

Lehrstuhl für
Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
der Technischen Universität München

Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze

Roland Mork

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann (i. R.)

Die Dissertation wurde am 17.01.2011 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 30.05.2011 angenommen.

Roland Mork

**Qualitätsbewertung und -regelung für
die Fertigung von Karosserieteilen
in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze**



Herbert Utz Verlag · München

Forschungsberichte IWB

Band 251

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2011

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.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2012

ISBN 978-3-8316-4127-7

Printed in Germany
Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utzverlag.de

Geleitwort der Herausgeber

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb* Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern dieses Instituts, für die stets wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh bedanke ich mich für die wissenschaftliche Betreuung und das entgegengebrachte Vertrauen bei der Durchführung der Arbeit. Weiterhin gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann (i.R.), dem ehemaligen Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München (utg), mein Dank für die Übernahme des Koreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp bedanke ich mich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Darüber hinaus bedanke ich mich recht herzlich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Institutes sowie bei allen Studentinnen und Studenten, die mich bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben.

Desweiteren danke ich der Audi AG in Ingolstadt für die Unterstützung meiner Arbeit. Besonders hervorheben möchte ich Herrn Dr.-Ing. Bernd Griesbach, Herrn Dipl.-Ing. Axel Bienhaus und Herrn Dipl.-Ing. Peter Hochholdinger.

Meinen INI.TUM-Kollegen Herrn Dr.-Ing. Ingo Faaß und Herrn Dr.-Ing. Meinhard Braedel danke ich für die hervorragende Zusammenarbeit während der gemeinsamen Tätigkeit und für die gründliche Durchsicht der Arbeit.

Besonderer Dank gilt meiner Mutter und meinen Freunden, die mich stets unterstützt haben und mir so den nötigen Rückhalt für diese Arbeit gaben.

In besonderem Maße danke ich meiner Verlobten Roxana für ihren Glauben an mich, ihre unermüdliche Motivation und Liebe bei der Fertigstellung dieser Arbeit.

München, im Juli 2011

Roland Mork

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	XIII
Abkürzungsverzeichnis.....	XV
Verzeichnis der Formelzeichen.....	XVII
Große lateinische Buchstaben.....	XVII
Kleine lateinische Buchstaben	XVIII
Griechische Buchstaben.....	XIX
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation der Arbeit.....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit.....	3
1.4 Stand der Technik	7
1.4.1 Prozesskette im Presswerk	7
1.4.2 Pressenanlagen	8
1.4.2.1 Pressentechnik.....	8
1.4.2.2 Zieheinrichtung.....	12
1.4.3 Ziehwerkzeuge	13
1.4.4 Qualitätsmängel von Karosseriebauteilen.....	14

1.4.5	Prozesssensorik bei der Fertigung von Karosseriebauteilen....	15
1.4.5.1	Sensorsysteme in modernen Pressenanlagen.....	15
1.4.5.2	Weitere Sensorsysteme für Pressenanlagen	17
1.4.5.3	Wirbelstromprinzip bei der zerstörungsfreien Ermittlung mechanischer Werkstoffkennwerte	19
1.4.6	Qualitätsbewertung auf Basis Neuronaler Netze	23
1.4.7	Ansätze zum Aufbau von Prozessregelungen.....	31
1.4.8	Zusammenfassung und Bewertung des aktuellen Forschungsstands	36
1.5	Lösungsansatz für eine modellbasierte Prozessregelung.....	38
2	Beschreibung des Gesamtsystems und Auswahl von Sensorsystemen	41
2.1	Analyse des Fertigungssystems	41
2.1.1	Allgemeines.....	41
2.1.2	Mechanischer Aufbau der Pressenanlage	41
2.1.3	Untersuchtes Werkzeug	42
2.1.4	Überblick über die Mess- und Einflussgrößen.....	43
2.2	Auswahl erforderlicher Systeme.....	44
2.2.1	Allgemeines.....	44
2.2.2	Mechanische Werkstoffkennwerte.....	44
2.2.3	Blechdicke.....	52
2.2.4	Rauheit und Schmierfilm	56
2.2.5	Temperatur des Bauteils und des Werkzeugs	57
2.2.6	Markierung von Platinen.....	59

2.3 Zusammenfassung – Auswahl geeigneter Sensorsysteme	61
3 Aufbau eines mechatronischen Systems zur Erfassung von Einflussgrößen	65
3.1 Systeme zur Prozessüberwachung	65
3.2 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung	66
3.2.1 Allgemeines	66
3.2.2 Systemintegration für den Serienbetrieb	66
3.2.3 Inbetriebnahme des Systems (Kalibrierung)	67
3.3 Blechdickenerfassung mittels des Lasertriangulationsverfahrens	70
3.3.1 Allgemeines	70
3.3.2 Vorrichtungskonstruktion für den Serienbetrieb	71
3.3.3 Inbetriebnahme und Kalibrierung des Systems	71
3.3.4 Messergebnisse im Serienbetrieb	72
3.4 Rauheits- und Schmierfilmmessung mittels des Reflexionsprinzips	73
3.5 Temperaturerfassung des Bauteils und des Werkzeugs	74
3.6 Integration der Platinenbeschriftungsanlage	75
3.7 Identifikation der Qualitätsmängel	77
3.8 Online-Messwerterfassung und Kennwertbildung	78
3.8.1 Inbetriebnahme des mechatronischen Gesamtsystems	78
3.8.2 Visualisierungsoberfläche für die Anzeige der Messgrößen	79
3.9 Zusammenfassung des Datenerfassungskonzeptes	80

4	Prozessmodell zur Vorhersage und Regelung der Bauteilqualität	83
4.1	Allgemeines	83
4.2	Überblick der Datenbasis und Analyse der Prozessdaten	83
4.2.1	Statistik der untersuchten Produktionsreihen (Abpressungen)	83
4.2.2	Zuordnung der Bauteilqualität	85
4.2.3	Übersicht der Eingangsgrößen	87
4.2.4	Bewertungskriterien und Auswahl relevanter Eingangsgrößen.....	88
4.2.5	Voruntersuchung der Eingangs- und Ausgangsdaten	89
4.3	Modell zur Online-Qualitätsvorhersage auf Basis Neuronaler Netze	93
4.3.1	Allgemeines.....	93
4.3.2	Strategien der Modellbildung.....	95
4.3.3	Modellbildung zwischen Wirbelstrommesswerten und mechanischen Werkstoffkennwerten	96
4.3.3.1	Korrelation mittels der Entscheidungsbäume.....	96
4.3.3.2	Korrelation mittels der linearen Regression	99
4.3.3.3	Korrelation mittels der Neuronalen Netze.....	101
4.3.4	Modellbildung zur Korrelation von Wirbelstrommesswerten und Bauteilqualität	104
4.3.4.1	Allgemeines	104
4.3.4.2	Trainingsdaten des Neuronalen Netzes	106
4.3.4.3	Training des Neuronalen Netzes.....	106
4.3.4.4	Bestimmung der Netzstruktur.....	108

4.3.5	Evaluierung der Modellgüten	111
4.3.5.1	Allgemeines	111
4.3.5.2	Bestimmung optimaler Trainingsdaten	112
4.3.5.3	Erweiterung der Struktur des Neuronalen Netzes....	116
4.3.5.4	Qualitätsvorhersage im Serienbetrieb	119
4.3.6	Zusammenfassung und weitere Vorgehensweise	122
4.4	Aufbau einer Prozessregelung in einer Pressenanlage	123
4.4.1	Allgemeines	123
4.4.2	Festlegung der Stör- und der Regelgrößen	124
4.4.3	Festlegung der Stellgrößen und der Stellglieder (Aktorik)	124
4.4.4	Bestimmung der Regelstrategien und der Regelstruktur	126
4.4.5	Implementierung und Aufbau des Regelkreises	128
4.4.6	Inline-Regelung der Bauteilqualität in der Serienfertigung ...	129
4.5	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	132
5	Prozessüberwachung und Qualitätsbewertung an einer Großserienanlage	135
5.1	Allgemeines	135
5.2	Beschreibung des Gesamtsystems und Prozessanalyse	135
5.2.1	Beschreibung der Großraumsaugertransferpresse	135
5.2.2	Überblick der Mess- und Einflussgrößen	137
5.2.3	Identifikation der Qualitätsmängel	138
5.3	Aufbau und Inbetriebnahme des mechatronischen Systems	139
5.3.1	Allgemeines	139

5.3.2	Wirbelstromsensor zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung.....	140
5.3.3	Implementierung weiterer Systeme zur Prozessüberwachung	142
5.3.4	Sensoren der Pressenanlage	143
5.3.5	Datenaufnahme im Serienbetrieb	144
5.4	Prozessmodell zur Qualitätsvorhersage und zur Prozessregelung	145
5.4.1	Allgemeines.....	145
5.4.2	Statistik der untersuchten Produktionsreihen (Abpressungen)	145
5.4.3	Festlegung der Eingangs- und der Ausgangsdaten für die Modellbildung	147
5.4.4	Entwurf eines Modells zur Vorhersage von Qualitätsmängeln.....	148
5.4.5	Vorschlag zur Realisierung einer Prozessregelung im Serienbetrieb	151
5.5	Zusammenfassung der Ergebnisse.....	152
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	155
7	Literaturverzeichnis	159
8	Anhang.....	171
8.1	Ergänzende Abbildungen und Tabellen.....	171
8.2	Genannte Firmen.....	179
8.3	Genutzte Softwareprodukte	181

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Typischer Qualitätsverlauf bei der Fertigung von Karosseriebauteilen im Presswerk	2
Abbildung 2:	Aufbau und Vorgehensweise der Arbeit.....	4
Abbildung 3:	Ausgangsplatine (links) und Fertigteil (rechts) des Versuchsträgers Nr. 1.....	6
Abbildung 4:	Platine (links) und Fertigteil (rechts) des Versuchsträgers Nr. 2	6
Abbildung 5:	Prozesskette innerhalb einer Pressenanlage in Anlehnung an GIRSCHEWSKI 2004	8
Abbildung 6:	Aufbau einer einfachwirkenden mechanischen Presse (SCHULER 1996).....	9
Abbildung 7:	Mechanisch angetriebene Transferpresse mit Sauerbrücken-Transfer (SCHULER 1996, BRAEDEL 2009).....	10
Abbildung 8:	Einfachwirkende hydraulische Presse mit aktivem Ziehkissen (SCHULER 1996).....	11
Abbildung 9:	Aufbau einer hydraulischen Vier-Punkt-Zieheinrichtung (SCHULER 1996)	12
Abbildung 10:	Aufbau eines einfachwirkenden Ziehwerkzeugs (BRAEDEL 2009)	14
Abbildung 11:	Qualitätsmängel von Karosseriebauteilen (FAASS 2009)	15
Abbildung 12:	Induktion in einem Körper nach SCHWIND 1998.....	20
Abbildung 13:	Induktion bei einem elektrisch leitfähigen Körper im induzierten elektrischen Wechselfeld nach SCHWIND 1998	21
Abbildung 14:	Fourieranalyse des Messsignals (SCHWIND 1998).....	22
Abbildung 15:	Ein- und Ausgangssignale eines Neurons.....	25
Abbildung 16:	Verarbeitungsschritte eines Neurons	25

Abbildung 17: Gerichtete und gewichtete Kanten.....	25
Abbildung 18: Kombination der Eingangssignale.....	26
Abbildung 19: Aktivierungsfunktionen eines Neurons	26
Abbildung 20: Struktur eines einfachen Feedforward-Netzes.....	27
Abbildung 21: Standardblockschaltbild eines Regelkreises nach JÖRGL 1995	31
Abbildung 22: Parallelschaltung und Adaption einer Modellstruktur als in der Regelung typischerweise eingesetzte Prozessmodelle	32
Abbildung 23: Blockschaltbild zur Regelung mittels Modellvorhersagen (STURM 2000)	34
Abbildung 24: Struktur eines prädiktiven Regelkreises	34
Abbildung 25: Signalfussplan einer IMC-Regelungsstruktur	35
Abbildung 26: Lösungskonzept für die Erstellung einer modellbasierten Prozessregelung	39
Abbildung 27: Schematischer Aufbau der untersuchten Pressenlinie (SCHULER 1996)	42
Abbildung 28: Aufbau des Ziehwerkzeugs des Versuchsträgers Nr. 1 (FAASS 2009)	42
Abbildung 29: Mögliche Einflussgrößen des Prozesses zur Fertigung des Versuchsträgers Nr. 1 (SCHULER 1996, FAASS 2009)	43
Abbildung 30: Wechselwirkungen zwischen Gefügezustand, mechanischen und elektromagnetischen Eigenschaften (SCHWIND 1998)	45
Abbildung 31: Prinzipaufbau der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mittels Wirbelstromverfahrens	47
Abbildung 32: Messprinzip der wirbelstrombasierten Werkstoffprüfung.....	48
Abbildung 33: Laboraufbau der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung.....	49
Abbildung 34: Aufbau von Widerstandsthermometern und Thermoelementen	58

Abbildung 35: Kennzeichnungsbeispiele der unterschiedlichen potenziellen Markierverfahren.....	60
Abbildung 36: Integration der Prozesssensorik in die untersuchte Pressenstraße für die Fertigung des Versuchsträgers Nr. 1 – Übersicht des Laderbereichs und des Werkzeugs.....	65
Abbildung 37: Mechanischer Aufbau der wirbelstrombasierten Werkstoffprüfung in der untersuchten Serienanlage	67
Abbildung 38: Validierungsergebnisse der zerstörungsfreien Prüfung des Werkstoffs TRIP700, inklusive der Abweichungen einzelner mechanischer Werkstoffkennwerte	69
Abbildung 39: Blechdickenmessung des Versuchsträgers Nr. 1 an ca. 500 Platinen	73
Abbildung 40: Temperaturmessung während einer Abpressung des Versuchsträgers Nr. 1 (FAASS 2009)	75
Abbildung 41: Risskritische Bereiche des Versuchsträgers Nr. 1 nach FAASS 2009	77
Abbildung 42: Messtechnische Anbindung der Sensorsysteme zum mechatronischen Gesamtsystem	78
Abbildung 43: Statistik der messtechnisch begleiteten Abpressungen und der Bauteilumfänge	84
Abbildung 44: Einteilung der begleiteten Abpressungen nach den aufgetretenen Gutteilen und den Reißerarten	86
Abbildung 45: Schwankungsintervalle der Amplituden über die gemessenen Platinen	90
Abbildung 46: Schwankungsintervalle der Phasenbeträge über die gemessenen Platinen	91
Abbildung 47: Zweidimensionaler und n-dimensionaler Entscheidungsraum	92

Abbildung 48: Korrelationsmöglichkeiten zwischen den elektromagnetischen Eigenschaften, den mechanischen Werkstoffkennwerten und der Teilequalität	94
Abbildung 49: Struktur des Entscheidungsbaumes für die 0,2%-Streckgrenze $R_{p0,2}$	97
Abbildung 50: Gewichtungsfaktoren der linearen Regression für die betrachteten mechanischen Werkstoffkennwerte	101
Abbildung 51: Prozentualer Fehler für die 0,2-Streckgrenze $R_{p0,2}$ in Abhängigkeit der Neuronenzahl	103
Abbildung 52: Schrittkette des Trainingsvorgangs der Neuronalen Netze	107
Abbildung 53: Struktur des Feedforward-Netzes zur Vorhersage der Bauteilqualität für die Reißer Nr. 1 und 3	109
Abbildung 54: Struktur des abgewandelten Neuronalen Netzes zur Qualitätsvorhersage für die Reißer Nr. 1 und 3.....	110
Abbildung 55: Ansätze für die Modellierung mehrerer Fehlerbereiche.....	116
Abbildung 56: Struktur des erweiterten Neuronalen Netzes zur Qualitätsvorhersage für die Reißer Nr. 1, 3 und 4.....	118
Abbildung 57: Blockschaltbild für die Qualitätsvorhersage des Versuchsträgers Nr. 1	120
Abbildung 58: Verlauf der Bauteilqualität und der Qualitätsvorhersage des Versuchsträgers Nr. 1 während der Abpressung Nr. 7.....	121
Abbildung 59: Detailbetrachtung der gerissenen Bauteile in der Abpressung Nr. 7	122
Abbildung 60: Werkzeug im Ausgangszustand und die aktive Blechhalterdistanz nach FAASS 2009 als Stellglied für die Prozessregelung des Reißers Nr. 1	126
Abbildung 61: Modellbasierter Regelkreis auf Basis Neuronaler Netze, spezifiziert für den Versuchsträger Nr. 1.....	128
Abbildung 62: Qualitätsvorhersage und automatische Regelung bei der Abpressung Nr. 8.....	130

Abbildung 63:	Detailansicht des Qualitätsverlaufs und der Modellvorhersage bei der Abpressung Nr. 8	131
Abbildung 64:	Untersuchte Großraumsaugertransferpresse im Presswerk der Audi AG	136
Abbildung 65:	Mögliche Einflussgrößen auf den Umformprozess zur Fertigung des Versuchsträgers Nr. 2 (FAASS 2009)	137
Abbildung 66:	Problem Bereiche und Qualitätsmängel bei der Serienfertigung des Versuchsträgers Nr. 2 (FAASS 2009)	138
Abbildung 67:	Übersicht der Sensorsysteme und der Datenerfassung in der untersuchten Großraumsaugertransferpresse	139
Abbildung 68:	Integration des Wirbelstromsensors zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung	140
Abbildung 69:	Einteilung der begleiteten Abpressungen nach den Gutteilen und den Reißerarten	146
Abbildung 70:	Nervenzellen eines biologischen Neuronalen Netzes (GALLAN 2009)	171
Abbildung 71:	3D-CAD-Modell der Vorrichtung zur Blechdickenmessung im Serienbetrieb	171
Abbildung 72:	Berührungslose Blechdickenmessung mittels Lasertriangulationsverfahren in der untersuchten Pressenstraße	172
Abbildung 73:	Einlegefeeder mit integriertem Sensor zur Rauheits- und Schmierfilmmessung	172
Abbildung 74:	Messorte der Thermoelemente im untersuchten Werkzeug	173
Abbildung 75:	Integration der kontinuierlichen Platinennummerierung mit wasserabwaschbarer Tinte in die untersuchte Pressenstraße ...	173
Abbildung 76:	Ablaufplan der Datenaufnahme im Serienbetrieb	174
Abbildung 77:	Bedien- und Visualisierungsoberfläche für die Datenerfassung	175

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Typische mechanische Kennwerte des Werkstoffs TRIP700.....	6
Tabelle 2:	Typische mechanische Kennwerte des Werkstoffs DC07.....	7
Tabelle 3:	Ausschnitt bedeutender Sensorsysteme zur Prozessüberwachung in modernen Pressenanlagen.....	16
Tabelle 4:	Gegenüberstellung der erzielten Genauigkeiten für die Systeme 3MA und 3R Technics für die betrachteten Werkstoffkennwerte.....	51
Tabelle 5:	Übersicht der Eingangsgrößen, der erzeugten Kennwerte und ihres Einflusses auf die Bauteilqualität.....	89
Tabelle 6:	Übersicht der Standardabweichung der realen Werkstoffkennwerte sowie der Schätzung für die Entscheidungsbäume, die lineare Regression und die Neuronalen Netze.....	98
Tabelle 7:	Starteinstellungen für die identifizierten Parameter beim Entwurf Neuronaler Netze	105
Tabelle 8:	Genauigkeit des Feedforward-Netzes und der geänderten Netzstruktur, trainiert mit Daten der Abpressung Nr. 3 und validiert mit Daten der Abpressung Nr. 2.....	111
Tabelle 9:	Erkennungsrate zwischen realer und berechneter Bauteilqualität der Prozessmodelle für die Reißer Nr. 1 und 3, erstellt mit verschiedenen Trainingssätzen aus mehreren Abpressungen.....	114
Tabelle 10:	Erkennungsrate zwischen realer und berechneter Bauteilqualität der Prozessmodelle für die Gutteile, erstellt mit verschiedenen Trainingssätzen aus mehreren Abpressungen.....	115
Tabelle 11:	Genauigkeit der zerstörungsfreien Prüfung des Werkstoffs DC07 bezüglich einzelner mechanischer Werkstoffkennwerte aus den Validierungsproben.....	142

Tabelle 12:	Gesamtübersicht über die gefertigten Bauteile und deren Zuordnung zu den Qualitätsmängeln.....	148
Tabelle 13:	Übersicht der Erkennungsraten des Modells mit den verschiedenen Netzstrukturen.....	150
Tabelle 14:	Zusammenfassung der eingesetzten Sensorsysteme und der Messgenauigkeiten	176
Tabelle 15:	Bausteine des Regelkreises und deren direkter Bezug auf die Prozessregelung des Versuchsträgers Nr. 1.....	177
Tabelle 16:	Starteinstellungen für identifizierte Parameter beim Entwurf Neuronaler Netze für den Versuchsträger Nr. 2.....	178

Abkürzungsverzeichnis

Hinweis: Einige der aufgeführten englischen Abkürzungen bezeichnen umfassende Methoden oder Konzepte. Sie werden im Deutschen gewöhnlich im Original übernommen und sind deshalb nachfolgend nicht übersetzt. Zur inhaltlichen Erläuterung der jeweiligen Abkürzung sei auf die Ausführungen im Text und die zitierten Quellen verwiesen.

CNC	Computerized Numerical Control (deutsch: numerische Steuerung mit Rechner)
DLR	Durchlaufrichtung
IF	Interstitial Free (deutsch: interstitiellfrei)
hardlim	Schwellwertfunktion (Softwareprogramm Matlab®)
iwb	Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (der Technischen Universität München)
logsig	Logistische Sigmoidfunktion (Softwareprogramm Matlab®)
PID	proportional integral derivative
purelin	Lineare Übertragungsfunktion (Softwareprogramm Matlab®)
R/E	Reißer/Einschnürung
RSS	Quadratsumme der Fehlerdifferenz der linearen Regression
SPS	speicherprogrammierbare Steuerung
tansig	Hyperbolische Tangenssigmoidfunktion (Softwareprogramm Matlab®)
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
trainlm	Levenberg-Marquardt-Backpropagation-Algorithmus
treefit	Funktion für die Modellierung von Entscheidungsbäumen (Softwareprogramm Matlab®)
TRIP	Transformation Induced Plasticity (deutsch: verformungsindu-

	zierte Plastizität)
utg	Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (der Technischen Universität München)

Verzeichnis der Formelzeichen

Hinweis: Einige der nachfolgend aufgeführten Formelzeichen werden mit mehreren verschiedenen Bedeutungen verwendet. Die jeweils zutreffende Bedeutung ergibt sich entweder aus dem Kontext oder ist explizit im Text angegeben.

Große lateinische Buchstaben

Größe	Einheit	Bezeichnung
A	-	Amplitude des Ausgangssignals des Wirbelstromsensors
A_{80}	%	Bruchdehnung
A_g	%	Gleichmaßdehnung
B	T	magnetische Flussdichte
E	V/m	elektrische Feldstärke
E_w	V/m	elektrische Feldstärke eines Wechselfeldes
F	-	Fehlermaß: Summe der Abweichungsquadrate des Ausgabewertes des Neuronalen Netzes und des Zielwertes
$G_Z(s)$	-	Übertragungsfunktion des Störgrößenverhaltens eines Regelkreises
$G_R(s)$		Übertragungsfunktion des Reglerverhaltens eines Regelkreises
$G_S(s)$		Übertragungsfunktion des Stellverhaltens eines Regelkreises
Im	-	Imaginärteil des Ausgangssignals des Wirbelstromsensors
L	H	Induktivität einer Spule
R	Ω	Wirkwiderstand

Re	-	Realteil des Ausgangssignals des Wirbelstromsensors
R_m	N/mm^2	Zugfestigkeit
$R_{p0,2}$	N/mm^2	0,2%-Streckgrenze
$U(s)$	-	Stellgröße eines Regelkreises
$U'(s)$	-	Funktion zukünftiger Stellgrößen eines Regelkreises
X	Ω	Blindwiderstand
$\mathbf{X}$	-	Matrix der Eingangswerte aller Datenpaare der linearen Regression
$Y(s)$	-	Regelgröße eines Regelkreises
$Y'(s)$	-	Vorhersage der Regelgröße eines Regelkreises
$\underline{Z}$	Ω	komplexer Wechselstromwiderstand (Impedanz)
$Z(s)$		Störgröße eines Regelkreises

Kleine lateinische Buchstaben

Größe	Einheit	Bezeichnung
a	-	Ausgangssignale des Neuronalen Netzes
e	-	Eingangssignale des Neuronalen Netzes
e_i	-	Fehlerdifferenz zwischen Ausgangsgrößen und berechneten Werten der linearen Regression
f	-	allgemeine Funktion
f_w	Hz	Frequenz der Wechselspannung
n	-	kombiniertes Neuroneneingangssignal eines Neuronalen Netzes
n_{90}	-	Verfestigungsexponent
p	-	Anzahl der Eingangsgrößen der linearen Regression
r_{90}	-	senkrechte Anisotropie

t	s	Variable der Zeit
w_{ij}	-	Gewichtungsfaktor zwischen Knoten des Neuronalen Netzes
x_i	-	Eingangsgrößen der linearen Regression
$\mathbf{x}$	-	Eingangsgrößenvektor
y	-	Ausgangsgrößen
$\mathbf{y}$	-	Ausgangsgrößenvektor
y_{soll}	-	Vorgabe- bzw. Zielwert des Neuronalen Netzes

Griechische Buchstaben

Größe	Einheit	Bezeichnung
β_i	-	Regressionskoeffizienten der linearen Regression
$\boldsymbol{\beta}$	-	Regressionskoeffizientenvektor der linearen Regression
μ	H/m	magnetische Permeabilität bzw. Leitfähigkeit
ρ	°	Phase des Ausgangssignals des Wirbelstromsensors
σ	1/(Ωm)	elektrische Leitfähigkeit

1 Einleitung

1.1 Motivation der Arbeit

Die Automobilindustrie der heutigen Zeit muss sich stets der Herausforderung stellen, eine Balance aus Wirtschaftlichkeit und Qualität zu halten. Dies erstreckt sich über sämtliche Bereiche der Prozesskette bis hin zur Fertigung von Karosseriebauteilen in Presswerken. Die Tendenz an dieser Stelle entwickelt sich über eine Steigerung der Teileausbringung pro Zeiteinheit. Dabei müssen stets die spezifizierten Qualitätsanforderungen, die sich in der Kundenzufriedenheit widerspiegeln, erfüllt werden. Um sich diesem Ziel zu nähern, werden technologisch weiterentwickelte Pressenanlagen aufgebaut. Damit werden eine Steigerung der Teileausbringung, Mehrfachteilefertigung und ein höherer Automatisierungsgrad erreicht. Weiterhin sollen störungsbedingte Ausfälle weitestgehend verhindert, Werkzeugwechselzeiten zwecks höherer Flexibilität reduziert und über Qualitätsüberwachungssysteme die Ausschusskosten minimiert werden.

Beim Fertigungsprozess im Presswerk wird die Qualitätsbewertung trotz des hohen Automatisierungsgrades überwiegend manuell durchgeführt. Technische Regelkreise und Inline-Überwachungssysteme für die serienbedingte Kontrolle und die Nachstellung der Qualitätskriterien haben sich bisher nicht durchgesetzt. Gründe sind unter anderem serienuntaugliche technologische Systeme, komplexe Wirkzusammenhänge und Einflussgrößen bei der Herstellung von Karosseriebauteilen sowie sensible Produktionsprozesse (FAASS 2009, GIRSCHESKI 2004).

Die gegenwärtige Prozesssteuerung erfolgt durch subjektives Eingreifen der Fertigungsfachkräfte vor Ort. Sie übernehmen Aufgaben der Prozessüberwachung und gegebenenfalls der Prozesskorrektur abhängig von Einflussgrößen, wie z.B. der Werkstoffqualität. Bewegen sich die Qualitätsmerkmale außerhalb der geforderten Qualitätsgrenzen, wird als Gegenmaßnahme ein manueller Eingriff eingeleitet (Abbildung 1). Aufgrund fehlender Prozessüberwachungssysteme und unzureichender Kenntnisse der Einflussgrößen und ihrer Wirkzusammenhänge bei der Fertigung von Karosseriebauteilen kann die Korrektur des Prozesses oft nur verzögert erfolgen. Am Auslaufband findet die Bewertung der Qualität des jeweiligen Bauteils statt, woraus die Fertigungsfachkräfte mittels ihres Erfahrungswissens die Prozessparameter verändern. Dieser Vorgang wird so lange

durchlaufen, bis sich ein Optimum einstellt. Die fehlerbehafteten Bauteile verursachen Kosten durch Nacharbeit oder Ausschuss.

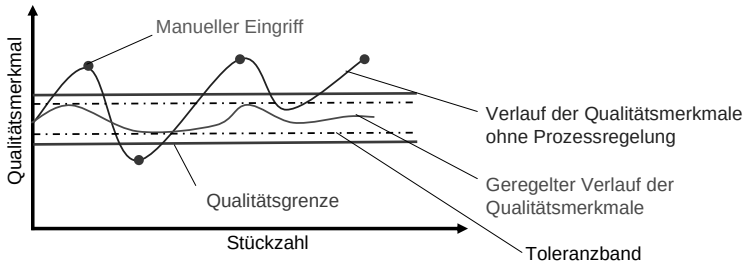


Abbildung 1: Typischer Qualitätsverlauf bei der Fertigung von Karosseriebauteilen im Presswerk

Werden Qualitätsfehler nicht erkannt, gelangen die damit behafteten Bauteile in die Nachfolgeprozesse und bewirken umso höhere Kosten, je später im Prozess die Fehler festgestellt werden. Aus der beschriebenen Problematik wird im folgenden Abschnitt die genaue Zielsetzung der vorliegenden Arbeit formuliert. Im Vordergrund steht die Notwendigkeit einer Prozessregelung für die Fertigung von Karosseriebauteilen im Presswerk. In Abschnitt 1.3 wird anschließend der Aufbau der Arbeit erläutert.

1.2 Zielsetzung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist die frühzeitige und automatisierte Erkennung des Verlaufs verschiedener Qualitätsmerkmale und der Entwurf einer Regelungsstruktur für ein rechtzeitiges Gegensteuern durch einen automatisierten Eingriff in den im Presswerk eines Automobilherstellers ablaufenden Prozess. Durch den geregelten Verlauf der Qualitätsmerkmale erschließt dieser stabile Prozess ein erhebliches Kosteneinsparungspotential, so dass die Wirtschaftlichkeit des Presswerks gesteigert werden kann.

Wird der Umformprozess innerhalb eines Regelkreises betrachtet, so haben mehrere Größen einen Einfluss auf die endgültige Qualität des Bauteils. Neben den Eingangsgrößen wirken sich schwer messbare Störgrößen, wie z.B. die Werkstoffeigenschaften, die Blechdicke, der Schmier- und der Werkzeugzustand auf die Bauteilqualität aus.

In einer Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der Technischen Universität München, dem Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg) der Technischen Universität München und der Audi AG im Rahmen eines Forschungsprojekts wird eine automatische Prozessregelung im Presswerk entwickelt. Am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg) findet die Bearbeitung des Teilprojekts mit den Schwerpunkten Umformprozess und Aktorik statt (FAASS 2009). Im Teilprojekt mit den Schwerpunkten Qualitätsbewertung und Regelung werden durch das iwb umfassende Sensor- und Prozessüberwachungssysteme zur Erfassung von Prozessparametern, die Einfluss auf die Qualität ausüben, entwickelt, getestet und für die Implementierung und softwaretechnische Ankopplung an die Serienproduktion vorbereitet. Über den Entwurf eines Regelkreises für die Fertigung von Karosseriebauteilen im Presswerk wird an Serienanlagen die Machbarkeit des mechatronischen Gesamtsystems nachgewiesen.

Qualitätsmuster unterliegen höchst nichtlinearen und stochastischen Schwankungen. Zur Abbildung und analytischen Beschreibung derartiger Eigenschaftsmuster werden Neuronale Netzwerke eingesetzt. Diese besitzen die Fähigkeit, nach einer definierten Anzahl von Trainingsphasen anhand von Bauteilen zulässiger und mangelhafter Qualität den genannten Schwankungen nachzukommen. Durch die Implementierung von Neuronalen Netzen innerhalb eines Regelungssystems soll eine kontinuierliche Qualitätsüberwachung gewährleistet werden. Die Umsetzung des am iwb entwickelten Systems erfolgt in einer Serienpilotanlage im Presswerk der Audi AG am Standort Ingolstadt.

Die Entwicklung eines mechatronischen Systems, das selbsttätig auf Qualitätsschwankungen reagiert, führt zu einem stabilen und robusten Umformprozess durch die Regelung der Bauteilqualität. Es wird eine Reduzierung von Ausschuss und eine Steigerung der Ausbringung angestrebt.

1.3 Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit

Aufbau der Arbeit

Die im Rahmen der Arbeit gewählte Vorgehensweise ist Abbildung 2 zu entnehmen.

Kapitel 1 beschreibt den aktuellen Stand der Technik und der Forschung mit Fokus auf untersuchte Aufgabengebiete der vorliegenden Arbeit. Es werden ein

Überblick zur Pressentechnik gegeben und Grundkenntnisse der Umformtechnik vermittelt. Gegenwärtige Systeme für eine Prozessüberwachung und Qualitätsbewertung im Presswerk werden aufgezeigt. Des Weiteren umfasst Kapitel 1 Grundlagen der Prozessmodellierung auf Basis von Neuronalen Netzwerken sowie Ansätze und Methoden der Prozessregelung. Einsatzmöglichkeiten von modellbasierten Regelungen für die Beschreibung von Fertigungsprozessen, zusammen mit dem Lösungskonzept für die Aufgabenstellung, werden skizziert.

In Kapitel 2 wird der Versuchsträger Nr. 1 vorgestellt. Es werden das Werkzeug, die hydraulischen Pressenanlage und die potentiellen Einflussgrößen beschrieben. In diesem Zusammenhang findet die Beschreibung und Bewertung notwendiger Sensorsysteme zur Erfassung und Überwachung des Gesamtsystems statt.

Kapitel 3 befasst sich mit der anlagenspezifischen Umsetzung, Integration und Inbetriebnahme der Prozessüberwachungssysteme. Die Konstruktion der Vorrichtungen und die Ablaufschritte bei der Datenakquisition mittels der vorgestellten Systeme werden erläutert. Über eine Online-Messwerterfassung und eine entsprechende Visualisierungsoberfläche sind letztendlich sämtliche Datenflüsse zusammengefügt.

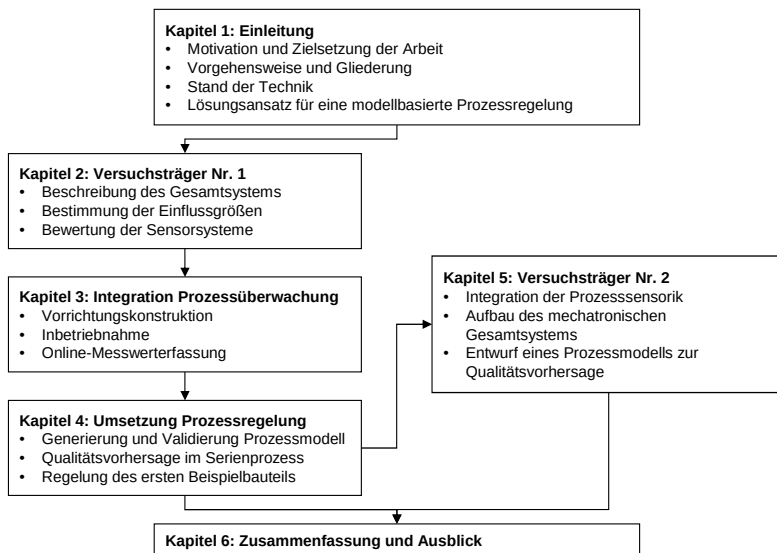


Abbildung 2: Aufbau und Vorgehensweise der Arbeit

Der Aufbau eines Prozessmodells und einer Prozessregelung wird in Kapitel 4 beschrieben. Untersuchungen zur Datenbasis und zu den messtechnisch begleiteten Abpressungen bilden die Grundlage für die Erstellung eines Modells auf Basis Neuronaler Netzwerke. Die allgemeine Vorgehensweise für die Generierung des optimalen Prozessmodells und dessen Evaluierung werden skizziert. Im Serienbetrieb wird die Funktionalität des Prozessmodells für eine Qualitätsvorhersage nachgewiesen. Abschließend folgt der Entwurf der modellbasierten Prozessregelung auf Basis Neuronaler Netze. Dessen Machbarkeit und Realisierung wird mittels einer Versuchsreihe in der Serienproduktion aufgezeigt.

Kapitel 5 beschreibt die Vorgehensweise und Umsetzung der Prozessmodellierung zur Qualitätsvorhersage und -regelung am Versuchsträger Nr. 2. Die mechanische Pressenanlage und die Einflussgrößen auf den Prozess werden hier vorgestellt. Die Schwerpunkte des Kapitels behandeln den Aufbau des mechatronischen Gesamtsystems, bestehend aus der Sensorintegration und der Prozessmodellierung.

Die Arbeit endet in Kapitel 6 mit einer Zusammenfassung der erzielten Ergebnisse und einem Ausblick auf zukünftige Möglichkeiten und Systeme zur Prozessregelung.

Versuchsträger Nr. 1

Bei dem ersten untersuchten Strukturbauteil „Verstärkung B-Säule“ handelt es sich um die Seitencrash-Verstärkung für die B-Säule des Audi Q7 (Modelljahr 2007). In den folgenden Ausführungen wird es als Versuchsträger Nr. 1 bezeichnet. Das Bauteil dient zur Verstärkung der äußeren B-Säule und wird mit dieser verschweißt.

Der Versuchsträger Nr. 1 wird aus dem nach prEN 10336 bezeichneten Werkstoff HXT700T + Z gefertigt, der zu den höchstfesten Stahlsorten gehört. Die konventionelle Bezeichnung für diesen Werkstoff ist TRIP700. TRIP-Stähle sind Mehrphasenstähle und weisen eine hohe Festigkeit auf, kombiniert mit einem hohen Umformvermögen. TRIP steht für „Transformation Induced Plasticity“ (verformungsinduzierte Plastizität). Der Werkstoff ist kaltgewalzt und feuerverzinkt. FAASS 2009 gibt einen Überblick über die Werkstoffcharakteristik, die chemische Zusammensetzung und die Gefügestruktur dieses Werkstoffs. Die Ausgangsplatine besitzt eine Blechdicke von 2 mm und hat die Abmessungen 1060 × 280 mm. Die Komplexität beim Umformen ergibt sich aus einer sehr ho-

hen Ziehtiefe. Die Ausgangsplatine und das fertige Bauteil sind in Abbildung 3 dargestellt.



Abbildung 3: Ausgangsplatine (links) und Fertigteil (rechts) des Versuchsträgers Nr. 1

Die Hubzahl, mit der die Bauteile gefertigt werden, beträgt 5 bis 6 Hub/min. Eine Produktionsreihe, auch Abpressung genannt, umfasst in der Regel zwischen 1000 und 2000 Bauteile. Tabelle 1 gibt beispielhaft einen Auszug typischer mechanischer Kennwerte des Werkstoffs TRIP700, einer im Serienprozess eingesetzten Platine. Die Werte wurden im Zugversuch nach EN 10002-1 quer zur Walzrichtung ermittelt.

Werkstoff	R_m [N/mm ²]	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	A_g [%]	A_{80} [%]	n_{90} [-]	r_{90} [-]
TRIP700	703	490	22	27	0,2	1

Tabelle 1: Typische mechanische Kennwerte des Werkstoffs TRIP700

Versuchsträger Nr. 2

Für die Erstellung einer Datenbasis und einer modellbasierten Prozessregelung wurde als zweites Anwendungsbeispiel das Karosserieaußenteil Seitenwandrahmen rechts des Audi A3 Sportback (Modelljahr 2007) untersucht, skizziert in Abbildung 4. Dieses Bauteil wird im Folgenden unter der Bezeichnung Versuchsträger Nr. 2 aufgeführt.



Abbildung 4: Platine (links) und Fertigteil (rechts) des Versuchsträgers Nr. 2

Die Ausgangsplatine besitzt eine Blechdicke von 0,84 mm und hat die Abmessungen 2782 x 1228 mm. Bei dem betrachteten Werkstoff handelt es sich um den IF-Stahl (Interstitial Free) DC07, der über sehr gute Zieheigenschaften verfügt. Exemplarisch sind in Tabelle 2 die typischen mechanischen Werkstoffkennwerte einer Zugversuchsprobe nach EN 10002-1, 90° zur Walzrichtung, dargestellt.

Werkstoff	R_m [N/mm ²]	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	A_g [%]	A_{80} [%]	n_{90} [-]	r_{90} [-]
DC07	283	139	26	47	0,24	2,83

Tabelle 2: Typische mechanische Kennwerte des Werkstoffs DC07

Das einfachwirkend aufgebaute Ziehwerkzeug besteht aus der Matrize, dem Stempel und dem Blechhalter. Des Weiteren besitzt das Werkzeug innere Blechhalter, bestehend aus dem Stempel und den Matrizeneinsätzen. Die Matrizeneinsätze befinden sich zusammen mit der Matrize im Werkzeugoberteil und nehmen über Stickstoff-Gasdruckfedern die Ziehtiefendifferenz zwischen dem Türeinstiegsbereich und dem äußeren Blechhalter auf. Nähere Informationen zum Aufbau und zur Funktionsweise des Ziehwerkzeugs sowie zum eingesetzten Werkstoff können FAASS 2009 entnommen werden.

1.4 Stand der Technik

1.4.1 Prozesskette im Presswerk

Im Presswerk werden die unterschiedlichen Prozessschritte automatisiert durch Pressenanlagen ausgeführt. Es handelt sich überwiegend um Großraumsauger-transferpressen oder um Pressenlinien, bei denen Einzelpressen hintereinander verkettet sind (SCHULER 1996). Bandschneideanlagen stehen in der Prozesskette einen Schritt vor den Bearbeitungsabläufen in Pressenanlagen. Die angelieferten Stahl- und Aluminiumbänder (z.B.: Firma ThyssenKrupp AG) in Form von aufgewickelten Coils werden abgewickelt, gerichtet, zu formgerechten Platinen beschnitten und zu einem Platinenpaket gestapelt.

Die Prozesskette in Abbildung 5 startet im Platinenlader mit der Vereinzelung der Platinen eines Stapels über Transportsysteme, sog. Feeder, mit Saugern oder Saugerbrücken. Die Platinen werden gereinigt, falls notwendig beölt, um das Umformverhalten zu begünstigen, und anschließend in die erste Stufe, die Zieh-

stufe, eingelegt. Hier im Tiefziehprozess findet das erste formgebende Fertigungsverfahren statt, bei dem die Platine zum Ziehteil umgeformt wird. Es folgen die Beschneideoperationen für die Erzeugung der Außenform, der großen Ausschnitte und der Lochungen des Bauteils. Unter Anderem wird dabei der Ziehrand vom Bauteil getrennt. Die nachstehenden Stufen sind für das Abstellen der Flansche und die Einbringung von Nebenformelementen zuständig. Im Nachformen werden Teilbereiche, die nicht fertiggezogen werden konnten, in die geforderte Lage gebracht. Es handelt sich um eine Mischform aus Biegen, Dehnen und Stauchen (DANZBERG 2004). Am Ende der Prozesskette werden die Bauteile auf das Auslaufband abgelegt und über eine Sichtkontrolle durch die Fertigungsfachkraft die Qualität für jedes einzelne Bauteil festgestellt. Abgeschlossen ist die Fertigung im Presswerk mit dem Abstackeln und der Einsortierung der fertigen Bauteile in Behälter.

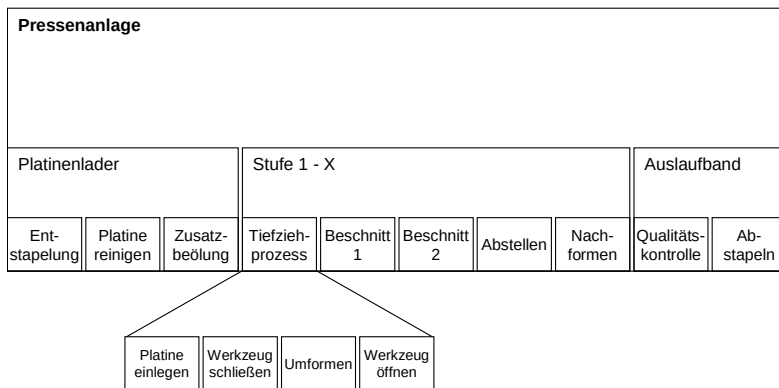


Abbildung 5: Prozesskette innerhalb einer Pressenanlage in Anlehnung an GIRSCHESKI 2004

1.4.2 Pressenanlagen

1.4.2.1 Pressentechnik

Pressenanlagen zur Herstellung von Karosseriebauteilen können hydraulisch (kraftgebunden) oder mechanisch (weggebunden) angetrieben sein. Eine Pressenanlage ist grundsätzlich aus der ersten Presse für die Ziehoperation und weite-

ren Folgepressen für die Nachfolgeoperationen, wie Nachform-, Loch- und Schneideoperationen, aufgebaut. In Pressenanlagen wird die erste Stufe als Kopfpresse bzw. Ziehpresse bezeichnet (Abbildung 6).

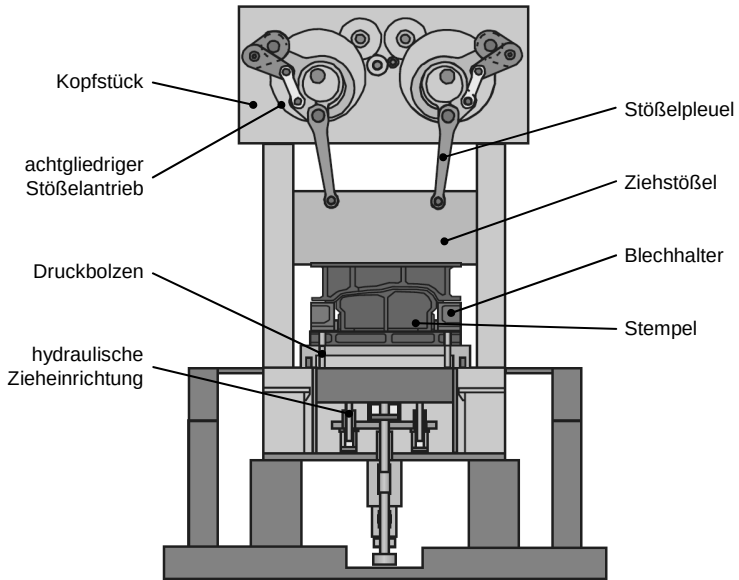


Abbildung 6: *Aufbau einer einfachwirkenden mechanischen Presse*
(SCHULER 1996)

Der Tiefziehprozess findet an dieser Stelle statt. Die Ziehpresse kann einfach- oder doppelwirkend ausgeführt sein. Bei einfachwirkenden Tiefziehpressen wird die Blechhalterkraft durch eine Zieheinrichtung übertragen. Die Umform- und die Blechhalterkraft werden vom Stößel durch Verdrängung der Zieheinrichtung nach unten aufgebracht. Doppeltwirkende Pressen besitzen zusätzlich zum Ziehstößel einen separaten Blechhalterstößel. Beide werden von oben betätigt (SCHULER 1996, TSCHÄTSCH & DIETRICH 2008, BOGON 1998, BAUR 2003).

Mechanische Pressen

Mechanische Pressen zeichnen sich dadurch aus, dass die Bewegung der Exzenterwelle über mehrere Pleuel auf den Pressenstößel übertragen wird. Der Exzenter- oder Kurbelantrieb weist einen charakteristischen sinusförmigen Bewegungsablauf auf.

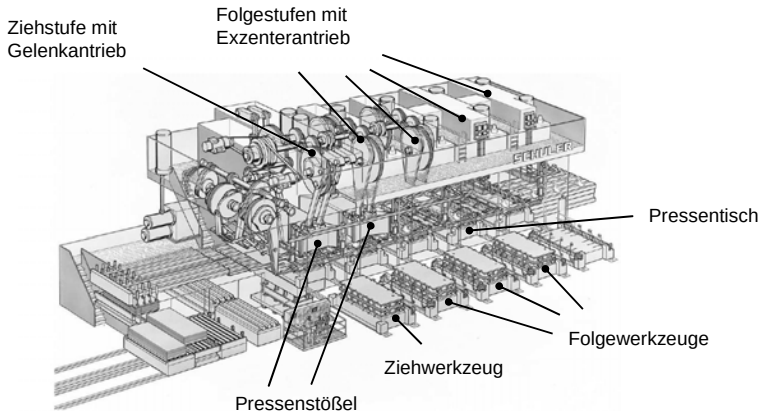


Abbildung 7: Mechanisch angetriebene Transferpresse mit Saugerbrücken-Transfer (SCHULER 1996, BRAEDEL 2009)

Für die Herstellung von großflächigen Karosseriebauteilen (z.B.: Seitenwandrahmen, Dächer, Bodengruppen, etc.) werden bevorzugt Großraumsaugertransferpressen bzw. Großteil-Transferpressen mit Saugerbrücken-Transfersystem, illustriert in Abbildung 7, verwendet. Sie sind in der Regel mit einfachwirkenden Ziehpressen ausgestattet. Im Laderbereich werden die Bauteile über Magnetbänder befördert. Der elektronische Transfer zwischen den einzelnen Stufen sorgt für optimale Transportbedingungen der Bauteile von einer Stufe zur nächsten. Ausführungsarten der Pressenanlagen haben meist sechs Stufen und erreichen Hubzahlen zwischen 10 und 30 Teile/min (SCHULER 1996, UMFORMTECHNIK ERFURT 2003, DOEGE & BEHRENS 2007). Die gesamten Bewegungsabläufe und Pressenfunktionen sind über verkettete speicherprogrammierbare Steuerungen (SPS) koordiniert. Abhängig vom Maschinentyp ist die Steuerung in mehrere Funktionsgruppen unterteilt:

- Einspeisung
- Hauptantrieb
- Sicherheitssteuerung
- Stößelfunktionen (Verriegelung, Überlastsicherung, Gewichtskraftausgleich, Werkzeugspanner, Verstellung)

- Zieheinrichtungs- bzw. Blechhalterfunktionen (Druckregelung, Verstellung)
- Schiebetischfunktionen (Fahren, Heben bzw. Senken, Spannen)
- Funktionen der Werkstücktransporteinrichtungen und der Werkzeuge
- Funktionen für Hydraulik, Pneumatik, Schmierung
- Sonderfunktionen für den Werkzeugwechsel

Die Pressensteuerung übernimmt die Erfassung der Signale und Daten von Bedienelementen und Sensoren der Maschine. Sie ist weiterhin für deren Umsetzung in Steuerbefehle an die Stellglieder und die Regelung der Maschine zuständig.

Hydraulische Pressen

Der Antrieb des Stößels wird bei hydraulischen Pressen über Hydraulikzylinder im Kopfstück der Presse realisiert. Über den Ölzufluss in die Hydraulikzylinder lässt sich die erforderliche Kraft über den gesamten Pressenhub einstellen (Abbildung 8).

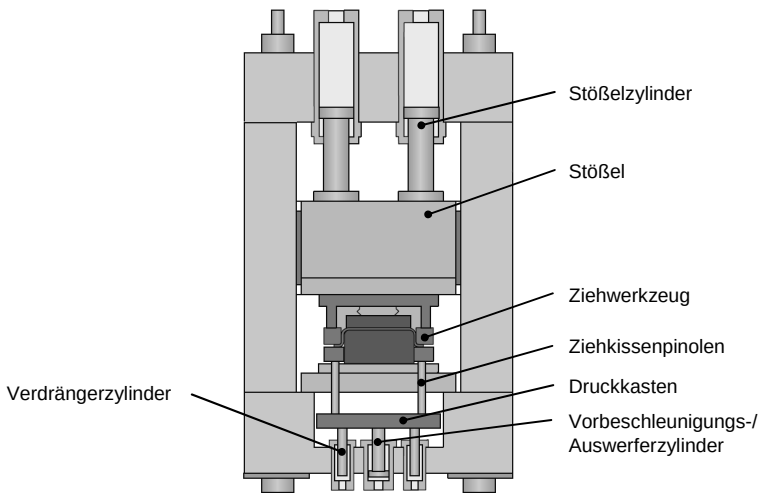


Abbildung 8: Einfachwirkende hydraulische Presse mit aktivem Ziehkissen (SCHULER 1996)

Der Stößelzylinder übernimmt zusammen mit der Stößelsteuerung die Aufgabe, den Bewegungsablauf im Pressenzyklus zu koordinieren. Die Kraft, der Weg und die Geschwindigkeit der hydraulischen Pressen werden über die Regulierung, d. h. über die Wirkung, die Zufuhr und die Menge der Druckflüssigkeit erzeugt. Die Durchflussrichtung bestimmt die Bewegungsrichtung des Stößels. Damit kann die Stößelgeschwindigkeit dem Arbeitsprozess angepasst und das Aufsetzen des Werkzeugoberteils gezielt gesteuert werden (SCHULER 1996, LANGE 1984).

1.4.2.2 Zieheinrichtung

Die Zieheinrichtung (oder das Ziehkissen) übernimmt die Aufgabe der Blechhaltung beim Tiefziehen in mechanischen und hydraulischen Pressen und verrichtet den größten Teil der Umformarbeit. Sie besteht aus Verdrängerzylindern, Druckkasten und Ziehkissenpinolen. Während des Ziehvorgangs können dadurch die Faltenbildung im Flanschbereich vermieden und der Werkstofffluss gesteuert werden. Zieheinrichtungen können pneumatisch oder hydraulisch betätigt werden, wobei sich in der Automobilindustrie hydraulische Zieheinrichtungen mit druckgeregelten Hydraulikzylindern (Verdrängerzylindern), veranschaulicht in Abbildung 9, durchgesetzt haben.

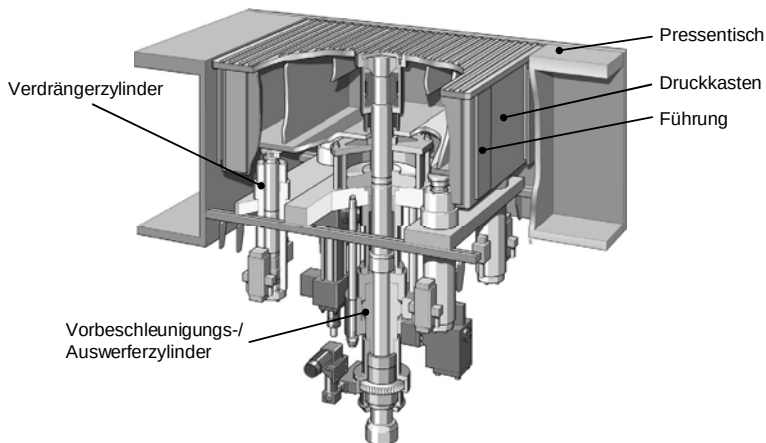


Abbildung 9: Aufbau einer hydraulischen Vier-Punkt-Zieheinrichtung (SCHULER 1996)

Die Blechhalterkraft wird beim Niedergang des Stößels über die Verdrängerzylinder erzeugt und muss während des gesamten Tiefziehvorgangs konstant und schwingungsfrei gehalten werden. Über die Ziehkissenregelung lassen sich die Verdrängerzylinder bei modernen Anlagen einzeln ansteuern und erlauben somit eine beliebige Einstellung der Blechhalterkraft, sowohl bezüglich ihres Niveaus als auch ihrer Verteilung. Des Weiteren übernimmt das Ziehkissen die Vorbeschleunigung und das Ausregeln der typischen Schwingungen beim Auftreffen des Stößels (BRAEDEL 2009, FAASS 2009, SCHULER 1996, HOFFMANN 1991, TEUTRINE & MÜLLER 2000). Ausführungsarten von Zieheinrichtungen existieren gegenwärtig mit einem, vier, sechs und acht Verdrängerzylinder.

1.4.3 Ziehwerkzeuge

Ziehwerkzeuge sind für den Ziehvorgang in der ersten Pressenstufe, der Ziehstufe der Pressenanlage, zuständig. Abbildung 10 skizziert den Aufbau eines ein-fachwirkenden Ziehwerkzeugs. Am Stößel der Presse ist das Werkzeugoberteil mit Matrize und oberem Blechhalter befestigt. Das Werkzeugunterteil mit Stempel und unterer Blechhalter, einschließlich der Blechhalterpinolen ist auf dem Pressentisch angebunden.

Für die Formgebung verantwortlich sind Matrize und Stempel des Ziehwerkzeugs. Am Werkzeugunterteil sind Freigüsse angebracht, die einen Kontakt der Ziehkissenpinolen mit den Blechhalterpinolen ermöglichen, so dass die Kraftübertragung vom Ziehkissen zum Ziehwerkzeug stattfinden kann. Beim Niedergang des Pressenstößels und damit ebenfalls des Werkzeugoberteils bauen die hydraulischen Verdrängerzylinder des Ziehkissens eine passive Gegenkraft auf. Zum Schutz der Wirkflächen von Stempel und Matrize sind am Werkzeugunterteil Distanzen montiert. Sie werden bei einem Leerhub im unteren Umkehrpunkt und zur gezielten Bauteilausprägung in Kontakt gebracht. Während der Umformung wird die Platine zwischen oberem und unterem Blechhalter fixiert und damit die Blechhalterkraft erzeugt, die den Werkstofffluss im Werkzeug bestimmt. Des Weiteren können zur Beeinflussung des Werkstoffflusses sogenannte Zieh-sicken im Blechhalter und Blechhalterdistanzen zum Einsatz kommen. Blechhalterdistanzen werden zwischen oberem und unterem Blechhalter umlaufend angeordnet. Werden sie in Kontakt gebracht, entsteht ein Kraftnebenschluss, die Blechhalterkraft verringert sich lokal und der Werkstofffluss wird begünstigt. Damit kann gezielt Einfluss auf die Bauteilqualität genommen werden (BRAEDEL 2009, FAASS 2009, GIRSCHEWSKI 2004).

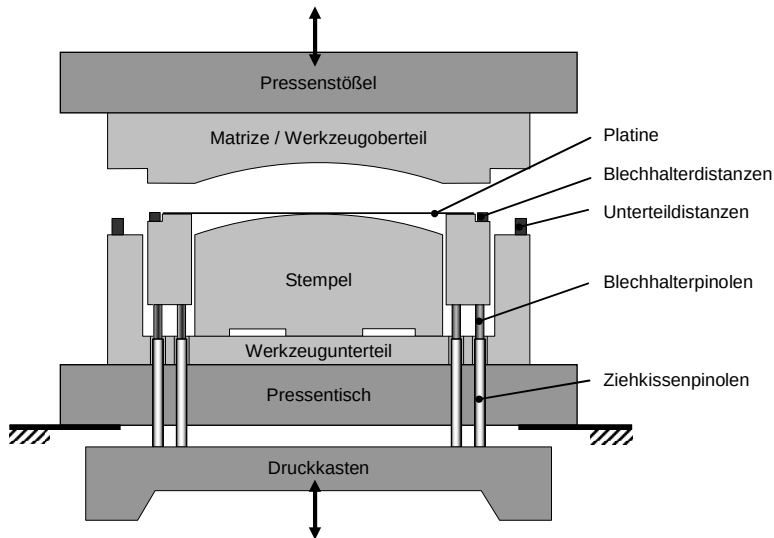


Abbildung 10: Aufbau eines einfachwirkenden Ziehwerkzeugs (BRAEDEL 2009)

Der Ablauf beim einfachwirkenden Ziehen umfasst folgende Schritte:

- Einlegen der Platine ins Werkzeug
- Absenken des Werkzeugoberteils und Schließen des Blechhalters
- Ziehen bzw. Umformen der Platine
- Öffnen des Werkzeugs und Entnahme des umgeformten Bauteils

1.4.4 Qualitätsmängel von Karosseriebauteilen

Bei der Serienproduktion von Karosseriebauteilen im Presswerk können mehrere Arten von Qualitätsmängeln auftreten. Im Wesentlichen wird eine Unterteilung nach Abbildung 11 vorgenommen. Es existieren Fehler bzgl. Oberfläche, Form und Dimension. Diese drei Kategorien von Qualitätsfehlern und deren Untergruppen gemäß Abbildung 11 haben ihren Hauptentstehungsort im Ziehprozess, teilweise jedoch ebenfalls in den Nachfolgeoperationen. Reißen und Einschnürungen sind beispielsweise Qualitätsfehler, die typischerweise während des Ziehprozesses entstehen. Detaillierte Beschreibungen zu den einzelnen Fehlerarten,

zu deren Ursachen und zu deren Entstehungsorten werden in FAASS 2009 gegeben. Ziel ist es, die genannten Qualitätsmängel während der Produktion zu vermeiden. Ist dies technisch oder prozessbedingt nicht umfassend möglich, müssen entsprechende Systeme zur Überwachung und Detektion der Qualität entwickelt und in die Anlage integriert werden.

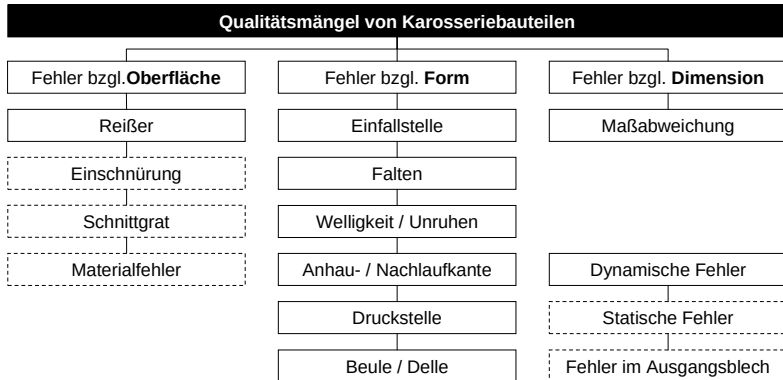


Abbildung 11: Qualitätsmängel von Karosseriebauteilen (FAASS 2009)

1.4.5 Prozesssensorik bei der Fertigung von Karosseriebauteilen

Bereits heute kommen im Presswerk von der Coilanlieferung bis zum fertigen Bauteil verschiedenste Sensorsysteme zum Einsatz. Die meisten dieser Systeme erfassen Zustände, Positionen und das Kraftverhalten der Pressenanlagen. Sind Informationen über Werkstoffeigenschaften, Blechdicken sowie Rauheit und Schmierung der Platinen oder über die Qualität der fertigen Bauteile im Pressentakt erforderlich, so ist festzuhalten, dass die gegenwärtigen technischen Lösungen und Systeme sich lediglich teilweise oder als Insellösungen bewährt haben.

1.4.5.1 Sensorsysteme in modernen Pressenanlagen

Die modernen Pressenanlagen, wie so genannte Großraumsaugertransferpressen, weisen eine umfangreiche Ausstattung hinsichtlich Prozesssensorik auf. Die integrierten Sensorsysteme dienen zur Überwachung, Regelung und Begrenzung der Prozessgrößen. Sie sind direkt mit speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) gekoppelt und führen in der Zykluszeit der Gesamtmaschine Abfragen,

Rechenoperationen und die Erzeugung von Steuerbefehlen für Aktoren aus. Eine Zykluszeit beträgt in der Regel zwischen 10 und 130 ms. Für Regelaufgaben sind zusätzliche Module in der SPS verbaut, die die Aufgabe übernehmen, den Zyklus zu unterbrechen, um Lesebefehle der Sensoren und Stellbefehle der Aktoren in einem kürzeren Takt von bis zu 2 ms durchzuführen.

Tabelle 3 gibt einen kurzen Überblick über die für die vorliegende Arbeit relevanten Sensorsystemen in modernen Pressenanlagen. Die Messgrößen, die Sensorsysteme und deren Hersteller, die Genauigkeit und die signalauswertende SPS sind exemplarisch für eine Großraumsaugertransferpresse aufgeführt.

Messgröße	Sensorsystem	Hersteller	SPS	Genauigkeit
Luftdruck Stößelgewichts- kraftausgleich	Druckaufnehmer	Wika	Sektion 1	1/10 bar
Hydraulische Überlastsicherung Stößel	1 Druckaufnehmer → Vorspanndruck 4 Druckaufnehmer → Ist-Druck	Wika	Sektion 1	1/10 bar
Verdrängezylinder- kräfte	8 Druckaufnehmer → Ist-Verdränger-zylinderdruck	Wika	Ziehkissen	1/10 bar
Kissenweg	2 Positionsgeber (Encoder) an Kissenplatte links/rechts	T&R	Ziehkissen	1/10 mm
Presskraft	4 Dehnmessstreifen am Ziehkissentisch	HBM	Ziehkissen	1 kN
Stößelposition	Lineargeber direkt am Stößel	Balluff	Ziehkissen	1/10 mm

Tabelle 3: Ausschnitt bedeutender Sensorsysteme zur Prozessüberwachung in modernen Pressenanlagen

Vom Laderbereich über die einzelnen Operationen in der Pressenanlage bis hin zum Auslaufband sind Sensorsysteme zur Messung von Prozessgrößen, wie Kraft, Position etc., integriert. Die Einbindung dieser Systeme stellt einen Schritt auf dem Weg zur Prozessüberwachung und Prozessregelung dar. Dieses Vorhaben lässt sich jedoch nur mit hohem finanziellem und technischem Aufwand verwirklichen. Die komplexe Einbindung der vorhandenen Systeme in die SPS-Struktur der Pressenanlage erlaubt keinen Zugriff auf Daten der Sensoren von einer externen Messplattform. In der Gesamtzykluszeit ist eine Abfrage der Sensoren möglich, jedoch unzureichend, da die Abtastzeit für die stattfindenden Prozesse zu hoch ist. Auf der anderen Seite verursachen eigens programmierte Bausteine zur Unterbrechung der Taktzeit und zum Ablegen dieser Informationen in externe Systeme eine starke Zunahme der Gesamtzykluszeit. Ein alternativer

Weg zur Einbindung der Pressensensoren führt über das direkte Abgreifen der analogen Ausgänge.

Die Umsetzung dieser Variante beansprucht eine Erweiterung der Infrastruktur und verursacht hohe Kosten. Die Implementierung der Sensorsysteme der Pressenanlage muss gezielt und abhängig vom Verhältnis zwischen Informationsgehalt über den Serienprozess und Aufwand zur Realisierung der Datenkopplung stattfinden.

1.4.5.2 Weitere Sensorsysteme für Pressenanlagen

Im Serienbetrieb einer Pressenstraße ist die hochgenaue Messung der Blechdicke bis zum heutigen Zeitpunkt noch nicht umgesetzt worden. Stand der Technik ist eine induktive Doppelblechkontrolle von Platinen bei der Entstapelung von Blechpaketen und vor dem Eingang in die erste Stufe der Pressenlinie (UMFORMTECHNIK ERFURT 2003). Für eine derartige Messung sind die Anforderungen mit Genauigkeiten von ca. 0,1 mm niedrig. Schwankungen bezüglich der Blechdicke liegen jedoch in Bereichen von ca. 0,01 mm (FAASS 2009) und können mit diesen Sensorsystemen nicht erfasst werden. Weitere Messsysteme zur Kontrolle der Blechdicke werden in Walzwerken eingesetzt. Hier können am laufenden Band, nach dem Walzprozess und vor dem Wickelvorgang zum fertigen Coil, die Schwankungen der Dicke des Bandes erfasst und kontrolliert werden. Ein automatisiertes System wird z.B. von der Firma NoKra angeboten. Die genannte Lösung kann lediglich an kontinuierlichen Bändern realisiert werden und erfordert einen hohen Einbauraum innerhalb einer Anlage. Für eine Integration in eine Pressenanlage ist sie damit ungeeignet bzw. dies ist nur mit hohem finanziellem Aufwand möglich.

Ein optimaler Tiefziehprozess setzt enge Toleranzen im tribologischen Verhalten des Materials voraus. Dazu gehört neben der kontinuierlichen Erfassung der Ölschichtdicke ebenfalls die Rauheitsmessung. Die Dicke und die Homogenität der Ölauflage und der Oberflächenrauheit der Stahlbänder bzw. -bleche beeinflussen unmittelbar den Umformprozess und die Qualität der Bauteile. Messgeräte zur Ölschichtdickenmessung auf Stahlbändern existieren gegenwärtig als Offline-Anwendungen im Labor oder als Handgeräte (Fa. Amepa). Die erhaltenen Informationen haben jedoch stichprobenartigen Charakter und lassen keine kontinuierliche Verfolgung des Produktionsprozesses zu. Über die Automatisierung der Systeme und Integration in Bandschneidanlagen in Presswerken und in

Walzwerken von Stahllieferanten sind bereits Lösungen für eine Messung des Beölungsgrades von kompletten Coils realisiert. Wenige Firmen (z.B. Fa. Amepa) bieten eine Technologie basierend auf dem Reflexionsprinzip, kombiniert mit der Absorption des Lichts durch die vorhandene Ölschicht, an. Gemäß des Lambert-Beer-Gesetzes (BILSTEIN ET AL. 2006) werden spezifische Wellenlängen des abgestrahlten Lichts in deren Intensität gedämpft und können gezielt ausgewertet werden. In BILSTEIN ET AL. 2006 ist ein Lösungskonzept und -verfahren der Fa. Amepa skizziert, über das an kontinuierlichen Stahlbändern die Rauheit erfasst werden kann. Aktuelle industrielle Umsetzungen genannter Systeme sind in Bandschneideanlagen zwischen der Coilabwicklung und dem Platinenzuschnitt anzutreffen. In Pressenanlagen hat dieses Verfahren, u. a. bedingt durch die begrenzenden Einbaumöglichkeiten, noch keinen Einzug gefunden.

Die Bestimmung der mechanischen Werkstoffeigenschaften der Platinen, die der Pressenanlage zugeführt werden, erfolgt zum gegenwärtigen Zeitpunkt überwiegend über ein zerstörendes Prüfverfahren. Im Zugversuch nach EN 10002-1 wird das Prüfteil bis zum Bruch belastet, um daraus die Materialeigenschaften zu erhalten. Aufgrund des hohen Aufwands des zerstörenden Verfahrens und des Fehlens der Halbzeuge in den Nachfolgeprozessen ist eine kontinuierliche Messung der Werkstoffkennwerte nicht denkbar. Alternativ ist eine indirekte Bestimmung der mechanischen Werkstoffeigenschaften über zerstörungsfreie Prüfverfahren möglich. Ultraschallverfahren, Röntgenverfahren und das elektromagnetische Verfahren zählen nach aktuellem Stand der Technik zu den Systemen zerstörungsfreier Prüfungen mit dem höchsten Potenzial für eine kontinuierliche Ermittlung von Werkstoffeigenschaften. Das Ultraschallverfahren dient der Detektierung von inneren und äußeren Fehlern und Inhomogenitäten aller Art in gut schallleitenden Werkstoffen. Das Messprinzip beruht auf der geradlinigen Ausbreitung der Schallwellen in Metallen als mechanische Schwingung mit hoher Geschwindigkeit und deren Reflexion an den Grenzflächen (KRAUTKRÄMER 1986). Beim Röntgenverfahren ereignet sich die zerstörungsfreie Prüfung über die Schwächung der Strahlung beim Durchgang durch den Prüfkörper. Gegenwärtig kommt das Verfahren zur Textur- und Anisotropiemessungen und zur Eigenspannungsmessung zum Einsatz (GÖBBELS & THEINER 1985). Der hohe erforderliche Aufwand für den Aufbau des Messsystems stellt einen begrenzenden Faktor für eine automatisierte Anwendung dar. Zu den elektromagnetischen Verfahren zählen sämtliche Methoden in Verbindung mit elektromagnetischen Feldern, Effekten elektromagnetischer Induktion und sich ändernden Strömen. Das

induktive Verfahren (Wirbelstromverfahren) repräsentiert eine der wichtigsten Messmethoden und dient als Hauptmesssystem in der vorliegenden Arbeit. Die Details des Verfahrens sind im folgenden Abschnitt erläutert.

1.4.5.3 Wirbelstromprinzip bei der zerstörungsfreien Ermittlung mechanischer Werkstoffkennwerte

Über das Wirbelstromverfahren nach DIN 54140 werden indirekt und zerstörungsfrei anhand der physikalischen bzw. elektromagnetischen Eigenschaften eines Werkstoffs die mechanischen Werkstoffkennwerte, wie z.B. Zugfestigkeit R_m , Streckgrenze $R_{p0,2}$, Gleichmaßdehnung A_g , Bruchdehnung A_{80} , Verfestigungsexponent n_{90} und Anisotropie r_{90} , bestimmt. Elektrisch leitende Materialien können über das Anlegen eines zeitlich sich ändernden magnetischen Feldes berührungslos und innerhalb kürzester Zeit vermessen werden. Sowohl mechanische als auch elektrische Eigenschaften, wie z.B. elektrische Leitfähigkeit σ , Permeabilität μ und Hysterese, hängen vom Werkstoffzustand und damit vom Gefüge, von Legierungsbestandteilen, der Korngröße, der Versetzungsdichte, der Anisotropie usw. ab. Damit existiert ein Korrelationsverhalten zwischen elektromagnetischen und mechanischen Eigenschaften eines Werkstoffs. Die exakten Wirkzusammenhänge sind in mehreren Arbeiten, darunter SCHWIND 1998 und RUZOVIC 2004 bereits fundiert analysiert und über mathematische Modelle beschrieben worden. Ein physikalischer Zusammenhang konnte bis heute nicht aufgestellt werden. Die erarbeiteten Korrelationen weisen für die quantitative Berechnung der oben genannten mechanischen Eigenschaften abhängig vom untersuchten Werkstoff Genauigkeiten von 3% bis 10% auf. Damit stoßen diese mathematischen Modelle bei sehr niedrig ausgeprägten Werkstoffschwankungen an ihre Grenzen.

Das Wirbelstromverfahren wird über den physikalischen Effekt der Induktion in einem Körper mit der zweiten Maxwellschen Gleichung (1) wiedergegeben. Sie beschreibt den Zusammenhang zwischen elektrischen und magnetischen Feldern (KURZWEIL ET AL. 2009).

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad \text{II. Maxwellsche Gleichung} \quad (1)$$

$\mathbf{B}$ magnetische Flussdichte
 t Zeitvariable

E elektrische Feldstärke

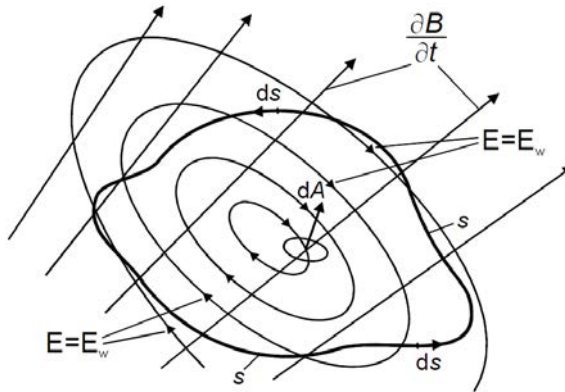


Abbildung 12: Induktion in einem Körper nach SCHWIND 1998

Abbildung 12 skizziert ein zeitvariantes magnetisches Feld ($\partial \mathbf{B} / \partial t$), das von einem elektrischen Wechselfeld $\mathbf{E} = \mathbf{E}_w$ mit geschlossenen Feldlinien begleitet wird. Befindet sich ein elektrisch leitfähiger Körper im induzierten elektrischen Wechselfeld, wird auf die frei beweglichen Ladungsträger im Körper dadurch eine Kraft ausgeübt. Die Ladungsträger bewegen sich auf geschlossenen Bahnen und erzeugen elektrische Ströme, sogenannte Wirbelströme. RUZOVIC 2004 stellt die Wirkungsweise unterschiedlicher Frequenzbereiche der Wirbelströme auf den geprüften Körper vor. Bei hohen Frequenzen verdichten sich die Wirbelströme auf der Oberfläche des Körpers, während dessen sie bei niedrigen Frequenzen tiefer eindringen. Die Phase der Wirbelströme unterliegt einem weiteren Effekt. Mit zunehmender Eindringtiefe erhöht sich die Phasenverschiebung zwischen den Wirbelströmen auf der Oberfläche und denen innerhalb des geprüften Körpers (CECCO ET AL. 1987).

Die genaue Funktionsweise und das Messprinzip eines Wirbelstromverfahrens sind idealisiert in Abbildung 13 skizziert. Zwei räumlich getrennte Leiterschleifen dienen als Erreger- und Empfängerspule.

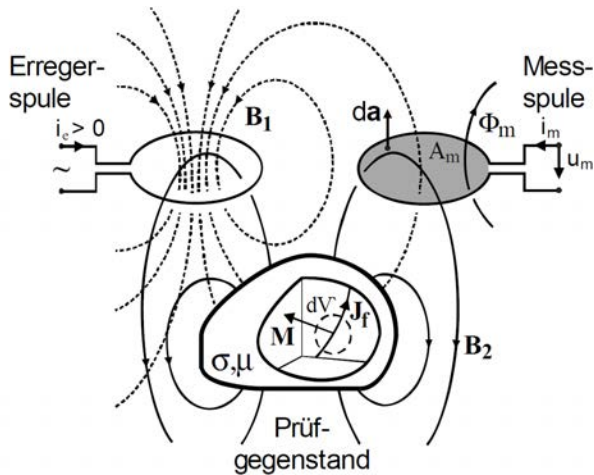


Abbildung 13: Induktion bei einem elektrisch leitfähigen Körper im induzierten elektrischen Wechselfeld nach SCHWIND 1998

Der Prüfkörper befindet sich in den elektromagnetischen Feldern beider Schleifen. Leitfähigkeit, Permeabilität und Hystereseverhalten des Prüfkörpers bestimmen die Stärke und die Ausdehnung der elektromagnetischen Felder. Die Erregerspule erzeugt das Primärfeld, das zeitvariante Magnetfeld $\mathbf{B}_1$, das im Prüfkörper Wirbelströme induziert. Nach der Lenzschen Regel versucht der induzierte Strom eine Änderung des magnetischen Feldes zu verhindern (SCHRÖDER 2007). Damit stellt sich die Richtung der Wirbelströme so ein, dass das von ihm erzeugte Sekundärfeld, das magnetische Feld $\mathbf{B}_2$, dem Magnetfeld der Erregerspule entgegenwirkt. Im Sekundärfeld $\mathbf{B}_2$ sind sämtliche Informationen über die Werkstoffeigenschaften des Prüfkörpers enthalten. Primärfeld $\mathbf{B}_1$ und Sekundärfeld $\mathbf{B}_2$ überlagern sich zum Gesamtfeld $\mathbf{B}$:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_1 + \mathbf{B}_2 \quad (2)$$

- $\mathbf{B}$ Gesamtfeld der magnetischen Flussdichte
- $\mathbf{B}_1$ Primärfeld der magnetischen Flussdichte
- $\mathbf{B}_2$ Sekundärfeld der magnetischen Flussdichte

Der Einfluss des Prüfkörpers auf die Empfängerspule lässt sich über die Änderung des komplexen Scheinwiderstands:

$$\underline{Z} = R + jX \quad (3)$$

$\underline{Z}$ komplexer Scheinwiderstand (Impedanz)
 R Wirkwiderstand
 X Blindwiderstand

der Spule wiedergeben, dessen Betrag als Wechselstromwiderstand bezeichnet wird. Der Realteil der Impedanz heißt Wirkwiderstand R und stellt den Ohmschen Widerstand bzw. die Verluste im System Prüfkörper-Spule dar. Der Imaginärteil wird als Blindwiderstand X bezeichnet und beschreibt die Fähigkeit des Systems, Energie aufzunehmen, im Magnetfeld zu speichern und sie wieder abzugeben. Die Energie pendelt ohne Wirkung zwischen Quelle und System hin und her, ohne dass Leistung aufgenommen wird (Blindleistung). Der induktive Blindwiderstand wird von der Frequenz der Wechselspannung und seiner Induktivität beeinflusst. Der induktive Blindwiderstand steigt, je größer die Induktivität L der Spule und je höher die Frequenz f_w der anliegenden Wechselspannung ist:

$$X = 2 \cdot \pi \cdot f_w \cdot L \quad (4)$$

f_w Frequenz der anliegenden Wechselspannung
 L Induktivität der Spule

Die induzierte Spannung resultiert aus einem Wirk- und einem Blindanteil, die eine Phasenverschiebung gegenüber dem Eingangsstrom bewirken.

Die Signaldeformation, die sich über das Gesamtfeld auch auf die Spannung in der Empfängerspule auswirkt, enthält wesentliche Informationen über den Werkstoff, da die Art der Magnetisierung stark von der Zusammensetzung und dem Gefüge des Werkstoffes abhängt (SCHWIND 1998). Mit Hilfe einer Fourieranalyse lässt sich die Messspannung in eine Grundschwingung und deren ungerade Oberwellen aufspalten, veranschaulicht in Abbildung 14.

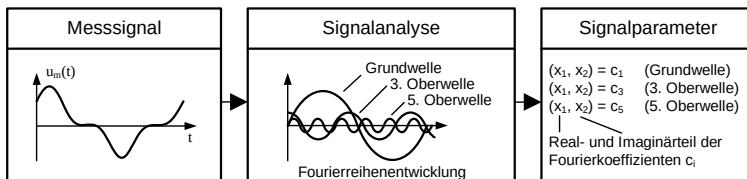


Abbildung 14: Fourieranalyse des Messsignals (SCHWIND 1998)

Die Fourierkoeffizienten geben dabei den Real- und den Imaginärteil des jeweiligen Schwingungsanteils an. Aufgrund der physikalischen Plausibilität werden diese Kenngrößen vorzugsweise in eine Phasenlage und eine Amplitude umgerechnet.

Beim Wirbelstromverfahren besteht die Möglichkeit, nur mit einer Anregungsfrequenz zu messen. Die Mehrfrequenzprüfung ist jedoch effektiver und birgt die Vorteile der Eliminierung von Störgrößen (THOMAS 1997, RUZOVIC 2004, SCHWIND 1998) und der eindeutigen Werkstoffzuordnung. Sie ist daher Stand der Technik. Die Prüfspule wird zeitgleich mit mehreren Frequenzen beaufschlagt oder die ausgesuchten Frequenzen werden sequenziell durchlaufen. Bei der ersten Methodik werden die Signale unterschiedlicher Frequenzen überlagert. Sie wird simultane Mehrfrequenzprüfung genannt und besitzt eine hohe Prüfgeschwindigkeit, die von der kleinsten Frequenz diktiert wird. Ein negativer Effekt steckt im hohen Aufwand für die Demodulation des Messsignals in den einzelnen Frequenzen. Bei der sequenziellen oder auch seriellen Mehrfrequenzprüfung erfolgt die Anregung mit verschiedenen aufeinander folgenden Frequenzen. Eine höhere Prüfgeschwindigkeit gegenüber der ersten Methodik ist damit die Folge. Die einfachere Umsetzung und die Erzeugung verzerrungsfreier Signale sprechen für die sequentielle Mehrfrequenzprüfung.

1.4.6 Qualitätsbewertung auf Basis Neuronaler Netze

Grundlagen von Neuronalen Netzwerken

Neuronale Netze sind Informationsverarbeitungssysteme, die Strukturen und Eigenschaften des menschlichen Gehirns nachbilden (Abbildung 70). In Anlehnung an das natürliche Vorbild sind Künstliche Neuronale Netze komplex und zeichnen sich durch ihre hochgradig parallele Informationsverarbeitung und ihre Anpassungs- und Lernfähigkeit (SCHELLER 1993) aus.

Des Weiteren sind sie Mittel zur Modellierung von linearen und nichtlinearen Zusammenhängen. Im Unterschied zu anderen Algorithmen und mathematischen Systemen werden Neuronale Netze nicht programmiert, sondern anhand von Trainingsbeispielen angelernet. Mit dem entstandenen Modell lassen sich anschließend die Systemzusammenhänge nachahmen (CALLAN 2003, ZELL 2000, ROJAS 1996).

Zur Beurteilung Künstlicher Neuronaler Netze müssen in erster Linie drei Kriterien in Betracht gezogen werden. Für theoretische Analysen und praktische Anwendungen führen die nachfolgend aufgezeigten Kriterien zu einer Aussage über die Fähigkeit Neuronaler Netze zur Approximation statistischer nichtlinearer Funktionen und zur Identifikation nichtlinearer dynamischer Systeme.

- Repräsentationsfähigkeit

Die Abbildungsaufgabe kann mit dem gewählten Netztyp realisiert werden

- Lernfähigkeit

Die Parameter des Neuronalen Netzes werden einer Variation unterzogen, bis die gewünschte Abbildung mit dem eingelernten Neuronalen Netz reproduziert wird. Wichtige Punkte hierbei sind die Lerngeschwindigkeit, die Stabilität des Lernergebnisses und die Online-Fähigkeit des Lernverfahrens.

- Verallgemeinerungsfähigkeit

Die Qualität des trainierten Netzes bei der Berechnung von Modellergebnissen aus einer Wertemenge außerhalb des trainierten Bereichs wird geprüft.

Elemente und Netzarchitektur

Analog dem biologischen Vorbild werden auch hier insbesondere funktionale Zusammenhänge kopiert. Neuronale Netze bestehen aus Verarbeitungseinheiten, sogenannten Neuronen, und Kanten, die die Neuronen, einem bestimmten Muster folgend, untereinander verbinden. Ein Neuron kann mehrere Eingangssignale empfangen, aber nur ein Ausgangssignal senden. Abbildung 15 verdeutlicht, dass das Ausgangssignal wieder als Eingangssignal für mehrere Neuronen verfügbar ist. Die Verarbeitung eines einzelnen Neurons, dargestellt in Abbildung 16, besteht in der Regel aus:

- der Kombination von Eingangssignalen und
- der Berechnung des Ausgangssignals aus den kombinierten Eingangssignalen mittels einer sogenannten Aktivierungsfunktion, die die Erregungsschwelle des biologischen Neurons modelliert (CALLAN 2003).

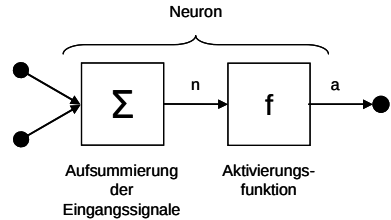
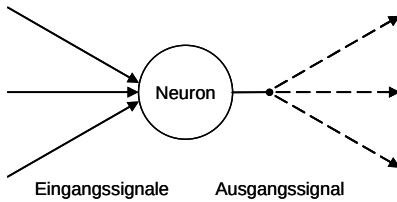


Abbildung 15: Ein- und Ausgangssignale eines Neurons

Abbildung 16: Verarbeitungsschritte eines Neurons

Neuronen sind über gerichtete und gewichtete Kanten miteinander verbunden. Sie zeigen die Richtung des Informationsflusses. Über die Gewichtung können die Signale in ihrer Wirkung verstärkt oder verringert werden. In Abbildung 17 ist die Verknüpfung der Neuronen mit unterschiedlich dicken Kanten und Kantenwerten angedeutet. Die Gewichte sind Elemente des reellen Zahlenraums.

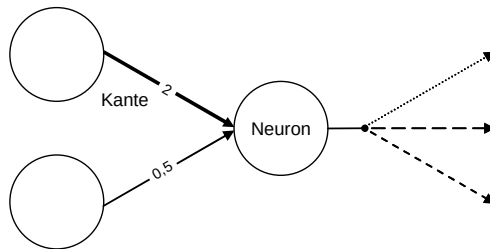


Abbildung 17: Gerichtete und gewichtete Kanten

Der Eingang eines Neurons wird aus der linearen Summation der diskret gewichteten Eingangssignale eines Neurons gebildet (CALLAN 2003, SCHELLER 1993). Das Beispiel in Abbildung 18 verdeutlicht dies.

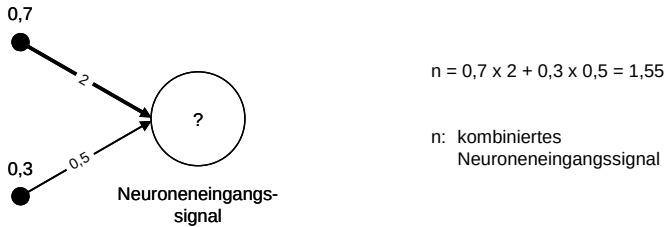


Abbildung 18: Kombination der Eingangssignale

Aus dem kombinierten Eingangssignal wird mit Hilfe einer Übertragungsfunktion, der Aktivierungsfunktion f , das Ausgangssignal a eines Neurons berechnet. Als Aktivierungsfunktion können verschiedene Funktionen wie bspw. Sprungfunktionen bzw. Schwellwertfunktionen, lineare Übertragungsfunktionen (mit/ohne Begrenzung) oder andere verwendet werden. Am häufigsten kommen dafür sigmoide Übertragungsfunktionen wie z.B. die logistische Sigmoidfunktion oder der hyperbolische Tangenssigmoid zum Einsatz, weil sie ein kontinuierliches Ausgangssignal liefern, differenzierbar sind und den Ausgabewertebereich durch asymptotisches Annähern an einen Grenzwert für große Werte begrenzen (DEMUTH ET AL. 1992-2009, VOGL ET AL. 1988). Sie bilden ihren Eingang n , der in einem Intervall von $]-\infty, +\infty[$ liegen kann, auf ein Intervall von $[0, 1]$ bzw. $[-1, 1]$ ab. Kurvenverlauf, Symbol und Gleichung aller genannten Funktionen sind in Abbildung 19 dargestellt.

Hyperbolische Tangenssigmoidfunktion	Logistische Sigmoidfunktion	Lineare Übertragungsfunktion	Schwellwertfunktion
$\text{tansig}(n) = \frac{2}{1 + e^{-2n}} - 1$	$\text{logsig}(n) = \frac{1}{1 + e^{-n}}$	$\text{purelin}(n) = n$	$\text{hardlim}(n) = \begin{cases} 1 & \text{wenn } n \geq 0 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$

Abbildung 19: Aktivierungsfunktionen eines Neurons

Ein einzelnes Neuron verfügt über eine sehr eingeschränkte Datenverarbeitungsfähigkeit. Erst der Verbund der Einheiten innerhalb eines Netzes lässt es komplexe Aufgaben durchführen (CALLAN 2003).

Das Verbindungsmuster und die Anordnung der Neuronen im Netzraum bestimmen die Netzarchitektur, auch Netztopologie genannt. Es existiert eine Vielzahl an verschiedenen Netzwerktypen, die abhängig vom Anwendungsgebiet spezifische Vor- und Nachteile aufweisen. Die Beschreibung der Netzarchitektur beschränkt sich an dieser Stelle auf die in dieser Arbeit verwendete Architektur. Ein guter Überblick der verschiedenen Netzarchitekturen ist in ZELL 2000 und PATTERSON 1997 zu finden.

In einem künstlichen Neuronalen Netz werden mehrere Neuronen miteinander verschaltet, oft werden sie dabei in Schichten angeordnet. Das am häufigsten eingesetzte Neuronale Netz ist das sog. Perceptron- oder Feedforward-Netz. Visualisiert in Abbildung 20 weist es eine feste, vorwärtsgerichtete Struktur aus zwei oder mehreren Schichten auf, wobei der Ausgang einer Schicht der jeweils nächsten Schicht als Eingang dient. Der Informationsfluss ist also von Schicht zur Schicht streng linear. Die Anzahl der Neuronen pro Schicht ist hierbei nicht festgelegt.

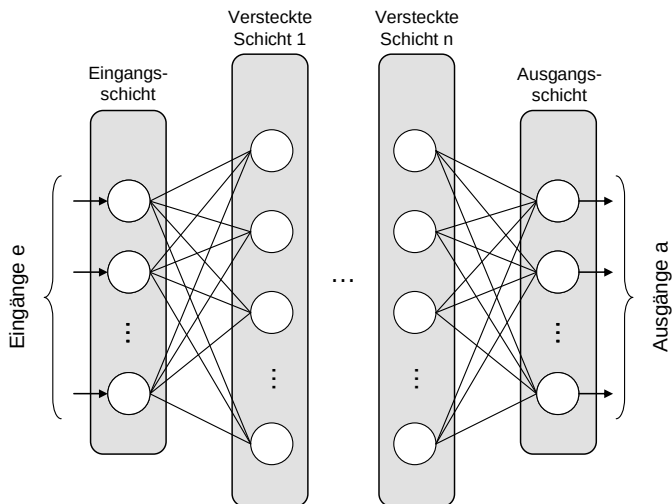


Abbildung 20: Struktur eines einfachen Feedforward-Netzes

Es gibt eine Eingabeschicht, die als Schnittstelle für die Signale der Umgebung ins Netz dient (Eingangssignale), und analog dazu eine Ausgabeschicht, die die ermittelten Netzergebnisse für die Außenwelt zur Verfügung stellt (Ausgangssignale). Alle dazwischen liegenden Schichten werden als versteckte Schichten bezeichnet. Sie dienen dazu, komplexe, nichtlineare Aufgabenstellungen zu lösen und sind in ihrer Anzahl beliebig. In der Regel sind mehr als zwei versteckte Schichten nicht sinnvoll. SCHELLER 1993 und CALLAN 2003 zeigen, dass eine hohe Anzahl an versteckten Schichten zu einem Auswendiglernen des Neuronalen Netzes führt. Damit werden trainierte Datensätze vom Netz gut reproduziert. Die Anwendung des Neuronalen Netzes auf neue Daten führt jedoch zu ungenauen Ergebnissen. Prinzipiell sind aber beliebige Verschaltungen der Schichten möglich. Wenn dynamisches Verhalten abgebildet werden soll, können auch rekurrente Netze mit Rückkopplung gebildet werden. Im Gegensatz zu den sogenannten Feedforward-Netzen zeichnen sich rekurrente Netze durch die Verbindungen von Neuronen einer Schicht zu Neuronen derselben oder einer vorangegangenen Schicht aus. Auf diese Weise können zeitlich codierte Informationen dargestellt werden. Hierauf wird in dieser Arbeit aber nicht weiter eingegangen, da die betrachteten Zusammenhänge hier statischer Natur sind und die Modellierung eines Klassifizierers erforderlich ist, der mit dem Perceptron erfüllt wird.

Die Anzahl der Neuronen in der Eingabeschicht ist mit der Zahl eingehender Signale, den sog. Merkmalen, vorgegeben. Die Anzahl der Ausgabeneuronen ist durch die Aufgabenstellung ebenfalls festgelegt. Die Anzahl der versteckten Schichten und ihrer Neuronen hingegen ist a priori nicht bestimmt, sondern lehnt sich an ähnliche, funktionierende Beispiele, falls vorhanden, an und wird empirisch ermittelt (CALLAN 2003, ZELL 2000).

Training Neuronaler Netze

Das Neuronale Netz ist in der Lage, anhand eines vorgegebenen Beispiel- bzw. Trainingssatzes zu lernen. Hierbei gibt es eine Vielzahl von möglichen Lernregeln, wie z.B. die Entwicklung bzw. das Löschen von Kanten oder die Entwicklung bzw. Löschung von Neuronen. Die häufigste und für die vorliegende Arbeit wichtigste Lernregel ist die Modifikation der Kantengewichtsfaktoren bestehender Verbindungen nach der sog. Hebb-Regel (ZELL 2000). Es wird dabei grundsätzlich zwischen überwachtem und unüberwachtem Lernen unterschieden. Im ersten Fall liegen Datensätze vor, die sowohl Eingangs- wie auch Ausgangssignale enthalten. Im zweiten Fall wird lediglich anhand von Eingangssignalen eine

Klassifizierung durchgeführt. Im Folgenden wird das überwachte Lernen betrachtet.

Beim Trainieren des Netzes werden die Gewichtungsfaktoren so lange verändert, bis die Abweichung des Netzergebnisses vom Zielwert ein Minimum erreicht hat oder bis ein Abbruchkriterium erfüllt wird. Als Maß für die Genauigkeit der Abbildung der Eingangssignale auf die Ausgangssignale dient die Summe der Abweichungsquadrate des Ausgabewertes des Neuronalen Netzes und des Zielwertes. Für die Minimierung der Fehlerquadratsumme stehen diverse Algorithmen zur Verfügung. Der bekannteste und am häufigsten zum Einsatz kommende ist der Backpropagation-Algorithmus in Kombination mit der sigmoiden Übertragungsfunktion als Aktivierungsfunktion.

Backpropagation

Mittels Gradientenabstieg versucht der Lernalgorithmus das Fehlermaß F zu minimieren:

$$F = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^k (y_{soll} - y)^2 \quad (5)$$

- F Fehlermaß: Summe der Abweichungsquadrate zwischen dem Ausgabewert des Neuronalen Netzes und dem Zielwert
- y Ausgabewert des Neuronalen Netzes
- y_{soll} Vorgabe- bzw. Zielwert des Neuronalen Netzes

Das Fehlermaß entspricht dabei der quadratischen Summe der Abweichungen zwischen Netzergebnis y und Vorgabewert y_{soll} über alle Trainingssätze. Durch Zurückpropagieren des Fehlers durch das Netz können die partiellen Ableitungen des Fehlers F nach den einzelnen Gewichtungsfaktoren w_{ij} bestimmt werden. Dies wird in jedem Trainingsschritt durchgeführt und es werden die Gewichte in Richtung des absteigenden Gradienten angepasst. Ein in SCHMIDT 2007 beschriebenes, einfaches Verfahren zur Berechnung der neuen Gewichte ist in Gleichung (6) beispielhaft aufgezeigt.

$$w_{ij}^{neu} = w_{ij}^{alt} - \mu \cdot \frac{\partial F}{\partial w_{ij}} \quad (6)$$

- w_{ij} Gewichtungsfaktor zwischen Knoten des Neuronalen Netzes
- μ Schrittweite der Iterationen

Eine Einschränkung des Gradientenabstiegsverfahrens ist, dass es nur in der Lage ist, lokale Minima des Fehlermaßes zu finden. Es existieren keine Verfahren dieses Typs, die die Auffindung des globalen Minimums garantieren. Rechenprogramme stellen verschiedene Algorithmen zur Verfügung, die zum Teil die Schrittweite μ abhängig vom Trainingsfortschritt anpassen, Unterschiede in der Berechnung des Gradienten aufweisen und weitere Verfahren zur schnelleren Konvergenz und optimalen Minimumssuche enthalten. Eine genaue Beschreibung der einzelnen Funktionsweisen kann DEMUTH ET AL. 1992-2009 entnommen werden. Um ein lokales Minimum zu finden, das dem globalen nahe kommt, sollten die Gewichte zufällig initialisiert und mehrere Netze trainiert werden, um anschließend das optimale auszuwählen. Wird der Fehler über die Gewichte aufgetragen, ergibt sich eine Fehlerfläche. Besitzt das Netz nur zwei variable Gewichte, ist die Fehlerfläche dreidimensional darstellbar (ZELL 2000).

Um die Generalisierungsfähigkeit des erzeugten Netzes sicher zu stellen, werden Datensätze in Trainings- und Testmengen aufgeteilt. Mit den Trainingsmengen wird das Netz angelernet, während es mit der Testmenge auf die Verallgemeinerungsfähigkeit überprüft wird.

Die mittels des Trainingsalgorithmus eingestellten Gewichtungsfaktoren des Neuronalen Netzes können nach dem Training ausgelesen werden. Es gestaltet sich allerdings sehr schwer, von diesen Gewichten auf das Übertragungsverhalten des Netzes zu schließen, da die Zusammenhänge sehr komplex sind und die Gewichte meist nicht nur die Auswirkungen eines einzelnen Eingangs beeinflussen. Selbst wenn ein Eingang in einem Pfad durchgehend hoch gewichtet wird, kann nicht ausgeschlossen werden, dass dieser vermeintlich hohe Einfluss durch gegensätzliche Gewichtung auf anderen Pfaden kompensiert wird. Ein Neuronales Netz hat nach dem Training daher „Black-Box“-Charakter und eignet sich nicht für die weitere manuelle Manipulation der Gewichte. Des Weiteren macht es die komplexe Struktur sehr schwer, bereits vorhandenes Vorwissen in das Netz einzubringen. Dies sollte also bereits beim Preprocessing und bei der Auswahl der Netzstruktur eingesetzt werden.

1.4.7 Ansätze zum Aufbau von Prozessregelungen

Im folgenden Abschnitt wird eine kurze Einführung zum Begriff und zum Aufbau einer Prozessregelung gegeben. Nach der Definition der Grundbegriffe wird konkret auf den aktuellen Stand der Technik und der Forschung bei der modellbasierten Prozessregelung insbesondere in der Fertigungstechnik eingegangen.

Regelungstechnik

Die Regelungstechnik befasst sich mit der Aufgabe, einen zeitlich veränderlichen Prozess so zu beeinflussen, dass dieser Prozess in einer vorgegebenen Weise abläuft. Kennzeichnend für eine Regelung ist ein geschlossener Wirkungskreis. Einen exemplarischen Regelkreis zeigt Abbildung 21.

Im Mittelpunkt steht ein dynamisches System, die Regelstrecke bzw. Strecke. Sie wird von außen von einer Stellgröße beeinflusst und hat als Ausgang eine messbare, physikalische Größe, die Regelgröße $Y(s)$. Das Regelziel ist es, die Regelgröße einer technischen Anlage auf einem konstanten Wert zu halten oder einem bestimmten zeitlichen Verlauf folgen zu lassen.

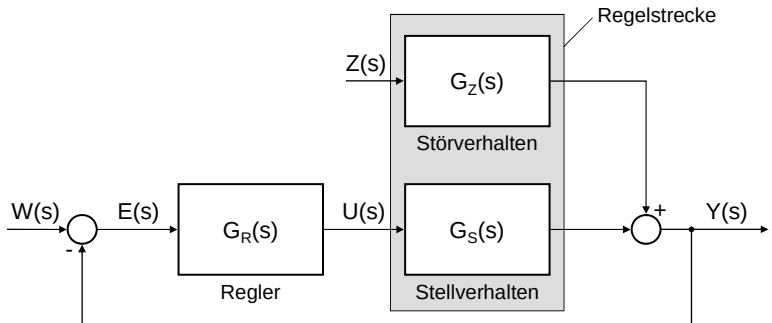


Abbildung 21: Standardblockschaltbild eines Regelkreises nach JÖRGL 1995

Der einzuhaltende Wert wird hierbei als Führungsgröße $W(s)$ bezeichnet. Zur gleichen Zeit müssen die Störgrößen $Z(s)$ in ihrer Wirkung auf den Gesamtprozess unterdrückt werden. Sie stellen unbekannte externe Einflüsse auf den Prozess dar. Über die Messung der Regelgröße $Y(s)$, deren Rückführung und den Abgleich mit der Sollgröße (Führungsgröße) lässt sich durch eine Regeleinrichtung (Regler) die Stellgröße $U(s)$ so verändern, dass das geregelte System das Regelziel erfüllt (SCHMIDT 2004, LUNZE 2004). Würde die Manipulation der

Stellgröße ohne Kenntnis bzw. Messung der Regelgröße stattfinden, so wäre von einer Steuerung zu sprechen (STURM 2000). Die einzelnen Komponenten eines Regelkreises können in der Regel über eine sog. Übertragungsfunktion $G_r(s)$, $G_s(s)$ und $G_z(s)$ im Frequenzbereich oder eine Zustandsraumdarstellung im Zeitbereich beschrieben werden. Sie gibt den kausalen Zusammenhang zwischen einer Ursache und einer Wirkung wieder (SCHMIDT 2004).

Modellbasierte Regelung

Die genannten theoretischen Grundlagen der Regelungstechnik greifen bei einigen Aufgabenstellungen nicht, und zwar bei Systemen mit einem nichtlinearen, zeitvarianten und dynamischen Verhalten.

Nichtlinearitäten sind Effekte wie z.B. Lose, Hysterese oder Vorlasten, die durch Unstetigkeiten oder Sprungeffekte bei der Einbindung in einem geschlossenen klassischen Regelkreis zu Instabilitäten führen können.

Parameterveränderungen innerhalb der Regelstrecke wie z.B. Temperaturänderungen, Lagerverschleiß, etc. führen zur Unkenntnis des Systems und können somit die Regelaufgabe negativ beeinflussen.

Totzeiten geben die Zeitdifferenz zwischen dem Regeleingriff und der tatsächlichen verzögerten Wirkung auf den Prozess bzw. die Strecke wieder. Weist das System eine zu große Totzeit auf, kann es schnell zu Instabilitäten kommen.

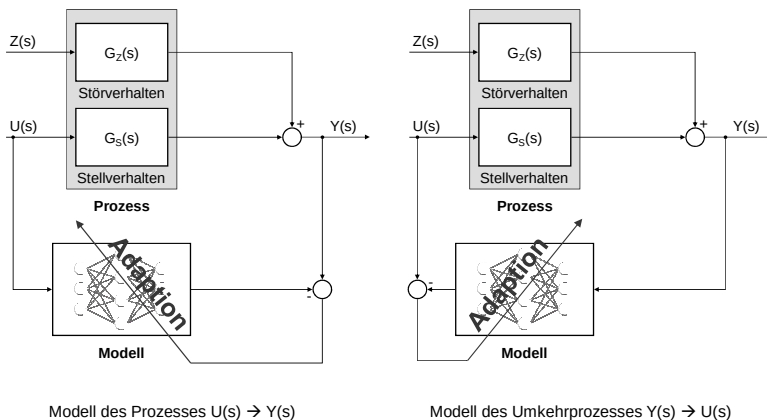


Abbildung 22: Parallelschaltung und Adaption einer Modellstruktur als in der Regelung typischerweise eingesetzte Prozessmodelle

Diese Schwierigkeiten können durch den Einsatz von Prozessmodellen gelöst werden. Die Herausforderung stellt sich hierbei in der Erstellung dieses Modells. Die Modellbildung erfolgt in einem ersten Schritt offline als eine zeitinvariante Abbildung des Gesamtprozesses (Abbildung 22).

In der Regelungstechnik werden Prozessmodelle durch Parallelschaltung einer Modellstruktur und einer anschließenden Adaption realisiert. Entweder stellt das Modell die Abbildung des realen Prozesses oder des Umkehrprozesses dar. Letzteres wird als inverses Prozessmodell bezeichnet und beispielsweise bei der Aufschaltung einer Vorsteuerung eingesetzt. Wie bereits erwähnt, findet dabei die Erstellung der Modelle offline statt. In manchen Fällen, in denen die Parameter des Systems zeitvariant sind, muss jedoch dieses Modell online adaptiert werden.

Werden Prozessmodelle in einem Regelkreis eingebunden, müssen zwei Varianten unterschieden werden. Im ersten Fall wird das Prozessmodell mit einem klassischen Regler kombiniert. Im zweiten Fall nimmt das inverse Prozessmodell selbst die Rolle des Reglers an (STURM 2000).

Inverses Prozessmodell als Vorsteuerung: Das Modell wird parallel zum Regler eingesetzt und gibt, bei genauer Abbildung des realen Prozesses, die richtige Stellgröße aus, damit der Prozess der Führungsgröße folgt. Der Regler hat lediglich die Aufgabe, die Störgrößen auszugleichen.

Regelung durch Modellvorhersagen: Ausgehend von einem Prozessmodell wird als Funktion zukünftiger Stellgrößen $U'(s)$ das Prozessverhalten vorhergesagt. Die Vorhersage der Regelgrößen $Y'(s)$ gibt den funktionalen Zusammenhang zwischen Stellgrößen und Regelgrößen wieder, und zwar zu einem in der Zukunft liegenden Zeitpunkt. Es können sowohl Stellgrößen als auch Störgrößen zur Bestimmung des zukünftigen Prozessverhaltens integriert werden.

Basierend auf dem zukünftigen Sollwert, den Nebenbedingungen (NB) und dem vorhergesagten Prozessausgang wird im Optimierer eine Zielfunktion minimiert. Das Ergebnis des Optimierers dient anschließend zur Adaption eines Reglers, bzw. zur Auswahl eines geeigneten Reglertyps oder es wird direkt als aktuelle Stellgröße dem Prozesseingang aufgeschaltet.

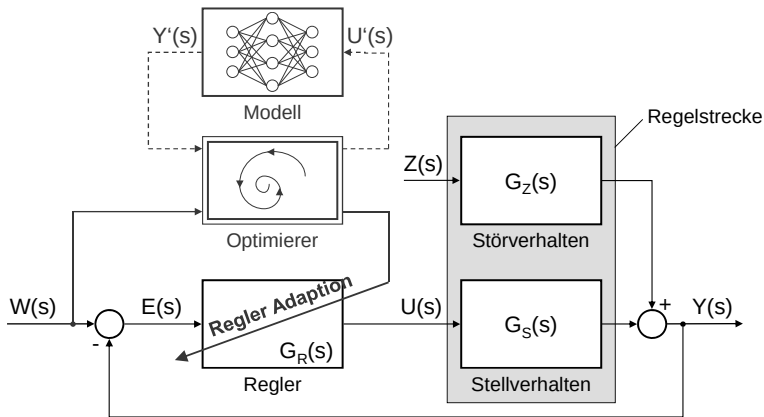


Abbildung 23: Blockschaltbild zur Regelung mittels Modellvorhersagen
(STURM 2000)

Abbildung 23 ist zu entnehmen, dass Messungen des aktuellen Prozessverhaltens nicht zur Aktualisierung des Modells verwendet werden. Weitere Ausführungen zu diesem Thema und zu modellgestützten Ansätzen sind in STURM 2000, ÅSTRÖM & WITTENMARK 1995, NARENDRA & PARTHASARATHY 1990, NARENDRA & ANNASWAMY 2005, MILLER 1995, DITTMAR & PFEIFFER 2004 zu finden.

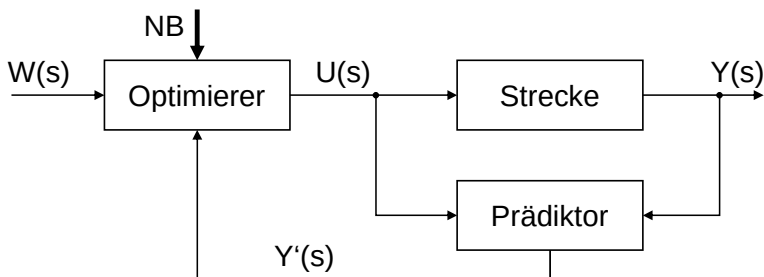


Abbildung 24: Struktur eines prädiktiven Regelkreises

Abbildung 24 zeigt eine erweiterte Möglichkeit der prädiktiven Regelung. Für eine exakte Vorhersage des Prozessverhaltens sind aktuelle Informationen über den Prozess unentbehrlich. Nach jeder Prädiktion muss ein Abgleich zum realen Prozess stattfinden und diese Information dem Prozessmodell rückgeführt werden. Dieser Abgleich gewährleistet eine möglichst genaue Vorhersage und ist

aufgrund von unbekannten Störgrößen und nicht exakter Modellierung erforderlich (RAU 2003). DITTMAR & PFEIFFER 2004 und weitere Fachliteratur bezeichnen die Regelkreisstruktur in Abbildung 25 als „Internal Model Control“ (IMC). Dem dynamischen Verhalten des realen Prozesses wird ein Modell parallel geschaltet. Mit dessen Hilfe erfolgt eine Vorhersage der Regelgrößen des Prozesses. Im Unterschied zum klassischen Regelkreis werden beim IMC-Regler anstatt der gemessenen Regelgrößen die Differenzen aus gemessenen und vorhergesagten Regelgrößen des Modells zurückgeführt.

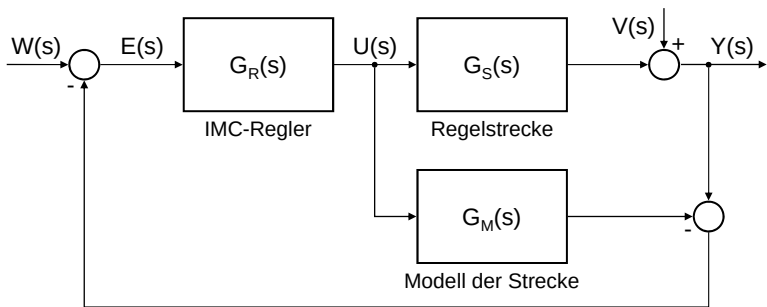


Abbildung 25: Signalflussplan einer IMC-Regelungsstruktur

Die Differenzen bilden eine Schätzung für die Wirkung sämtlicher nicht messbarer Störgrößen und der Modellfehler. Der Regler bestimmt Steuergrößen, basierend auf den Prädiktionen, der vorgegebenen Zielfunktion und den Nebenbedingungen der Steuer- und Regelgrößen.

Prozessregelung in der Fertigungstechnik

Bereits in diversen Vorarbeiten fanden Untersuchungen zur Abbildung von Qualitätsmerkmalen statt. Es handelt sich dabei um Modelle für lineare, nichtlineare und statistische Zusammenhänge zwischen Messgrößen und für die Regelung von Aktoren. Ansätze für Regelungen von Einzelsystemen wurden in BRÄUNLICH 2002 und FORSTMANN 2000 untersucht. In den Arbeiten wurde ein Konzept für eine Blecheinzugsregelung beim Umformprozess aufgezeigt. In REIL 1994 wurde ein Regelverfahren entwickelt, das auf der Basis von unscharfen Mengen arbeitet. Die Eingangsgrößen setzten sich in diesem Fall aus mehrdeutigen Ausdrücken zusammen. Die Bezeichnung des Verfahrens lautet Fuzzy-Regelung und erfordert vor dem industriellen Einsatz eine Testphase. Über nichtlineare und gewichtete Zusammenhänge wurde in HUTTERER 2005 ein Regelal-

gorithmus für Formgebungsprozesse realisiert. LEE 1995 erarbeitet eine Grundlage für die Anwendung von Fuzzy Control zur Verbesserung und Ergänzung der konventionellen Regelungen in der Umformtechnik, vor allem beim Ringwalz- und Schmiedeprozess. Des Weiteren fanden Vorarbeiten aus dem Bereich der Modellierung und Regelung von nichtlinearen Systemen mittels Neuronaler Netze (HENRIQUES ET AL. 2002, ZIEGERT & KALLE 1994) statt. Sie eignen sich hervorragend für die Darstellung von Wechselwirkungen zwischen Messgrößen und Qualitätsmerkmalen. In Kombination mit dem Entwurf eines klassischen oder eines Zustandsreglers können die Ausgangsgrößen des Neuronalen Netzes als Eingangsgrößen für den Regler verwendet werden.

In weiteren Arbeiten werden Ansätze für die Regelung des Ziehprozesses vorgestellt. Sie zielen auf eine Regelung von Blechhaltekräften anhand kontinuierlich gemessener Prozessparameter, z.B. des Werkstoffflusses noch während des ablaufenden Hubvorgangs ab (GRIESBACH 2000, FORSTMANN 2000, RITTMEIER 2007, STRAUBE 1994). Über diese Anforderung werden sehr hohe Ansprüche an die einzusetzende Messtechnik und die Auswerte- und Regelungstechnik gestellt.

GIRSCHEWSKI 2004 skizziert eine Methodik, um über ermittelte Einflussgrößen auf den Umformprozess und die Bauteilqualität sowie deren stochastische Schwankungen eine Prozessführung und -optimierung zu realisieren. Kontinuierliche Prozessüberwachung, Prozesseingriff über geeignete Aktoren und der Einsatz von Prozessmodellen werden als zielführend vorgestellt.

RUZOVIC 2004 behandelt die adaptive Korrektur von Werkstoffschwankungen basierend auf dem Wirbelstromprinzip. Beim Drahtbiegeprozess wurde aus einem Korrelationsverhältnis zwischen Materialeigenschaften und der gefertigten Qualität eine direkte Kopplung zwischen den kontinuierlich gemessenen Wirbelstromwerten und den Maschinenwerten für die Korrektur der Prozessparameter geschaffen.

1.4.8 Zusammenfassung und Bewertung des aktuellen Forschungsstands

Die Betrachtung des aktuellen Stands der Technik gibt einen Einblick in die Schwerpunkte und Themenbereiche der vorliegenden Arbeit. Es handelt sich hierbei um umformtechnische Grundlagen, Sensorsysteme zur Prozessüberwachung und Grundlagen von Neuronalen Netzwerken zur Prozessmodellierung.

Weiterhin wurden regelungstechnische Gesetzmäßigkeiten und Möglichkeiten zur Prozessregelung anhand von Prozessmodellen vorgestellt. Beginnend mit der Einordnung des Presswerks in die Prozesskette der Karosseriefertigung und dem direkten Prozessablauf einer Pressenanlage zur Bauteilfertigung wurden die einzelnen Fachbereiche vertieft. Die grundsätzlichen Bauweisen von Pressenanlagen und die dazugehörige Pressentechnik wurden veranschaulicht sowie detaillierte Angaben und Grundsätze zu Zieheinrichtung, Ziehwerkzeug und Ziehvorgang dargelegt. Ausgehend vom aktuellen Stand der Technik bietet die Optimierung des Umformprozesses zahlreiche Handlungsfelder sowohl auf dem Gebiet der Werkzeugtechnik als auch der Pressentechnik. In der vorliegenden Arbeit liegt der Fokus auf der Prozessregelung und nicht auf der Gestaltung des Umformprozesses.

Die Brücke zu den erforderlichen Sensorsystemen für den Aufbau einer Prozessüberwachung und -regelung bildet die Beschreibung der im Ziehprozess auftretenden Qualitätsfehler bei der Fertigung von Karosseriebauteilen im Presswerk. In diesem Zusammenhang wurde das Wirbelstromverfahren als ein zentraler Baustein der Prozessüberwachung über eine zerstörungsfreie Prüfung der mechanischen Werkstoffeigenschaften näher beleuchtet. Das Grundprinzip und der aktuelle Entwicklungsstand lassen den Schluss zu, dass das zerstörungsfreie Prüfverfahren jeder in den Prozess eingeführten Platine (100%-Prüfung) ein hohes Potenzial birgt. Zur Kontrolle des Ziehens von Stangen bei der Herstellung von Bettfedern ist die Industrietauglichkeit des Verfahrens nachgewiesen worden (RUZOVIC 2004). Für die Prüfung von zweidimensionalen Blechen sind lediglich Laborlösungen im Einsatz. Im Serienbetrieb einer Pressenanlage ist ein derartiges System bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht integriert worden. Die Implementierung und Industrialisierung des Prüfverfahrens auf Basis von Wirbelstrommessungen zur Bestimmung der mechanischen Werkstoffeigenschaften und von zusätzlichen Sensorsystemen zur Erfassung entscheidender Einflussgrößen jeder in den Prozess eingeleiteten Platine stellen weitere Herausforderung für diese Arbeit dar.

Den Ausgangspunkt für die Erstellung von mathematischen nichtlinearen Modellen zur Qualitätskontrolle bildet das Modellierungswerkzeug der Neuronalen Netzwerke. Erste Grundlagen zur Netzstruktur und -architektur, zum Training und zu Lernverfahren wurden aufgabenspezifisch skizziert. Mittels der dargestellten Informationen sind die Voraussetzungen für den Entwurf von Prozessmodellen und zur Entwicklung einer Prozessregelung im Presswerk erfüllt worden. Die Ausführungen zum Stand der Technik enden mit der Vorstellung von

Ansätzen zum Aufbau von Prozessregelungen. Der Schwerpunkt liegt an dieser Stelle auf modellbasierten Regelungen, vor allem mittels Neuronaler Netze. Beispiele aus diversen Anwendungsbereichen der Produktionstechnik, z.B. dem Kunststoffspritzgießen, den Schmiede- und den Ringwalzprozessen sowie aus dem umformtechnischen Prozess belegen die Realisierungsmöglichkeit einer Prozessregelung in einer Pressenanlage. Vorarbeiten auf den Gebieten der Umformtechnik und der Prozessüberwachung liefern die Grundlagen dafür, sind allerdings bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht erfolgreich im Serienbetrieb implementiert worden. Sie befassen sich mit dem Aufbau eines Regelkreises während des ablaufenden Tiefziehprozess. Diese Aufgabenstellung führte zu extrem hohen Anforderungen an Sensorik, Regelung und Aktorik. Der regelnde Eingriff musste im Bereich weniger Millisekunden stattfinden und stieß damit an die Grenzen der Machbarkeit, sowohl software- als auch hardwareseitig. Daraus entsprang die Vision, aus Messdaten und Wissen der vergangenen Prozesse und Produktionsreihen zu lernen, um den gegenwärtigen Prozess zu prognostizieren und zu kontrollieren. Konkretisiert bezogen auf den Prozessablauf in einer Pressenanlage wird durch die zeitlich vorgezogene Messung relevanter Einflussgrößen eine Regelung vor dem eigentlichen Ziehvorgang angestrebt.

1.5 Lösungsansatz für eine modellbasierte Prozessregelung

Aus der Zielsetzung der vorliegenden Arbeit, die darin besteht, Qualitätsfehler frühzeitig und automatisiert zu erkennen sowie rechtzeitig gegenzusteuern, wird ein Lösungskonzept für den Entwurf einer modellbasierten Prozessregelung für die Herstellung von Karosseriebauteilen im Presswerk abgeleitet. Begründet ist das Vorgehen in den beschriebenen, teilweise bereits existierenden Systemen und Konzepten gemäß dem Stand der Technik. Abbildung 26 veranschaulicht das Prinzip zur Lösung dieser Aufgabenstellung.

Die Entwicklung einer Prozessregelung kann in drei Arbeitsschritte unterteilt werden. Im ersten Arbeitsschritt werden sämtliche Informationen zum Ausgangs- und Fertigungszustand gesammelt. Es handelt sich hierbei um eine Erfassung der Werkstoffqualität der Ausgangsplatinen, die der Pressenanlage zugeführt werden. Somit stellt die Werkstoffcharakterisierung eine wesentliche Einflussgröße des Prozesses und der Qualität der Bauteile dar. Weiterhin findet eine Abfrage des Werkzeugzustandes und der aktuell eingestellten Maschinendaten statt. Realisiert wird die Akquisition der Daten über Sensorik in der Pressenanlage und über zusätzlich zu implementierende Messvorrichtungen. Aus der Gesamtheit der Infor-

mationen wird jeweils ein Datensatz für jede Platine bzw. jedes daraus gefertigte Bauteil erzeugt. Die zugeführte Platine erhält damit eine Identität und kann zu jedem Zeitpunkt im Fertigungsprozess erkannt werden. Am Ende des Serienprozesses wiederum wird die Qualität der Bauteile festgestellt und festgehalten. Dieser Vorgang bildet den zweiten Arbeitsschritt bei der Umsetzung des Lösungskonzeptes. Eine manuelle oder automatische Qualitätsprüfung sowie eingehende Reklamationen aus den Folgeprozessen bilden die Information über die Qualität des gefertigten Bauteils ab. Es ist zwischen Bauteilen ohne Qualitätsfehler, so genannte Gutteile und Bauteilen mit Qualitätsfehler, so genannte Schlechteile zu unterscheiden.

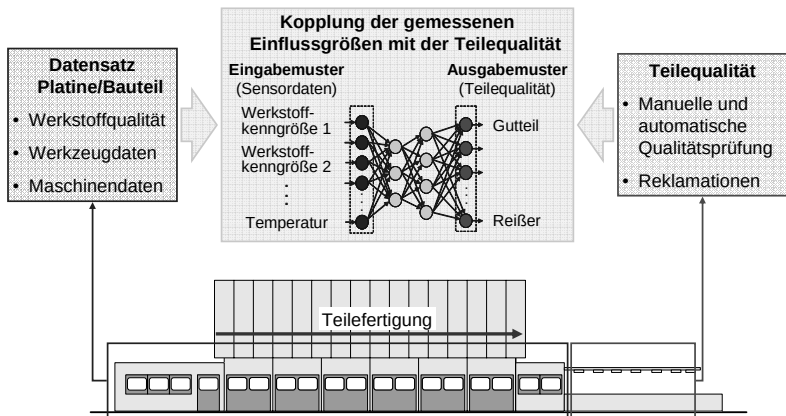


Abbildung 26: Lösungskonzept für die Erstellung einer modellbasierten Prozessregelung

Sind die ersten beiden Arbeitsschritte des Lösungsansatzes abgeschlossen, werden die gemessenen Einflussgrößen mit der Teilequalität gekoppelt. Eine Datenbasis übernimmt die Aufgabe der Zusammenführung der Datensätze und dient als Grundstein für den Aufbau eines wissensbasierten Prozessmodells anhand Neuronaler Netze. Für eine Qualitätsvorhersage wird das entworfene Prozessmodell parallel zur Serienproduktion in die Online-Prozessüberwachung eingebunden. Die erfolgreiche Funktionsweise der Online-Qualitätsvorhersage leitet den letzten Arbeitsschritt, die Realisierung einer automatischen Prozessregelung, ein. Innerhalb eines Regelkreises dient die Qualitätsvorhersage des Prozessmodells als Regelgröße. Der Regler vergleicht die Abweichung zwischen der Führungs- und der Regelgröße, d. h. die Qualitätsvorgabe und die vorhergesagte Qualität,

und verstellt einen Aktor mit dem Ziel, die geforderte Qualität eines Bauteils zu erreichen.

Die Ausführungen in den vorangegangenen Abschnitten dieses Kapitels und die Skizzierung des Lösungskonzeptes im gegenwärtigen Abschnitt bilden die Grundlage für die Auswahl der Versuchsträger, die Entwicklung eines mechatronischen Gesamtsystems sowie die Umsetzung eines seriennahen modellbasierten Prozessregelkreises.

2 Beschreibung des Gesamtsystems und Auswahl von Sensorsystemen

2.1 Analyse des Fertigungssystems

2.1.1 Allgemeines

Das folgende Kapitel beschreibt das erste untersuchte Gesamtsystem der vorliegenden Arbeit, bestehend aus Pressenlinie, Werkzeug, Bauteil und Werkstoff. Für die Entwicklung einer Regelung von Umformprozessen wird exemplarisch das Werkzeug zur Herstellung des Versuchsträgers Nr. 1 betrachtet. Im Herstellungsprozess treten vielfältige Qualitätsmängel auf, die ebenfalls aufgezeigt werden. Aus diesen möglichen Qualitätsmängeln werden Rückschlüsse auf die zu verwendenden Messsysteme zur Erfassung dieser Fehler gezogen, soweit diese nach dem aktuellen Stand der Technik zur Verfügung stehen.

2.1.2 Mechanischer Aufbau der Pressenanlage

Der Versuchsträger Nr. 1 wird auf einer hydraulischen Pressenlinie gefertigt. Sie besteht, wie in Abbildung 27 dargestellt, aus sechs hintereinander angeordneten Einzelpressen, die mit Transporteinrichtungen verkettet sind. Während die Kopfpresse der Pressenlinie einfachwirkend und doppeltwirkend ausgeführt ist, arbeiten die Folgepressen einfachwirkend, teilweise mit im Tisch integrierter Zieheinrichtung. Die Ziehkissen weisen mit zwei Zylindern eine maximale Ziehkissenkraft von 1700 kN auf. Konstruiert wurde die Pressenlinie von der Fa. Müller Weingarten im Jahr 1971.

Der Arbeitsablauf in der Pressenlinie beginnt mit dem Entstapeln der Bleche durch den Platinenlader, dem Reinigen (optional mit Zusatzbeölung) und der Zuführung der Bleche in die erste Pressenstufe. Nach abgeschlossener Umformoperation werden die Teile in den Folgepressen z.B. durch Schneiden, Abkanten oder Nachformen weiterverarbeitet. Am Ende der Pressenlinie erfolgt die Abstapelung der Fertigteile (SCHULER 1996).

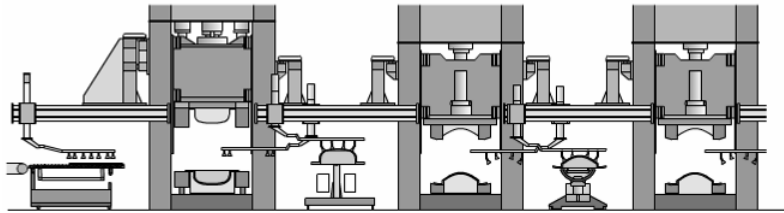


Abbildung 27: Schematischer Aufbau der untersuchten Pressenlinie
(SCHULER 1996)

Der Werkstücktransport zwischen den einzelnen Pressen wird in der Pressenlinie und der Platinezuführung automatisch von einem CNC-Feeder übernommen. Diese CNC-gesteuerten Feeder sind in zwei Achsen frei programmierbar und für unterschiedliche Teilespektren einsetzbar. Die Ausbringung der Pressenlinie liegt zwischen fünf und zehn großflächigen Teilen pro Minute, wobei eine maximale Platinengröße von 2480×1700 mm umgeformt werden kann.

2.1.3 Untersuchtes Werkzeug

Bei dem untersuchten Werkzeug handelt es sich um das Ziehwerkzeug zur Fertigung des Versuchsträgers Nr. 1.

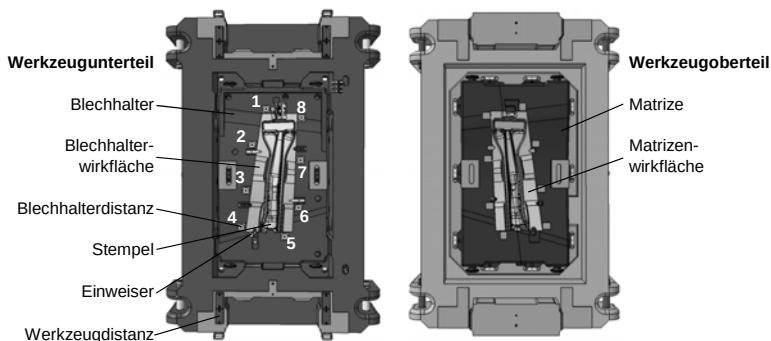


Abbildung 28: Aufbau des Ziehwerkzeugs des Versuchsträgers Nr. 1 (FAASS 2009)

Entsprechend der Abbildung 28 handelt es sich um ein einfachwirkendes Werkzeug, bei dem das Werkzeugunterteil aus Blechhalter und Stempel besteht und

am Pressentisch befestigt ist. Das Ziehkissen überträgt die Verdrängerzylinderkraft über Pinolen an den Blechhalter. An der Blechhalterwirkfläche sind gleichmäßig verteilt acht Blechhalterdistanzen angebracht. Das Werkzeugoberteil ist am Pressenstößel befestigt und enthält die Matrice mit eingebautem Niederhalter, der über Stickstoff-Gasdruckfedern angesteuert wird. Detailliertere Informationen zum Aufbau und zur Funktionsweise des Werkzeugs können FAASS 2009 entnommen werden.

2.1.4 Überblick über die Mess- und Einflussgrößen

Qualitätsfehler an gefertigten Bauteilen können durch eine Vielzahl an Einflussgrößen verursacht werden. Abbildung 29 präsentiert sämtliche Größen, die bei dem vorliegenden Umformprozess eine Rolle spielen und somit Mängel an den Bauteilen bewirken können.

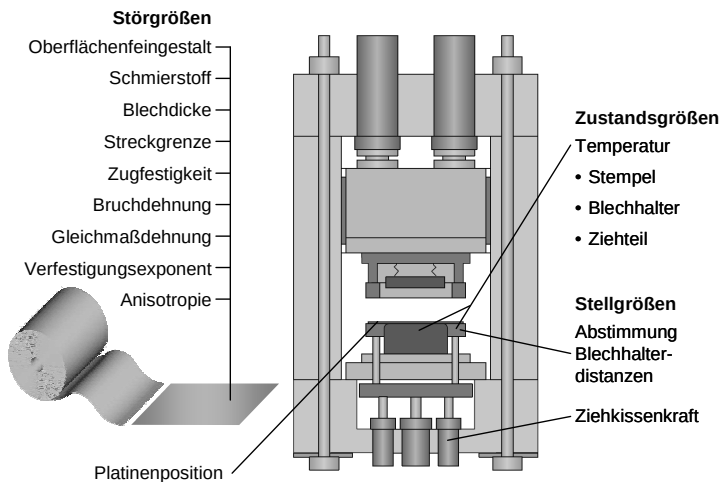


Abbildung 29: Mögliche Einflussgrößen des Prozesses zur Fertigung des Versuchsträgers Nr. 1 (SCHULER 1996, FAASS 2009)

Die Größen ergeben sich als Gesamtheit aus werkstoffseitigen, werkzeugeitigen und pressenseitigen Einflussgrößen. Ziel ist es hierbei, alle in Abbildung 29 dargestellten Größen durch eine geeignete Auswahl von Messsystemen erfassbar zu machen.

Es lassen sich folgende Systeme für die Überwachung der geforderten Einflussgrößen festlegen:

- Mechanische Werkstoffkennwerte: Zugfestigkeit R_m , 0,2%-Streckgrenze $R_{p0,2}$, Gleichmaßdehnung A_g , Bruchdehnung A_{80} , Verfestigungsexponent n_{90} , senkrechte Anisotropie r_{90} (FAASS 2009)
- Blechdicke
- Temperatur des Werkzeugs und des Bauteils
- Rauheit und Schmierfilm der Platine

Nun ist festzustellen, mit welchen Messsystemen sich die genannten Einflussgrößen ermitteln lassen, um damit zur Lösung der vorliegenden Problemstellung beizutragen.

2.2 Auswahl erforderlicher Systeme

2.2.1 Allgemeines

In den folgenden Abschnitten werden die Sensorsysteme für die genannten Einflussgrößen vorgestellt. Es findet ein Vergleich mehrerer zur Auswahl stehender Sensoren zur Ermittlung identischer physikalischer Größen statt. Auf dieser Basis wird eine Auswahl der für die vorliegenden Rahmenbedingungen, Störeinflüsse und Messzeiten optimalen Systeme getroffen. .

2.2.2 Mechanische Werkstoffkennwerte

In einer Parameterstudie wurde nachgewiesen, dass die mechanischen Werkstoffeigenschaften einen entscheidenden Einfluss auf den Ziehvorgang und damit auch auf die Bauteilqualität haben (FAASS 2009). Für die direkte zerstörungsfreie Ermittlung der Zugfestigkeit, der 0,2%-Streckgrenze und anderer mechanischer Werkstoffkennwerte stand bis vor Kurzem keine technische Lösung zur Verfügung. Die klassische Methode zur Ermittlung der genannten Größen besteht in der Entnahme einer Zugprobe nach EN 10002-1 quer zur Walzrichtung. Anschließend wird diese auf einer zertifizierten Zugprüfmaschine gezogen und die Werte gemessen bzw. berechnet. Eine Onlinemessung dieser Werte während ei-

nes Serienproduktionsprozesses war damit ausgeschlossen. Neue technologische Ansätze bieten die Möglichkeit, mittels einer zerstörungsfreien Messung die mechanischen Werkstoffkennwerte Zugfestigkeit, 0,2%-Streckgrenze, Gleichmaßdehnung, Bruchdehnung, Verfestigungsexponent und senkrechte Anisotropie zu ermitteln.

Untersucht wurden, entsprechend dem Stand der Technik, zwei Systeme von unterschiedlichen Anbietern, die nach ähnlichen, jedoch nicht identischen physikalischen Prinzipien die Messungen erlauben. Beide Verfahren nutzen den bestehenden Zusammenhang zwischen Gefügestand, mechanischen Eigenschaften und elektromagnetischen Eigenschaften, skizziert in Abbildung 30.

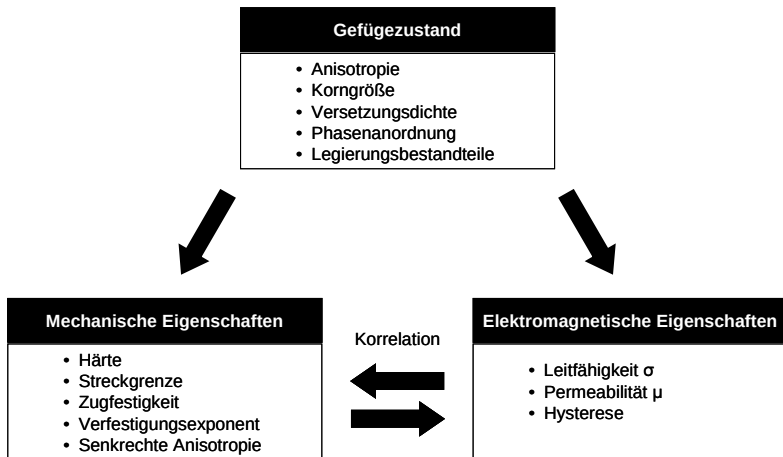


Abbildung 30: Wechselwirkungen zwischen Gefügestand, mechanischen und elektromagnetischen Eigenschaften (SCHWIND 1998)

Das Messprinzip beruht auf den Wechselwirkungen zwischen dem Gefügestand sowie den mechanischen und den elektromagnetischen Eigenschaften eines Werkstoffs, wie in Abschnitt 1.4.5.3 beschrieben. Über einen Messkopf wird der Prüfgegenstand mit verschiedenen Prüffrequenzen angeregt. Das empfangene Messsignal ist abhängig von den ferromagnetischen und elektromagnetischen Eigenschaften des Prüfgegenstandes. Im Vorfeld wird ein Korrelationsmodell zwischen den elektromechanischen Eigenschaften des Werkstoffs und den mechanischen Werkstoffkennwerten ermittelt bzw. berechnet. Mit diesem Korrelationsmodell ist anschließend die zerstörungsfreie Ermittlung der Werkstoffkennwerte möglich. Eine weitere Gemeinsamkeit besteht darin, dass ein Korrelati-

onsmodell jeweils nur für eine Werkstoffart mit einer konstanten Blechdicke erzeugt und später geprüft werden kann. Werden mehrere Blechdicken des gleichen Werkstoffs oder ein anderer Werkstoff gemessen, müssen weitere Korrelationsmodelle erst speziell erzeugt werden.

Im Folgenden werden diese zwei Systeme, die physikalischen Messprinzipien, die Korrelationsmethoden, die Praxiserprobung und die Genauigkeit für die anstehende Themenstellung aufgezeigt.

3MA-Prüftechnik

Die 3MA-Prüftechnik (Mikromagnetische Multiparameter-Mikrostruktur- und -Spannungsanalyse) des Fraunhofer-Instituts für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) repräsentiert eine verfahrens- und gerätetechnische Kombination aus vier verschiedenen Messverfahren: Mehrfrequenzwirbelstrom, Überlagerungsspermeabilität, Oberwellenanalyse und magnetisches Barkhausenrauschen (STÖCKER 2007). Bei den Verfahren werden 22 mikromagnetische Prüfgrößen analysiert und ausgewertet. Die Mikrostruktur und der Eigenspannungszustand eines Werkstoffs wirken sich nicht nur auf dessen mechanisch-technologische, sondern auch auf seine elektromagnetischen Eigenschaften aus. Mittels multipler Regressionsanalysen werden Approximationsfunktionen für die Verknüpfung der zu messenden Qualitätsmerkmale (Zielgrößen) mit den 3MA-Messparametern (Prüfgrößen) aufgestellt. Dieser Schritt stellt den Kalibrierungsvorgang des Systems dar. Unerwünschte Messschwankungen bzw. ein Messrauschen der Zielgrößen, z.B. der Zugfestigkeit, der 0,2%-Streckgrenze und der Störgrößen (z.B. Eigenspannungen, Werkstoffeigenschaften) können über eine Kombination der Prüfgrößen im Multiparameter-Verfahren in deren Einfluss eliminiert bzw. reduziert werden. Die verwendeten mikromagnetischen Verfahren der 3MA-Prüftechnik zeichnen sich durch einen charakteristischen Bereich von Analysiertiefen aus. Die Kombination der Verfahren erlaubt damit die Analyse von Tiefenabhängigkeiten des Gefüges, der Werkstoffeigenschaften und der Eigenspannungen. Innerhalb eines Prüfschrittes von 40 Messungen pro Sekunde werden sämtliche genannten Prüfgrößen simultan aufgezeichnet. Das 3MA-System berechnet daraus die kalibrierten Zielgrößen der mechanischen Werkstoffeigenschaften (DOBMANN ET AL. 2004).

Das 3MA-Messsystem besteht aus einem Prüfkopf und einem Hardware-Frontend mit integriertem Controller. Im Prüfkopf implementiert sind eine Magnetisierungseinheit und ein Sender-Empfänger-System. Das Hardware-Frontend

kann über eine Ethernet-Schnittstelle mit einem beliebigen Computer verbunden werden.

Wirbelstrombasierte Werkstoffprüfung

Eine alternative Möglichkeit der zerstörungsfreien Messung der mechanischen Werkstoffeigenschaften bietet die Fa. 3R Technics GmbH an. Das Prinzip basiert auf einer Prüfung von ebenen Stahlblechen mittels eines Wirbelstromverfahrens. Der Messaufbau des Wirbelstromsystems ist in Abbildung 31 aufgezeigt.

Das 3RTechnics-System besteht aus einem Prüfkopf bzw. Taster und dem Prüfgerät Magnatest 3.633 der Fa. Förster GmbH, ein Mehrfrequenz-Wirbelstrommessgerät. Der Taster stellt den Wirbelstromsensor dar, ein Spulenpaar aus einer Erreger- bzw. Senderspule und einer Mess- bzw. Empfängerspule. Eine Vergleichsspule kommt nicht zum Einsatz. Mittels einer Senderspule wird ein Wirbelstrom in der Platine induziert. Jede Platine wird mit den Erregerfrequenzen 16 Hz, 32 Hz, 64 Hz, 128 Hz, 256 Hz, 512 Hz und 1024 Hz gemessen. Damit werden sowohl niedrige als auch hohe Frequenzen über eine schrittweise Verdoppelung der Ausgangsfrequenz geprüft. An die Erregerspule werden nacheinander, nicht simultan, Spannungen mit den einzelnen Prüffrequenzen angelegt und das in der Messspule induzierte Signal parallel dazu aufgenommen.

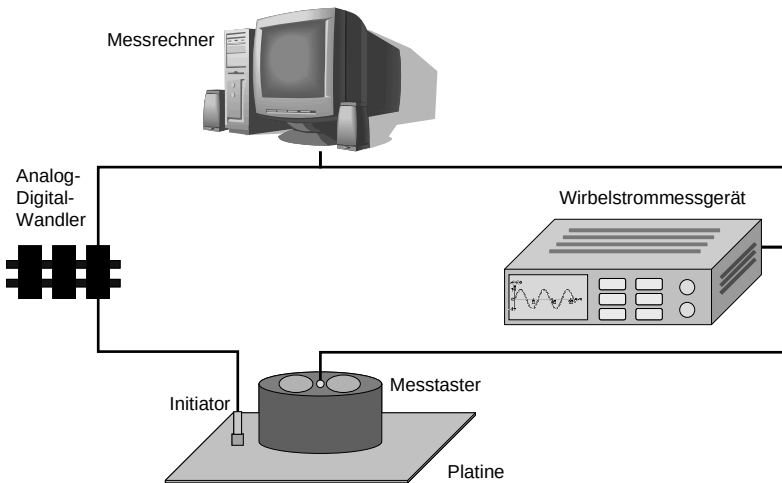


Abbildung 31: Prinzipaufbau der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung mittels Wirbelstromverfahrens

Die Messstelle muss in der Mitte einer Fläche mit einem Mindestmaß von 300×300 mm liegen. Abhängig von der Werkstoffzusammensetzung, d. h. von den mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs, wird der induzierte Strom abgeschwächt. Eine Empfängerspule misst das abgeschwächte Feld in Form einer Amplitudenschwächung und einer Phasenverschiebung des Empfängersignals gegenüber dem Sendersignal. Diese Eigenschaften spiegeln sich in elektromagnetischen Eigenschaften wie Leitfähigkeit, Permeabilität und Hysterese wider. Das Prüfgerät errechnet daraus die Real- und Imaginärteile der einzelnen Schwingungsanteile. Ein Messzyklus ergibt insgesamt 24 Datenpaare, bestehend aus Grundwellen und ersten Oberwellen der Schwingungen in der Messspule. Die Wirbelstrommesswerte stehen wiederum im direkten Zusammenhang mit den mechanischen Werkstoffkennwerten wie Zugfestigkeit, Bruchdehnung etc. Die Kommunikation zwischen dem Messrechner der Fa. 3R Technics und dem Prüfgerät der Fa. Förster erfolgt über eine Ethernetverbindung. Der Messrechner speichert eingehende Datenpakete und errechnet aus den Wirbelstrommessdaten mittels eines Korrelationsmodells die Werkstoffkennwerte der Platine.

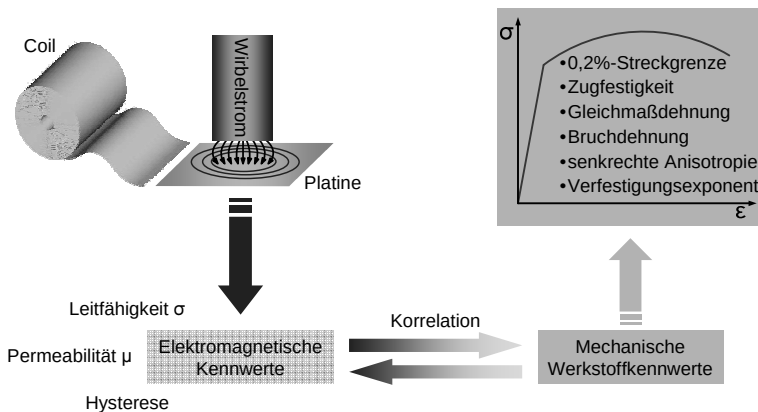


Abbildung 32: Messprinzip der wirbelstrombasierten Werkstoffprüfung

Um eine konsistente und genaue Korrelation zwischen Wirbelstrommesswerten und mechanischen Werkstoffkennwerten zu gewährleisten, muss vor dem Serienbetrieb eine sorgfältige Kalibrierung des Sensors erfolgen. Der Ablauf besteht aus der Wirbelstrommessung einer Mindestmenge an Platinen unterschiedlicher Werkstoffgüte. Es handelt sich um mindestens zehn Messproben aus zehn verschiedenen Kaltbändern. Ideale Bedingungen für die Kalibrierungsphase stel-

len zwei bis drei redundante Proben der selben Stelle in der Platine bzw. im Coil dar. Nach Durchführung der Wirbelstrommessung werden genau an der gleichen Messstelle die Zugproben herausgefräst und ein Zugversuch durchgeführt. Nach Eingabe der beiden Datensätze in das vorhandene System kann dieses eigenständig ein Korrelationsmodell zwischen elektromagnetischen Eigenschaften und Materialeigenschaften erzeugen (Abbildung 32). Weisen die Proben eine große Streuung der Materialeigenschaften auf, kann ein genaues Korrelationsmodell sichergestellt werden. Falls dies nicht der Fall ist, müssen weitere Proben entnommen, vermessen und gezogen werden.



Abbildung 33: Laboraufbau der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung

Ein weiterer Aspekt, der bei der Kalibrierung und der späteren Messung zwingend beachtet werden muss, ist, dass die Umgebungseinflüsse stets konstant und unverändert gehalten werden. Aufgrund des Wirbelstromverfahrens werden durch die Platinen und durch weitere elektromagnetische Komponenten, wie z.B. Schrauben in der Halterung des Messkopfs, eine Platte für die Halterung usw., magnetische Felder erzeugt bzw. die magnetischen Felder verändert. Sie beeinflussen die zerstörungsfreie Messung aktiv und erfordern einen minimalen Abstand von 75 mm bis 110 mm in einem Umkreis um den Sensorkopf. Falls diese Vorgaben nicht einzuhalten sind, lassen sich durch spezielle Auswahl der Werkstoffe der eingesetzten Komponenten zur Verschraubung oder Halterung des Messkopfs die Einflüsse reduzieren. Hier kann lediglich eine schlechte Magnetisierung und Leitfähigkeit vorgegeben werden, da jedes Material im Vorfeld auf seine Wirkung auf das Messsystem hin untersucht werden muss. Damit fließen die umgebenden Materialien auch in das später erzeugte Korrelationsmodell ein. Um im Serienbetrieb diese Bedingungen beizubehalten und gleiche Ergebnisse zu erhalten, muss die Sensorumgebung bei der Trainingsphase und beim Serien-

betrieb identisch sein. Die Tischversion des Sensorkopfes und der Versuchsaufbau der Prüfung können Abbildung 33 entnommen werden.

Der Kalibrierungsphase folgt eine Validierungsphase. Während der Validierung wird die Genauigkeit der berechneten mechanischen Werkstoffkennwerte geprüft und damit auch die Genauigkeit des Korrelationsmodells zwischen Wirbelstrommesswerten und mechanischen Werkstoffkennwerten. Für den Serienbetrieb ist damit eine Messung der mechanischen Werkstoffkennwerte für jede einzelne Platine im Prozess sichergestellt. Die Messung teilt sich in drei Schritte auf: Im ersten Schritt wird, für die Sicherstellung eines definierten Abstands vom Sensorkopf zur Platine, der Sensorkopf an das Blech angesaugt. Im zweiten und dritten Schritt finden die Wirbelstrommessung und das Lösen der Platine statt. Die gesamte Messzeit beträgt ca. zwei Sekunden und beeinflusst damit nicht die Prozesszykluszeit. Die Messdauer für die reine Wirbelstrommessung beläuft sich auf 0,6 Sekunden.

Auswahl des geeigneten Messverfahrens

Die vorgestellten Systeme zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung wurden innerhalb einer Voruntersuchung einem Vergleich unterzogen. Aus Gründen der Repräsentativität fand die Kalibrierung beider genannter Systeme mit identischen Werkstoffen statt. Es handelte sich um den IF-Stahl (Interstitial Free) DC06, der in der Serienproduktion der Audi AG z.B. für die Herstellung von Seitenwandrahmen eingesetzt wird. Als Zielgrößen der Kalibrierung beider Verfahren wurden die 0,2%-Streckgrenze $R_{p0,2}$, die Bruchdehnung A_{80} und die senkrechte Anisotropie r_{90} gewählt. Um auch die Richtungsabhängigkeit einer Prüfung zu unterziehen, wurden die Größen A_{80} und die Anisotropie (r-Wert) im Winkel von 45° zur Walzrichtung sowie $R_{p0,2}$ in Walzrichtung betrachtet. Zerstörungsfreie Messungen, Zugversuche der Probebleche aus mehreren Kaltbändern und die Aufstellung von Korrelationsmodellen für jedes System waren die ersten Schritte des Analysevorgangs. Für die Validierung beider Systeme wurden Probebleche aus unterschiedlichen Kaltbändern eingesetzt. Die zerstörende Prüfung im Zugversuch gilt anschließend als Referenz für die Gegenüberstellung der Genauigkeiten der Systeme. Tabelle 4 verdeutlicht am Beispiel dreier mechanischer Werkstoffkennwerte die erzielten Ergebnisse mittels der kalibrierten Systeme. Ein Vergleich der Genauigkeiten der 0,2%-Streckgrenze $R_{p0,2}$ führt zu einem ersten Vorteil des 3R Technics-Systems gegenüber dem 3MA-Verfahren. Die Systeme weisen eine Abweichung von 3% bzw. 4% zwischen der berechneten und der im Zugversuch ermittelten 0,2%-Streckgrenze $R_{p0,2}$ auf. Weiterhin gibt Tabelle 4 die

erzielten Genauigkeiten für die untersuchten Größen A_{80} und r-Wert wieder. Zu erkennen sind die geringeren Fehlertoleranzen des 3R Technics-Systems für A_{80} und damit die bessere Eignung des Systems für die anstehende Problemlösung. Der r-Wert lässt sich laut den Ausführungen zum Stand der Technik bereits im Zugversuch schwer bestimmen und ergibt im Allgemeinen niedrige Genauigkeiten bei der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung (SCHWIND 1998, RUZOVIC 2004).

System	$R_{p0,2}$ (in Walzrichtung)	A_{80} (45° zur Walzrichtung)	r-Wert (45° zur Walzrichtung)
3MA	±4%	±8%	±15%
3R Technics	±3%	±5%	±15%

Tabelle 4: Gegenüberstellung der erzielten Genauigkeiten für die Systeme 3MA und 3R Technics für die betrachteten Werkstoffkennwerte

Ein weiterer Vorteil, der für den Serieneinsatz des Wirbelstromsensors der Fa. 3R Technics spricht, ist die Unabhängigkeit der Kalibrierung vom Prüfkopf. Nach Angabe beider Sensorhersteller hat die Beschädigung des Prüfkopfes des 3MA-Systems einen Verlust sämtlicher Kalibrierungsdaten und Werkstoffmodelle zur Folge. Der Taster des 3R Technics-Systems dagegen ist austauschbar und erfordert keine neue Trainingsphase der untersuchten Werkstoffe. Die Robustheit der Kalibrierung gegenüber einem Defekt am Prüfkopf stellt ein wichtiges Kriterium bei der Bewertung der Vor- und Nachteile des Systems zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung dar. Gerade der Einsatz des Sensors in Pressenanlagen und die damit verbundenen rauen Umgebungsbedingungen, wie z.B. Vibrationen des Messkopfes, Stöße bzw. Auftreffstöße auf Messbleche, überhöhte Ölmengen etc., erhöhen die Gefahr der Beschädigung des Messkopfes.

Resultierend daraus wurde das 3R Technics-System als System zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung eingesetzt, weiterentwickelt und seriennah integriert. Die nachstehenden Schritte der vorliegenden Arbeit stützen sich auf die getroffene Systemauswahl. Somit lässt sich mit dem vorliegenden 3R Technics-System eine Inline-Messung folgender mechanischer Werkeigenschaften zerstörungsfrei während des Serienbetriebs realisieren:

- Zugfestigkeit R_m
- 0,2%-Streckgrenze $R_{p0,2}$
- Gleichmaßdehnung A_g

- Bruchdehnung A_{80}
- Senkrechte Anisotropie r_{90}
- Verfestigungsexponent n_{90}

2.2.3 Blechdicke

Im Rahmen der Qualifizierung der Sensorsysteme zur Bestimmung der Blechdicke wurden verschiedene Messverfahren und die technischen Ausführungen mit den hohen Anforderungen im Presswerk abgeglichen. Für den Einsatz im Presswerk müssen die Sensoren einen großen Messbereich aufweisen. Zugleich gilt es, einen großen Messabstand zwischen Sensorkopf und Platine einzuhalten, da beim Transport der Bleche innerhalb der Pressenanlage starke Vibrationen der Bleche auftreten. Des Weiteren setzen zuverlässige Messungen eine hohe Abtastfrequenz voraus, da die Bleche hohen Transportgeschwindigkeiten unterliegen. Die Sensoren müssen gegenüber Umgebungseinflüssen, wie z.B. Licht-, Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsschwankungen, beständig sein. Die wichtigste Anforderung an die Blechdickenmessung ist die Messgenauigkeit, die sich aus Auflösung und Linearität der Sensoren ergibt. Blechdickenschwankungen bewegen sich in Bereichen kleiner als 0,01 mm (FAASS 2009). Um Änderungen der Blechdicke festzustellen, ist eine Messgenauigkeit des Sensorsystems von 5 μm definiert. Neben technischen Faktoren besitzen auch die Kosten einen entscheidenden Einfluss auf die Auswahl des jeweiligen Sensorsystems.

Klassifizierung der Messverfahren

Eine Klassifizierung der in der Messtechnik angewandten Dickenmessverfahren lässt sich anhand folgender Gesichtspunkte durchführen. Entsprechend dem Bezug der Sensoren zum Messobjekt wird zwischen einer einseitigen, einer zweiseitigen und einer indirekten Messung unterschieden. Bei der einseitigen Messung wird der Abstand einer Oberfläche des Bleches zum Sensor bestimmt. Zusätzlich muss der konstante Abstand einer Referenzfläche zum Sensor genau bekannt sein. Zur Blechdickenmessung in Pressenstraßen kann diese einseitige Abstandsmessung ausgeschlossen werden, da nicht gewährleistet ist, dass die einzelnen, zugeführten Platinen eben und ohne Zwischenraum auf einer Referenzfläche aufliegen. Bei einer zweiseitigen Messung werden zwei Sensoren benötigt, die sich auf unterschiedlichen Seiten des Bleches befinden. Jeder dieser Sensoren ermittelt den Abstand des Sensors zur zugehörigen Blechseite. Die zwei gemes-

senen Werte werden vom konstanten Abstand der Sensoren zueinander abgezogen. Wird der Abstand zum Blech durch die Schwächung von Strahlen oder durch Kräfte gemessen, liegt eine indirekte Messung vor. Aus den so ermittelten Größen kann die Blechdicke bestimmt werden (DREYER 1997).

Ein weiteres Klassifizierungsmerkmal ist der Kontakt der Sensoren zum Messobjekt. Die Dicke des Bleches kann entweder berührungslos oder durch teilweisen bzw. vollständigen Kontakt zum Blech gemessen werden. Die Sensoren, die den Kontakt zum Blech teilweise oder vollständig durch ein Kopplungsmedium herstellen, z.B. Ultraschallsensoren, können für den Einsatz im Fertigungsprozess ausgeschlossen werden. Die Anwendung eines Kopplungsmediums stellt einen zu hohen und nicht realisierbaren Aufwand dar, da es zuerst aufgebracht und anschließend rückstandsfrei entfernt werden muss. Des Weiteren sind durch die hohen Hubzahlen und Durchlaufzeiten der einzelnen Platinen nicht erfüllbare Anforderungen an eine derartige Messung gestellt.

Eine Einteilung der Dickenmessmethoden kann ebenfalls anhand der gemessenen Größen vorgenommen werden. Neben elektrischen Größen, wie beispielsweise die Induktivität und die Kapazität, können durch Heranziehen verschiedener physikalischer Effekte auch nichtelektrische Größen gemessen werden. Dabei steuert oder erzeugt die nichtelektrische Größe das elektrische Signal des jeweiligen Aufnehmers, des Gebers, des Fühlers, des Detektors oder des Sensors. Als Beispiel für nichtelektrische Messgrößen können die Entfernung, die Kraft oder die Reflexion genannt werden (SCHRÜFER 2007).

Im Folgenden werden Messverfahren behandelt, die für den Einsatz einer Dickenmessung von Stahl- und Aluminiumblechen im Fertigungsprozess in Frage kommen. Es sei darauf hingewiesen, dass eine Vielzahl weiterer Messverfahren existiert, die jedoch für einen industriellen Einsatz in Pressenstraßen nicht geeignet sind.

Messabweichungen und deren Ursachen

Bei der Beurteilung der Messverfahren zur Bestimmung der Blechdicke in Pressenanlagen sind die möglichen Messabweichungen und deren Auswirkungen auf die Messergebnisse zu berücksichtigen. Im konkreten Anwendungsfall wirken sich diese Messfehler, die durch eine ungünstige geometrische Lage der Bleche entstehen, auf die Resultate aus. Durch die Schräglage eines Bleches stehen die Sensoren nicht senkrecht zur Oberfläche des Bandes und die Messergebnisse werden verfälscht. Eine weitere Fehlerquelle sind Wölbungen des Bleches. Auf

diese Weise können die Messergebnisse durch eine veränderte Auflagefläche, durch ein verändertes Reflexionsverhalten oder durch einen Linearitätsverlust der Ausgangsgrößen verfälscht werden. Die Messabweichungen können aber auch aus der Vielzahl von Umgebungseinflüssen resultieren. Zum einen tragen Schwingungen aus dem Tiefziehprozess oder aus benachbarten Umformvorgängen im Presswerk dazu bei, aber auch Verschmutzungen durch Öldunst am Messsystem führen zu Messfehlern. Entscheidenden Einfluss auf den Messprozess hat im Allgemeinen ebenfalls die Temperatur. Ein zusätzlicher Grund für Messfehler bei der Blechdickenmessung kann eine variable Ölschicht auf der Platine sein, die aus unterschiedlichen Verteilungen der sogenannten Grundbeölung resultiert.

Die verschiedenen Messverfahren werden durch die jeweiligen Messfehler unterschiedlich beeinflusst. Während bei einigen Verfahren bestimmte Einflüsse keine Rolle spielen, können andere Messverfahren sehr empfindlich auf Einflüsse reagieren. Das kann dazu führen, dass eine Messmethode für den Einsatz im Presswerk ungeeignet ist (ZÄH ET AL. 2005).

Auswahl des zu verwendenden Messverfahrens

Um das für die Messung der Blechdicke am besten geeignete Messverfahren zu ermitteln, wurden im Vorfeld die Messsysteme in Versuchen getestet und untereinander verglichen. Es wurden Untersuchungen hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, der Messgenauigkeit und der Bedeutung von Umgebungseinflüssen, wie z.B. Schwebestaub, Verunreinigungen, Beölungsgrad der Bleche und Temperaturschwankungen, durchgeführt.

Bei Verwendung von Messtastern fährt durch Anlegen von Druckluft der Messbolzen in die Messposition aus und wird durch Federkraft in die Ruhelage zurückgedrückt. Voruntersuchungen zeigten, dass sich das Blech bei ausgefahrenen Messbolzen im Stillstand befinden muss. Es besteht weiterhin die Gefahr, dass sich die Messtaster trotz guter Einspannung leicht neigen können. Verändert sich deren kalibrierte Lage, kommt es zu erheblichen Abweichungen (bis zu 50 µm). Messtaster sind somit für die Blechdickenmessung nicht geeignet, da Stillstandszeiten der Platine in der Serienproduktion sehr kurz bzw. unzulässig sind.

Das induktive Messverfahren scheidet aufgrund der geringen Messgenauigkeit von 0,1 mm nicht zuletzt wegen Temperaturfehlern aus der weiteren Betrachtung aus. Die Genauigkeit wird durch Werkstoffeigenschaften, wie die Korngröße, die Anisotropie und den Gefügestand, beeinflusst. Sie ist zusätzlich von Oberflä-

cheneigenschaften, wie beispielsweise den Beschichtungen und der Rauigkeit des Materials abhängig. Zudem entsprechen das Linearitätsverhalten und die Wiederholgenauigkeit nicht den Anforderungen.

Beim kapazitiven Messprinzip ist die Empfindlichkeit gegenüber in den Kondensator eindringender Substanzen, wie Öle, Fette oder Wasser, die die relative Dielektrizitätszahl beeinflussen, zu beachten. Darüber hinaus müssen elektromagnetische Felder aus der Umgebung berücksichtigt werden. Den größten Einfluss auf die Messergebnisse haben jedoch Wölbungen des Bleches. Ein weiterer Nachteil der induktiven und auch der kapazitiven Messmethode ist die notwendige Kalibrierung des Messsystems auf die Vielzahl der im Presswerk verwendeten Stahl- und Aluminiumwerkstoffe. Ein wesentlicher Grund für den Ausschluss sowohl des induktiven als auch des kapazitiven Messverfahrens für den automatisierten Einsatz im Presswerk ist der kleine Messbereich bei gleichzeitig geringem Messabstand zwischen dem Messsystem und dem Blech.

Das Lasertriangulationsverfahren ist das für den Einsatz im Presswerk am besten geeignete Messverfahren. Lasertriangulation ist ein berührungslos arbeitendes Messverfahren, mit dem ein Abstand eines Punktes auf einer Oberfläche zu einer Referenzebene gemessen werden kann. Der aus dem Sender austretende Laserstrahl wird mittels einer Optik fokussiert und auf dem Messobjekt diffus reflektiert. Als Sender werden Halbleiterlaserdioden verwendet. Das Messobjekt muss sich im Messbereich befinden. Aus dem Bündel diffus reflektierter Strahlen muss wieder genau ein Messstrahl gewonnen werden, der zur Triangulationsmessung herangezogen wird. Dies geschieht mit einer Linse. Um den Lichtpunkt auf dem Empfänger scharf abzubilden, müssen sich die Ebenen der Abbildungsoptik und des Empfängers in der Achse des Beleuchtungsstrahlenganges schneiden. Je nach Abstand zwischen dem Triangulationssensor und dem Messobjekt wird der Lichtpunkt auf einer anderen Stelle am Empfänger abgebildet. Die einzelnen Auftreffpunkte des Lichtflecks sind vom Empfangswinkel abhängig. Mithilfe des Winkels und des Strahlengesetzes kann der Abstand zwischen dem Sensor und dem Messobjekt bestimmt werden.

Die kontaktlose Laserwegmessung bietet eine Kombination aus einer hohen Messgenauigkeit, einem großen Messabstand und einer sehr hohen Abtastgeschwindigkeit. Die Bleche, die durch Feedersysteme oder Bänder mit einer hohen Geschwindigkeit innerhalb der Pressenanlage transportiert werden und stark vibrieren, können dennoch einer Messung unterzogen werden. Durch neu entwickelte Messalgorithmen ist eine zuverlässige Messung selbst bei transparenten

und spiegelnden Oberflächen möglich, so dass die auf die Platine aufgebrachte Ölschicht keine Messabweichungen verursacht. In den durchgeführten Voruntersuchungen zeigte sich, dass Umgebungseinflüsse wie Schwebstaub oder Verschmutzungen nur geringen Einfluss auf die Genauigkeit der Messergebnisse haben. Instabile Messungen aufgrund von anhaftenden Schmutzpartikeln oder Öl an der Vorderseite des Objektivs können durch die Verwendung eines Gehäuses bzw. durch Erzeugen eines Luftvorhangs vermieden werden.

Als leistungsfähigstes und für den Einsatz im Presswerk am besten geeignetes Sensorsystem stellte sich die Modellreihe LK-G der Fa. Keyence heraus. Für den vorliegenden Anwendungsfall wurde, nach Rücksprache mit dem Hersteller und der Erprobung eines Testgerätes, der Modelltyp LK-G37 mit breitem Lichtpunkt ausgewählt. Ein großer Laserlichtpunktdurchmesser bzw. eine Laserlichtlinie ist notwendig, um diffuse Reflexionen, die durch unregelmäßige Oberflächen der Bleche verursacht werden, zu mitteln und Messwertschwankungen zu vermeiden.

2.2.4 Rauheit und Schmierfilm

Bei der Analyse des Standes der Technik in Abschnitt 1.4.5.2 ist beispielhaft ein System zur kontinuierlichen Messung des Beölungsgrades skizziert worden (BILSTEIN ET AL. 2006). Zum gegenwärtigen Zeitpunkt ist die Funktionsweise des Systems lediglich am kontinuierlichen Band in Schneideanlagen realisiert und entzieht sich damit der potenziellen Nutzung für die Untersuchung des Versuchsträgers Nr. 1 an einzelnen Platinen in der Pressenanlage. Weiterhin existieren Handgeräte zur stichprobenartigen Ermittlung des Beölungszustandes von Platinen, z.B. von der Fa. Fuchs. Diese Systeme arbeiten nach dem gleichen Prinzip wie bei BILSTEIN ET AL. 2006 beschrieben und können für eine Online-Messung im Serienprozess nicht eingesetzt werden.

Alternativ kann ein Messkopf der Fa. 3R Technics für die Bestimmung der relativen Änderung der Tribologieverhältnisse verwendet werden. Es handelt sich dabei um ein Laborgerät, das als Ausgangssignal eine elektrische Spannung besitzt. Der Messkopf wird auf die Oberfläche der Platine über eine federnde Befestigung angedrückt. Das Reflexionsprinzip gilt als Grundlage für die Ermittlung der Ausgangsspannung, die über einer Fläche von 4×4 mm auf der Platine gebildet wird. Als Mittelwert dieser Fläche stellt das ausgegebene Spannungsniveau den Mischwert aus Oberflächenrauheit und Beölung dar. Die Spannungsversorgung des Sensors beträgt 230 V, seine Messzeit 0,1 Sekunden und seine

Ausgangsspannung variiert zwischen 0 und 0,4 V. Der Unterschied zwischen beöhlten und unbeöhlten Blechen beträgt wenige Millivolt. Deshalb muss der Messbereich entsprechend gewählt oder das Signal verstärkt werden. Ein analytisches Verhältnis zwischen der Ausgangsspannung des Sensors und der tatsächlichen Rauheit bzw. der quantitativen Menge des Schmierfilms existiert für das Gerät nicht.

2.2.5 Temperatur des Bauteils und des Werkzeugs

Für die Erfassung der Einflussgröße Temperatur wurden mehrere Verfahren für den Einsatz in einer Pressenstraße bzw. im Ziehwerkzeug untersucht. In Frage kommen vier Systeme, die das Potenzial haben, den Rahmenbedingungen zu genügen und die auf dem Markt verfügbar sind:

- Widerstandsthermometer
- Thermoelemente
- Wärmebildkamera
- Infrarotthermometer

Widerstandsthermometer und Thermoelemente eignen sich vor allem für die Messung der Temperatur im Werkzeug. Die Temperaturerfassung muss hier direkt an der Wirkfläche des Werkzeugs stattfinden. Laut FAASS 2009 gilt als Vorgabe für den Messort der Bereich, in dem viel Material aus dem Flanschbereich nachfließt, und der Bereich mit der größten Ziehtiefe des Bauteils.

Im Aufbau ähneln Widerstandsthermometer Leitern und Halbleitern. Sie messen eine Änderung des elektrischen Widerstands in Abhängigkeit von einer Temperaturveränderung. Das am häufigsten auf den Markt anzutreffende Widerstandsthermometer hat die Bezeichnung Pt 100. Gemäß Abbildung 34(a) wird der temperaturempfindliche Widerstand – in der Regel Platin – als Messwicklung auf einen Träger aufgebracht. Dies wird in Glas oder in eine keramische Masse eingebettet. Die Widerstände sind zum Schutz gegen äußere Einflüsse in Schutzrohre eingebaut.

Beim Einbau ist zu beachten, dass eine Berührung zwischen dem zu messenden Medium und dem Widerstandsthermometer stattfinden muss. Als Ausgangssignal steht eine analoge Spannung für die Messung zur Verfügung. Der Tempera-

turmessbereich eines Widerstandsthermometers liegt zwischen -200°C und $+600^{\circ}\text{C}$.

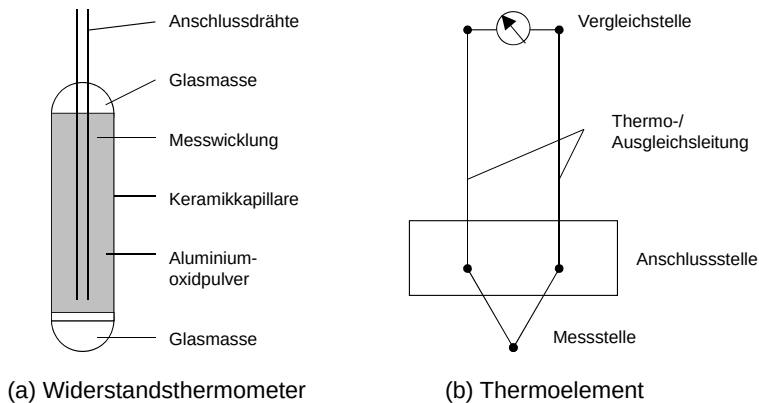


Abbildung 34: Aufbau von Widerstandsthermometern und Thermoelementen

Thermoelemente bestehen aus zwei elektrischen Leitern unterschiedlicher Werkstoffe. An einem Ende, an der sog. Messstelle, werden sie miteinander verbunden, während sie am offenen Ende die Vergleichsstelle bzw. die Messstelle des Anwenders bilden (Abbildung 34(b)). Die Thermospannung, die an der Vergleichsstelle auftritt, ist abhängig vom Werkstoff der Drähte und der Temperaturdifferenz zwischen der Messstelle und der Vergleichsstelle. Für die Thermodrähte kommen unterschiedliche Legierungen zum Einsatz, wie z.B. Cu-CuNi und Fe-CuNi. Ausführungen für Thermoelemente sind mit Schutzfassungen aus Schutzrohren oder aus isolierendem Material versehen. Beim Einbau ist auf Kontakt zum Messobjekt zu achten. Für eine optimale Wärmeübertragung auf das Thermoelement muss eine sog. Wärmeleitpaste zusätzlich eingebracht werden. Der Temperaturmessbereich für Thermoelemente ist zwischen -200°C und $+1000^{\circ}\text{C}$ definiert. Die Vorteile der Thermoelemente gegenüber dem Widerstandsthermometer sind die hohen Temperaturbereiche, die schnelleren Ansprechzeiten und die kleineren Bauformen.

Die Temperatur des Ziehteils lässt sich über eine Wärmebildkamera oder ein Infrarotthermometer erfassen. Beide Methoden arbeiten berührungslos und erlauben so eine Messung der Temperatur direkt nach dem Umformvorgang. Wird die Temperatur des Ziehteils zu einem geringfügig späteren Zeitpunkt aufgenommen, ist das Bauteil bereits leicht abgekühlt. Beide Verfahren beruhen auf

der Erfassung der Infrarotstrahlung des Messobjekts. Die Wärmebildkamera erzeugt eine detaillierte Abbildung der Wärmeverteilung eines zu messenden Körpers und seiner Umgebung. Hier ist zu beachten, dass keine glänzenden oder polierten Flächen in das Bild eintreten. Die Folgen wären eine Verzerrung und eine Verfälschung der Messung. Glänzende Flächen haben grundsätzlich die Eigenschaft, dass deren Messung zu einer Erfassung der Umgebungstemperatur führt und nicht der Temperatur des Objekts. Das Infrarotthermometer hat den Vorteil, dass über eine punktuelle bzw. eine kleinflächige Messung des Objekts, abhängig vom Abstand zwischen Messkopf und Messobjekt, die verfälschenden Einflüsse stark minimiert werden. Des Weiteren liegen die Anschaffungskosten einer Wärmebildkamera um den Faktor 50 höher als bei einem Infrarotthermometer. Die Oberflächentemperatur des Messobjekts wird hier über das Strahlungsgesetz ausgewertet. Es handelt sich um ein rein passives Verfahren, bei dem die elektromagnetische Strahlungsenergie (Wärmeenergie) des Objekts erfasst wird. Vom Sensor wird keine Strahlung ausgesendet. Für eine absolute Temperaturerfassung muss der Emissionsgrad des Messobjekts bestimmt werden. Der Emissionsgrad beschreibt das Verhältnis der Infrarotstrahlung aus der Temperatur des Körpers zu den Reflexionen aus den benachbarten Körpern. Die zeitgleiche Messung der Temperatur mittels eines taktilen Sensors, z.B. eines Thermoelements, ermöglicht den Abgleich beider Temperaturen und somit die Ermittlung des Emissionsgrads. Der Messbereich für typische Infrarotthermometer liegt zwischen -40°C und $+900^{\circ}\text{C}$.

2.2.6 Markierung von Platinen

Die Aufnahme von Datensätzen für jede zu verarbeitende Platine führt zwangsläufig zu der Fragestellung nach einer entsprechenden Zuordnung zwischen den Messwerten und der Teilequalität. Der Prozessablauf gibt vor, dass die beschriebenen Sensorsysteme die Informationen über den Prozesszustand vor und während der Fertigung gewinnen. Die Teilequalität kann jedoch erst am Auslaufband, d. h. am Ende der Fertigungskette festgestellt werden. Um eine konsistente und vollständige Datenzuordnung sicherzustellen, ist die Integration eines Kennzeichnungssystems für jedes Bauteil bzw. für jede Platine unabdingbar. Nur dadurch lassen sich alle aufgenommenen Daten fehlerlos verwalten und jedem Bauteil zuweisen. Zur Lösung der Aufgabenstellung in der vorliegenden Arbeit stehen auf dem Markt drei Verfahren zur Verfügung:

- Prägewerke, Ritz- oder Nadelmarkiergeräte

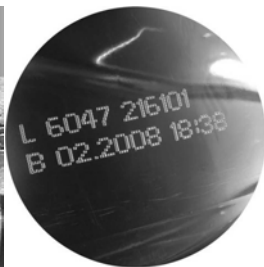
- Laserbeschriftungssysteme
- Tintenbeschriftungssysteme

Prägewerke zeichnen sich durch eine Stempelwirkung des jeweiligen zu markierenden Schriftzuges aus. Diese Methode ist schnell und effizient, die Oberfläche der Platine wird jedoch durch das Einprägen beschädigt. Ferner kann es zur Durchdringung und zur Entfernung der schützenden Zinkschicht (Abschnitt 1.3) auf der Platine kommen.

Ritz- und Nadelmarkiergeräte greifen ebenfalls mechanisch in die Platine ein. Das Nadelmarkieren funktioniert durch einen punktuellen Stoß einer pneumatisch oder elektrisch angetriebenen Hartmetallnadel in das Metall (Abbildung 35). Beim Ritzmarkieren wird die Vollmetallnadel nicht punktuell ins Material gestoßen, sondern eingedrückt und in dieser Position verfahren. Beide Verfahren wirken sich nachteilig auf die Platinenoberfläche aus. Zusätzlich liegen die Markierzeiten bei diesen beiden Methoden höher, als es die Taktzeit von ca. einer Sekunde, abhängig von der betrachteten Anlage und der eingestellten Hubzahl, zulässt.



Nadelritz



Laser



Tintenstrahl

Quelle: KBA-Metronic AG

Abbildung 35: Kennzeichnungsbeispiele der unterschiedlichen potenziellen Markierverfahren

Lasermarkiersysteme eignen sich sehr gut für die genannte Themenstellung. Sie können einen Schriftzug in weniger als einer Sekunde aufbringen, verändern die Oberfläche lediglich im Nanometerbereich und führen somit nicht zu Korrosionsgefahr. Der gebündelte Energiestrahle hat eine Abtragung oder eine Farbveränderung des Materials zur Folge (Abbildung 35). Nachteile dieses Verfahrens

sind die aufwändigen Schutzmaßnahmen für den Laser und die sehr hohen Anschaffungskosten.

Die oben beschriebenen Methoden benötigen für den Markiervorgang einen Stillstand der Platine. Tintenbeschriftungssysteme hingegen können sich bewegende Platinen beschriften. Daher kann der Kopf fest eingebaut werden. Der Tintenaufdruck wird punktuell auf die Platine aufgebracht, so dass beliebige Schriftzüge oder Codes generiert werden können (Abbildung 35). Das System zeichnet sich durch kurze Trocknungszeiten und gute Haftungseigenschaften der Tinte aus. Zusätzlich kann der aufgebrachte Schriftzug in den nachfolgenden Prozessschritten (Rohbau, Montage, etc.) leicht entfernt werden. Es findet kein Eingriff in die Materialoberfläche statt. Stahllieferanten versehen die Coils ebenfalls mit einem Schriftzug, der die Kaltbandnummer des Stahls enthält. Die zusätzliche Markierung im Presswerk zum Zwecke der Datenrückverfolgbarkeit kann demzufolge mit einer identischen, wasserabwaschbaren Tinte umgesetzt werden. Somit wird eine Veränderung des Gesamtsystems ausgeschlossen. Ein zusätzlicher Vorteil sind die sehr niedrigen Anschaffungs- und Betriebskosten.

Der Bewertung für den Einsatz eines Markiersystems wurden folgende Kriterien zu Grunde gelegt:

- kurze Markierzeiten (kleiner als eine Sekunde)
- dynamisch sich verändernder Schriftzug
- niedrige Anschaffungskosten
- keine mechanische Veränderung der beschriebenen Platine
- keine dauerhafte Markierung der Bauteile

Aus den oben beschriebenen Systemen und unter Berücksichtigung der Kriterien für den Einsatz in einer Pressenanlage kann zusammenfassend festgestellt werden, dass die Tintenbeschriftung für die vorliegende Aufgabenstellung den maximalen Nutzen, verbunden mit geringen Anschaffungskosten, bietet.

2.3 Zusammenfassung – Auswahl geeigneter Sensorsysteme

Verschiedene Systeme zur Prozessüberwachung wurden unter Berücksichtigung der Aufgabenstellung und der zu untersuchenden Anlagen analysiert. Für die Erfassung von einzelnen Prozessparametern wurden Messverfahren untereinander

verglichen und die Vor- und Nachteile für den Einsatz in Pressenanlagen herausgehoben.

Die wirbelstrombasierte Werkstoffprüfung anhand des Sensors der Fa. 3R Technics mit einer Messsonde der Fa. Förster hat sich für die zerstörungsfreie Ermittlung der mechanischen Werkstoffkennwerte jeder einzelnen Platine als zielführend erwiesen. Zu dieser Erkenntnis führen die kurze Messzeit, die umfassende Werkstoffanalyse, die konsistente Datenerfassung und die im Vergleich geringen Anschaffungskosten. Das Hauptkriterium für diese Auswahl ist jedoch die Austauschbarkeit der Messköpfe unter Beibehaltung der gebildeten Korrelationsmodelle für die Berechnung der Werkstoffkennwerte aus den gemessenen Wirbelstrommesswerten. Den vergleichbaren Systemen fehlt diese Eigenschaft, die Folge wären höhere Betriebskosten über die Laufzeit.

Für die Realisierung einer Blechdickenmessung im Online-Serienbetrieb wurden optische, induktive, kapazitive und laserbasierte Systeme zur Wegmessung untersucht. Aufgrund der erschwerten Umgebungs- und Störeinflüsse (Vibrationen, Ölfilm, etc.) scheiden die meisten Systeme aus. Die Lasertriangulationssensoren der Fa. Keyence, die mit zwei Messköpfen die Entfernung der Ober- und Unterseite des Bleches messen und daraus die Blechdicke ermitteln, erfüllen als einziges System die Anforderungen und wurden im weiteren Vorgehen in die Anlage integriert.

Das Laborgerät der Fa. 3R Technics weist die besten Eigenschaften auf, um Rauheit und Schmierfilm für einzelne Platinen zu bestimmen. Unter Berücksichtigung der geringen Anschaffungskosten und des geringen Einflusses der Schmierfilmdicke auf die Teilequalität der untersuchten Bauteile wird im Prozess der Kompromiss eingegangen, einen Relativwert als Mischwert der Rauheitseigenschaften und der Schmierfilmdicke zu erhalten. Weiterentwickelte Systeme zur Online-Messung der Schmierfilmdicke vermitteln umfassendere Informationen zum Platinenzustand, konnten jedoch im Rahmen der Arbeit aufgrund der hohen Anschaffungskosten nicht berücksichtigt werden.

Die auf dem Markt zur Verfügung stehenden Sensoren zur Temperaturermittlung und die Rahmenbedingungen der Messaufgabe führten zur Schlussfolgerung, dass den Thermoelementen und den Infrarotthermometern der Vorrang zu geben war. Sie sind eine günstige, effiziente und robuste Methode zur Online-Messung der auftretenden Temperaturen im Werkzeug und im Ziehteil.

Schließlich sind im Rahmen der Arbeit mehrere Verfahren zur Kennzeichnung von Platinen geprüft worden. Jedes Verfahren weist Vor- und Nachteile auf. Die Tintenbeschriftung führt am schnellsten zum erwünschten Ziel, jede Platine mit einer fortlaufenden Nummer zu kennzeichnen. Das entscheidende Kriterium dabei ist die Beschriftung der Platine während der Transportbewegung. Dadurch werden Stillstandszeiten überflüssig bzw. vermieden.

Die Sensorsysteme für den Einbau und die Messung von zusätzlichen Prozessparametern wurde vorgestellt, eine Auswahl der Sensoren, die alle Anforderungen erfüllen, getroffen. Im folgenden Schritt findet eine umfassende Beschreibung der Konstruktion und Integration der einzelnen Systeme in eine Pressenanlage statt. Des Weiteren wurde ein Online-Messdaten-Erfassungssystem für den Aufbau einer Datenbasis realisiert.

3 Aufbau eines mechatronischen Systems zur Erfassung von Einflussgrößen

3.1 Systeme zur Prozessüberwachung

Die konstruktive und informationstechnische Integration von Sensorsystemen zur Akquisition von Prozessdaten bei der Fertigung des exemplarisch betrachteten Versuchsträgers Nr. 1 ist der zentrale Bestandteil der folgenden Abschnitte. Die Voraussetzungen für eine kontinuierliche und konsistente Gewinnung und Dokumentation der Prozessbedingungen werden geschaffen. Damit ist der Aufbau einer umfassenden Datenbank gewährleistet. Sie dient als Basis für den Entwurf von Prozessmodellen zur Qualitätsvorhersage und -regelung. Abbildung 36 visualisiert die implementierten, im Serienprozess betriebenen Sensorsysteme.

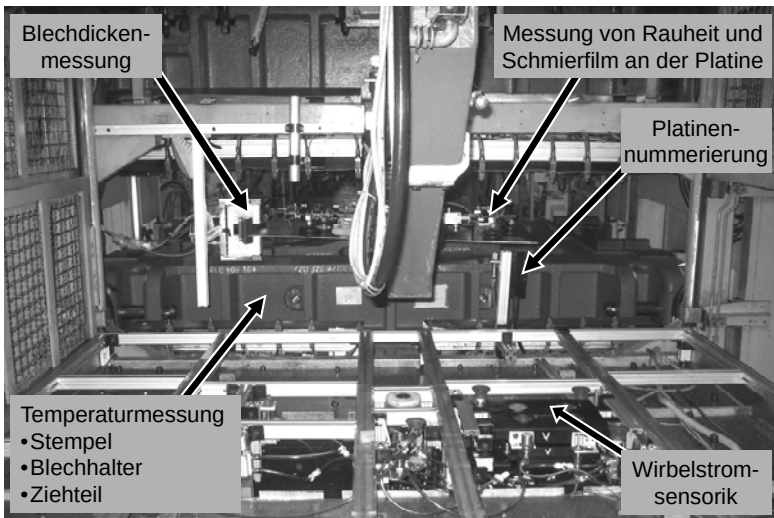


Abbildung 36: Integration der Prozesssensorik in die untersuchte Pressenstraße für die Fertigung des Versuchsträgers Nr. 1 – Übersicht des Laderbereichs und des Werkzeugs

Beginnend mit der Integrationsbeschreibung der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung in Abschnitt 3.2, schließen sich in Abschnitt 3.3 die Vorrichtungskonstruktion für eine automatisierte Blechdickenmessung und in Abschnitt 3.4 die Instal-

lation der Rauheits- und Schmierfilmmessung am Einlegefeeder an. Abschnitt 3.5 veranschaulicht die Möglichkeit für eine Temperaturerfassung im Werkzeug und am Ziehteil. Der Zusammenführung und Zuordnung der Messdaten zur tatsächlichen Bauteilqualität dient eine selbsttätig arbeitende Bauteilbeschriftungseinheit, beschrieben in Abschnitt 3.6. Schließlich wurden sämtliche Sensorsysteme innerhalb eines mechatronischen Gesamtsystems betrieben und unter einer Bedienoberfläche visualisiert und zugänglich gemacht (Abschnitt 3.8 und 3.9).

3.2 Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung

3.2.1 Allgemeines

In Abschnitt 2.2.2 wurden bereits die Funktionsweise und die Vorteile einer zerstörungsfreien Werkstoffprüfung erläutert. Im Rahmen einer Vergleichs- und Validierungsphase wurde hervorgehoben, dass das Sensorsystem der Fa. 3R Technics mit einer Tastsonde der Fa. Förster die genauesten Ergebnisse liefert. Im Folgenden wird die Implementierung des Messsystems für den Anwendungsfall der Prozessregelung des Versuchsträgers Nr. 1 in die fertige Anlage, eine hydraulische Pressenanlage, erläutert. Der mechanische und messtechnische Aufbau werden aufgezeigt. Ferner werden die Validierung des Systems für den untersuchten Werkstoff TRIP700 und die Datenerfassung beschrieben.

3.2.2 Systemintegration für den Serienbetrieb

Abbildung 37 zeigt eine Detailaufnahme des in die Pressenanlage integrierten Sensors. Zum leichteren Verständnis der Funktionsweise des Wirbelstromsensors wird zuerst der Produktionsablauf der Anlage beschrieben. Die Platine wird gemäß Abbildung 36 vom linken oder vom rechten Platinenpaket durch einen Feeder entstapelt und auf dem Ladertisch abgelegt. Ein zweiter Feeder entnimmt diese Platine und legt sie in die erste Stufe (die Ziehstufe) ein. Hier findet der Ziehprozess statt. Anschließend wird das Bauteil in die nachfolgenden Operationen transportiert. Im Laderbereich ist die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung integriert. Sobald die Platine auf dem Ladertisch abgelegt wird, startet der Messvorgang. Die dazugehörige Ablaufkette ist im Folgenden kurz zusammengefasst. Am Ladertisch wird mittels eines äußeren und eines inneren Unterdruckkreislaufs die Platine eben an den Sensorkopf angedrückt. Ein Initiator startet die

Wirbelstrommessung der anwesenden Platine, bestehend aus der Induktion der Wirbelströme unterschiedlicher Frequenzen (Abschnitt 2.2.2) und der Berechnung der mechanischen Werkstoffkennwerte. Nach Beendigung der Wirbelstrommessung werden die Unterdruckkreisläufe ausgeschaltet. Die Platine wird entnommen und die Komponenten des Wirbelstromsensors werden in den Grundzustand verfahren. Der gesamte Messvorgang beträgt ca. zwei Sekunden und ist damit kürzer als die Taktzeit der Anlage. Der mechanische Aufbau des Wirbelstromsensors ist in Abbildung 37 illustriert.

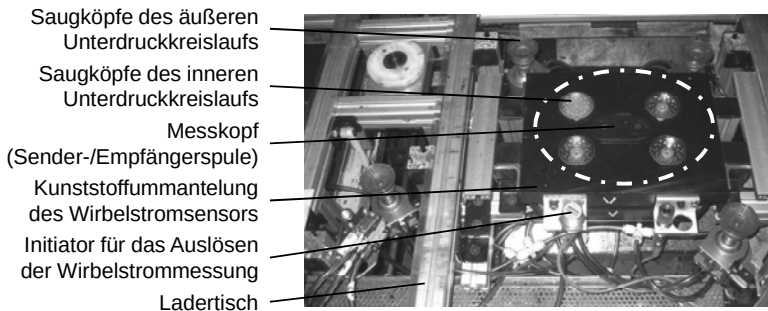


Abbildung 37: Mechanischer Aufbau der wirbelstrombasierten Werkstoffprüfung in der untersuchten Serienanlage

Damit ist die zerstörungsfreie wirbelstrombasierte Werkstoffprüfung in die Pressenanlage vollständig implementiert. Das Sensorsystem arbeitet autonom, d. h. eine Rückkopplung mit der Pressensteuerung ist nicht vorhanden. Es ist gewährleistet, dass der Pressenablauf durch die Messung weder verzögert noch unterbrochen wird.

3.2.3 Inbetriebnahme des Systems (Kalibrierung)

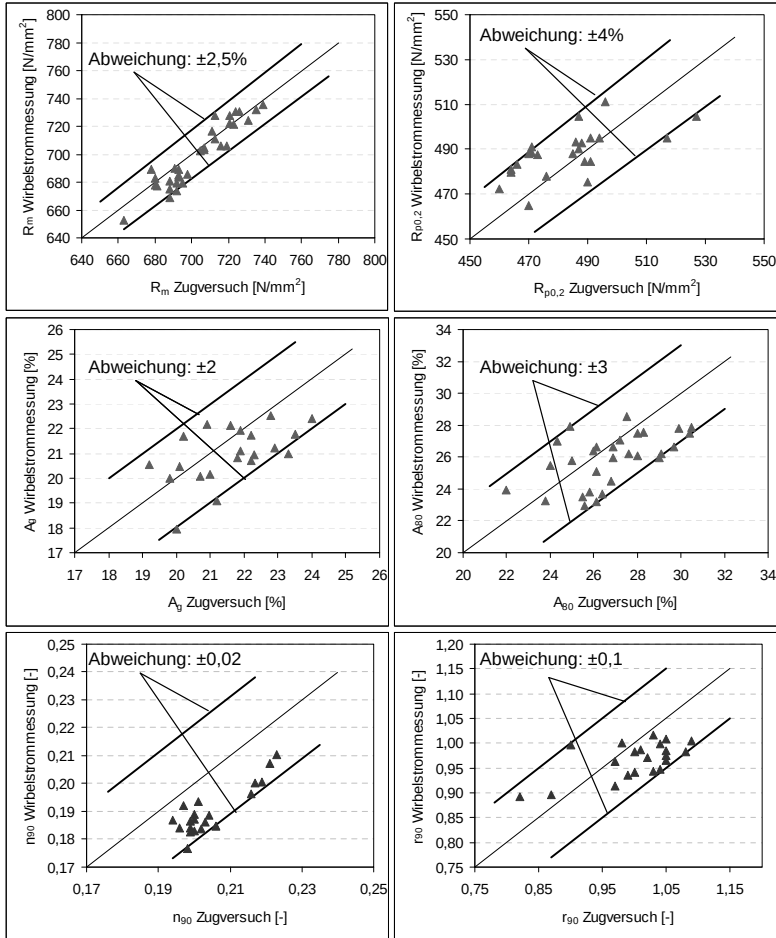
Die Online-Messung der mechanischen Werkstoffkennwerte setzte die Kalibrierung und die Validierung des Wirbelstromsensors bezogen auf den Werkstoff TRIP700 voraus. Diese Vorgänge mussten innerhalb der Anlage verwirklicht werden, um den Einfluss von Umgebungs- bzw. Störvariablen auszuschließen. Komponenten aus elektrisch leitfähigen und magnetischen Materialien können in einer Pressenanlage nicht vollständig aus der Sensorumgebung ausgeschlossen werden. In Abschnitt 2.2.2 wurde auf die negativen Einflüssen derartiger Werk-

stoffe hingewiesen. Ein fixer Einbauort der Komponenten minimiert den Einfluss auf die Messung.

Im Rahmen der Kalibrierung des Werkstoffs TRIP700 wurden ca. 150 Platinen mit dem Wirbelstromsensor manuell vermessen. Anschließend wurden Zugproben nach EN 10002-1 gefertigt und auf einer Zugprüfmaschine gezogen. Die gemessenen Proben unterteilten sich in eine Trainingsmenge mit ca. 120 Proben und in eine Validierungsmenge mit ca. 30 Proben. Anhand der Trainingsmenge geschah die Korrelation zwischen den Wirbelstrommesswerten und den mechanischen Werkstoffkennwerten. Das Modell stimmte mit den gemessenen Werkstoffkennwerten R_m , $R_{p0,2}$, A_g , A_{g0} , n_{90} , r_{90} sehr gut überein. Abweichungen zwischen den gemessenen und den berechneten mechanischen Werkstoffkennwerten waren nur geringfügig vorhanden.

Abbildung 38 zeigt den Vergleich zwischen den gemessenen und den über den Wirbelstromsensor berechneten Werkstoffkennwerten. Am Beispiel der Zugfestigkeit R_m soll die Darstellung erklärt werden. Auf der Abszisse sind die Ergebnisse des mechanischen Zugversuchs aufgetragen. Die Ordinate enthält die Werte der Messung und der Berechnung des Wirbelstromsensors der gleichen zu prüfenden Proben. Die Proben mit der höchsten Genauigkeit liegen auf der Winkelhalbierenden der Diagrammfläche. Auf dieser Gerade stimmen die Werte des Zugversuchs zu 100% mit den Werten der Wirbelstrommessung überein. Weiterhin stellen die zwei Geraden ober- und unterhalb der Ideallinie ein Fehlerintervall dar. Die höchste Genauigkeit wird für die Zugfestigkeit R_m mit $\pm 2,5\%$ Abweichung vom Zugversuchswert erreicht.

Die Genauigkeiten der berechneten Werkstoffkennwerte für den Werkstoff TRIP700 in Abbildung 38 müssen im Verhältnis zur Streubreite der materialspezifischen, zerstörend ermittelten Werkstoffkennwerte betrachtet werden. Die Schwankungsintervalle sind FAASS 2009 zu entnehmen. Die Fehlerintervalle für die Zugfestigkeit R_m und die 0,2%-Streckgrenze $R_{p0,2}$ genügen den Anforderungen einer konsistenten Erfassung und Auswertung. Die Abweichungen vom Referenzwert des Zugversuchs für die Gleichmaßdehnung A_g , die Bruchdehnung A_{g0} , die senkrechte Anisotropie r_{90} und den Verfestigungsexponent n_{90} weisen sehr hohe Werte auf. Dies kann bei den weiteren Auswertungen dazu führen, dass im Serienprozess die Schwankungen nicht festgestellt werden bzw. die Schwankungen nicht eindeutig dem Werkstoff oder der Ungenauigkeit des Korrelationsmodells zugewiesen werden können.



▲ Messwert Wirbelstromsensor

Abbildung 38: Validierungsergebnisse der zerstörungsfreien Prüfung des Werkstoffs TRIP700, inklusive der Abweichungen einzelner mechanischer Werkstoffkennwerte

Eine mögliche Fehlerquelle liegt in den Messungenauigkeiten des Zugversuchs. Während Größen, wie die Zugfestigkeit R_m und die 0,2%-Streckgrenze $R_{p0.2}$, im Zugversuch sehr genau gemessen und berechnet werden können, sind bei den Größen Gleichmaßdehnung A_g , Bruchdehnung A_{80} , senkrechte Anisotropie r_{90}

und Verfestigungsexponent n_{90} die Messmittel der Zugversuchseinrichtung noch teilweise mit Fehlern behaftet. Dies führt bei der Korrelation mit Wirbelstrommesswerten zu Unstimmigkeiten, die sich auf jede weitere Messung auswirken. Eine Verbesserung kann über die Fertigung mehrerer Zugproben der mit dem Wirbelstromsensor vermessenen Bleche erzielt werden. Die Werkstoffkennwerte mehrerer Proben werden einer Mittelwertbildung unterzogen, der Wert gilt anschließend als Referenz für das Training des Korrelationsmodells.

Mathematische Abweichungen bei der Bildung des Korrelationsmodells und bei der Berechnung der Werkstoffkennwerte fließen ebenfalls in das negative Ergebnis der Genauigkeitsuntersuchung in der Abbildung 38 ein. Eine Aussage zu den Modellen ist jedoch aufgrund der Black-Box-Gestaltung der Auswertungssoftware nicht möglich. Die erzielten Genauigkeiten stimmen mit den Analysen in SCHWIND 1998 und RUZOVIC 2004 gut überein.

Die Ergebnisse der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung durch eine Wirbelstrommessung führen zur Schlussfolgerung, dass die Auswertung und die Weiterverwendung der mechanischen Werkstoffkennwerte für die Vorhersage der Bauteilqualität bedingt ausreichend sind. Die identischen Größenordnungen der Schwankungsbereiche der Werkstoffkennwerte und der Genauigkeiten der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung sind unter anderem die Gründe hierfür. Eine Lösung für diese Problemstellung wird in Kapitel 4 aufgezeigt.

3.3 Blechdickenerfassung mittels des Lasertriangulationsverfahrens

3.3.1 Allgemeines

Im Folgenden wird die elektrische, mechanische und informationstechnische Integration des Lasertriangulationsverfahrens aus Abschnitt 2.2.3 in die Pressenlinie beschrieben, die der automatisierten Blechdickenerfassung im Fertigungsprozess dient. Gemessen wurde zwischen der Entstapelungsstation und der ersten Pressenstufe. Der Feeder vereinzelt die Platinen der zwei Entstapelstellen links und rechts zur Durchlaufrichtung. Als temporärer Aufbau wurden die Vorrichtungen mit Schraubverbindungen an einem Querträger direkt vor der ersten Stufe in der Pressenstrasse befestigt, wie in Abbildung 72 visualisiert.

3.3.2 Vorrichtungskonstruktion für den Serienbetrieb

Die Vorrichtung setzt sich aus drei Strebenprofilen zusammen. Sie kann in und senkrecht zur Durchlaufrichtung der Platinen manuell verschoben und auf die zu messende Platinenhöhe eingestellt werden. Somit ist es möglich, ohne Eingriff in die speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) des Feedersystems die Blechdicke der Platinen an beliebiger Stelle sowohl in Bewegung als auch bei Stillstand zu messen.

Die Sensoren wurden in einem vorgegebenen Abstand auf eine verzugfreie C-förmige Aluminiumplatte montiert. Es ist darauf zu achten, dass sich die Sensoren in einer Flucht befinden und rechtwinklig auf die Oberfläche des Messobjektes gerichtet sind. Bei den Sensoren der Fa. Keyence (siehe Abschnitt 2.2.3) ist ein Messabstand von 30 mm zur Platinenoberfläche einzuhalten, wobei der Messbereich ± 5 mm beträgt.

Es handelt sich um eine elektro-pneumatisch gesteuerte Messvorrichtung. Ein C-Träger wird durch zwei Linearführungen mit der Anschlussplatte verbunden. In die Anschlussplatte wurden zwei Pneumatikzylinder der Fa. Festo eingeschraubt und mit dem C-Träger verbunden, so dass eine Beweglichkeit des Sensorsystems relativ zum Messobjekt sichergestellt ist. Abbildung 71 stellt das 3D-CAD-Modell der Vorrichtung dar. Die doppeltwirkenden Zylinder werden durch ein 5/2-Wegeventil betätigt, wobei die in die Zylinder strömende Luft durch einfachwirkende Drosseln reduziert wird. Das Magnetventil wird durch das Stromsignal einer Lichtschranke angesteuert. Bei Anwesenheit einer Platine zwischen den Lichtschranken wird ein 24-V-Spannungssignal ausgesendet und das Magnetventil angesteuert. Ein gehärtetes Blech dient als Anschlag der Messvorrichtung an der Blechkante, wodurch immer im gleichen Abstand vom Platinenrand gemessen wird.

3.3.3 Inbetriebnahme und Kalibrierung des Systems

Wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben, wurden für die Messung der Blechdicke die Lasertriangulationssensoren der Fa. Keyence ausgewählt. Zur Erfassung einer Messstelle sind zwei Sensorköpfe vom Modelltyp LK-G37, das Steuergerät LK-G3001P und zwei Kabel zum Anschluss der Sensoren an die Steuereinheit erforderlich. Die Versorgungsspannung des Messsystems von 24 V wird von einem Netzteil mit stabilisiertem Output geliefert. Es besteht die Möglichkeit, die

Spannungs- bzw. Stromsignale direkt über die Anschlussklemmen des sechspoligen Klemmleistenblocks am Steuergerät abzugreifen und über eine Analog/Digital-Wandlerkarte weiterzuverarbeiten.

Die Einstellung bzw. die Programmierung des Sensorsystems LK-G37 der Fa. Keyence wurde über die Systemsoftware LK Navigator vorgenommen. Als Berechnungsverfahren wurden zwei Messköpfe (Sensor 1 und Sensor 2, siehe Abbildung 72) und ein Abtastzyklus von 200 μ s eingestellt. Um Messwertschwankungen zu vermeiden, wird nach 256 Messwerten ein gleitender Mittelwert gebildet. Die Kalibrierung der Sensorsysteme erfolgte mit Parallelendmaßen, die eine Längengenauigkeit von 1 μ m aufweisen.

3.3.4 Messergebnisse im Serienbetrieb

Für die Ermittlung der gemessenen Blechdicke pro Platine ist eine Rechenoperation für die Datenerfassung zu hinterlegen. Die Messwerte werden in der Serienproduktion über einen kontinuierlichen Zeitraum hinweg aufgenommen. Für jede Platine ist ein Wert zu ermitteln, der in der Datenbasis hinterlegt wird. Aufgrund von Vibrationen der Halterung, der Platine und der gesamten Anlage entstehen Schwankungen, die sich in den Messdaten niederschlagen. Als Umrechnungsalgorithmus eignet sich an dieser Stelle eine Berechnung des am häufigsten ausgegebenen Wertes. In HOFFMANN 2007 ist ein Vergleich zwischen den Messergebnissen des Sensoraufbaus und einer Mikrometerschraube zu finden. Die Messunterschiede der Serienvorrichtung schwanken in einem Intervall von 16 μ m. Damit entsprechen sie nahezu den Anforderungen, im Bereich einiger 0,01 mm zu messen.

Die Blechdicke wurde in mehreren Abpressungen am Versuchsträger Nr. 1 aufgenommen. Die Ausgangsplatine, aus der das untersuchte Bauteil gefertigt wurde, besaß eine Sollblechdicke von 2,0 mm. Abbildung 39 zeigt die Messergebnisse exemplarisch an ca. 500 Platinen einer Abpressung. Es lässt sich erkennen, dass die Blechdicke Schwankungen im Bereich zwischen 1,920 mm und 1,990 mm aufweist. Die ermittelten Schwankungen der Blechdicke beeinflussen laut FAASS 2009 nicht das Auftreten von Reißern in der Serienfertigung des Versuchsträgers Nr. 1. Die Prozessanalyse eines weiteren Bauteils kann jedoch ergeben, dass sich die Größe Blechdicke auf den Prozess und damit auf die Bauteilqualität entscheidend auswirkt.

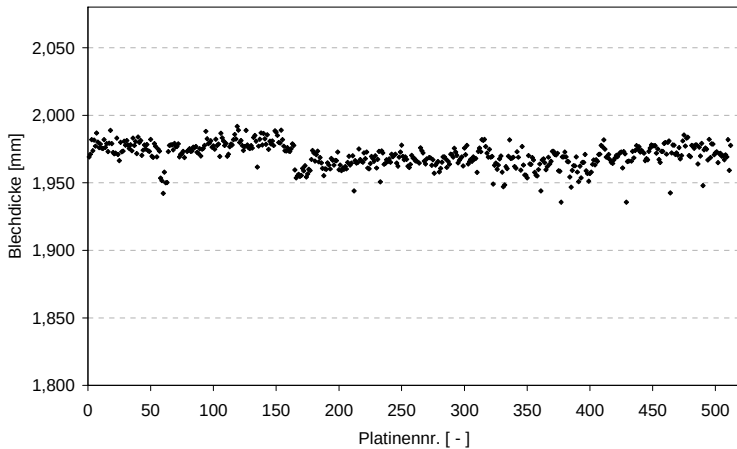


Abbildung 39: Blechdickenmessung des Versuchsträgers Nr. 1 an ca. 500 Platinen

3.4 Rauheits- und Schmierfilmmessung mittels des Reflexionsprinzips

Das im Abschnitt 2.2.4 vorgestellte Laborgerät zur Ermittlung der Rauheit und des Schmierfilms wurde im weiteren Verlauf für einen automatisierten Messablauf in die betrachtete Pressenanlage montiert. Die Detaildarstellung in Abbildung 36 zeigt den Einbauort und die Ausführung des Sensorkopfes (siehe auch Abbildung 73 im Anhang).

Der Sensor befindet sich am Feeder, der für den Transport der Platine vom Ldertisch in die erste Stufe zuständig ist. Beim Ansaugen der Platine wird der Messkopf des Sensors über eine federnde Befestigung auf die Blechoberfläche aufgedrückt. Eine um die Unterseite des Sensors umlaufende Gummilippe stellt den flächendeckenden, vollständigen Kontakt zwischen dem Messkopf und der Blechoberfläche sicher. Während des Transports der Platine in die erste Stufe kann die Messung ausgeführt werden. Die Messdauer von 0,1 Sekunden liegt deutlich unter der Transportzeit der Platine und stellt keine Einschränkung des Prozessablaufs der Anlage dar.

3.5 Temperaturerfassung des Bauteils und des Werkzeugs

Eine Vorauswahl der einzusetzenden Messtechnik wurde in Abschnitt 2.2.5 getroffen. Die Aufgabenstellung führte zur Schlussfolgerung, dass die Werkzeugtemperatur mittels Thermoelementen erfasst wird. Die Temperaturentwicklung im Ziehteil wird anhand von berührungslosen Infrarotthermometern aufgezeichnet. Die Einbauorte der Thermoelemente im untersuchten Werkzeug zeigt Abbildung 74 im Anhang. Drei Messstellen wurden festgelegt. Es handelt sich um den Stempel und den Blechhalter auf der linken sowie auf der rechten Seite des Werkzeugs. Die Sensoren mussten nah an der Wirkfläche des Werkzeugs integriert werden. An diesen Stellen ist laut FAASS 2009 die größte Erwärmung im Werkzeug zu erwarten. Beim Ziehen des Blechs über den Stempel kommt es sowohl zu Reibeffekten als auch zur Blechdickenreduzierung. Die Folgen sind eine Erwärmung des Blechs und des Werkzeugs. Am Blechhalter treten ähnliche Effekte auf, da die Ziehtiefe des betrachteten Versuchsträgers Nr. 1 ca. 200 mm beträgt und bezogen auf den Werkstoff TRIP700 erheblich ist. Bohrungen mit einer Tiefe von 100 mm wurden seitlich im Blechhalter erzeugt. Der Stempel wurde stirnseitig mit einer Bohrung von 50 mm Tiefe versehen. In diese Bohrungen wurden die Thermoelemente vom Typ K eingeführt. Sie erfassen Temperaturen zwischen 0° und 1000° Celsius, haben eine Genauigkeit von $\pm 1^\circ\text{C}$ und besitzen eine Länge von 200 mm. Eine gute Übertragung der Werkzeugtemperatur auf das Thermoelement gewährleistete eine Wärmeleitpaste als Medium zwischen dem Stahlguss des Werkzeugs und dem Kopf des Thermoelements. Die Thermoelemente wurden mit einem Messumwandler sowie mit einem Verstärker vom Typ JKT der Fa. RS Components GmbH, die seitlich am Werkzeug festgeschraubt sind, gekoppelt.

Die Temperatur des Ziehteils wurde über einen berührungslosen Sensor erfasst. Es handelt sich dabei um das Infrarotthermometer CTfast der Fa. Optris GmbH. Es hat eine Reichweite bis ca. 1,5 m. Der Messkopf wurde im Abstand von ca. 300 mm am Werkzeug montiert. Die Ziehteiltemperatur wird damit über eine Messfläche von ca. 30 mm² ermittelt. Die Temperaturmessung wird ausgelöst, sobald der Umformvorgang beendet und das Werkzeug geöffnet wird. Der für die herrschenden Umgebungsbedingungen ermittelte Emissionsfaktor (siehe Abschnitt 2.2.5) hat einen Wert von 0,9. Die Genauigkeit der Messung liegt bei $\pm 1^\circ\text{C}$.

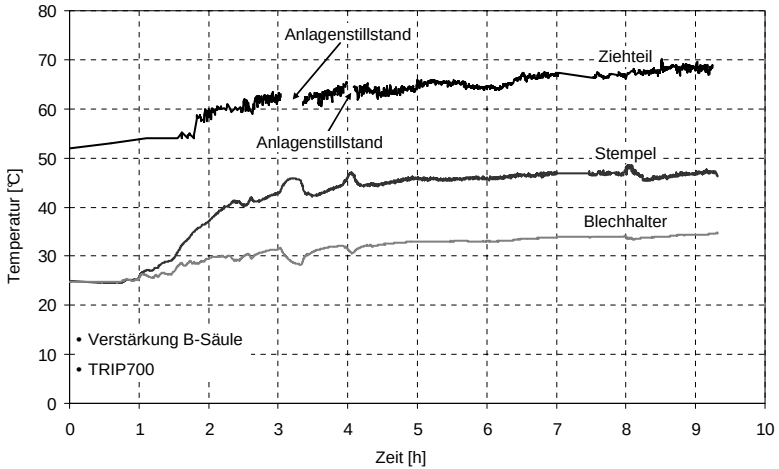


Abbildung 40: Temperaturmessung während einer Abpressung des Versuchsträgers Nr. 1 (FAASS 2009)

Abbildung 40 veranschaulicht beispielhaft die Temperaturentwicklung im Werkzeug und am Ziehteil über eine Abpressung mit einer Dauer von ca. acht Stunden. Die Temperatur im Blechhalter und im Stempel steigt im Produktionsverlauf von ca. 20° C Raumtemperatur asymptotisch auf einen Wert von ca. 45° C im Stempel und ca. 35° C im Blechhalter. Die Temperatur des Ziehteils beträgt bereits nach dem ersten Hub ca. 52° C und nähert sich der Asymptote von ca. 70° C an. Dieses Verhalten ist in allen messtechnisch begleiteten Abpressungen zu beobachten.

3.6 Integration der Platinenbeschriftungsanlage

Die Kennzeichnung von Platinen für den Serienbetrieb setzt die Aufbringung eines Schriftzugs auf das Blech voraus. Die Nachfolgeprozesse dürfen in keinerlei Weise negativ beeinflusst werden. Die Analyse in Abschnitt 2.2.6 hat erwiesen, dass die Kennzeichnung durch eine Tintenbeschriftung, die in den nachfolgenden Prozessen leicht entfernbar ist, die optimale Lösung hierfür bietet. Die Auswahl der verwendeten Tinte fiel auf eine Zusammensetzung, die auch bei den Stahlherstellern im Einsatz ist.

Das eingesetzte System heißt alphaJET E und stammt von der Fa. KBA-Metronic AG. Es handelt sich um ein sogenanntes Continuous-InkJET-System, bestehend aus einer Steuer- und einer Druckeinheit. Das System kann die Produktions- und die Produktdaten mit einer hohen Qualität aufbringen. Im Innenraum einer Pressenanlage herrscht durch Verdunstungen und die Aufwirbelung von Ölen stets ein Dunstnebel, der die Schreibqualität negativ beeinflussen würde. Abbildung 75 gibt einen Einblick in den prinzipiellen Aufbau des Tintenbeschriftungssystems. Zu erkennen ist zum einen die Steuereinheit, in der die prozessbedingten Parameter (z.B.: die Geschwindigkeit der Platine, die Druckwiederholungen, etc.) und die Programmabläufe (z.B.: das Kennzeichnungsverfahren) hinterlegt werden. Zum anderen ist die an die Steuereinheit angeschlossene Druckeinheit mit dem Druckkopf zu beobachten.

Für die Integration der Beschriftung in die untersuchte Pressenanlage wurde eine Halterung für den Druckkopf konstruiert. Abbildung 36 und Abbildung 75 stellen ebenfalls die Vorrichtungskonstruktion und das Beschriftungsergebnis am fertigen Bauteil dar. Als Einbauort wurde der Raum kurz vor dem Einlegen der Platine in die Ziehstufe ausgewählt. Es handelt sich dabei um die Beölungsstelle der Platine. Zwischen dem Druckkopf und der zu beschreibenden Platine ist eine Relativbewegung in einem Abstand von 5 mm zueinander erforderlich. Der optimale Lösungsansatz nutzt die Transportbewegung der Platine aus, während der Schreibkopf fest eingebaut ist. Damit ergibt sich folgender Schreibvorgang. Die Platine wird durch den Einlegefeeder vom Ladertisch entnommen und zur Ziehstufe transportiert. Dabei wird die Platine über den Druckkopf hinweg geführt. An der Vorrichtung befindet sich ferner ein Lichttaster, der die Kennzeichnung auslöst.

Die Zusammenführung der gemessenen Datensätze und der Bauteilqualität am Auslaufband erfordert die Kennzeichnung der Platinen durch eine fortlaufende, um die durchlaufende Platine inkrementierte Nummerierung. In der Steuereinheit des Beschriftungsgeräts wurde als Programm eine Routine für das Bedrucken jeder Platine mit einer fünfstelligen Nummer hinterlegt.

Die Voraussetzungen für eine eindeutige und konsistente Datenakquisition während der laufenden Serienproduktion wurden mit den hier umgesetzten Sensorsystemen und ihrer messtechnischen Kopplung geschaffen.

3.7 Identifikation der Qualitätsmängel

Im Zuge einer Prozessanalyse mit dem Ziel, auftretende Mängel bei der Abpresung des Versuchsträgers Nr. 1 festzustellen, wurden mehrere Reißerarten bestimmt. Die Ergebnisse werden zum besseren Verständnis und zur Durchgängigkeit der Arbeit an dieser Stelle kurz zusammengefasst. Die vier risskritischen Bereiche, die bei der Fertigung des Versuchsträgers Nr. 1 auftreten können, werden in Abbildung 41 illustriert.

Die Reißer Nr. 1 und Nr. 3 sind so genannte Kantenrisse. Beide Reißer bilden sich während des Ziehvorgangs. Von der Platinenkante ausgehend, breiten sie sich meist in den Bauteilbereich aus. Der Reißer Nr. 2 entsteht an der seitlichen Verprgung des Bauteils während des Ziehvorgangs. Der Reißer Nr. 4 befindet sich im T-Bereich des Versuchsträgers Nr. 1 und entsteht ebenfalls im Ziehvorgang. Bei den letztgenannten Reißern handelt es sich nicht um Kantenreier. Nähere Erläuterungen bzgl. der Qualitätsmängel sind in FAASS 2009 vorzufinden.

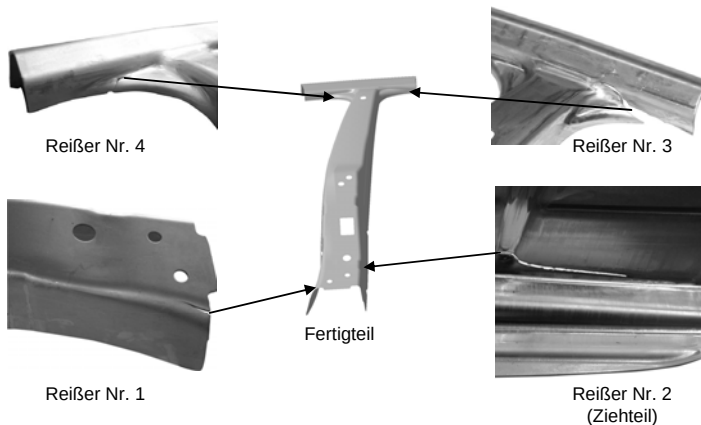


Abbildung 41: Risskritische Bereiche des Versuchsträgers Nr. 1 nach FAASS 2009

3.8 Online-Messwerterfassung und Kennwertbildung

3.8.1 Inbetriebnahme des mechatronischen Gesamtsystems

Bevor die Methodik für den Aufbau eines Prozessmodells und einer -regelung erläutert wird, soll der Ablauf der Messwerterfassung während des Serienbetriebs erklärt werden. Die Ausgangsbedingungen für eine platinengenaue Datenaufnahme sind erfüllt worden. Diese können mit der Teilequalität am Auslaufband in Zusammenhang gesetzt werden. Eine Zuordnung zu den unterschiedlichen Reißearten kann für jede Platine sichergestellt werden. Die Sensorsysteme für die Erfassung der Einflussgrößen sind validiert und in die Serienanlage integriert worden. Den Signalflussplan für das mechatronische Gesamtsystem zur Datenaufnahme zeigt Abbildung 42.

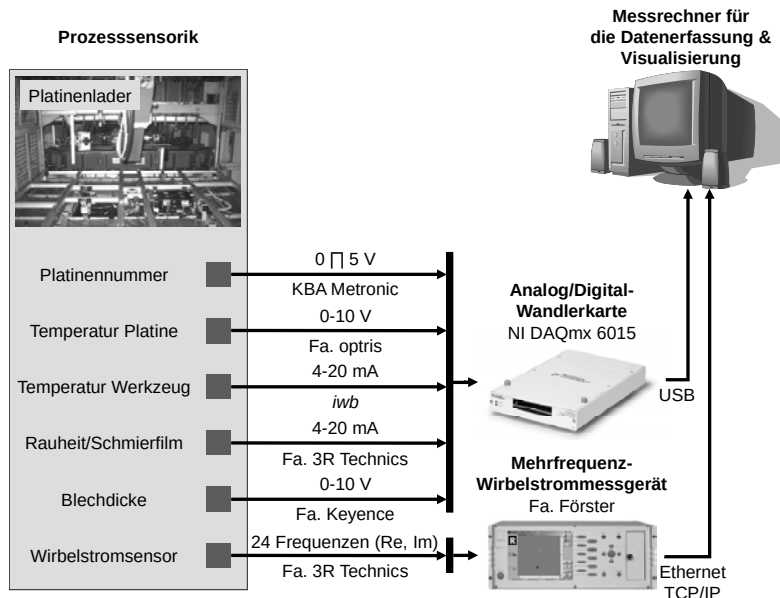


Abbildung 42: Messtechnische Anbindung der Sensorsysteme zum mechatronischen Gesamtsystem

Die Messwerterfassung im Messrechner findet mittels des Softwareprogramms Matlab® der Firma Mathworks statt. Zwei Arten von Eingangsdatensätzen sind

der Abbildung 42 zu entnehmen. Die analogen Signale werden über die Analog/Digital-Wandlerkarte der Fa. National Instruments dem Messrechner zugeführt. Die erfassten Messgrößen sind: die Temperatur des Werkzeugs und des Bauteils, die Blechdicke, die Rauheit und der Schmierfilm sowie die Platinennummer. Die eingestellte Abtastrate beträgt 1000 Hz, um eine konsistente Datenerfassung zu gewährleisten. In Matlab® ist hierzu ein Programmskript für die Erfassung, die Umrechnung, die Speicherung und die Visualisierung der Messwerte hinterlegt. Das dazugehörige Ablaufdiagramm wird in Abbildung 76 skizziert. Die Vorgehensweise der Datenverarbeitung ist bereits in den vorangegangenen Abschnitten erläutert worden.

Die Ausgangsdaten des Wirbelstromsensors zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung werden über eine Ethernet-Schnittstelle direkt an den Messrechner weitergegeben (Abbildung 42). Es handelt sich dabei um einen Datensatz, bestehend aus den Wirbelstrommesswerten (Abschnitt 2.2.2), den berechneten Werkstoffkennwerten und der eigens durch das Sensorsystem vergebenen Platinennummer. Die Datensätze der Analog/Digital-Wandlerkarte und der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung werden gemäß eines Ablaufdiagramms, determiniert durch die Reihenfolge der Messwertaufnahme, zu einem vollständigen Datensatz für jede Platine zusammengeführt.

Die unterschiedlichen Messorte in der untersuchten Pressenanlage führen zu einem zeitlichen Versatz bei der Gewinnung der Daten. Für die Zusammenführung der Messergebnisse, deren Zuordnung zur aktuell im Prozess anwesenden Platine und der zugehörigen Bauteilqualität am Auslaufband ist im Programmskript der Software Matlab® eine Ablaufkette abgelegt. Abbildung 76 veranschaulicht die einzelnen Schritte der Datenerfassung und der Zusammenführung zu einem einzelnen, platinenspezifischen Datensatz. Dieser dient als Basis für die weiteren Analysen, die Auswertungen und die Visualisierungen.

3.8.2 Visualisierungsoberfläche für die Anzeige der Messgrößen

Neben der automatisierten Datenerfassung und -speicherung der platinenbezogenen Einflussgrößen wurde eine Bedien- und Visualisierungsoberfläche entworfen. Darin sind die Kenn- und Messwerte der aktuell im Prozess anwesenden Platine bzw. des Bauteils enthalten. Die Oberfläche erfüllt die Aufgaben einer bedienfreundlichen Ansteuerung der Messaufgabe und einer übersichtlichen Dar-

stellung der gewonnen Daten. Der Aufbau der programmierten Oberfläche kann Abbildung 77 entnommen werden.

Über entsprechende Schaltflächen können sowohl die Datenaufzeichnung als auch die Datenanzeige gestartet bzw. angehalten werden. Ferner lassen sich vor dem Beginn der Aufzeichnung die Standardeinstellungen der Analog/Digital-Wandlerkarte (z.B.: Abtastrate) modifizieren. Die Messanzeige ist in vier Felder unterteilt, beginnend mit der aktuellen Platinennummer. Die digitalisierten Signale der Analog/Digital-Wandlerkarte sind innerhalb eines zweiten Feldes zusammengefasst. Darin sind für die Größen Blechdicke, Rauheit bzw. Schmierfilm, Temperatur des Bauteils und Temperatur des Werkzeugs jeweils eigene Anzeigetafeln vorgesehen. Aus den Ergebnissen der Wirbelstrommessung werden die mechanischen Werkstoffkennwerte extrahiert und innerhalb eines dritten Feldes vereinzelt abgebildet. Ein letztes Anzeigefeld ist für die Prognose der Bauteilqualität vorgesehen. Es umfasst drei Anzeigetafeln zur Veranschaulichung der vom Prozessmodell vorhergesagten Qualität. Die Gutteile und die gerissenen Teile des Typs Nr. 1, 3 oder 4 werden zusätzlich über eine farbliche Kodierung – Grün bzw. Rot – der Flächen hervorgehoben. Die eingesetzten Prozessmodelle, deren Funktionsweise und der Messablauf während der Begleitung einer Abpressung werden in Kapitel 4 erläutert.

3.9 Zusammenfassung des Datenerfassungskonzeptes

Mit den Inhalten der vorangegangenen Abschnitte sind die Voraussetzungen für eine robuste und platinengenaue Erfassung der wesentlichen Einflussgrößen auf die Bauteilqualität im Serienprozess erfüllt worden. Für die ausgewählten Sensorsysteme wurden die Vorrichtungen zur Integration der Messköpfe in die untersuchte Pressenanlage und in das betrachtete Werkzeug konstruiert. Weiterhin sind die Funktionsweise der Sensoren und die messtechnische Kopplung zu einem einheitlichen mechatronischen Datenerfassungssystem vorgestellt worden. Beginnend mit der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung auf Basis von Wirbelstrommessungen, über die Blechdickenmessung mittels Lasertriangulationssensoren, die Rauheits- und Schmierfilmbestimmung anhand eines relativen Reflexionsprinzips, die Temperaturermittlung über Thermoelemente im Werkzeug und die Infrarottemperaturmessung des umgeformten Bauteils wurden sämtliche Sensoren sukzessive in die Serienanlage implementiert. Jeder Platine wird damit ein Datensatz zugewiesen, der sich aus den berechneten Kennwerten der Messergebnisse zusammensetzt. Die Zuordnung zwischen dem platinenbezogenen Daten-

satz und der am Auslaufband ermittelten Bauteilqualität gewährleistet die Implementierung eines Beschriftungssystems zur Platinennummerierung mittels wasserabwaschbarer Tinte. Eine zusammenfassende Übersicht der integrierten Sensoren, der jeweiligen Hersteller, der Messgenauigkeit, etc. gibt Tabelle 14 im Anhang.

Die Ausführungen zu den Qualitätsmängeln des Versuchsträgers Nr. 1 komplettieren die Problemstellung. Die Informationen zu den Entstehungsorten, den Entstehungsmechanismen und den Wirkzusammenhängen zwischen den aufgetretenen Qualitätsfehlern dienen dazu, die weiteren Messreihen auszuwerten und zu analysieren.

Schließlich wurden die zusätzlich integrierten Systeme zur Prozessüberwachung zu einem mechatronischen Gesamtsystem zusammengefasst und deren softwaretechnische Kopplung realisiert. Die Datenaufnahme während der begleiteten Abpressungen im Serienprozess wird anhand eines Ablaufplans Schritt für Schritt ausgeführt. Eine speziell auf die Aufgabenstellung zugeschnittene Visualisierungs- und Bedienoberfläche sichert die Anzeige und Archivierung der gewonnenen Messergebnisse. Die gewonnenen Datensätze dienen zum Aufbau einer Datenbasis, die im Folgenden auf Korrelationen zwischen den Prozessdaten und der Bauteilqualität analysiert wird.

4 Prozessmodell zur Vorhersage und Regelung der Bauteilqualität

4.1 Allgemeines

Im vorliegenden Kapitel werden der Aufbau und die Inhalte der in Zusammenarbeit mit FAASS 2009 entstandenen Datenbasis für die Erstellung eines Prozessmodells bei der Fertigung des Versuchsträgers Nr. 1 beschrieben. In einem ersten Schritt werden die gewonnen Datensätze bewertet. Diese Analysen werden zu den Ansätzen für die Modellbildung und zur Auswahl des Nachbildungsverfahrens des vorhandenen Prozesses führen. Zur Vervollständigung der Prozesskette wird anschließend der Aufbau eines Regelkreises beschrieben. So wird die Bauteilqualität durch das Zusammenspiel eines Prozessmodells, eines Reglers und eines Aktors beeinflusst.

Eine entscheidende Rolle für den Einsatz Neuronaler Netze spielen repräsentative Datensätze. Die Fertigung des Versuchsträgers Nr. 1 wurde über mehrere Produktionsreihen, sogenannte Abpressungen, begleitet, die Prozessdaten wurden aufgezeichnet und die Qualität zugeordnet. Die Erstellung eines Prozessmodells zur Qualitätsvorhersage setzt aussagekräftige Daten voraus. Diese wurden empirisch ermittelt, da Erfahrungswerte aufgrund der Neuheit der Anwendung nicht vorlagen.

4.2 Überblick der Datenbasis und Analyse der Prozessdaten

4.2.1 Statistik der untersuchten Produktionsreihen (Abpressungen)

Die Datenbasis setzt sich aus Eingangsdaten, Ausgangsdaten und der dazugehörigen Bauteilqualität zusammen. Im Rahmen der Messdatenerfassung am Versuchsträger Nr. 1 wurden acht Abpressungen verfolgt und dokumentiert. Die ersten sechs Abpressungen dienten als Grundlage für die Modellerstellung zur Qualitätsvorhersage. Entscheidend hierbei ist nicht zwingend die Anzahl der dokumentierten Abpressungen, sondern in erster Linie die Anzahl der beobachteten Qualitätsunterschiede, d. h. die Anzahl der gerissenen Bauteile und das zahlenmäßige Verhältnis zwischen den aufgetretenen Gutteilen und den aufgetretenen

Schlechtteilen. Eine Übersicht der Abpressungen und der dazugehörigen Bauteilumfänge zeigt Abbildung 43.

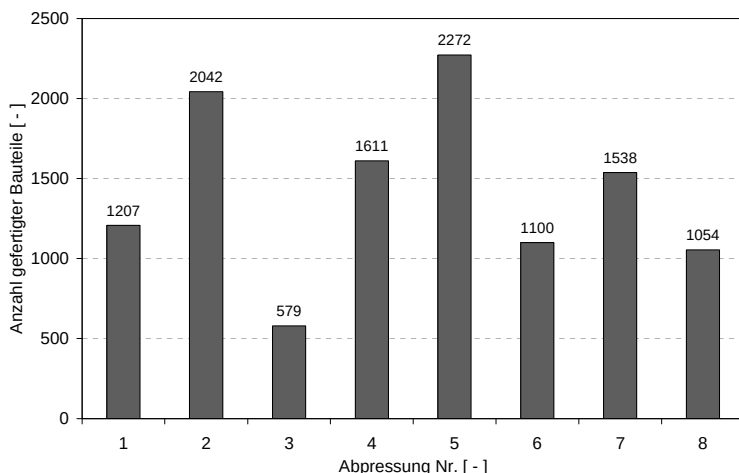


Abbildung 43: Statistik der messtechnisch begleiteten Abpressungen und der Bauteilumfänge

Die Abpressung Nr. 7 diente der Validierung des aus vorausgegangenen Datenreihen entstandenen Modells. Die Eingangsdaten wurden einem Prozessmodell zugeführt, das eine Qualitätsvorhersage für die noch nicht umgeformte Platine traf. Am Auslaufband konnte anschließend die Qualitätsvorhersage mit der Realität verglichen und bewertet werden. Der erfolgreichen Überprüfung des Modells schloss sich die Regelung der Bauteilqualität auf der Basis des prognostizierten Zustandes an. In der Abpressungsübersicht erfüllte die Abpressung Nr. 8 diesen Zweck. Die entwickelten, in die Anlage integrierten Komponenten wurden in einem mechatronischen Gesamtsystem zusammengeschlossen. Über eine modellgestützte prädiktive Regelung wurden die Gut- und die Schlechteile bestimmt und die Qualität der Schlechteile über einen Aktor geregelt. Es handelte sich um die explizite Nutzung eines Prozessmodells zur Vorhersage zukünftiger Prozesszustände und die Berechnung eines regelnden Stellsignals. Zur Sicherstellung der einwandfreien Funktionsweise des Regelkreises wurde das Prozessmodell erneut validiert. Damit wurden die Robustheit und die Reproduzierbarkeit der Qualitätsvorhersage sichergestellt.

Die Differenzierung zwischen den unterschiedlichen Abpressungen musste aufgrund zweier Aspekte während der Modellfindung beibehalten werden. Zum einen sollte die Realität im Serienprozess möglichst genau abgebildet werden. Die Datensätze wurden chronologisch ermittelt, zur Modellbildung eingesetzt und als Prozessmodell lediglich in den darauf folgenden Abpressungen angewendet. Zum anderen ist die Unterscheidung nach Abpressungen entscheidend für die Erstellung eines exakten Modells. Grund hierfür sind die nicht zwingend reproduzierbaren Verhältnisse bei der Prozessdatenaufnahme. Die Sensorsysteme mussten vor bzw. nach jeder Abpressung justiert sowie ein- bzw. ausgebaut werden. Damit hätten sich leicht unterschiedliche Messwerte ergeben können. Diese hätten die Modellbildung negativ beeinflussen und zu falschen Aussagen führen können. Folglich besteht die Möglichkeit, bei Bekanntheit der Abpressungsmengen diese Unterschiede auszugleichen. Diese Erkenntnis ist der erste Schritt auf dem Weg zum erfolgreich generierten Modell. Ausgehend von der Einteilung der Abpressungen lassen sich sukzessive weitere Kriterien ableiten, die in den folgenden Abschnitten näher beschrieben werden.

4.2.2 Zuordnung der Bauteilqualität

Von entscheidender Bedeutung bei der Modellgenerierung ist die genaue Pflege der zugrunde liegenden Datenbasis. Hierzu ist neben der Messdatenerfassung und der entsprechenden Zuordnung der Messwerte zu jeder Platine bzw. zu jedem Bauteil die korrekte Einstufung der Qualität der Bauteile entscheidend. Über die im Gesamtsystem integrierte Beschriftungseinheit lässt sich die Zuordnung der Bauteilqualität bis zum Auslaufband verwirklichen. Anschließend sind die Entstehungsmechanismen der aufgetretenen Qualitätsmängel aufzuzeigen. Durch diese Maßnahme lassen sich Fehler zusammenfassen bzw. differenzieren. Fehlen diese Informationen, kann die Modellbildung über Neuronale Netze entweder stark erschwert sein, fehlerhaft werden oder sogar scheitern. Liegt der Ursprung mehrerer Reißer in den gleichen Entstehungsmechanismen, werden sie im Prozessmodell zu einem gleichartigen Qualitätsfehler zusammengefasst. Damit werden die physikalischen Abhängigkeiten zwischen den Einflussgrößen und den Qualitätsfehlern im Modellentwurf berücksichtigt. In den messtechnisch begleiteten Abpressungen des Versuchsträgers Nr. 1 müssen drei Reißertypen als Qualitätsfehler eingestuft werden. Die aus acht Abpressungen gewonnene Datenbasis ist in Abschnitt 3.7 nach den Versagensursachen eingeteilt worden. Die Abpressungsstatistik nach den aufgetretenen Gutteilen und den Reißertypen zeigt Abbil-

Abbildung 44. Auf der Abszisse ist die jeweilige Abpressung aufgetragen. Die linke Ordinate entspricht der Anzahl der gefertigten Gutteile, während die rechte Ordinate die Anzahl der aufgetretenen Reißer visualisiert.

Allgemein ist festzustellen, dass die Anzahl aufgetretener Reißer im Verhältnis zu den produzierten Gutteilen sehr niedrig war, und zwar ca. 1:100. Damit gestaltete sich der Entwurf eines Modells des vorliegenden Prozesses wesentlich komplexer. Neuronale Netze und Algorithmen im Allgemeinen setzen – abhängig von der Aufgabe – im Idealfall ein ausgewogenes Verhältnis der unterschiedlichen Zustände voraus (Abschnitt 1.4.6). Im Folgenden bestand die Herausforderung darin, trotz des unausgeglichene Verhältnisses zwischen den aufgetretenen Reißern und den Gutteilen ein Prozessmodell für die Vorhersage und Regelung der Qualität des betrachteten Versuchsträgers Nr. 1 zu erstellen.

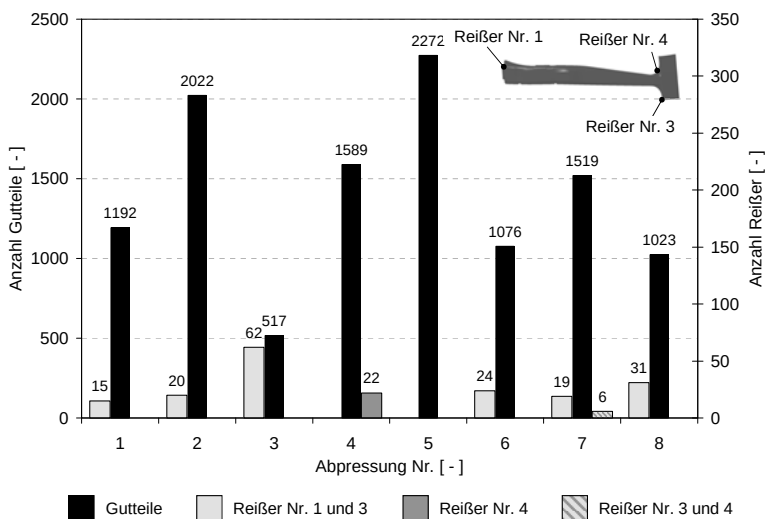


Abbildung 44: Einteilung der begleiteten Abpressungen nach den aufgetretenen Gutteilen und den Reißerarten

Der Abpressungsstatistik in Abbildung 44 in Zusammenhang mit Abschnitt 3.7 ist zu entnehmen, dass bei den Abpressungen Nr. 1, 2, 3, 6, 7 und 8 jeweils gerissene Bauteile vom Reiertyp Nr. 1 und 3 vorgekommen sind. Der risskritische Bereich, in dem der Reißer Nr. 1 aufgetreten ist, befindet sich im bergangsreich des Bauteils zwischen der B-Säule und dem Dachholm. Der Reißer Nr. 3 ist

am unteren Ende des Bauteils an der Kante des U-Profils vorzufinden. Der Zusammenhang zwischen den Reißern Nr. 1 und 3 ist in Abschnitt 3.7 angegeben. Aufgrund ihres gemeinsamen Entstehungsmechanismus wurden sie in den folgenden Modellierungsuntersuchungen als ein einziger, gleichartiger Qualitätsfehler betrachtet. Da deren physikalischer Ursprung identisch ist und sich laut FAASS 2009 in den Werkstoffeigenschaften widerspiegelt, würde eine gesonderte Differenzierung der Qualitätsfehler Reißer Nr. 1 und 3 ein ungenaues Korrelationsmodell liefern.

Die Abpressung Nr. 4 wies als einzige Messreihe exklusiv den Reißer Nr. 4 auf. Eine Modellbildung für diesen Reißertyp ist wegen der niedrigen Anzahl von 22 gerissenen Bauteilen und der fehlenden Testmenge aus den weiteren Abpressungen nur begrenzt möglich. Das entworfene Modell konnte somit nicht validiert und dessen Aussagekraft nicht bewertet werden. Desweiteren trägt die Abpressung Nr. 5 wenig zur Modellbildung und Validierung bei, da bei dieser nur Gutteile gefertigt wurden. Mit dem aufgebauten Modell wurde in der Abpressung Nr. 7 die Bauteilqualität mittels einer Online-Messung und einer Online-Qualitätsvorhersage getestet. An dieser Stelle lag eine neue Kombination der Reißer Nr. 3 und 4 vor. Diese wurde in die Trainingsmenge des Prozessmodells aufgenommen. Mangels weiteren Auftretens der genannten Reißerkombination konnte ein Test bei den darauf folgenden Abpressungen nicht vorgenommen werden. In den Ausführungen zur Modellbildung bleiben sie daher unberücksichtigt. Letztendlich diente Abpressung Nr. 8 dazu, den gesamten Regelkreis in der Serienfertigung zu realisieren. Als Prozessmodell wurde erneut das Wissen aus den ersten sechs Abpressungen eingesetzt.

4.2.3 Übersicht der Eingangsgrößen

Für eine umfassende Prozessüberwachung wurden in den Kapiteln 2 und 3 mehrere Sensorsysteme definiert, beschrieben und deren Implementierungsmöglichkeiten in die Serienfertigung aufgezeigt. Sie repräsentieren die Eingangsgrößen der vorliegenden Datenbasis und können der Tabelle 5 zusammen mit den entsprechenden Kennwerten entnommen werden.

Somit stehen bei der Modellerstellung 60 Kennwerte für die Bewertung jeder Platine zur Verfügung. Um die Anzahl der Eingangsgrößen auf ein Minimum zu reduzieren, wie in Abschnitt 1.4.6 erklärt, müssen weitere Kriterien definiert

werden. Dadurch wird die Komplexität minimiert und die Robustheit sowie die Stabilität bei der Generierung des Modells sichergestellt.

4.2.4 Bewertungskriterien und Auswahl relevanter Eingangsgrößen

Es existieren zwei Methoden, die Anzahl der Eingänge konsistent zu verringern. Die Reduktion der Eingänge äußerte sich bei der Modellerstellung als vorteilhaft, da nicht relevante Eingangsgrößen das Prozessmodell hätten verfälschen können. Zum einen ließen sich durch Voruntersuchungen Größen ausschließen bzw. deren Einfluss auf den Prozess quantifizieren. In FAASS 2009 ist experimentell und simulativ der Einfluss der Blechdicke auf die Bauteilqualität analysiert worden. Die Untersuchung belegt, dass eine Blechdickenmessung über die gesamte Platinenbreite notwendig wäre, um weiterführende Informationen für den Umformprozess zu erhalten. In der realisierten Prozessüberwachung ist lediglich eine punktuelle Messung technisch möglich. Zum anderen trat bei den untersuchten Platinen eine sehr geringe Dickenstreuung auf. Daher ist es zulässig, die Eingangsgröße Blechdicke in der Datenbasis zu vernachlässigen.

Anhand von Umformsimulationen zeigt FAASS 2009 ebenfalls, dass die tribologischen Verhältnisse den vorliegenden Prozess nicht relevant beeinflussen. Das Bauteil unterliegt keiner Grund- und Zusatzbeölung, sondern wird mit Trockenschmierstoff gefertigt. Somit lässt sich die Größe, zusammengesetzt aus der Rauheit und dem Schmierfilm, ebenfalls vernachlässigen.

Was die Temperatur betrifft, so fanden im Rahmen der Arbeit Versuche im kalten und im warmen Werkzeugzustand statt. Hierzu wurden Bauteile aus aussortierten Materialchargen gefertigt. Diese führten sowohl beim kalten als auch beim warmen Werkzeug zu Qualitätsfehlern. Die beschriebenen Messergebnisse und die aufgetretenen Reißer im kalten und im warmen Werkzeugzustand lassen den Rückschluss zu, dass die Temperatur bei der Fertigung des Versuchsträgers Nr. 1 keinen signifikanten Einfluss hat (FAASS 2009).

Gemäß Abschnitt 3.7 weisen die Werkstoffeigenschaften bzw. die Güte des Materials den größten Einfluss auf die Bauteilqualität auf. Mittels des Wirbelstromsensors wurden für jede Platine im Serienbetrieb zerstörungsfrei die Werkstoffeigenschaften aufgenommen (Abschnitt 3.2). Sie liegen sowohl in Form von Wirbelstrommesswerten in Amplitude und Phase als auch über ein Modell zur Berechnung mechanischer Werkstoffeigenschaften in Form von Werkstoffkennwer-

ten (R_m , $R_{p0,2}$, etc.) vor. Tabelle 5 zeigt die Übersicht relevanter Eingangsgrößen der Datenbasis.

Eingangsgröße	Kennwert pro Platine	Relevanz für die Modellbildung
Wirbelstromdaten	48	+
Werkstoffkennwerte	6	+
Blechdicke	1	-
Schmierfilm	1	-
Temperatur am Stempel	1	-
Temperatur am Blechhalter	2	-
Temperatur im Bauteil	1	-
Platinennummer	1	+

Tabelle 5: Übersicht der Eingangsgrößen, der erzeugten Kennwerte und ihres Einflusses auf die Bauteilqualität

Als letzter Punkt ist die Beschriftung jeder Platine zu erwähnen. Sie ermöglicht die exakte Zuordnung der gemessenen Datensätze zum Bauteil und zum Qualitätszustand.

4.2.5 Voruntersuchung der Eingangs- und Ausgangsdaten

Die gewonnenen Datensätze enthalten unter anderem die so genannten Wirbelstrommesswerte. Die Ausgangsgrößen des Sensors sind, wie in Abschnitt 3.2 erläutert, Kennwerte von Schwingungen unterschiedlicher Frequenz und Amplitude. Ausgegeben werden sie in Form eines Real- und eines Imaginärteils für die 24 gemessenen Frequenzen des Systems. Um eine physikalische und praktisch handhabbare Darstellungsweise der Messwerte zu erreichen, fand in einem Vorverarbeitungsschritt die Umrechnung in Amplitude und Phase nach Gleichung (7) und (8) statt:

$$A = \sqrt{\text{Re}^2 + \text{Im}^2} \quad (7)$$

$$\rho = \arctan\left(\frac{\text{Im}}{\text{Re}}\right) \quad (8)$$

A Amplitude des Ausgangssignals des Wirbelstromsensors

ρ Phase des Ausgangssignals des Wirbelstromsensors

Re Realteil des Ausgangssignals des Wirbelstromsensors
Im Imaginärteil des Ausgangssignals des Wirbelstromsensors

Anhand dieser Darstellung lässt sich für jede Erregerfrequenz die Verstärkung bzw. Abschwächung der Amplitude und die Verschiebung der Phase ablesen. Abbildung 45 und Abbildung 46 zeigen die Schwankungsintervalle der Amplituden und der Phasen der Wirbelstrommesswerte der gemessenen Platinen aus den Abpressungen Nr. 1 bis 6.

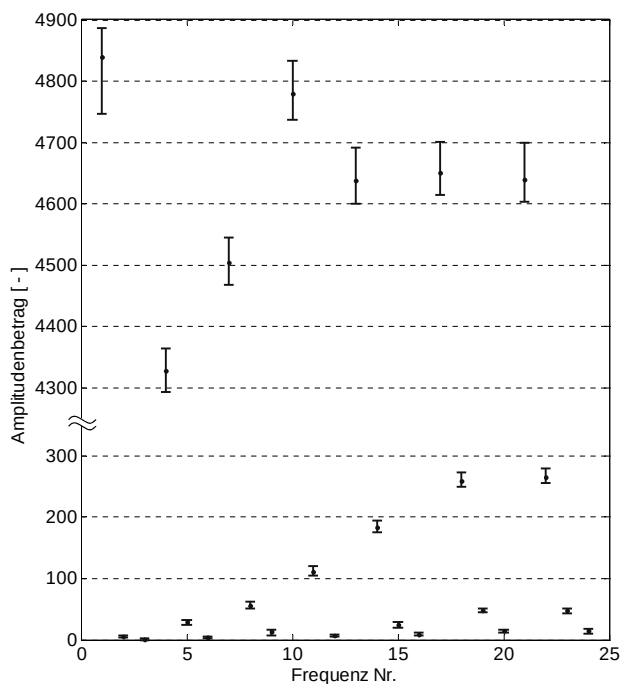


Abbildung 45: Schwankungsintervalle der Amplituden über die gemessenen Platinen

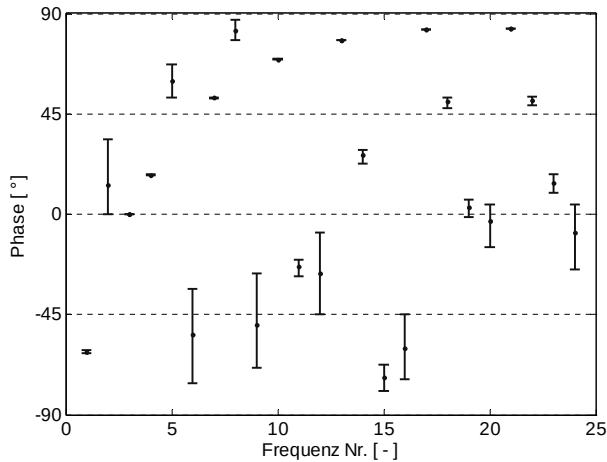


Abbildung 46: Schwankungsintervalle der Phasenbeträge über die gemessenen Platinen

Die Amplituden der 24 Frequenzen weisen einen stark schwankenden Wertebereich auf. Sie variieren sowohl in ihrem absoluten Wert als auch in unterschiedlich großen Intervallen. Werden die Daten derartig unbalancierter Ausprägung als Eingangsgrößen für Modellierungsalgorithmen eingesetzt, kann es zu fehlerhaften Modellen kommen bzw. die Modellfindung kann sich als ergebnislos gestalten. Der Wertebereich der Phasen variiert zwischen -90° und $+90^\circ$. Die Schwankungen der einzelnen Phasen bei der jeweiligen Frequenz sind erheblich. Während die Phasenverschiebungen bei hohen Amplituden nahezu konstant sind, ergeben sich bei den Frequenzen mit niedriger Amplitude große Variationen der Phasenbeträge. Dieser Sachverhalt führt zur Schlussfolgerung, dass eine Größe, betrachtet über alle Frequenzen, für die weitere Datenanalyse und Modellbildung hinreichend ist. Sowohl die Amplitude als auch die Phase, da sie sich aus dem gemessenen Real- und Imaginärteil zusammensetzen, geben die Informationen der Eingangsdaten wieder. Eine mathematische nichtlineare Funktion verbindet sie miteinander. Demzufolge ist es zulässig, eine Eigenschaft der Wirbelstrommesswerte für die nachfolgende Modellfindung zu vernachlässigen.

Ziel der Vorverarbeitung ist es, eine konsistente Reduzierung der gemessenen Eingangsdaten zu erreichen. Dabei darf jedoch der Informationsgehalt der gewonnenen Messwerte keinesfalls verloren gehen. Die Verarbeitung der Daten,

die mit starken Variationen und mit großen Abweichungen behaftet sind, sowie die zielführende Auswahl der Eingangsparameter für die Korrelationsmodelle werden in Abschnitt 4.3 näher erläutert.

Bevor die komplexen Zusammenhänge zwischen den Eingangsgrößen und der Bauteilqualität aufgestellt werden konnten, fand die Analyse der Datenbasis statt. Betrachtet wurden die 48 Messwerte des Wirbelstromsensors über die Summe aller Abpressungen. Des Weiteren wurde jedem Wirbelstrommesswert die Qualität des entsprechenden Bauteils gegenübergestellt, mit dem Ziel, einen vereinfachten Zusammenhang zwischen den Wirbelstrommesswerten und dem Gutteil bzw. dem Fehlerteil zu erkennen. Aktuell geht aus der Untersuchung zum Stand der Technik und der Forschung hervor, dass kein expliziter physikalischer Zusammenhang zwischen den Wirbelstrommesswerten und dem Formänderungsvermögen eines Werkstoffs existiert. Würden einzelne Werte der Wirbelstrommessung eine deutliche Wechselwirkung mit der Bauteilqualität aufweisen, dann könnten die gemessenen Platinen in Gut- und Schlechteile analytisch klassifiziert werden.

Ein direkter Zusammenhang zwischen der Bauteilqualität und den Wirbelstrommesswerten war bei den gemessenen Platinen nicht zu erkennen. Die Mengen der Wirbelstrommesswerte für die zugehörigen Schlechteile und die Gutteile stimmen vollständig überein. Somit lässt sich allein aus der grafischen und statistischen Analyse der Wirbelstrommesswerte keine Aussage über die Bauteilqualität treffen. Folglich ist die Kombination mehrerer Kennwerte für die Erstellung eines Prozessmodells des Umformvorgangs entscheidend.

Gemäß Abbildung 47 ist für den zweidimensionalen Raum die Ableitung eines analytischen Zusammenhangs bzw. durch grafische Anschauung eine Zuordnung der Werte zur dazugehörigen Bauteilqualität aufgezeigt.

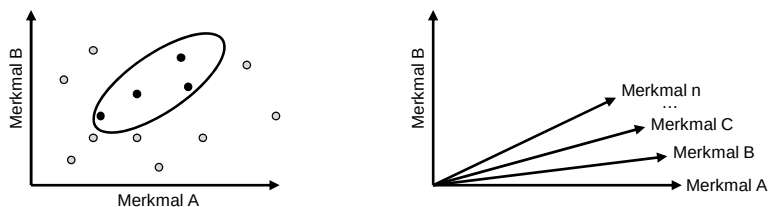


Abbildung 47: Zweidimensionaler und n-dimensionaler Entscheidungsraum

Andererseits ist die Lösung dieser Aufgabe für den n -dimensionalen Raum nicht trivial und erfordert komplexe mathematische Ansätze und Methoden. Für die Klassifizierungen in einem hochdimensionalen Merkmalsraum sind nur Maschinenlernverfahren geeignet, da manuell die Problemlösung nicht möglich ist. Hier gibt es verschiedenen Methoden der Korrelationsbildung, von Entscheidungsbäumen bis zu Neuronalen Netzen. Im folgenden Abschnitt werden verschiedene Ansätze für die Anwendung untersucht. Die Methode der Neuronalen Netze erwies sich dabei als bestes Werkzeug für die Erstellung der Qualitätsmodelle.

4.3 Modell zur Online-Qualitätsvorhersage auf Basis Neuronaler Netze

4.3.1 Allgemeines

Die Korrelation zwischen den Eingangsdaten und dem Qualitätszustand als Ausgangsdaten impliziert mehrere Schritte. Um auf die Bauteilqualität zu schließen, sind folgende Vorgehensweisen möglich, die in Abbildung 48 illustriert werden.

1. Aus den erfassten Wirbelstrommesswerten, die die elektromagnetischen Eigenschaften der Platinen widerspiegeln, lassen sich über Korrelationen die mechanischen Werkstoffkennwerte ermitteln. Diese können in Umformsimulationen einbezogen und die Qualität des Bauteils kann daraus abgeleitet werden. In FAASS 2009 wurden die Auswirkungen der Schwankungen der mechanischen Werkstoffkennwerte auf das Umformergebnis untersucht. Die dabei erschlossenen Wirkzusammenhänge entziehen sich jedoch einer analytischen Beschreibung, da sie mit Nichtlinearitäten behaftet sind. Eine Inline-Qualitätsregelung auf Basis von Umformsimulationen ist wegen der hohen Rechenzeiten (mehrere Stunden) und des teilweise unvollständigen Simulationsergebnisses technisch und wirtschaftlich nicht realisierbar.
2. Liegen die mechanischen Werkstoffkennwerte vor, lässt sich über Korrelationsmethoden auf die Bauteilqualität schließen. Ausschlaggebend hierbei ist eine exakte Bestimmung bzw. Ermittlung der Werkstoffkennwerte. Ist diese Voraussetzung nicht erfüllt, kann die Modellbildung zu ungenauen Ergebnissen führen. Die Klassifikation der Qualitätsvorhersage wird

von zwei Parametern bestimmt: Genauigkeit der Werkstoffkennwerte und Genauigkeit des Korrelationsmodells.

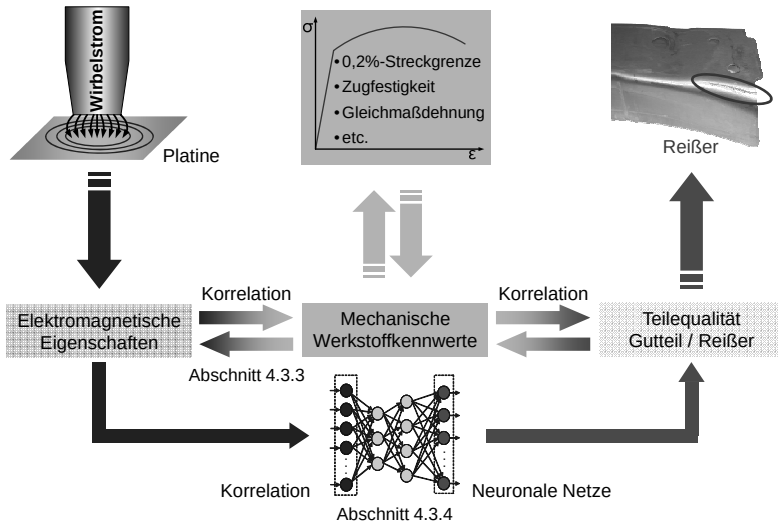


Abbildung 48: Korrelationsmöglichkeiten zwischen den elektromagnetischen Eigenschaften, den mechanischen Werkstoffkennwerten und der Teilequalität

- Die genannten Methoden stellen die Korrelation zwischen den Werkstoffeigenschaften der Platine und der Bauteilqualität auf indirektem Wege her. Die Schlussfolgerung einer direkten Korrelationsmethode liegt demzufolge nahe. Realisiert wird dies durch die Bildung eines Korrelationsmodells direkt zwischen den Wirbelstrommesswerten und der Bauteilqualität. Die Fehlerquellen der indirekten Korrelationsmethoden halbieren sich. Anstatt zweier Korrelationen zwischen den Wirbelstrommesswerten und den Werkstoffkennwerten sowie zwischen den Werkstoffkennwerten und der Bauteilqualität wird lediglich eine Korrelation zwischen den Wirbelstrommesswerten und der Bauteilqualität berechnet. Mögliche Ungenauigkeiten bei den unterschiedlichen Modellbildungen werden dadurch reduziert. Gemäß RUZOVIC 2004 und SCHWIND 1998 geben die Wirbelstrommesswerte hinreichende Informationen über den gemessenen Werkstoff, dessen Gefüge, die chemische Zusammensetzung etc. wieder (Abschnitt 1.4.5.3). Die einzigen Größen, die die Qualitätsvorhersage beein-

flussen, sind die Genauigkeit der Wirbelstrommessung und die des Korrelationsmodells.

4.3.2 Strategien der Modellbildung

Im Hinblick auf die beschriebenen Aspekte und die Aufgabenstellung wurden die Korrelationsmodelle auf Basis von Neuronalen Netzen zwischen den Eingangs- und den Ausgangsgrößen gebildet. Aufgrund der direkten und indirekten Zusammenhänge zwischen den elektromagnetischen Eigenschaften, den mechanischen Werkstoffkennwerten und der Bauteilqualität fand ein exemplarischer Nachweis für die Eignung Neuronaler Netze zur Lösung der dargestellten Problemstellung statt.

Dafür wurde anfangs eine vereinfachte Thematik betrachtet. Untersucht wurden mehrere Ansätze der Korrelation zwischen den Wirbelstrommesswerten und den mechanischen Werkstoffkennwerten. Dieser Rechenbaustein ist, wie in Abschnitt 2.2.2 erläutert, ebenfalls in der Software des Sensorlieferanten 3R Technics (RUZOVIC 2004) für den Wirbelstromsensor hinterlegt. Die Fehlerquote bei der Berechnung der mechanischen Werkstoffkennwerte für den Werkstoff TRIP700 gibt Abbildung 38 wieder. Ziel war es nun, mit einer kleinen Losgröße und einer reduzierten Anzahl an Eingangsdaten die Methodik der Neuronalen Netze als geeignete Modellierungsart nachzuweisen. Diese Vorgehensweise ist aufgrund der beschriebenen Zusammenhänge zwischen den zur Verfügung stehenden Datensätzen zulässig. Des Weiteren gibt die Kenntnis der Korrelationsmethode des Wirbelstromsensors Aufschluss über den richtigen Lösungsansatz für die Berechnung der Qualität direkt aus den Wirbelstrommesswerten.

Der betrachtete Datensatz enthält Ergebnisse der Wirbelstrommessungen von 198 Platinen und die dazugehörigen im Zugversuch ermittelten Werkstoffkennwerte. Ausgewählt wurden mehrere Platinen aus zehn Chargen. Sie repräsentieren somit eine Streuung, die bei der Fertigung des Werkstoffs auftreten kann. Aus einem Satz identischer Platinen wurden die Wirbelstrommesswerte und die sechs mechanischen Werkstoffkennwerte Zugfestigkeit R_m , 0,2%-Streckgrenze $R_{p0.2}$, Gleichmaßdehnung A_g , Bruchdehnung A_{80} , senkrechte Anisotropie r_{90} und Verfestigungsexponent n_{90} ermittelt. Um die Leistungsfähigkeit der Modelle bezüglich des Trainings und der Genauigkeit beurteilen zu können, wurden diese jeweils mit 50 Prozent der Daten kalibriert und mit den verbleibenden 50 Prozent validiert. Das Ergebnis der Validierung wurde mit den gemessenen Werkstoff-

kennwerten verglichen und die auf den Mittelwert bezogene prozentuale Abweichung dargestellt.

Drei voneinander unterschiedene Korrelationsmodelle wurden untersucht:

- Entscheidungsbäume
- Lineare Regression
- Neuronale Netze

Als Eingangsgrößen dienten die 24 Amplituden der gemessenen Wirbelstrommesswerte. Die Phasen wurden anfangs unberücksichtigt gelassen, um die Datenmenge möglichst gering zu halten. Weiterhin liefern sie, wie in Abschnitt 4.2.5 beschrieben, keine zusätzlichen Informationen zur Lösung der Aufgabe. Ferner werden die Real- und die Imaginärteile der gemessenen Frequenzen über die Amplituden bereits erfasst.

Korrelationsansätze mit den berechneten Werkstoffkennwerten als Eingangsdaten und der Bauteilqualität als Ausgangsdaten haben sich nicht als zielführend erwiesen.

4.3.3 Modellbildung zwischen Wirbelstrommesswerten und mechanischen Werkstoffkennwerten

4.3.3.1 Korrelation mittels der Entscheidungsbäume

Die genannten drei Verfahren zur Korrelationserstellung wurden an 198 Proben getestet. Eine Aussage über die Eignung eines Korrelationsverfahrens für die weitere Vorgehensweise wurde getroffen. Des Weiteren wurde die Übertragung der Methodik auf die Modellbildung zur Vorhersage der Bauteilqualität geprüft.

Entscheidungsbäume veranschaulichen aufeinanderfolgende, hierarchische Entscheidungsregeln. Jede Verzweigung (Ast) ist mit einer Wahrscheinlichkeit versehen. Beim binären Entscheidungsbaum werden mehrere Fälle abgefragt (z.B. Eingang Nr. 1 ist kleiner als der Wert Zehn), die jeweils diskret beantwortet werden. Das Resultat einer Aufgabe wird erreicht, wenn von der Wurzel her den Ästen des Baumes gefolgt wird. Am Endpunkt des Baumes existiert stets ein konkreter Wert. Die Vorteile dieser Methode sind die gute Veranschaulichung sowie

die Erklärbarkeit der Problemstellung und des Lösungsweges und damit des Einflusses unterschiedlicher Eingangsgrößen. Oft werden Entscheidungsbäume als Zwischenschritt eingesetzt, um bestimmte Beziehungen zu erkennen, Regeln abzuleiten oder, wie im vorliegenden Fall, Zusammenhänge nachzuweisen und zu identifizieren (BIELESCH 2000). Ein Nachteil ist jedoch die starke Zunahme der Komplexität des Baumes bei einer hohen Anzahl an Eingängen, die kontinuierliche Wertemengen besitzen, wie im vorliegenden Anwendungsfall. Dadurch können die Nachvollziehbarkeit und die Verallgemeinerungsfähigkeit verloren gehen. Trainierte Werte können gut reproduziert werden. Die Qualität des Resultats nimmt bei der Übertragung auf neue Datensätze ab.

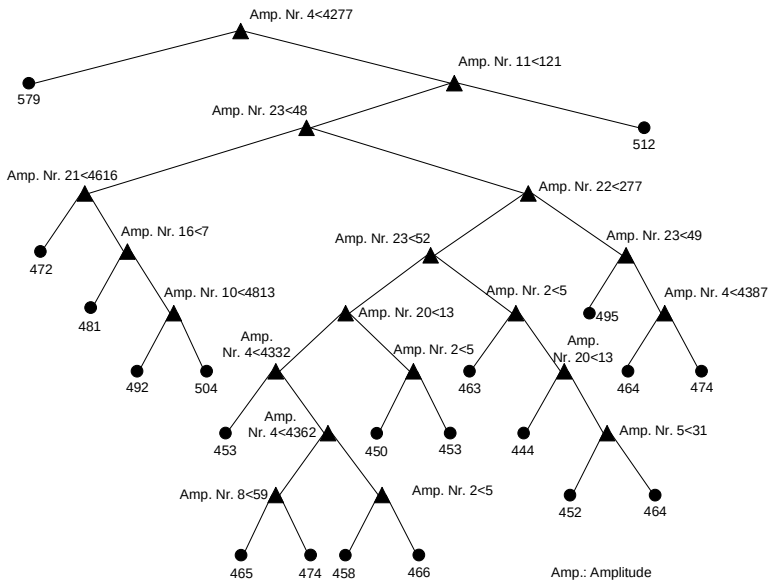


Abbildung 49: Struktur des Entscheidungsbaumes für die 0,2%-Streckgrenze $R_{p0,2}$

Die Eingänge für den Entscheidungsbaum sind die 24 Amplituden aus der Wirbelstrommessung. Damit wurde die Komplexität des Baums niedrig gehalten, ohne die Schätzgüte zu verschlechtern. 50 Prozent der Proben wurden zum Training des Entscheidungsbaumes eingesetzt und 50 Prozent zur Validierung. Die Modellierung fand im Softwareprogramm Matlab® über die interne Funktion *treefit* statt. Der implementierte Algorithmus erzeugt, basierend auf einer statisti-

schen Analyse der übergebenen Daten, einen Entscheidungsbaum, der eine möglichst hohe Schätzgenauigkeit bezüglich der vorliegenden Datensätze aufweist. Zur Gewährleistung einer hohen Generalisierungsfähigkeit wurde die Anzahl der Verzweigungsknoten gering gehalten. Der Informationsgehalt der Eingangsdaten diente dabei als Auswahlkriterium für die signifikanten Knoten. Den erzeugten Entscheidungsbaum mittels des Softwareprogramms Matlab® zeigt Abbildung 49 beispielhaft für die 0,2%-Streckgrenze $R_{p0,2}$.

Der dargestellte Baum für die 0,2%-Streckgrenze $R_{p0,2}$ enthält 26 Entscheidungen und berücksichtigt 16 der 24 zur Verfügung stehenden Eingangsdaten. Weiterhin wird anhand der Amplitude Nr. 4 bereits auf der obersten Ebene eine Entscheidung bzgl. des exakten Wertes der trainierten Größe getroffen. Sie impliziert einen starken Einfluss der genannten Amplitude auf den Berechnungsprozess. Ist der Wert der Amplitude Nr. 4 also kleiner als 4277, so werden, unabhängig von den anderen Eingängen, 579 N/mm² als Ergebnis für die 0,2%-Streckgrenze $R_{p0,2}$ ausgegeben.

Anhand der Validierungsmenge wurde der prozentuale Fehler, bezogen auf den Mittelwert aller Platinen, für die ermittelten mechanischen Werkstoffkennwerte berechnet. Die Standardabweichung dieses Fehlers gilt als Maß für die Schätzgüte. Für eine Gegenüberstellung von realen Ergebnissen aus dem Zugversuch mit geschätzten Werten wird ebenfalls die Standardabweichung für die prozentuale Differenz der Werkstoffkennwerte von deren Mittelwert angegeben.

Die Genauigkeiten der geschätzten mechanischen Werkstoffkennwerte, bezogen auf die Zugversuchswerte der 99 Validierungsproben, sind Tabelle 6 zu entnehmen. Sind die Werte der Standardabweichung aus dem Zugversuch kleiner als die Schätzwerte, ist eine Korrelation mittels Entscheidungsbäumen ungeeignet.

Verfahren/Modell	R_m [N/mm ²]	$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	A_g [%]	A_{g0} [%]	n_{90} [-]	r_{90} [-]
Reale Werkstoffkennwerte	5,87	8,72	10,80	4,06	5,34	8,72
Entscheidungsbaum	2,66	5,13	10,06	12,55	6,14	8,97
Lineare Regression	1,70	2,86	6,68	8,61	3,62	6,58
Neuronale Netze	1,56	1,68	4,72	4,87	2,17	4,16

Tabelle 6: Übersicht der Standardabweichung der realen Werkstoffkennwerte sowie der Schätzung für die Entscheidungsbäume, die lineare Regression und die Neuronalen Netze

Folglich lassen sich mit dieser Modellierungsmethodik die Zugfestigkeit R_m und die 0,2%-Streckgrenze $R_{p0,2}$ schätzen. Die Schätzgüte ist für die Aufgabenstellung und die weiterführende Problematik nur bedingt geeignet. Des Weiteren können die Gleichmaßdehnung A_g , die Bruchdehnung A_{80} , die senkrechte Anisotropie r_{90} und der Verfestigungsexponent n_{90} nur fehlerhaft nachgebildet werden, da die Standardabweichung der Zugversuchswerte deutlich kleiner ist als die Standardabweichung der Schätzung.

4.3.3.2 Korrelation mittels der linearen Regression

Bei der linearen Regression wird angenommen, dass der Ausgang y linear von den Eingängen x_i abhängt. Es besteht bei p Eingangsgrößen also folgender Zusammenhang:

$$y = \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \dots + \beta_p \cdot x_p \quad (9)$$

β_i	Regressionskoeffizienten der linearen Regression
x_i	Eingangsgrößen
p	Anzahl der Eingangsgrößen
y	Ausgangswert der linearen Regression

Diese Relation kann in der Vektorschreibweise durch das Skalarprodukt dargestellt werden:

$$y = \boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{x} \quad (10)$$

$\boldsymbol{\beta}$	Regressionskoeffizientenvektor der linearen Regression
$\mathbf{x}$	Eingangsgrößenvektor

Zur Bestimmung der Regressionskoeffizienten wird die Methode der kleinsten Quadrate eingesetzt, die sich folgendermaßen beschreiben lässt (STORM 2007):

$$RSS = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{x}_i)^2 \quad (11)$$

e_i	Fehlerdifferenz zwischen Ausgangsgrößen und den berechneten Werten
n	Anzahl der Wertepaare
RSS	Quadratsumme der Fehlerdifferenz der linearen Regression

Mit Hilfe des Gauß-Markow-Theorems bestimmen sich nun die Regressionskoeffizienten zu:

$$\boldsymbol{\beta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y} \quad (12)$$

X Matrix der Eingangswerte aller Datenpaare

Die Matrix **X** enthält die Eingangswerte aller Datenpaare und der Vektor **y** analog deren Ausgangswerte. Bei der Bestimmung nach dem obigen Verfahren verläuft die Regressionsgerade immer durch den Ursprung. Um weitere Verläufe zu ermöglichen, wird der Matrix **X** eine Spalte mit konstantem Wert Eins hinzugefügt. Der Umgang mit kontinuierlichen Ein- und Ausgangswerten stellt einen erheblichen Vorteil gegenüber den Entscheidungsbäumen dar. Nachteilig äußert sich die Beschränkung des Verfahrens auf lineare Zusammenhänge. Dieser Tatsache kann mit einer gezielten Vorverarbeitung der Daten begegnet werden, erfordert jedoch weitere Kenntnisse des Ein- und Ausgangsverhaltens.

Zum Testen des geeigneten Korrelationsverfahrens wurden bei der linearen Regression ebenfalls die 24 Amplituden des Wirbelstromsignals als Eingänge eingesetzt. Ein zusätzlicher Eingang in Form eines konstanten Wertes wurde als ein Offset zwischen den Eingangs- und den Ausgangsdaten benötigt. Zur Abschätzung des Einflusses der unterschiedlichen Eingangssignale wurden die Ein- und Ausgänge normiert. Als Kalibrierungs- und Validierungsmengen dienten die gleichen Datensätze wie bei der Korrelation mittels der Entscheidungsbäume.

Abbildung 50 zeigt die berechneten Gewichtungsfaktoren der linearen Regression für die sechs mechanischen Werkstoffkennwerte auf. Über die normierte Darstellung lässt sich der Einfluss der Frequenzen Nr. 4, 7, 10, 13, 17 und 21 als entscheidend ablesen. Für ein Korrelationsmodell konnte nun der Ansatz verfolgt werden, die niedrig gewichteten Eingangssignale entfallen zu lassen. Die Qualität der erzielten Ergebnisse war vom jeweiligen Werkstoffkennwert abhängig. So führte zum Beispiel das Ausweisen der Frequenz Nr. 1 zu einer Verbesserung der Schätzgüte für die 0,2%-Streckgrenze $R_{p0,2}$, jedoch zu einer Verschlechterung der Schätzgüte für die Zugfestigkeit R_m . Wurde zusätzlich die Trainingsmenge variiert, veränderte sich die Schätzgüte der Modelle. Aufgrund des fehlenden analytischen und physikalischen Zusammenhangs zwischen den Wirbelstrommesswerten und den Werkstoffkennwerten lässt sich eine qualitative Auswahl bezüglich der Eingangsgrößen nicht treffen. Lediglich empirische Ansätze führen gemäß Abschnitt 1.4.5.3 zum aktuellen Stand der Technik zu zielführenden Korrelati-

onsmodellen. Somit wurden für das weitere Vorgehen weiterhin sämtliche Amplituden als Eingangsgrößen herangezogen.

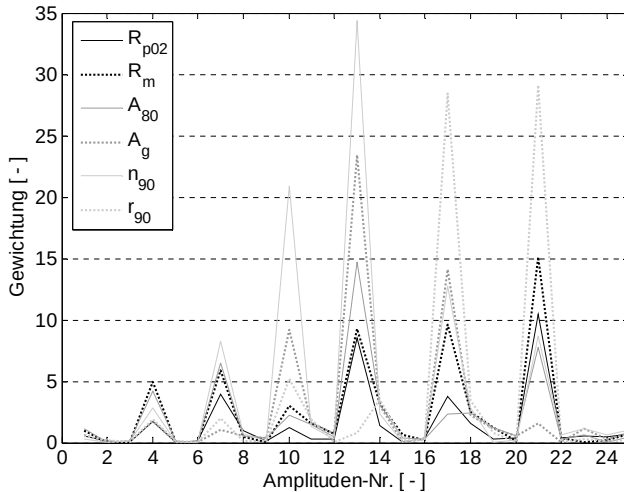


Abbildung 50: Gewichtungsfaktoren der linearen Regression für die betrachteten mechanischen Werkstoffkennwerte

Für die mechanischen Werkstoffkennwerte ist in Tabelle 6 der Vergleich der Ergebnisse aus dem Zugversuch mit den berechneten Werten aus der linearen Regression aufgezeigt. Bereits am Wert der 0,2%-Streckgrenze $R_{p0,2}$ lässt sich eine Steigerung der Ergebnisqualität gegenüber der Korrelation mit den Entscheidungsbäumen entnehmen. Dies bestätigt die Berechnung der Standardabweichung vom Mittelwert für jeden mechanischen Werkstoffkennwert. Sie weist einen um 50 Prozent geringeren Wert auf.

Die Ausführungen haben gezeigt, dass die Auswahl der Korrelationsmethode die Schätzgüte direkt beeinflusst. Der Wirkzusammenhang konnte jedoch mit rein linearen Ansätzen nicht hinreichend nachgebildet werden.

4.3.3.3 Korrelation mittels der Neuronalen Netze

Neuronale Netze sind ein geeignetes Werkzeug, um sowohl nichtlineare Zusammenhänge abzubilden als auch statistische Schwankungen zu implementieren

(Abschnitt 1.4.6). Zum Nachweis der Wirksamkeit der Methode der Neuronalen Netze zur Lösung der vorliegenden Aufgabenstellung wurde ein den vorangegangenen Modellierungsmethoden analoges Vorgehen gewählt. Ziel war es, mit den identischen Datensätzen und Rahmenbedingungen, jedoch mit unterschiedlichen Ansätzen ein besseres Resultat zu erreichen. Als Eingänge wurden die 24 Amplituden des Wirbelstromsignals und als Ausgänge die mechanischen Werkstoffkennwerte angenommen. An dieser Stelle und in der gesamten Arbeit wurden die Netze mit dem Softwareprogramm Matlab® erzeugt und berechnet. Die Auswahl des Netzes fiel auf ein Feedforward-Netz mit 24 Eingängen und Ausgängen. Die Eingangsdaten wurden auf das Intervall $[-1,1]$ projiziert.

Training der Neuronalen Netze

Beim Training des Neuronalen Netzes wurden die Kalibrierungs- und die Validierungsdaten analog den bereits in den Abschnitten 4.3.3.1 und 4.3.3.2 beschriebenen Ansätzen gewählt. Der Kalibrierungsdatensatz unterteilt sich in eine Trainings- und eine Validierungsmenge, mit der das erzeugte Netz in jedem Trainingsschritt getestet wurde. Abbildung 52 zeigt die dazugehörige Schrittkette. Beim Start des Trainings mittels des Backpropagation-Algorithmus (Abschnitt 1.4.6) sind die Gewichte der einzelnen Knoten (Perceptrons) mit Zufallszahlen initialisiert. Gemäß Abschnitt 1.4.6 fand eine Anpassung der Gewichte statt und das Fehlermaß der Validierungsmenge wurde errechnet. Die Summe der quadratischen Abweichungen zwischen der Netzausgabe und dem Vorgabewert bildete das Fehlermaß, das in jedem Schritt minimiert wurde. Ein Abbruch des Trainings fand erst statt, wenn das Fehlermaß das erste Mal wieder angestiegen war. Beginnend mit diesem Zeitpunkt löst die Weiterführung des Trainings ein Übertrainieren des Netzes und damit eine Abnahme der Generalisierungsfähigkeit aus.

Durch die zufällige Initialisierung des Netzes führten mehrere Trainingsvorgänge meist zu unterschiedlichen Ergebnissen. Abhängig von den Startwerten der Gewichte wurden andere lokale Minima der Gütefunktion ermittelt (Abschnitt 1.4.6). Aus mehreren Trainingsvorgängen wurde jenes Netz ausgewählt, welches bei der Anwendung auf dem Netz nicht bekannte Validierungsdaten die wenigsten Fehlerklassifikationen aufwies. Damit wurde sichergestellt, ein Neuronales Netz mit höchster Güte erzeugt zu haben.

Netzstruktur

Die Struktur eines einfachen Feedforward-Netzes kann Abbildung 20 entnommen werden. Als Parameter der Aufgabe wurden die Anzahl der Schichten und

die Anzahl der Neuronen pro Schicht festgelegt. Zum Training des Netzes fand der Levenberg-Marquardt-Backpropagation-Algorithmus (*trainlm*) Anwendung (DEMUTH ET AL. 1992-2009). *trainlm* verwendet ein Gradientenverfahren mit variabler Schrittweite, bei dem immer ein Vielfaches des aktuellen Gradienten von den Gewichten subtrahiert wird. Für eine genauere Beschreibung des Algorithmus' sei auf DEMUTH ET AL. 1992-2009 verwiesen. SCHMIDT 1994 weist nach, dass jede kontinuierliche Funktion bereits durch den Einsatz einer versteckten Schicht beliebig genau approximiert werden kann (Abschnitt 1.4.6). Um den genannten Sachverhalt angesichts der Komplexität der Problemstellung zu berücksichtigen, wurden im Folgenden Netze mit maximal drei Schichten untersucht. Die Anzahl der Neuronen in der Eingangs- sowie der versteckten Schicht wurde zwischen eins und 30 variiert. Abbildung 51 gibt die Ergebnisse der Netzoptimierung für den Werkstoffkennwert 0,2-Streckgrenze $R_{p0,2}$ wieder.

Bereits bei sieben Neuronen in der Eingangsschicht und der versteckten Schicht ist der Fehler minimal. Die Verwendung eines Netzes höherer Komplexität führt zu keiner Verbesserung des Ergebnisses, erhöht jedoch den Rechenaufwand deutlich. Die sehr hohe Schätzgüte bei nur einem Neuron je Schicht deutet darauf hin, dass der Zusammenhang zwischen der Wirbelstrommessung und den Werkstoffkennwerten weitestgehend linear ist und die Abweichungen durch stochastische Einflüsse verursacht werden.

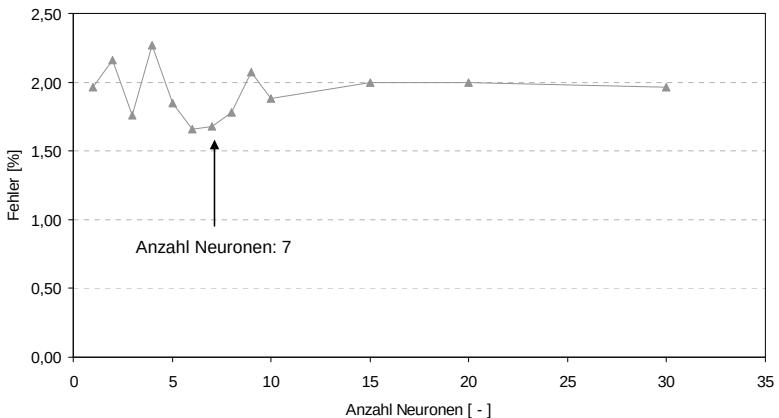


Abbildung 51: Prozentualer Fehler für die 0,2-Streckgrenze $R_{p0,2}$ in Abhängigkeit der Neuronenzahl

Zusammenfassung der Ergebnisse

Die erzielten Genauigkeiten mit den Methoden der linearen Regression und der Neuronalen Netze sind den Ergebnissen in SCHWIND 1998 und RUZOVIC 2004 gleichzusetzen. Die beiden genannten Methoden besitzen die höchste Schätzgüte. Die Neuronalen Netze erreichen eine höhere Genauigkeit, die jedoch mit einem komplexeren Modellierungsaufwand verbunden ist. Ferner eignet sich der Lösungsansatz mittels der Entscheidungsbäume nicht für die vorliegende Aufgabenstellung. Die Nachteile bestehen in der Annahme von diskreten Werten, in der fehlenden Interpolation und in der mangelnden Generalisierungsfähigkeit.

Die skizzierten Verfahren werden in Tabelle 6 anhand der Standardabweichung vom Mittelwert der betrachteten mechanischen Werkstoffkennwerte verglichen. Sind die Werte der Standardabweichung der Schätzung niedriger als die Werte der Standardabweichung der Zugversuchswerte, eignet sich das jeweilige Verfahren zur Berechnung der mechanischen Werkstoffkennwerte. Somit können die 0,2%-Streckgrenze $R_{p0,2}$ und die Zugfestigkeit R_m mittels Neuronaler Netze sehr gut nachgebildet werden. Die Berechnung der Kennwerte Gleichmaßdehnung A_g , senkrechte Anisotropie r_{90} und Verfestigungsexponent n_{90} mittels der Neuronalen Netze erreichen befriedigende Genauigkeiten. Die Bruchdehnung A_{80} lässt sich mit keinem Lösungsansatz modellieren, da die mechanischen Werkstoffkennwerte mit Ungenauigkeiten aus dem Zugversuch behaftet sind. Diese Tatsache, der Aufwand sowie die höhere Fehlerwahrscheinlichkeit bei der Ermittlung der mechanischen Werkstoffkennwerte führten zu einem alternativen Korrelationsansatz. Dabei wurde eine direkte Korrelation zwischen den Wirbelstrommesswerten und der Bauteilqualität erstellt. Die 24 Frequenzen des Wirbelstromsensors besitzen einen höheren Informationsgehalt bzgl. der Werkstoffeigenschaften als die sechs mechanischen Werkstoffkennwerte (Abschnitt 1.4.5.3 und FAASS 2009).

4.3.4 Modellbildung zur Korrelation von Wirbelstrommesswerten und Bauteilqualität

4.3.4.1 Allgemeines

In den Abschnitten 4.3.4.2 bis 4.3.4.4 wird das Vorgehen bei der Erstellung eines Prozessmodells zur Vorhersage der Qualität des Versuchsträgers Nr. 1 erläutert. Die Modelle mittels der Neuronalen Netze wurden im Softwareprogramm Mat-

lab® erstellt. Als Datenbasis für den Aufbau des Modells standen sechs Abpressungen zur Verfügung. Die Eingangsdaten setzten sich aus den aufgenommenen Wirbelstrommesswerten zusammen. Die entsprechende Bauteilqualität stellt die Menge der Ausgangsdaten dar. Zur Kontrolle der Funktionalität im Betrieb und zur aktiven Regelung der Bauteilqualität wurden zwei weitere Abpressungen betrachtet. Die Übersicht hierzu geben Abbildung 43 und Abbildung 44 wieder. Zur Bewertung der Modellgüte wurden die Abpressungen Nr. 7 und 8 als Validierungsmenge mitberücksichtigt. Sie hatten jedoch auf die Auswahl des Netzes keinen entscheidenden Einfluss, da zum Zeitpunkt der Fertigung dieser Bauteile das Modell bereits existierte und getestet wurde.

Parameter	Standardeinstellungen
Trainingsdaten	
Eingangsgrößen	24 Amplituden der Messfrequenzen
Zahl der Datensätze	6 Abpressungen mit jeweils zwischen 500 und 2000 Bauteilen
Gutteile pro Schlechtheil	100
Aufbereitung der Daten	Projektion der Rohdaten auf das Intervall [-1; 1]
Ausgangsgrößen	Qualität der Bauteile
Training	
Trainingsalgorithmus	Resilient-Backpropagation
Abbruchkriterium	Mittlere quadratische Abweichung + definierte Gütefunktion
Netztopologie	
Zahl der (versteckten) Schichten	2
Zahl der Neuronen pro Schicht	15, 15
Aktivierungsfunktion	Hyperbolische Tangenssigmoidfunktion

Tabelle 7: Starteinstellungen für die identifizierten Parameter beim Entwurf Neuronaler Netze

Bei der Erstellung des Prozessmodells auf Basis Neuronaler Netze wurden mehrere Parameter einbezogen. Tabelle 7 fasst sie zusammen und gibt die Standardeinstellungen beim Anwendungsfall des Versuchsträgers Nr. 1 wieder. Die Parameterwerte wurden während der Modellbildung variiert und die Vorhersagefähigkeit anhand der Validierungsmenge beurteilt. Die Validierungsmenge bestand aus dem Teil der Datenbasis, der nicht für das Training des Netzes verwendet

wurde. Im vorliegenden Fall handelt es sich um die Klassifizierungsgüte für die nicht in der Trainingsmenge enthaltenen Abpressungen.

4.3.4.2 Trainingsdaten des Neuronalen Netzes

Ausgehend von der Struktur des Neuronalen Netzes in Abschnitt 4.3.3.3, fand eine Modifikation der Netzstruktur statt. Die Eingangsdaten des Netzes waren die 24 Amplituden aus den 24 Messfrequenzen des Wirbelstromsignals. Als Aufbereitung der Eingangsdaten des Neuronalen Netz wurden alle Amplituden auf das Intervall $[-1, 1]$ projiziert. Zur Absicherung dieses Vorgehens wurden exemplarisch die Phasenanteile der Wirbelstrommesswerte zur Modellbildung ebenfalls herangezogen. Es wurde nachgewiesen, dass sie keine zusätzliche Verbesserung der Modellgüte bewirken. Der Ausgabewert des Netzes ist die Qualität des jeweiligen Bauteils als diskreter Wert. Die Fehlerteile mit Rissen besitzen den Wert Eins und die Gutteile den Wert Null. Berücksichtigt wurden in den ersten Modellierungsschritten lediglich die Reißer Nr. 1 und 3, da deren Anzahl erheblich höher ist als beim Reißer Nr. 4. Vorab ist anzumerken, dass die Modellbildung für den Reißer Nr. 4 aufgrund der geringen fehlerbehafteten Losgrößen nur bedingt realisierbar ist. Die Ausgabeschicht des Netzes ist von keiner scharfen Entscheidungsfunktion gekennzeichnet und führte daher zu Werten innerhalb des Intervalls $[0, 1]$. Somit wurden die Ergebnisse mittels einer Schwellenwertentscheidung eindeutig einer Qualitätsaussage zugeordnet. Der Wert der Schwelle wurde auf 0,5 gesetzt.

4.3.4.3 Training des Neuronalen Netzes

Die Neuronalen Netze wurden mittels des Resilient-Backpropagation-Algorithmus, anstatt des gemäß Abschnitt 4.3.3.3 verwendeten Levenberg-Marquardt-Backpropagation-Algorithmus (*trainlm*), trainiert. Der Resilient-Backpropagation-Algorithmus ist für Klassifikationsprobleme besser geeignet und zeigt in der Praxis wesentlich schnellere Konvergenz. Die zu subtrahierenden Werte der Gleichungen (5) und (6) in Abschnitt 1.4.6 hängen nicht direkt vom aktuellen Gradienten ab, sondern werden zufällig initialisiert und im Verlauf des Trainings angepasst, bis sie schließlich bei Erreichen eines Minimums gegen den Wert Null streben. Für eine genauere Beschreibung des Algorithmus' sei auf DEMUTH ET AL. 1992-2009 verwiesen.

Das Abbruchkriterium beim Training der Netze bildete die Fehlerfunktion in Gleichung (6). Sie gibt die Abweichung der berechneten Werte von den Sollausgängen wieder. Am meisten Einsatz findet nach DEMUTH ET AL. 1992-2009 die mittlere quadratische Abweichung. Es existieren weitere Fehlerfunktionen, die für die Lösung der vorliegenden Problemstellung keine Verbesserung der Modellgüte hervorgerufen haben. Bei gleich bleibendem Ergebnis unterscheidet sich lediglich der Berechnungsweg. Aufgrund der stark abweichenden Anzahl zwischen den Gut- und den Schlechteilen führte die genannte Fehlerfunktion oft zu lokalen Minima und demzufolge zu einem vorzeitigen Abbruch des Trainings.

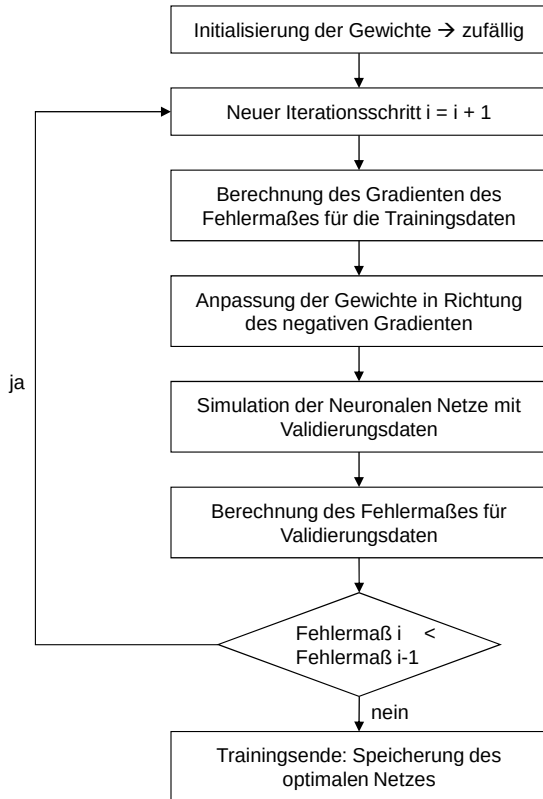


Abbildung 52: Schrittkette des Trainingsvorgangs der Neuronalen Netze

Um das Erreichen eines globalen Minimums der Fehlerfunktion sicherzustellen, wurde ein übergeordnetes Abbruchkriterium implementiert. Es initiierte einen

neuen Trainingsstart, falls eine festgelegte Genauigkeit nicht erreicht wurde. Die Genauigkeit orientierte sich an der Abweichung zwischen den berechneten Werten und den Validierungsdaten. Damit sank die quadratische Abweichung sowohl für die Trainings- als auch für die Validierungsdaten. In Abbildung 52 ist die Schrittkette des Trainings aufgeführt.

4.3.4.4 Bestimmung der Netzstruktur

Das Neuronale Netz löst über eine hohe Anzahl an Schichten und der darin enthaltenen Neuronen komplexe Klassifizierungsaufgaben. Im mehrdimensionalen Merkmalsraum können somit beliebige Klassifizierungen aufgestellt werden. Die Folge kann jedoch, wie in Abschnitt 1.4.6 erörtert, eine unerwünschte Überanpassung sein. Ein weiterer Nachteil ist die stark ansteigende Rechenzeit bei komplexen Netzstrukturen. Folglich werden weniger komplexe Netze prinzipiell bevorzugt eingesetzt. Es gilt, das Netz so klein wie möglich und so groß wie nötig zu gestalten.

Als Aktivierungsfunktion kam die hyperbolische Tangenssigmoidfunktion (Abschnitt 1.4.6) zum Einsatz. Der Backpropagation-Algorithmus setzt eine stetige differenzierbare Funktion voraus. Über sie werden die gewichteten und aufsummierten Eingänge in den Ausgang der Neuronen umgerechnet.

Die Untersuchungen zur Netzgröße fanden über eine Variation der versteckten Schicht von eins bis drei und der Neuronen je Schicht von eins bis 30 statt. Die Ergebnisse mit einer versteckten Schicht fielen verhältnismäßig gut aus. Dies bestätigt auch die Versuchsreihe gemäß Abschnitt 4.3.3.3. Aus den Ergebnissen der Topologieuntersuchung ließ sich ableiten, dass nur wenige Neuronen für die Klassifizierung benötigt wurden. Die Netze mit fünf bis 25 Neuronen in der versteckten Schicht wiesen eine vergleichbare Klassifizierungsgüte auf. Die Netze, die nur aus einem oder aus zwei Neuronen in der versteckten Schicht bestanden, zeigten etwas geringere Erkennungsraten. Drei versteckte Schichten führten, verglichen mit einem Netz aus zwei versteckten Schichten, zu keiner Verbesserung. Somit war eine höhere Anzahl an versteckten Schichten nicht zielführend.

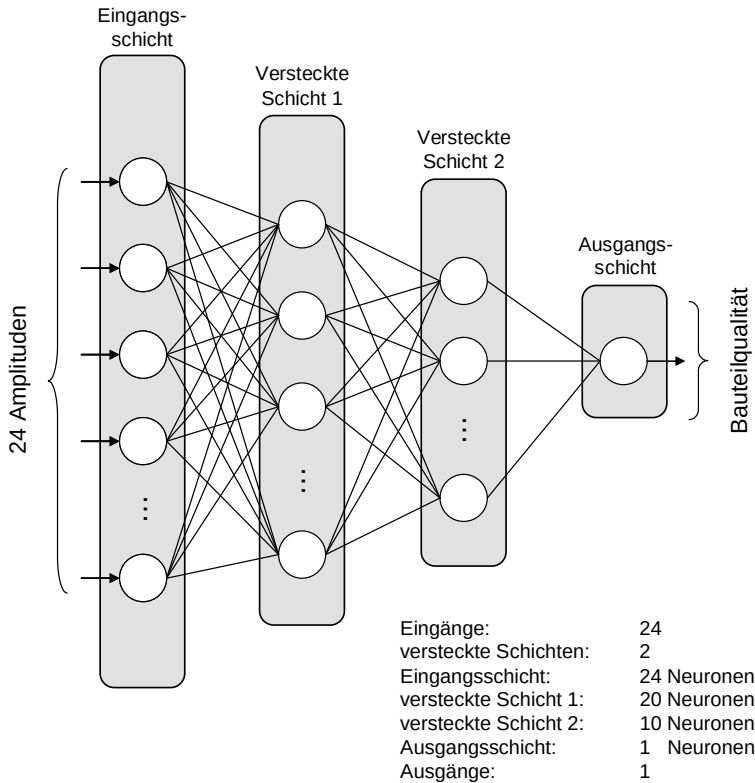


Abbildung 53: Struktur des Feedforward-Netztes zur Vorhersage der Bauteilqualität für die Reißer Nr. 1 und 3

Die weiteren Analysen fanden mittels einer und zweier versteckter Schichten statt. Es wurde mit 15 Neuronen pro Schicht begonnen und deren Anzahl gemäß den genannten Abbruchkriterien variiert. Die Eingangsschicht besteht aus 24 Neuronen für die 24 Amplituden des Wirbelstromsensors. Die Ausgangsschicht ist mit einem Neuron belegt, das die Information über ein Gut- oder ein Schlechteil trägt. Die optimalen Ergebnisse ergab eine Netzstruktur mit 20 Neuronen in der ersten und zehn Neuronen in der zweiten versteckten Schicht. Allgemein lässt sich feststellen, dass sehr gute Ergebnisse erzielt wurden, falls die Trainings- und die Validierungsdaten aus der gleichen Abpressung gewählt wurden. Beim Test des Netzes auf unbekannte Daten anderer Abpressungen nahm die Genauigkeit

deutlich ab. In diesem Fall wurden eine erhebliche Anzahl der Gutteile als Reißer und umgekehrt eingeordnet. Die Ursache für die schlechte Verallgemeinerungsfähigkeit liegt darin, dass jedes Neuron der ersten Schicht sämtliche Amplituden enthält. Diese werden summiert gewichtet, ohne den Wertebereich einzelner Amplituden zu berücksichtigen.

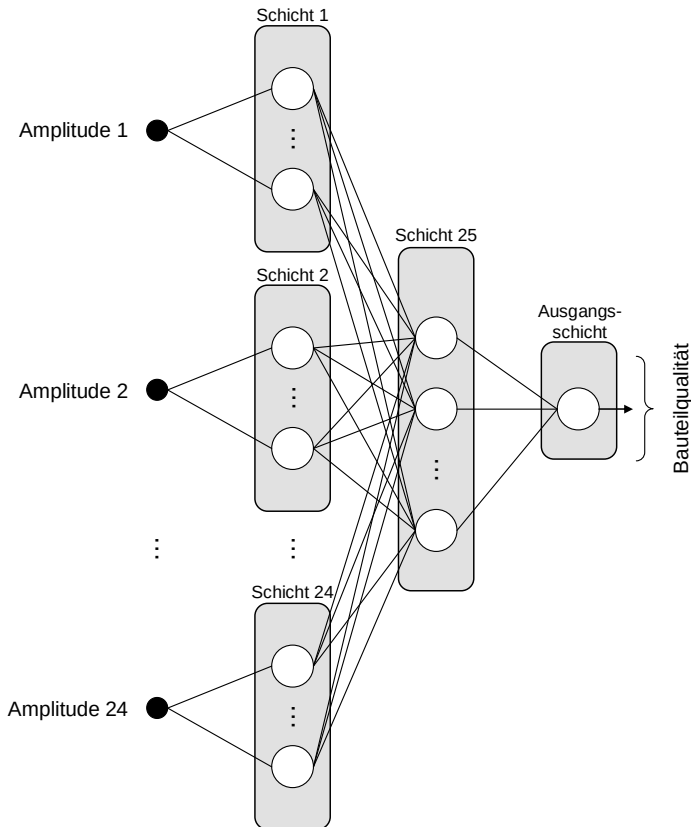


Abbildung 54: Struktur des abgewandelten Neuronalen Netzes zur Qualitätsvorhersage für die Reißer Nr. 1 und 3

Die Erstellung einer neuen Struktur des Neuronalen Netzes löst dieses Problem. Jeder Eingang wird zunächst an eine eigene Schicht mit einer geringen Neuronenzahl übergeben. Über die Sigmoidfunktion wird der Einfluss der einzelnen Eingangsgrößen, bevor sie miteinander verknüpft werden, beschränkt.

Das erzeugte Netz konnte auf die Amplituden, die außerhalb des trainierten Bereichs liegen, robuster und stabiler reagieren. Die Strukturen des klassischen Feedforward-Netzes und der abgeänderten Version können in Abbildung 53 und Abbildung 54 miteinander verglichen werden.

Die Schichten kleiner Neuronenzahl, die die Eingänge getrennt berücksichtigen, sind parallel angeordnet und besitzen jeweils vier Neuronen (Abbildung 54). Sie ersetzen die erste Schicht in Abbildung 53 und übergeben die berechneten Werte gleichzeitig an die nächste versteckte Schicht. Die zweite versteckte Schicht erzeugte mit 25 Neuronen optimale Ergebnisse.

In Tabelle 8 ist beispielhaft ein Vergleich der Modellgüte zwischen dem klassischen Feedforward-Netz und dem abgewandelten Netz aufgezeigt. Beide Netze wurden anhand der Gut- und der Schlechteile der Abpressung Nr. 3 trainiert. Dargestellt ist der Test der Netze mit Daten der Abpressung Nr. 2.

Prozess / Netztyp	Korrekt klassifizierte Reißer	Korrekt klassifizierte Gutteile
Reale Bauteilqualität	20	2022
Feedforward-Netz	20	1972
Geänderte Struktur	20	2012

Tabelle 8: Genauigkeit des Feedforward-Netzes und der geänderten Netzstruktur, trainiert mit Daten der Abpressung Nr. 3 und validiert mit Daten der Abpressung Nr. 2

Die Reißer wurden von den beiden Netzstrukturen zu 100% erkannt. Die Gutteile besitzen jedoch teilweise eine falsche Einstufung als Reißer. Die geänderte Struktur weist mit lediglich zehn falsch klassifizierten Gutteilen (entspricht 99,51%) eine um das Fünffache höhere Schätzgüte als das Feedforward-Netz auf. Dieses klassifiziert 50 Gutteile falsch (entspricht 97,53%).

4.3.5 Evaluierung der Modellgüten

4.3.5.1 Allgemeines

Die Erzeugung und der Vergleich von robusten und exakten Modellen zur Qualitätsvorhersage sind der Inhalt dieses Abschnitts. Der Bestimmung aller Parameter für die problembezogene Generierung Neuronaler Netze schließt sich die ge-

eignete Auswahl der Trainingsdaten an, um eine Qualitätsvorhersage im laufenden Produktionsprozess zu realisieren. Bereits in Abschnitt 4.2 ist auf die starke Abhängigkeit der Modellgenauigkeit von den trainierten Abmessungen hingewiesen worden. An dieser Stelle wird dieser Zusammenhang anhand einer Gegenüberstellung der Modellgüten und eines Tests in der Produktionsanlage nachgewiesen. Berücksichtigt wurden zuerst die Qualitätsfehler Reißer Nr. 1 und 3. Für den Reißer Nr. 4 wird ein Lösungsansatz vorgeschlagen und als Neuronales Netz umgesetzt, ohne jedoch dessen Validierung (mangels hinreichender Daten) nachzuweisen (Abschnitte 4.2.2 und 4.3.5.3).

4.3.5.2 Bestimmung optimaler Trainingsdaten

Die Auswahl der Trainingsdaten ist entscheidend für die Genauigkeit eines Netzes. Eine umfangreiche Datenmenge ist für einen Trainingsablauf vorteilhaft. In der Praxis müssen bei der Auswahl der Messdaten mehrere Aspekte berücksichtigt werden. Weitere Abstriche müssen bezüglich der Trainingsmenge gemacht werden, da hohe Datenmengen hohe Rechenzeiten bei der Netzerstellung zur Folge haben. Für einen effizienten Serieneinsatz ist die Generierung eines Modells zur Qualitätsvorhersage innerhalb kürzester Zeit und anhand möglichst geringer Datenmengen erstrebenswert. Bereits nach wenigen Abmessungen kann so das Modell angewandt werden. Sind fehlerbehaftete Messungen in den Datensätzen enthalten, führt das Training zu starken Einbußen in der Leistungsfähigkeit des Netzes. Im vorliegenden Anwendungsbeispiel waren reproduzierbare Messergebnisse nicht vollständig sichergestellt.

Aufgrund des fehlenden physikalischen Zusammenhangs (SCHWIND 1998, RUZOVIC 2004) zwischen den Wirbelstrommesswerten und der Bauteilqualität ist eine analytische Bewertung der gemessenen Daten nicht möglich. Es wurde ein alternativer Lösungsweg gewählt, der empirisch über eine experimentelle Variation der Trainings- und der Validierungsdaten zum Neuronalen Netz mit der gewünschten Genauigkeit führte.

Im Folgenden wurden die Netze mit verschiedenen Datensätzen erstellt und deren Leistungsfähigkeit bewertet. Die nachstehenden Ausführungen und Analysen beziehen sich ausschließlich auf die Modellierung der Reißer Nr. 1 und 3. Der Ansatz für ein Prozessmodell des Reißers Nr. 4 findet in Abschnitt 4.3.5.3 statt. Dieser Ansatz konnte angesichts des einmaligen Vorkommens über die begleiteten Abmessungen nicht explizit validiert werden. Die ausgewählten Trainingsda-

ten spiegeln sich in der jeweiligen Nomenklatur der Neuronalen Netze wider. Beispielweise steht die Bezeichnung Netz Nr. 2 für die Erzeugung eines Neuronalen Netzes aus den Daten der Abpressung Nr. 2 und Netz Nr. 3 & 6 analog aus der Kombination der Abpressungen Nr. 3 und 6. Im ersten Schritt wurden Netze aus jeweils einer Abpressung erzeugt und mit den weiteren Abpressungen getestet. Die Abpressung Nr. 1 gibt die erste Produktionsreihe, bei der das mechatronische Messsystem in Betrieb genommen wurde, wieder. Im Rahmen dieser Messdatenaufnahme sind die Ansaugvorrichtung der Bleche und der Sensorkopf der Wirbelstrommessung (Abschnitt 3.2) optimiert worden. Beginnend mit der Abpressung Nr. 2 ist die Vorrichtung des Wirbelstromsensors bis zur Abpressung Nr. 8 unverändert geblieben. Daher wurden die Datensätze der Abpressung Nr. 1 im Rahmen der Modellfindung nicht berücksichtigt. Bereits die ersten damit unternommenen Korrelationsversuche bestätigten die beschriebenen Messbedingungen, da keine Übertragung des Modells auf die weiteren Messergebnisse möglich war.

Des Weiteren wurden keine Netze anhand der Daten der Abpressungen Nr. 4 und 5 erstellt. Während der Abpressung Nr. 5 wurden keine Bauteile mit Qualitätsfehlern gefertigt. In Abpressung Nr. 4 trat neben den Gutteilen ausschließlich der Qualitätsfehler Reißen Nr. 4 auf. Sie tragen demzufolge keinen Informationsgehalt zur Netzgenerierung der Qualitätsfehler Reißen Nr. 1 und 3 bei. Die ausschließlich aus Gutteilen bestehenden Datensätze eignen sich nicht für das Training eines Netzes. Derartige Netze können keine gerissenen Bauteile erkennen. Chronologisch betrachtet, standen die Abpressungen Nr. 7 und 8 zum Zeitpunkt der Modellerstellung für eine Online-Qualitätsvorhersage und -regelung im Serienbetrieb nicht zur Verfügung und konnten nicht in die Modellbildung implementiert werden. Der Vollständigkeit halber werden die Fehlerquoten für diese zwei Datensätze ebenfalls angegeben.

Anhand jedes Datensatzes wurden mindestens zehn Neuronale Netze erzeugt. Dasjenige mit der geringsten Fehlerquote wurde ausgewählt. In Tabelle 9 und Tabelle 10 ist die Leistungsfähigkeit der trainierten Netze aufgetragen. Die aufgeführten Prozentsätze geben die Übereinstimmung zwischen gemessener und berechneter Qualität wieder. Ziel ist das Erreichen eines Klassifikationsverhaltens von im Idealfall 100%. Die Schätzungsergebnisse für die Gut- und die Ausschussteile mit 100% Klassifikationsgüte sind farblich hervorgehoben.

Bei der Ergebnisbewertung ist vor allem entscheidend, die Anzahl der korrekt eingestuftten Reißen möglichst hoch zu halten. Falsch sortierte Gutteile sind we-

niger stark zu bewerten. Im Rahmen einer Qualitätsvorhersage würde ein falsch eingestuftes Gutteil dazu führen, dieses Bauteil unnötigerweise zu kontrollieren. Zusätzliche Kosten entstehen dadurch nicht. Gerissene Teile dürfen jedoch nicht irrtümlich an die Nachfolgeprozesse als Gutteile weitergeleitet werden. Die Analyse der optimalen Datensätze für die Erstellung eines robusten Neuronalen Netzes wird anhand Tabelle 9 und Tabelle 10 erklärt.

Netz Nr. 2: Dieses mit der Abpressung Nr. 2 trainierte Netz erkennt die gerissenen Bauteile aus der Trainingsmenge.

Netz Nr. 3: Es erkennt die gleichen Datensätze der Gut- und Schlechtheile wie Netz Nr. 2. Zusätzlich werden die in der Trainingsmenge enthaltenen Reißen der Abpressung Nr. 3 detektiert. Folglich weist dieses Neuronale Netz eine bessere Leistungsfähigkeit als das Netz Nr. 2 auf.

Netz Nr. 6: Die Fehlerquote für die Gutteile ist sehr niedrig. Das Netz erkennt jedoch nur die trainierten Reißen der dazugehörigen Abpressung. Desweiteren werden die Reißen der Abpressung Nr. 7 sehr gut bestimmt.

Zusätzliches Netz Nr. 7: Die Eigenschaften ähneln denen vom Netz Nr. 6, das die Gutteile besser klassifiziert.

Zusätzliches Netz Nr. 8: Es liefert keine zusätzlichen Erkenntnisse und wird für die weiteren Betrachtungen vernachlässigt.

Abpressung Nr.	Anzahl Reißen	Neuronales Netz						
		Nr. 2	Nr. 3	Nr. 6	Nr. 7	Nr. 8	Nr. 3 & 6	Nr. 3 & 6*
1	15	6,7%	40,0%	0,0%	0,0%	6,7%	20,0%	0,0%
2	20	100,0%	100,0%	0,0%	0,0%	80,0%	100,0%	100,0%
3	62	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%	0,0%	100,0%	100,0%
4	0	-	-	-	-	-	-	-
5	0	-	-	-	-	-	-	-
6	24	0,0%	0,0%	100,0%	83,3%	4,2%	100,0%	100,0%
7	19	0,0%	0,0%	78,9%	94,7%	0,0%	100,0%	100,0%
8	30	93,5%	93,5%	3,2%	0,0%	100,0%	100,0%	100,0%

* inklusive Phasen

Tabelle 9: Erkennungsrate zwischen realer und berechneter Bauteilqualität der Prozessmodelle für die Reißen Nr. 1 und 3, erstellt mit verschiedenen Trainingssätzen aus mehreren Abpressungen

Abpres- sung Nr.	Anzahl Gutteile	Neuronales Netz						
		Nr. 2	Nr. 3	Nr. 6	Nr. 7	Nr. 8	Nr. 3 & 6	Nr. 3 & 6*
1	1192	93,6%	69,9%	100,0%	100,0%	95,6%	82,9%	67,4%
2	2022	100,0%	99,8%	99,5%	99,6%	99,9%	99,3%	97,8%
3	517	99,8%	100,0%	100,0%	100,0%	97,3%	100,0%	100,0%
4	1589	99,7%	99,0%	100,0%	100,0%	94,7%	99,6%	96,0%
5	2272	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%	100,0%
6	1076	100,0%	100,0%	100,0%	95,4%	100,0%	100,0%	100,0%
7	1519	100,0%	100,0%	99,3%	100,0%	100,0%	100,0%	99,2%
8	1023	100,0%	100,0%	99,3%	99,1%	100,0%	100,0%	99,1%

* inklusive Phasen

Tabelle 10: Erkennungsrate zwischen realer und berechneter Bauteilqualität der Prozessmodelle für die Gutteile, erstellt mit verschiedenen Trainingssätzen aus mehreren Abpressungen

Die Gegenüberstellung der verschiedenen entworfenen Neuronalen Netze sowie die chronologische Gewinnung der Messergebnisse führte zur Schlussfolgerung, eine Kombination aus mehreren Datensätzen für das Training eines Netzes heranzuziehen. Das Netz Nr. 3 & 6 wurde aus den Abpressungen Nr. 3 und Nr. 6 generiert und vereint die Fähigkeit beider Einzelnetze. Bei allen untersuchten Abpressungen werden sehr geringe Fehlerquoten erreicht. Im Serienbetrieb wurden die besten Ergebnisse mittels eines Neuronalen Netzes, bestehend aus je vier Neuronen in den 24 ersten versteckten Schichten, 25 Neuronen in der zweiten versteckten Schicht und einem Neuron in der Ausgangsschicht, erzielt (Abbildung 53).

Um sicher zu gehen, keinen Informationsverlust durch die Vernachlässigung der Phasen des Wirbelstromsignals zu erleiden, wurden mit den Datensätzen der Abpressungen Nr. 3 und 6 unter den gleichen Randbedingungen, wie beim Netz Nr. 3 & 6, ca. 50 Netze trainiert. Tabelle 9 und Tabelle 10 geben die Fehlerquoten des besten Neuronalen Netzes, das als Eingangsgrößen die 24 Amplituden und die 24 Phasen der Wirbelstrommesswerte besitzt (Netz Nr. 3 & 6*, siehe Tabelle 9 und Tabelle 10), wieder. Der Vergleich der Genauigkeiten des Netzes Nr. 3 & 6* mit derjenigen des Netzes Nr. 3 & 6, bei dem die Amplituden die Trainingsdaten repräsentieren, führt zu keiner Verbesserung der Resultate. Diese Aussage lässt sich über eine direkte Gegenüberstellung der Klassifikation sowohl der Gutteile als auch der Schlechteile bekräftigen. In den Abpressungen Nr. 1 bis 7 wird keine Steigerung der Trefferquote erzielt. Somit bestätigt sich, dass die Phasen

keinen zusätzlichen Informationsgehalt liefern, jedoch die Komplexität und den Trainingsaufwand des Netzes deutlich erhöhen.

4.3.5.3 Erweiterung der Struktur des Neuronalen Netzes

Das oben beschriebene Neuronale Netz weist eine sehr hohe Schätzungsgüte gegenüber Reißen Nr. 1 und 3 auf. Nicht betrachtet wird der Qualitätsfehler Reißen Nr. 4. Die Reißen an dieser Stelle traten lediglich in der Abpressung Nr. 4 auf. Ein umfassendes Klassifikationswerkzeug setzt ein Prozessmodell, das die Schlechteile unabhängig von ihrem Ursprung detektiert, vorhersagt und gegebenenfalls regelt, voraus. Es soll in der Lage sein, gerissene Bauteile in allen kritischen Bereichen zu erkennen. Eine Möglichkeit muss gefunden werden, den Reißen Nr. 4 über die Neuronalen Netze abzubilden. Die Komplexität der Modellbildung ergibt sich aus der kleinen Anzahl der dokumentierten Schlechteile bezüglich dieses Bereichs und der gegenüber den Reißen Nr. 1 und 3 abweichenden physikalischen Ursachen (Abschnitt 3.7). Das Training eines einzigen Netzes für sämtliche Fehlerbereiche stellt die Herausforderung dieses Abschnitts dar.

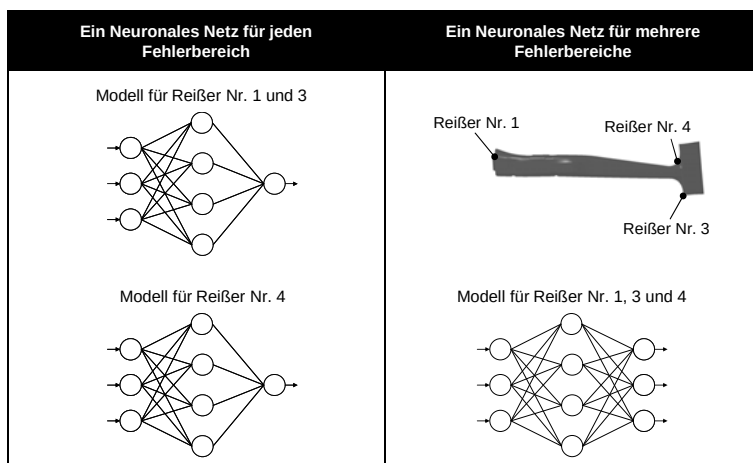


Abbildung 55: Ansätze für die Modellierung mehrerer Fehlerbereiche

Für die Integration und die Unterscheidung mehrerer Fehlerbereiche existieren zwei Ansätze, visualisiert in Abbildung 55. Einerseits kann ein Neuronales Netz mit mehreren Ausgängen verwendet werden. Jeder Ausgang gibt die Qualität des

Bauteils für genau einen Fehlerbereich an. Andererseits kann jeder Fehlerbereich über ein einzelnes Netz abgebildet werden. Jedes dieser Netze sagt aus, ob das Bauteil im zugehörigen Fehlerbereich einen Riss aufweist.

Besitzen die Netze eine sehr hohe Klassifizierungsgüte, kann die zweite Möglichkeit problemlos gewählt werden. Ist dies nicht der Fall, wird die erste Variante bevorzugt. Die parallele Verarbeitung der Eingangsdaten durch mehrere Netze führt dazu, dass sich die Wahrscheinlichkeiten einer korrekten Gutteilklassifizierung aller Netze multiplizieren. Für die Fehlerteile gelten hingegen die Einzelwahrscheinlichkeiten, da die Qualität für jeden Fehlerbereich nur von einem Netz berechnet wird. Die Entscheidung, welche der beiden Integrationsmöglichkeiten gewählt wird, hängt also von der Qualität der Netze ab beziehungsweise davon, wie stark deren Leistungsfähigkeit durch die Erweiterung um mehrere Ausgänge sinkt.

Im Rahmen des Auswahlverfahrens wurde ein Netz mit den in Abschnitt 4.3.4.4 ermittelten Parametereinstellungen generiert und auf drei Ausgänge erweitert. Das Neuronale Netz mit den drei Ausgängen entspricht in seiner Genauigkeit dem Netz Nr. 3 & 6 mit nur einem Ausgang und wird in Tabelle 9 und Tabelle 10 daher nicht explizit aufgeführt. Allerdings stellt es die zusätzliche Information des Reißertyps zur Verfügung. Der Nachweis der Funktionalität des erzeugten Netzes und der expliziten Unterscheidung zwischen mehreren Reißertypen konnte lediglich für die Reißer Nr. 1 und 3 vorgenommen werden. Die vorliegenden Datensätze enthalten als einzige Qualitätsfehler die Reißer Nr. 1 und 3. Die Klassifizierung der Bauteilqualität zwischen gut und schlecht findet vollständig statt. Weiterhin stimmt für die Reißer Nr. 1 und 3 die Aussage mit der Realität sehr gut überein. Hier wurde kein Bauteil mit Qualitätsfehlern falsch geschätzt. Die in der Abpressung Nr. 4 aufgetretenen Reißer Nr. 4 wurden vom Modell ebenfalls komplett erkannt. An dieser Stelle muss berücksichtigt werden, dass die Abpressung Nr. 4 Teil der Trainingsmenge des Modells ist.

Zum Vergleich wurde neben dem Netz für die Reißer Nr. 1 und 3 in Abschnitt 4.3.5.2 ein zweites Netz für den Reißer Nr. 4 generiert. Auch hier wurden die gleichen Parametereinstellungen verwendet. Die Vorhersagequalität beider einzelner Netze lag leicht höher. Werden bei jeder Platine beide Modelle parallel eingesetzt, fehlt die Möglichkeit der Entscheidungsfindung zwischen den einzelnen Schätzungen. Die Schätzungsgüte sinkt demzufolge. Insgesamt lieferte damit das Netz mit den drei Ausgängen ein genaueres Ergebnis. Zudem ist diese Variante übersichtlicher und erfordert weniger Rechenleistung. Vorteilhafter ist es daher,

ein Neuronales Netz mit mehreren Ausgängen zu generieren. Im Folgenden wurde mit nur einem Netz und drei Ausgängen gearbeitet. Die Netzstruktur kann Abbildung 56 entnommen werden. Sie ähnelt der Struktur des Neuronalen Netzes in Abbildung 54.

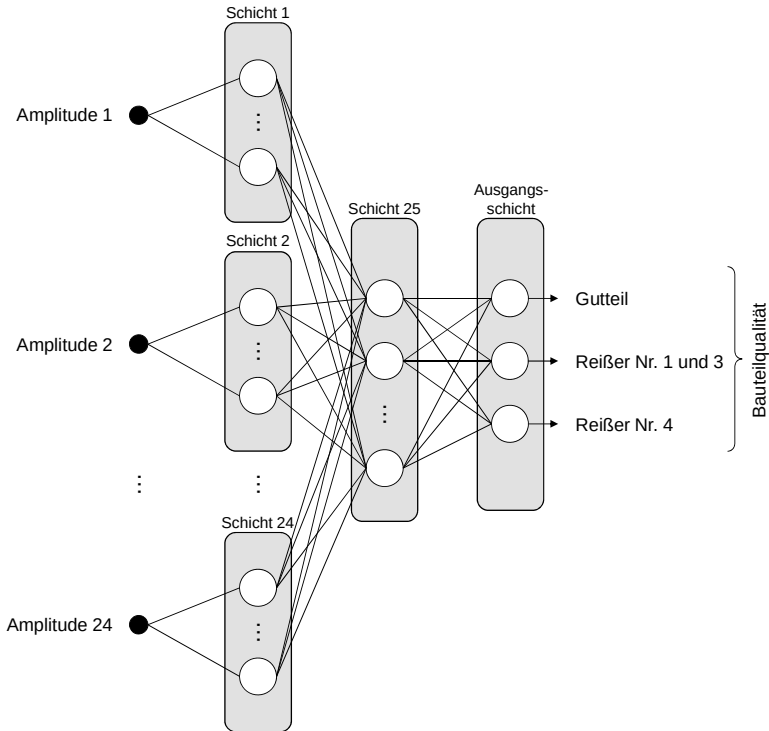


Abbildung 56: Struktur des erweiterten Neuronalen Netzes zur Qualitätsvorhersage für die Reißer Nr. 1, 3 und 4

Der Unterschied ist in den ersten Schichten mit je fünf Neuronen und in der Ausgangsschicht der Netze vorzufinden. Die Ausgangsschicht besteht, verglichen mit dem Netz in Abbildung 54, aus drei Ausgängen. Die Entscheidungsfindung bzgl. der berechneten Vorhersage impliziert mehrere Schritte. Jeder Ausgang stellt eine mögliche Klassifikation dar und nimmt Werte im Intervall $[0, 1]$ an. Ergibt die Klassifikation eines Bauteils ein Gutteil, wird der erste Ausgang auf den Wert Eins gesetzt. Bei der Vorhersage des Reißers Nr. 1 oder 3 schaltet der zweite Ausgang auf den Wert Eins. Analog gibt, beim Auftreten des Reißers

Nr. 4, der dritte Ausgang den Wert Eins aus. In Anlehnung an das Neuronale Netz im vorangegangenen Abschnitt wurden die Reißer Nr. 1 und 3 erneut zu einem gleichartigen Qualitätsfehler und damit zu einem Netzausgang zusammengefasst, da sie gemäß Abschnitt 3.7 den gleichen Versagensursprung besitzen. Treten mehrere unterschiedliche Qualitätsfehler auf, werden die Ausgänge Nr. 2 und 3 gleichzeitig auf den Wert Eins geschaltet. Der Wertebereich $[0, 1]$ jedes Ausgangs führt zu unscharfen Entscheidungen des Netzes. Für eine eindeutige Qualitätsaussage fand eine weitere Unterscheidung statt. Die Summe aller drei Ausgänge wurde gebildet und der prozentuale Anteil der jeweiligen Ausgänge berechnet. Ein Anteil des ersten Ausgangs von kleiner als 50 Prozent entspricht einer Klassifikation der Platine als ein Schlechtheil. Der Anteil des Ausgangs Nr. 2 oder 3, der einen Wert über 25 Prozent angibt, bestimmt die Art des Reißertyps.

Zusammenfassend ist anzuführen, dass sich mittels der erweiterten Struktur des Neuronalen Netzes die Qualitätsfehler nach ihrem Vorkommen und ihrer Art detektieren lassen. Die Genauigkeiten bezüglich der Klassifikation nach einem Gut- und einem Schlechtheil erleiden unter dem vorgestellten Vorgehen keine Einbußen. Voraussetzung hierfür sind umfangreiche und akkurat dokumentierte Datensätze. Aufgrund fehlender Qualitätsfehler vom Typ Reißer Nr. 4 für das Training und für die Validierung wird von einem unausgereiften Prozessmodell für den Reißer Nr. 4 ausgegangen.

In den weiteren Schritten wurde die erweiterte Struktur des Neuronalen Netzes eingesetzt. Die Klassifikation hinsichtlich der Gut- und der Schlechtheile sowie das Detektieren der Reißer Nr. 1 und 3 standen dabei im Vordergrund.

4.3.5.4 Qualitätsvorhersage im Serienbetrieb

Das generierte Modell zur Vorhersage der Bauteilqualität auf Basis Neuronaler Netze wurde unter Produktionsbedingungen evaluiert. Ein Prozessmodell mittels der Datensätze der Abpressungen Nr. 3 und 6 hatte sich für die weiteren Untersuchungen bewährt. Dieses Neuronale Netz wurde in die Ablaufkette der Online-Messwerterfassung, beschrieben in Abschnitt 3.8, implementiert.

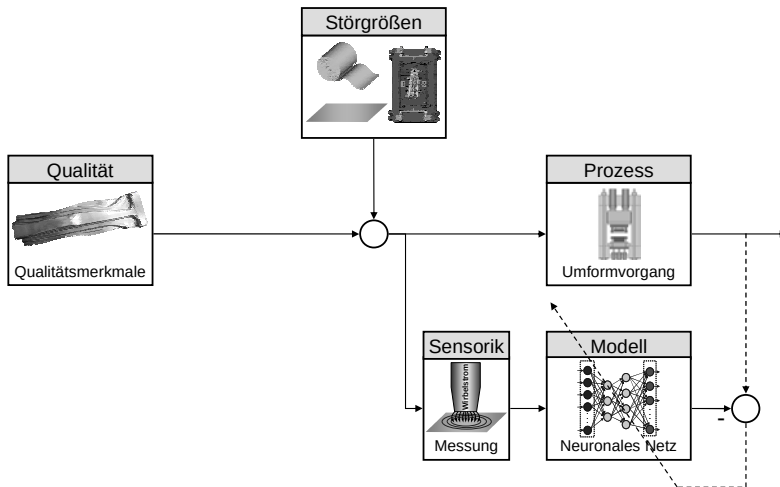


Abbildung 57: Blockschaltbild für die Qualitätsvorhersage des Versuchsträgers Nr. 1

Abbildung 57 skizziert das Blockschaltbild des Testvorgangs im Serienprozess. In diesem Schritt fand keine aktive Beeinflussung der Fertigung statt. Das Modell zur Qualitätsvorhersage wurde parallel dazu geschaltet. Am Ende der Prozesskette, d. h. am Auslaufband, wurde die reale Bauteilqualität mit der vorhergesagten abgeglichen. Die Abpressung Nr. 7 diente als Nachweis für die Robustheit und die Genauigkeit des Modells. Jede Platine wurde gemäß Abschnitt 3.8 einer Wirbelstrommessung unterzogen. Die erhaltenen Daten wurden dem Qualitätsmodell als Eingangsgrößen zugeführt. Die Neuronale Netze erzeugten anschließend eine Vorhersage über die voraussichtliche Qualität des Bauteils. Die Vorhersage stand noch vor dem Einlegen der Platine in die Ziehstufe der Pressenstraße, d. h. noch vor der Fertigung des Bauteils, zur Verfügung. Demzufolge existierte hier ein Zeitintervall, in dem eine Reaktion möglich war. Die Anzeige der vorhergesagten Bauteilqualität wurde in der Visualisierung (Abschnitt 3.8) anhand einer grün aufleuchtenden Schaltfläche für die Gutteile sichtbar gemacht. Wurde ein Qualitätsmangel prognostiziert, leuchtete eine rot gekennzeichnete Anzeigefläche in Abbildung 77 auf. Auf einen Eingriff in den laufenden Produktionsprozess wurde vorerst verzichtet. Die Genauigkeit der Qualitätsvorhersage für die Messung der Abpressung Nr. 7 stand hier im Fokus. Abbildung 58 zeigt das Ergebnis der dokumentierten Produktionsreihe und der dazugehörigen Qualitätsvorhersage.

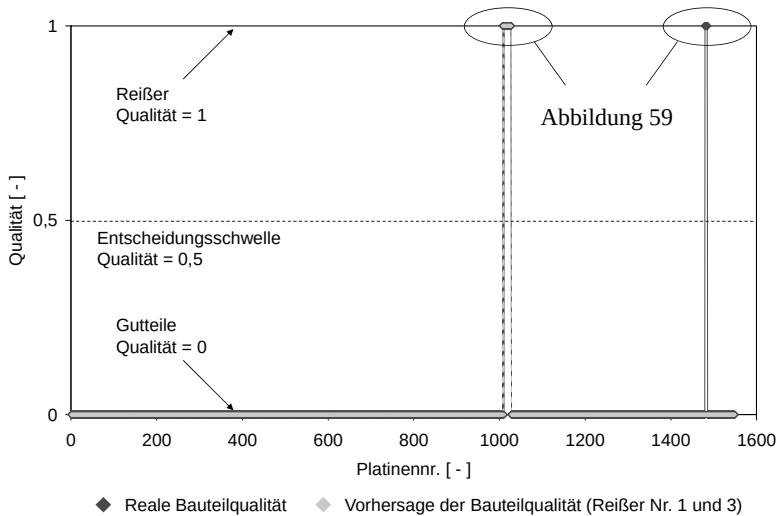


Abbildung 58: Verlauf der Bauteilqualität und der Qualitätsvorhersage des Versuchsträgers Nr. 1 während der Abpressung Nr. 7

Die Abpressung Nr. 7 wies 1519 gefertigte Gutteile und 25 gefertigte Schlechteile auf. Die Qualitätsfehler wurden über die Reißer Nr. 1, 3 und 4 charakterisiert. Neben der realen Bauteilqualität ist in Abbildung 58 die vorhergesagte Qualität mittels Neuronaler Netze für die Reißer Nr. 1 und 3 aufgetragen. Deutlich zu erkennen ist in Abbildung 59, dass sämtliche Bauteile korrekt klassifiziert wurden. Von den 19 hinsichtlich der Reißer Nr. 1 und 3 gerissenen Bauteilen wurden 19 detektiert. Das Klassifikationsergebnis der genannten Abpressung ist ebenfalls der Übersicht der Tabelle 9 zu entnehmen. Der Vergleich mit den zusätzlich erzeugten Neuronalen Netzen bestätigt die korrekte Auswahl der Trainingsdatensätze Nr. 3 und 6 für die Kalibrierung der Qualitätsmodelle. Kein weiteres Netz kann die hohe Genauigkeit übertreffen.

Des Weiteren traten bei der Abpressung Nr. 7 fehlerbehaftete Bauteile in einer neuen Kombination auf. Sechs Bauteile wiesen zeitgleich die Reißer Nr. 3 und 4 auf. Diese Fehlerart kam bei der genannten Abpressung zum ersten Mal zum Vorschein und konnte vom Qualitätsmodell nicht erkannt werden. Für weitere Untersuchungen wurden die neuen Fehlerteile in die Trainingsmenge des Modells aufgenommen und in den folgenden Abpressungen überwacht.

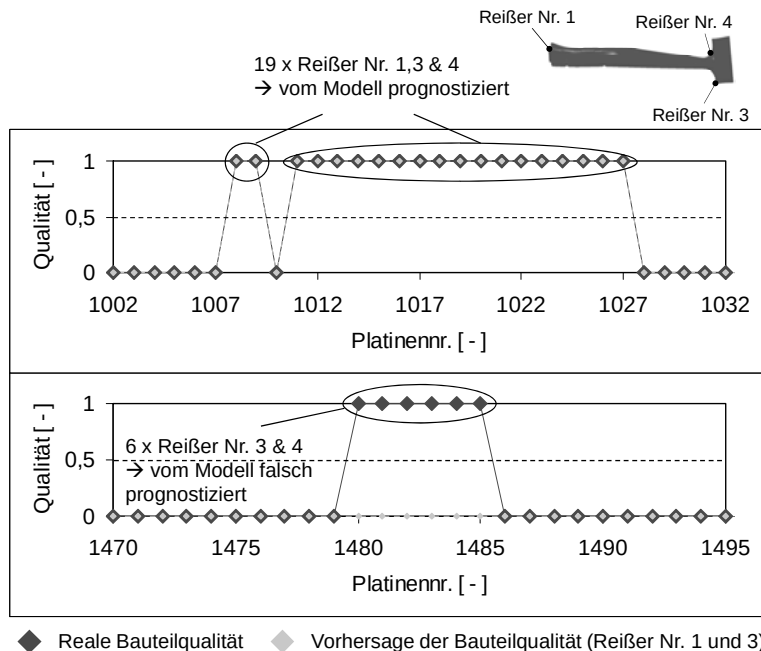


Abbildung 59: Detailbetrachtung der gerissenen Bauteile in der Abpressung Nr. 7

Der erfolgreichen Evaluierung des Prozessmodells unter den Produktionsbedingungen schließt sich der nächste Schritt an, um ein stabiles mechatronisches Gesamtsystem im Presswerk zu erreichen: die Prozessregelung im Serienbetrieb.

4.3.6 Zusammenfassung und weitere Vorgehensweise

Im vorangegangenen Abschnitt wurde die Vorgehensweise bei der Ableitung von Modellierungsstrategien und bei der Erstellung eines Prozessmodells zur Vorhersage der Bauteilqualität detailliert beschrieben. Einleitend wurden beispielhaft verschiedene Möglichkeiten für den Entwurf eines Modells zur Berechnung der mechanischen Werkstoffkennwerte aus den elektromechanischen Eigenschaften aufgezeigt. Ziel hierbei war es, den Nachweis für die Neuronalen Netze als die zielführende Modellierungsstrategie für die weitere Vorgehensweise zu erbringen. Aufgrund unbekannter nichtlinearer Wechselwirkungen zwischen den

Werkstoffkennwerten und den Wirbelstrommesswerten sowie der Eliminierung einer zusätzlichen Modellungenauigkeit ist eine Möglichkeit angeführt worden, direkt die Bauteilqualität zu bestimmen. Die Zusammenhänge mittels Neuronaler Netze sind zwischen den gemessenen Wirbelstromwerten und der Bauteilqualität aufgestellt worden. Die Untersuchungen zur Netzstruktur, zu den Trainings- und Validierungsdaten sowie zu deren Gegenüberstellung führten zum endgültigen Modell für die Online-Qualitätsvorhersage. Der Bewertung verschiedener generierter Netze schlossen sich die Auswahl und die Evaluierung eines Netzes für den Einsatz unter Produktionsbedingungen an. Die Abpressung Nr. 7 erbrachte den Beweis, ein konsistentes Modell mittels Neuronaler Netze und mit optimalen Trainingsdaten erzielt zu haben. Tabelle 9 und Tabelle 10 untermauern in einem Vergleich der Genauigkeiten der unterschiedlich trainierten Netze über die Abpressungen Nr. 1 bis 7 die Auswahl des Netzes Nr. 3 & 6 als bestmögliches Qualitätsmodell.

Gemäß der Aufgabenstellung der Arbeit fehlt ein letzter Baustein für die Schließung des Regelkreises in einer Pressenstraße. Die vorangegangenen Untersuchungen sind unter der Prämisse abgeschlossen worden, die entworfenen Modelle parallel zum Prozess einzusetzen. Ein Verbesserungspotenzial zur Detektion mangelhafter Bauteile wurde damit aufgezeigt. Ausgehend hiervon wurde mittels eines Aktors und einer geeigneten Regelungsstrategie der Serienprozess aktiv beeinflusst. Als Basis gelten die erarbeiteten und getesteten Qualitätsmodelle des Abschnitts 4.3.

4.4 Aufbau einer Prozessregelung in einer Pressenanlage

4.4.1 Allgemeines

Der Entwurf einer Prozessregelung für die betrachtete Pressenanlage wurde über die Implementierung eines Reglers und eines entsprechenden Stellgliedes (Aktor) vervollständigt. Die formulierten Verfahren ermöglichen die Überwachung und die Bewertung des Produktionsprozesses. Soll aktiv über geeignete Parameter in den Prozess eingegriffen werden, muss die Informationsverarbeitungsstruktur um die genannten Bausteine erweitert werden. Ziel ist es, im Falle der Vorhersage eines Bauteils als Schlechteil über ein Regelungsverfahren ein Stellglied so anzusteuern, dass dennoch ein Gutteil produziert wird. Wird ein Gutteil prognostiziert, soll der Prozess unbeeinflusst bleiben. Dieses Regelungsprinzip ist reali-

sierbar, da die Vorhersage der Qualität vor dem eigentlichen Umformprozess stattfindet und damit rechtzeitig eine Reaktion eingeleitet werden kann. Der Regelkreis einschließlich der Regelgrößen, der Stellglieder und der Regelungsstrukturen wird in den anknüpfenden Abschnitten bestimmt. Über die softwaretechnische Implementierung des Verfahrens wurde mittels einer Produktionsreihe die Serientauglichkeit nachgewiesen.

4.4.2 Festlegung der Stör- und der Regelgrößen

Die Datensätze der Wirbelstrommessung geben Aufschluss über die mechanischen Werkstoffeigenschaften. Diese beeinflussen in Wechselwirkung mit den herrschenden Prozessbedingungen die reale Bauteilqualität. Weder die elektromechanischen Eigenschaften noch die Werkstoffkennwerte lassen im Serienprozess eine direkte analytische Aussage über die Qualität der produzierten Bauteile zu. In der gegenwärtigen Serienfertigung steht diese erst am Ende der Prozesskette und damit am Auslaufband fest. Ein regelnder Eingriff würde zu diesem Zeitpunkt zu spät erfolgen. Soll die Forderung erfüllt werden, rechtzeitig in den Prozess einzugreifen, muss die Information über die Bauteilqualität zu einem früheren Zeitpunkt, d. h. vor dem Umformprozess, zur Verfügung gestellt werden. Diesen Aspekt verwirklicht die Einbindung des Modells zur Qualitätsvorhersage aus Abschnitt 4.3.5.4. Es erzeugt die geforderte Aussage bereits zu einem frühen Zeitpunkt und repräsentiert damit die Regelgröße des Produktionsprozesses. Das Fehlen der realen Bauteilqualität als Regelgröße vor dem Fertigungsvorgang wird über eine prädizierte Qualität ausgeglichen. Sie setzt sich aus den Erfahrungsinformationen der vorangegangenen Produktionsreihen und aus den durchgeführten Analysen zusammen. Die Regelgröße Teilequalität kann vier Zustände annehmen. Wird ein Gutteil gefertigt, ist ein Prozesseingriff auszusetzen. Werden gerissene Bauteile des Typs Reißer Nr. 1, 3, 4 oder eine Kombination daraus vorhergesagt, muss eine Stellgröße verändert und damit ein Akteur aktiviert werden, um – falls möglich – regelnd in den Prozess einzugreifen.

4.4.3 Festlegung der Stellgrößen und der Stellglieder (Aktorik)

Stellgrößen

In FAASS 2009 wurden unterschiedliche, für den aktuellen Prozess relevante Stellgrößen sukzessive analysiert. Zusammen mit Simulationen und Versuchen

vor Ort stellte sich die Veränderung der Blechhalterdistanz als einzig sinnvolles Stellglied in der betrachteten Pressenstraße heraus. Änderungen im Kraftfluss lassen sich über die Verdrängerzylinder (Abschnitt 1.4.2.2), die die Kraft pressenseitig einleiten, oder über in Eingriffbringen von Blechhalterdistanzen im Werkzeug (Abschnitt 1.4.3) erreichen. Bereits im frühen Untersuchungsstadium ließen sich die Verdrängerzylinder als aktive Stellglieder ausschließen. Die Zieh-einrichtung der Pressenstraße wird von einer S5-Steuerung der Fa. Siemens kontrolliert. Aufgrund fehlender Schnittstellen erlaubt die genannte Steuerungsgeneration keine Datenkopplung mit einer externen Einheit, um neue Einstellungen der Verdrängerzylinderkräfte einzuleiten und damit die Blechhalterkräfte zu verändern. Des Weiteren führt die Veränderung der Sollkräfte der Zieh-einrichtung zu einer Kraftänderung im gesamten Bauteilbereich. Eine lokale Beeinflussung des Werkstoffflusses war somit über die beschriebene Systematik nicht möglich.

Werden gezielt die Blechhalterdistanzen in Eingriff gebracht, entsteht ein Kraftnebenfluss, der lokal den Werkstofffluss begünstigt und dadurch die Reißer vermeidet. Die Auswahl und die Abstimmung der im Werkzeug integrierten Blechhalterdistanzen und deren Reaktion auf die Qualitätsmängel sind in FAASS 2009 mittels Finite-Elemente-Simulation durchgeführt worden. Abbildung 28 zeigt das untersuchte Werkzeug des Versuchsträgers Nr. 1 und die Anordnung der Distanzen am Blechhalter.

Ziel war es, nur eine Blechhalterdistanz zu aktivieren, um den Prozesseingriff gering zu halten und negative Effekte auf andere Bauteilbereiche zu unterlassen. Als Gegenmaßnahme zur Vermeidung des Reißers Nr. 1 wurde die Aktivierung und die Höhenabstimmung der Distanz Nr. 4 auf +1,0 mm festgelegt. Die Untersuchungen für die Reißer Nr. 3 und 4 und deren Vermeidung über die umliegenden Blechhalterdistanzen ließen keine Lösungsfindung für eine Prozessregelung zu (FAASS 2009). Im Folgenden wird das mechatronische Gesamtsystem, bestehend aus der Qualitätsvorhersage und der automatischen Regelung für den Reißer Nr. 1, vorgestellt.

Stellglieder

Die Höhenabstimmung der ausgewählten Blechhalterdistanz Nr. 4 im Rahmen einer Prozessregelung im Serienbetrieb setzte die Implementierung eines automatisierten Stellgliedes (Aktors) voraus. Dessen Aufgabe war es, selbsttätig in den Prozess einzugreifen und damit einen manuellen Eingriff zu vermeiden. Dafür

kam eine aktive Blechhalterdistanz zum Einsatz. Sie ist in Abbildung 60 zusammen mit der Ausgangssituation des Werkzeugs skizziert.

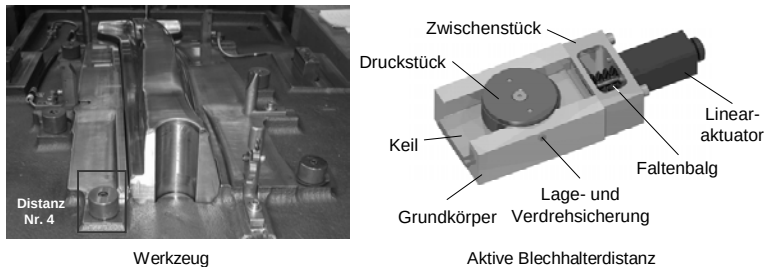


Abbildung 60: Werkzeug im Ausgangszustand und die aktive Blechhalterdistanz nach FAASS 2009 als Stellglied für die Prozessregelung des Reibers Nr. 1

Sie arbeitet nach dem Prinzip des Keiltriebs und ermöglicht zwischen den Pressenhüben das Einstellen einer neuen Distanzierung des Blechhalters. Ausgehend von der Qualitätsvorhersage des Modells lässt sich die aktive Blechhalterdistanz in Eingriff bringen bzw. zurückfahren. Die Bewegung des Keiltriebs überträgt ein Linearmotor der Fa. Oriental Motor. Es handelt sich dabei um einen Schrittmotor mit Schrittweiten von 0,02 mm. Die Ansteuerung des Motors übernimmt ein Verstärkermodule, das direkt mit der Analog/Digital-Wandlerkarte des Messsystems (vgl. Abschnitt 3.8) gekoppelt ist. Der Analogausgang der Analog/Digital-Wandlerkarte erzeugt die notwendige Spannung, um den Linearmotor in die festgelegte Position zu bewegen und damit den Keil ein- oder auszufahren. Über die Längsverschiebung des Keils wird das Druckstück in der Höhe verstellt und damit die aktive Blechhalterdistanz in Eingriff gebracht. In der Grundstellung herrscht bei einer absoluten Höhe von -0,2 mm kein Kontakt zwischen Distanz und Oberwerkzeug. Eine Höhenverstellung des Druckstücks auf die Position +1,0 mm, gemäß der Forderung der ermittelten Stellgrößen, wird über eine Spannungserhöhung von +6,0 V erreicht. Eine Schrittweite von 0,02 mm entspricht einer Spannungsänderung von 0,1 V.

4.4.4 Bestimmung der Regelstrategien und der Regelstruktur

Klassische Regler, wie z.B. PID-Regler, sind dafür geeignet, bei einer Vielzahl unterschiedlicher Regelstrecken ein gutes Führungs- und Störungsverhalten zu

erzielen (JAKOBY 1996). Stetige Regler erfordern ebenfalls den Einsatz von stetigen Stellgliedern, um ein unmittelbares Stellsignal für den jeweiligen Prozess zu erzeugen. Die Reihenschaltung eines kontinuierlichen Reglers und eines schaltenden Stellgliedes führt nicht zum gewünschten Erfolg. Schaltende Stellglieder können mit einem Zweipunktregler oder einem schaltenden Regler gut kombiniert werden (Abschnitt 1.4.7). Im vorliegenden Prozess zur Qualitätsregelung wurde einem ähnlichen Anwendungsfall begegnet. Die beschriebenen Rahmenbedingungen stellen durchgehend diskrete Prozessgrößen dar. In der Regelgröße Teilequalität verbergen sich, bezogen auf den zu regelnden Reißer Nr. 1, zwei Zustände: Gutteil (Wert der Vorhersage ist Null) und Schlechtteil (Wert der Vorhersage ist Eins). Diese Aussage wurde über die entworfene Qualitätsvorhersage erzeugt und dem Regler zugeführt (Abschnitt 4.3.5.4). Das Stellglied, die aktive Blechhalterdistanz bzw. der Linearmotor, nimmt laut vorhergehender Definition ebenfalls zwei Zustände ein: Grundstellung (-0,2 mm) und aktive Distanzierung (+1,0 mm). Folglich ist der Einsatz eines schaltenden Reglers zu empfehlen. Da schaltende Regler nichtlineares Verhalten besitzen, ist eine Darstellung in Form einer Übertragungsfunktion nicht möglich. Gleichung (13) zeigt die Funktion des prozessspezifischen Reglers:

$$f(y) = \begin{cases} -0,2 & \text{für } y < 0,5 \\ +1,0 & \text{für } y \geq 0,5 \end{cases} \quad (13)$$

$f(y)$ Funktion für die Position der aktiven Blechhalterdistanz
 y Qualitätsvorhersage des Prozessmodells

Wird vom Prozessmodell ein Gutteil prognostiziert, ist eine Verstellung der aktiven Blechhalterdistanz in Grundstellung auf -0,2 mm vorgeschrieben. Die Vorhersage eines Reißers Nr. 1 hat eine Aktivierung der Distanz auf eine Höhe von +1,0 mm zur Folge. Der Zweipunktregler hat die Aufgabe, zwischen diesen beiden Zuständen zu schalten. Schaltende Regler besitzen gewöhnlich eine Hysterese, die aus der Reaktionszeit auf eine sprungförmige Änderung der Führungsgröße entspringt. Dieser Effekt war im vorliegenden Prozess aufgrund der Stillstandzeiten zwischen zwei aufeinanderfolgenden Hübten bei Hubzahlen von 5 bis 6 Hub/min, und damit der langen Regel- und Stellzeiten zwischen den einzelnen Hübten, zu vernachlässigen.

4.4.5 Implementierung und Aufbau des Regelkreises

Die Voraussetzungen wurden damit geschaffen, um an dieser Stelle den Regelkreis für das mechatronische Gesamtsystem zu erstellen. Die in der Arbeit beschriebenen Ergebnisse fließen nun zusammen und werden miteinander verknüpft. Die Struktur zur Bestimmung der Qualitätsvorhersage wurde um den regelnden Anteil erweitert und ist aus Abbildung 61 ersichtlich.

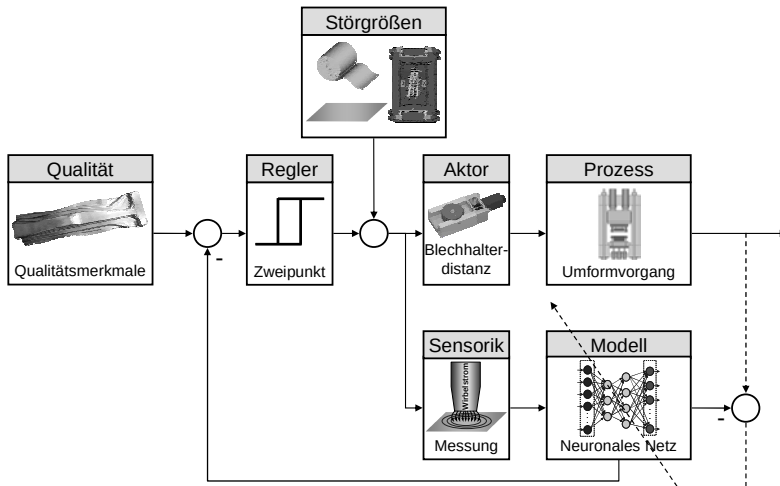


Abbildung 61: Modellbasierter Regelkreis auf Basis Neuronaler Netze, spezifisiert für den Versuchsträger Nr. 1

Es handelt sich um eine modellbasierte Regelung auf Basis Neuronaler Netze. Das Prozessmodell enthält Wissen aus dokumentierten und analysierten Datensätzen vorangegangener Abpressungen. In Tabelle 15 wird eine kurze Beschreibung und eine Zusammenfassung der einzelnen Bausteine des Regelkreises aufgezeigt. Hervorgehoben sind die innerhalb der Prozessregelung verarbeiteten Informationen und Signale. Die weiteren Signale dienen der Prozessbeobachtung.

Der mechatronische Gesamtprozessablauf fand gemäß der kontinuierlich gekennzeichneten Signalflusslinien in Abbildung 61 in folgenden Schritten statt. Vor dem eigentlichen Umformvorgang wurden im Platinenlader über die Wirbelstrommessung die Werkstoffeigenschaften bestimmt. Sie dienten als Eingangsgrößen für das Prozessmodell, das noch vor dem Weitertransport der Platine eine

Qualitätsvorhersage auf Basis Neuronaler Netze abgab. Aus dem Vergleich zwischen der Soll- bzw. Führungsgröße Teilequalität und der Istgröße prädiizierte Aussage des Modells wurde die Regeldifferenz berechnet. Sie wurde an einen schaltenden Regler mit zwei Zuständen weitergeleitet. Dieser Zweipunktregler schaltete entsprechend der geforderten Teilequalität die aktive Blechhalterdistanz als Stellglied in die Position -0,2 mm oder +1.0 mm. Vor dem Einlegen der Platinen in die Ziehstufe konnten somit über die vorzeitige Einstellung der Blechhalterdistanz der Umformprozess geregelt und bevorstehende Qualitätsfehler am Versuchsträger Nr. 1 vermieden werden.

Die unterbrochen gekennzeichneten Signalflüsse in Abbildung 61 beschreiben den Prozessablauf einschließlich einer Adaption des aktuellen Modells zur Qualitätsvorhersage. Die Anpassung der Modelle ereignet sich im Anschluss an eine dokumentierte Messreihe. Die kurzen Zeitintervalle zwischen der Verarbeitung der Platinen, und damit der Messwerterfassung bei 5 bis 6 Hub/min sowie die hohe Totzeit bis zur Rückmeldung der realen Teilequalität am Auslaufband, verhindern eine Online-Anpassung der Prozessmodelle. Nach Beendigung der Abpressung wurden die vorhergesagte und die reale Teilequalität einander gegenübergestellt und die Neuronalen Netze mit den neu gewonnen Trainingsdaten bei Abweichungen neu berechnet. In einer Folgeabpressung lag somit ein verbessertes, an die aktuellen Qualitätsfehler adaptiertes Prozessmodell zur Qualitätsvorhersage vor.

4.4.6 Inline-Regelung der Bauteilqualität in der Serienfertigung

Das mechatronische Gesamtsystem, bestehend aus der Sensorik, der Aktorik, dem Prozessmodell, der Qualitätsvorhersage und der Regelung, wurde zwecks der Validierung und der Prüfung der Funktionalität im Serienablauf integriert. Die Begleitung einer weiteren, neuen Produktionsreihe, der Abpressung Nr. 8, wies die Funktionsfähigkeit der Inline-Prozessregelung und der automatischen Verstellung der Aktorik in der Serienfertigung von Karosseriebauteilen nach. Als Modell zur Qualitätsvorhersage wurde das Neuronale Netz aus Abschnitt 4.3.5.4, das in der Abpressung Nr. 7 getestet wurde, eingesetzt. Es handelte sich um ein Prozessmodell, generiert aus Trainingsdaten der Abpressungen Nr. 3 und 6. Die sehr hohe Schätzgüte, bezogen auf die begleiteten Abpressungen einschließlich der Abpressung Nr. 7, setzte kein neues Training des Modells voraus. Weiterhin konnte auf diese Weise das bestehende Neuronale Netz mit einer weiteren Messreihe getestet werden.

Für die gezielte Erprobung des neuen Aufbaus in der Abpressung Nr. 8 wurden teilweise Platinen aus abgesetzten Paketen eingesetzt. Aufgrund der hohen Qualitätsprobleme bei der Fertigung der genannten Platinen wurden diese ausgeschleust, um ihr Formänderungsvermögen zu einem späteren Zeitpunkt erneut zu testen. Sie eigneten sich daher hervorragend für den gesteuerten Test und den Nachweis des Lösungskonzeptes der Prozessregelung. Abbildung 62 zeigt die Resultate der messtechnischen Begleitung der Abpressung Nr. 8.

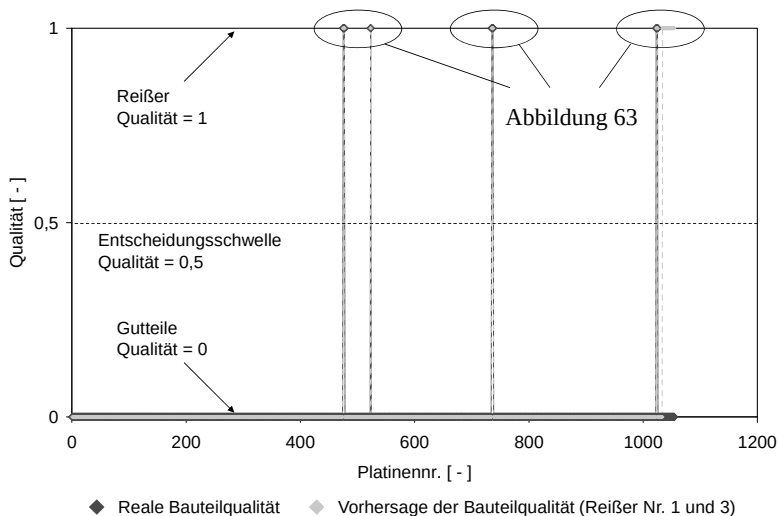


Abbildung 62: Qualitätsvorhersage und automatische Regelung bei der Abpressung Nr. 8

Analog Abschnitt 4.3.5.4 werden Gutteile mit einem logischen Wert Null und gerissene Bauteile mit einem Wert Eins gekennzeichnet. Auf der Abszisse ist die fortlaufende Platinennummer und auf der Ordinate die jeweils entsprechende Qualität aufgetragen. Zum Nachweis der Funktionalität der Qualitätsvorhersage für die Abpressung Nr. 8 wurde in einem ersten Schritt der Regelkreis geöffnet betrieben und damit der regelnde Eingriff ausgesetzt. Das Prozessmodell diente lediglich der Prognose der Teilequalität. Die abgesetzten Platinen vergangener Abpressungen wurden in stochastischer Reihenfolge gefertigt. Falls gerissene Teile vorkamen, wurden sie über das Qualitätsmodell detektiert. Wie Abbildung 62 und Abbildung 63 zu entnehmen ist, traten nach ca. 500 gefertigten Bauteilen vier Reißer Nr. 1 auf. Nach weiteren ca. 300 Teilen wurden erneut zwei Reißer

Nr. 1 und ein Reißer Nr. 3 gefertigt. Dieser Vorgang wiederholte sich nach der Produktion von ca. 200 weiteren Bauteilen, unter denen drei Reißer Nr. 1 auftraten. ber das geschaltete Online-Prozessmodell wurden sämmtliche bis zu diesem Zeitpunkt aufgetretenen Bauteile mit dem realen Qualitätsmerkmal Gutteil, Reißer Nr. 1 und Reißer Nr. 3 korrekt vorhergesagt.

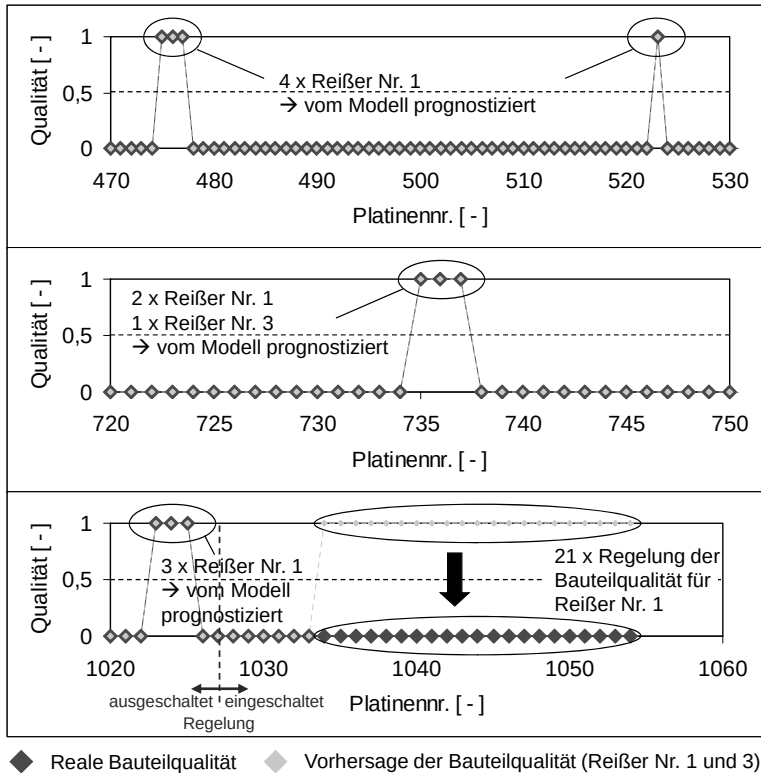


Abbildung 63: Detailansicht des Qualittsverlaufs und der Modellvorhersage bei der Abpressung Nr. 8

Somit waren die Bedingungen, um den Regelkreis zu schließen und damit die automatische Prozessregelung über eine aktive Blechhalterdistanz zu verwirkli-

chen, erfüllt. Gemäß dem vorangegangenen Abschnitt wurde bei der Prognose von Reißern Nr. 1 und 3 über einen Zweipunktreger die Blechhalterdistanz in Eingriff gebracht. Diese wurde auf eine Distanzierung von +1,0 mm eingestellt und erzeugte damit entsprechend der Regelstrategie Gutteile. Die beschriebenen Vorgänge fanden dabei automatisch, ohne einen manuellen Eingriff von außen, statt.

Abbildung 62 und Abbildung 63 verdeutlichen die hohe Genauigkeit des realisierten Systems mit 100% korrekt erkannten Reißern und 100% korrekt erkannten Gutteilen. Nach 1027 gefertigten Bauteilen wurden vom Prozessmodell 21 Reißer Nr. 1 prognostiziert. Durch den automatisierten Ablauf des Regelungskonzeptes wurden der Aktor Blechhalterdistanz 21 Mal aktiviert, 21 gerissene Bauteile vermieden und damit 21 zusätzliche Gutteile erzielt. Die erarbeiteten Ergebnisse zeigen das hohe Potenzial eines mechatronischen Gesamtsystems, bestehend aus einer modellbasierten Prozessregelung über Neuronale Netzwerke für die Minimierung des Ausschusses, auf. Weiterhin vermeiden die automatisierten Eingriffe in den Produktionsprozess gegenüber der manuellen Verstellung des Gesamtsystems einen Stillstand der Anlage.

4.5 Zusammenfassung der Versuchsergebnisse

Im Rahmen der Untersuchung des Versuchsträgers Nr. 1 sind verschiedene Prozessmodelle entworfen worden. Die Analyse der Datenbasis, entstanden aus der messtechnischen Begleitung von sechs Abpressungen, führte schrittweise zum optimalen Modell. Die akkurate Dokumentation der Messdaten und der zugeordneten Bauteilqualität, die Bewertung und die Voruntersuchung der Eingangsgrößen sowie die Auswahl geeigneter Modellierungsmethoden zeigten sich als entscheidende Größen für den Entwurf eines Prozessmodells. Für die Auswahl der Neuronalen Netze als Modellierungsmethode, gemäß der Aufgabenstellung, wurden Korrelationen zwischen den Wirbelstrommesswerten und den mechanischen Werkstoffkennwerten gebildet. Hierbei wiesen Neuronale Netze die besten Ergebnisse auf, um den Werkstoff zu charakterisieren. Da die Wirbelstrommesswerte einen höheren Informationsgehalt bezüglich der Werkstoffeigenschaften besitzen und die Genauigkeit über zwei Korrelationen (Wirbelstrommesswerte-Werkstoffkennwerte und Werkstoffkennwerte-Teilequalität) abnimmt, wurden Modelle über den direkten Ansatz zwischen den Wirbelstrommesswerten und der Teilequalität generiert. Das optimale Prozessmodell, basierend auf Neuronalen Netzen, resultierte aus der Variation der Ein- und der Ausgangsdaten, der Netz-

struktur und der Trainingsdaten. Die Klassifizierungsgüte der Modelle wurde anhand der aufgenommenen Messdaten validiert. Die Serienerprobung erfolgte durch die Implementierung einer Online-Qualitätsvorhersage für eine exemplarisch begleitete Abpressung. Die erzielten Erkennungsraten für die gerissenen Bauteile und für die Gutteile beliefen sich auf 100%.

Das System zur Qualitätsvorhersage wurde um einen Regler und einen Aktor in Form eines Zweipunktreglers und einer aktiven Blechhalterdistanz erweitert. Die notwendigen Regelgrößen, die Stellgrößen und die Regelstrategien wurden bestimmt. In einer weiteren Abpressung wurde der entwickelte Regelkreis unter den Serienbedingungen getestet. Die automatische Prozessregelung auf Basis Neuronaler Netze erreichte eine vollständige Erkennung und Regelung der gerissenen Bauteile und ermöglichte die Reduzierung des Ausschusses.

5 Prozessüberwachung und Qualitätsbewertung an einer Großserienanlage

5.1 Allgemeines

Die gewonnenen Erkenntnisse zum Aufbau eines mechatronischen Systems sowie die vorgestellten Verfahren der Prozessüberwachung und Qualitätsvorhersage und die möglichen Regelstrategien wurden auf ein zweites exemplarisches Bauteil, welches auf einer Großraumsaugertransferpresse gefertigt wird, übertragen. Es dient als zweites Anwendungsbeispiel der vorliegenden Arbeit und komplettiert den Nachweis der Realisierung eines mechatronischen Systems zur Qualitätsbewertung und -vorhersage in einem Serienprozess. Die erarbeiteten Ansätze zur Modellierung des Fertigungsprozesses auf Basis Neuronaler Netze aus Kapitel 4 standen dafür als Lösungsinstrument zur Verfügung.

Einleitend wird das Gesamtsystem, bestehend aus der untersuchten Serienanlage, dem Werkzeug und dem Bauteil, vorgestellt. Die Analyse der aufgetretenen Qualitätsfehler und der zugehörigen Einflussgrößen führte zur Festlegung der notwendigen Sensorsysteme für eine Prozessüberwachung. Die Erfahrungen der vorangegangenen Kapitel im Bereich Sensorik und die Aussagekraft der Messverfahren erlaubten eine gezielte Einschränkung bzw. Reduktion der einzusetzenden Systeme. Es entstand ein mechatronisches Gesamtsystem, basierend auf Sensoren zur Erfassung der Einflussgrößen, deren Relevanz nachgewiesen wurde.

5.2 Beschreibung des Gesamtsystems und Prozessanalyse

5.2.1 Beschreibung der Großraumsaugertransferpresse

Bei der zweiten betrachteten Anlage handelt es sich um eine Großraumsaugertransferpresse mit Saugerbrücken der Fa. Umformtechnik Erfurt aus dem Baujahr 2003. Sie wird sowohl für die Produktion von großflächigen Karosserieteilen als auch für die Fertigung von Doppel- und Mehrfachteilen eingesetzt. Sie besteht aus einem Platinenlader, sechs Pressenstufen mit einer Gesamtpresskraft von 73000 kN (21000 kN in Stufe 1, der Ziehpresse) und der Teileentnahme mit zwei

Auslaufbändern. Details zum Aufbau und zur Funktionsweise der beschriebenen Anlage sind in Abschnitt 1.4.1, Abschnitt 1.4.2 und in Abbildung 7 vorzufinden. Die untersuchte Pressenanlage illustriert Abbildung 64.



Abbildung 64: Untersuchte Großraumsaugertransferpresse im Presswerk der Audi AG

Die Ziehpresse weist eine hydraulische Acht-Punkt-Zieheinrichtung im Tischkissen mit einer maximalen Ziehkissenkraft von 6000 kN auf. Die fünf Folgestufen sind durch pneumatische Stoßkissen gekennzeichnet. Die Entstapelung im Laderbereich übernimmt ein Universalfeeder mit integriertem Sensor zur Doppelblecherkennung. Ein unvorhergesehenes Aufgreifen und zeitgleiches Einbringen zweier Platinen in die Umformstufe der Anlage sowie eine Beschädigung des Werkzeugs und der Presse werden damit ausgeschlossen. Die Beförderung der entstapelten Platinen aus dem Laderbereich in die Ziehstufe übernehmen mehrere parallel arbeitende Magnetbänder. Sie vermeiden unerwünschte Verschiebungen und Vibrationen der Platinen. Der Transport der Bauteile zwischen den verschiedenen Stufen wird über ein Saugerbalkensystem bewerkstelligt. Die Pressenanlage kann eine Einstellhubzahl von maximal 15 Hub/min erreichen.

Die Platinenzufuhr, der Werkstücktransport, die Steuerung der Zieheinrichtung, die Teileentnahme, teilweise die Fertigteilstapelung sowie die elektrische Steuerung der gesamten Transferpresse werden vollautomatisch über speicherprogrammierbare Steuerungen ausgeführt.

5.2.2 Überblick der Mess- und Einflussgrößen

Das Ergebnis der Identifikation der Einflussgrößen für das Auftreten von Qualitätsmängeln am Versuchsträger Nr. 2 wird in Abbildung 65 zusammengefasst.

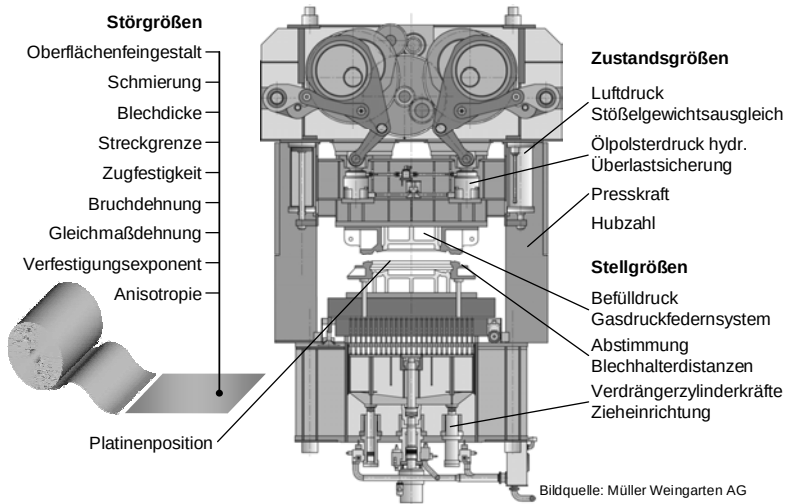


Abbildung 65: Mögliche Einflussgrößen auf den Umformprozess zur Fertigung des Versuchsträgers Nr. 2 (FAASS 2009)

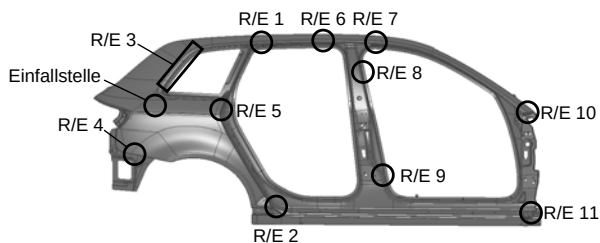
Die Pressenanlage bietet eine große Vielfalt an umfassenden Sensorsystemen. Diese sind bereits in der Großraumsaugertransferpresse integriert und können über analoge und digitale Schnittstellen der speicherprogrammierbaren Steuerungen der unterschiedlichen Pressenstufen ausgelesen werden. Dazu gehören u. a. die Verdrängerzylinderdrücke und die Ölpolsterdrücke der hydraulischen Überlast (Abschnitt 1.4.5.1). Die Erfassung der Einflussgrößen bezieht, analog dem Vorgehen bei der Prozessregelung des Versuchsträgers Nr. 1, die Integration weiterer Sensorsysteme mit ein.

Die Voruntersuchungen in FAASS 2009 führen zur Schlussfolgerung, dass für den Aufbau einer konsistenten Datenbasis und einer modellbasierten Prozessregelung eine reduzierte Anzahl an Messgrößen hinreichend ist. Damit ergibt sich für die Überwachungssysteme folgende Anforderungsliste zur Erfassung der relevanten Einflussgrößen:

- Mechanische Werkstoffkennwerte: Zugfestigkeit R_m , 0,2%-Streckgrenze $R_{p0,2}$, Gleichmaßdehnung A_g , Bruchdehnung A_{80} , Verfestigungsexponent n_{90} , senkrechte Anisotropie r_{90}
- Wirbelstrommesswerte
- Druck im Gasdruckfedersystem der inneren Blechhalter
- Verdrängerzylinderkräfte (Sollkräfte)
- Hubzahl

5.2.3 Identifikation der Qualitätsmängel

Die Analyse der Teilequalität bei der Fertigung des Versuchsträgers Nr. 2 ergibt elf Problembereiche und die dort auftretenden Qualitätsmängel, visualisiert in Abbildung 66.



R/E 1-11: Kritische Bereiche bzgl. Reißen / Einschnürungen

Abbildung 66: Problembereiche und Qualitätsmängel bei der Serienfertigung des Versuchsträgers Nr. 2 (FAASS 2009)

Reißer und Einschnürungen sind die überwiegenden Mängel bei der Fertigung des analysierten Bauteils. Des Weiteren äußern sich die Qualitätsschwankungen als Einfallstellen im Bereich des Heckfensters.

Während der begleiteten und dokumentierten Abpressungen des Versuchsträgers Nr. 2 traten lediglich Qualitätsmängel in den Problembereichen R/E 1, R/E 2 und R/E 3 auf. In den Problembereichen R/E 1 und R/E 2 äußerten sich die Mängel als Reißer bzw. Einschnürungen, im Bereich R/E 3 dagegen ausschließlich als Einschnürungen. Im Gegensatz zum Versuchsträger Nr. 1 konnten die einzelnen Mängel nicht auf die gleichen Versagensursachen zurückgeführt werden. Sie tra-

ten stets getrennt voneinander auf (FAASS 2009). Damit ist es vorteilhaft, sie in den weiteren Schritten bei der Erstellung der Prozessmodelle getrennt zu behandeln.

5.3 Aufbau und Inbetriebnahme des mechatronischen Systems

5.3.1 Allgemeines

Die Voraussetzung für die Datenerfassung im Serienbetrieb ist die Integration der erforderlichen Sensorsysteme in die untersuchte Großraumsaugertransferpresse. Eine Übersicht der eingesetzten Sensoren, deren Einbauort und deren Vorrichtungskonzept ist Abbildung 67 zu entnehmen.

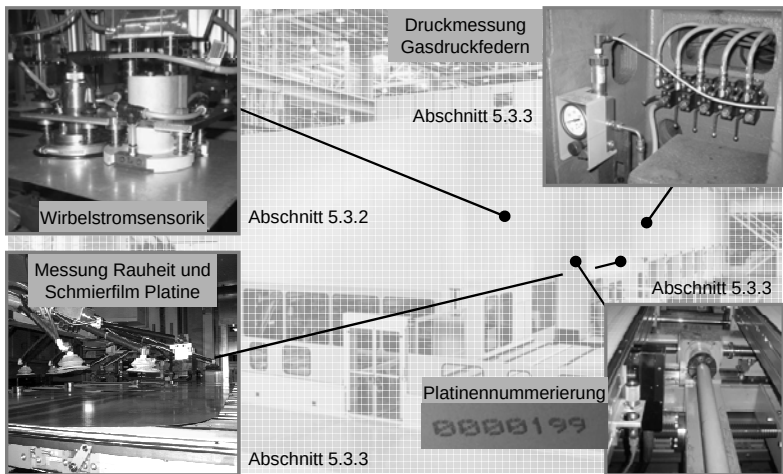


Abbildung 67: Übersicht der Sensorsysteme und der Datenerfassung in der untersuchten Großraumsaugertransferpresse

Die Funktionsweise und der Messablauf des mechatronischen Systems werden in den im Bild genannten Abschnitten (Abbildung 67) der Arbeit näher beschrieben. Die Sensoren erfüllen die Serienbedingungen des laufenden Produktionsprozesses, ohne diesen zu beeinflussen. Damit stellten sie in der untersuchten Pressenanlage die Daten für eine konsistente Prozessüberwachung zur Verfügung.

5.3.2 Wirbelstromsensor zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung

Die Ausgangsbasis für die Integration des Wirbelstromsensors aus Abschnitt 2.2.2 bildete der bereits in der Anlage implementierte Sensor zur Doppelblecherkennung, der sog. Doppelblechsensor. Eingebaut im Entstapelfeeder, erfüllt dieser die Funktion, während der Aufnahme und der Entstapelung der Platinen doppelt aufgenommene Platinen zu erkennen und aus dem Produktionsprozess auszuschleusen. Er kann innerhalb der Anlage senkrecht zur Durchlaufrichtung der Platinen verfahren werden. Nimmt der Entstapelfeeder die Platinen auf, wird der Sensor über ein Unterdruckluftverfahren an die Platinenoberfläche angebracht. Die Doppelblechmessung findet während des Platinentransports vom Paketstapel auf die folgenden Magnetbänder der Pressenanlage statt.

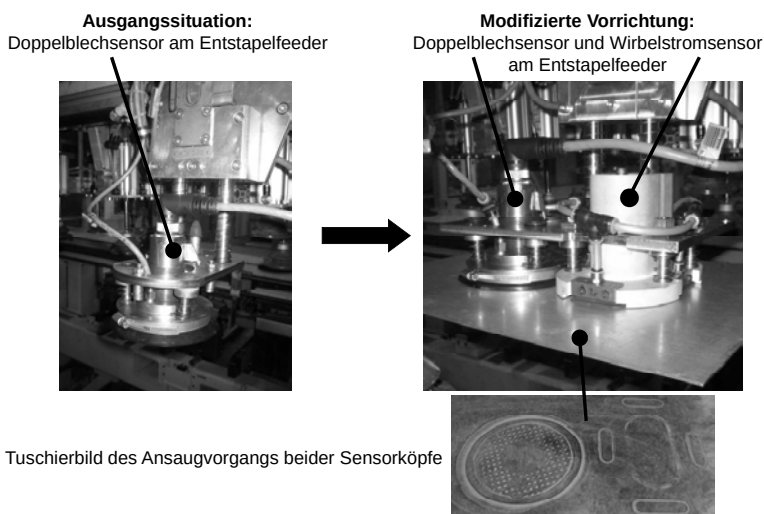


Abbildung 68: Integration des Wirbelstromsensors zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung

Das Funktionsprinzip beruht auf einer induktiven Messung der Blechdicke mittels zweier konzentrisch angeordneter Spulen. Wird ein Wert größer als die Referenzblechdicke einer Platine ermittelt, signalisiert der Sensor zwei aufgenommene Platinen und schleust diese aus.

Das Integrationskonzept für die Funktionsweise des Wirbelstromsensors wurde dem beschriebenen Verfahren der Doppelblecherkennung nachempfunden. Die

Ablaufschritte der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung werden parallel, jedoch informationstechnisch vom Doppelblechsensor getrennt, ausgeführt. Die Führungsplatte der Doppelblecherkennung wurde erweitert und der Wirbelstromsensor an die Verfahrhalterung montiert. Beide Sensoren können über ein gemeinsames Unterdruckluftsystem betrieben und an die Platinenoberfläche angedrückt werden. Den Vergleich zwischen der ursprünglichen und der abgewandelten Konstruktion veranschaulicht Abbildung 68. Des Weiteren wurde über ein Tuschiebild der vollständige Kontakt zwischen dem Wirbelstromsensor und der Platinenoberfläche und damit ein fehlerfreier Messvorgang sichergestellt. Beim Tuschieieren werden die Oberflächen von Prüfobjekten mit blauer Farbe versehen. Die Objekte werden miteinander in Kontakt gebracht und der Farbabdruck der Oberflächen wird geprüft. Dieser signalisiert, ob zwischen zwei Flächen ein Kontakt herrscht.

Die zerstörungsfreie Werkstoffprüfung wird von einem an der Halterung montierten Initiator in Form eines Lichttasters gestartet. Dieser schaltet, sobald eine Platine am Sensor anliegt. Aufgrund des Platinentransports zum Magnetband, behaftet mit einem Zeitintervall von ca. zwei Sekunden, kann die Werkstoffprüfung mit einer Messdauer von 0,6 Sekunden vollzogen werden. Eine im Kabelschlepp des Entstapelfeeder verlegte Spezialleitung gewährleistet die Signalübertragung zum Prüfgerät der Fa. Förster (Abschnitt 2.2.2). Weiterhin kann so den drei Bewegungsachsen des Feeder definiert gefolgt werden. Das Prüfgerät wurde statisch oberhalb des Laderbereichs installiert, um es vor Erschütterungen und weiteren Umwelteinflüssen abzuschirmen. Die Messdaten werden über eine Ethernetverbindung vom Prüfgerät an den Messschrank übertragen. Die eingehenden Datenpakete werden gespeichert und mittels eines Korrelationsmodells die mechanischen Werkstoffkennwerte der Platine aus den Wirbelstrommesswerten berechnet.

Für den betrachteten Werkstoff DC07 fand die Erstellung des Korrelationsmodells aus den Wirbelstrommesswerten und den mechanischen Werkstoffkennwerten und dessen Validierung, analog Abschnitt 3.2, manuell statt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Gemäß der Normprüfung von Werkstoffen nach EN 10002-1 wurde die Einbau- richtung und dementsprechend auch die Validierung des Wirbelstromsensors für den Versuchsträger Nr. 2 in 90° zur Walzrichtung realisiert. Die Genauigkeiten der einzelnen mechanischen Werkstoffkennwerte des Werkstoffs DC07 weisen höhere Werte auf als die Kennwerte des Werkstoffs TRIP700. Der Sachverhalt

stimmt mit den Angaben des Sensorlieferanten hinsichtlich der Genauigkeitseinbußen bei der Prüfung des Werkstoffs TRIP700 gegenüber DC07 überein. Bezüglich des Verfestigungsexponenten n_{90} und der senkrechten Anisotropie r_{90} ist die Aussagekraft des Sensors nicht ausreichend. Diese Kennwerte konnten somit nicht berücksichtigt werden.

Messgröße	Sensor	Genauigkeit
R_m [N/mm ²]	Wirbelstromsensor	$\pm 2,1\%$
$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	Wirbelstromsensor	$\pm 3\%$
A_g [%]	Wirbelstromsensor	$\pm 1,5$
A_{80} [%]	Wirbelstromsensor	$\pm 1,2$
n_{90} [-]	Wirbelstromsensor	-
r_{90} [-]	Wirbelstromsensor	.
Wirbelstrommesswerte [-]	Wirbelstromsensor	-

Tabelle 11: Genauigkeit der zerstörungsfreien Prüfung des Werkstoffs DC07 bezüglich einzelner mechanischer Werkstoffkennwerte aus den Validierungsproben

Die Rahmenbedingungen eines Serieneinsatzes hinsichtlich der Robustheit, der Messzeit und der Genauigkeit des Wirbelstromsensors zur Prozessüberwachung des Versuchsträgers Nr. 2 sind erfüllt. Die Integration in den Arbeitsablauf der Pressenanlage barg einen zusätzlichen Vorteil gegenüber der Messung des Versuchsträgers Nr. 1. Der hohe Automatisierungsgrad der Anlage garantierte die Reproduzierbarkeit jeder Prüfung einer Platine, unabhängig von der Platine, vom Platinenpaket oder von der Abpressung. Gerade im Zuge der Prozessmodellierung führt die Tatsache der Abpressungsunabhängigkeit, d. h. der stets identischen Lage des Messkopfes zur Platinenoberfläche, zur Gleichbehandlung der Datensätze und damit zu größeren Datenmengen und zur schnelleren, robusteren Modellfindung.

5.3.3 Implementierung weiterer Systeme zur Prozessüberwachung

Weitere Sensorsysteme für die Analyse möglicher Einflussgrößen des Versuchsträgers Nr. 2 wurden gemäß Abbildung 67 in die Pressenanlage eingebaut. Ab-

schnitt 1.3 beschreibt das Werkzeug und die Funktion des autonomen Gasdruckfedernsystems im inneren Blechhalter des Werkzeugoberteils. Zur Berücksichtigung des Verhaltens des Befülldruckes während des Tiefziehvorgangs und während einer gesamten Abpressung wurden Drucktransmitter des Typs S-10 der Fa. Wika mit einer Messgenauigkeit von $\pm 0,1$ bar angeschlossen. Die Signalkopplung wurde über speziell verlegte Leitungen im Pressenstößel und im Pressengerüst der Ziehstufe realisiert. Der Messrechner empfängt, speichert und visualisiert analog des Signalflussplans für den Versuchsträger Nr. 1 in Abbildung 42 alle Datensätze.

Der Sensor zur Rauheits- und Schmierfilmmessung aus Abschnitt 3.4 erfasst die Änderungen der Ölschicht zwischen den Platinen. Aufgenommen im Einlegefeeder für die Ziehstufe der Anlage und informationstechnisch über den Pressen-transfer verbunden, leitet der Sensor die Messwerte an den Messrechner weiter.

Die Qualität der gefertigten Teile wurde am Auslaufband über eine Sichtprüfung bestimmt. Für die Zuordnung der zu Beginn des Produktionsprozesses ermittelten platinenbezogenen Messdaten und der gefertigten Bauteilqualität kam erneut eine Platinenbeschriftungseinheit gemäß Abschnitt 2.2.6 und 3.6 zum Einsatz. Der Schreibkopf befindet sich zwischen den Magnetbändern, um die Platinenbewegung zu nutzen. Beim Transport der Platinen mittels der Bänder wird der Schreibkopf überfahren, ein Initiator löst den Schreibvorgang aus und eine fortlaufende Nummer wird mit wasserabwaschbarer Tinte auf jede Platine gedruckt. Diese wird am Auslaufband mit den Datensätzen der Sensorsysteme zusammengeführt. Die Zuordnung der Messergebnisse zur Bauteilqualität wurde damit gewährleistet.

5.3.4 Sensoren der Pressenanlage

Während des Umformvorgangs übernehmen eine zentrale und mehrere dezentrale speicherprogrammierbare Steuerungen die Koordination der Abläufe. Die Signale der in der Pressenanlage vorhandenen Sensorik werden an die speicherprogrammierbare Steuerung der Großraumsaugertransferpresse geleitet. Hier sind die analogen Signale der Sensoren bereits digital umgewandelt. Die Kopplung zwischen einem Messrechner und der speicherprogrammierbaren Steuerung bzw. dem Programmiergerät der Anlagensteuerung ermöglichte die Erfassung weiterer Einflussgrößen: Verdrängerzylinderkräfte, Stoßelkissendruck, etc.

Das Ziel ist es, die aufgezeichneten Daten im Simulations- und im Messprogramm Matlab® zu integrieren, um die Datenzuordnung und -weiterverarbeitung zu garantieren. Dafür gibt es die Möglichkeit, mit einem speziell für die Variablenbeobachtung entworfenen Softwarewerkzeug SPS-Analyzer der Fa. Autem die Steuerungen über TCP/IP-Protokoll einzeln anzusprechen und die Sensordaten aufzuzeichnen. Diese können als Textdatei exportiert und in Matlab® importiert werden. Die Sensordaten werden mit einer Zykluszeit von 10 bis 100 ms von der speicherprogrammierbaren Steuerung abgefragt. Ist eine genauere Datenaufnahme als die Zykluszeit der speicherprogrammierbaren Steuerung notwendig, führt eine zweite Methodik zum Ziel. Bei dieser wird im SPS-Hauptprogramm ein so genannter Interrupter programmiert, dessen Aufgabe darin besteht, das Hauptprogramm zu unterbrechen, die Sensorsignale mit einer vorgegebenen Abtastzeit zu erfassen und in vorgesehene Datenbausteine abzulegen. Diese werden über eine TCP/IP-Schnittstelle an Matlab® transferiert. Matlab® ist für die Filterung, die Aufbereitung, die Visualisierung und die Weiterverarbeitung der Daten zuständig. Letztendlich können die Signale in den entworfenen Prozessregelkreis eingebunden und der Steuerung erneut zugeführt werden. Der genannte Schritt verlangt einen hohen Programmieraufwand seitens des Pressenherstellers, um eine Verlängerung der Gesamttaktzeit der speicherprogrammierbaren Steuerung und Fehloperationen der Anlage zu verhindern. Innerhalb der gegenwärtigen Arbeitstätigkeit konnte dieser Schritt daher nicht umgesetzt werden.

Der Forderung, die Verdrängerzylinderkräfte als Einflussgröße messbar zu gestalten, wurde auf eine vereinfachte Weise nachgekommen. Das Softwarewerkzeug SPS-Analyzer gestattet die Aufzeichnung der Sollkräfte der Verdrängerzylinder. Über dieses Verfahren lässt sich die eingestellte Sollhubzahl ebenfalls erfassen. Über eine Zeitsynchronisation mit dem Messrechner, zuständig für die Speicherung und die Auswertung der Wirbelstrommesswerte, lassen sich die beiden Datensätze hubgenau und damit platinengenau zuordnen. Diese Informationen genügen den Anforderungen einer vollständigen Prozessüberwachung des Versuchsträgers Nr. 2.

5.3.5 Datenaufnahme im Serienbetrieb

Im regulären Produktionsbetrieb der Anlage während der Fertigung des Versuchsträgers Nr. 2 wurden die beschriebenen Prozessdaten zu einem Datensatz pro Platine zusammengefasst. Vergleichbar mit dem Messablauf bei der Abpres-

sung des Versuchsträgers Nr. 1 in Abschnitt 3.8 sind die jeweiligen Schritte erläutert. Bei der Entstapelung im Laderbereich der Anlage wird die Platine einer Wirbelstrommessung unterzogen. Bei der Beförderung der Platine in die Ziehstufe mittels des Einlegefeeders wird die Messung der Rauheit und des Schmierfilms ausgeführt. Die Übermittlung des kontinuierlichen Drucks im Gasdruckfedersystem des Werkzeugoberteils wird im Zuge des Tiefziehvorgangs vollzogen. Beide Informationspakete empfängt der Messrechner und legt sie zusammen mit den Wirbelstrommesswerten ab. Am Auslaufband, am Ende des Produktionsprozesses, findet die Zuweisung der Qualität jedes produzierten Bauteils über die aufgedruckte Platinennummer statt. Nach Beendigung der Abpressung lassen sich die über die speicherprogrammierbare Steuerung getrennt aufgenommenen Sollkräfte der Verdrängerzylinder in der Ziehkisseneinrichtung und die Sollhubzahl der Anlage mit den Datenpaketen im Messrechner zusammenführen. Damit ist der Grundstein für die Prozessanalyse und die Prozessmodellierung gelegt.

5.4 Prozessmodell zur Qualitätsvorhersage und zur Prozessregelung

5.4.1 Allgemeines

Im Fertigungsprozess des Versuchsträgers Nr. 2 werden Formplatinen mit bereits vorhandener Grundbeölung verarbeitet. Vor dem Einlegen in die Ziehstufe werden die Platinen von einer Waschmaschine im Platinenlader mit Waschöl gereinigt. Anschließend werden, um bessere Tiefzieheigenschaften zu erreichen, die Flanschbereiche der Platinen gezielt zusatzbeölt. Die Losgrößen betragen zwischen 1500 und 3000 Bauteilen pro Abpressung. Sie werden bei Hubzahlen zwischen zehn und 14 Hub/min gefertigt.

5.4.2 Statistik der untersuchten Produktionsreihen (Abpressungen)

Im Rahmen der Prozessüberwachung und des Aufbaus eines Modells zur Qualitätsvorhersage des Versuchsträgers Nr. 2 wurden acht Abpressungen messtechnisch begleitet. Für die Prozessmodellierung galt es, die eingestellten Verdrängerzylinderkräfte, die die Blechhalterkräfte wiedergaben, ebenfalls zu berücksichtigen. Der Ziehprozess wird stets mit Standardeinstellungen bezüglich der Verdrängerzylinderkräfte zu Beginn jeder Abpressung gestartet. Treten Quali-

tätsmängel auf, wird überwiegend mit einer Veränderung der Verdrängerzylindereinstellungen reagiert.

Neben den gefertigten Gutteilen traten Reißen/Einschnürungen in den Problem-bereichen R/E 1, R/E 2 und R/E 3 auf (Abbildung 66). Eine Übersicht des Verhältnisses der Gutteile und der Teile mit Qualitätsmängeln in den einzelnen Abpressungen gibt Abbildung 69.

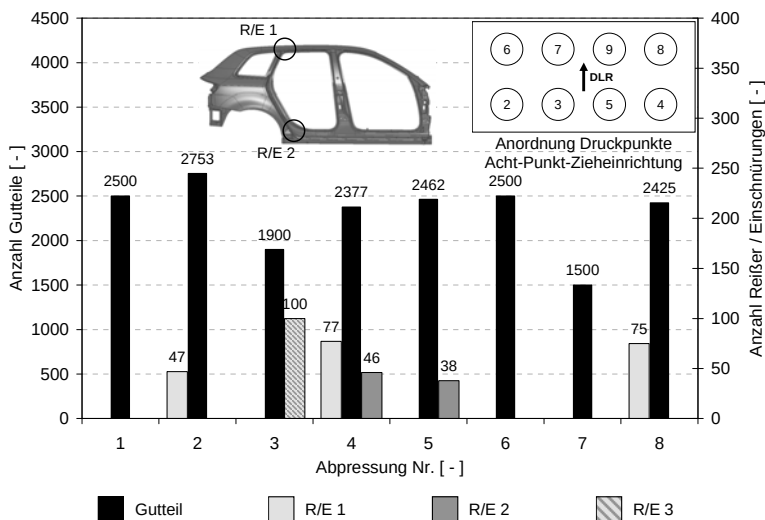


Abbildung 69: Einteilung der begleiteten Abpressungen nach den Gutteilen und den Reißenarten

In den Abpressungen Nr. 1, 6 und 7 lagen ausschließlich Gutteile vor. Die Standardeinstellung der Verdrängerzylinderkräfte blieb über den gesamten Abpressungszeitraum konstant. Die Abpressung Nr. 2 war durch Reißen/Einschnürungen im Problem-bereich R/E 1 gekennzeichnet. Zwei Verdrängerzylindereinstellungen kamen bei einer Losgröße von ca. 2800 Teilen zum Einsatz. Neben der Standardeinstellung fand die Reduzierung der Kräfte der in diesem Bereich liegenden Verdrängerzylinder Nr. 7 und 9 von 300 kN auf 250 kN als Reaktion auf das Auftreten von Reißen statt. Die Maßnahme blieb ohne nachhaltigen Erfolg. 100 Bauteile der Abpressung Nr. 3 wiesen bereits zu Beginn sehr gering ausgeprägte Einschnürungen im Problem-bereich R/E 3 auf. Sie genügten den gestellten Qualitätsanforderungen und wurden nicht als Ausschuss vermerkt. Als Gegenmaß-

nahme wurden die Kräfte der Verdrängerzylinder Nr. 6, 7 und 9 von 250 kN, 300 kN und 300 kN auf 230 kN, 260 kN und 270 kN verringert.

Die Abpressung Nr. 4 enthält 77 Bauteile mit Reißern/Einschnürungen im Problembereich R/E 1 und 46 im Problembereich R/E 2. Die Verringerung der Kräfte der Verdrängerzylinder Nr. 7 und 9 von 300 kN auf 250 kN erwies sich, analog zur Abpressung Nr. 2, als nicht nachhaltige Gegenmaßnahme zur Vermeidung von Reißern im Problembereich R/E 1. Nach ca. 700 weiteren gefertigten Bauteilen wurden 53 Teile mit Qualitätsmängeln im Problembereich R/E 1 erkannt. Die weitere Minderung der Kräfte der Verdrängerzylinder Nr. 7 und 9 auf 230 kN führte zur Verhinderung der Reißer/Einschnürungen im Problembereich R/E 1. Gegenteilig dazu verursachte diese Maßnahme bei 46 Bauteilen Reißer/Einschnürungen im Problembereich R/E 2. Als Konsequenz zur fehlenden Lösungsfindung wurde die Abpressung eingestellt. Die Bauteile mit Reißern/Einschnürungen im Problembereich R/E 2 prägten auch das Bild von Abpressung Nr. 5. Im Verlauf der gesamten Abpressung wurden nahezu alle Kräfte der Verdrängerzylinder gesenkt. Des Weiteren wurden die Bereiche der Zusatzbeölung erweitert und die Ölmenge erhöht. Sämtliche Maßnahmen führten nur bedingt zur Vermeidung von Ausschuss, da sporadisch weiterhin Qualitätsmängel auftraten. Zum Abschluss der Abpressung Nr. 8 wurde ein erneutes Mal das ausgeschleuste Platinenpaket aus der Abpressung Nr. 4 verarbeitet. Die gefertigten Bauteile dieses Pakets wiesen nur sehr leichte Einschnürungen im Problembereich R/E 1 auf und wurden daher nicht als Ausschuss deklariert.

Bereits an dieser Stelle lassen sich zwei wesentliche Eingangsgrößen des Prozessmodells konstatieren. Analog zum Versuchsträger Nr. 1 weist die sprunghafte Änderung der Bauteilqualität auf einen starken Einfluss des Werkstoffs hin. Ferner führt die Veränderung der Verdrängerzylinderkräfte zu einem erheblichen, teils unbekannten Wechsel der Teilequalität.

5.4.3 Festlegung der Eingangs- und der Ausgangsdaten für die Modellbildung

Die geschilderten Ereignisse bei den messtechnisch begleiteten Abpressungen heben die Sensorsysteme mit der höchsten Aussagekraft bezüglich der gefertigten Bauteilqualität hervor. Während des Modellbildungsprozesses auf Basis Neuronaler Netze finden sie Berücksichtigung und werden in die Struktur der Netze implementiert. Die aufgezeichneten Wirbelstrommesswerte (und damit die

mechanischen Werkstoffeigenschaften) bilden zusammen mit den herrschenden Krafteinstellungen der Verdrängerzylinder, also der Blechhalterkraft, die Eingangsdaten der Neuronalen Netze. Der Wirbelstromsensor sendet die 48 Kennwerte in Form von 24 Amplituden und 24 Phasen der induzierten und über die Werkstoffeigenschaften abgeschwächten Ströme.

Die Kräfte der Verdrängerzylinder wurden im begleiteten Fertigungsprozess als Reaktion auf die aufgetretenen Qualitätsmängel verändert. Dieses Vorgehen führte nur bedingt zum Erfolg, beeinflusste jedoch die Bauteilqualität. Die Abweichungen der Verdrängerzylinderkräfte von der Standardeinstellung erzeugten einen neuen Prozesszustand. Um den beschriebenen Zusammenhang zu berücksichtigen, werden im Neuronalen Netz zusätzlich acht Eingänge für die acht Kräfte vorgesehen. Sie übernehmen die Aufgabe, den Einfluss der Blechhalterkraft bezüglich der Bauteilqualität wiederzugeben.

Die Ausgangsgrößen sind die aufgetretenen Qualitätsmängel der acht überwachten Abpressungen. Tabelle 12 spiegelt die Summe der gefertigten Bauteile mit den dazugehörigen Qualitätsmängeln wider. Alle Abpressungen einbezogen, handelt es sich um 199 Bauteile mit Reißen/Einschnürungen im Problembereich R/E 1 und 84 im Problembereich R/E 2. Die 100 Bauteile mit sehr gering ausgeprägten Einschnürungen im Problembereich R/E 3 werden im späteren Verlauf gesondert behandelt, da sie nicht als Ausschuss vermerkt wurden.

Bauteilqualität	Gutteile	R/E 1	R/E 2	R/E 3
Zahl der Bauteile	18800	199	84	100

Tabelle 12: Gesamtübersicht über die gefertigten Bauteile und deren Zuordnung zu den Qualitätsmängeln

Im weiteren Modellbildungsprozess wurde die Information der Abpressungszugehörigkeit, gegenteilig zum Vorgehen beim Versuchsträger Nr. 1, vernachlässigt. Zulässig ist dies aufgrund der genannten Reproduzierbarkeit der Messumgebung durch die festen Einbauorte der Sensorsysteme und durch die automatisierten Abläufe.

5.4.4 Entwurf eines Modells zur Vorhersage von Qualitätsmängeln

Der Wirkzusammenhang der Einflussgrößen wurde anfangs mit einem vereinfachten Modell untersucht. Als Eingangsgrößen fiel die Wahl auf die Wirbel-

strommesswerte, die bei der Standardeinstellung der Verdrängerzylinderkräfte aufgezeichnet wurden (siehe Kapitel 4). Als Ausgangsgrößen wurden lediglich die Bauteile mit Qualitätsmängeln im Problembereich R/E 1 berücksichtigt. Ausgehend von den Starteinstellungen in Tabelle 16, analog zur Tabelle 7, fand die Variation der Parameter statt. Über eine Validierungsmenge, die nicht Teil der Trainingsmenge war, wurden die erzeugten Netze sowie ihre Genauigkeit untersucht. Der Prozentsatz korrekt klassifizierter Gut- und Schlechteile gibt die Genauigkeit der Netze und die Modellgüte wieder. Erneut galt als Ziel, möglichst hohe Erkennungsraten für die Gutteile und besonders für die Schlechteile zu erreichen. Die mangelhaften Bauteile dürfen nicht in die Nachfolgeprozesse gelangen, wodurch sie erhebliche Kosten verursachen würden.

Die Trainingsmenge der Neuronalen Netze bestand aus 50% zufällig ausgewählter Bauteile mit bzw. ohne Qualitätsmängel im Problembereich R/E 1. Netzstrukturen mit einer bis drei versteckten Schichten und einem bis dreißig Neuronen wurden variiert (Abschnitt 4.3.4.4). Die optimalen Erkennungsraten lieferten die Netze, die aus zwei versteckten Schichten mit jeweils zehn Neuronen bestehen und mit dem Bayes'schen Backpropagation-Algorithmus trainiert werden (detailliert erklärt in MACKAY 1992). Aufgesucht wird damit das globale Minimum einer Fehlerfläche, die mit Hilfe der mittleren quadratischen Abweichung berechnet wird. Mittels einer zufälligen Auswahl der Trainingsdaten liegen die Ergebnisse für die Klassifizierung der Gutteile bei 94% und der Schlechteile bei 98%.

Die Aufnahme aller Qualitätsmängel und Prozesseinstellungen ins Modell erforderte die Erweiterung der Netzstruktur um acht neue Eingänge für die acht Sollkräfte der Verdrängerzylinder. Analog zum Abschnitt 4.3.5.3 und zu Abbildung 55 werden für die drei Problembereiche des Versuchsträgers Nr. 2 R/E 1, R/E 2 und R/E 3 ein um zwei weitere Ausgänge erweitertes Netz oder drei parallel arbeitende Netze benötigt. Die Vor- und die Nachteile der Netzstrukturen mit mehreren Ausgängen im Vergleich zu denen mit parallelen Netzen sind bereits in Abschnitt 4.3.5.3 beleuchtet worden. Für beide Ansätze wurde ein optimales Netz mit den zuvor ermittelten Parametereinstellungen generiert. Die Netze mit drei Ausgängen für die drei Problembereiche R/E 1, R/E 2 und R/E 3 führten zu Erkennungsraten der Reißer/Einschnürungen von 71%, 82% und 100%. Währenddessen lag die Erkennungsrate für korrekt eingeordnete Gutteile bei 94%. Die Netze mit einem Ausgang für einen Problembereich ergaben eine Vorhersagequalität von 69%, 87% und 100% für die Qualitätsmängel R/E 1, R/E 2 und R/E 3 und von 93%, 94% und 99% für die Gutteile. Die parallele Verschaltung der Eingangsdaten durch mehrere Netze führte dazu, dass sich die Wahrchein-

lichkeiten einer korrekten Gutteilklassifizierung aller Netze multiplizieren. Damit ergibt die Multiplikation der Einzelwahrscheinlichkeiten eine Gutteilerkennungsrate von lediglich 86%.

Netzstruktur	Gutteile	R/E 1	R/E 2	R/E 3
Vereinfachtes Netz für den Problemereich R/E 1	94%	98%	-	-
Netz mit drei Ausgängen für die Problembereiche R/E 1, R/E 2 & R/E 3	94%	71%	82%	100%
Drei parallel verschaltete Netze mit einem Ausgang pro Problemereich	86%	69%	87%	100%
Netz mit drei Ausgängen für die Problembereiche R/E 1, R/E 2 & R/E 3 (optimiert)	93%	92%	100%	100%

Tabelle 13: Übersicht der Erkennungsraten des Modells mit den verschiedenen Netzstrukturen

Das Ergebnis ist eine deutlich bessere Modellgüte des Netzes mit drei Ausgängen im Vergleich zu parallel geschalteten Netzen. Die Zusammenfassung der Genauigkeiten der entworfenen Neuronalen Netze gibt Tabelle 13 wieder.

Anhand des erweiterten Neuronalen Netzes mit drei Ausgängen wurden weitere Optimierungsmethoden zur Erhöhung der Klassifikationsgüte eingesetzt. Ein erster Ansatz hierfür ist eine gezielte Gewichtung des Einflusses der Verdrängerzylinderkräfte auf die entstehende Netzstruktur. Die Verschiebung der Entscheidungsschwelle für die Klassifikation der Ausgangswerte hinsichtlich der Gut- und der Schlechteile stellt eine weitere Maßnahme dar. Des Weiteren erlaubt die Veränderung der Fehlerflächenberechnung eine Erhöhung der Trainingsmenge bei der programmspezifischen Generierung der Neuronalen Netze mit Matlab®. Letztendlich existiert die Möglichkeit, mehrere Netze zu kombinieren. Die Gutteile in der Trainingsmenge werden auf mehrere Netze aufgeteilt, unterdessen bleiben die Anzahl und die Menge der Schlechteile für alle Netze konstant. Für die Validierung kommen die nicht in den Trainingsmengen enthaltenen Datensätze zum Einsatz. Die Abläufe der Qualitätsvorhersage stellen sich aus einem identischen Eingangsvektor für sämtliche Netze und einem Ausgangsvektor, der den gemittelten Wert aller Netzausgänge ausgibt, zusammen. Mit den vorgestellten Maßnahmen zur Optimierung ließen sich Erkennungsraten für die korrekt eingeordneten Gutteile von 93% und für die Qualitätsmängel in den Problemereichen R/E 1, R/E 2 und R/E 3 von 92%, 100% und 100% realisieren. Höhere Klassifizierungsgüten hätten über größere Datenmengen, vor allem für die Quali-

tätsmängel im Problembereich R/E 1, erzielt werden können. Diese Trainingsmengen standen innerhalb der Projektlaufzeit nicht zur Verfügung.

Die ermittelten Modelle zur Qualitätsvorhersage sind an bereits aufgenommenen Datensätzen getestet worden. Aufgrund der zeitlichen und projektbezogenen Rahmenbedingungen existierte keine Möglichkeit eines Online-Einsatzes im Serienbetrieb der Anlage.

5.4.5 Vorschlag zur Realisierung einer Prozessregelung im Serienbetrieb

Im untersuchten Serienbetrieb bei der Fertigung des Versuchsträgers Nr. 2 wurden mehrere Prozesseingriffe bzw. Gegenmaßnahmen versucht. In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Maßnahmen zur Vermeidung der Reißer/Einschnürungen in den Problembereichen R/E 1, R/E 2 und R/E 3 erläutert. Die Veränderung der Verdrängerzylinderkräfte führte nur teilweise zur Stabilisierung des Prozesses, da keine nachhaltige Verbesserung über die Abpressungen hinweg erreicht werden konnte. Für den Versuchsträger Nr. 2 konnte demzufolge, wie FAASS 2009 ebenfalls konstatiert, lediglich die Funktionalität Qualitätsvorhersage realisiert werden.

An dieser Stelle wird der Vorschlag der Realisierung eines Regelkreises auf Basis Neuronaler Netze für den Versuchsträger Nr. 2 aufgezeigt. Der Regelkreis lässt sich nur umsetzen, falls regelbare Qualitätsmängel mit erfolgreich und nachhaltig eingeleiteten Gegenmaßnahmen auftreten. Der Vorschlag lautet wie folgt: analog zum Schaltbild in Abbildung 61 gestaltet sich die Regelungsstruktur des betrachteten Bauteils. Die Aktorik des Regelkreises für den Versuchsträger Nr. 2 wird von den acht Verdrängerzylindern übernommen. Über eine entsprechende Krafteinstellung wird der Produktionsprozess und damit die Bauteilqualität aktiv beeinflusst. Die Aufgabe des Reglers erfüllt ein Mehrpunktregler. Er schaltet abhängig von der vorhergesagten Qualität mittels des Prozessmodells für den Versuchsträger Nr. 2 in einen anderen Zustand. Der entsprechende Zustand ist direkt mit einer festgelegten Einstellung aller acht Verdränger verbunden. Bedingung hierfür ist die Kenntnis mehrerer Verdrängerzylindereinstellungen, die zur Vermeidung von Reißern/Einschnürungen in den jeweiligen Problembereichen führen. Die Einstellungen sollten bevorzugt aus den Prozesseingriffen direkt an der Anlage abgeleitet werden können. Die vom Regler diktierten Verdrängerzylinderkräfte können entweder als Vorschlag innerhalb der Visualisie-

rung der Pressenanlage dem Pressenbediener angezeigt oder direkt in die speicherprogrammierbare Steuerung der Anlage umgesetzt werden. Letzteres verlangt ein robustes und exaktes Modell der Qualitätsvorhersage, um Fehleingriffe im Serienprozess auszuschließen. Die weiteren Bausteine des Regelkreises bleiben, wie bereits beim Versuchsträger Nr. 1, unverändert.

5.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Ein zweites Anwendungsbeispiel für die Qualifizierung der modellbasierten Prozessregelung, basierend auf Neuronalen Netzen unter Serienbedingungen, wurde erprobt. An einer Großraumsaugertransferpresse wurde das Lösungskonzept des Versuchsträgers Nr. 1 auf den Versuchsträger Nr. 2 übertragen und angepasst. Einleitend wurde das Gesamtsystem, bestehend aus der Großraumsaugertransferpresse, dem Bauteil, dem Werkstoff und dem Werkzeug, beschrieben. Aus der Prozessanalyse wurden die relevanten Einflussgrößen, die Messgrößen und die aufgetretenen Qualitätsmängel vorgestellt. Für die Prozessüberwachung und zum Aufbau einer Datenbasis fand die Integration der Sensorsysteme in die Pressenanlage und in den Serienprozess statt. Die Wirbelstromsensorik zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung wurde dabei in den automatisierten Fertigungsablauf vollständig implementiert. Als signifikante Einflussgrößen zeichneten sich die mechanischen Werkstoffeigenschaften und die äußeren Blechhalterkräfte, wiedergegeben über die Kräfte in den Verdrängerzylindern, aus. Sie bildeten die vollständige Datenbasis für den Aufbau eines Prozessmodells zur Qualitätsvorhersage und zur Prozessregelung. Im Rahmen der Modellgenerierung mittels Neuronaler Netze wurden Korrelationen zwischen den Wirbelstrommesswerten und den Verdrängerzylinderkräften auf der einen Seite sowie der Bauteilqualität auf der anderen Seite aufgestellt. Die erzielten optimalen Prozessmodelle, basierend auf Neuronalen Netzen, lieferten sehr hohe Genauigkeiten bezüglich der Erkennung der Qualitätsmängel in den unterschiedlichen Problembereichen. Die Erkennungsraten für die Gutteile sind mit 94% korrekt klassifizierter Bauteile hinreichend. Auf die Gesamtanzahl der im betrachteten Zeitraum aufgetretenen Gutteile von 18800 aus insgesamt 19183 gefertigter Bauteile bezogen, besteht noch Verbesserungspotenzial. Weiterführende Vorschläge für Optimierungsmaßnahmen der erstellten Prozessmodelle sind, vor allem in Verbindung mit höheren Datenmengen, unterbreitet worden. Die Klassifizierungsgüte der Modelle wurde über im Serienprozess aufgenommene und der Trainingsmenge vorenthaltene Messdaten validiert.

In der Phase der Datenakquisition wurden von den Fertigungsfachkräften die Prozesseingriffe als Reaktion auf die aufgetretenen Qualitätsmängel vorgenommen. Das Fehlen der nachhaltigen Verbesserung aus den getätigten Eingriffen ließ die Ableitung und die Umsetzung von Regelstrategien für den Betrachtungsumfang nicht zu. Als Folge dessen wurden die Regelstrategien für eine modellbasierte Prozessregelung als allgemeiner Konzeptvorschlag vorgestellt.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Fertigung von Karosseriebauteilen in Presswerken der Automobilindustrie steht vor der Herausforderung einer hohen Teileausbringung in kürzester Zeit, verbunden mit einem hohen Qualitätsanspruch. Moderne Pressenanlagen mit vollständig automatisierten Fertigungsabläufen, kurzen Werkzeugwechselzeiten und Ausbringungsraten von bis zu 20 Bauteilen in der Minute helfen dabei, die Teileausbringung zu steigern. Ausgestattet mit umfangreichen und vielschichtigen Sensorsystemen bieten sie Möglichkeiten der Prozesssteuerung und -überwachung bei der Produktion komplexer Bauteilgeometrien. Der vorherrschende sensible Umformprozess repräsentiert das Nadelöhr bei der Fertigung von Karosseriebauteilen. Die Beherrschung dieses Arbeitsschrittes führt zur Minimierung von Ausschusskosten durch die Erfüllung der gesetzten Qualitätsstandards. Mehrere Einflussgrößen und die mit ihnen verbundenen Schwankungen steuern kontinuierlich den Umformprozess und die gefertigte Bauteilqualität. Die Qualitätsmerkmale besitzen in Folge dessen stochastische und stark nichtlineare Verläufe. Die frühzeitige und automatisierte Erkennung der Qualitätstrends ist ein notwendiger Schritt für die Detektierung von Bauteilen mit Qualitätsmängeln und deren Ausschluss aus dem Produktionsprozess. Basierend darauf können, um die Entstehung von Qualitätsmängeln zu vermeiden, Regelungskonzepte für den Umformprozess erarbeitet und in den Serienablauf implementiert werden.

Der Fokus dieser Arbeit lag im Aufbau eines mechatronischen Gesamtsystems zur Prozessüberwachung und Qualitätsbewertung bei der Fertigung von Karosseriebauteilen und zur modellbasierten Prozessregelung. Ausgehend von den relevanten Einflussgrößen des Umformprozesses wurden zusätzliche Sensorsysteme qualifiziert und in Pressenanlagen integriert. Dies schafft die Voraussetzungen für eine messtechnische Erfassung von Einflussgrößen des Umformprozesses und die Zuordnung zur gefertigten Bauteilqualität. Die entstehende Datenbasis stellt die Grundlage für den Entwurf von Prozessmodellen auf Basis Neuronaler Netze dar. Sie bilden die Korrelationszusammenhänge zwischen gemessenen Einflussgrößen und der Teilequalität ab. Im Serienprozess geben die Modelle als Online-Qualitätsvorhersagen die Information über die Qualität des aktuell zu fertigenden Bauteils wieder. Eingebunden in einen Regelkreis kann über geeignete Regelstrategien und Stellglieder der Prozess stabilisiert werden. Als Ergebnis entsteht, basierend auf Neuronalen Netzen, eine automatische, modellbasierte Prozessregelung für die Fertigung von Karosseriebauteilen.

Aufbauend auf den Abschnitten zum Stand der Technik, die die Pressentechnik, die potentiellen Sensorsysteme zur Aufgabenlösung und die Prozessmodellierungsmethoden mittels Neuronaler Netze näher beleuchten, wurde schrittweise das Vorgehen beim Aufbau eines mechatronischen Systems zur Prozessregelung beschrieben. Angesichts der Notwendigkeit des allgemeinen Machbarkeitsnachweises und des gleichzeitig breiten Teile- und Pressenspektrums in heutigen Presswerken wurden zwei Bauteile an zwei unterschiedlichen Pressenanlagen analysiert. Es handelte sich um den Versuchsträger Nr. 1, das Strukturbauteil „Verstärkung B-Säule“ des Audi Q7 (Modelljahr 2007), gefertigt auf einer hydraulischen Pressenstraße, und um den Versuchsträger Nr. 2, das Karosserieaußenteil Seitenwandrahmen rechts des Audi A3 Sportback (Modelljahr 2007), gefertigt auf einer Großraumsaugertransferpresse.

Im Rahmen der Untersuchung des Versuchsträgers Nr. 1 fand die detaillierte Beschreibung der Arbeitsabläufe zur Realisierung der automatischen Prozessregelung statt. Im Anschluss an die Analyse der Prozessumgebung, gegliedert in die betrachtete Presse, das Werkzeug, den Werkstoff und die notwendigen Messgrößen des Prozesses, wurden die geeigneten Sensorsysteme einem Vergleich bezüglich der potentiellen Prozessüberwachungs- und Serienfähigkeit unterzogen. Die Wirbelstromsensorik zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung erlaubte es, innerhalb kürzester Zeit die mechanischen Eigenschaften eines Werkstoffs indirekt zu ermitteln. Über das Induktionsgesetz wurde die Signaländerung zwischen einer Sender- und einer Empfängerspule bei Anwesenheit eines Prüfkörpers (Platine) innerhalb des magnetischen Feldes gemessen. Das Messergebnis wurde den mechanischen Werkstoffkennwerten gegenübergestellt und ein Korrelationsmodell gebildet. Bewertet wurden die Robustheit gegenüber den Serienbedingungen, die Anschaffungs- und die Betriebskosten sowie die Genauigkeit der berechneten Werkstoffkennwerte. Das System der Fa. 3R Technics zeigte sich als effektivstes Gerät zur Lösung der Aufgabenstellung. Weitere Sensoren wurden für die Messung der möglichen Einflussgrößen Blechdicke, Rauheit und Schmierfilm sowie Temperatur des Werkzeugs und des Bauteils beurteilt und ausgewählt. Die Kenntnis der Qualität eines gefertigten Bauteils am Ende des Fertigungsprozesses, am Auslaufband der Pressenanlage, zog die Qualifizierung einer Methode zur Platinenkennzeichnung nach sich. Die Auswahl einer Beschriftungseinheit mittels wasserabwaschbarer Tinte ermöglichte die Nachverfolgung der gefertigten Bauteile über eine Nummernzuweisung.

Für die messtechnische Erfassung des Fertigungsprozesses und zum Aufbau einer Datenbasis wurden die ausgewählten Sensorsysteme in den Serienprozess

integriert. Die Einbauorte der einzelnen Sensoren wurden definiert, die Vorrichtungen konstruiert, die Leitungen verlegt, die Kalibrierungen durchgeführt und die Messzeitpunkte bestimmt. Die informationstechnische Kopplung und die Messdatenverwaltung übernimmt ein Messrechner. Die Bauteilqualität wurde am Ende jeder Abpressung über die markierten Platinen mit den Sensordatensätzen zusammengeführt.

Dem Entwurf des Prozessmodells lag die während acht Abpressungen gewonnene Datenbasis zugrunde. Die Eingangsgrößen des Modells wurden definiert und die Qualitätsmängel bezüglich ihrer Anzahl und ihres Zusammenwirkens bewertet. Im ersten Modellierungsschritt wurde zum Nachweis der Neuronalen Netze als geeignete Methode eine Korrelation zwischen den Wirbelstrommesswerten und den mechanischen Werkstoffkennwerten, z.B. Zugfestigkeit, 0,2%-Streckgrenze etc., aufgestellt. Aufgrund fehlender Zusammenhänge zwischen den zerstörungsfrei gemessenen mechanischen Werkstoffkennwerten, der Teilequalität und der Eliminierung einer Modellungenauigkeit wurden die Wirbelstrommesswerte als Eingangsgrößen zur Modellgenerierung ausgewählt. Im zweiten Schritt wurden die Korrelationsmodelle zwischen den Wirbelstrommesswerten und der Bauteilqualität entworfen. Die Neuronalen Netze wurden mit diversen Trainingsmengen aus den unterschiedlichen Abpressungen erzeugt. Die Modelle wurden stets mit von der Trainingsmenge abweichenden Datensätzen validiert. Das Neuronale Netz mit der höchsten Genauigkeit wurde im Serieneinsatz für eine Online-Qualitätsvorhersage erfolgreich eingesetzt. Für den Versuchsträger Nr. 1 wurden sämtliche Bauteile mit der richtigen Qualität vorhergesagt.

Für die Realisierung einer modellbasierten Prozessregelung wurde das System zur Qualitätsvorhersage zum Regelkreis, bestehend aus einer aktiven Blechhalterdistanz als zusätzlichem Akteur und einem Zweipunktregler, erweitert. Für den Versuchsträger Nr. 1 erreicht die automatische Prozessregelung auf Basis Neuronaler Netze die vollständige Erkennung und Regelung der gerissenen Bauteile und ermöglicht die Reduzierung des Ausschusses.

Das umgesetzte Verfahren wurde auf ein zweites Beispielbauteil, den Versuchsträger Nr. 2, übertragen. Der Aufbau des Gesamtsystems, bestehend aus der Großraumsaugertransferpresse, dem Bauteil und dem Werkstoff, den zu messenden Einflussgrößen und den vorherrschenden Qualitätsmängeln, bildete die Ausgangsbedingung für die Integration der geeigneten Sensorsysteme und deren Inbetriebnahme. Als signifikante Einflussgrößen auf den Umformprozess und auf

die Teilequalität zeichnen sich neben dem vollständig automatisiert eingebundenen Wirbelstromsensor zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung die Sollkräfte der Verdrängerzylinder aus. Acht messtechnisch begleitete Abpressungen lieferten die Datenbasis für den Entwurf eines Prozessmodells auf Basis Neuronaler Netze. Ein optimales Prozessmodell mit den Wirbelstrommesswerten und den Kräften der Verdrängerzylinder als Eingangsgrößen und der verschiedenen Qualitätsmängel als Ausgangsgrößen wurde generiert. Die Qualitätsvorhersage wurde anhand von dem Modell unbekannten Datensätzen vorgenommen. Die Erkennungsraten für Bauteile mit Qualitätsmängeln und für Gutteile erreichten hohe Prozentsätze. Für den Versuchsträger Nr. 2 wurde anschließend ein Konzept für die automatische modellbasierte Prozessregelung vorgestellt.

Die Ergebnisse der Arbeit zeigen ein deutliches Potenzial bei der Realisierung einer modellbasierten Prozessregelung für ein breites Bauteilspektrum einer Pressenanlage auf. Die weiteren Herausforderungen liegen hardwareseitig in der automatisierten Integration der Sensorsysteme zur Prozessüberwachung und der platinengenauen Erfassung der Teilequalität. Damit verbunden ist eine vollständige und kontinuierliche Datenaufzeichnung über die speicherprogrammierbare Steuerung der Anlage oder über autonom arbeitende Messsysteme. Die Qualitätsmängel müssen akkurat dokumentiert und automatisch den Sensordatensätzen zugewiesen werden. Die informationstechnische Kopplung zwischen der Teilequalität und den Datensätzen kann über ein Bedienfeld oder über ein Prüfsystem am Auslaufband der Anlage stattfinden. Des Weiteren führt die Situation der Mehrfachfertigung in modernen Pressenanlagen zu einer Vervielfachung der Sensorkosten für die Erfassung jedes Bauteils. Abhilfe würde an dieser Stelle die Integration der Sensorsysteme, vor allem des Wirbelstromsensors mit seinen hohen Kosten in eine Bandschneideanlage schaffen. Mittels eines einzigen Sensors könnten auf diese Weise mehrere Bauteile und Pressenanlagen abgedeckt werden.

Softwareseitig lässt sich der Ansatz verfolgen, allgemeingültige Prozessmodelle zu finden. Diese könnten in der Lage sein, eine Bauteilgruppe nachzubilden. Ferner könnten sie über eine deutlich kleinere Trainingsmenge bereits für eine Qualitätsvorhersage einsatzfähig sein. Modulare Modelle oder Korrelationsmodelle mit alternativen Algorithmen könnten ebenfalls zum Ziel führen, die Qualitätstrends des umfangreichen Teilespektrums abzudecken.

7 Literaturverzeichnis

ÅSTRÖM & WITTENMARK 1995

Åström, K. J.; Wittenmark, B.: Adaptive control, 2. Aufl., Reading, Mass.: Addison-Wesley 1995. ISBN: 0201558661.

BAUR 2003

Baur, M.: Prozessorientierte Kaskadenplanung im Bereich Strukturplanung Presswerk. Diss. Technische Universität Chemnitz (2003).

BOGON 1998

Bogon, P.: Grundsätzliche Eigenschaften von Mehrstößel-Transferpressen. In: Blech Rohre Profile 45 (1998) 5, S. 46-53.

BILSTEIN ET AL. 2006

Bilstein, W.; Enderle, W.; Moreas, G.; Oppermann, D.; Routschek, T.; Van De Velde, F.: Two Systems for On-Line Oilfilm and Surface Roughness Measurement for Strip Steel Production. Konferenz-Einzelbericht: Steel Rolling Conference. Paris/Frankreich, 19.-21. Juni 2006.

BRAEDEL 2009

Braedel, M.: Optimierung des Werkzeugeinarbeitsprozesses für Karosserieaußenhautbauteile. Diss. Technische Universität München (2009). München: Hieronymus 2009. ISBN: 3-89791-401-8. (utg Forschungsberichte, 51).

BRÄUNLICH 2002

Bräunlich, H.: Blecheinzugsregelung beim Tiefziehen mit Niederhalter. Ein Beitrag zur Erhöhung der Prozessstabilität. Diss. Technische Universität Chemnitz (2002). Zwickau: Verl. Wiss. Scripten 2002. ISBN: 3928921835. (Berichte aus dem IWU, 19).

CALLAN 2003

Callan, R.: Neuronale Netze im Klartext. München: Pearson Studium 2003. ISBN: 382737071X. (Pearson Studium im Klartext).

CECCO ET AL. 1987

Cecco, V. S.; Drunen, G. v.; Sharp, F. L.: Eddy current testing. Columbia, Md.: GP Courseware 1987. ISBN: 0876838905. (AECL, 7523).

DANZBERG 2004

Danzberg, J.: Methodenplanung im Karosseriebau. Veranstaltung vom 08.04.2004, aus der Reihe "Virtuelle Systeme - Umformtechnik". Zürich. Veranstalter: ETH Zürich 08.04.2004.

DEMUTH ET AL. 1992-2009

Demuth, H.; Beale, M.; Hagan, M.: Neural Network Toolbox 6. User's Guide. The MathWorks, Inc. 1992-2009.

DICKERSBACH 1998

Dickersbach, J. T.: Einsatz Neuronaler Netze zur Qualitätssicherung beim Widerstandspunktschweißen. Diss. RWTH Aachen (1998). Aachen: Shaker 1998. ISBN: 3-8265-3964-8. (Aachener Berichte Fügetechnik, 98,5).

DIN 54140

DIN 54140, Teil 3: Zerstörungsfreie Prüfung – Induktive Verfahren – Darstellung und allgemeine Eigenschaften von Spulensystemen. Berlin: Beuth 1989.

DITTMAR & PFEIFFER 2004

Dittmar, R.; Pfeiffer, B.-M.: Modellbasierte prädiktive Regelung. Eine Einführung für Ingenieure. München: Oldenbourg 2004. ISBN: 9783486275230.

DOBMANN ET AL. 2004

Dobmann, G.; Kern, R.; Wolter, B.: Mechanical property determination of heavy steel plates and cold rolled steel sheets by micro-magnetic NDT. In: World Conference on Nondestructive Testing (WCNDT). Montreal/Canada, 16, August 30 - September 3, 2004.

DOEGE & BEHRENS 2007

Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik. Grundlagen, Technologien, Maschinen. Berlin: Springer 2007. ISBN: 3-54023-441-8. (VDI).

DREYER 1997

Dreyer, J.: Zur Dickenmessung von Stahlblech im Fertigungsprozess. Diss. RWTH Aachen 1997.

EN 10002-1

EN 10002-1: Metallische Werkstoffe – Zugversuch – Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur. Berlin: Beuth 2001.

FAASS 2009

Faass, I.: Prozessregelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken. Diss. Technische Universität München (2009). München: Hieronymus 2009. ISBN: 3-89791-398-1. (utg Forschungsberichte, 49).

FORSTMANN 2000

Forstmann, U.: Induktive Wegsensoren zur Überwachung und Regelung des Blecheinzugs beim Tiefziehen. Diss. Technische Universität Berlin (2000). Berlin: IPK Fraunhofer Institut Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik 2000. ISBN: 381675547X. (Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin).

GIRSCHEWSKI 2004

Girschewski, B.: Optimierung des Umformprozesses ziehkritischer Blechteile. Diss. Technische Universität München (2004). München: Hieronymus 2004. ISBN: 3-89791-340-2. (utg Forschungsberichte, 30).

GÖBBELS & THEINER 1985

Göbbels, K; Theiner, W.: Zerstörungsfreie Analyse der Gefüge- und Spannungszustände in metallischen Werkstoffen. In: Materialprüfung 27 (1985) 3, S. 64-69.

GRIESBACH 2000

Griesbach, B.: In-Prozess Stoffflussmessung zur Analyse und Regelung von Tiefziehvorgängen. Diss. Universität Hannover (2000).

HENRIQUES ET AL. 2002

Henriques, J.; Gil, P.; Dourado, A.; Duarte-Ramos, H.: Non-linear Multivariable Predictive Control: Neural versus First Principle Modelling Approach. In: IASTED Control and Applications. Cancun/Mexico, May 20-22, 2002.

HOFFMANN 1991

Hoffmann, H.: Vergleichende Untersuchungen über hydraulische und pneumatische Ziehrichtungen. Konferenz-Einzelbericht. In: Ziehrichtungen ein-fachwirkender Pressen für die Blechumformung, Stuttgart, 1991, S. 1-20.

HOFFMANN ET AL. 2007

Hoffmann, H.; Zäh, M. F.; Faass, I.; Mork, R.; Golle, M.; Griesbach, B.; Kerschner, M.: Automatic Process Control in Press Shops. Konferenz-Einzelbericht: Sheet Metal 2007, Palermo, 2007. In: Key Engineering Materials 344 (2007), S. 881-888.

HUTTERER 2005

Hutterer, A.: Entwicklung prozessüberwachender Regelkreise für flexible Formgebungsprozesse. Diss. Universität Erlangen-Nürnberg (2004). Bamberg: Meisenbach 2005. ISBN: 3875252128. (Bericht aus dem Lehrstuhl für Fertigungstechnologie, LFT, 152).

JÖRGL 1995

Jörgl, H. P.: Repetitorium Regelungstechnik. Bd. 1. 2. Aufl. Wien, München: Oldenbourg 1995. ISBN: 3486233246.

KRAUTKRÄMER 1986

Krautkrämer, J.; Krautkrämer, H.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall. Berlin: Springer 1986. ISBN: 3540157549.

KURZWEIL ET AL. 2009

Kurzweil, P.; Frenzel, B.; Gebhard, F.: Physik Formelsammlung. Mit Erläuterungen und Beispielen aus der Praxis für Ingenieure und Naturwissenschaftler. 2., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2009. ISBN: 9783834808752.

LEE 1995

Lee, Y.-H.: Anwendung der Fuzzy Control in der Umformtechnik. Diss. RWTH Aachen (1994), Düsseldorf: Stahleisen 1995. (Umformtechnische Schriften, 61).

LUNZE 2004

Lunze, J.: Regelungstechnik. Bd. 1. 4., erw. und überarb. Aufl. Berlin: Springer 2004. ISBN: 3540207422. (Springer-Lehrbuch).

MACKAY 1992

MacKay, D. J. C.: A practical Bayesian framework for backpropagation networks. In: Neural Computation 4 (1992) 3, S. 415-472.

MILLER 1995

Miller, W. T.: Neural networks for control. 1. MIT Press paperback ed. Cambridge, Mass.: MIT Press 1995. ISBN: 0262132613. (Neural network modelling and connectionism).

NARENDRA & ANNASWAMY 2005

Narendra, K. S.; Annaswamy, A. M.: Stable Adaptive Systems: Dover Publications 2005. ISBN: 0486442268. (Dover Books on Engineering Series).

NARENDRA & PARTHASARATHY 1990

Narendra, K. S.; Parthasarathy, K.: Identification and control of dynamical systems using Neuronal networks. In: Proceedings of the IEEE First Annual International Conference on Neuronal Networks 1 (1990) 1, S. 4-27.

PATTERSON 1997

Patterson, D. W.: Künstliche Neuronale Netze. Das Lehrbuch. 2. Aufl. Haar bei München: Prentice Hall 1997. ISBN: 3827295319.

prEN 10336

prEN 10336: Kontinuierlich schmelztauchveredeltes und elektrolytisch veredeltes Band und Blech aus Mehrphasenstählen zum Kaltumformen – Technische Lieferbedingungen 2005.

RAU 2003

Rau, M.: Nichtlineare modellbasierte prädiktive Regelung auf Basis lernfähiger Zustandsraummodelle. Diss. Technische Universität München (2003).

REIL 1994

Reil, G.: Prozessregelung numerisch gesteuerter Umformmaschinen mit Fuzzy Logic. Diss. Universität Dortmund (1993). Aachen: Shaker 1994. ISBN: 3861118629. (Berichte aus der Fertigungstechnik).

REISSNER 2009

Reissner, J.: Umformtechnik multimedial. Werkstoffverhalten, Werkstückversagen, Werkzeuge, Maschinen. München: Hanser 2009. ISBN: 9783446418400.

RITTMEIER 2007

Rittmeier, S.: Systemunterstützte Umformung. Diss. Technische Universität Dresden (2007). 1. Aufl. Göttingen: Cuvillier 2007. ISBN: 3867274193.

ROJAS 1996

Rojas, R.: Theorie der Neuronalen Netze. Eine systematische Einführung. 4., korrigierter Nachdr. Berlin: Springer 1996. ISBN: 3540563539. (Springer-Lehrbuch).

RUZOVIC 2004

Ruzovic, M.: Die zerstörungsfreie Ermittlung von genauen Zugversuchsdaten mit dem Wirbelstromverfahren. Diss. ETH Zürich (2004). (Diss. ETH, Nr. 15822).

SHELLER 1993

Scheller, W.: Einsatz künstlicher Neuronaler Netze in Schweißkopfführungssystemen für das Metallschutzgasschweißen. Diss. RWTH Aachen. Aachen: Shaker 1993. ISBN: 3-86111-836 X.

SCHMIDT 1994

Schmidt, G.: Grundlagen der Regelungstechnik. 2., überarb. u. erw. Aufl., 3., berichtigter Nachdr. Berlin: Springer 1994. ISBN: 0387171126. (Hochschultext).

SCHMIDT 2007

Schmidt, G.: Skriptum Computational Intelligence. Lehrstuhl für Steuerungs- und Regelungstechnik: Technische Universität München 2007.

SCHRÖDER 2007

Schröder, D.: Elektrische Antriebe - Grundlagen. Mit durchgerechneten Übungs- und Prüfungsaufgaben. 3., erw. Aufl. Berlin: Springer Berlin 2007. ISBN: 9783540727644. (Springer-Lehrbuch).

SCHRÜFER 2007

Schrüfer, E.; Reindl, L. M.: Elektrische Messtechnik. Messung elektrischer und nichtelektrischer Größen ; mit 41 Tabellen. 9., aktualisierte Aufl. München: Hanser 2007. ISBN: 3-446-40904-0.

SCHULER 1996

Schuler GmbH: Handbuch der Umformtechnik. Berlin: Springer 1996. ISBN: 3-54061-099-5.

SCHWIND 1998

Schwind, M.: Zerstörungsfreie Ermittlung mechanischer Eigenschaften von Feinblechen mit dem Wirbelstromverfahren. Diss. Universität Erlangen-Nürnberg (1998). Bamberg: Meisenbach 1998. ISBN: 3-87525-102-4.

STÖCKER 2007

Stöcker, H.: Taschenbuch der Physik. Formeln, Tabellen, Übersichten. Nachdr. der 5., korrigierten Aufl. Frankfurt am Main: Deutsch 2007. ISBN: 3817117213.

STORM 2007

Storm, R.: Wahrscheinlichkeitsrechnung, mathematische Statistik und statistische Qualitätskontrolle. 12., verb. Aufl. Leipzig: Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verlag 2007.

STURM 2000

Sturm, M.: Neuronale Netze zur Modellbildung in der Regelungstechnik. Diss. Technische Universität München, Fakultät für Informatik (2000). Netzpublikation 2000.

TEUTRINE & MÜLLER 2000

Teutrine, J.; Müller, M.: Ziehkissenregelung mit konstanter Regelgüte. München: Carl Hanser 2000. (WB).

TSCHÄTSCH & DIETRICH 2008

Tschätsch, H.; Dietrich, J.: Praxis der Umformtechnik. Arbeitsverfahren, Maschinen, Werkzeuge. 9., überarb. und aktualisierte Aufl. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2008. ISBN: 3-83480-324-5.

UMFORMTECHNIK ERFURT 2003

Umformtechnik Erfurt: Umformtechnik Erfurt: Mehrständertransferpresse MSTP 7300. Schulungsunterlagen für die Audi AG. Ingolstadt 2003.

VOGL ET AL. 1988

Vogl, T. P.; Mangis, J. K.; Rigler, A. K.; Zink, W. T.; Alkon, D. L.: Accelerating the convergence of the backpropagation method. In: Biological Cybernetics 59 (1988) 4/5, Berlin/Heidelberg: Springer 1988, S. 257-263.

ZÄH ET AL. 2005

Zäh, M. F.; Lindemann, U.; Heinzl, J.: Qualitätsmanagement – Qualität im Produktlebenszyklus. Vorlesungsskript. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München (2005).

ZELL 2000

Zell, A.: Simulation Neuronaler Netze. 3., unveränd. Nachdr. München: Oldenbourg 2000. ISBN: 3486243500.

ZIEGERT & KALLE 1994

Ziegert, J. C.; Kalle, P.: Error compensation in machine tools: a neural network approach. In: Journal of Intelligent Manufacturing 5 (1994) 3, Niederlande: Springer 1994, S. 143-151.

8 Anhang

8.1 Ergänzende Abbildungen und Tabellen

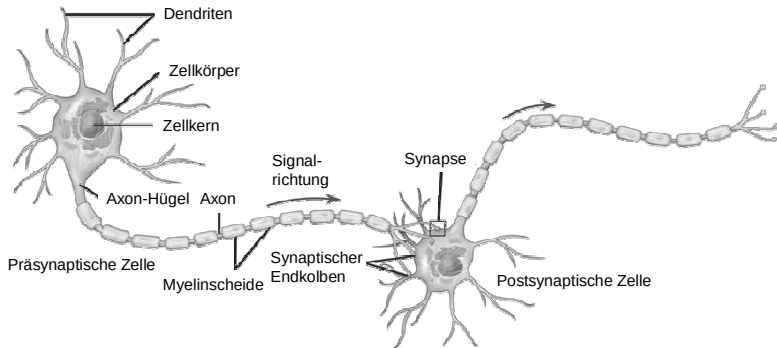


Abbildung 70: Nervenzellen eines biologischen Neuronalen Netzes
(GALLAN 2009)

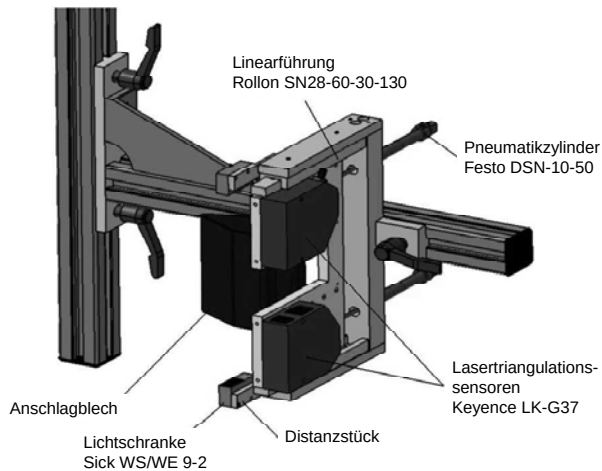


Abbildung 71: 3D-CAD-Modell der Vorrichtung zur Blechdickenmessung im Serienbetrieb

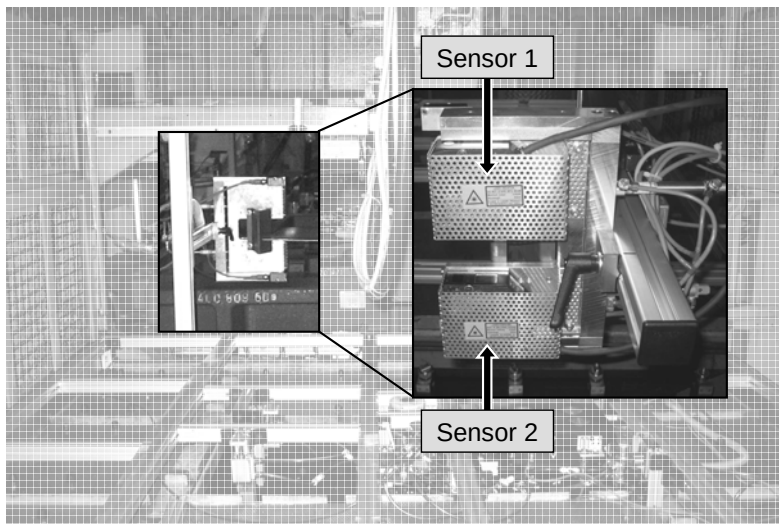


Abbildung 72: Berührungslose Blechdickenmessung mittels Lasertriangulationsverfahren in der untersuchten Pressenstraße

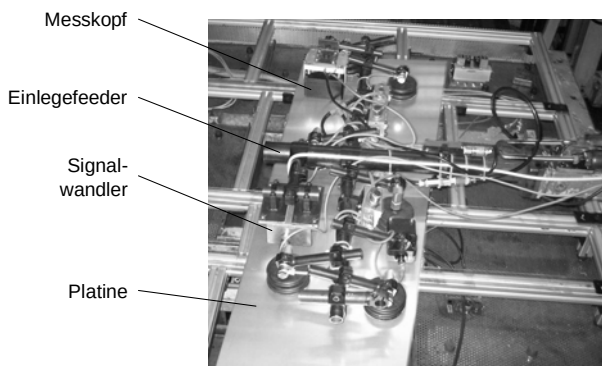


Abbildung 73: Einlegefeeder mit integriertem Sensor zur Rauheits- und Schmierfilmmessung

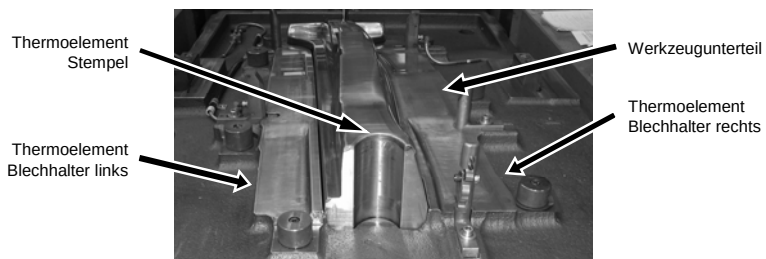


Abbildung 74: Messorte der Thermoelemente im untersuchten Werkzeug

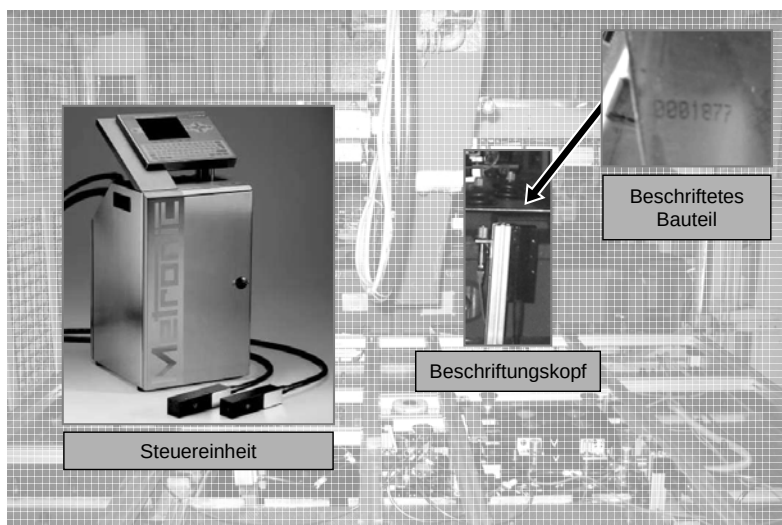


Abbildung 75: Integration der kontinuierlichen Platinennummerierung mit waserabwaschbarer Tinte in die untersuchte Pressenstraße

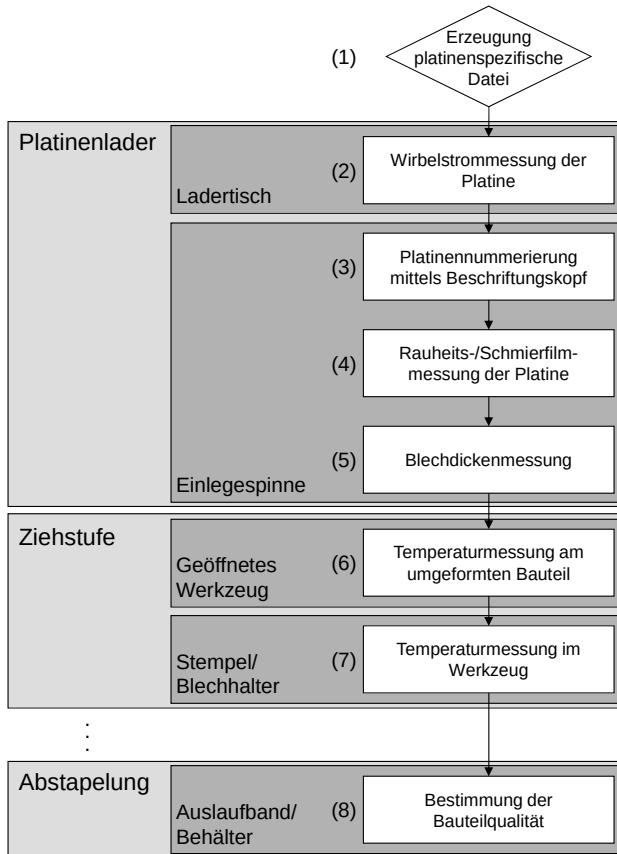


Abbildung 76: Ablaufplan der Datenaufnahme im Serienbetrieb

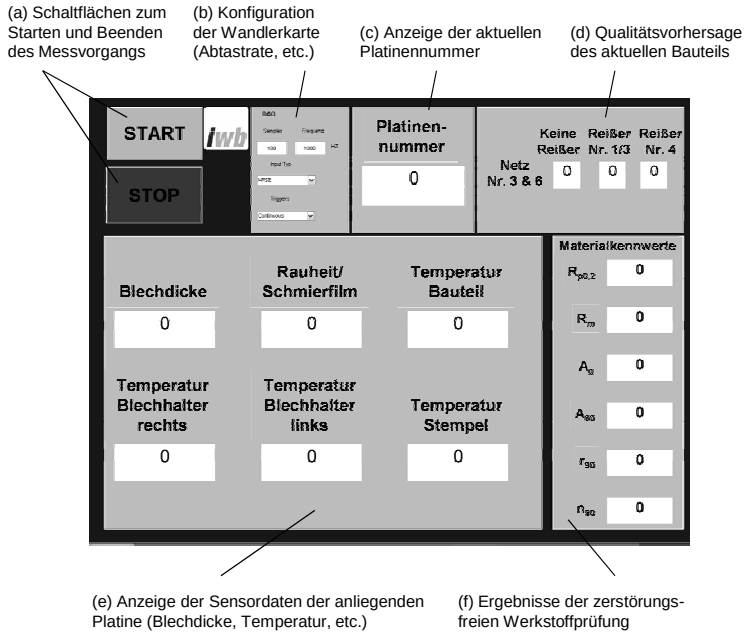


Abbildung 77: Bedien- und Visualisierungsoberfläche für die Datenerfassung

Messgröße	Sensor	Genauigkeit
R_m [N/mm ²]	Wirbelstromsensor, Fa. 3R Technics GmbH	±2,5%
$R_{p0,2}$ [N/mm ²]	Wirbelstromsensor, Fa. 3R Technics GmbH	±4%
A_g [%]	Wirbelstromsensor, Fa. 3R Technics GmbH	±2
A_{80} [%]	Wirbelstromsensor, Fa. 3R Technics GmbH	±3
n_{90} [-]	Wirbelstromsensor, Fa. 3R Technics GmbH	±0,02
r_{90} [-]	Wirbelstromsensor, Fa. 3R Technics GmbH	±0,1
Wirbelstrommesswerte [-]	Wirbelstromsensor, Fa. 3R Technics GmbH	-
Blechdicke [mm]	Lasertriangulation, Fa. Keyence GmbH	±0,008
Rauheit/Schmierfilm [-]	Labormessgerät, Fa. 3R Technics GmbH	-
Stempeltemperatur [°C]	Thermoelement Typ K + Messwertumformer Typ JKT, Fa. RS Components GmbH	±1°C
Blechhaltertemperatur [°C]	Thermoelement Typ K + Messwertumformer Typ JKT, Fa. RS Components GmbH	±1°C
Ziehteiltemperatur [°C]	Infrarotthermometer CTfast, Fa. Optris GmbH	±1°C

Tabelle 14: Zusammenfassung der eingesetzten Sensorsysteme und der Messgenauigkeiten

Qualitätsvorgabe		Störgrößen	
Geforderte Qualitätsmerkmale der Teilequalität Keine Reißer Nr. 1 & 3 Keine Reißer Nr. 2, 4		Platinenposition Blechdicke Oberfläche Schmierung Zugfestigkeit Streckgrenze Gleichmaßdehnung Bruchdehnung Senkrechte Anisotropie Verfestigungsexponent	
Sensorik		Aktorik	
Wirbelstrommessung zur Ermittlung mechanischer Werkstoffeigenschaften Blechdickenmessung Rauheits- und Schmierfilmmessung Temperaturmessung am Bauteil Temperaturmessung am Werkzeug Platinennummerierung		Aktive Blechhalterdistanzierung Aktivierung und Höhenabstimmung über zwei Positionen: Grundstellung (nicht aktiviert) Höhe = -0,2 mm Im Eingriff Höhe = +1,0 mm	
Regelstrecke		Prozessmodell	
Pressenstraße Laderbereich Stufe 1 - Ziehstufe Umformvorgang Stufe 2 - 6 Auslaufband		Basierend auf Neuronalen Netzen Datenbasis: Abpressungen 1 bis 6 Trainingsdaten für Qualitätsvorhersage und Regelung: Datensätze der Abpressungen Nr. 3 und Nr. 6	
Regler			
Schaltender Zweipunktregler			

Tabelle 15: Bausteine des Regelkreises und deren direkter Bezug auf die Prozessregelung des Versuchsträgers Nr. 1

Parameter	Standardeinstellungen
Trainingsdaten	
Eingangsgrößen	24 Amplituden und 24 Phasen der Messfrequenzen
Zahl der Datensätze	8 Abpressungen mit jeweils zwischen 1500 und 3000 Bauteilen
Gutteile pro Schlechtteil	100
Aufbereitung der Daten	Projektion der Rohdaten auf das Intervall [-1; 1]
Ausgangsgrößen	Qualität der Bauteile
Training	
Trainingsalgorithmus	Resilient-Backpropagation
Abbruchkriterium	Mittlere quadratische Abweichung + definierte Gütefunktion
Netztopologie	
Zahl der (versteckten) Schichten	2
Zahl der Neuronen pro Schicht	10, 5
Aktivierungsfunktion	Hyperbolische Tangenssigmoidfunktion

Tabelle 16: Starteinstellungen für identifizierte Parameter beim Entwurf Neuronaler Netze für den Versuchsträger Nr. 2

8.2 Genannte Firmen

3R Technics GmbH

Technoparkstrasse 1
8005 Zürich
<<http://www.3r-technics.com>>

Audi AG

85045 Ingolstadt
<<http://www.audi.de>>

AMEPA GmbH Angewandte Messtechnik und Prozessautomatisierung GmbH

Karl-Carstens-Str. 12
52146 Wuerselen-Aachen
<<http://www.amepa.de>>

Festo AG & Co. KG

Ruiter Straße 82
73734 Esslingen-Berkheim
<<http://www.festo.com>>

Fraunhofer-Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP)

Campus E3 1
66123 Saarbrücken
<<http://www.izfp.fraunhofer.de>>

Institut Dr. Förster GmbH & Co. KG

In Laisen 70
72766 Reutlingen
<<http://www.foerstergroup.de>>

Keyence Deutschland GmbH

Zentrale
Siemensstraße 1
63263 Neu-Isenburg, F.R.G.
<<http://www.keyence.de>>

KBA-Metronic AG

Benzstraße 11
D-97209 Veitshöchheim
<<http://www.kba-metronic.com>>

Müller Weingarten AG

Schussenstraße 11
88250 Weingarten
<<http://www.schulergroup.com>>

National Instruments Germany GmbH

Ganghoferstraße 70 b
80339 München
<<http://www.ni.com>>

*NoKra Optische Prüftechnik
und Automation GmbH*

Max-Planck-Straße 12
52499 Baesweiler
<<http://www.nokra.de>>

Optris GmbH

Ferdinand-Buisson-Str. 14
13127 Berlin
<<http://www.optris.de>>

Oriental Motor (Europa) GmbH

Schiessstraße 74
40549 Düsseldorf
<<http://www.orientalmotor.de>>

RS Components GmbH

Hessenring 13 b
64546 Mörfelden-Walldorf
<<http://de.rs-online.com>>

*WIKA Alexander Wiegand SE &
Co. KG*

Alexander-Wiegand-Straße 30
63911 Klingenberg
<<http://de-de.wika.de>>

8.3 Genutzte Softwareprodukte

Labview® 8.0

Grafische Programmierumgebung zur Entwicklung von Mess-, Prüf-, Steuer- und Regelsystemen

National Instruments Corporation

Matlab® 7.5.0

Software zur Lösung mathematischer Probleme und zur grafischen Darstellung der Ergebnisse (CACE)

The MathWorks, Inc.

Microsoft Excel 2002®

Tabellenkalkulation

Microsoft Corporation

SPS-Analyzer pro 5

Software zur Logikanalyse und Registrierung von Messgrößen an SPS-gesteuerten Anlagen

AUTEM GmbH

iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- 1 *Streitinger, E.*
Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel
1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3
- 2 *Fuchsberger, A.*
Untersuchung der spannenden Bearbeitung von Knochen
1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1
- 3 *Maier, C.*
Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern
1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X
- 4 *Summer, H.*
Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen
1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8
- 5 *Simon, W.*
Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen
1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9
- 6 *Büchs, S.*
Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung
1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7
- 7 *Hunzinger, I.*
Schneiderodierte Oberflächen
1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5
- 8 *Pilland, U.*
Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen
1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2
- 9 *Barthelmeß, P.*
Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung
1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2
- 10 *Reithofer, N.*
Nutzungssicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen
1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6
- 11 *Diess, H.*
Rechnerunterstützte Entwicklung flexibler automatisierter Montageprozesse
1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5
- 12 *Reinhart, G.*
Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze
1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1
- 13 *Bürstner, H.*
Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion
1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6
- 14 *Groha, A.*
Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme
1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8
- 15 *Riese, K.*
Klipsmontage mit Industrierobotern
1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6
- 16 *Lutz, P.*
Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung
1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3
- 17 *Klippel, C.*
Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems
1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0
- 18 *Rascher, R.*
Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung
1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9
- 19 *Heusler, H.-J.*
Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme
1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5
- 20 *Kirchknopf, P.*
Ermittlung modaler Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen
1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3
- 21 *Sauerer, Ch.*
Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen
1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1
- 22 *Karstedt, K.*
Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigungsautomatisierung
1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7
- 23 *Peiker, St.*
Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems
1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0
- 24 *Schugmann, R.*
Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage
1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0
- 25 *Wirba, P.*
Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik
1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X
- 26 *Eibelshäuser, P.*
Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung
1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7
- 27 *Prasch, J.*
Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie
1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2

- 28 *Teich, K.*
Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 *Pfarr, W.*
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 *Tauber, A.*
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 *Jäger, A.*
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 *Hartberger, H.*
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 *Tuczek, H.*
Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 *Fischbacher, J.*
Planungsstrategien zur stömungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 *Moser, O.*
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 *Naber, H.*
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 *Kupec, Th.*
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 *Maulhardt, U.*
Dynamisches Verhalten von Kreissägen
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 *Gatz, R.*
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 *Koepfer, Th.*
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 *Schmidt, M.*
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 *Burger, C.*
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 *Hoßmann, J.*
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstabilen Bauteilen
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 *Petry, M.*
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmbaukastens für robotergeführte Klebprozesse
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 *Schönecker, W.*
Integrierte Diagnose in Produktionszellen
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 *Bick, W.*
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 *Gebauer, L.*
Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 *Schröder, N.*
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 *Wiesbacher, J.*
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 *Garnich, F.*
Laserbearbeitung mit Robotern
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 *Eubert, P.*
Digitale Zustandsregelung elektrischer Vorschubantriebe
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 *Gleas, W.*
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 *Helml, H.J.*
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 *Lang, Ch.*
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 *Schuster, G.*
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55803-6
- 56 *Bomm, H.*
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitioncontrolling komplexer Produktionssysteme
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 *Wendt, A.*
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 *Hansmaier, H.*
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 *Dilling, U.*
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayer, R.*
Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von
Zubringeeinrichtungen
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*
Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer
Zellenrechnersoftware
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stetter, R.*
Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur
Effizienzsteigerung des Industrieroboteinsatzes
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*
Robotersysteme zur förderbandsynchronen Montage
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*
Simulation des Schwingungsverhaltens spanender
Werkzeugmaschinen
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*
Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-
Layoutoptimierung
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummetsteiner, G.*
3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur
Planung manueller Montagesysteme
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelman, F.*
Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen
Automatisierung von Produktionssystemen
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*
Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-
Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*
Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*
Automatische Inbetriebnahme
geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*
Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von
Produktionssystemen
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*
Rechnergestütztes Projektinformations- und
Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*
Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur
Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*
Verfahren zur simulationsgestützten
Produktionsregelung in der Einzel- und
Kleinserienproduktion
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*
Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*
Das integrierte Betriebsmittelwesen - Baustein einer
flexiblen Fertigung
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Rath, P.*
Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in
der Arbeitsvorbereitung
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*
Strömungstechnische Optimierung von
Produktionssystemen durch Simulation
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zah, M. F.*
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwenzer, N.*
Technologisches Prozeßmodell für die
Kugelschleifbearbeitung
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*
Konstruktionsbegleitende Kalkulation von
Werkzeugmaschinen
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*
Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen
Fertigungszellen
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*
Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der
Hartbearbeitung
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*
Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in
flexiblen Produktionszellen
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*
Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung
und logistisches Störungsmanagement
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*
Systematische Planung anwendungsspezifischer
Materialflußsteuerungen
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*
Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in
Montageanlagen
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58989-6
- 88 *Linner, St.*
Konzept einer integrierten Produktentwicklung
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*
Integrierte Planung von Informationssystemen für
rechnergestützte Produktionssysteme
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deutsche, U.*
Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung
in mittelständischen Unternehmen
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieterle, A.*
Recyclingintegrierte Produktentwicklung
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*
Personalorientierte Montageplanung für komplexe und variantenreiche Produkte
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*
Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen · Gestellstrukturen
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*
Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*
Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*
Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestrukturen in Werkzeugmaschinen
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*
Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*
Autonome Fertigungszellen · Gestaltung, Steuerung und integrierte Störungsbehandlung
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moctezuma de la Barrera, J.L.*
Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*
Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*
Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischelsrieder, K.*
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*
Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen variantenreichen Kleinprodukten
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*
Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*
Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wagner, M.*
Steuerungintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*
Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krönert, U.*
Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitssuche und Standardisierung
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*
Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kuba, R.*
Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*
Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*
Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*
Produktionsregelung · ein modularer, modellbasierter Ansatz
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*
Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindermaier, R.*
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehrer, J.*
Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*
Leitfaden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*
Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Pflob, E.*
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen
1999 · 69 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*
Erfahrungsgeleitete Planung von Laseranlagen
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

- 122 Schneider, Burghard
Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd
Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Moßmer, Helmut E.
Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter
Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen
Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelman, Doris
Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf
Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.
Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto
Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael
Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.
Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbünden
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut
Sichere Prognosen für die Produktionsptimierung mittels stochastischer Modelle
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan
Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can
Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan
Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken
2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.
Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung
2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra
Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen
2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander
Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen
2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.
Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken
2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprengel, Andreas
Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung
2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas
Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion
2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf
Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen
2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0
- 144 Schneider, Christian
Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion
2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian
Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen
2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich
Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen
2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof
Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss
2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank
Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen
2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Höhn, Michael
Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme
2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Bohl, Jörn
Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung
2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert
Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben
2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X
- 152 Stephan Dürrschmidt
Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion
2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6
- 153 Bernhard Eich
Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung
2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7

- 154 Wolfgang Rudorfer
Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke
 2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier
Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe
 2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak
Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen
 2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner
Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen
 2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz
Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung
 2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald
Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung
 2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner
Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen
 2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller
Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen
 2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer
Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen
 2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fahrer
Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses
 2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner
Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler
 2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte
Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik
 2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weissenberger
Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess
 2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob
Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik
 2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer
System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen
 2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel
Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen
 2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7
- 170 Paul Jens Peter Ross
Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung
 2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun
Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess
 2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6

- 172 Florian von der Hagen
Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen
 2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer
Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe
 2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen
Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme
 2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton
Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsender Montagesysteme
 2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser
Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke
 2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breiting
Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen
 2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling
Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling
 2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch
Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine
 2003 · 190 Seiten · 87 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein
Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems
 2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlek
Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen
 2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr
Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung
 2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber
Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken
 2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt
Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern
 2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4
- 185 Tim Angerer
Effizienzsteigerung in der automatisierten Montage durch aktive Nutzung mechatronischer Produktkomponenten
 2004 · 180 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0336-7
- 186 Alexander Krüger
Planung und Kapazitätsabstimmung stückzahlflexibler Montagesysteme
 2004 · 197 Seiten · 83 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0371-5
- 187 Matthias Meindl
Beitrag zur Entwicklung generativer Fertigungsverfahren für das Rapid Manufacturing
 2005 · 222 Seiten · 97 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0465-7
- 188 Thomas Fusch
Betriebsbegleitende Prozessplanung in der Montage mit Hilfe der Virtuellen Produktion am Beispiel der Automobilindustrie
 2005 · 190 Seiten · 99 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0467-3

- 189 Thomas Mosandl
Qualitätssteigerung bei automatisiertem Klebstoffauftrag durch den Einsatz optischer Konturfolgesysteme
 2005 · 182 Seiten · 58 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0471-1
- 190 Christian Patron
Konzept für den Einsatz von Augmented Reality in der Montageplanung
 2005 · 150 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0474-6
- 191 Robert Cisek
Planung und Bewertung von Rekonfigurationsprozessen in Produktionssystemen
 2005 · 200 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0475-4
- 192 Florian Auer
Methode zur Simulation des Laserstrahlschweißens unter Berücksichtigung der Ergebnisse vorangegangener Umformsimulationen
 2005 · 160 Seiten · 65 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0485-1
- 193 Carsten Selke
Entwicklung von Methoden zur automatischen Simulationsmodellgenerierung
 2005 · 137 Seiten · 53 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0495-9
- 194 Markus Seefried
Simulation des Prozessschrittes der Wärmebehandlung beim Indirekten-Metall-Lasersintern
 2005 · 216 Seiten · 82 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0503-3
- 195 Wolfgang Wagner
Fabrikplanung für die standortübergreifende Kostensenkung bei marktnaher Produktion
 2006 · 208 Seiten · 43 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0586-6
- 196 Christopher Ulrich
Erhöhung des Nutzungsgrades von Laserstrahlquellen durch Mehrfach-Anwendungen
 2006 · 178 Seiten · 74 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0590-4
- 197 Johann Hartl
Prozessgaseinfluss beim Schweißen mit Hochleistungsdiodenlasern
 2006 · 140 Seiten · 55 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0611-0
- 198 Bernd Hartmann
Die Bestimmung des Personalbedarfs für den Materialfluss in Abhängigkeit von Produktionsfläche und -menge
 2006 · 208 Seiten · 105 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0615-3
- 199 Michael Schilp
Auslegung und Gestaltung von Werkzeugen zum berührungslosen Greifen kleiner Bauteile in der Mikromontage
 2006 · 130 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0631-5
- 200 Florian Manfred Grätz
Teilautomatische Generierung von Stromlauf- und Fluidplänen für mechatronische Systeme
 2006 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0643-9
- 201 Dieter Eireiner
Prozessmodelle zur statischen Auslegung von Anlagen für das Friction Stir Welding
 2006 · 214 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0650-1
- 202 Gerhard Volkwein
Konzept zur effizienten Bereitstellung von Steuerungsfunktionalität für die NC-Simulation
 2007 · 192 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0668-9
- 203 Sven Roeren
Komplexitätsvariable Einflussgrößen für die bauteilbezogene Struktursimulation thermischer Fertigungsprozesse
 2007 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0680-1
- 204 Henning Rudolf
Wissensbasierte Montageplanung in der Digitalen Fabrik am Beispiel der Automobilindustrie
 2007 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0697-9
- 205 Stella Clarke-Griebsch
Overcoming the Network Problem in Telepresence Systems with Prediction and Inertia
 2007 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0701-3
- 206 Michael Ehrenstraßer
Sensoreinsatz in der telepräsenten Mikromontage
 2008 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0743-3

- 207 Rainer Schack
Methodik zur bewertungsorientierten Skalierung der Digitalen Fabrik
2008 · 248 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0748-8
- 208 Wolfgang Sudhoff
Methodik zur Bewertung standortübergreifender Mobilität in der Produktion
2008 · 276 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0749-5
- 209 Stefan Müller
Methodik für die entwicklungs- und planungsbegleitende Generierung und Bewertung von Produktionsalternativen
2008 · 240 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0750-1
- 210 Ulrich Kohler
Methodik zur kontinuierlichen und kostenorientierten Planung produktionstechnischer Systeme
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0753-2
- 211 Klaus Schlickerrieder
Methodik zur Prozessoptimierung beim automatisierten elastischen Kleben großflächiger Bauteile
2008 · 204 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0776-1
- 212 Niklas Möller
Bestimmung der Wirtschaftlichkeit wandlungsfähiger Produktionssysteme
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0778-5
- 213 Daniel Siedl
Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen während Verfabrbewegungen
2008 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0779-2
- 214 Dirk Ansoerge
Auftragsabwicklung in heterogenen Produktionsstrukturen mit spezifischen Planungsfreiräumen
2008 · 146 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0785-3
- 215 Georg Wunsch
Methoden für die virtuelle Inbetriebnahme automatisierter Produktionssysteme
2008 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0795-2
- 216 Thomas Oertli
Strukturmechanische Berechnung und Regelungssimulation von Werkzeugmaschinen mit elektromechanischen Vorschubantrieben
2008 · 194 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0798-3
- 217 Bernd Petzold
Entwicklung eines Operatorarbeitsplatzes für die telepräsenste Mikromontage
2008 · 234 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0805-8
- 218 Loucas Papadakis
Simulation of the Structural Effects of Welded Frame Assemblies in Manufacturing Process Chains
2008 · 260 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0813-3
- 219 Mathias Mörtl
Ressourcenplanung in der variantenreichen Fertigung
2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0820-1
- 220 Sebastian Weig
Konzept eines integrierten Risikomanagements für die Ablauf- und Strukturgestaltung in Fabrikplanungsprojekten
2008 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0823-2
- 221 Tobias Hornfeck
Laserstrahlbiegen komplexer Aluminiumstrukturen für Anwendungen in der Luftfahrtindustrie
2008 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0826-3
- 222 Hans Egermeier
Entwicklung eines Virtual-Reality-Systems für die Montagesimulation mit kraftrückkoppelnden Handschuhen
2008 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0833-1
- 223 Matthäus Sigl
Ein Beitrag zur Entwicklung des Elektronenstrahlsinterns
2008 · 185 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0841-6

- 224 Mark Harfensteller
Eine Methodik zur Entwicklung und Herstellung von Radiumtargets
 2009 · 196 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0849-8
- 225 Jochen Werner
Methode zur roboterbasierten förderbandsynchronen Fließmontage am Beispiel der Automobilindustrie
 2009 · 210 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0857-7
- 226 Florian Hagemann
Ein formflexibles Werkzeug für das Rapid Tooling beim Spritzgießen
 2009 · 226 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0861-4
- 227 Haitham Rashidy
Knowledge-based quality control in manufacturing processes with application to the automotive industry
 2009 · 212 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0862-1
- 228 Wolfgang Vogl
Eine interaktive räumliche Benutzerschnittstelle für die Programmierung von Industrierobotern
 2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0869-0
- 229 Sonja Schedl
Integration von Anforderungsmanagement in den mechatronischen Entwicklungsprozess
 2009 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0874-4
- 230 Andreas Trautmann
Bifocal Hybrid Laser Welding – A Technology for Welding of Aluminium and Zinc-Coated Steels
 2009 · 268 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0876-8
- 231 Patrick Neise
Managing Quality and Delivery Reliability of Suppliers by Using Incentives and Simulation Models
 2009 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0878-2
- 232 Christian Habicht
Einsatz und Auslegung zeitenfensterbasierter Planungssysteme in überbetrieblichen Wertschöpfungsketten
 2009 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0891-1
- 233 Michael Spitzweg
Methode und Konzept für den Einsatz eines physikalischen Modells in der Entwicklung von Produktionsanlagen
 2009 · 180 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0931-4
- 234 Ulrich Munzert
Bahnplanungsalgorithmen für das robotergestützte Remote-Laserstrahlschweißen
 2010 · 176 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 978-3-8316-0948-2
- 235 Georg Völlner
Rührreischweißen mit Schwerlast-Industrierobotern
 2010 · 232 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-0955-0
- 236 Nils Müller
Modell für die Beherrschung und Reduktion von Nachfrageschwankungen
 2010 · 270 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-0992-5
- 237 Franz Decker
Unternehmensspezifische Strukturierung der Produktion als permanente Aufgabe
 2010 · 180 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-0996-3
- 238 Christian Lau
Methodik für eine selbstoptimierende Produktionssteuerung
 2010 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4012-6
- 239 Christoph Rimpau
Wissensbasierte Risikobewertung in der Angebotskalkulation für hochgradig individualisierte Produkte
 2010 · 200 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4015-7
- 240 Michael Loy
Modulare Vibrationswendelförderer zur flexiblen Teilezuführung
 2010 · 169 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4027-0
- 241 Andreas Eursch
Konzept eines immersiven Assistenzsystems mit Augmented Reality zur Unterstützung manueller Aktivitäten in radioaktiven Produktionsumgebungen
 2010 · 205 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4029-4

- 242 Florian Schwarz
Simulation der Wechselwirkungen zwischen Prozess und Struktur bei der Drehbearbeitung
 2010 · 256 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4030-0
- 243 Martin Georg Prasch
Integration leistungsgewandelter Mitarbeiter in die variantenreiche Serienmontage
 2010 · 261 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4033-1
- 244 Johannes Schilp
Adaptive Montagesysteme für hybride Mikrosysteme unter Einsatz von Telepräsenz
 2011 · 160 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4063-8
- 245 Stefan Lutzmann
Beitrag zur Prozessbeherrschung des Elektronenstrahlschmelzens
 2011 · 222 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4070-6
- 246 Gregor Branner
Modellierung transienter Effekte in der Struktursimulation von Schichtbauverfahren
 2011 · 230 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4071-3
- 247 Josef Ludwig Zimmermann
Eine Methodik zur Gestaltung berührungslos arbeitender Handhabungssysteme
 2011 · 184 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4091-1
- 248 Clemens Pörnbacher
Modellgetriebene Entwicklung der Steuerungssoftware automatisierter Fertigungssysteme
 2011 · 280 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4108-6
- 249 Alexander Lindworsky
Teilautomatische Generierung von Simulationsmodellen für den entwicklungsbegleitenden Steuerungstest
 2011 · 300 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4125-3
- 250 Michael Mauderer
Ein Beitrag zur Planung und Entwicklung von rekonfigurierbaren mechatronischen Systemen – am Beispiel von starren Fertigungssystemen
 2011 · 150 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4126-0
- 251 Roland Mork
Qualitätsbewertung und -regelung für die Fertigung von Karosserieteilen in Presswerken auf Basis Neuronaler Netze
 2011 · 228 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4127-7
- 252 Florian Reichl
Methode zum Management der Kooperation von Fabrik- und Technologieplanung
 2011 · 224 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4128-4
- 253 Paul Gebhard
Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen bei Anwendung für das Rührreibschweißen
 2011 · 220 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4129-1
- 254 Michael Heinz
Modellunterstützte Auslegung berührungsloser Ultraschallgreifsysteme für die Mikrosystemtechnik
 2012 · 220 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · 978-3-8316-4147-5

Seminarberichte iw b

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart und Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh,
Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
der Technischen Universität München

Seminarberichte iw b sind erhältlich im Buchhandel oder beim
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, info@utz.de

- 1 Innovative Montagesysteme · Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 Integriertes Produktmodell · Von der Idee zum fertigen Produkt
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen · Berechnung, Simulation und Optimierung
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 Simulation · Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 Materialbearbeitung mit Laser · von der Planung zur Anwendung
86 Seiten · ISBN 3-931327-76-0
- 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
- 8 Qualitätsmanagement · der Weg ist das Ziel
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
- 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen · Analysen und Konzepte
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
- 10 3D-Simulation · Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 Unternehmensorganisation · Schlüssel für eine effiziente Produktion
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 Autonome Produktionssysteme
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 Planung von Montageanlagen
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 14 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 15 Flexible Fluide Kleb/Dichtstoffe · Dosierung und Prozeßgestaltung
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 Time to Market · Von der Idee zum Produktionsstart
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 Industriekeramik in Forschung und Praxis · Probleme, Analysen und Lösungen
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 Das Unternehmen im Internet · Chancen für produzierende Unternehmen
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 Leittechnik und Informationslogistik · mehr Transparenz in der Fertigung
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen · Plug & Play · Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 Rapid Prototyping · Rapid Tooling · Schnell zu funktionalen Prototypen
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 Mikrotechnik für die Produktion · Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 EDM Engineering Data Management
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 Rationelle Nutzung der Simulationstechnik · Entwicklungstrends und Praxisbeispiele
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme · Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauftrag
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 Rapid Prototyping · Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 Rapid Tooling · Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen · Abschlußseminar
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 30 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 31 Engineering Data Management (EDM) · Erfahrungsberichte und Trends
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 32 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 33 3D-CAD · Mehr als nur eine dritte Dimension
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 Laser in der Produktion · Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 Ablaufsimulation · Anlagen effizient und sicher planen und betreiben
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 Moderne Methoden zur Montageplanung · Schlüssel für eine effiziente Produktion
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit · Produktivitätsteigerung durch technische und organisatorische Ansätze
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 Rapid Prototyping · Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 Rapid Tooling · Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie · Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 Stückzahlflexible Montagesysteme
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 Produktivität und Verfügbarkeit · ...durch Kooperation steigern
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 Automatisierte Mikromontage · Handhaben und Positionieren von Mikrobautteilen
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 Produzieren in Netzwerken · Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 Virtuelle Produktion · Ablaufsimulation
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1

- 47 Virtuelle Produktion · Prozeß- und Produktsimulation
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8
- 49 Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50 Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51 Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53 Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54 Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55 e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56 Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57 Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58 Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59 Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60 Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 62 Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63 Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64 Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65 Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66 Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67 Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvorgehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder
148 Seiten · ISBN 3-89675-067-4
- 68 Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69 Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette
134 Seiten · ISBN 3-89675-069-0
- 70 Mechatronik · Strukturdynamik von Werkzeugmaschinen
161 Seiten · ISBN 3-89675-070-4
- 71 Klebtechnik · Zerstörungsfreie Qualitätssicherung beim flexibel automatisierten Kleben und Dichten
ISBN 3-89675-071-2 · vergriffen
- 72 Fabrikplanung 2004 · Erfolgsfaktor im Wettbewerb · Erfahrungen – Werkzeuge – Visionen
ISBN 3-89675-072-0 · vergriffen
- 73 Rapid Manufacturing Vom Prototyp zur Produktion · Erwartungen – Erfahrungen – Entwicklungen
179 Seiten · ISBN 3-89675-073-9
- 74 Virtuelle Produktionssystemplanung · Virtuelle Inbetriebnahme und Digitale Fabrik
133 Seiten · ISBN 3-89675-074-7
- 75 Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 76 Berührungslose Handhabung · Vom Wafer zur Glaslinse, von der Kapselfür aseptischen Ampulle
95 Seiten · ISBN 3-89675-076-3
- 77 ERP-Systeme · Einführung in die betriebliche Praxis · Erfahrungen, Best Practices, Visionen
153 Seiten · ISBN 3-89675-077-7
- 78 Mechatronik · Trends in der interdisziplinären Entwicklung von Werkzeugmaschinen
155 Seiten · ISBN 3-89675-078-X
- 79 Produktionsmanagement
267 Seiten · ISBN 3-89675-079-8
- 80 Rapid Manufacturing · Fertigungsverfahren für alle Ansprüche
154 Seiten · ISBN 3-89675-080-1
- 81 Rapid Manufacturing · Heutige Trends – Zukünftige Anwendungsfelder
172 Seiten · ISBN 3-89675-081-X
- 82 Produktionsmanagement · Herausforderung Variantenmanagement
100 Seiten · ISBN 3-89675-082-8
- 83 Mechatronik · Optimierungspotenzial der Werkzeugmaschine nutzen
160 Seiten · ISBN 3-89675-083-6
- 84 Virtuelle Inbetriebnahme · Von der Kür zur Pflicht?
104 Seiten · ISBN 978-3-89675-084-6
- 85 3D-Erfahrungsforum · Innovation im Werkzeug- und Formenbau
375 Seiten · ISBN 978-3-89675-085-3
- 86 Rapid Manufacturing · Erfolgreich produzieren durch innovative Fertigung
162 Seiten · ISBN 978-3-89675-086-0
- 87 Produktionsmanagement · Schlank im Mittelstand
102 Seiten · ISBN 978-3-89675-087-7
- 88 Mechatronik · Vorsprung durch Simulation
134 Seiten · ISBN 978-3-89675-088-4
- 89 RFID in der Produktion · Wertschöpfung effizient gestalten
122 Seiten · ISBN 978-3-89675-089-1

