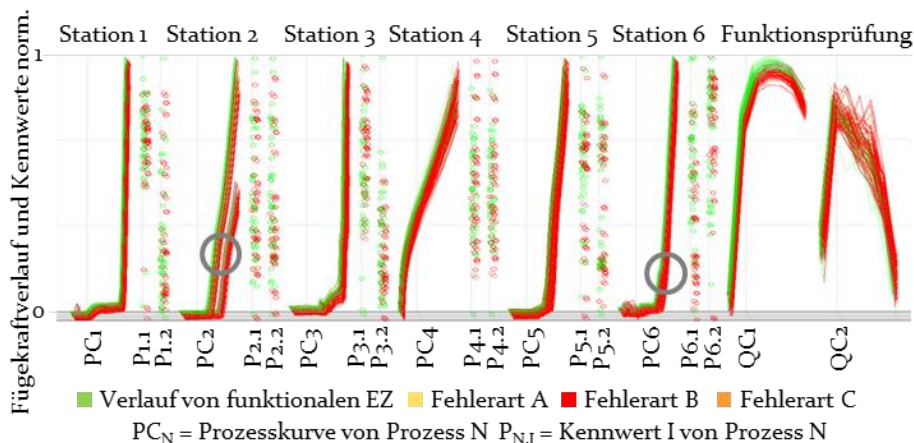


Bild 50: 2D-Draufsicht auf die betrachtete MPK mit abweichenden Zuführchargen an Prozessschritt 2 und 6

schritt-übergreifende Visualisierung von Prozessdatensätzen mit hohem Informationsgehalt. Der Erhalt der Zeitinformation durch eine eigene Achse im Koordinatensystem und die gewohnte 2D-Darstellung in der Draufsicht soll eine intuitive Nutzung und effiziente Analyse ermöglichen. Diese beiden Darstellungsarten sind in Bild 50 und Bild 51 ersichtlich. Zusätzlich sind BDE/MDE-Datensätze zur erweiterten Qualitätsanalyse eingebunden, um qualitätsbeeinflussende Änderungen über die gesamte betrachtete Montageprozesskette visuell erkennbar zu machen.

Zur Visualisierung von Änderungen am Betriebsmodus der SPS, die meist mit dem Eingriff eines Maschineneinstellers in einen Prozessschritt auftreten, wird ein Joch (Bild 51) mit definiertem Start- und Endzeitpunkt genutzt. Die visuelle Korrelationsanalyse nutzt nun den Zeitbereich ab dem initialen Eingriff und nach erfolgtem Eingriff, um Veränderungen auf die Prozesskurven entlang der komplexen Montageprozesskette und auf die Qualität des Endprodukts aufzudecken. Das dargestellte Joch beschreibt aggregiert mehrere Eingriffe des Maschinenbedieners in den Prozessschritt in kurzen Zeitabständen, die jedoch erfolglos für die Störungsbehebung sein sollten.

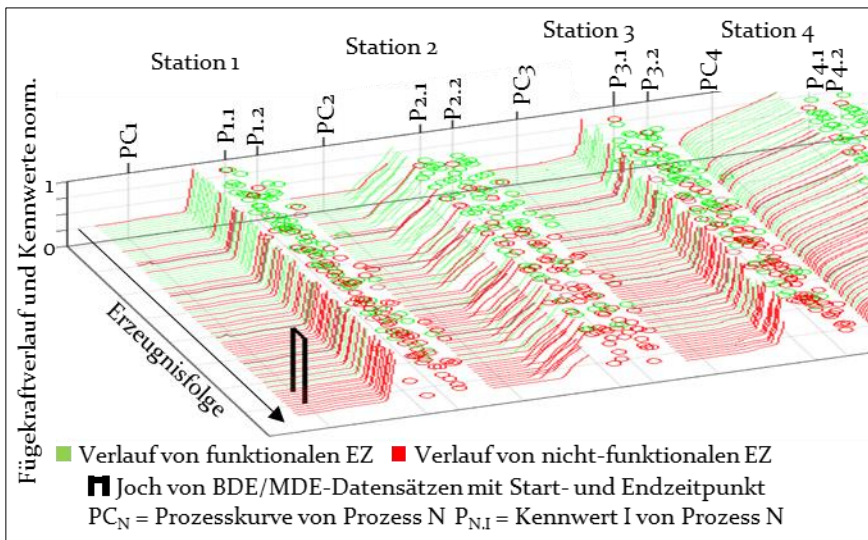


Bild 51: Visualisierung von BDE/MDE Datensätzen zur Erkennung manueller Änderungen an der Station

Weiterhin ermöglicht die interne Datenaufbereitung, dass neben Prozesskennwerten auch Prozess-, Qualitäts- und Energiekurven in einer

Darstellung sichtbar sind. Hierfür wird einerseits die potenziell unterschiedlich große Anzahl an Stützstellen der Kurven auf eine einheitliche Breite projiziert, wodurch die Datenaufbereitung erleichtert wird. Andererseits ermöglicht die einstellbare Normierungskomponente, dass eine Min-Max-Normierung entweder anhand der gesamten Kurve oder je Stützpunkt stattfindet. Die beiden Optionen arbeiten stark gegenteilig, wobei eine Normierung des kompletten Kurvenverlaufs Bereiche mit niedrigen Prozesswerten optisch unterrepräsentiert. Die stützpunktbasierte Betrachtung legt den Fokus auf prozentuelle Abweichungen am lokalen Stützpunkt, um hohe Werte zu dämpfen und niedrige Bereiche zu verstärken. Das Prozessverhalten und die zu beantwortende Fragestellung entscheiden die Art der Normierung. Parallel neben den Prozesskurven sind deren abgeleitete Kennwerte dargestellt, um die konventionell bereits erfassten Daten direkt auswertbar zu machen.

Im Sinne der explorativen Datenanalyse (EDA) [171] ist die dynamische Selektion bestimmter Erzeugnisse und deren Hervorhebung durch Brushing [172] möglich. Hierdurch wird ein weiteres effizientes Analysewerkzeug nutzbar, wie bei der Fragestellung, wo sich dieses Erzeugnis oder eine ausgewählte Gruppe von anderen unterscheidet. Speziell die sequentielle Anordnung der Prozesskurven ermöglicht die Verfolgung des gesamten Prozessschrittverlaufs von einem bestimmten Erzeugnis, womit auch sporadisch auftretende Wechselwirkungen analysierbar sind. Mittels Brushing ist eine gezielte Einzelteilverfolgung und auch ein Gruppenvergleich effizient darstellbar. Zusätzlich ermöglichen die freie Kameraführung und der Zoom beliebiger Bereiche eine sehr dynamische Exploration.

Die Einfärbung der Energie-, Montage- und Qualitätsdaten erfolgt nach dem Ergebnis der Funktionsprüfung. Hierdurch sind Gutteile (grün) von den im Datensatz vorhandenen Schlechtteilen (gelb, rot, orange) visuell unterscheidbar, wie auch unterschiedliche Fehlerarten untereinander.

Der Absprung in einzelne Stationen ist für Detailanalysen sinnvoll, wobei die Skala der Prozesswerte und -kurven von normalisiert auf die realen Werte wechselt. Dies ermöglicht, nach der visuellen Analyse über die betrachtete Montageprozesskette, eine mittels Expertenwissen fundierte Prozessanalyse an selektierten Prozessschritten.

Falls parallelisierte Prozessschritte vorhanden sind und damit alternative Fertigungspfade existieren, ist eine gesonderte Darstellung ratsam. Speziell im Fall von unterschiedlichen Maschinen- und Werkzeugzuständen auch bei nur leichten Kalibrierungsabweichungen und damit

gegebenenfalls unterschiedlich ausgeprägten Wechselwirkungen muss eine andere Analysestrategie Anwendung finden. Hierbei kann, bei einer überschaubaren Anzahl von Alternativpfaden, auf mehreren Visualisierungsschienen die Darstellung und damit getrennte Analyse erfolgen.

6.4 Zusammenfassung und Bewertung

Grundlage der erforschten prozessschritt-übergreifenden Analyse komplexer Montageprozessketten bilden die drei erforschten Methoden E|ASY-Inter zur Aufdeckung von Wechselwirkungen mittels PCP, die eventbasierte Prozessüberwachung E|ASY-Event und E|ASY-Curves, die 3D-Visualisierung von Prozesskurven entlang der betrachteten komplexen Montageprozesskette. Die erste Vorgehensweise E|ASY-Inter zur Adhoc-Analyse mittels PCP ermöglicht eine ergebnis- und gruppenorientierte Betrachtung des Montageweges, um abweichende und schadhafte Prozessverläufe sowie problematische Kombinationen in MPK aufzudecken. Hierbei sind mittlere und starke Prozessänderungen einfach zu detektieren. Parallel prüft die entwickelte eventbasierte Prozessüberwachung E|ASY-Event permanent datengetrieben, ob Qualitätseinbußen ihren Ursprung in geänderten Montageprozesszuständen haben, die gegebenenfalls einem Störeinfluss unterliegen. Sie ermöglicht eine schnelle Reaktion zur Problembeseitigung durch vorausschauende und bestätigte Korrelationen zwischen sich verändernden Qualitätsmerkmalen und Prozessänderungen in der vorgeschalteten Montageprozesskette. Die Universalität der vorgestellten Methoden ist durch den datengetriebenen Ansatz und die freie Konfiguration der Analysealgorithmen gegeben.

Kernstück der prozessschritt-übergreifenden 3D-Visualisierung E|ASY-Curves zur bedienergeführten Mustererkennung von Prozessverläufen mit schadhafter Auswirkung auf die Funktionserfüllung des montierten Erzeugnisses über die gesamte MPK hinweg ist die freie Kameraführung in Verbindung mit Brushing von selektierten Erzeugnissen. Die konfigurierbare Datenvisualisierungskomponente mit unterschiedlichen Normierungsvarianten und die definierte Breite je Prozesskurve ermöglicht eine effektive, prozessschritt-übergreifende Abweichungsanalyse von mehreren Hundert gefertigten Erzeugnissen.

7 Prototypische Umsetzung sowie Validierung der E|ASY-MPK Methoden und Algorithmen

Dieses Kapitel befasst sich zunächst mit der Umsetzung der in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Methoden zur Fehlererkennung und Wissensgenerierung in isoliert betrachteten Prozessschritten mittels bedienergeführter visueller und automatisierter Methoden (Kapitel 5) sowie zur prozessschritt-übergreifenden Analyse komplexer Montageprozessketten (Kapitel 6). Die Implementierung der erforschten Methoden erfolgt in Visualisierungstools und Analyseworkflows, deren Funktionsfähigkeit im Rahmen von Anwendungsfällen validiert, evaluiert und verglichen wird. Anschließend folgt die Diskussion der Funktions-evaluierung. Die Datengrundlage basiert auf eigenen Untersuchungen an einem Pressenmodul am Lehrstuhl FAPS sowie einigen Montageprozessschritten und den komplexen Montageprozessketten AKTOR₁ und AKTOR₂. Letztere sind aus Gründen der Geheimhaltung normalisiert und anonymisiert dargestellt, wobei Datensätze in dieser Arbeit generell meist bereits nach der Datenvorverarbeitung normalisiert vorliegen. Nur in speziellen Visualisierungen sind die realen Werte und Einheiten während des produktiven Einsatzes in der Werkstatt relevant.

Die Erprobung erfolgt anhand der Prozesse Fügen durch Einpressen und Schrauben, Funktionsprüfung sowie anhand kompletter MPK. Zentrale Kriterien zur Beurteilung sind die effektive Aufzeigung von Änderungen sowie die Einsetzbarkeit in der Werkstatt. Bei der Unterstützung der Ursachenanalyse und Fehlererkennung spielt die Interpretierbarkeit der Ergebnisse eine wichtige Rolle. Die Datenerhebung und Validierung der folgenden Ergebnisse ist angelehnt an die vom Autor angeleiteten und am Lehrstuhl FAPS entstandenen studentischen Arbeiten [S30-34,36-40,45-48].

7.1 Versuchsumgebung und Aufbau

Die Versuche zur Datengewinnung nutzen das Fügemodul Promess UFM₅ mit maximal 100 kN Presskraft am Lehrstuhl FAPS sowie mehrere MPK bei einem Projektpartner. Letztere bestehen hauptsächlich aus Fügemodulen und weiteren Montageprozessschritten sowie Funktionsprüfständen. Aufgrund der vergleichenden, datengetriebenen Herangehensweise

ist der genaue Aufbau der Erzeugnisse und Prozessschritte im Rahmen dieser Arbeit von geringer Bedeutung. Gleichzeitig unterstreichen diese Tatsache sowie die Breite der untersuchten Montageprozesse und deren Varianz, die universelle Einsatzbarkeit der entwickelten Methoden.

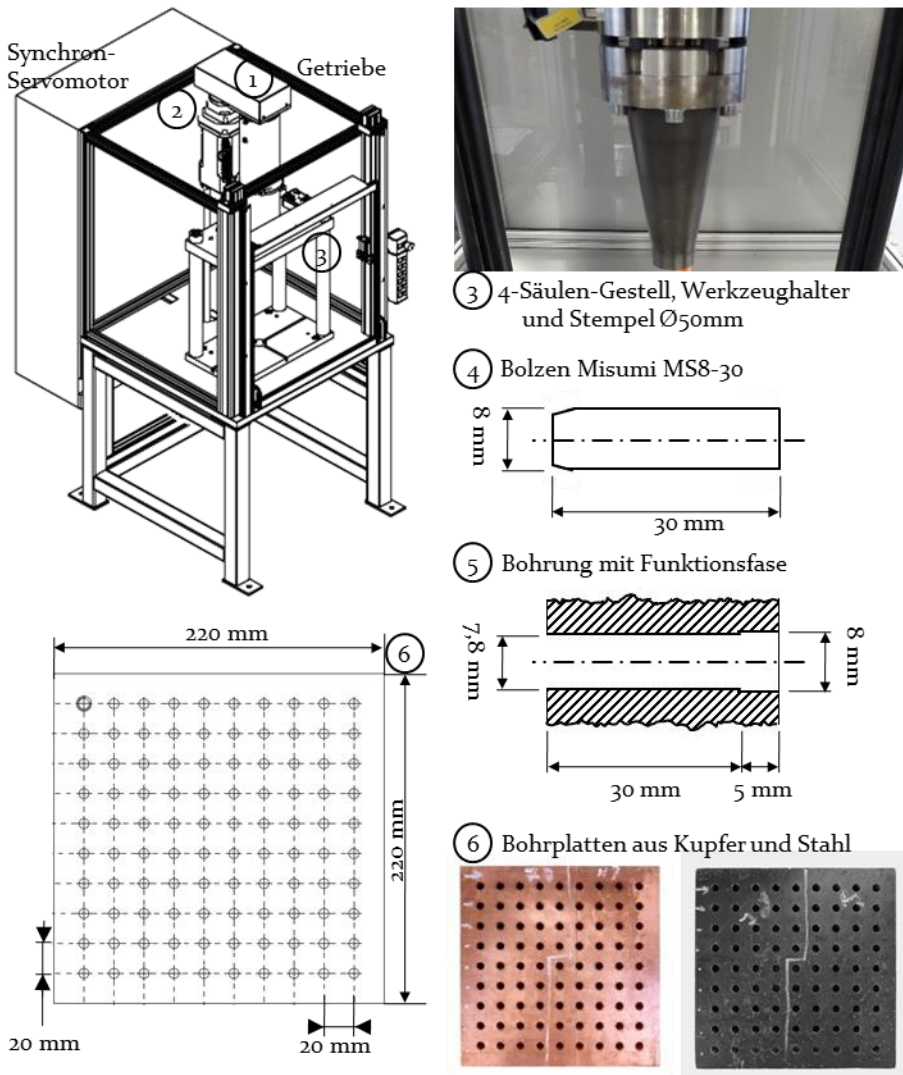


Bild 52: Versuchsaufbau Fügen durch Einpressen

Entscheidend ist die Art der Prozessdatensätze bei einzelnen Methoden, wobei speziell Prozesskurven in den Frequenzbereich transformierbar

sein müssen. Die meist empirisch gewonnenen Daten sind teilweise durch Versuchsdurchführungen mit definierten Schädigungsfällen um explizit schadhafte Zustände erweitert. Gleichzeitig dienen einzelne Schadensfälle, die während eigener Untersuchungen in der industriellen Umgebung aufgetreten sind, zur Funktionsvalidierung. Die durch Experten bestätigten Zusammenhänge, identifizierten Ursachen und erfolgreichen Abstellmaßnahmen dienen hierbei zur Verifikation.

Die betrachteten komplexen Montageprozessketten zeichnen sich teilweise durch mehrere parallele Bearbeitungsstränge aus, weshalb sich alternative Fertigungspfade ergeben. Einpresskurven liegen meist als stützpunktbasierte Kraft-Weg-Kurven vor. Prüfprozesse nutzen stützpunktbasierte Messkurven und Kennwerte als Abbildung für den Funktionserfüllungsgrad. Weiterhin protokolliert eine betrachtete Schraubstation den Drehmoment-Weg-Verlauf während der Prozessdurchführung. Für die Speicherung sind meist hunderte bis tausende Stützpunkte bei Montageprozessen und einige bis hunderte Messpunkte in der Funktionsprüfung zuständig.

Durchgeführte Versuche dienen als Grundlage der überwachten Lernverfahren EB, NN und CNN zur Fehlerklassifikation und als zu erkennende Kontrollgruppe. Nur durch explizite Zuordnung definierter Störeinflüsse und Schädigungen zu dem einzelnen Versuchsdurchlauf ist deren Anwendung als Klassifikator möglich. Hierzu dient zunächst das Fügen des Bolzens Misumi MS8-30 mit 8x30 mm in Bohrungen mit 7,8 mm Durchmesser, wie in Bild 52 dargestellt. Die ersten 5 mm der Bohrung sind mit einem Durchmesser von 8 mm ausgeführt, um als Fügehilfe das Einbringen der Bolzen per Hand zu unterstützen. Aufgrund der erwartungsgemäß höheren resultierenden Einpresskraft und Stromaufnahme des Elektromotors des Fügemoduls ist das Übermaß deutlich ausgeprägt gewählt. Gleichzeitig sind die definierten Faktoren des Versuchsplans meist gering gehalten, um deren Einfluss speziell innerhalb der Streuung und Toleranz der Fügeprozesse aufzuzeigen. Diese treten hauptsächlich in Kombination auf, wobei von den fünf Faktoren auch jede Kombination gleichzeitig aktiv sein kann. Bild 53 zeigt die ausgesuchten Faktoren Winkelversatz, Bolzentemperatur, Quarzsand als Fremdkörper, abweichendes Plattenmaterial und Beölung. In einer realen Fertigungsumgebung treten die definierten Faktoren eher als Störgrößen auf, werden jedoch meist nicht explizit erprobt.

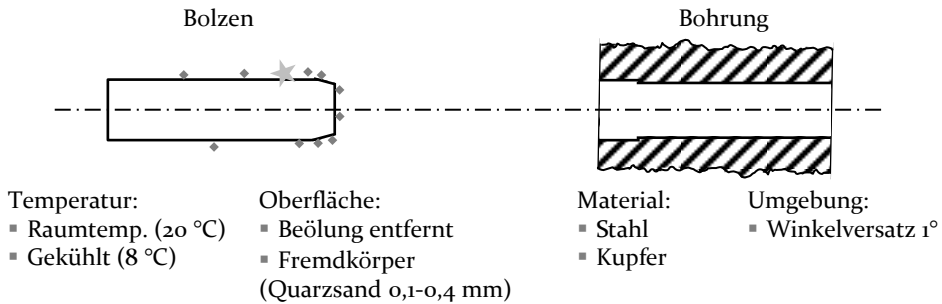


Bild 53: Gewählte Faktoren für die Versuchsdurchführung mit meist geringer Auswirkung auf die Maximalkraft beim Fügen durch Einpressen

7.2 Abweichungsanalyse und Wissensentdeckung in einzeln betrachteten Montageprozessen

Der Fokus in diesem Abschnitt liegt in der Betrachtung von einzelnen Prozessschritten, um Änderungen in MPK mit schadhafter Auswirkung auf die Funktionserfüllung des montierten Erzeugnisses aufzuzeigen, Prozessverläufe zu charakterisieren und maschinen-unterstützt Wissen zu entdecken. Mittels geeigneter Visualisierungsmethoden wie E|ASY-Heat¹ sind hierbei Veränderungen im Prozessverhalten mit negativer Auswirkung auf die Funktionserfüllung aufzuzeigen, um eine schnelle Fehlerisolation zu ermöglichen. Abschließend versuchen unterschiedliche Klassifikationsverfahren im Rahmen von E|ASY-Class zu erkennen, welche definierten Störeinflüsse in Montagekurven vorhanden sind. Hierbei liegt der Fokus auf der Aufdeckung, in welcher Art das Prozessverhalten gut beschreibbar ist. Darunter fallen stützpunktbasierte Parameterbereiche, das Kurvenverhalten und darin enthaltene Muster. Abschließend spielt das musterbasierte Verfahren E|ASY-Pat für die Wissensentdeckung mittels CNN (Kapitel 5.3.3) eine entscheidende Rolle.

7.2.1 Abweichungserkennung durch Visualisierung von Montageprozesskurven mittels E|ASY-Heat

Die Bewertung der in Kapitel 5.2.2 entwickelten E|ASY-Heat Visualisierungstechniken für einzelne Prozessschritte zur bedienergeführten Aufdeckung von Änderungen erfolgt anhand von drei Fehlerfällen. Bild 54 stellt die Aufdeckung von zwei geometrisch abweichenden Zuführchargen

¹ Der Autor wurde in der Implementierung von cand. M.Sc. Patricia Schuh unterstützt.

(links, B), einem gelockerten Werkzeug (Mitte, D) und umgedreht zugeführter flacher Bauteile (rechts, F) dar. In allen drei Fällen zeigt die Heatmap-Darstellung von mehreren hundert Einpresskurven entscheidende Veränderungen im Prozessverhalten wesentlich deutlicher als die 3D-Darstellung selbst in nahezu optimalem Winkel (Mitte) oder die konventionelle Darstellung anhand einer einzelnen Kurve in der Werkstatt (nicht dargestellt) an. Die Frequenzdarstellung (unten) weist bei der Charge auf signifikante Unterschiede hin.

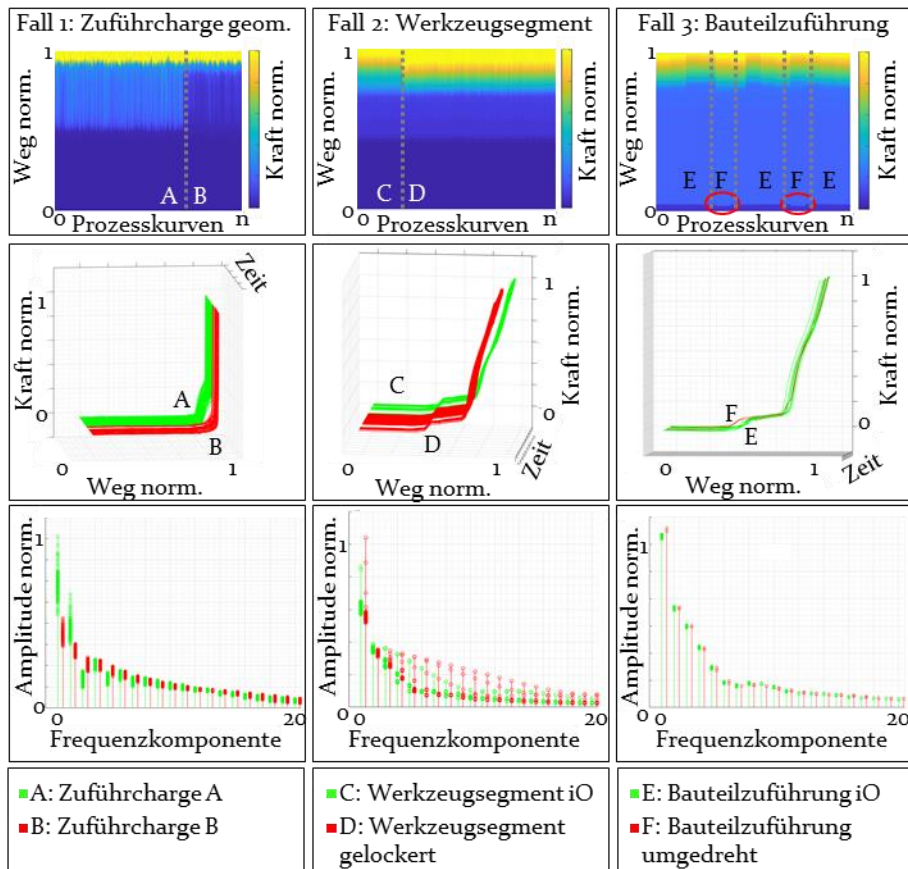


Bild 54: Vergleich der Darstellungsarten Heatmap und 3D-Visualisierung für einzelne Prozessschritte sowie Frequenzkomponenten

Speziell die Rückkopplung der Ergebnisse aus der Funktionsprüfung erlaubt eine schnelle Abweichungs- und Ursachenidentifizierung, zunächst durch Fehlerisolierung der ursächlichen Prozessschritte. Dies erfolgt durch die manuelle Überwachung der gezeigten Visualisierungen

für jeden Prozessschritt entlang der betrachteten komplexen Montageprozesskette, die relevante Prozesskurven erzeugt. Als detailreiche Darstellung zeigt Bild 55 die spektrale Energieverteilung einzelner Einpresskurven zusammen mit dem Prüfergebnis (rot/grün). Hier zeigen sich Unterschiede der funktionierenden (1-4 v. links) und nicht-funktionierenden (1-2 v. rechts) Erzeugnisse aufgrund der geringeren Fügeenergie im Hauptteil des Prozessschritts, weil diese Komponenten einen geringeren Durchmesser aufweisen und nur einen geringeren magnetischen Fluss ermöglichen. Angewendet auf jede Montagestation einer MPK ist die Identifikation von Prozessschritten stark erleichtert, die einer Änderung unterliegen und nun ursächlich für einen verminderten Funktionserfüllungsgrad sind.

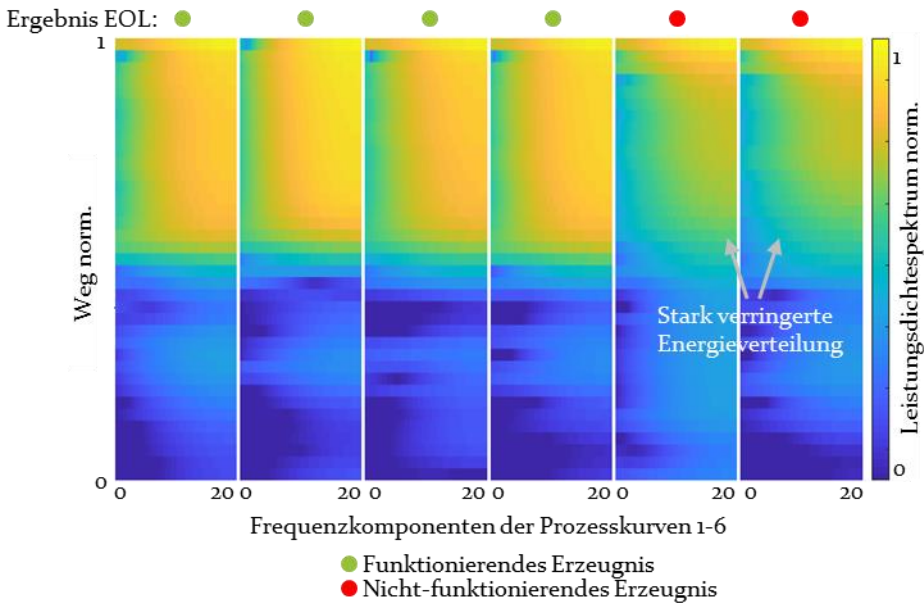


Bild 55: Spektrale Energieverteilung mehrerer Prozessabläufe mit Rückkopplung der Funktionsprüfung

Insgesamt steigt die Erkennbarkeit von Abweichungen bei der Durchführung von Einpressprozessen sogar innerhalb der verfügbaren Toleranzgrenzen, die eine schadhafte Auswirkung auf die geprüfte Funktionserfüllung des Enderzeugnisses haben. Weiterhin geben die Visualisierungen einen guten Hinweis auf sporadische und vor allem systematische Fehlerursachen. Durch die einfache, benutzergeführte visuelle Abweichungserkennung über viele Prozesskurven hinweg ist ein nutzerfreundli-

ches System möglich. So sind Veränderungen des Kraft-Weg-Verlaufs in Phase (Fall 3) und Amplitude (Fall 1 und 2) als flächige Musterveränderung zu entdecken. Als Beschränkungen der visuellen Abweichungserkennung bleiben die allgemeine personenbezogene Abhängigkeit der Erkennungsrate sowie die Nachteile der Darstellungsart, wie eine suboptimale Farbskala, bestehen.

7.2.2 Validierung der Methode E|ASY-Class zur maschinell-unterstützten Wissensentdeckung in Montageprozessen

Zur maschinell-unterstützten Wissensgenerierung aus Montageprozesskurven treten zunächst bis zu vier Herangehensweisen mittels manueller Regeln, Entscheidungsbaum, NN und CNN aus Kapitel 5.3.2 vergleichend gegeneinander an. Zu beachten sind die gänzlich unterschiedlichen betrachteten Prozesse, Datensätze, Art der Datenrepräsentation und Arbeitsweisen der Klassifikatoren. Als Ergebnis zeigt sich die Kombination aus Klassifikator und Repräsentation, welche den betrachteten Prozess anhand des vorliegenden empirischen Datensatzes am besten beschreiben kann. Der Ablauf ist dreigeteilt und beschäftigt sich zunächst mit der Fehlererkennung in einem Schraubprozess mit definierten Schädigungen und Frequenzdarstellung, sowie einem Einpressprozess mit verlängerter Messkette.

Schraubprozess mit Schädigungen

Der regelbasierte Ansatz mittels Novelty Detection nutzt 1.000 Prozesskurven eines Schraubprozesses aus der Serienproduktion des Projektpartners zur impliziten Modellierung erfolgreicher Prozessdurchläufe anhand der spektralen Energieverteilung von Gutteilen. Die Menge der zu erkennenden Referenzteile besteht aus 84 definiert geschädigten Versuchsteilen und deren Prozesskurven. Bei der Auswahl der Schädigungen stand die Generierung möglichst geringer Abweichungen im Vergleich zu Gutteilen im Vordergrund.

Bild 56 zeigt die Prozesskurven mit eingebrachten Veränderungen, wobei die Gewinde der Schraube und der Bohrung definiert geschädigt oder selektierte Späne eingebracht sind. Die Beschichtung der Schrauben ist im Ultraschallbad entfernt, der Winkelversatz der Bohrung-Schraubachse auf 1° eingestellt oder der Schraubenkopf vorher manuell ausgeschlagen worden. Diese Faktoren sind nur einzeln aktiv und die geschädigten Durchläufe befinden sich innerhalb der Streuung der Referenzkurven.

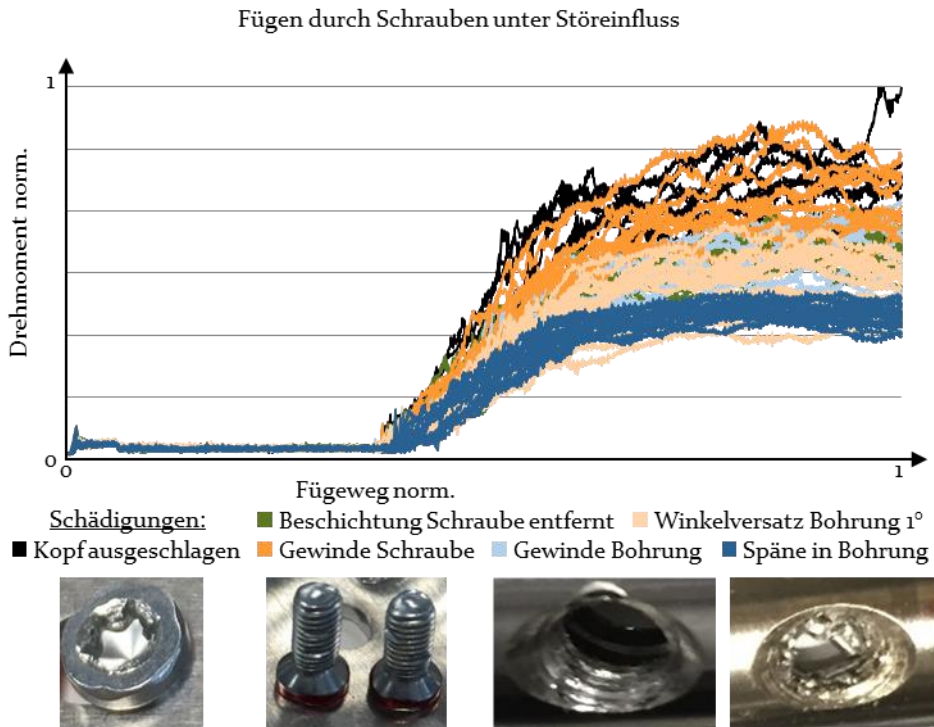


Bild 56: Prozessstreuung der Durchläufe unter Störeinfluss

Die jeweilige Klassifikationsgüte der Herangehensweisen ist in Tabelle 9 ersichtlich. Als Datensatz dienen meist die direkten Drehmomentkurven mit über 1.500 Messpunkten, nur die manuelle Regelerstellung nutzt die Amplituden der ersten 10 Frequenzkomponenten ausgehend von einer Fast-Fourier-Transformation.

Tabelle 9: Klassifikationsgüte Schraubprozess mit und ohne Störeinfluss

Klassifikator/ Merkmal	Manuelle Regeln	Entscheidungs- baum	Neuronales Netzwerk
Klassifi- kationsgüte (Recall)			
Gutkurven	937/1000	966/1000	1000/1000
Störeinfluss	54/84	28/84	20/84

Die Ergebnisse der unterschiedlichen Klassifikatoren zeigen, dass eine triviale Unterscheidbarkeit von Gutteilen und definierten Schädigungen nicht gegeben ist. Jedoch steht in dieser Arbeit nicht die Klassifikationsgüte, sondern die Wissensgenerierung im Vordergrund. Das Ziel der Methode liegt darin, die unterschiedlichen Algorithmen auf deren Eignung zur Modellbildung in einem ersten Screening zu prüfen. Wie zu erwarten sind die Erkennungsraten bei den Schadensfällen <90 %, aufgrund der prozessbedingten Streuung und den gering gewählten Auswirkungen der eingebrachten Störungen. Daher zeigt die Tabelle, dass die manuelle Regelableitung anhand des Frequenzspektrums die meisten Schadensfälle detektiert. Gleichzeitig ist der Informationsverlust als gering einzustufen, bei Verwendung von 10 Frequenzamplituden anstelle von durchschnittlich 1.536 Messpunkten. Basierend auf automatisch generierten Regeln anhand der Drehmoment-Weg-Kurven zeigt auch ein trainierter Entscheidungsbaum, dass die Unterscheidung nicht trivial ist. Die beiden Ansätze mittels EB und NN leiden unter dem Effekt des unausgeglichene Datensatzes.

Einpressprozess mit verlängerter Messkette

Für die Abschätzung des Informationsgehalts unterschiedlicher Repräsentationen von Prozesskurven dienen die durchgeführten Versuche an dem bereits in Kapitel 7.1 beschriebenen Fügemodul anhand Fügen durch Einpressen. Hierbei sind die Störgrößen Schmierung, Material, Winkelversatz 1° , Fremdkörper Quarzsand mit 0,1-0,4 mm Körnung sowie die Temperatur des Bolzens auf Raumtemperatur und 8°C in jeglicher Kombination aktiv. Als Alternative zur Kraft-Weg-Kurve bei Einpressprozessen wird zusätzlich der Motorstrom über den Wegverlauf betrachtet. Hierbei stehen Rohdaten oder deren Transformation zum Vergleich der Repräsentation zur Verfügung, wobei im Vorfeld eine Wavelet-basierte Glättung der Signale zur Streuungsreduzierung erfolgt. Als Erweiterung

der konventionellen Stützpunktbetrachtung arbeitet die Frequenzdarstellung mittels Amplitude je Frequenzkomponente oder Imaginär- und Realteil durch Fast-Fourier-Transformation (FFT) sowie diskreter Wavelet-Transformation (DWT). Die Aufteilung in Trainings- und Testdatensatz erfolgt mit 80 zu 20, wobei die Ergebnisse in Tabelle 10 ersichtlich sind.

Tabelle 10: Klassifikation von Störeinflüssen basierend auf unterschiedlichen Datenrepräsentationen mittels EB

Störeinfluss/ Datengrundlage	Material	Fremdkörper	Winkelversatz	Schmierung	Temperatur	Gesamt (Accuracy)
Diskrete Wavelet-Transformation	95 %	65 %	75 %	80 %	65 %	76 %
Fast-Fourier-Transformation A/ ρ	85 %	70 %	55 %	75 %	75 %	72 %
Fast-Fourier-Transformation $\Im/\Re$	80 %	75 %	75 %	80 %	45 %	71 %
Strom/Weg Kurve	65 %	85 %	70 %	55 %	45 %	64 %

Durch Nutzung spezialisierter binärer Klassifikationsmodelle je Merkmalsausprägung und der verfügbaren Repräsentationen ist die Erzielung einer Gesamtklassifikationsgenauigkeit von nahezu 80 % möglich. Daher empfiehlt sich die Merkmalsextraktion anhand unterschiedlicher Datengrundlagen und Verfahren. Ausgehend von der geringen Datenmenge, die im Rahmen von Versuchen gewonnen wurde, haben die trainierten EB-Modelle den betrachteten Fügeprozess erfolgreich regelbasiert abgebildet. Speziell die hohe Erkennungsrate von eingebrachten Fremdkörpern ausgehend von der Strom-Weg Kurve ist erstaunlich, weil diese einem stärkeren Rauschen als die Kraft-Weg Repräsentation unterliegt. Weiterhin ist die Klassifikationsgenauigkeit der besten Einzelmodelle stark über den Erwartungen, weil die Kombination aller Störgrößen gleichzeitig aktiv ist. Aufgrund der rauen Bedingungen im Produktionsumfeld wurde dieses Vorgehen in den Laborversuchen gewählt. Als Ergebnis zeigt sich, dass selbst bei einer kleinen Datenmenge für das Training und der Nutzung des Motorstroms als indirektes

Merkmal des Fügekraftverlaufs erstaunlich gute Klassifikationsraten realisierbar sind. Natürlich sind die Modelle für einen Serienprozess zu schlecht, jedoch sind hier hauptsächlich größere Datensätze notwendig.

Musterbasierte Klassifikation mittels CNN

Zur weiteren Evaluation des Informationsgehalts von konventionellen Kraft-Weg- und alternativen Strom-Weg-Kurven nutzt ein CNN die stützpunktbasiert protokollierten Prozessabläufe zur musterbasierten Erkennung der obigen Merkmale. Wie auch bei dem EB als überwachtes Lernverfahren wird ein Klassifikationsmodell für jede Ausprägung trainiert, aufgrund der überschaubaren Datengrundlage von insgesamt 170 Prozesskurven.

Tabelle 11: Klassifikationsgüte CNN zur Erkennung von Störeinflüssen

Merkmal/ Art	Material	Fremd- körper	Winkel- versatz	Schmier- ung	Temp- eratur
Kraft-Weg max	83,78 %	85,13 %	77,02 %	64,86 %	71,62 %
min	74,32 %	79,72 %	70,27 %	55,40 %	55,40 %
Strom-Weg max	78,57 %	90,47 %	61,90 %	64,28 %	73,80 %
min	66,66 %	83,33 %	45,23 %	50,00 %	52,38 %

Wie Tabelle 11 zeigt, sind bestimmte Störeinflüsse auch über das Signal des Motorstroms neben der konventionellen Kraft-Weg-Kurve auflösbar, trotz erheblich größerer Streuung des Signals. Dieses Ergebnis steht im Einklang mit [149] und zeigt das Potenzial verlängerter Messketten in Montageprozessen auf. Ausgehend von der höchsten und niedrigsten Klassifikationsgüte aus 10-facher Kreuzvalidierung lässt sich die Robustheit der Modellierung abschätzen.

Als Gesamtergebnis zeigen sich einerseits die Vorteile des Frequenzbereichs als Datengrundlage für Klassifikationsverfahren. Andererseits ist die entwickelte musterbasierte Klassifikation bei jedem zu erkennenden Störeinfluss in Prozesskurven nutzbar, meist robust gegen die stärkere Streuung des Strom-Weg-Signals und in einigen Fällen sogar genauer als ein EB. Dies ist umso mehr erstaunlich, weil EB im Rahmen eigener Untersuchungen in den meisten Fällen eine höhere Klassifikationsgenauigkeit als andere Klassifikatoren erzielen. Daher ist anzunehmen, dass die

vorgeschalteten Filterstufen eines CNN entscheidende Vorteile bei der Bewertung von Prozesskurven bringen. Dennoch ist die Streuung der Klassifikationsgüte stets zu berücksichtigen, ausgehend von den Initialkonditionen des Modells und dem zugrundeliegenden Datensatz.

7.2.3 Vergleichende Bewertung der musterbasierten Wissensentdeckung mittels E|ASY-Pat

Im Vergleich zur visuellen Baumstruktur eines Entscheidungsbaums anhand einzelner Kennwerte, stellt ein konventionelles neuronales Netzwerk eher eine Black-Box dar. Aufgrund der neuerlich publizierten Methode Grad-CAM ist es möglich, die entscheidenden Merkmale eines bereits klassifizierten Bildes anhand der Aktivierungskarte des CNN-Modells anschaulich aufzuzeigen. Die im Rahmen dieser Arbeit erfolgte Anpassung der Netzwerkparameter und Weiterentwicklung der Ergebnisdarstellungen ermöglichen eine musterbasierte Wissensentdeckung in Prozesskurven.

Im Rahmen der prototypischen Implementierung² wird als Systemaufbau ein AlexNet-CNN mit fünf Ebenen gewählt, das aus jeweils (64,64,64,128,128) Convolutional Layern und 2x2 Pooling sowie je 256 Neuronen in den beiden Fully connected Layern besteht. Ausgehend von der Anzahl an Kurvenstützpunkten bei den untersuchten Einpressprozessen ist der Input als 256x256 Pixel Grafik mit weißem Hintergrund und schwarzer Prozesskurve gewählt. Die Farbtiefe umfasst 8-Bit Graustufen zur Datenreduktion, anstelle 32-Bit RGB. Wichtig ist die maßstabsgetreue Abbildung der Prozesskurven auf den 256x256 Bildbereich, weil sonst das Netzwerk absolute Maximalwerte als relative und alternierende Muster bewertet. Die Abtastung des Inputs erfolgt durch einen Stride von 2, wobei die folgenden C-Layer eine Kernel-Size von 3x3 aufweisen. Daher erfolgt die Abtastung mit einem 3x3-Filter und einer Verschiebung von 2 Pixeln je Durchlauf.

² Der Autor wurde durch cand. M.Sc. Tim Raffin bei der Implementierung unterstützt.

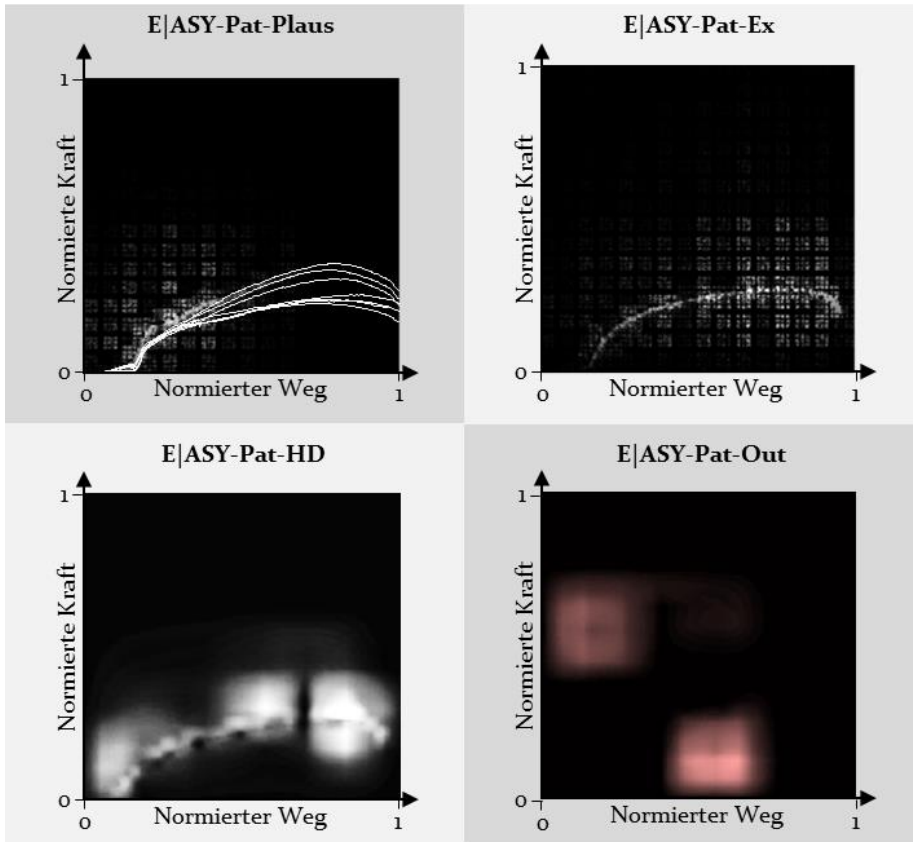


Bild 57: Vergleich der maschinell-unterstützten Wissensentdeckung

Die Ansätze Pat-Phase, Pat-Plaus, Pat-Ex, Pat-HD und Pat-Out zur maschinell-unterstützten, musterbasierten Merkmalsextraktion sind anhand der generierten Prozesskurven beim Fügen durch Einpressen unter Störeinfluss erprobt. Bild 57 zeigt die letztgenannten vier Ansätze zur Entdeckung von Prozesscharakteristiken, die aus dem Modell extrahierbar sind. Die Plausibilisierung der Klassifikationsentscheidung anhand E|ASY-Pat-Plaus (links oben) nutzt die Überblendung des genutzten Trainingsdatensatzes auf das Ergebnis der Guided-Backpropagation, um für das Modell entscheidende Merkmale der Kurve hervorzuheben. Die Anwendung von E|ASY-Pat-Ex (rechts oben) zur Hervorhebung von erkannten Merkmalen der aktuellen Prozesskurve im Rahmen der Serienproduktion unterstützt den Anwender in der Werkstatt durch Fokussierung auf bestimmte Kurvenbereiche und -verläufe. Gleichzeitig unterstützt E|ASY-Pat-Phase (nicht dargestellt)

mittels Darstellung der Intensitätsverteilung mit Überblendung der Prozessphasen eine gezielte Ursachenanalyse nach erfolgter Lokalisierung des identifizierten Störeinflusses. Die Methode E|ASY-Pat-HD (links unten) nutzt das durchgehende Mapping aller Convolution-Ebenen, um die hohe Lokalisierung der Entscheidungsfindung des Modells mit hoher Auflösung zu unterstützen. Hier wird zusätzlich ersichtlich, dass das Netzwerk den kompletten Kurvenverlauf modelliert und dennoch Schwerpunkte setzt. Als abgeleitete Information lassen sich so Kurvencharakteristiken aus immens großen Kurvendatensätzen ableiten, anstelle explizite Versuche im Rahmen einer DoE oder eine manuelle Suche in Prozesskurven durchzuführen. Abschließend erlaubt die Visualisierung der kurvenexternen Bereiche mit E|ASY-Pat-Out (rechts unten) die Entdeckung von meist unbekannten Sektoren, die zur Differenzierung erfolgreicher und störungsbehafteter Durchläufe dienen. Abschließend zeigt Tabelle 12 einen qualitativen Vergleich der entwickelten Methoden mit der konventionellen Knoten-Blatt-Darstellung eines Entscheidungsbaums sowie einem Neuronalen Netzwerk mit klassischem Black-Box-Charakter.

Tabelle 12: Qualitativer Vergleich der E|ASY-Pat Methoden mit EB und NN

Merkmal/ Methode	Pat-Phase	Pat-Plaus	Pat-Ex	Pat-HD	Pat-Out	EB Knoten-Blatt-Darstellung	Neurales Netzwerk (BlackBox)
Lokalisierung der Prozessphase	●	◐	◐	◐	◐	◑	○
Gemeinsamkeiten der Klassenobjekte	○	●	◐	◐	●	●	○
Detailgrad der Darstellung	●	◐	◐	●	◐	○	○
Merkmalsentdeckung	●	●	●	●	●	◑	○
● Hoch/Einfach möglich ● Gut/möglich ◐ Teilweise ◑ Gering/Selten ○ Nicht möglich							

7.3 Evaluierung der prozessübergreifenden Analyse komplexer Montageprozessketten

Nach der Betrachtung von einzelnen Prozessschritten steht in diesem Abschnitt die prozessschritt-übergreifende Analyse von komplexen Montageprozessketten im Fokus. Hierfür sind zunächst mittels E|ASY-Inter die Wechselwirkungen und abweichende Parameterbereiche von nicht-funktionierenden Erzeugnissen im Gegensatz zu Gutteilen aufzuzeigen. Spontan eintretende, meist unbekannte Prozessveränderungen in der Montageprozesskette mit negativer Auswirkung auf die Funktionserfüllung sind durch die eventbasierte Überwachung E|ASY-Event aufzudecken. Die gleichzeitige Visualisierung der Signal- und Fehlerfortpflanzung ermöglicht hierbei eine schnelle Fehlerlokalisierung. Für die Erschließung des vollen Informationsgehalts nutzt die folgende 3D-Visualisierung E|ASY-Curves die anfallenden Prozesskurven von Montage- und Prüfprozessschritten, um Änderungen mit schadhafter Auswirkung auf die Funktionserfüllung des montierten Erzeugnisses aufzudecken.

7.3.1 Validierung von E|ASY-Inter zur Aufdeckung von Wechselwirkungen

Die Validierung der Methode E|ASY-Inter zur Aufdeckung von Wechselwirkungen und abweichenden Prozessverläufen erfolgt anhand der PCP-basierten Visualisierung³ von 17 Kennwerten aus den Montageprozessschritten entlang der komplexen Montageprozesskette AKTOR₂. Bild 58 zeigt als Referenz im Hintergrund (dunkelgrau) die Verläufe von funktionierenden Erzeugnissen. Im Vordergrund weisen die Fehlertypen 1 bis 3 sowie der gemischte Fehlerfall aus mindestens zwei gleichzeitig auftretenden Fehlertypen auf abweichende Kennwerte (P₅, P₇) hin. Auch Kombinationen bestimmter Parameterbereiche von mehreren Kennwerten anhand einzelner Erzeugnisse oder Erzeugnisgruppen erleichtert die Analyse von schadhaften Wechselwirkungen und die Fehlerlokalisierung. So weisen die Fehlertypen 1 und 2 keine Auffälligkeiten bei den Kennwerten (P₅, P₇) auf, weshalb von unterschiedlichen Schädigungsmechanismen im Gegensatz zu den anderen Fehlerarten ausgegangen wird. Dies ist durch Expertenwissen bestätigt. Speziell die Verhaltensweise von P₅ und P₇ ist auf deren prozessbedingte Wechselwirkung aufgrund der gleichen betroffenen Komponente zurückzuführen. Die beiden abweichenden

³ Der Autor wurde bei der Implementierung von cand. M.Sc. Tobias Lechler unterstützt.

Parameterbereiche wirken sich direkt auf die flussführenden Eigenschaften des Aktors aus, weshalb eine sehr hohe Fehlerquote auftritt.

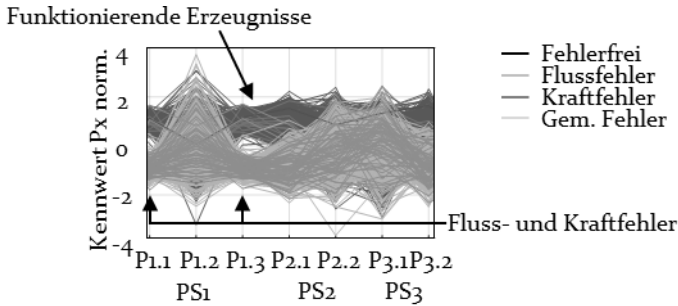


Bild 58: PCP aufgeteilt nach Fehlerarten und funktionsfähigen Erzeugnissen

7.3.2 Validierung der Methodik E|ASY-Event zur Erkennung schadhafter Prozessveränderungen

Die Validierung der Methodik zur Erkennung schadhafter Prozessveränderungen aus Kapitel 6.2.2 erfolgt anhand der Auswirkung eines schadhafte Werkzeugzustands während der Montage. Dieser wirkt auf die resultierenden Qualitätsergebnisse ein, die am Funktionsprüfstand gemessen werden. Als Datengrundlage dienen Datensätze aus der Montagelinie AKTOR₁ über einen sehr langen Zeitraum. Basierend auf der Detektion lokaler Änderungen von Mittelwert oder Standardabweichung an einer Vielzahl von Montagestationen sollen schadhafte Prozesszustände aufgedeckt werden. Diese sind abgesichert durch eine Rückkopplung des Qualitätsergebnisses des jeweiligen Erzeugnisses durch dessen Seriennummer, anstelle einer Prozessbetrachtung ausschließlich über den zeitlichen Verlauf.

Dem betrachteten Fall unterliegt ein partiell abgebrochenes Werkzeug. Entscheidend ist jeweils die Signal- und Fehlerfortpflanzung durch die MPK und die Verschlechterung der Funktionserfüllung des finalen Produkts. Die Fehlerursache und deren Lokalisierung sind aus mehreren Gründen als unbekannt anzusehen. Einerseits wird im Rahmen einer Ursachenanalyse basierend auf Expertenwissen die Fehlerlokalisierung an diesem Prozessschritt sogar eher ausgeschlossen, während fälschlicherweise ein erfolgreicher Kalibriervorgang nach erfolgtem Werkzeugbruch angenommen wurde. Partielle Werkzeugdefekte sind selbst in der Literatur (Kapitel 4.2.2) nur selten Gegenstand der Untersuchungen.

Gleichzeitig ist die Abweichung der betroffenen Kennwerte nur gering, vor allem in Relation zu der verfügbaren Toleranzbreite im Rahmen der Prozess- und Kennwertüberwachung.

Bild 59 zeigt die relevanten 7 aus 17 analysierten Parametern, wobei vier von vier zu erkennenden schadhaften Events detektiert werden. Die Signal- und Fehlerfortpflanzung über sechs Stationen wird erfolgreich aufgezeigt, während eine Station trotz eher periodischem Verhaltensmuster nur Hinweise für lokale Änderungen gibt. Zufällig entstehende Fehlmeldungen treten trotz diesem abweichenden Verhalten nicht auf, da keine gleichzeitige Eventaktivierung bei der Montagestation und dem Qualitätswert in der Funktionsprüfung auftreten.

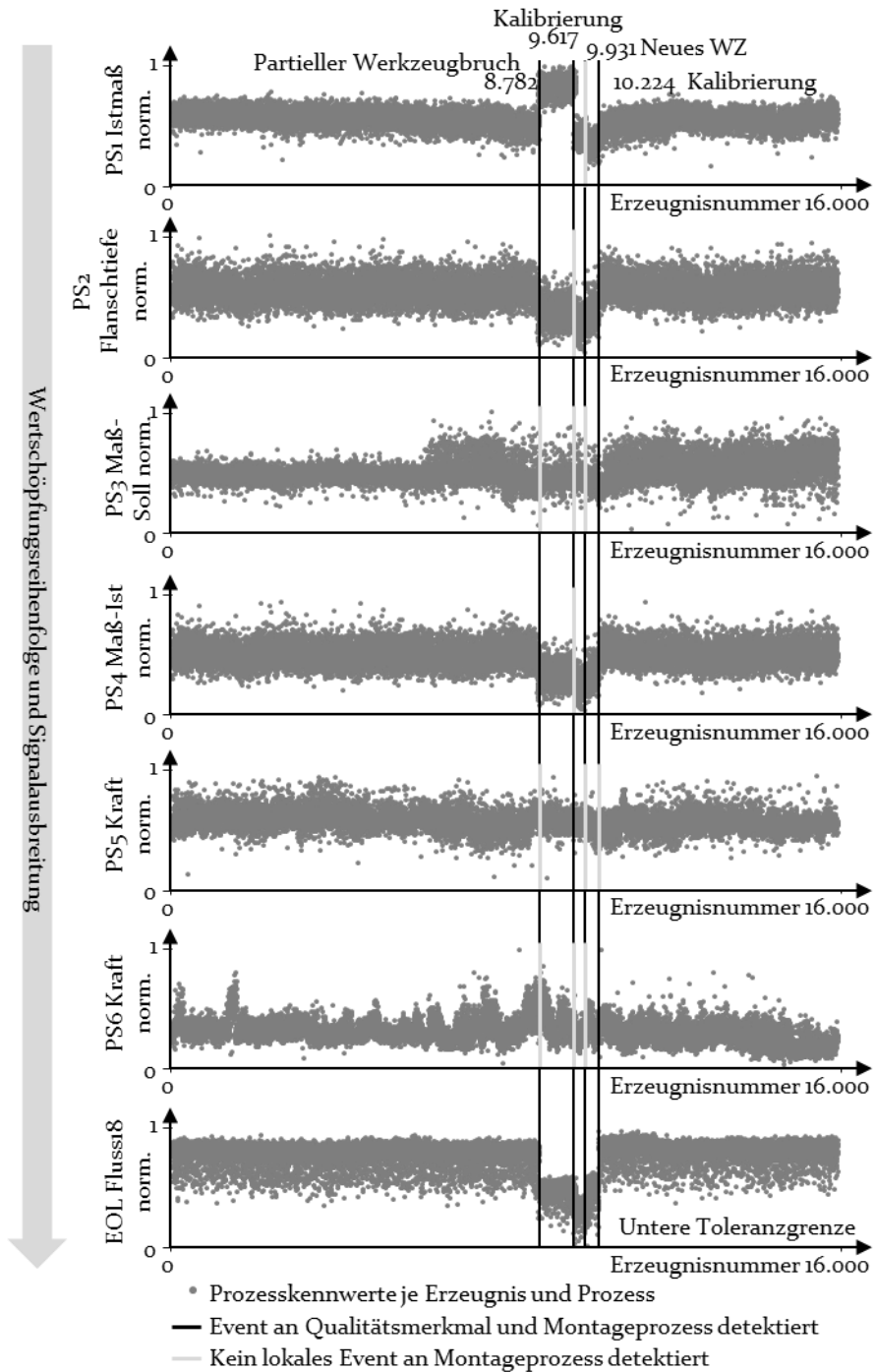


Bild 59: Sprungdetektion für vier Events in der Funktionsprüfung

Die insgesamt hohe Erkennungsrate schadhafter Events inklusive Signal- und Fehlerfortpflanzung bei gleichzeitig geringer Fehlmeldungsquote ermöglicht ein System mit hoher Nutzenakzeptanz in der Werkstatt.

7.3.3 Validierung der prozessschritt-übergreifenden 3D-Visualisierung E|ASY-Curves

Die Validierung⁴ der prozessschritt-übergreifenden 3D-Visualisierung E|ASY-Curves erfolgt anhand von zwei Anwendungsfällen zur Ursachenidentifizierung von Qualitätsmängeln an der MPK AKTOR2. Hierfür wurde der abnormale Kurvenverlauf der Qualitätskurve QC2 in Bild 60 mittels Brushing markiert, das spezifische Erzeugnis selektiert und dessen Prozess- und Qualitätskurven stationsübergreifend in dunkelrot hervorgehoben. Die ursächliche Abweichung ist in der Prozesskurve PC3 zu finden. Die erhöhte Einpresskraft führt zu einer leichten Verformung der eingepressten Scheibe und verändert so den magnetischen Fluss. Diese ist durch Expertenwissen bestätigt die Ursache für das resultierende Prüfergebnis.

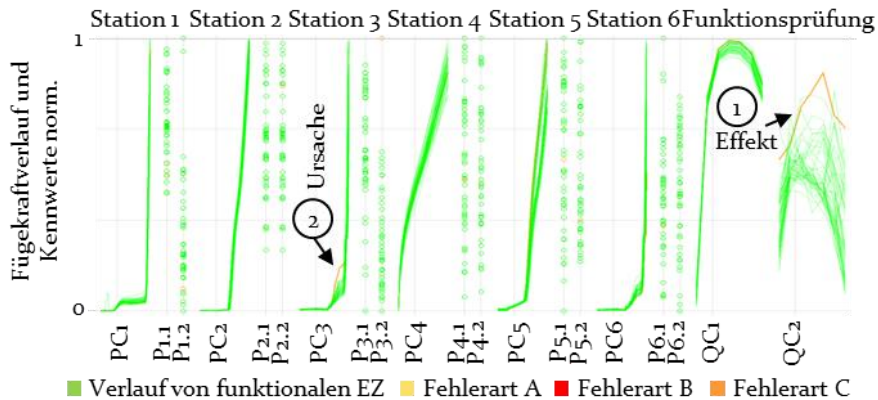


Bild 60: Draufsicht der Einpress- und Qualitätskurven entlang einer komplexen Montageprozesskette

Dem zweiten Fehlerfall in Bild 61 unterliegt eine suboptimale Charge von Zuführteilen, deren Einbringung zu einer hohen Ausschussquote führt. Durch die starke Reduktion der Maximalkraft bei der Prozesskurve PC2 ist die Zuführung einer neuen Charge ersichtlich, die bei den gleichen Erzeugnissen zu einer Steigerung der Funktionserfüllung beiträgt.

⁴ Der Autor wurde bei der Implementierung von cand. M.Sc. Patricia Schuh unterstützt.

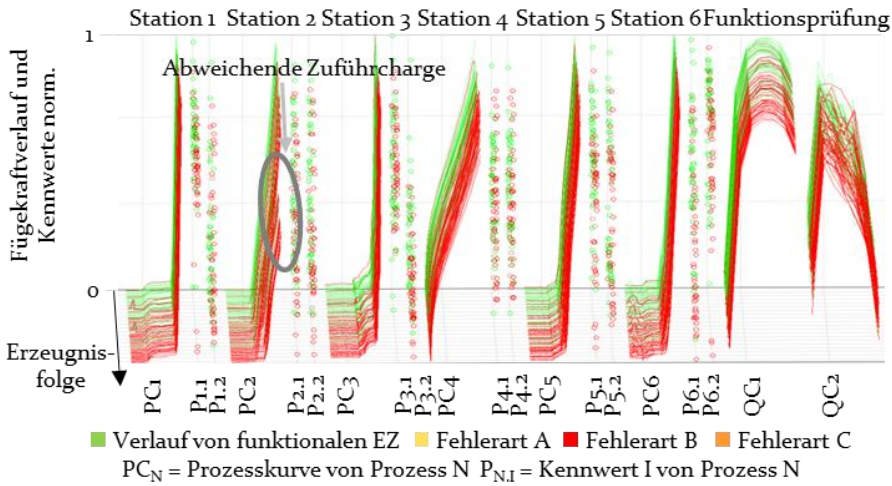


Bild 61: Gekippte Darstellung mit Kolorierung der Fehlerart

7.4 Zusammenfassung und Bewertung

Nach der kurzen Beschreibung des verwendeten Versuchsaufbaus in Abschnitt 7.1 zeigt 7.2 die experimentellen Untersuchungen, welche die Funktionsfähigkeit der in Kapitel 5 entwickelten Methoden E|ASY-Heat und E|ASY-Class zur Fehlererkennung und Wissensentdeckung in einzelnen Prozessschritten belegen. Durch Aufzeigung unterschiedlicher Wirkungsbeziehungen sind das vorhandene Prozesswissen und die verfügbare Datengrundlage stetig erweiterbar. Zusätzlich erlaubt die automatisierte Fehlerklassifikation in Montageprozessen eine aufwandsarme Abbildung schadhafter Prozesseinflüsse oder gar deren besseres Verständnis zur effizienteren Ursachenanalyse. Darüber hinaus ermöglicht die musterbasierte Wissensentdeckung bei abweichenden Prozessbedingungen mittels E|ASY-Pat neben der Anwendung in der Werkstatt auch die automatisierte Hervorhebung kritischer Merkmale im Prozessverlauf für Experten. Dabei wird der Anwender durch eine intuitiv nutzbare Visualisierung unterstützt. Insgesamt wird die Voraussetzung für differenzierte Ursachenanalysen geschaffen, um anschließend die Datenflut eines Maschinenverbunds beherrschbar zu machen.

Neben der Analyse von einzelnen Prozessschritten sind auch Maßnahmen notwendig, um schadhafte Wechselwirkungen stationsübergreifend innerhalb komplexer Montageprozessketten aufzuzeigen. Hierzu nutzt die eventbasierte Prozessüberwachung E|ASY-Event die anfallenden Kenn-

werte jeder Montage- und Prüfstation, um eventbasiert Änderungen mit folgend verschlechtertem Funktionserfüllungsgrad zu detektieren. Im gleichen Zuge wird die Identifikation von ursächlichen Stationen und Kennwerten durch weitere Methoden unterstützt. Die Analyse von Wechselwirkungen ist durch E|ASY-Inter mittels PCP-Darstellungen effektiv möglich, während die prozessschritt-übergreifende 3D-Visualisierung E|ASY-Curves anfallende Kennwerte sowie Prozess- und Prüfkurven in höchstem Detailgrad graphisch zugänglich macht.

Zusammenfassend zeigen die experimentellen Untersuchungen anhand von labortypischen, einzelnen Prozessschritten und industriell eingesetzten komplexen Montageprozessketten die Funktion und Wirksamkeit der erforschten Methoden zur prozessschritt-übergreifenden Analyse.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Komplexe Montageprozessketten sind ein wichtiger Bestandteil der deutschen Industrie. Jedoch gestaltet sich der Betrieb aufgrund steigender Variantenzahl, zunehmender Bauteilkomplexität und resultierender Störungen immer schwieriger. Gleichzeitig steigt der manuelle Aufwand zur Ursachenanalyse und Überwachung der laufenden Produktion, weil konventionelle Methoden an ihre Grenzen stoßen. Der bisherige Fokus von Maschinenbauern, produzierenden Unternehmen und Forschungsarbeiten liegt auf der Prozessüberwachung und Analyse von einzelnen Prozessschritten. Zur Generierung von Versuchsdatensätzen wird auf statistische Versuchsplanung und zur Analyse auf management- und expertenbasierte Vorgehen zurückgegriffen. Methoden aus dem Bereich der Prozessüberwachung nutzen eher statische Toleranzgrenzen, Hüllkurven und selten mathematische Formeln, um Prozessstabilität trotz Störungen zu gewährleisten. Prinzipbedingt sind diese Vorgehensweisen auf einzelne Prozessschritte, Werkzeuge und Produktvarianten beschränkt, weshalb sie für jeden neuen Prozess und jede neue Einflussgröße aufwendig individuell durchgeführt werden müssen. Ein alternativer Ansatz ist die Nutzung von Veränderungen in den Prozessdaten von einzelnen Prozessschritten, um Änderungen in Montageprozessen mit schadhafter Auswirkung auf die Funktionserfüllung des montierten Erzeugnisses unabhängig von Prozess und Störungsursache anzuzeigen. Bekannte Vorgehensweisen haben Defizite entweder in der Universalität, Anwendbarkeit in komplexen Montageprozessketten oder Sensibilität. Weiterhin ist im bekannten Stand der Technik und Forschung entweder der Fokus auf Prozessschritte und Prozessketten in der Fertigung gelegt oder die Nachvollziehbarkeit der Ergebnisse bei BlackBox-Ansätzen zu wenig adressiert. Daher soll die vorliegende Dissertationsschrift einen Beitrag zur prozessschritt-übergreifenden Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining leisten.

Aus grundlegenden Untersuchungen gewonnene Erkenntnisse über das Verhalten von komplexen Montageprozessketten, entwickelten Verfahren zur Analyse sowie Wissensentdeckung in einzelnen Prozessschritten bilden sich die zentralen Forschungsschwerpunkte dieser Arbeit. Zusätzlich sind prozessschritt-übergreifende Analyse- und Visualisierungsverfahren für komplexe Montageprozessketten adressiert.

Trotz der hohen Relevanz des Verhaltens komplexer Montageprozessketten behandeln nur wenige Veröffentlichungen die prozessschritt-über-

greifenden Analyse solcher Systeme. Eigene Untersuchungen an unterschiedlichen Montageprozessen und -ketten zeigen die starken Auswirkungen von Änderungen der Prozesskennwerte speziell innerhalb der gültigen Eingriffsgrenzen und belegen die Komplexität des Themas. Aufgrund der unüberschaubar hohen Anzahl an Wechselwirkungen und Störgrößen ist die Analyse mittels konventioneller uni- und multivariater Methoden nur schwer möglich. Kombiniert mit der kritischen Forderung einer sehr geringen Ausschussquote von Erzeugnissen in der Montage unterstreichen die genannten Punkte die Notwendigkeit einer prozessschritt-übergreifenden Analyse für komplexe Montageprozessketten. Ausgehend von den Untersuchungsergebnissen leiten sich mehrere Handlungsbedarfe ab: Einerseits die Notwendigkeit einer Fehlererkennung in einzelnen Prozessschritten, andererseits der Bedarf an neuartigen Methoden zur Analyse komplexer Montageprozessketten.

Einen zentralen Eckpfeiler dieser Arbeit stellt das Verständnis von einzelnen Prozessschritten dar. Unter kombinierter Nutzung der verfügbaren Montageprozess- und Qualitätskurven wird die Grundlage für eine differenzierte Analyse optimaler und abweichender, respektive guter und schadhafter Prozessdurchläufe geschaffen, wobei sich das Vorgehen E|ASY-MPK durch seine universelle Einsetzbarkeit auszeichnet. In diesem Zuge ermöglichen daten- und frequenzbasierte Visualisierungen im Sinne von E|ASY-Heat das Aufzeigen von Änderungen im Prozessverhalten, neuartig durch die Betrachtung der spektralen Energieverteilung im Montageprozess während der Durchführung. Die anschaulichen Darstellungen ermöglichen eine schnelle Reaktion zur Störungsbeseitigung, speziell bei neuen und unbekannten Einflüssen und Zuständen. Insbesondere die maschinell-unterstützte Wissensentdeckung durch E|ASY-Class und E|ASY-Pat mittels CNN leitet den Anwender gezielt zu den entscheidenden Prozessphasen und -verläufen, während die Adaption an weitere Prozesse empirisch möglich ist.

Nicht nur die Prozessvisualisierung E|ASY-Heat und Wissensentdeckung mittels E|ASY-Class und E|ASY-Pat für einzeln betrachtete Montageprozesse stellen einen wesentlichen Aspekt der Forschungsarbeit dar. Zusätzlich ermöglichen Methoden und Vorgehensweisen eine prozessschritt-übergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten. Zunächst wird die Identifizierung von ursächlichen Stationen bei Qualitätsproblemen sowie von Wechselwirkungen adressiert. Hierbei unterstützt die Vorgehensweise E|ASY-Inter mittels Parallelem Koordinatenplot die bedienergeführte Aufdeckung von Wechselwirkungen, die erzeugnisbasiert erfolgt. Parallel prüft die eventbasierte Prozessüberwa-

chung E|ASY-Event eine komplexe Montageprozesskette in der Prozessebene auf eintretende Ereignisse. Speziell wird getestet, ob sich Änderungen der Montageprozesse auf den Grad der Funktionserfüllung auswirken, respektive ob sich Qualitätsverschlechterungen durch schadhafte Veränderungen vorhergehender Prozessschritte anhand einer Signalausbreitung erklären lassen. Weiterhin ermöglicht die 3D-Visualisierung E|ASY-Curves die nutzerfreundliche, bedienergeführte Analyse der Prozess- und Qualitätskurven entlang einer Montageprozesskette.

Eine wesentliche Herausforderung bei der Analyse von komplexen Montageprozessketten stellt die Informationsüberflutung durch die vorhandenen digitalen Datensätze von Montageprozessen dar. Hierbei gilt es, den Anwender nicht durch zu viel Information zu irritieren, gleichzeitig eine sehr hohe Informationsdichte zu erzielen und nur geringen Informationsverlust durch Kennwertbildung zuzulassen. Die erforschten Methoden zur Visualisierung und Wissensentdeckung sowie die Vorgehensweisen zur Identifikation von ursächlichen Prozessschritten und schadhafter Prozessveränderungen liefern einen Beitrag zur besseren Handhabbarkeit der Datenflut. Dabei ist ein wichtiges Merkmal die hohe Sensibilität der Systeme. Vor allem die Kombination aus intuitiver Bedienung, Universalität beim betrachteten Montageprozess und hoher Sensibilität stellt für bekannte Ansätze aus dem Stand der Forschung und Technik eine immense Einschränkung dar.

Die erforschten Vorgehensweisen und Methoden zur Analyse von einzelnen Prozessschritten sowie komplexen Montageprozessketten sind in den marktverfügbaren Analyse- und Datenverarbeitungsprogrammen KNIME®, Excel®, Python® und Matlab® implementiert. Neben der generellen Portierbarkeit auf nahezu jegliches Computersystem bieten die entwickelten Methoden eine intuitive Bedienbarkeit durch die graphische Benutzeroberfläche und einfache Parametrierbarkeit. Durch den modularen Aufbau ist eine einfache Erweiterbarkeit durch neue Features, die Anbindung weiterer Montageprozesse und deren MPK sowie die Einbindung in bestehende Systeme möglich.

Als Ausblick bietet sich die Professionalisierung der entwickelten Demonstratoren, punktuelle Optimierungen und anschließend die Vermarktung an, aufgrund des großen Potenzials in Industrien mit hohem Montageanteil. Basierend auf der kontinuierlichen Funktionserweiterung ist eine nachhaltige und zukunftsfähige Anwendbarkeit gegeben. Im Rahmen der nachvollziehbaren, maschinell-unterstützten Wissensentdeckung in einzelnen Prozessschritten ist eine Erweiterung

um die Rückkopplung der Funktionsergebnisse denkbar. Eigene Untersuchungen zeigen zwar eine gute Anwendbarkeit von Klassifikatoren basierend auf neuronalen Netzwerken und Entscheidungsbäumen [156] zur Modellierung von komplexen Montageprozessketten, jedoch sinkt die Klassifikationsgenauigkeit bei großen und detailreichen Datensätzen. Eine Möglichkeit zur Dimensionsreduzierung liegt in der Anwendung eines CNN zur Beschreibung der Montageprozesskurven. Durch Kopplung der abstrakten Ergebnisse, Kennwerte und Qualitätsergebnisse ist ein stabiler Klassifikator mit hoher Prognosegüte möglich. Ein solches System ist derzeit nicht verfügbar, kann aber Gegenstand zukünftiger industrieller Entwicklungs- oder universitärer Forschungsarbeit sein.

9 Summary

Complex assembly process chains are an important part of German industry. However, their operation is becoming increasingly difficult due to the growing number of variants, increasing component complexity and resulting malfunctions. At the same time, the manual effort required for root cause analysis and monitoring of ongoing production is increasing because conventional methods are reaching their limits. The previous focus of mechanical engineers, manufacturing companies and research work has been on process monitoring and analysis of individual process steps. Design of experiments is used to generate test data sets and management- and expert-based procedures are used for analysis. Methods from the field of process monitoring tend to use static tolerance limits, envelopes and rarely mathematical formulas to ensure process stability despite disturbances. In principle, these procedures are limited to individual process steps, tools and product variants, which is why they have to be carried out individually for each new process and each new influencing variable. An alternative approach is to use changes in the process data of individual process steps to indicate changes in assembly processes with a damaging effect on the functional performance of the assembled product, irrespective of the process and the cause of the fault. Known procedures have deficits either in their universality, applicability in complex assembly process chains or sensitivity. Furthermore, the known state of the art and research either focuses on process steps and process chains in manufacturing or does not sufficiently address the traceability of results in black box approaches. Therefore, this dissertation is intended to contribute to the analysis of complex assembly process chains by means of data mining.

The central research focus of this work is based on findings gained from fundamental investigations into the behavior of complex assembly process chains, developed methods for analysis and knowledge discovery in individual process steps. In addition, cross-process step analysis and visualization methods for complex assembly process chains are addressed.

Despite the high relevance of the behavior of complex assembly process chains, only few publications deal with the cross-process step analysis of such systems. Own investigations on different assembly processes and chains show the strong effects of changes in process parameters especially within the valid control limits and prove the complexity of the topic. Due to the unmanageable high number of interactions and disturbance

variables, analysis using conventional uni- and multivariate methods is difficult. Combined with the critical requirement of a very low reject rate of products in assembly, the points mentioned underline the necessity of a cross-process step analysis for complex assembly process chains. Based on the results of the analysis, several needs for action can be derived: On the one hand, the need for error detection in individual process steps, on the other hand, the need for new methods for the analysis of complex assembly process chains.

A central cornerstone of this work is the understanding of individual process steps. By combined use of the available assembly process and quality curves, the basis for a differentiated analysis of optimal and deviating, respectively good and defective process runs is created. The procedure E|ASY-MPK is characterized by its universal applicability. Here, data and frequency-based visualizations in the sense of E|ASY-Heat enable depiction of changes in process behavior, novel by observing the spectral energy distribution in the assembly process during execution. The vivid visualizations enable a fast reaction for troubleshooting, especially in case of new and unknown influences and conditions. In particular, the machine-supported knowledge discovery through E|ASY-Class and E|ASY-Pat by means of CNN guides the user specifically to the decisive process phases and sequences, while adaptation to further processes is empirically possible.

Not only the process visualization E|ASY-Heat and knowledge discovery by means of E|ASY-Class and E|ASY-Pat for individually considered assembly processes represent an essential aspect of the research work. In addition, methods and procedures enable a cross-process step analysis of complex assembly process chains. First, the identification of causal stations in quality problems as well as interactions is addressed. Here, the E|ASY-Inter procedure using parallel coordinate plot supports the operator-guided detection of interactions, which is product-based. In parallel, the event-based process monitoring system E|ASY-Event checks a complex assembly process chain at the process level for occurring events. In particular, it is tested whether changes to the assembly processes affect the degree of function fulfillment, or whether quality deteriorations due to damaging changes to preceding process steps can be explained by signal propagation. Furthermore, the 3D-visualization E|ASY-Curves enables user-friendly, operator-guided analysis of the process and quality curves along an assembly process chain.

A major challenge in the analysis of complex assembly process chains is the information overload caused by the existing digital data sets of assembly processes. Here it is important not to irritate the user with too much information, while at the same time achieving a very high information density and allowing only minimal loss of information through the formation of characteristic values. The researched methods for visualization and knowledge discovery as well as the procedures for identifying causal process steps and harmful process changes contribute to a better manageability of the data flood. An important feature is the high sensitivity of the systems. Above all, the combination of intuitive operation, universality in the assembly process under consideration and high sensitivity represents an immense limitation for known approaches from the state of the art in research and technology.

The researched procedures and methods for the analysis of individual process steps as well as complex assembly process chains are implemented in the analysis and data processing programs KNIME®, Excel®, Python® and Matlab® which are available on the market. In addition to general portability to almost any computer system, the developed methods offer intuitive usability through the graphical user interface and easy parameterization. Due to the modular design, an easy extensibility by new features, the connection of further assembly processes and their MPK as well as the integration into existing systems is possible.

The professionalization of the developed demonstrators, selective optimizations and subsequent marketing are possible as a preview, due to the great potential in industries with a high assembly share. Based on the continuous functional expansion, a sustainable and future-proof applicability is given. Within the scope of the comprehensible, machine-supported knowledge discovery in individual process steps, an extension by feedback of the functional results is conceivable. Own investigations show a good applicability of classifiers based on neural networks and decision trees [156] for the modelling of complex assembly process chains, but the classification accuracy decreases with large and detailed data sets. One way to reduce dimensions is to use a CNN to describe assembly process curves. By coupling the abstract results, characteristic values and quality results, a stable classifier with high prediction quality is possible. Such a system is currently not available, but may be the subject of future industrial development or university research.

Literaturverzeichnis

- [1] Statistisches Bundesamt. Kennzahlen der Unternehmen des Verarbeitenden Gewerbes [online], 2015. Verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/Wirtschaftsbereiche/IndustrieVerarbeitendesGewerbe/Tabellen/KennzahlenVerarbeitendesGewerbe.html>
- [2] VDMA. Aktuelle Branchendaten 2017 [online], 2018. Verfügbar unter: <https://ias.vdma.org/viewer/-/v2article/render/26837279>
- [3] Feldmann, K., V. Schöppner und G. Spur (Hrsg.). Handbuch Fügen, Handhaben, Montieren. München: Carl Hanser Verlag, 2014.
- [4] Sommer, S. Algorithmen zur Steigerung der Qualitätsleistung und Verfügbarkeit automatisierter Montage- und Prüfsysteme. Dissertation. Ilmenau, 2006
- [5] Günthner, W.A., M. Wilke, M.F. Zäh, F. Aull und H. Rudolf. Produktion individualisierter Produkte. In: U. Lindemann, R. Reichwald und M.F. Zäh, Hg. Individualisierte Produkte — Komplexität beherrschen in Entwicklung und Produktion. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2006, S. 63-87. ISBN 3-540-25506-0
- [6] Clement, U. und M. Lacher. Produktionssysteme und Kompetenzerwerb. Zu den Veränderungen moderner Arbeitsorganisation und ihren Auswirkungen auf die berufliche Bildung. Stuttgart: Franz Steiner Verlag, 2006. Pädagogik. ISBN 3-515-08900-4
- [7] Eversheim, W. und G. Schuh. Integrierte Produkt- und Prozessgestaltung. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. VDI-Buch. ISBN 9783540269465
- [8] Lotter, B. und H.-P. Wiendahl. Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. VDI-Buch. ISBN 978-3-540-36669-0
- [9] Bodenburg, I. Mitarbeiterportale als Instrument des Wissensmanagements. Norderstedt: Grin Verlag, 2008. ISBN 978-3-638-95138-8
- [10] Heller, F. Wissensbasiertes Online-Störungsmanagement flexibler, hoch automatisierter Montagesysteme. Dissertation. Paderborn, 2003. Heinz-Nixdorf-Institut. Bd. 129. ISBN 3-935433-38-7

- [11] Westkämper, E. und E. Zahn. Wandlungsfähige Produktionsunternehmen. Das Stuttgarter Unternehmensmodell. Berlin: Springer, 2009. ISBN 978-3-540-68890-7
- [12] Linß, G. Qualitätssicherung - Technische Zuverlässigkeit. Lehr- und Arbeitsbuch. München: Carl Hanser Verlag, 2016. ISBN 978-3-446-44052-4
- [13] Hielscher, T. Qualitätsmanagement in fertigungstechnischen Prozessketten. Vorgehensweise zur fehlerbasierten Optimierung der gefertigten Bauteilqualität. Dissertation. Kaiserslautern, 2008. Produktionstechnische Berichte aus dem FBK. ISBN 978-3-939432-74-6
- [14] Lengwiler, A. Fehlerfortpflanzung, Simulation und Optimierung von Prozessketten anhand der gebauten Nockenwelle. Dissertation. Zürich, 2011. Fortschritt-Berichte VDI. Reihe 2, Fertigungstechnik. Nr. 682. ISBN 9783183682027
- [15] Götzfried, A. Analyse und Vergleich fertigungstechnischer Prozessketten für Flugzeugtriebwerks-Rotoren. Dissertation. München, 2013. Forschungsberichte IWB. 277. ISBN 978-3-8316-4310-3
- [16] Merget, M. Kostenoptimierung durch Toleranzvariation im Simultaneous Engineering. Dissertation. Aachen, 2004. Berichte aus der Produktionstechnik. ISBN 3-8322-2575-7
- [17] Jorden, W. Form- und Lagetoleranzen. Handbuch für Studium und Praxis. 6., aktual. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2009. ISBN 978-3-446-41778-6
- [18] Thürling, K. Prozessdatenanalyse zur Inline-Verminderung von Störeinflüssen beim Ultraschallsiegeln. Dissertation. Dresden, 2016
- [19] Neher, J. Neuro-Fuzzy-Modellierung zur umfassenden Prozessüberwachung am Beispiel des Ultraschallschweißens von Kunststoffteilen. Dissertation. Stuttgart, 2012. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. 1
- [20] Witt, S.T. Integrierte Simulation von Maschine, Werkstück und spanendem Fertigungsprozess. Dissertation. Aachen, 2007. Berichte aus der Produktionstechnik. 31
- [21] Zerehsaz, Y. Tensorial Data Modeling and Analysis for Manufacturing Process Quality Control Using Sensor Data. Dissertation. Ann Arbor, 2017
- [22] Ostgathe, M. System zur produktbasierten Steuerung von Abläufen in der auftragsbezogenen Fertigung und Montage. Dissertation. München, 2012. Forschungsberichte IWB. 265. ISBN 978-3-8316-4206-9

- [23] Strunz, M. Instandhaltung. Grundlagen - Strategien - Werkstätten. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg, 2012. ISBN 978-3-642-27389-6
- [24] Tonne, J. Robust Model Predictive Control for Large-Scale Manufacturing Systems subject to Uncertainties. Dissertation. Kassel, 2017. ISBN 978-3-7376-0449-9
- [25] Pyzdek, T. und P.A. Keller. Six Sigma handbook. A complete guide for green belts, black belts, and managers at all levels. 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2012. McGraw-Hill's AccessEngineering. ISBN 978-0071623384
- [26] Jeschke, K. Grundlagen und Prinzipien zur Null-Fehler-Produktion. In: F. Mikosch und E. Westkämper, Hg. Null-Fehler-Produktion in Prozeßketten. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1997, S. 9-27. ISBN 978-3-642-64376-7
- [27] Siebertz, K., D. van Bebber und T. Hochkirchen. Statistische Versuchsplanung. Design of Experiments (DoE). Heidelberg: Springer, 2010. VDI-Buch. ISBN 978-3-642-05493-8
- [28] Runkler, T.A. Data Mining. Methoden und Algorithmen intelligenter Datenanalyse ; Mit 72 Abbildungen und 7 Tabellen. Wiesbaden: Vieweg + Teubner, 2010. Studium. ISBN 978-3-8348-9353-6
- [29] Köksal, G., İ. Batmaz und M.C. Testik. A review of data mining applications for quality improvement in manufacturing industry [online]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(10), S. 13448-13467. ISSN 09574174. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.eswa.2011.04.063
- [30] Shi, J. und S. Zhou. Quality control and improvement for multistage systems: A survey [online]. IIE Transactions, 2009, 41(9), S. 744-753. ISSN 0740-817X. Verfügbar unter: doi:10.1080/07408170902966344
- [31] Kistler Instrumente GmbH. Prozessüberwachungssysteme [online], 2017. Verfügbar unter: <https://www.kistler.com/?type=669&fid=191&model=download>
- [32] PROMESS Gesellschaft für Montage- und Prüfsysteme mbH. Fügemodule [online], 2018. Verfügbar unter: <https://www.promessmontage.de/produkte/uebersicht/details/fuegemodule/ufm-line5/>
- [33] Böttcher, M. On utilising change over time in data mining. Dissertation. Magdeburg, 2013
- [34] Goldhahn, H. und J.-P. Majschak. Hoch effiziente Maschinensysteme für die individualisierte Massenproduktion. Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät der Wissenschaften zu Berlin, 2015, 122

- [35] Gröger, C. Advanced Manufacturing Analytics. Datengetriebene Optimierung von Fertigungsprozessen. Dissertation. Stuttgart, 2015. ISBN 3844104208
- [36] Salvendy, G. Handbook of industrial engineering. Technology and operations management. 3. ed. New York, NY: Wiley, 2001. ISBN 9780471330578
- [37] Koether, R. und W. Rau. Fertigungstechnik für Wirtschaftsingenieure. 3., aktualisierte Aufl. München: Hanser, 2008. ISBN 3446412743
- [38] Feldmann, K., Hg. Montage strategisch ausrichten. Praxisbeispiele marktorientierter Prozesse und Strukturen. Berlin: Springer, 2004. Engineering online library. ISBN 3-540-40304-3
- [39] Wiesbeck, M. Struktur zur Repräsentation von Montagesequenzen für die situationsorientierte Werkerführung. Dissertation. München, 2014. Forschungsberichte IWB. 285. ISBN 3831643695
- [40] Henke, J. Eine Methodik zur Steigerung der Wertschöpfung in der manuellen Montage komplexer Systeme. Dissertation. Stuttgart, 2015. Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung. Band 47. ISBN 978-3-8396-0964-4
- [41] VDI 2860:1990-05. Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole
- [42] Miese, M. Rationalisierung der Montage. In: K. Brankamp, Hg. Handbuch der modernen Fertigung und Montage. München: Verl. Moderne Industrie, 1975. ISBN 3478411009
- [43] VDI 2815:1978-05. Blatt 1 Begriffe für die Produktionsplanung und -steuerung - Einführung, Grundlagen
- [44] Andreasen, M.M., S. Kähler und T. Lund. Montagegerechtes Konstruieren. Berlin: Springer, 1985. ISBN 3540154345
- [45] Westkämper, E., Hg. Montageplanung - effizient und marktgerecht. Berlin: Springer, 2001. VDI-Buch. ISBN 3540666478
- [46] DIN 8593-0:2003-09. Fertigungsverfahren Fügen - Teil 0: Allgemeines; Einordnung, Unterteilung, Begriffe
- [47] DIN 8580:2003-09. Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung
- [48] Lotter, B. Wirtschaftliche Montage. Ein Handbuch für Elektrogerätebau und Feinwerktechnik. Düsseldorf: VDI-Verl., 1986. ISBN 9783184007096
- [49] DIN 1319-1:1995-01. Grundlagen der Meßtechnik - Teil 1: Grundbegriffe
- [50] Steinhoff, K. Prozessmodell für das Fügen durch Einpressen. Dissertation. Hamburg-Harburg, 1997

- [51] Goch, G. und M. Dijkman. Holonic quality control strategy for the process chain of bearing rings [online]. CIRP Annals, 2009, 58(1), S. 433-436. ISSN 00078506. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.cirp.2009.03.037
- [52] Eversheim, W. und K.W. Witte. Montage richtig planen: Methoden und Hilfsmittel zur rationellen Gestaltung der Montage in Unternehmen mit Einzel- und Serienfertigung. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1981
- [53] VDI 2221:1993-05. Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte, 1993
- [54] Konold, P. und H. Reger. Angewandte Montagetechnik. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 1997. ISBN 978-3-528-03843-4
- [55] Willnecker, U. Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen. Dissertation. München, 2000. Forschungsberichte IWB. 146. ISBN 3-89675-891-8
- [56] Fichtmüller, N. Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme. Dissertation. München, 1996. Forschungsberichte IWB. 95. ISBN 978-3-662-09672-7
- [57] Lotter, B. und H.-P. Wiendahl. Montage in der industriellen Produktion. Ein Handbuch für die Praxis. 2. Aufl. 2013. Berlin: Springer, 2012. VDI-Buch. ISBN 978-3-642-29061-9
- [58] Nicolaysen, E. Modellunterstützte Fehlerbehandlung in der Montage. Dissertation. Düsseldorf, 1996. Berichte der Institute für Automatisierungstechnik. 407. ISBN 3183407027
- [59] Min, Z. DATA-DRIVEN MODELING AND CONTROL FOR TIME-VARYING MULTISTAGE MANUFACTURING PROCESSES. Dissertation. Singapore, 2016
- [60] Wisweh, L. Rechnerunterstützte technologische Prüfvorbereitung bei der Geometrieprüfung in der Teilefertigung: Vorlaufanalyse-statistische Methoden-Verfahrensökonomie. Dissertation. Magdeburg, 1987
- [61] Willms, H. Methodisches System zur Auslegung von kostenoptimalen und prozessstabilen Fertigungsverkettungen. Dissertation. Aachen, 2008
- [62] Schäfer, L. Analyse und Gestaltung fertigungstechnischer Prozessketten: Konzept zur datenbasierten Ermittlung qualitätswirksamer Einfluss-Ursache-Wirkzusammenhänge und zur Ableitung von Maßnahmen zur Prozesssicherung. Dissertation. Kaiserslautern, 2003

- [63] Bettin, V. Ansatz zur übergreifenden Qualitätsregelung von Prozessketten in der Fertigung. Dissertation. Erlangen-Nürnberg, 2003. Berichte aus dem Lehrstuhl Qualitätsmanagement und Fertigungsmesstechnik. 9. ISBN 3-83223-323-7
- [64] Westermeyer, M. Qualitätsorientierte Analyse komplexer Prozessketten am Beispiel der Herstellung von Batteriezellen. Dissertation. München, 2016. Forschungsberichte IWB. 322. ISBN 978-3-8316-4586-2
- [65] Spath, D., M. Becker und S. Koch. Die adaptive unternehmerische Arbeitsorganisation. wt Werkstattstechnik online, 2005, 95(1/2), S. 3-6
- [66] Lebedynska, Y. Entwicklung eines Informationssystems mit Reifegradmanagement für automatisierte Schraubprozesse. Dissertation. Cottbus, 2011
- [67] Mahto, D. und A. Kumar. Application of root cause analysis in improvement of product quality and productivity [online]. Journal of Industrial Engineering and Management, 2008, 1(2). Verfügbar unter: doi:10.3926/jiem.2008.v1n2.p16-53
- [68] Zhou, S., Y. Chen und J. Shi. Statistical Estimation and Testing for Variation Root-Cause Identification of Multistage Manufacturing Processes [online]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2004, 1(1), S. 73-83. ISSN 1545-5955. Verfügbar unter: doi:10.1109/TASE.2004.829427
- [69] Chen, H.-S., Z. Yan, X. Zhang, Y. Liu und Y. Yao. Root Cause Diagnosis of Process Faults Using Conditional Granger Causality Analysis and Maximum Spanning Tree [online]. IFAC-PapersOnLine, 2018, 51(18), S. 381-386. ISSN 24058963. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ifacol.2018.09.330
- [70] Ma, L., J. Dong, K. Peng und K. Zhang. A novel data-based quality-related fault diagnosis scheme for fault detection and root cause diagnosis with application to hot strip mill process [online]. Control Engineering Practice, 2017, 67, S. 43-51. ISSN 09670661. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.conengprac.2017.07.005
- [71] Eversheim, W. Organisation in der Produktionstechnik. 2., neubearb. u. erw. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl., 1989. Studium und Praxis. ISBN 318400841X
- [72] REFA - Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation. Lexikon der Betriebsorganisation. 3. Aufl. München: Hanser, 1999. Methodenlehre der Betriebsorganisation. ISBN 3446175237

- [73] Heil, M. Entstörung betrieblicher Abläufe. Gabler Edition Wissenschaft. Wiesbaden: Deutscher Universitätsverlag, 1995. Gabler Edition Wissenschaft. ISBN 978-3-663-08460-0
- [74] Wildemann, H. Entstörmanagement als PPS-Funktion. 2., Neubearb. Aufl. München: TCW-Transfer-Centrum-Verl., 1995. TCW. 12. ISBN 3929918064
- [75] Czaja, L. und K.-I. Voigt. Störungen und Störungsauslöser in automobilen Wertschöpfungsnetzwerken - Ergebnisse einer empirischen Untersuchung in der deutschen Automobilzulieferindustrie. In: D. Specht, Hg. Weiterentwicklung der Produktion: Tagungsband der Herbsttagung 2008 der Wissenschaftlichen Kommission Produktionswirtschaft im VHB. Wiesbaden: Gabler, 2009, S. 1-17. ISBN 978-3-8349-8306-0
- [76] DIN IEC 60050-351:2014-09. Internationales Elektrotechnisches Wörterbuch - Teil 351: Leittechnik (IEC 60050-351:2013)
- [77] Hofmann, P. Fehlerbehandlung in flexiblen Fertigungssystemen. Einführung für Hersteller und Anwender. Dissertation. Erlangen, 1990. ISBN 3486217844
- [78] Kim, M.-h. Rechnerunterstütztes Störmanagementsystem in der Produktion. Dissertation. Düsseldorf, 1995. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8, Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik. 492. ISBN 3183492083
- [79] Verband deutscher Maschinen- und Anlagenbauer, Hg. Montage - Systemfähigkeit. Forschungsheft Nr. 3, AiF-Vorhaben Nr. 9176. Frankfurt am Main: Maschinenbau Verlag, 1996
- [80] Müller, B. Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile. Dissertation. Erlangen-Nürnberg, 2006. Fertigungstechnik - Erlangen. 173. ISBN 3-87525-240-3
- [81] Hochmuth, R. und H. Meerkamm. An approach to a general view on tolerances in mechanical engineering. Proceedings of the 2nd International Workshop on Integrated, 1998, S. 65-76
- [82] VDI. Lexikon der Produktionsplanung und -steuerung. Begriffszusammenhänge und Begriffsdefinitionen. 4. Aufl. Düsseldorf: VDI-Verl., 1992. ISBN 3184010066
- [83] Sand, C., D. Manke und J. Franke. Virtual Process Data Linkage of Assembly Stations in High Variance Workshop Production [online]. Applied Mechanics and Materials, 2017, 871, S. 60-68. Verfügbar unter: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.871.60

- [84] Weskamp, M., A. Tamas, T. Wochinger und A. Schatz. Studie Einsatz und Nutzenpotenziale von Data Mining in Produktionsunternehmen [online], 2014. Verfügbar unter: https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Publikationen/Studien/Studie_DataMininginProduktionsunternehmen.pdf
- [85] Würtz, G. Montage von Pressverbindungen mit Industrierobotern. Dissertation. Stuttgart, 1992. IPA-IAO Forschung und Praxis. 171. ISBN 978-3-642-47952-6
- [86] Pedersen, N.L. On optimization of interference fit assembly [online]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2016, 54(2), S. 349-359. ISSN 1615-147X. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00158-016-1419-0
- [87] Liuti, A., F. Rodriguez Vedugo, N. Paone und C. Ungaro. High-accuracy interference-fit assembly utilizing a hybrid actuator [online]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 95(1-4), S. 747-758. ISSN 0268-3768. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00170-017-1256-3
- [88] Sauer, B., Hg. Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1. Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen. 9. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2016. Springer-Lehrbuch. ISBN 978-3-642-39501-7
- [89] Benuzzi, D. und G. Donzella. Prediction of the press-fit curve in the assembly of a railway axle and wheel [online]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2004, 218(1), S. 51-65. ISSN 0954-4097. Verfügbar unter: doi:10.1243/095440904322804439
- [90] Wang, X., Z. Lou, X. Wang und C. Xu. A new analytical method for press-fit curve prediction of interference fitting parts [online]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 250, S. 16-24. ISSN 09240136. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.06.022
- [91] You, B., Z. Lou, Y. Luo, Y. Xu und X. Wang. Prediction of Pressing Quality for Press-Fit Assembly Based on Press-Fit Curve and Maximum Press-Mounting Force [online]. International Journal of Aerospace Engineering, 2015, 2015(6), S. 1-10. ISSN 1687-5966. Verfügbar unter: doi:10.1155/2015/823019
- [92] Paredes, M., N. Nefissi und M. Sartor. Study of an interference fit fastener assembly by finite element modelling, analysis and experiment [online]. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 2012, 6(3), S. 171-177. ISSN 1955-2513. Verfügbar unter: doi:10.1007/s12008-012-0146-z

- [93] Qasim, B.M. Influence of Surface Roughness and Hub Thickness on Interference Fitting. *kirkuk university journal for scientific studies*, 2017, 12(2), S. 255-270
- [94] Xiao, J., Q. Wu und F. Li. A Precise Press-Fit System of Booster Valve Based on Real-Time Displacement Monitoring. In: 2018 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS): IEEE, 2018, S. 451-455. ISBN 978-1-5386-4201-6
- [95] Fellner, T., E. Zukowski und J. Wilde. Modelling of process and reliability of press-fit interconnections. In: EuroSimE 2009 - 10th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems: IEEE, 2009, S. 1-7. ISBN 978-1-4244-4159-4
- [96] Sieben, C. Entwicklung eines Prognosemodells zur prozessbegleitenden Beurteilung der Montagequalität von Kolbendichtungen. Dissertation. München, 2015. Forschungsberichte IWB. 303. ISBN 9783831645107
- [97] VDA - Verband der Automobilindustrie. Quality Management in the Automotive Industry. Capability of Measurement Processes for the Torque Inspection on Bolted Joints. Berlin: VDA, 2013
- [98] Jia, Z., A. Bhatia, R.M. Aronson, D. Bourne und M.T. Mason. A Survey of Automated Threaded Fastening [online]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2018, S. 1-13. ISSN 1545-5955. Verfügbar unter: doi:10.1109/TASE.2018.2835382
- [99] Steber, M. Prozeßoptimierter Betrieb flexibler Schraubstationen in der automatisierten Montage. Dissertation. Erlangen, 1997. Reihe Fertigungstechnik Erlangen. 71. ISBN 3-87525-096-6
- [100] VDI 2230:2015-11. Blatt 1 Systematische Berechnung hochbeanspruchter Schraubenverbindungen - Zylindrische Einschraubenverbindungen
- [101] Mathurin, F., J. Guillot, P. Stéphan und A. Daidié. 3D Finite Element Modeling of an Assembly Process With Thread Forming Screw [online]. *CIRP Annals*, 2009, 131(4), S. 41015. ISSN 00078506. Verfügbar unter: doi:10.1115/1.3160377
- [102] Wikipedia: Betriebsdatenerfassung [online], 2020. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Betriebsdatenerfassung>
- [103] DIN 2330:2013-07. Begriffe und Benennungen - Allgemeine Grundsätze
- [104] Kief, H.B. NC/CNC-Handbuch 2001/02. NC, CNC, DNC, CAD, CAM, FFS, SPS, NC-Maschinen, NC-Roboter, LAN, Fachwortverzeichnis. München: Hanser, 2001. ISBN 3-446-21756-8

- [105] Baars, H. und H.-G. Kemper. Management Support with Structured and Unstructured Data—An Integrated Business Intelligence Framework [online]. Information Systems Management, 2008, 25(2), S. 132-148. ISSN 1058-0530. Verfügbar unter: doi:10.1080/10580530801941058
- [106] Piro, A. und M. Gebauer. Definition von Datenarten zur konsistenten Kommunikation im Unternehmen. In: K. Hildebrand, M. Gebauer, H. Hinrichs und M. Mielke, Hg. Daten- und Informationsqualität. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008, S. 143-156. ISBN 978-3-8348-0321-4
- [107] Seitz, M. Speicherprogrammierbare Steuerungen für die Fabrik- und Prozessautomation. Strukturierte und objektorientierte SPS-Programmierung, Motion Control, Sicherheit, vertikale Integration. 4., überarbeitete und erweiterte Auflage. München: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2015. ISBN 9783446442733
- [108] Bernath, U. Kombimessung von Kraft und Weg. 100% Überwachung bei Montage-, Füge- und Schraubprozessen. Technica, 2002, 51(20)
- [109] Kirchheim, A., Lehmann, A., Schaffner, G., Deuerling, R., Jeck, N. Force monitoring optimizes resistance welding and related joining processes. DVS Annual Welding Conference, 2005, 14.9.(13)
- [110] Richter, A. Möglichkeiten und Grenzen der Prozeßüberwachung zur Qualitätssicherung beim Fügen durch Umformen. Dissertation. Hamburg-Harburg, 1997
- [111] DIN EN ISO 9000:2005-12. Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe (ISO 9000:2005); Dreisprachige Fassung EN ISO 9000:2005
- [112] DIN 55350-17:1988-08. Begriffe der Qualitätssicherung und Statistik; Begriffe der Qualitätsprüfungsarten
- [113] Sand, C., M. Seidl, C. Leinauer, M. Neuner, M. Meiners, S. Baumann und J. Franke. Potentials for Energy Saving and Quality Improvement of Assembly Presses Using Data Mining [online]. Applied Mechanics and Materials, 2016, 856, S. 82-90. Verfügbar unter: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.856.82
- [114] Kohl, J. Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik. Dissertation. Erlangen, 2016. Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik. 282. ISBN 978-3-87525-406-8
- [115] Klocke, F. und W. König. Fertigungsverfahren 1. Drehen, Fräsen, Bohren. 8 Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. VDI-Buch. ISBN 978-3-540-23458-6

- [116] ten Hompel, M., T. Schmidt und J. Dregger. Materialflusssysteme. Förder- und Lagertechnik. 4. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2018. VDI-Buch. ISBN 3662561808
- [117] Spur, G. und T. Stöferle. Fügen, Handhaben und Montieren. München: Hanser, 1986. Handbuch der Fertigungstechnik. 5. ISBN 3446125361
- [118] Khrebtov, P. Neuartiges Verfahren zur Online-Prozessüberwachung und -Fehlerklassifizierung beim Durchsetzfügeverbinden von Blechen. Dissertation. Clausthal, 2011. ISBN 978-394-221-670-8
- [119] Breckweg, A. Automatisiertes und prozessüberwachtes Radialclinchen höherfester Blechwerkstoffe. Dissertation: Jost Jetter Verlag, 2007
- [120] Neher, M., C. Sand und J. Franke. Entwicklung einer Methodik zur automatisierten Charakterisierung von Prozesskurven. Masterarbeit. Erlangen, 2017
- [121] Dietrich, E. und A. Schulze. Statistische Verfahren zur Maschinen- und Prozessqualifikation. 7., aktualisierte Auflage. München: Carl Hanser Verlag, 2014. ISBN 978-3-446-44055-5
- [122] Schmitt, R. und T. Pfeifer. Qualitätsmanagement. Strategien, Methoden, Techniken. 4., vollst. überarb. Aufl. München Wien: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2010. ISBN 9783446412774
- [123] Linß, G. Qualitätsmanagement für Ingenieure. 4., aktualisierte und erweiterte Auflage. München: Hanser Carl, 2018. ISBN 978-3-446-44042-5
- [124] Bertsche, B. und G. Lechner. Zuverlässigkeit im Fahrzeug- und Maschinenbau. Ermittlung von Bauteil- und System-Zuverlässigkeiten. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2004. VDI-Buch. ISBN 978-3-540-34996-9
- [125] Warnecke, G., U. Zitt, C. Barth, J. Oh und R. Dollmeier. Modellbildung und Simulationenmethoden in der spanenden Fertigungstechnik. ASIM, Simulationstechnik, 1998, 12, S. 123-134
- [126] Liedl, P. Automatische Online-Früherkennung von Qualitätsschwankungen und Störungen bei zyklischen und kontinuierlichen Prozessen. Dissertation. Stuttgart: dissertation.de, 2005. 1160. ISBN 3866240600
- [127] Loher, M., Saladin, D., & Weidig, U. Model-based optimisation of a virtual manufacturing process with neural networks. The 36th CIRP-International Seminar on Manufacturing Systems, 2003

- [128] Backhaus, K., B. Erichson, W. Plinke und R. Weiber. Multivariate Analysemethoden. Eine anwendungsorientierte Einführung. 14., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Berlin: Springer Gabler, 2016. ISBN 978-3-662-46076-4
- [129] Baier, L., S. Spindler, M. Wacker, P. Schuderer und J. Franke. Defining Batches under Consideration of Quality-Related Factors for Improved Failure and Scrap Analysis [online]. Applied Mechanics and Materials, 2018, 882, S. 17-23. Verfügbar unter: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.882.17
- [130] Reichl, D.J., C. Sand und J. Franke. Qualitätssteigerung des Honprozesses einer automatisierten Fertigungslinie mittels Data Mining. Masterarbeit. Erlangen, 2016
- [131] Bertelmann, C., C. Sand und J. Franke. Analyse von KE- und Laserschweißprozessen mittels Data-Mining. Masterarbeit. Erlangen, 2015
- [132] Ehler, S., C. Sand und J. Franke. Entwicklung einer Überwachung von Hydraulikkontaktierprozessen mittels Data Mining. Masterarbeit. Erlangen, 2018
- [133] Han, J., M. Kamber und J. Pei. Data mining. Concepts and techniques. 3. ed. Amsterdam: Elsevier/Morgan Kaufmann, 2012. The Morgan Kaufmann series in data management systems. ISBN 9780123814791
- [134] Ankerst, M. Visual data mining. Dissertation. München, 2001. ISBN 3898252019
- [135] Shneiderman, B. The eyes have it: a task by data type taxonomy for information visualizations. In: Proceedings 1996 IEEE Symposium on Visual Languages: IEEE Comput. Soc. Press, 1996, S. 336-343. ISBN 0-8186-7508-X
- [136] KDnuggets. Where Analytics, Data Science, Machine Learning Were Applied: Trends and Analysis [online], 2018. Verfügbar unter: <https://www.kdnuggets.com/2018/04/poll-analytics-data-science-ml-applied-2017.html>
- [137] Kim, D.-H., T.J.Y. Kim, X. Wang, M. Kim, Y.-J. Quan, J.W. Oh, S.-H. Min, H. Kim, B. Bhandari, I. Yang und S.-H. Ahn. Smart Machining Process Using Machine Learning: A Review and Perspective on Machining Industry [online]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2018, 5(4), S. 555-568. ISSN 2288-6206. Verfügbar unter: doi:10.1007/s40684-018-0057-y

- [138] Escartin, J., J. Argandona und J.K. Gerrikagoitia. Data-driven Exploration and Process Optimization for a Milling-boring Machine. In: 2018 IEEE 16th International Conference on Industrial Informatics (INDIN): IEEE, 2018, S. 80-86. ISBN 978-1-5386-4829-2
- [139] Kirchheim, A., Lehmann, A., Schaffner, G., Deuerling, R., Jeck, N. Force monitoring optimizes resistance welding and related joining processes. DVS Annual Welding Conference, 2005, 14.9.(13)
- [140] Bastuck, M. In-Situ-Überwachung von Laserschweißprozessen mittels höherfrequenter Schallemissionen. Dissertation. Saarbrücken: Universität des Saarlandes, 2016
- [141] Chumakov, R. An artificial neural network for fault detection in the assembly of thread-forming screws [online]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2008, 19(3), S. 327-333. ISSN 0956-5515. Verfügbar unter: doi:10.1007/s10845-008-0085-5
- [142] Matsuno, T., J. Huang und T. Fukuda. Fault detection algorithm for external thread fastening by robotic manipulator using linear support vector machine classifier. In: 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation: IEEE, 2013, S. 3443-3450. ISBN 978-1-4673-5643-5
- [143] Hao, L., L. Bian, N. Gebraeel und J. Shi. Residual Life Prediction of Multistage Manufacturing Processes With Interaction Between Tool Wear and Product Quality Degradation [online]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017, 14(2), S. 1211-1224. ISSN 1545-5955. Verfügbar unter: doi:10.1109/TASE.2015.2513208
- [144] Tong, X., H.D. Ardakani, D. Siegel, E. Gamel und J. Lee. A Novel Methodology for Fault Identification of Multi-stage Manufacturing Process Using Product Quality Measurement. International Journal of Prognostics and Health Management, 2017, (8)
- [145] Aggarwal, C.C. Outlier Analysis. 2nd ed. 2017. Cham: Springer International Publishing, 2017. ISBN 978-3-319-47578-3
- [146] Chandola, V., A. Banerjee und V. Kumar. Anomaly detection [online]. ACM Computing Surveys, 2009, 41(3), S. 1-58. ISSN 03600300. Verfügbar unter: doi:10.1145/1541880.1541882
- [147] Ziaja, A., I. Antoniadou, T. Barszcz, W.J. Staszewski und K. Worden. Fault detection in rolling element bearings using wavelet-based variance analysis and novelty detection [online]. Journal of Vibration and Control, 2016, 22(2), S. 396-411. ISSN 1077-5463. Verfügbar unter: doi:10.1177/1077546314532859

- [148] Krizhevsky, A., I. Sutskever und G.E. Hinton. ImageNet classification with deep convolutional neural networks [online]. Communications of the ACM, 2017, 60(6), S. 84-90. ISSN 00010782. Verfügbar unter: doi:10.1145/3065386
- [149] Fu, Y., Y. Zhang, Y. Gao, H. Gao, T. Mao, H. Zhou und D. Li. Machining vibration states monitoring based on image representation using convolutional neural networks [online]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2017, 65, S. 240-251. ISSN 09521976. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.engappai.2017.07.024
- [150] Khan, S., H. Rahmani, S.A.A. Shah, M. Bennamoun und G. Medioni. A Guide to Convolutional Neural Networks for Computer Vision. San Rafael: Morgan & Claypool Publishers, 2018. Synthesis Lectures on Computer Vision. 15. ISBN 1681730227
- [151] Selvaraju, R.R., M. Cogswell, A. Das, R. Vedantam, D. Parikh und D. Batra. Grad-CAM: Visual Explanations from Deep Networks via Gradient-Based Localization. In: 2017 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV): IEEE, 2017, S. 618-626. ISBN 978-1-5386-1032-9
- [152] Lee, K.B., S. Cheon und C.O. Kim. A Convolutional Neural Network for Fault Classification and Diagnosis in Semiconductor Manufacturing Processes [online]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2017, 30(2), S. 135-142. ISSN 0894-6507. Verfügbar unter: doi:10.1109/TSM.2017.2676245
- [153] Sand, C., S. Kunz, H. Hubbert und J. Franke. Towards an inline quick reaction system for actuator manufacturing using data mining. In: 2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC): IEEE, 2016, S. 74-79. ISBN 978-1-5090-2908-2
- [154] Sand, C., T. Lechler, P. Schuh und J. Franke. Potentials for Error Detection and Process Visualization in Assembly Lines Using a Parallel Coordinates Plot [online]. Applied Mechanics and Materials, 2018, 882, S. 10-16. Verfügbar unter: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.882.10
- [155] Sand, C., P. Schuh, T. Lechler und J. Franke. Data analysis and error detection in assembly lines using a three-dimensional visualization technique. In: 2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC), 2017
- [156] Sand, C., S. Kawan, T. Lechler, M. Neher, D. Schweigert und J. Franke. Potentials for Error Detection and Quality Improvement in Assembly Lines Using FFT, Clustering and Dynamic Envelope Curve [online]. Applied Mechanics and Materials, 2017, 871, S. 52-59. Verfügbar unter: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.871.52

- [157] Sand, C., F. Renz, A.C. Aslanpinar und J. Franke. A Quick Reaction System Using Energy, Process and Quality Data for Process Characterization and Holistic Monitoring of Large Scale Assembly Lines [online]. Applied Mechanics and Materials, 2017, 871, S. 44-51. Verfügbar unter: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.871.44
- [158] Sand, C., M. Meiners, J. Eberle und J. Franke. Evaluation of energy measurements for error detection in press-fitting processes. In: 2018 2nd International Symposium on Small-scale Intelligent Manufacturing Systems (SIMS): IEEE, 16. April 2018 - 18. April 2018, S. 1-6. ISBN 978-1-5386-4437-9
- [159] Weckenmann, A. und B. Gawande. Koordinatenmesstechnik. Flexible Meßstrategien für Maß, Form und Lage. s.l.: Carl Hanser Fachbuchverlag, 2012. ISBN 978-3-446-40739-8
- [160] Keferstein, C.P. und M. Marxer. Fertigungsmesstechnik. Praxisorientierte Grundlagen, moderne Messverfahren. 8., vollst. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. ISBN 9783834825827
- [161] Reiter, R. Integrierte Gestaltung automatischer Prüfmittel für die flexible Montage. Dissertation. München. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 8, Meß-, Steuerungs- und Regelungstechnik. 720. ISBN 3183720086
- [162] Reinhart, G., U. Lindemann und J. Heinzl. Qualitätsmanagement. Ein Kurs für Studium und Praxis. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1996. ISBN 3642802109
- [163] Karrenberg, U. Signale - Prozesse - Systeme. Eine multimediale und interaktive Einführung in die Signalverarbeitung. 7., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2017. ISBN 978-3-662-52659-0
- [164] Lee, J., M. Recker, A. Bowers und M. Yuan. Hierarchical Cluster Analysis Heat-maps and Pattern Analysis. An Approach for Visualizing Learning Management System Interaction Data. Proceedings of the 9th International Conference on Educational Data Mining, 2016, S. 603-604
- [165] Schumann, H. und W. Müller. Visualisierung. Grundlagen und allgemeine Methoden. Berlin: Springer, 2000. ISBN 364257193X
- [166] Bojarski, M., A. Choromanska, K. Choromanski, B. Firner, L. Jackel, U. Muller und K. Zieba. VisualBackProp: efficient visualization of CNNs [online]. 2016. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/pdf/1611.05418v3>

- [167] Inselberg, A. Parallel Coordinates. Visual Multidimensional Geometry and Its Applications. New York: Springer-Verlag New York, 2009. ISBN 978-0387215075
- [168] Liu, B., Y. Xia und P.S. Yu. Clustering through decision tree construction. In: A. Agah, J. Callan, E. Rundensteiner und S. Gauch, Hg. Proceedings of the ninth international conference on Information and knowledge management - CIKM '00. New York, New York, USA: ACM Press, 2000, S. 20-29. ISBN 1581133200
- [169] University of Waikato. Weka 3: Data Mining Software in Java [online], 2018. Verfügbar unter: <https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/>
- [170] KNIME AG. KNIME Analytics Platform [online], 2018. Verfügbar unter: <https://www.knime.com/knime-software/knime-analytics-platform>
- [171] Tukey, J.W. Exploratory data analysis. Reading, Mass.: Addison-Wesley, 1997. Addison-Wesley series in behavioral science Quantitative methods. ISBN 978-0201076165
- [172] Becker, R.A., W.S. Cleveland und A.R. Wilks. Dynamic Graphics for Data Analysis [online]. Statistical Science, 1987, 2(4), S. 355-383. ISSN 0883-4237. Verfügbar unter: doi:10.1214/ss/1177013104
- [173] Ling, C.X. und V.S. Sheng. Cost-Sensitive Learning. In: C. Sammut und G.I. Webb, Hg. Encyclopedia of Machine Learning and Data Mining. Boston: Springer US, 2017, S. 285-289. ISBN 978-1-4899-7685-7
- [174] López, V., A. Fernández, S. García, V. Palade und F. Herrera. An insight into classification with imbalanced data: Empirical results and current trends on using data intrinsic characteristics [online]. Information Sciences, 2013, 250, S. 113-141. ISSN 00200255. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ins.2013.07.007
- [175] Staudt, T., C. Sand und J. Franke. Entwicklung einer Methode zur Detektion von Störeinflüssen in einem Fügeprozess. Projektarbeit. Erlangen, 2018
- [176] Neher, M., C. Sand und J. Franke. Entwicklung einer Methodik zur automatisierten Charakterisierung von Prozesskurven. Masterarbeit. Erlangen, 2017

Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] Sand, C., S. Kawan, T. Lechler, M. Neher, D. Schweigert und J. Franke. Potentials for Error Detection and Quality Improvement in Assembly Lines Using FFT, Clustering and Dynamic Envelope Curve [online]. Applied Mechanics and Materials, 2017, 871, S. 52-59. Verfügbar unter:
doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.871.52
- [P2] Sand, C., S. Kunz, H. Hubbert und J. Franke. Towards an inline quick reaction system for actuator manufacturing using data mining. In: 2016 6th International Electric Drives Production Conference (EDPC): IEEE, 2016, S. 74-79.
ISBN 978-1-5090-2908-2
- [P3] Sand, C., T. Lechler, P. Schuh und J. Franke. Potentials for Error Detection and Process Visualization in Assembly Lines Using a Parallel Coordinates Plot [online]. Applied Mechanics and Materials, 2018, 882, S. 10-16. Verfügbar unter:
doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.882.10
- [P4] Sand, C., D. Manke und J. Franke. Virtual Process Data Linkage of Assembly Stations in High Variance Workshop Production [online]. Applied Mechanics and Materials, 2017, 871, S. 60-68. Verfügbar unter: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.871.60
- [P5] Sand, C., M. Meiners, J. Eberle und J. Franke. Evaluation of energy measurements for error detection in press-fitting processes. In: 2018 2nd International Symposium on Small-scale Intelligent Manufacturing Systems (SIMS): IEEE, 16. April 2018 - 18. April 2018, S. 1-6. ISBN 978-1-5386-4437-9
- [P6] Sand, C., F. Renz, A.C. Aslanpinar und J. Franke. A Quick Reaction System Using Energy, Process and Quality Data for Process Characterization and Holistic Monitoring of Large Scale Assembly Lines [online]. Applied Mechanics and Materials, 2017, 871, S. 44-51. Verfügbar unter:
doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.871.44
- [P7] Sand, C., P. Schuh, T. Lechler und J. Franke. Data analysis and error detection in assembly lines using a three-dimensional visualization technique. In: 2017 7th International Electric Drives Production Conference (EDPC), 2017

- [P8] Sand, C., M. Seidl, C. Leinauer, M. Neuner, M. Meiners, S. Baumann und J. Franke. Potentials for Energy Saving and Quality Improvement of Assembly Presses Using Data Mining [online]. Applied Mechanics and Materials, 2016, 856, S. 82-90. Verfügbar unter: [doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.856.82](https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.856.82)

Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten⁵

- [S1] Bertelmann, C., C. Sand und J. Franke. Analyse von KE- und Laserschweißprozessen mittels Data-Mining. Masterarbeit. Erlangen, 2015
- [S2] Daberkow, J., C. Sand und J. Franke. Prozessoptimierung im industriellen Musterbau durch ganzheitliche Datenanalyse. Masterarbeit. Erlangen, 2014
- [S3] Dürr, L., C. Sand und J. Franke. Entwicklung neuer Anwendungsfälle multivariater Analysemethoden in der Montage. Bachelorarbeit. Erlangen, 2016
- [S4] Dürr, L., C. Sand und J. Franke. Untersuchung der Prozessleistung beim Einpressen anhand von Strom- und Kraftmesswerten. Projektarbeit. Erlangen, 2018
- [S5] Ehler, S., C. Sand und J. Franke. Entwicklung einer Überwachung von Hydraulikkontaktierprozessen mittels Data Mining. Masterarbeit. Erlangen, 2018
- [S6] Funk, D.P., C. Sand und J. Franke. Produktions- und Prozessoptimierung mittels Data Mining im industriellen Umfeld - Bewertung von Klassifikationsalgorithmen. Projektarbeit. Erlangen, 2015
- [S7] Funk, D.P., C. Sand und J. Franke. Einsatzpotential von Data Mining Methoden im Qualitätsmanagement der industriellen Fertigung. Masterarbeit. Erlangen, 2016
- [S8] Gwildies, W., C. Sand und J. Franke. Entwicklung einer Prüfsystematik für Funktionsprüfstände mittels Data Mining. Projektarbeit. Erlangen, 2016
- [S9] Gwildies, W., C. Sand und J. Franke. Analyse eines Hydraulikkontaktierungsprozesses mittels Data Mining. Masterarbeit. Erlangen, 2016
- [S10] Hahn, D., C. Sand und J. Franke. Anwendungsfälle und Bewertung von multivarianten Analysen in der spanenden Fertigung. Bachelorarbeit. Erlangen, 2015

⁵ Der Autor an zweiter (und ggf. dritter) Stelle bezeichnet den bzw. die Betreuer der studentischen Arbeit und an letztgenannter Stelle den/die Lehrstuhlinhaber/in

- [S11] Hetz, P., C. Sand und J. Franke. Konzeptionierung eines Systems zur Optimierung der Rückverfolgbarkeit von Erzeugnissen an einer Montagelinie. Projektarbeit. Erlangen, 2016
- [S12] Kawan, S., C. Sand und U. Schultheiß. Frequenzanalyse von Einpress- und Qualitätskurven in der Serienfertigung von Druckregelventilen. Bachelorarbeit. Darmstadt, 2017
- [S13] Kummert, V., C. Sand und J. Franke. Entwicklung einer Methodik zur Bewertung von Optimierungspotentialen mittels Data Mining. Bachelorarbeit. Erlangen, 2017
- [S14] Kunz, S.E.A., C. Sand und J. Franke. Voruntersuchungen einer Produktionslinie auf deren Eignung für Data Mining Analysen. Projektarbeit. Erlangen, 2015
- [S15] Kunz, S.E.A., C. Sand und J. Franke. Entwicklung einer Methodik zur Produktionsoptimierung mittels Data Mining. Masterarbeit. Erlangen, 2016
- [S16] Leinauer, C.M., C. Sand und J. Franke. Analyse von Energiedaten und Prozesseinflüssen. Projektarbeit. Erlangen, 2016
- [S17] Leinauer, C.M., C. Sand und J. Franke. Energetische Einsparpotenziale bei Pressprozessen in der Großserienfertigung. Masterarbeit. Erlangen, 2017
- [S18] Rehwald, M., C. Sand und J. Franke. Konzeptionierung einer Methodik zur Überwachung von Einpressvorgängen. Projektarbeit. Erlangen, 2017
- [S19] Reichl, D.J., C. Sand und J. Franke. Qualitätssteigerung des Honprozesses einer automatisierten Fertigungslinie mittels Data Mining. Masterarbeit. Erlangen, 2016
- [S20] Schmid, V., C. Sand und J. Franke. Konzeptionierung einer Methodik zur Beurteilung von Einpressprozessen durch Energiedaten. Projektarbeit. Erlangen, 2017
- [S21] Seidl, M., C. Sand und J. Franke. Analyse von Energiedaten und Konzepterstellung zur Visualisierung von Prozessinformationen. Bachelorarbeit. Erlangen, 2015
- [S22] Seidl, M., C. Sand und J. Franke. Entwicklung einer Anomalieerkennung für Energiedaten mittels Data Mining. Projektarbeit. Erlangen, 2017

- [S23] Raffin, T., C. Sand und J. Franke. Konzeptionierung einer Prozessüberwachung für Einpressvorgänge mittels Signalverarbeitung. Bachelorarbeit. Erlangen, 2017
- [S24] Melkonian, Y., C. Sand, I. Ullmann und M. Vossiek. Entwicklung einer frequenzbasierten Prozessüberwachung für Schraubprozesse. Masterarbeit. Erlangen, 2018
- [S25] Staudt, T., C. Sand und J. Franke. Entwicklung einer Methode zur Detektion von Störeinflüssen in einem Fügeprozess. Projektarbeit. Erlangen, 2018
- [S26] Lechler, T., C. Sand und J. Franke. Entwicklung einer Methodik zur Prozessüberwachung im industriellen Musterbau. Projektarbeit. Erlangen, 2017
- [S27] Lechler, T., C. Sand und J. Franke. Entwicklung einer Methodik zur Analyse verketteter Montagesysteme mittels Data Mining. Masterarbeit. Erlangen, 2018
- [S28] Schuh, P.A., C. Sand und J. Franke. Analyse qualitätsbeeinflussender Prozessabweichungen mittels Data Mining. Projektarbeit. Erlangen, 2017
- [S29] Schuh, P.A., C. Sand und J. Franke. Entwicklung einer Methodik zur Überwachung und Analyse automatisierter Montageprozesse. Masterarbeit. Erlangen, 2018
- [S30] Aslanpinar, A.C., C. Sand und J. Franke. Weiterentwicklung eines Datensammlers und Konzepterstellung zur Visualisierung von Prozessinformationen. Bachelorarbeit. Erlangen, 2015
- [S31] Aslanpinar, A.C., C. Sand und J. Franke. Analyse von Prozessdaten zur Prozessoptimierung einer Fertigungslinie mittels Data Mining. Projektarbeit. Erlangen, 2017
- [S32] Aslanpinar, A.C., C. Sand und J. Franke. Entwicklung einer Methodik zur Klassifizierung von Prozess- und Qualitätsdaten einer Montagelinie. Masterarbeit. Erlangen, 2018
- [S33] Bogus, K.M., C. Sand und J. Franke. Voruntersuchungen einer Produktionslinie auf deren Eignung für Data Mining Analysen. Projektarbeit. Erlangen, 2016
- [S34] Bogus, K.M., C. Sand und J. Franke. Umsetzung eines Live-Prozessmonitoringsystems zur ganzheitlichen Analyse einer Montagelinie. Masterarbeit. Erlangen, 2016

- [S35] Dieffenbacher, M., C. Sand und J. Franke. Entwicklung eines Live Monitoring Dashboards mittels Business Intelligence Tools. Bachelorarbeit. Erlangen, 2017
- [S36] Renz, F., C. Sand und J. Franke. Entwicklung eines Dashboards zur Visualisierung von Prozess- und Prüfparametern. Projektarbeit. Erlangen, 2016
- [S37] Renz, F., C. Sand und J. Franke. Prozessoptimierung vollautomatisierter Fertigungslinien mittels operativem Dashboard auf Basis von Data Mining. Masterarbeit. Erlangen, 2017
- [S38] Yildirim, Z., C. Sand und R. Dehs. Analyse einer Produktionslinie mittels Data Mining. Bachelorarbeit. Ansbach, 2016
- [S39] Hubbert, H.H., C. Sand und J. Franke. Planung, Entwicklung und Umsetzung eines modularen Datensammlers für vollautomatische Wertschöpfungsketten. Projektarbeit. Erlangen, 2015
- [S40] Hubbert, H.H., C. Sand und J. Franke. Entwicklung einer Methodik zur Produktionsoptimierung vollautomatischer Fertigungslinien mittels Data Mining. Masterarbeit. Erlangen, 2016
- [S41] Meiners, M., C. Sand und J. Franke. Prozessdatenanalyse mittels Data Mining und Konzepterstellung zur virtuellen Verknüpfung von Produktionslinien. Projektarbeit. Erlangen, 2015
- [S42] Meiners, M., C. Sand und J. Franke. Entwicklung einer Live-Prozessüberwachung für Musterbau und Großserie mit Hüllkurvenanalyse. Masterarbeit. Erlangen, 2016
- [S43] Neher, M., C. Sand und J. Franke. Konzeptionierung einer webbasierten App zur Prozessvisualisierung im industriellen Umfeld. Projektarbeit. Erlangen, 2016
- [S44] Neher, M., C. Sand und J. Franke. Entwicklung einer Methodik zur automatisierten Charakterisierung von Prozesskurven. Masterarbeit. Erlangen, 2017
- [S45] Pecht, F., M. Meiners, C. Sand und J. Franke. Entwicklung einer Methodik zur Fehlererkennung in Montageprozessen mittels Data Mining. Masterarbeit. Erlangen, 2019
- [S46] Eberle, J., C. Sand und J. Franke. Entwicklung einer Methodik zur Detektion von Störgrößen beim Einpressen mittels Data Mining. Masterarbeit. Erlangen, 2017

- [S47] Forster, E.-J., C. Sand und J. Franke. Prozess- und Energiedatenanalyse zur Optimierung des An- und Einpressens mittels Data Mining. Masterarbeit. Erlangen, 2017
- [S48] Neuner, M.F., C. Sand und J. Franke. Konzeptionierung einer Methode zur energetischen Optimierung eines Fügeprozesses mittels Data Mining. Masterarbeit. Erlangen, 2016

Abstract

Assembly systems are an integral part of the manufacturing industry, especially in the German automotive and mechanical engineering sectors. The focus of this work is on complex assembly process chains (MPK) in large-scale production. In these systems every single process step is defined with several parameters in narrow process windows and they are robustly located there. Nevertheless, serial defects occur which are very difficult to detect. On the one hand, all parameters along the MPK are within the limits and have a good to very good Cp value. On the other hand, there are events in MPK that lead to rejects, although each individual process and its parameters are excellently located within the tolerance limits.

The focus of this work is on the cross-process, data-driven analysis of MPK. In the context of E|ASY-Class and E|ASY-Pat, the discovery of knowledge in process curves is addressed and the process visualization E|ASY-Heat allows for a continuous change analysis of the process behavior. For the analysis of MPK, E|ASY-Inter visualizes complex interactions between assembly processes and the tested defective products in function fulfillment to identify the causes of faults. E|ASY-Event recognizes spontaneous changes with a damaging effect on the functional fulfillment of the assembled product by means of signal propagation along complex assembly systems. For detailed analysis, E|ASY-Curves supports the visual evaluation of process curves by means of 3D representation.

Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2020):

Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, www.mb.fau.de/diss/

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52

Fertigungstechnik – Erlangen

ISSN 1431-6226

Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307

Fertigungstechnik – Erlangen

ISSN 1431-6226

Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308

FAU Studien aus dem Maschinenbau

ISSN 2625-9974

FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

FAPS	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
KTmflk	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
LFT	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
LPT	Lehrstuhl für Photonische Technologien

Band 1: Andreas Hemberger
Innovationspotentiale in der
rechnerintegrierten Produktion durch
wissensbasierte Systeme
FAPS, 208 Seiten, 107 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15234-2.

Band 2: Detlef Classe
Beitrag zur Steigerung der Flexibilität
automatisierter Montagesysteme
durch Sensorintegration und erweiterte
Steuerungskonzepte
FAPS, 194 Seiten, 70 Bilder. 1988.
ISBN 3-446-15529-5.

Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting
Projektierung von Montagesystemen
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15541-4.

Band 4: Karsten Schlüter
Nutzungsgradsteigerung von
Montagesystemen durch den Einsatz
der Simulationstechnik
FAPS, 177 Seiten, 97 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15542-2.

Band 5: Shir-Kuan Lin
Aufbau von Modellen zur Lageregelung
von Industrierobotern
FAPS, 168 Seiten, 46 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15546-5.

Band 6: Rudolf Nuss
Untersuchungen zur Bearbeitungsquali-
tät im Fertigungssystem Laserstrahl-
schneiden
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15783-2.

Band 7: Wolfgang Scholz
Modell zur datenbankgestützten Planung
automatisierter Montageanlagen
FAPS, 194 Seiten, 89 Bilder. 1989.
ISBN 3-446-15825-1.

Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier
Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhal-
tens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.
ISBN 3-446-15921-5.

Band 9: Rainer Eisele
Konzeption und Wirtschaftlichkeit von
Planungssystemen in der Produktion
FAPS, 183 Seiten, 86 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16107-4.

Band 10: Rolf Pfeiffer
Technologisch orientierte
Montageplanung am Beispiel der
Schraubtechnik
FAPS, 216 Seiten, 102 Bilder, 16 Tab. 1990.
ISBN 3-446-16161-9.

Band 11: Herbert Fischer
Verteilte Planungssysteme zur
Flexibilitätssteigerung der
rechnerintegrierten Teilefertigung
FAPS, 201 Seiten, 82 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16105-8.

Band 12: Gerhard Kleineidam
CAD/CAP: Rechnergestützte Montage-
feinplanung
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.
ISBN 3-446-16112-0.

Band 13: Frank Vollertsen
Pulvermetallurgische Verarbeitung eines
übereutektoiden verschleißfesten Stahls
LFT, XIII u. 217 Seiten, 67 Bilder, 34 Tab.
1990. ISBN 3-446-16133-3.

Band 14: Stephan Biermann
Untersuchungen zur Anlagen- und
Prozeßdiagnostik für das Schneiden
mit CO₂-Hochleistungslasern
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab.
1991. ISBN 3-446-16269-0.

Band 15: Uwe Geißler
Material- und Datenfluß in einer flexiblen
Blechbearbeitungszelle
LFT, 124 Seiten, 41 Bilder, 7 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16358-1.

Band 16: Frank Oswald Hake
Entwicklung eines rechnergestützten
Diagnosesystems für automatisierte
Montagezellen
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16428-6.

Band 17: Herbert Reichel
Optimierung der Werkzeugbereitstellung
durch rechnergestützte
Arbeitsfolgenbestimmung
FAPS, 198 Seiten, 73 Bilder, 2 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16453-7.

Band 18: Josef Scheller
Modellierung und Einsatz von
Softwaresystemen für rechnergeführte
Montagezellen
FAPS, 198 Seiten, 65 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16454-5.

Band 19: Arnold vom Ende
Untersuchungen zum Biegeumforme mit
elastischer Matrize
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.
ISBN 3-446-16493-6.

Band 20: Joachim Schmid
Beitrag zum automatisierten Bearbeiten
von Keramikguß mit Industrierobotern
FAPS, XIV u. 176 Seiten, 111 Bilder, 6 Tab.
1991. ISBN 3-446-16560-6.

Band 21: Egon Sommer
Multiprozessorsteuerung für
kooperierende Industrieroboter in
Montagezellen
FAPS, 188 Seiten, 102 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-17062-6.

Band 22: Georg Geyer
Entwicklung problemspezifischer
Verfahrensketten in der Montage
FAPS, 192 Seiten, 112 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16552-5.

Band 23: Rainer Flohr
Beitrag zur optimalen
Verbindungstechnik in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 186 Seiten, 79 Bilder. 1991.
ISBN 3-446-16568-1.

Band 24: Alfons Rief
Untersuchungen zur Verfahrensfolge
Laserstrahlschneiden und -schweißen
in der Rohkarosseriefertigung
LFT, VI u. 145 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab.
1991. ISBN 3-446-16593-2.

Band 25: Christoph Thim
Rechnerunterstützte Optimierung
von Materialflußstrukturen in der
Elektronikmontage durch Simulation
FAPS, 188 Seiten, 74 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17118-5.

Band 26: Roland Müller
CO₂-Laserstrahlschneiden von
kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17104-5.

Band 27: Günther Schäfer
Integrierte Informationsverarbeitung
bei der Montageplanung
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17117-7.

Band 28: Martin Hoffmann
Entwicklung einer
CAD/CAM-Prozesskette für die
Herstellung von Blechbiegeteilen
LFT, 149 Seiten, 89 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17154-1.

Band 29: Peter Hoffmann
Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden
und -schweißen: Prozeßführung und
Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbear-
beitung von Blechformteilen
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992.
ISBN 3-446-17153-3.

Band 30: Olaf Schrödel
Flexible Werkstattsteuerung mit
objektorientierten Softwarestrukturen
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17242-4.

Band 31: Hubert Reinisch
Planungs- und Steuerungswerkzeuge
zur impliziten Geräteprogrammierung
in Roboterzellen
FAPS, XI u. 212 Seiten, 112 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17380-3.

Band 32: Brigitte Bärnreuther
Ein Beitrag zur Bewertung des Kommuni-
kationsverhaltens von Automatisierungs-
geräten in flexiblen Produktionszellen
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992.
ISBN 3-446-17451-6.

Band 33: Joachim Hutfless
Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik
in der Strahlführung einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17532-6.

Band 34: Uwe Günzel
Entwicklung und Einsatz eines Simula-
tionsverfahrens für operative und
strategische Probleme der
Produktionsplanung und -steuerung
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
1993. ISBN 3-446-17604-7.

Band 35: Bertram Ehmann
Operatives Fertigungscontrolling durch
Optimierung auftragsbezogener Bearbei-
tungsabläufe in der Elektronikfertigung
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17658-6.

Band 36: Harald Kolléra
Entwicklung eines benutzerorientierten
Werkstattprogrammiersystems für das
Laserstrahlschneiden
LFT, 129 Seiten, 66 Bilder, 1 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17719-1.

Band 37: Stephanie Abels
Modellierung und Optimierung von
Montageanlagen in einem integrierten
Simulationssystem
FAPS, 188 Seiten, 88 Bilder. 1993.
ISBN 3-446-17731-0.

Band 38: Robert Schmidt-Hebbel
Laserstrahlbohren durchflußbestimmen-
der Durchgangslöcher
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993.
ISBN 3-446-17778-7.

Band 39: Norbert Lutz
Oberflächenfeinbearbeitung
keramischer Werkstoffe mit
XeCl-Excimerlaserstrahlung
LFT, 187 Seiten, 98 Bilder, 29 Tab. 1994.
ISBN 3-446-17970-4.

Band 40: Konrad Grampp
Rechnerunterstützung bei Test und
Schulung an Steuerungssoftware von
SMD-Bestücklinien
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18173-3.

Band 41: Martin Koch
Wissensbasierte Unterstützung der
Angebotsbearbeitung in der
Investitionsgüterindustrie
FAPS, 169 Seiten, 68 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18174-1.

Band 42: Armin Gropp
Anlagen- und Prozeßdiagnostik beim
Schneiden mit einem gepulsten
Nd:YAG-Laser
LFT, 160 Seiten, 88 Bilder, 7 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18241-1.

Band 43: Werner Heckel
Optische 3D-Konturerfassung und
on-line Biegewinkelmessung mit
dem Lichtschnittverfahren
LFT, 149 Seiten, 43 Bilder, 11 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18243-8.

Band 44: Armin Rothhaupt
Modulares Planungssystem zur
Optimierung der Elektronikfertigung
FAPS, 180 Seiten, 101 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18307-8.

Band 45: Bernd Zöllner
Adaptive Diagnose in der
Elektronikproduktion
FAPS, 195 Seiten, 74 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18308-6.

Band 46: Bodo Vormann
Beitrag zur automatisierten
Handhabungsplanung komplexer
Blechbiegeteile
LFT, 126 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18345-0.

Band 47: Peter Schnepf
Zielkostenorientierte Montageplanung
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18397-3.

Band 48: Rainer Klotzbücher
Konzept zur rechnerintegrierten
Materialversorgung in flexiblen
Fertigungssystemen
FAPS, 156 Seiten, 62 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18412-0.

Band 49: Wolfgang Greska
Wissensbasierte Analyse und
Klassifizierung von Blechteilen
LFT, 144 Seiten, 96 Bilder. 1995.
ISBN 3-446-18462-7.

Band 50: Jörg Franke
Integrierte Entwicklung neuer
Produkt- und Produktionstechnologien
für räumliche spritzgegossene
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 196 Seiten, 86 Bilder, 4 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18448-1.

Band 51: Franz-Josef Zeller
Sensorplanung und schnelle
Sensorregelung für Industrieroboter
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995.
ISBN 3-446-18601-8.

Band 52: Michael Solvie
Zeitbehandlung und
Multimedia-Unterstützung in
Feldkommunikationssystemen
FAPS, 200 Seiten, 87 Bilder, 35 Tab. 1996.
ISBN 3-446-18607-7.

Band 53: Robert Hopperdietzel
Reengineering in der Elektro- und
Elektronikindustrie
FAPS, 180 Seiten, 109 Bilder, 1 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-070-2.

Band 54: Thomas Rebhahn
Beitrag zur Mikromaterialbearbeitung
mit Excimerlasern - Systemkomponenten
und Verfahrensoptimierungen
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 10 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-075-3.

Band 55: Henning Hanebuth
Laserstrahlhartlöten mit
Zweistrahlschweißtechnik
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-074-5.

Band 56: Uwe Schönherr
Steuerung und Sensordatenintegration
für flexible Fertigungszellen mit
kooperierenden Robotern
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-076-1.

Band 57: Stefan Holzer
Berührungslose Formgebung mit
Laserstrahlung
LFT, 162 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 1996.
ISBN 3-87525-079-6.

Band 58: Markus Schultz
Fertigungsqualität beim
3D-Laserstrahlschweißen von
Blechformteilen
LFT, 165 Seiten, 88 Bilder, 9 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-080-X.

Band 59: Thomas Krebs
Integration elektromechanischer
CA-Anwendungen über einem
STEP-Produktmodell
FAPS, 198 Seiten, 58 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-081-8.

Band 60: Jürgen Sturm
Prozeßintegrierte Qualitätssicherung
in der Elektronikproduktion
FAPS, 167 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-082-6.

Band 61: Andreas Brand
Prozesse und Systeme zur Bestückung
räumlicher elektronischer Baugruppen
(3D-MID)
FAPS, 182 Seiten, 100 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-087-7.

Band 62: Michael Kauf
Regelung der Laserstrahlleistung und
der Fokusparameter einer
CO₂-Hochleistungslaseranlage
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-083-4.

Band 63: Peter Steinwasser
Modulares Informationsmanagement
in der integrierten Produkt- und
Prozeßplanung
FAPS, 190 Seiten, 87 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-084-2.

Band 64: Georg Liedl
Integriertes Automatisierungskonzept
für den flexiblen Materialfluß in der
Elektronikproduktion
FAPS, 196 Seiten, 96 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-086-9.

Band 65: Andreas Otto
Transiente Prozesse beim
Laserstrahlschweißen
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-089-3.

Band 66: Wolfgang Blöchl
Erweiterte Informationsbereitstellung
an offenen CNC-Steuerungen zur
Prozeß- und Programmoptimierung
FAPS, 168 Seiten, 96 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-091-5.

Band 67: Klaus-Uwe Wolf
Verbesserte Prozeßführung und
Prozeßplanung zur Leistungs- und
Qualitätssteigerung beim
Spulenwickeln
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.
ISBN 3-87525-092-3.

Band 68: Frank Backes
Technologieorientierte Bahnplanung
für die 3D-Laserstrahlbearbeitung
LFT, 138 Seiten, 71 Bilder, 2 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-093-1.

Band 69: Jürgen Kraus
Laserstrahlumformen von Profilen
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-094-X.

Band 70: Norbert Neubauer
Adaptive Strahlführungen für
CO₂-Laseranlagen
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-095-8.

Band 71: Michael Steber
Prozeßoptimierter Betrieb flexibler
Schraubstationen in der
automatisierten Montage
FAPS, 168 Seiten, 78 Bilder, 3 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-096-6.

Band 72: Markus Pfestorf
Funktionale 3D-Oberflächenkenngrößen
in der Umformtechnik
LFT, 162 Seiten, 84 Bilder, 15 Tab. 1997.
ISBN 3-87525-097-4.

Band 73: Volker Franke
Integrierte Planung und Konstruktion
von Werkzeugen für die Biegebearbeitung
LFT, 143 Seiten, 81 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-098-2.

Band 74: Herbert Scheller
Automatisierte Demontagesysteme
und recyclinggerechte Produktgestaltung
elektronischer Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 104 Bilder, 17 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-099-0.

Band 75: Arthur Meßner
Kaltmassivumformung metallischer
Kleinstteile - Werkstoffverhalten,
Wirkflächenreibung, Prozeßauslegung
LFT, 164 Seiten, 92 Bilder, 14 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-100-8.

Band 76: Mathias Glasmacher
Prozeß- und Systemtechnik zum
Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 184 Seiten, 104 Bilder, 12 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-101-6.

Band 77: Michael Schwind
Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer
Eigenschaften von Feinblechen mit
dem Wirbelstromverfahren
LFT, 124 Seiten, 68 Bilder, 8 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-102-4.

Band 78: Manfred Gerhard
Qualitätssteigerung in der
Elektronikproduktion durch
Optimierung der Prozeßführung
beim Löten komplexer Baugruppen
FAPS, 179 Seiten, 113 Bilder, 7 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-103-2.

Band 79: Elke Rauh
Methodische Einbindung der Simulation
in die betrieblichen Planungs- und
Entscheidungsabläufe
FAPS, 192 Seiten, 114 Bilder, 4 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-104-0.

Band 80: Sorin Niederkorn
Meßeinrichtung zur Untersuchung
der Wirkflächenreibung bei umformtech-
nischen Prozessen
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-105-9.

Band 81: Stefan Schubert
Regelung der Fokusslage beim Schweißen
mit CO₂-Hochleistungslasern unter
Einsatz von adaptiven Optiken
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-106-7.

Band 82: Armando Walter Colombo
Development and Implementation of
Hierarchical Control Structures of
Flexible Production Systems Using High
Level Petri Nets
FAPS, 216 Seiten, 86 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-109-1.

Band 83: Otto Meedt
Effizienzsteigerung bei Demontage
und Recycling durch flexible
Demontagetechnologien und optimierte
Produktgestaltung
FAPS, 186 Seiten, 103 Bilder. 1998.
ISBN 3-87525-108-3.

Band 84: Knuth Götz
Modelle und effiziente Modellbildung
zur Qualitätssicherung in der
Elektronikproduktion
FAPS, 212 Seiten, 129 Bilder, 24 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-112-1.

Band 85: Ralf Luchs
Einsatzmöglichkeiten leitender Klebstoffe zur zuverlässigen Kontaktierung elektronischer Bauelemente in der SMT
FAPS, 176 Seiten, 126 Bilder, 30 Tab. 1998.
ISBN 3-87525-113-7.

Band 86: Frank Pöhlau
Entscheidungsgrundlagen zur Einführung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 144 Seiten, 99 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-114-8.

Band 87: Roland T. A. Kals
Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-115-6.

Band 88: Gerhard Luhn
Implizites Wissen und technisches Handeln am Beispiel der Elektronikproduktion
FAPS, 252 Seiten, 61 Bilder, 1 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-116-4.

Band 89: Axel Sprenger
Adaptives Streckbiegen von Aluminium-Strangpreßprofilen
LFT, 114 Seiten, 63 Bilder, 4 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-117-2.

Band 90: Hans-Jörg Pucher
Untersuchungen zur Prozeßfolge Umformen, Bestücken und Laserstrahllöten von Mikrokontakten
LFT, 158 Seiten, 69 Bilder, 9 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-119-9.

Band 91: Horst Arnet
Profilbiegen mit kinematischer Gestalterzeugung
LFT, 128 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-120-2.

Band 92: Doris Schubart
Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO₂-Laserstrahlung
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-122-9.

Band 93: Adrianus L. P. Coremans
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-124-5.

Band 94: Hans-Martin Biehler
Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999.
ISBN 3-87525-126-1.

Band 95: Wolfgang Becker
Oberflächen Ausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-127-X.

Band 96: Philipp Hein
Innenhochdruck-Umformen von Blechpaaren: Modellierung, Prozeßauslegung und Prozeßführung
LFT, 129 Seiten, 57 Bilder, 7 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-128-8.

Band 97: Gunter Beitinger
Herstellungs- und Prüfverfahren für
thermoplastische Schaltungsträger
FAPS, 169 Seiten, 92 Bilder, 20 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-129-6.

Band 98: Jürgen Knoblach
Beitrag zur rechnerunterstützten
verursachungsgerechten
Angebotskalkulation von Blechteilen
mit Hilfe wissensbasierter Methoden
LFT, 155 Seiten, 53 Bilder, 26 Tab. 1999.
ISBN 3-87525-130-X.

Band 99: Frank Breitenbach
Bildverarbeitungssystem zur Erfassung
der Anschlußgeometrie elektronischer
SMT-Bauelemente
LFT, 147 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-131-8.

Band 100: Bernd Falk
Simulationsbasierte
Lebensdauervorhersage für Werkzeuge
der Kaltmassivumformung
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-136-9.

Band 101: Wolfgang Schlögl
Integriertes Simulationsdaten-Management für Maschinenentwicklung und
Anlagenplanung
FAPS, 169 Seiten, 101 Bilder, 20 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-137-7.

Band 102: Christian Hinsel
Ermüdungsbruchversagen
hartstoffbeschichteter Werkzeugstähle
in der Kaltmassivumformung
LFT, 130 Seiten, 80 Bilder, 14 Tab. 2000.
ISBN 3-87525-138-5.

Band 103: Stefan Bobbert
Simulationsgestützte Prozessauslegung
für das Innenhochdruck-Umformen
von Blechpaaren
LFT, 123 Seiten, 77 Bilder. 2000.
ISBN 3-87525-145-8.

Band 104: Harald Rottbauer
Modulares Planungswerkzeug zum
Produktionsmanagement in der
Elektronikproduktion
FAPS, 166 Seiten, 106 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-139-3.

Band 105: Thomas Hennige
Flexible Formgebung von Blechen
durch Laserstrahlumformen
LFT, 119 Seiten, 50 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-140-7.

Band 106: Thomas Menzel
Wissensbasierte Methoden für die
rechnergestützte Charakterisierung
und Bewertung innovativer
Fertigungsprozesse
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder. 2001.
ISBN 3-87525-142-3.

Band 107: Thomas Stöckel
Kommunikationstechnische Integration
der Prozeßebene in Produktionssysteme
durch Middleware-Frameworks
FAPS, 147 Seiten, 65 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-143-1.

Band 108: Frank Pitter
Verfügbarkeitssteigerung von
Werkzeugmaschinen durch Einsatz
mechatronischer Sensorlösungen
FAPS, 158 Seiten, 131 Bilder, 8 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-144-X.

Band 109: Markus Korneli
Integration lokaler CAP-Systeme in
einen globalen Fertigungsdatenverbund
FAPS, 121 Seiten, 53 Bilder, 11 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-146-6.

Band 110: Burkhard Müller
Laserstrahljustieren mit Excimer-Lasern -
Prozeßparameter und Modelle zur
Aktorkonstruktion
LFT, 128 Seiten, 36 Bilder, 9 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-159-8.

Band 111: Jürgen Göhringer
Integrierte Telediagnose via Internet
zum effizienten Service von
Produktionssystemen
FAPS, 178 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-147-4.

Band 112: Robert Feuerstein
Qualitäts- und kosteneffiziente Integra-
tion neuer Bauelementetechnologien in
die Flachbaugruppenfertigung
FAPS, 161 Seiten, 99 Bilder, 10 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-151-2.

Band 113: Marcus Reichenberger
Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten
alternativer Elektroniklote in der
Oberflächenmontage (SMT)
FAPS, 165 Seiten, 97 Bilder, 18 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-152-0.

Band 114: Alexander Huber
Justieren vormontierter Systeme mit dem
Nd:YAG-Laser unter Einsatz von Aktoren
LFT, 122 Seiten, 58 Bilder, 5 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-153-9.

Band 115: Sami Krimi
Analyse und Optimierung von Montage-
systemen in der Elektronikproduktion
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 3 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-157-1.

Band 116: Marion Merklein
Laserstrahlumformen von
Aluminiumwerkstoffen - Beeinflussung
der Mikrostruktur und
der mechanischen Eigenschaften
LFT, 122 Seiten, 65 Bilder, 15 Tab. 2001.
ISBN 3-87525-156-3.

Band 117: Thomas Collisi
Ein informationslogistisches
Architekturkonzept zur Akquisition
simulationsrelevanter Daten
FAPS, 181 Seiten, 105 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-164-4.

Band 118: Markus Koch
Rationalisierung und ergonomische
Optimierung im Innenausbau durch
den Einsatz moderner
Automatisierungstechnik
FAPS, 176 Seiten, 98 Bilder, 9 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-165-2.

Band 119: Michael Schmidt
Prozeßregelung für das Laserstrahl-
Punktschweißen in der Elektronikpro-
duktion
LFT, 152 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-166-0.

Band 120: Nicolas Tiesler
Grundlegende Untersuchungen zum
Fließpressen metallischer Kleinstteile
LFT, 126 Seiten, 78 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-175-X.

Band 121: Lars Pursche
Methoden zur technologieorientierten
Programmierung für
die 3D-Lasermikrobearbeitung
LFT, 111 Seiten, 39 Bilder, 0 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-183-0.

Band 122: Jan-Oliver Brassel
Prozeßkontrolle beim
Laserstrahl-Mikroschweißen
LFT, 148 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-181-4.

Band 123: Mark Geisel
Prozeßkontrolle und -steuerung beim
Laserstrahlschweißen mit den Methoden
der nichtlinearen Dynamik
LFT, 135 Seiten, 46 Bilder, 2 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-180-6.

Band 124: Gerd Eßer
Laserstrahlunterstützte Erzeugung
metallischer Leiterstrukturen auf
Thermoplastsubstraten für die
MID-Technik
LFT, 148 Seiten, 60 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-171-7.

Band 125: Marc Fleckenstein
Qualität laserstrahl-gefügter
Mikroverbindungen elektronischer
Kontakte
LFT, 159 Seiten, 77 Bilder, 7 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-170-9.

Band 126: Stefan Kaufmann
Grundlegende Untersuchungen zum
Nd:YAG- Laserstrahlfügen von Silizium
für Komponenten der Optoelektronik
LFT, 159 Seiten, 100 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-172-5.

Band 127: Thomas Fröhlich
Simultanes Löten von Anschlußkontak-
ten elektronischer Bauelemente mit
Diodenlaserstrahlung
LFT, 143 Seiten, 75 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-186-5.

Band 128: Achim Hofmann
Erweiterung der Formgebungsgrenzen
beim Umformen von
Aluminiumwerkstoffen durch den Ein-
satz prozessangepasster Platinen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-182-2.

Band 129: Ingo Kriebitzsch
3 - D MID Technologie in der
Automobilelektronik
FAPS, 129 Seiten, 102 Bilder, 10 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-169-5.

Band 130: Thomas Pohl
Fertigungsqualität und Umformbarkeit
laserstrahlgeschweißter Formplatinen
aus Aluminiumlegierungen
LFT, 133 Seiten, 93 Bilder, 12 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-173-3.

Band 131: Matthias Wenk
Entwicklung eines konfigurierbaren
Steuerungssystems für die flexible
Sensorführung von Industrierobotern
FAPS, 167 Seiten, 85 Bilder, 1 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-174-1.

Band 132: Matthias Negendanck
Neue Sensorik und Aktorik für
Bearbeitungsköpfe zum
Laserstrahlschweißen
LFT, 116 Seiten, 60 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-184-9.

Band 133: Oliver Kreis
Integrierte Fertigung - Verfahrensin-
tegration durch Innenhochdruck-Umfor-
men, Trennen und Laserstrahlschweißen
in einem Werkzeug sowie ihre tele- und
multimediale Präsentation
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-176-8.

Band 134: Stefan Trautner
Technische Umsetzung produktbezoge-
ner Instrumente der Umweltpolitik bei
Elektro- und Elektronikgeräten
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-177-6.

Band 135: Roland Meier
Strategien für einen produktorientierten
Einsatz räumlicher spritzgegossener
Schaltungsträger (3-D MID)
FAPS, 155 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-178-4.

Band 136: Jürgen Wunderlich
Kostensimulation - Simulationsbasierte
Wirtschaftlichkeitsregelung komplexer
Produktionssysteme
FAPS, 202 Seiten, 119 Bilder, 17 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-179-2.

Band 137: Stefan Novotny
Innenhochdruck-Umformen von Blechen
aus Aluminium- und Magnesiumlegie-
rungen bei erhöhter Temperatur
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab. 2002.
ISBN 3-87525-185-7.

Band 138: Andreas Licha
Flexible Montageautomatisierung zur
Komplettmontage flächenhafter Produkt-
strukturen durch kooperierende
Industrieroboter
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-189-X.

Band 139: Michael Eisenbarth
Beitrag zur Optimierung der Aufbau- und
Verbindungstechnik für mechatronische
Baugruppen
FAPS, 207 Seiten, 141 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-190-3.

Band 140: Frank Christoph
Durchgängige simulationsgestützte
Planung von Fertigungseinrichtungen der
Elektronikproduktion
FAPS, 187 Seiten, 107 Bilder, 9 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-191-1.

Band 141: Hinnerk Hagenah
Simulationsbasierte Bestimmung der
zu erwartenden Maßhaltigkeit für das
Blechbiegen
LFT, 131 Seiten, 36 Bilder, 26 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-192-X.

Band 142: Ralf Eckstein
Scherschneiden und Biegen metallischer
Kleinstteile - Materialeinfluss und
Materialverhalten
LFT, 148 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-193-8.

Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff
Excimerlaserstrahlbiegen dünner
metallischer Folien mit homogener
Lichtlinie
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2003.
ISBN 3-87525-196-2.

Band 144: Andreas Kach
Rechnergestützte Anpassung von
Laserstrahlschneidbahnen
an Bauteilabweichungen
LFT, 139 Seiten, 69 Bilder, 11 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-197-0.

Band 145: Stefan Hierl
System- und Prozesstechnik für das
simultane Löten mit Diodenlaserstrahlung
von elektronischen Bauelementen
LFT, 124 Seiten, 66 Bilder, 4 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-198-9.

Band 146: Thomas Neudecker
Tribologische Eigenschaften keramischer
Blechumformwerkzeuge- Einfluss einer
Oberflächenendbearbeitung mittels
Excimerlaserstrahlung
LFT, 166 Seiten, 75 Bilder, 26 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-200-4.

Band 147: Ulrich Wenger
Prozessoptimierung in der Wickeltechnik
durch innovative maschinenbauliche und
regelungstechnische Ansätze
FAPS, 132 Seiten, 88 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-203-9.

Band 148: Stefan Slama
Effizienzsteigerung in der Montage durch
marktorientierte Montagestrukturen und
erweiterte Mitarbeiterkompetenz
FAPS, 188 Seiten, 125 Bilder, 0 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-204-7.

Band 149: Thomas Wurm
Laserstrahljustieren mittels Aktoren-Entwicklung
von Konzepten und Methoden für die rechnerunterstützte Modellierung
und Optimierung von komplexen
Aktorsystemen in der Mikrotechnik
LFT, 122 Seiten, 51 Bilder, 9 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-206-3.

Band 150: Martino Celeghini
Wirkmedienbasierte Blechumformung:
Grundlagenuntersuchungen zum Einfluss
von Werkstoff und Bauteilgeometrie
LFT, 146 Seiten, 77 Bilder, 6 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-207-1.

Band 151: Ralph Hohenstein
Entwurf hochdynamischer Sensor- und
Regelsysteme für die adaptive
Laserbearbeitung
LFT, 282 Seiten, 63 Bilder, 16 Tab. 2004.
ISBN 3-87525-210-1.

Band 152: Angelika Hutterer
Entwicklung prozessüberwachender
Regelkreise für flexible
Formgebungsprozesse
LFT, 149 Seiten, 57 Bilder, 2 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-212-8.

Band 153: Emil Egerer
Massivumformen metallischer Kleinstteile
bei erhöhter Prozesstemperatur
LFT, 158 Seiten, 87 Bilder, 10 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-213-6.

Band 154: Rüdiger Holzmann
Strategien zur nachhaltigen Optimierung
von Qualität und Zuverlässigkeit in
der Fertigung hochintegrierter
Flachbaugruppen
FAPS, 186 Seiten, 99 Bilder, 19 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-217-9.

Band 155: Marco Nock
Biegeumformen mit
Elastomerwerkzeugen Modellierung,
Prozessauslegung und Abgrenzung des
Verfahrens am Beispiel des Rohrbiegens
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 13 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-218-7.

Band 156: Frank Niebling
Qualifizierung einer Prozesskette zum
Laserstrahlsintern metallischer Bauteile
LFT, 148 Seiten, 89 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-219-5.

Band 157: Markus Meiler
Großserientauglichkeit trockenschmier-
stoffbeschichteter Aluminiumbleche im
Presswerk Grundlegende Untersuchun-
gen zur Tribologie, zum Umformverhal-
ten und Bauteilversuche
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-221-7.

Band 158: Agus Sutanto
Solution Approaches for Planning of
Assembly Systems in Three-Dimensional
Virtual Environments
FAPS, 169 Seiten, 98 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-220-9.

Band 159: Matthias Boiger
Hochleistungssysteme für die Fertigung
elektronischer Baugruppen auf der Basis
flexibler Schaltungsträger
FAPS, 175 Seiten, 111 Bilder, 8 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-222-5.

Band 160: Matthias Pitz
Laserunterstütztes Biegen höchstfester
Mehrphasenstähle
LFT, 120 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-223-3.

Band 161: Meik Vahl
Beitrag zur gezielten Beeinflussung des
Werkstoffflusses beim Innenhochdruck-
Umformen von Blechen
LFT, 165 Seiten, 94 Bilder, 15 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-224-1.

Band 162: Peter K. Kraus
Plattformstrategien - Realisierung
einer varianz- und kostenoptimierten
Wertschöpfung
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 0 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-226-8.

Band 163: Adrienn Cser
Laserstrahlschmelzabtrag - Prozessana-
lyse und -modellierung
LFT, 146 Seiten, 79 Bilder, 3 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-227-6.

Band 164: Markus C. Hahn
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung von Leichtbauverbundstruk-
turen mit Aluminiumschaumkern
LFT, 143 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-228-4.

Band 165: Gordana Michos
Mechatronische Ansätze zur Optimie-
rung von Vorschubachsen
FAPS, 146 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-230-6.

Band 166: Markus Stark
Auslegung und Fertigung hochpräziser
Faser-Kollimator-Arrays
LFT, 158 Seiten, 115 Bilder, 11 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-231-4.

Band 167: Yurong Zhou
Kollaboratives Engineering Management
in der integrierten virtuellen Entwicklung
der Anlagen für die Elektronikproduktion
FAPS, 156 Seiten, 84 Bilder, 6 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-232-2.

Band 168: Werner Enser
Neue Formen permanenter und lösbarer elektrischer Kontaktierungen für mechatronische Baugruppen
FAPS, 190 Seiten, 112 Bilder, 5 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-233-0.

Band 169: Katrin Melzer
Integrierte Produktpolitik bei elektrischen und elektronischen Geräten zur Optimierung des Product-Life-Cycle
FAPS, 155 Seiten, 91 Bilder, 17 Tab. 2005.
ISBN 3-87525-234-9.

Band 170: Alexander Putz
Grundlegende Untersuchungen zur Erfassung der realen Vorspannung von armierten Kaltfließpresswerkzeugen mittels Ultraschall
LFT, 137 Seiten, 71 Bilder, 15 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-237-3.

Band 171: Martin Prechtel
Automatisiertes Schichtverfahren für metallische Folien - System- und Prozesstechnik
LFT, 154 Seiten, 45 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-238-1.

Band 172: Markus Meidert
Beitrag zur deterministischen Lebensdauerabschätzung von Werkzeugen der Kaltmassivumformung
LFT, 131 Seiten, 78 Bilder, 9 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-239-X.

Band 173: Bernd Müller
Robuste, automatisierte Montagesysteme durch adaptive Prozessführung und montageübergreifende Fehlerprävention am Beispiel flächiger Leichtbauteile
FAPS, 147 Seiten, 77 Bilder, 0 Tab. 2006.
ISBN 3-87525-240-3.

Band 174: Alexander Hofmann
Hybrides Laserdurchstrahlsschweißen von Kunststoffen
LFT, 136 Seiten, 72 Bilder, 4 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-243-9.

Band 175: Peter Wölflick
Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für bleifreie Mechatronik-Anwendungen
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-246-0.

Band 176: Attila Komlodi
Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods
LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-248-4.

Band 177: Uwe Popp
Grundlegende Untersuchungen zum Laserstrahlstrukturieren von Kaltmassivumformwerkzeugen
LFT, 140 Seiten, 67 Bilder, 16 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-249-1.

Band 178: Veit Rückel
Rechnergestützte Ablaufplanung und Bahngenerierung Für kooperierende Industrieroboter
FAPS, 148 Seiten, 75 Bilder, 7 Tab. 2006.
ISBN 978-3-87525-250-7.

Band 179: Manfred Dirscherl
Nicht-thermische Mikrojustiertechnik mittels ultrakurzer Laserpulse
LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-251-4.

Band 180: Yong Zhuo
Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-253-8.

Band 181: Stefan Lang
Durchgängige Mitarbeiterinformation zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Produktion
FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-257-6.

Band 182: Hans-Joachim Krauß
Laserstrahlinduzierte Pyrolyse präkeramischer Polymere
LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-258-3.

Band 183: Stefan Junker
Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Bestückung permanent erregter Läufer mit oberflächenmontierten Dauermagneten
FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-259-0.

Band 184: Rainer Kohlbauer
Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechumformprozesse
LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-260-6.

Band 185: Klaus Lamprecht
Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßgeschneiderter Halbzeuge
LFT, 137 Seiten, 81 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-265-1.

Band 186: Bernd Zolleiß
Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatronischer Baugruppen
FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007.
ISBN 978-3-87525-266-8.

Band 187: Michael Kerausch
Simulationsgestützte Prozessauslegung für das Umformen lokal wärmebehandelter Aluminiumplatten
LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-267-5.

Band 188: Matthias Weber
Unterstützung der Wandlungsfähigkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-269-9.

Band 189: Thomas Frick
Untersuchung der prozessbestimmenden Strahl-Stoff-Wechselwirkungen beim Laserstrahlschweißen von Kunststoffen
LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-268-2.

Band 190: Joachim Hecht
Werkstoffcharakterisierung und
Prozessauslegung für die wirkmedienba-
sierte Doppelblech-Umformung von
Magnesiumlegierungen
LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007.
ISBN 978-3-87525-270-5.

Band 191: Ralf Völkl
Stochastische Simulation zur Werkzeug-
lebensdaueroptimierung und Präzisions-
fertigung in der Kaltmassivumformung
LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-272-9.

Band 192: Massimo Tolazzi
Innenhochdruck-Umformen verstärkter
Blech-Rahmenstrukturen
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-273-6.

Band 193: Cornelia Hoff
Untersuchung der Prozesseinflussgrößen
beim Presshärten des höchstfesten
Vergütungsstahls 22MnB5
LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-275-0.

Band 194: Christian Alvarez
Simulationsgestützte Methoden zur
effizienten Gestaltung von Lötprozessen
in der Elektronikproduktion
FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-277-4.

Band 195: Andreas Kunze
Automatisierte Montage von makrome-
chatronischen Modulen zur flexiblen
Integration in hybride
Pkw-Bordnetzsyste
FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-278-1.

Band 196: Wolfgang Hußnätter
Grundlegende Untersuchungen zur
experimentellen Ermittlung und zur
Modellierung von Fließortkurven bei
erhöhten Temperaturen
LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-279-8.

Band 197: Thomas Bigl
Entwicklung, angepasste Herstellun-
gsverfahren und erweiterte Qualitätssiche-
rung von einsetzgerechten elektroni-
schen Baugruppen
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-280-4.

Band 198: Stephan Roth
Grundlegende Untersuchungen zum
Excimerlaserstrahl-Abtragen unter
Flüssigkeitsfilmen
LFT, 113 Seiten, 47 Bilder, 14 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-281-1.

Band 199: Artur Giera
Prozesstechnische Untersuchungen
zum Rührreibschweißen metallischer
Werkstoffe
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab. 2008.
ISBN 978-3-87525-282-8.

Band 200: Jürgen Lechler
Beschreibung und Modellierung
des Werkstoffverhaltens von
presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 154 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-286-6.

Band 201: Andreas Blankl
Untersuchungen zur Erhöhung der
Prozessrobustheit bei der Innenhoch-
druck-Umformung von flächigen Halb-
zeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten
Laserstrahlfügeoperationen
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-287-3.

Band 202: Andreas Schaller
Modellierung eines nachfrageorientierten
Produktionskonzeptes für mobile
Telekommunikationsgeräte
FAPS, 120 Seiten, 79 Bilder, 0 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-289-7.

Band 203: Claudius Schimpf
Optimierung von Zuverlässigkeitsunter-
suchungen, Prüfabläufen und Nachar-
beitsprozessen in der Elektronikproduk-
tion
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-290-3.

Band 204: Simon Dietrich
Sensoriken zur Schwerpunktslagebestim-
mung der optischen Prozessemissionen
beim Laserstrahl-tiefschweißen
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-292-7.

Band 205: Wolfgang Wolf
Entwicklung eines agentenbasierten
Steuerungssystems zur
Materialflussorganisation im
wandelbaren Produktionsumfeld
FAPS, 167 Seiten, 98 Bilder. 2009.
ISBN 978-3-87525-293-4.

Band 206: Steffen Polster
Laserdurchstrahlungsschweißen
transparenter Polymerbauteile
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-294-1.

Band 207: Stephan Manuel Dörfler
Rührreibschweißen von walzplattiertem
Halbzeug und Aluminiumblech zur
Herstellung flächiger Aluminiumschaum-
Sandwich-Verbundstrukturen
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-295-8.

Band 208: Uwe Vogt
Seriennahe Auslegung von Aluminium
Tailored Heat Treated Blanks
LFT, 151 Seiten, 68 Bilder, 26 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-296-5.

Band 209: Till Laumann
Qualitative und quantitative Bewertung
der Crashtauglichkeit von höchstfesten
Stählen
LFT, 117 Seiten, 69 Bilder, 7 Tab. 2009.
ISBN 978-3-87525-299-6.

Band 210: Alexander Diehl
Größeneffekte bei Biegeprozessen-
Entwicklung einer Methodik zur
Identifikation und Quantifizierung
LFT, 180 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-302-3.

Band 211: Detlev Staud
Effiziente Prozesskettenauslegung für das
Umformen lokal wärmebehandelter und
geschweißter Aluminiumbleche
LFT, 164 Seiten, 72 Bilder, 12 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-303-0.

Band 212: Jens Ackermann
Prozesssicherung beim Laserdurchstrahl-
schweißen thermoplastischer Kunststoffe
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-305-4.

Band 213: Stephan Weidel
Grundlegende Untersuchungen zum
Kontaktzustand zwischen Werkstück
und Werkzeug bei umformtechnischen
Prozessen unter tribologischen
Gesichtspunkten
LFT, 144 Seiten, 67 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-307-8.

Band 214: Stefan Geißdörfer
Entwicklung eines mesoskopischen
Modells zur Abbildung von Größeneffek-
ten in der Kaltmassivumformung mit
Methoden der FE-Simulation
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-308-5.

Band 215: Christian Matzner
Konzeption produktspezifischer Lösun-
gen zur Robustheitssteigerung elektroni-
scher Systeme gegen die Einwirkung von
Betaung im Automobil
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-309-2.

Band 216: Florian Schüssler
Verbindungs- und Systemtechnik für
thermisch hochbeanspruchte und
miniaturisierte elektronische Baugruppen
FAPS, 184 Seiten, 93 Bilder, 18 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-310-8.

Band 217: Massimo Cojutti
Strategien zur Erweiterung der Prozess-
grenzen bei der Innhochdruck-Umform-
ung von Rohren und Blechpaaren
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-312-2.

Band 218: Raoul Plettke
Mehrkriterielle Optimierung komplexer
Aktorsysteme für das Laserstrahljustieren
LFT, 152 Seiten, 25 Bilder, 3 Tab. 2010.
ISBN 978-3-87525-315-3.

Band 219: Andreas Dobroschke
Flexible Automatisierungslösungen für
die Fertigung wickeltechnischer Produkte
FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-317-7.

Band 220: Azhar Zam
Optical Tissue Differentiation for
Sensor-Controlled Tissue-Specific
Laser Surgery
LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-318-4.

Band 221: Michael Rösch
Potenziale und Strategien zur Optimie-
rung des Schablonendruckprozesses in
der Elektronikproduktion
FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-319-1.

Band 222: Thomas Rechtenwald
Quasi-isothermes Laserstrahlintern von
Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine
Betrachtung werkstoff-prozessspezifi-
scher Aspekte am Beispiel PEEK
LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-320-7.

Band 223: Daniel Craiovan
Prozesse und Systemlösungen für die
SMT-Montage optischer Bauelemente auf
Substrate mit integrierten Lichtwellenlei-
tern
FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-324-5.

Band 224: Kay Wagner
Beanspruchungsangepasste
Kaltmassivumformwerkzeuge durch
lokal optimierte Werkzeugoberflächen
LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-325-2.

Band 225: Martin Brandhuber
Verbesserung der Prognosegüte des Ver-
sagens von Punktschweißverbindungen
bei höchstfesten Stahlgüten
LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011.
ISBN 978-3-87525-327-6.

Band 226: Peter Sebastian Feuser
Ein Ansatz zur Herstellung von
pressgehärteten Karosseriekomponenten
mit maßgeschneiderten mechanischen
Eigenschaften: Temperierte Umform-
werkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimu-
lation und funktionale Untersuchung
LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-328-3.

Band 227: Murat Arbak
Material Adapted Design of Cold Forging
Tools Exemplified by Powder
Metallurgical Tool Steels and Ceramics
LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-330-6.

Band 228: Indra Pitz
Beschleunigte Simulation des
Laserstrahlumformens von
Aluminiumblechen
LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-333-7.

Band 229: Alexander Grimm
Prozessanalyse und -überwachung des
Laserstrahlhartlötens mittels optischer
Sensorik
LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-334-4.

Band 230: Markus Kaupper
Biegen von höhenfesten Stahlblechwerk-
stoffen - Umformverhalten und Grenzen
der Biegebarkeit
LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-339-9.

Band 231: Thomas Kroiß
Modellbasierte Prozessauslegung für
die Kaltmassivumformung unter
Brücksichtigung der Werkzeug- und
Pressenauffederung
LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-341-2.

Band 232: Christian Goth
Analyse und Optimierung der Entwick-
lung und Zuverlässigkeit räumlicher
Schaltungsträger (3D-MID)
FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-340-5.

Band 233: Christian Ziegler
Ganzheitliche Automatisierung
mechatronischer Systeme in der Medizin
am Beispiel Strahlentherapie
FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-342-9.

Band 234: Florian Albert
Automatisiertes Laserstrahllöten
und -reparaturlöten elektronischer
Baugruppen
LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012.
ISBN 978-3-87525-344-3.

Band 235: Thomas Stöhr
Analyse und Beschreibung des
mechanischen Werkstoffverhaltens
von presshärtbaren Bor-Manganstählen
LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-346-7.

Band 236: Christian Kägeler
Prozessdynamik beim
Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche im Überlappstoß
LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-347-4.

Band 237: Andreas Sulzberger
Seriennahe Auslegung der Prozesskette
zur wärmeunterstützten Umformung
von Aluminiumblechwerkstoffen
LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-349-8.

Band 238: Simon Opel
Herstellung prozessangepasster
Halbzeuge mit variabler Blechdicke
durch die Anwendung von Verfahren
der Blechmassivumformung
LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-350-4.

Band 239: Rajesh Kanawade
In-vivo Monitoring of Epithelium
Vessel and Capillary Density for the
Application of Detection of Clinical
Shock and Early Signs of Cancer Develop-
ment
LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-351-1.

Band 240: Stephan Busse
Entwicklung und Qualifizierung eines
Schneidclinchverfahrens
LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-352-8.

Band 241: Karl-Heinz Leitz
Mikro- und Nanostrukturierung mit kurz
und ultrakurz gepulster Laserstrahlung
LPT, 154 Seiten, 71 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-355-9.

Band 242: Markus Michl
Webbasierte Ansätze zur ganzheitlichen
technischen Diagnose
FAPS, 182 Seiten, 62 Bilder, 20 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-356-6.

Band 243: Vera Sturm
Einfluss von Chargenschwankungen
auf die Verarbeitungsgrenzen von
Stahlwerkstoffen
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 9 Tab. 2013.
ISBN 978-3-87525-357-3.

Band 244: Christian Neudel
Mikrostrukturelle und mechanisch-technologische Eigenschaften
widerstandspunktgeschweißter
Aluminium-Stahl-Verbindungen für
den Fahrzeugbau
LFT, 178 Seiten, 171 Bilder, 31 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-358-0.

Band 245: Anja Neumann
Konzept zur Beherrschung der
Prozessschwankungen im Presswerk
LFT, 162 Seiten, 68 Bilder, 15 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-360-3.

Band 246: Ulf-Hermann Quentin
Laserbasierte Nanostrukturierung mit
optisch positionierten Mikrolinsen
LPT, 137 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-361-0.

Band 247: Erik Lamprecht
Der Einfluss der Fertigungsverfahren
auf die Wirbelstromverluste von
Stator-Einzelzahnblechpaketen für den
Einsatz in Hybrid- und Elektrofahrzeugen
FAPS, 148 Seiten, 138 Bilder, 4 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-362-7.

Band 248: Sebastian Rösel
Wirkmedienbasierte Umformung von
Blechhalbzeugen unter Anwendung
magnetorheologischer Flüssigkeiten als
kombiniertes Wirk- und Dichtmedium
LFT, 148 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-363-4.

Band 249: Paul Hippchen
Simulative Prognose der Geometrie
indirekt pressgehärteter Karosseriebauteile für die industrielle Anwendung
LFT, 163 Seiten, 89 Bilder, 12 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-364-1.

Band 250: Martin Zubeil
Versagensprognose bei der Prozesssimulation von Biegeumform- und Falzverfahren
LFT, 171 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-365-8.

Band 251: Alexander Kühl
Flexible Automatisierung der
Statorenmontage mit Hilfe einer
universellen ambidexteren Kinematik
FAPS, 142 Seiten, 60 Bilder, 26 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-367-2.

Band 252: Thomas Albrecht
Optimierte Fertigungstechnologien
für Rotoren getriebeintegrierter
PM-Synchronmotoren von
Hybridfahrzeugen
FAPS, 198 Seiten, 130 Bilder, 38 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-368-9.

Band 253: Florian Risch
Planning and Production Concepts for
Contactless Power Transfer Systems for
Electric Vehicles
FAPS, 185 Seiten, 125 Bilder, 13 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-369-6.

Band 254: Markus Weigl
Laserstrahlschweißen von Mischverbindungen aus austenitischen und ferritischen korrosionsbeständigen Stahlwerkstoffen
LPT, 184 Seiten, 110 Bilder, 6 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-370-2.

Band 255: Johannes Noneder
Beanspruchungserfassung für die Validierung von FE-Modellen zur Auslegung von Massivumformwerkzeugen
LFT, 161 Seiten, 65 Bilder, 14 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-371-9.

Band 256: Andreas Reinhardt
Ressourceneffiziente Prozess- und Produktionstechnologie für flexible Schaltungsträger
FAPS, 123 Seiten, 69 Bilder, 19 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-373-3.

Band 257: Tobias Schmuck
Ein Beitrag zur effizienten Gestaltung globaler Produktions- und Logistiknetzwerke mittels Simulation
FAPS, 151 Seiten, 74 Bilder. 2014.
ISBN 978-3-87525-374-0.

Band 258: Bernd Eichenhüller
Untersuchungen der Effekte und Wechselwirkungen charakteristischer Einflussgrößen auf das Umformverhalten bei Mikroumformprozessen
LFT, 127 Seiten, 29 Bilder, 9 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-375-7.

Band 259: Felix Lütteke
Vielseitiges autonomes Transportsystem basierend auf Weltmodellerstellung mittels Datenfusion von Deckenkameras und Fahrzeugsensoren
FAPS, 152 Seiten, 54 Bilder, 20 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-376-4.

Band 260: Martin Grüner
Hochdruck-Blechumformung mit formlos festen Stoffen als Wirkmedium
LFT, 144 Seiten, 66 Bilder, 29 Tab. 2014.
ISBN 978-3-87525-379-5.

Band 261: Christian Brock
Analyse und Regelung des Laserstrahltiefschweißprozesses durch Detektion der Metaldampffackelposition
LPT, 126 Seiten, 65 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-380-1.

Band 262: Peter Vatter
Sensitivitätsanalyse des 3-Rollen-Schubbiegens auf Basis der Finite Elemente Methode
LFT, 145 Seiten, 57 Bilder, 26 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-381-8.

Band 263: Florian Klämpfl
Planung von Laserbestrahlungen durch simulationsbasierte Optimierung
LPT, 169 Seiten, 78 Bilder, 32 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-384-9.

Band 264: Matthias Domke
Transiente physikalische Mechanismen
bei der Laserablation von dünnen
Metallschichten
LPT, 133 Seiten, 43 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-385-6.

Band 265: Johannes Götz
Community-basierte Optimierung des
Anlagenengineerings
FAPS, 177 Seiten, 80 Bilder, 30 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-386-3.

Band 266: Hung Nguyen
Qualifizierung des Potentials von
Verfestigungseffekten zur Erweiterung
des Umformvermögens aushärtbarer
Aluminiumlegierungen
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-387-0.

Band 267: Andreas Kuppert
Erweiterung und Verbesserung von Ver-
suchs- und Auswertetechniken für die
Bestimmung von Grenzformänderungs-
kurven
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-388-7.

Band 268: Kathleen Klaus
Erstellung eines Werkstofforientierten
Fertigungsprozessfensters zur Steigerung
des Formgebungsvermögens von Alumi-
niumlegierungen unter Anwendung einer
zwischen geschalteten Wärmebehandlung
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-391-7.

Band 269: Thomas Svec
Untersuchungen zur Herstellung von
funktionsoptimierten Bauteilen im
partiellen Presshärtprozess mittels lokal
unterschiedlich temperierter Werkzeuge
LFT, 166 Seiten, 87 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-392-4.

Band 270: Tobias Schrader
Grundlegende Untersuchungen zur
Verschleißcharakterisierung beschichte-
ter Kaltmassivumformwerkzeuge
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-393-1.

Band 271: Matthäus Brela
Untersuchung von Magnetfeld-Messme-
thoden zur ganzheitlichen Wertschöp-
fungsoptimierung und Fehlerdetektion
an magnetischen Aktoren
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-394-8.

Band 272: Michael Wieland
Entwicklung einer Methode zur Prognose
adhäsiven Verschleißes an Werkzeugen
für das direkte Presshärten
LFT, 156 Seiten, 84 Bilder, 9 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-395-5.

Band 273: René Schramm
Strukturierte additive Metallisierung
durch kaltaktives
Atmosphärendruckplasma
FAPS, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-396-2.

Band 274: Michael Lechner
Herstellung beanspruchungsangepasster
Aluminiumblechhalbzeuge durch
eine maßgeschneiderte Variation der
Abkühlgeschwindigkeit nach
Lösungsglühen
LFT, 136 Seiten, 62 Bilder, 15 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-397-9.

Band 275: Kolja Andreas
Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit
auf das Werkzeugeinsatzverhalten beim
Kaltfließpressen
LFT, 169 Seiten, 76 Bilder, 4 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-398-6.

Band 276: Marcus Baum
Laser Consolidation of ITO Nanoparticles
for the Generation of Thin Conductive
Layers on Transparent Substrates
LPT, 158 Seiten, 75 Bilder, 3 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-399-3.

Band 277: Thomas Schneider
Umformtechnische Herstellung
dünnwandiger Funktionsbauteile
aus Feinblech durch Verfahren der
Blechmassivumformung
LFT, 188 Seiten, 95 Bilder, 7 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-401-3.

Band 278: Jochen Merhof
Sematische Modellierung automatisierter
Produktionssysteme zur Verbesserung
der IT-Integration zwischen Anlagen-
Engineering und Steuerungsebene
FAPS, 157 Seiten, 88 Bilder, 8 Tab. 2015.
ISBN 978-3-87525-402-0.

Band 279: Fabian Zöller
Erarbeitung von Grundlagen zur
Abbildung des tribologischen Systems
in der Umformsimulation
LFT, 126 Seiten, 51 Bilder, 3 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-403-7.

Band 280: Christian Hezler
Einsatz technologischer Versuche zur
Erweiterung der Versagensvorhersage
bei Karosseriebauteilen aus höchstfesten
Stählen
LFT, 147 Seiten, 63 Bilder, 44 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-404-4.

Band 281: Jochen Bönig
Integration des Systemverhaltens von
Automobil-Hochvoltleitungen in die
virtuelle Absicherung durch
strukturmechanische Simulation
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-405-1.

Band 282: Johannes Kohl
Automatisierte Datenerfassung für disk-
ret ereignisorientierte Simulationen in
der energieflexiblen Fabrik
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-406-8.

Band 283: Peter Bechtold
Mikroschockwellenumformung mittels
ultrakurzer Laserpulse
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-407-5.

Band 284: Stefan Berger
Laserstrahlschweißen thermoplastischer
Kohlenstofffaserverbundwerkstoffe mit
spezifischem Zusatzdraht
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-408-2.

Band 285: Martin Bornschlegl
Methods-Energy Measurement - Eine
Methode zur Energieplanung für
Fügeverfahren im Karosseriebau
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-409-9.

Band 286: Tobias Rackow
Erweiterung des Unternehmenscontrol-
lings um die Dimension Energie
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-410-5.

Band 287: Johannes Koch
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung zyklisch-symmetrischer
Bauteile mit Nebenformelementen durch
Blechmassivumformung
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-411-2.

Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann
Beitrag zur Untersuchung der
tribologischen Bedingungen in der
Blechmassivumformung - Bereitstellung
von tribologischen Modellversuchen und
Realisierung von Tailored Surfaces
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-412-9.

Band 289: Thomas Senner
Methodik zur virtuellen Absicherung
der formgebenden Operation des
Nasspressprozesses von
Gelege-Mehrschichtverbunden
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-414-3.

Band 290: Sven Kreitlein
Der grundoperationsspezifische
Mindestenergiebedarf als Referenzwert
zur Bewertung der Energieeffizienz in
der Produktion
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-415-0.

Band 291: Christian Roos
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter
Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-416-7.

Band 292: Alexander Kahrmanidis
Thermisch unterstützte Umformung von
Aluminiumblechen
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-417-4.

Band 293: Jan Tremel
Flexible Systems for Permanent
Magnet Assembly and Magnetic Rotor
Measurement / Flexible Systeme zur
Montage von Permanentmagneten und
zur Messung magnetischer Rotoren
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab. 2016.
ISBN 978-3-87525-419-8.

Band 294: Ioannis Tsoupis
Schädigungs- und Versagensverhalten
hochfester Leichtbauwerkstoffe unter
Biegebeanspruchung
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-420-4.

Band 295: Sven Hildering
Grundlegende Untersuchungen zum
Prozessverhalten von Silizium als
Werkzeugwerkstoff für das
Mikroscherschneiden metallischer Folien
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-422-8.

Band 296: Sasia Mareike Hertweck
Zeitliche Pulsformung in der
Lasermikromaterialbearbeitung –
Grundlegende Untersuchungen und
Anwendungen
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-423-5.

Band 297: Paryanto
Mechatronic Simulation Approach for
the Process Planning of Energy-Efficient
Handling Systems
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-424-2.

Band 298: Peer Stenzel
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik
für verteilte Wicklungen im
Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-425-9.

Band 299: Mario Lušić
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung
montageführender Werkerinformations-
systeme simultan zum
Produktentstehungsprozess
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-426-6.

Band 300: Arnd Buschhaus
Hochpräzise adaptive Steuerung und
Regelung robotergeführter Prozesse
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-427-3.

Band 301: Tobias Laumer
Erzeugung von thermoplastischen
Werkstoffverbunden mittels simultanem,
intensitätsselektivem
Laserstrahlschmelzen
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-428-0.

Band 302: Nora Unger
Untersuchung einer thermisch unter-
stützten Fertigungskette zur Herstellung
umgeformter Bauteile aus der höherfes-
ten Aluminiumlegierung EN AW-7020
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-429-7.

Band 303: Tommaso Stellan
Design of Manufacturing Processes for
the Cold Bulk Forming of Small Metal
Components from Metal Strip
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-430-3.

Band 304: Bassim Bachy
Experimental Investigation, Modeling,
Simulation and Optimization of Molded
Interconnect Devices (MID) Based on
Laser Direct Structuring (LDS) / Experi-
mentelle Untersuchung, Modellierung,
Simulation und Optimierung von Molded
Interconnect Devices (MID) basierend
auf Laser Direktstrukturierung (LDS)
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-431-0.

Band 305: Michael Spahr
Automatisierte Kontaktierungsverfahren
für flachleiterbasierte
Pkw-Bordnetzsysteme
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-432-7.

Band 306: Sebastian Suttner
Charakterisierung und Modellierung
des spannungszustandsabhängigen
Werkstoffverhaltens der Magnesium-
legierung AZ31B für die numerische
Prozessauslegung
LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-433-4.

Band 307: Bhargav Potdar
A reliable methodology to deduce
thermo-mechanical flow behaviour of
hot stamping steels
LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017.
ISBN 978-3-87525-436-5.

Band 308: Maria Löffler
Steuerung von Blechmassivumformpro-
zessen durch maßgeschneiderte
tribologische Systeme
LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

Band 309: Martin Müller
Untersuchung des kombinierten Trenn-
und Umformprozesses beim Fügen art-
ungleicher Werkstoffe mittels
Schneidclinchverfahren
LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab.
2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

Band 310: Christopher Kästle
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbond-
technologie für integrierte Leistungs-
module in harschen Umgebungs-
bedingungen
FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

Band 311: Daniel Vipavc
Eine Simulationsmethode für das
3-Rollen-Schubbiegen
LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

Band 312: Christina Ramer
Arbeitsraumüberwachung und autonome
Bahnplanung für ein sicheres und
flexibles Roboter-Assistenzsystem
in der Fertigung
FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

Band 313: Miriam Rauer
Der Einfluss von Poren auf die
Zuverlässigkeit der Lötverbindungen
von Hochleistungs-Leuchtdioden
FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

Band 314: Felix Tenner

Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche

LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab.
2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

Band 315: Aarief Syed-Khaja

Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics

FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab.
2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

Band 316: Adam Schaub

Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung

LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

Band 317: Daniel Gröbel

Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

Band 318: Philipp Hildenbrand

Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess

LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

Band 319: Tobias Konrad

Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohrbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen

LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

Band 320: David Meinel

Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge

FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

Band 321: Andrea Zimmermann

Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile

LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

Band 322: Christoph Amann

Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden

LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

Band 323: Jennifer Tenner

Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen

LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

Band 324: Susan Zöller

Mapping Individual Subjective Values to Product Design

KTmfk, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

Band 325: Stefan Lutz
Erarbeitung einer Methodik zur
semiempirischen Ermittlung der
Umwandlungskinetik durchhärtender
Wälzlagerstähle für die Wärme-
behandlungssimulation
LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

Band 326: Tobias Gnihl
Modellbasierte Prozesskettenabbildung
rührreibgeschweißter Aluminium-
halbzeuge zur umformtechnischen
Herstellung höchstfester Leichtbau-
strukturteile
LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

Band 327: Johannes Bürner
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur
Lastflexibilisierung durch intelligente
elektrische Wärmespeicher
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-219-2.

Band 328: Wolfgang Böhm
Verbesserung des Umformverhaltens von
mehrlagigen Aluminiumblechwerk-
stoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-227-7.

Band 329: Stefan Landkammer
Grundsatzuntersuchungen, mathemati-
sche Modellierung und Ableitung einer
Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe
nach dem Spinnenbeinprinzip
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-229-1.

Band 330: Stephan Rapp
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung
transienter optischer Materialeigen-
schaften bei der Ultrakurzpuls-Laser-
materialbearbeitung
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-235-2.

Band 331: Michael Scholz
Intralogs Execution System mit
integrierten autonomen, servicebasierten
Transportentitäten
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-237-6.

Band 332: Eva Bogner
Strategien der Produktindividualisierung
in der produzierenden Industrie im Kon-
text der Digitalisierung
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-246-8.

Band 333: Daniel Benjamin Krüger
Ein Ansatz zur CAD-integrierten
muskuloskelettalen Analyse der Mensch-
Maschine-Interaktion
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab.
2019. ISBN 978-3-96147-250-5.

Band 334: Thomas Kuhn
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirekt-
strukturierter mechatronisch integrierter
Baugruppen (LDS-MID)
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-252-9.

Band 335: Hans Fleischmann
Modellbasierte Zustands- und Prozess-
überwachung auf Basis sozio-cyber-phy-
sischer Systeme
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-256-7.

Band 336: Markus Michalski
Grundlegende Untersuchungen zum
Prozess- und Werkstoffverhalten bei
schwingungsüberlagerter Umformung
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab.
2019. ISBN: 978-3-96147-270-3.

Band 337: Markus Brandmeier
Ganzheitliches ontologiebasiertes
Wissensmanagement im Umfeld der
industriellen Produktion
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab.
2020. ISBN: 978-3-96147-275-8.

Band 338: Stephan Purr
Datenerfassung für die Anwendung
lernender Algorithmen bei der Herstel-
lung von Blechformteilen
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab.
2020. ISBN: 978-3-96147-281-9.

Band 339: Christoph Kiener
Kaltfließpressen von gerad- und schräg-
verzahnten Zahnrädern
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-287-1.

Band 340: Simon Spreng
Numerische, analytische und empirische
Modellierung des Heißscrimpprozesses
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-293-2.

Band 341: Patrik Schwingenschlögl
Erarbeitung eines Prozessverständnisses
zur Verbesserung der tribologischen
Bedingungen beim Presshärten
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-297-0.

Band 342: Emanuela Affronti
Evaluation of failure behaviour
of sheet metals
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-303-8.

Band 343: Julia Degner
Grundlegende Untersuchungen zur
Herstellung hochfester Aluminiumblech-
bauteile in einem kombinierten Umform-
und Abschreckprozess
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-307-6.

Band 344: Maximilian Wagner
Automatische Bahnplanung für die Auf-
teilung von Prozessbewegungen in syn-
chrone Werkstück- und Werkzeugbewe-
gungen mittels Multi-Roboter-Systemen
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-309-0.

Band 345: Stefan Härter
Qualifizierung des Montageprozesses
hochminiaturisierter elektronischer Bau-
elemente
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-314-4.

Band 346: Toni Donhauser
Ressourcenorientierte Auftragsregelung
in einer hybriden Produktion mittels
betriebsbegleitender Simulation
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab.
2020. ISBN 978-3-96147-316-8.

Band 347: Philipp Amend
Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen
LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder
2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

Band 348: Matthias Ehlert
Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung
KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

Band 349: Thomas Sander
Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten
KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4

Band 350: Florian Pilz
Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen
LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8

Band 351: Sebastian Josef Katona
Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometriemodelle
KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6

Band 352: Jürgen Herrmann
Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014
LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1

Band 353: Christof Küstner
Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung
KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9

Band 354: Tobias Gläsel
Prozessketten zum Laserstrahlschweißen von flachleiterbasierten Formspulenwicklungen für automobiler Traktionsantriebe
FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

Band 355: Andreas Meinel
Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern
KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8

Band 356: Hannah Riedle
Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation
FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0

Band 357: Maximilian Landgraf
Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen
FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9

Band 358: Alireza Esfandiyari
Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production
FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3

Band 359: Christian Sand
Prozessübergreifende Analyse komplexer
Montageprozessketten mittels Data Mi-
ning
FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab.
2021. ISBN 978-3-96147-398-4

Montagesysteme sind integraler Bestandteil des verarbeitenden Gewerbes, vor allem im deutschen Fahrzeug- und Maschinenbau. Im Fokus dieser Arbeit stehen komplexe Montageprozessketten (MPK) in der Großserienfertigung, die in jedem Prozessschritt mit mehreren Parametern in engen Prozessfenstern definiert sind und dort robust liegen. Dennoch treten Serienfehler auf, die nur sehr schwer zu entdecken sind. Einerseits liegen alle Parameter entlang der MPK innerhalb der Grenzen und weisen einen guten bis sehr guten Cp-Wert auf. Andererseits existieren Ereignisse in MPK, die zu Ausschuss führen, obwohl jeder Einzelprozess und deren Kennwerte hervorragend innerhalb der Toleranzgrenzen liegen.

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der prozessschritt-übergreifenden, datengetriebenen Auswertung von MPK. Im Rahmen von E|ASY-Class und E|ASY-Pat ist die Entdeckung von Wissen in Prozesskurven adressiert und die Prozessvisualisierung E|ASY-Heat erlaubt eine laufende Änderungsanalyse des Prozessverhaltens. Für die Analyse von MPK visualisiert E|ASY-Inter komplexe Wechselwirkungen zwischen Montageprozessen und den geprüft defekten Erzeugnissen in der Funktionserfüllung, um Fehlerursachen zu identifizieren. Spontane Änderungen mit schadhafter Auswirkung auf die Funktionserfüllung des montierten Erzeugnisses erkennt E|ASY-Event anhand der Signalausbreitung entlang komplexer Montagesysteme. Für die Detailanalyse unterstützt E|ASY-Curves mittels 3D-Darstellung die visuelle Auswertung von Prozesskurven.

