



FAU Studien aus dem Maschinenbau 410

**Markus Hubert**

Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie  
in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien  
für mechatronische Produkte



Markus Hubert

Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte

# **FAU Studien aus dem Maschinenbau**

## **Band 410**

Herausgeber/-innen:

Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Prof. Dr.-Ing. Nico Hanenkamp

Prof. Dr.-Ing. habil. Tino Hausotte

Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein

Prof. Dr.-Ing. Sebastian Müller

Prof. Dr.-Ing. Michael Schmidt

Prof. Dr.-Ing. Sandro Wartzack

Markus Hubert

# **Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte**

Dissertation aus dem Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung  
und Produktionssystematik (FAPS) Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke

Erlangen  
FAU University Press  
2022

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

Bitte zitieren als

Hubert, Markus. 2022. *Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie in der Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte*. FAU Studien aus dem Maschinenbau Band 410. Erlangen: FAU University Press. DOI: 10.25593/978-3-96147-604-6.

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

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

Verlag und Auslieferung:  
FAU University Press, Universitätsstraße 4, 91054 Erlangen

Druck: docupoint GmbH

ISBN: 978-3-96147-603-9 (Druckausgabe)  
eISBN: 978-3-96147-604-6 (Online-Ausgabe)  
ISSN: 2625-9974  
DOI: 10.25593/978-3-96147-604-6

**Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie  
in der Verarbeitung von metallischen  
Funktionsfolien für mechatronische Produkte**

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

zur  
Erlangung des Doktorgrades Dr.-Ing.

vorgelegt von

Dipl.-Ing. (FH) Markus Hubert

aus Schweinfurt

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

Tag der mündlichen  
Prüfung: 05.07.2022

Gutachter/in: Prof. Dr.-Ing. Jörg Franke  
Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, TU München

## Vorwort

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

Mein besonderer Dank gilt dem Ordinarius des Lehrstuhls Herrn Professor Dr.-Ing. Jörg Franke für seine Unterstützung zu meiner Forschung, die wertvollen Impulse, das entgegengebrachte Vertrauen sowie die wissenschaftliche Freiheit, welche die erfolgreiche Arbeit im innovativen Umfeld des Lehrstuhls ermöglichten. Herrn Professor Dr.-Ing. Wolfgang Volk, Ordinarius des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen an der Technischen Universität München, danke ich für die Übernahme des Koreferates. Zusätzlich danke ich Herrn Professor Dr. Michael Stingl für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes sowie Herrn Professor Dr.-Ing. Ingo Hahn für sein Engagement als weiteres Mitglied des Prüfungskollegiums.

Großer Dank gilt meinen Kollegen, insbesondere Marco Ziegler sowie meinen Industriepartnern für die zielführenden Diskussionen, die mich neue Aspekte und weiterführende Ansätze entdecken ließen und stets weitergebracht haben. Auch die nichtwissenschaftlichen und motivierenden Gespräche haben mich in meinem persönlichen Tun unterstützt und angespornt.

Zuletzt sage ich „Danke“ an meine Familie, besonders meiner Ehefrau Georgia-Theresa, die mir immer den Rücken gestärkt und mir den notwendigen Freiraum für die Erstellung meiner Dissertationsschrift verschafft hat. Das größte Glück in dieser Zeit war die Geburt unserer Tochter Malina-Greta und die Geburt unseres Sohnes Jannis, die mir neben unermesslicher Freude auch die erforderliche Kraft und Ausdauer in den letzten Zügen meiner Promotion verliehen haben.

Ebermannstadt, August 2022

Markus Hubert



# Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis .....	ix
Bildverzeichnis .....	xiii
Tabellenverzeichnis .....	xviii
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Applikationsanalyse der Rotationsschneidtechnologie für mechatronische Produkte .....</b>	<b>3</b>
2.1 Allgemeine Verbreitung der Rotationsschneidtechnologie .....	3
2.1.1 Rotationsschneidtechnologie in der Verpackungs-, Haushalts- und Hygieneindustrie .....	4
2.1.2 Rotationsschneidtechnologie in der metallverarbeitenden Industrie.....	5
2.1.3 Stand der Forschung.....	7
2.2 Wichtige Funktionsfolien für die Serienfertigung von mechatronischen Produkten.....	8
2.2.1 Elektroband für weichmagnetische Kerne.....	9
2.2.2 Kupferfolie für Leiterzüge in Schaltungsträgern .....	12
2.2.3 Legiertes Kupferband für Stanzgitter und Steckverbinder .....	16
2.2.4 Lotband für Lotstanz- und Lotformteile.....	17
2.3 Herausforderungen und Lösungsansatz .....	17
<b>3 Technologische Merkmale des Rotationsschneidprozesses....</b>	<b>21</b>
3.1 Anlagenaufbau und Werkzeuganordnung beim Rotationsschneiden .....	21
3.1.1 Geometrische Anordnung der Werkzeugzylinder .....	22
3.1.2 Blech- bzw. Schneidgutlage .....	25
3.1.3 Varianten der Schneidgutzufuhr .....	26
3.1.4 Eingriffspunkt, -winkel und -länge.....	27
3.1.5 Schneidphasen im Prozess .....	30
3.1.6 Partielle Konturlänge im Prozesseingriff .....	31
3.2 Kinematik des Rotationsschneidprozesses .....	33
3.2.1 Geschwindigkeitsprofile im Anlagenmodell.....	33
3.2.2 Werkzeugbewegung im Kinematikmodell .....	35
3.2.3 Relativbewegungen im Rotationsschneidprozess .....	37

3.3	Statik und Dynamik beim Rotationsschneiden .....	39
3.3.1	Approximierte Schneidkraft.....	40
3.3.2	Nieder- bzw. Gegenhaltekraft der Elastomer-Matrix.....	42
3.3.3	Vorspannkraft der Werkzeugzylinder.....	43
3.3.4	Maximales Schneidmoment und Antriebsmoment .....	44
3.4	Einfluss und Zusammenwirken wesentlicher Parameter .....	45
<b>4</b>	<b>Rotative Schneidverfahren für dünne metallische Folien und Bänder .....</b>	<b>49</b>
4.1	Begleitende versuchstechnische Untersuchung der rotativen Schneidverfahren.....	50
4.1.1	Geometrie der Testkontur.....	52
4.1.2	Auswahl der Materialien .....	52
4.1.3	Parameter der Auswertung .....	53
4.2	Rotatives Messerschneiden MSA/MSD.....	55
4.2.1	Gestaltung des Werkzeugsystems MSD/MSA.....	55
4.2.2	Trennvorgang des rotativen MSD/MSA.....	59
4.2.3	Analyse des Schneidverfahrens MSD/MSA .....	60
4.3	Rotatives Stempel-Matrize-Schneiden SMS .....	65
4.3.1	Gestaltung des Werkzeugsystems SMS.....	65
4.3.2	Trennvorgang des rotativen SMS .....	67
4.3.3	Analyse des Schneidverfahrens SMS .....	69
4.4	Rotatives Elastomer-Schneiden ES.....	72
4.4.1	Gestaltung des Werkzeugsystems ES.....	72
4.4.2	Trennvorgang des rotativen ES.....	75
4.4.3	Analyse des Schneidverfahrens ES .....	76
4.5	Kategorisierung der rotativen Schneidverfahren .....	79
<b>5</b>	<b>Effiziente rotative Verarbeitung von Elektroband zu Stator- und Rotorpaketen .....</b>	<b>83</b>
5.1	Rahmenbedingungen zur rotativen Verarbeitung von Elektroband.....	83
5.1.1	Gestaltung des Blechschnitts .....	83
5.1.2	Prozesskette zur durchgängigen Verarbeitung .....	86
5.1.3	Anlagenaufbau zur Abbildung der Prozesskette .....	88

5.2	Untersuchung Ringkernprobe .....	89
5.2.1	Aufbau und Herstellung der Ringkernprobe .....	90
5.2.2	Ergebnisauswertung der Ringkernprobe .....	91
5.3	Untersuchung Stator-Einzelzahnsegment .....	95
5.3.1	Aufbau und Herstellung des Stator- Einzelzahnsegments .....	95
5.3.2	Auswertung zum Stator-Einzelzahnsegment .....	96
5.4	Fazit zur rotativen Verarbeitung von Elektroband .....	97
<b>6</b>	<b>Effiziente rotative Verarbeitung von Kupferfolie in der Herstellung von Schaltungsträgern für LED-Leuchtmittel ....</b>	<b>99</b>
6.1	LED-Leuchtmittel basierend auf klassischen Schaltungsträgern .....	100
6.2	LED-Leuchtmittel basierend auf rotativ verarbeiteten Schaltungsträgern .....	101
6.2.1	Gestaltung des LED-Leuchtmittels .....	101
6.2.2	Herstellung von LED-Leuchtmitteln auf Basis rotativ geschnittener Leiterbahnen .....	104
6.2.3	Anlagenaufbau zur Abbildung der adaptierten Prozesskette .....	105
6.3	Untersuchung des rotativ hergestellten LED-Leuchtmittels ..	107
6.3.1	Aufbau und Herstellung des LED-Leuchtmittels .....	108
6.3.2	Auswertung zum LED-Modul auf Basis rotativ verarbeiteter LED-Schaltungsträger .....	109
6.4	Fazit zur rotativen Verarbeitung von Kupferleiterbahnen für LED-Module .....	113
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>115</b>
<b>8</b>	<b>Summary and outlook.....</b>	<b>119</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>121</b>



# Formelzeichen- und Abkürzungsverzeichnis

## Formelzeichen

Symbol	Einheit	Beschreibung
$a$	mm	Achsabstand
$a_x$	mm	Horizontaler Achsabstand
$a_y$	mm	Vertikaler Achsabstand
$B$	T	Magnetische Flussdichte
$b_{KE}$	mm	Kanteneinzugsbreite
$b_{SG}$	mm	Schnittgratbreite
$A_{S,max}$	mm <sup>2</sup>	Scherfläche Maximum
$d_{ma}$	mm	Innerer Matrizenflugkreisdurchmesser
$d_{MA}$	mm	Äußerer Matrizenflugkreisdurchmesser
$D_{MA}$	mm	Matrizenwälzkreisdurchmesser
$d_{sg}$	mm	Durchmesser innere Krümmung Schneidgut
$d_{SG}$	mm	Durchmesser äußere Krümmung Schneidgut
$d_{st}$	mm	Innerer Stempelflugkreisdurchmesser
$d_{ST}$	mm	Äußerer Stempelflugkreisdurchmesser
$D_{ST}$	mm	Stempelwälzkreisdurchmesser
$D_{RK,a}$	mm	Ringkernprobe Außendurchmesser
$D_{RK,i}$	mm	Ringkernprobe Innendurchmesser
$F$	Hz	Frequenz
$F_G$	N	Gewichtskraft
$F_{NH}$	N	Nieder- bzw. Gegenhaltekraft
$F_R$	N	Reibkraft
$F_S$	N	Schneidkraft
$F_{S,max}$	N	Schneidkraft Maximum
$F_V$	N	Vorspannkraft
$H$	A/m	Magnetische Feldstärke
$h_B$	mm	Bruchflächenhöhe
$h_G$	mm	Glattschnitthöhe

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$h_{KE}$	mm	Kanteneinzugshöhe
$h_{MA}$	mm	Matrizenhöhe
$h_{SG}$	mm	Schnittgrathöhe
$h_{ST}$	mm	Stempelhöhe
$i_A$	-	Übersetzung Werkzeugsystem zu Antrieb
$i_W$	-	Übersetzung Stempel- zu Matrizenzylinder
$k_S$	N/mm <sup>2</sup>	Scherwiderstand
$l_{PE}$	mm	Prozesseingriffslänge
$L_{KG}$	mm	Länge Gesamtkontur Werkzeug
$L_{KP}$	mm	Länge Kontur partiell im Prozesseingriff
$L_{KPn}$	mm	Länge Konturelement partiell im Prozesseingriff
$L_{KP,max}$	mm	Maximum Länge Kontur partiell im Prozesseingriff
$l_{RK}$	mm	Ringkernprobe Paketlänge
$M_A$	Nm	Antriebsmoment
$M_{S,max}$	Nm	Schneidmoment Maximum
$n$	1 /min	Drehzahl
$n_{MA}$	1 /min	Drehzahl Matrizenzylinder
$n_{ST}$	1 /min	Drehzahl Stempelzylinder
$P_A$	(X/Y)	Punkt - Austritt
$P_e$	W/kg	Wirbelstromverluste (e = eddy current)
$P_E$	(X/Y)	Punkt - Eingriff
$P_h$	W/kg	Hystereseverluste (h = hysteresis)
$P_{MA}$	(X/Y)	Mittelpunkt vom Durchmesser des Matrizenzylinder
$P_S$	W/kg	Gesamtverluste (s = sum)
$P_{ST}$	(X/Y)	Mittelpunkt vom Durchmesser des Stempelzylinder
$P_U$	(X/Y)	Punkt - Umkehr
$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Beschreibung</b>
$R_{P02}$	N/mm <sup>2</sup>	Streckgrenze
$s$	mm	Materialstärke
$u$	mm	Überdeckung zwischen Stempel und Matrize
$V$	W/kg	Gesamtverluste (Hysteresen- + Wirbelstromverluste)
$v_{MA}$	m/s	Umfangsgeschwindigkeit Matrizenzyylinder
$v_{MA(X)}$	m/s	X-Komponente Umfangsgeschwindigkeit Matrizenzyylinder
$v_{MA(Y)}$	m/s	Y-Komponente Umfangsgeschwindigkeit Matrizenzyylinder
$v_S$	m/s	Schneidgeschwindigkeit
$v_{ST}$	m/s	Umfangsgeschwindigkeit Stempelzyylinder
$v_{ST(X)}$	m/s	X-Komponente Umfangsgeschwindigkeit Stempelzyylinder
$v_{ST(Y)}$	m/s	Y-Komponente Umfangsgeschwindigkeit Stempelzyylinder
$v_V$	m/s	Vorschubgeschwindigkeit
$\alpha$	°	Werkzeugeingriffswinkel
$\alpha_{MA}$	°	Matrizenseitiger Werkzeugeingriffswinkel
$\alpha_{ST}$	°	Stempelseitiger Werkzeugeingriffswinkel
$\beta$	°	Anstellwinkel am Stanzguteinlauf
$\gamma$	°	Bruchflächenwinkel
$\varepsilon$	°	Einnehmender Winkelbereich der Werkzeugkontur auf dem Werkzeugzyylinder
$\kappa$	°	Schnittwinkel; Keilwinkel
$\pi$	3,14	Kreiszahl Pi
$\varphi$	°	Drehwinkel / Wälzwinkel
$\varphi_{MA}$	°	Matrizenseitiger Wälzwinkel
$\varphi_{ST}$	°	Stempelseitiger Wälzwinkel
$\omega$	1/sec	Winkelgeschwindigkeit
$\omega_{MA}$	1/sec	Winkelgeschwindigkeit Matrizenzyylinder
$\omega_{ST}$	1/sec	Winkelgeschwindigkeit Stempelzyylinder

## Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
3D-MID	Dreidimensionaler mechatronischer Schaltungsträger (3-dimensional mechatronic interconnected device)
BL	Blech- oder Schneidgutlagen
DIN	Deutsches Institut für Normung
ED-Kupfer	Elektrolytkupfer (electric deposit)
ES	Elastomer-Schneiden
EZL	Einzelzahnlamelle
EZS	Einzelzahnsegment
FE-Methode / FEM	Finite-Elemente-Methode
FR4	Basismaterial nach NEMA Standard; Verbund aus Epoxidharz und Glasfasergewebe
GO / KO	Kornorientiert (grain oriented)
HTE	Hohe Bruchdehnungswerte im Hochtemperaturbereich (high temperature elongation)
MSA	Messer-Anschneiden
MSD	Messer-Durchschneiden
NO / NKO	Nicht kornorientiert (non grain oriented)
SMS	Stempel-Matrize-Schneiden
SWOT-Analyse	Englisches Akronym für Stärken (strengths), Schwächen (weaknesses), Chancen (opportunities) und Risiken (threats)
RA-Kupfer	Walzkupfer (rolled annealed)
TK	Testkontur
TUM	Technische Universität München
utg	Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (an der TUM)

## Bildverzeichnis

Bild 1: Verbreitung der Rotationsschneidtechnologie in der verarbeitenden Industrie .....	4
Bild 2: Werkzeugsystem (links) und Rotationsschneidanlage (rechts) zur Herstellung von Klebeetiketten [6] .....	5
Bild 3: Werkzeugsystem (links) und Rotationsschneidanlage (rechts) zur Herstellung von Trockenbauprofilen [11] .....	6
Bild 4: Überblick über den Einsatz metallischer und nichtmetallischer Folien und Bänder in mechatronischen Anwendungen.....	8
Bild 5: Prinzipielle Prozesskette zur Herstellung von schlussgeglühtem Elektroband [23] .....	10
Bild 6: Verschiedene Arten von Elektroblechpaketen .....	10
Bild 7: Prinzipielle Prozesskette zur Verarbeitung von Elektroband zu Blechpaketen .....	11
Bild 8: Variation von Schaltungsträgern .....	12
Bild 9: Klassifizierung der Herstellverfahren für Schaltungsträger [30] .....	13
Bild 10: Prinzipielle Prozesskette zur subtraktiven Herstellung von Schaltungsträgern mittels Fotodruck [31] .....	13
Bild 11: Prinzipielle Prozesskette zur subtraktiven Herstellung von Schaltungsträgern mittels Siebdruck [31] .....	13
Bild 12: Prinzipielle Prozesskette zur additiven Herstellung von Schaltungsträgern mittels Heißprägen [33] .....	15
Bild 13: Prinzipielle Prozesskette zur Herstellung von Stanzgittern .....	16
Bild 14: Prinzipielle Prozesskette zur Herstellung von Steckverbindern....	16
Bild 15: Prinzipielle Prozesskette zur Verarbeitung von Lotband zu Lotstanzteilen .....	17
Bild 16: SWOT-Analyse zum Einsatz der Rotationsschneidtechnologie in der Verarbeitung von Metallfolien .....	18

Bild 17: Abstraktion des Rotationsschneidprozesses in Anlagenaufbau, Kinematik und Dynamik.....	21
Bild 18: Geometrischer Aufbau der Prozessstruktur (angelehnt an [P4])..	22
Bild 19: Ausprägungen von Überdeckung $u$ , Materialstärke $s$ und Werkzeughöhen $h_{ST}$ ; $h_{MA}$ zu Formel (6) .....	24
Bild 20: Gängige Schneidgutlagen im Rotationsschneidprozess (nach [16]) .....	25
Bild 21: Gerader (l.) und angestellter (r.) Schneidguteinzug .....	27
Bild 22: Geometrische Parameter des Schneidbereichs (angestellte Schneidgutzufuhr) [P4].....	28
Bild 23: Phasen beim Rotationsschneiden [19] am Beispiel einer Rechteckkontur.....	31
Bild 24: Anteilige Konturlänge im Eingriff <b>LKP</b> exemplarisch für die Testkontur .....	32
Bild 25: Anlagenmodell für gleichgroße Werkzeugzylinder (links) mit zugehörigem Geschwindigkeitsprofil (rechts) [P4] .....	34
Bild 26: Bahnkurven zur verlängerten, gemeinen und verkürzten Epizykloide .....	36
Bild 27: Grafische Darstellung der Werkzeugbewegungen mit auf die Mittellebene gelegtem Bezug (angelehnt an [19, 57]).....	37
Bild 28: Übersicht der differenten Geschwindigkeitsvektoren für Stempel, Matrize und Schneidgut zu den Drehwinkeln .....	38
Bild 29: Gesamtübersicht der im Rotationsschneidprozess potenziell auftretenden Kräfte .....	39
Bild 30: Ausprägung der Elastomer-Matrix ohne (links) und mit (rechts) Schneidgut .....	42
Bild 31: Maximales Drehmoment im Prozesseingriff <b>MS, max</b> .....	44
Bild 32: Abhängigkeit des Eingriffswinkels $\alpha_{ST}$ von der Materialstärke $s$ und dem Werkzeugdurchmesser $d_{ST}$ .....	45

Bild 33: Abhängigkeit der Schneidgeschwindigkeit $v_S$ von der Vorschubgeschwindigkeit $v_V$ und dem Wälzkreisdurchmesser $D_{ST}$ .....	46
Bild 34: Abhängigkeit des maximalen Schneidmoments $MS, max$ vom Werkzeugdurchmesser $d_{ST}$ .....	46
Bild 35: Einordnung der rotativen Schneidverfahren [P <sub>2</sub> ] in die Untergruppe des Zerteilens nach DIN 8580 und DIN 8588 [61, 62] .....	49
Bild 36: Nomenklatur der Versuchspaarungen.....	50
Bild 37: Testkontur zum Vergleich der rotativen Schneidverfahren (Darstellung ist nicht maßstabsgetreu).....	51
Bild 38: Übersicht über die ausgewählten Auswerteparameter .....	54
Bild 39: Schneidaggregat zum rotativen Messerschneiden in der Ausführung Magnetzylinder mit Stanzblech .....	56
Bild 40: Prinzipielle Variationen im Werkzeugsystem zum rotativen Messerschneiden .....	57
Bild 41: Idealisierter Trennvorgang beim rotativen Messerschneiden [68].....	59
Bild 42: Schnittflächengrößen beim Messerschneiden nach VDI 2906 [64, 68] .....	60
Bild 43: Testteile TK-K035-MSD/MSA (oben) und Testteile TK-K105-MSD/MSA (unten) .....	61
Bild 44: Testteile TK-L163-MSD/MSA und TK-Lo44-MSD/MSA .....	61
Bild 45: Soll-Ist-Konturvergleich des geschnittenen Testteils TK-K035-MSA .....	62
Bild 46: Schnittkanten zu Testteilen TK-K035-MSD/MSA .....	63
Bild 47: Schnittkanten zu Testteilen TK-K105-MSD/MSA.....	63
Bild 48: Einfluss des Material-Abhebens auf die Schnittkanten beim rotativen Messerschneiden (Darstellung anhand TK-K105-MSD/MSA) .....	64
Bild 49: Schnittkanten zu Testteilen TK-Lo44/L163-MSA/MSD .....	65

Bild 50: Am Lehrstuhl entwickeltes Schneidaggregat zum rotativen Stempel-Matrize-Schneiden [P5–P8] .....	66
Bild 51: Idealisierter Trennvorgang beim rotativen Stempel-Matrize-Schneiden .....	68
Bild 52: Schnittflächengrößen beim Scherschneiden nach VDI 2906 [64, 68] .....	69
Bild 53: Testteile TK-E350-SMS und TK-E200-SMS .....	70
Bild 54: Soll-Ist-Konturvergleich des geschnittenen Testteils TK-E350-SMS .....	70
Bild 55: Schnittkanten zu Testteilen TK-E200-SMS und TK-E350-SMS .....	71
Bild 56: Schnittkanten zum Testteil TK-K500-SMS .....	72
Bild 57: Prototypisches Schneidaggregat zum rotativen Elastomer-Schneiden .....	73
Bild 58: Werkzeugkavität zum rotativen Elastomer-Schneiden .....	73
Bild 59: Idealisierter Trennvorgang beim rotativen Elastomer-Schneiden .....	75
Bild 60: Testteile TK-K035-ES und TK-K105-ES .....	77
Bild 61: Testteile TK-L044-ES und TK-L163-ES .....	77
Bild 62: Soll-Ist-Konturvergleich des geschnittenen Testteils TK-K105-ES .....	78
Bild 63: Schnittkanten zum Testteil TK-K105-ES .....	78
Bild 64: Übersicht der, für die rotative Verarbeitung geeigneten Blechschnitte bzw. Statoren .....	84
Bild 65: Gegenüberstellung von, auf das jeweilige Verfahren hin optimierten Blechschnitten [P2] .....	85
Bild 66: Durchgängige Prozesskette zur rotativen Verarbeitung von Elektroblechband zu Slinky-Blechschnitten bzw. -Statoren .....	86
Bild 67: Prototypische Anlage zur durchgängigen Verarbeitung von Elektroband zu Elektroblechlamellen .....	88
Bild 68: Rotativ hergestellter Ringkernprüfling nach DIN 60404-6 [P5, P6] .....	90

Bild 69: Vergleich der Hystereseschleifen für verschiedene Verarbeitungsverfahren bei einer Polarisation von 1,0 T [P5, P6, P10].....	92
Bild 70: Vergleich der Hystereseschleifen für verschiedene Verarbeitungsverfahren bei einer Polarisation von 1,5 T [P5, P6, P10].....	92
Bild 71: Vergleich der Hysterese-, Wirbelstrom- und Gesamtverluste für verschiedene Verarbeitungsverfahren [P6, P10] .....	94
Bild 72: Verschiedene Aufbaustufen des segmentierten Statorpakets.....	95
Bild 73: Ebenheitsauswertung zur rotativ geschnittenen Stator- Einzelzahnlamelle und zum paketierte Einzelzahnsegment....	96
Bild 74: Rotativ geschnittenes und manuell paketierte Stator- Einzelzahnsegment .....	97
Bild 75: Globaler Markttrend für LED-Module [87] .....	99
Bild 76: LED-Modul auf Basis rotativ hergestellter Schaltungsträger.....	102
Bild 77: Lagenweiser Aufbau des LED-Moduls .....	103
Bild 78: Starre Prozesskette zur Herstellung des Schaltungsträgers.....	104
Bild 79: Flexible Prozesskette zur Herstellung des LED-Moduls .....	105
Bild 80: Versuchsanlagen und -vorrichtungen zur Herstellung des LED-Schaltungsträgers .....	106
Bild 81: Verwendete SMT-Fertigungslinie zur Bestückung der LED-Module [93] .....	107
Bild 82: Verschiedene Aufbaustufen des LED-Modul-Versuchsträgers ...	108
Bild 83: Schliffbilder der LED-Schaltungsträger – mit aufgelötetem LED-Chip (oben) und als unbestückter Bereich (unten) .....	109
Bild 84: Schälwiderstandsverlauf für 90° Schältest nach DIN EN 60249 ..	110
Bild 85: Scherkräfte von aufgelöteten LED-Chips für Schertest nach DIN EN 62137-1-2 [97] .....	111
Bild 86: Wärmeverteilung im LED-Leuchtmittel bei verschiedenen stationären Leistungen .....	112

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Versuchsmatrix zur Charakterisierung und Kategorisierung der rotativen Schneidverfahren .....	51
Tabelle 2: Aufschlüsselung der Versuchsmaterialien [24, 26, 35, 36, 42, 48].....	53
Tabelle 3: Parameterauswahl des Versuchsaggregats zum rotativen Messerschneiden.....	59
Tabelle 4: Parameterauswahl des Versuchsaggregats zum rotativen Stempel-Matrize-Schneiden .....	67
Tabelle 5: Parameterauswahl des Versuchsaggregats zum rotativen Elastomer-Schneiden.....	74
Tabelle 6: Kategorisierung der rotativen Schneidverfahren .....	79
Tabelle 7: Materialkarte zu M330-35A [82, 83] .....	91

# 1 Einleitung

Der technische Fortschritt ist heutzutage maßgeblich getrieben von Innovationsprüngen und kontinuierlichen Verbesserungen. Während kontinuierliche Verbesserungen meist mehr verwaltend bzw. „versionierend“ sind, die in kleinen Schritten Detailschärfe liefern (sustaining technologies), stellen Innovationsprünge oft einen Aufbruch ins Ungewisse dar. Sie entstehen nicht selten auf Basis von Visionen, deren Ausgang offen ist, aber deutliches Potenzial erhoffen lassen. Diese Ausgangsbasis ist die erste Hürde, welche auf dem risikoreichen Weg bis hin zur Zielerreichung, der Umsetzung eben dieser ursprünglichen Vision, überwunden werden muss (disruptive technologies). [1]

Eine Innovation beinhaltet auch immer disruptive Elemente, d.h. der Status quo wird maßgeblich verändert und etablierte Produkte bzw. Prozesse werden möglicherweise verdrängt oder sogar vollständig ersetzt. Dieser Zyklus wird oft als disruptive Technologie beschrieben und kann ebenso ein Produkt, wie auch einen Prozess respektive ein Verfahren betreffen. [1]

In der Anfangsphase eines Innovationszyklus sind disruptive Technologien den gegenwärtigen Technologien, aufgrund deren kontinuierlich technologischen Weiterentwicklung und Kostenoptimierung im Produkt-/Prozesszyklus in ihrer Leistungsfähigkeit häufig unterlegen. Der erfolgversprechendste Weg, disruptive Technologien zielsicher in den Markt zu bringen, ist, sich zunächst auf einfache Anwendungen und kleinere Zielmärkte mit geringeren Margen zu fokussieren. Mit der sukzessiven Adaption der disruptiven Technologie in dem geplanten Segment nimmt deren Leistungsfähigkeit graduell, oft auch im High-End-Segment, zu. Ist der Tipping Point erreicht, setzt ein Schwenk zur neuen Technologie ein, womit sich diese erfolgreich etabliert hat. [1]

Ein Beispiel für ein disruptives Verfahren ist das Aufkommen von Miniwalzwerken, sogenannten Mini Mills, in der amerikanischen Stahlindustrie im 20. Jahrhundert. Gemeint sind kleine Stahlhersteller, die auf das Elektroverfahren anstelle des Sauerstoffverfahrens setzen und damit den etablierten Kreis großer integrierter Stahlunternehmen deutlich stören. Zunächst im Niedrigpreissegment gestartet, steht diese Technologie heute für einen Großteil der verarbeitenden Stahlindustrie in Amerika aber auch weltweit. [1-3]

Diesem Beispiel folgt auch der Einsatz der Rotationsschneidtechnologie auf dünne metallische Funktionsfolien für mechatronische Produkte. Sie

bringt etliche Prozessattribute mit, die in den aktuell bekannten Verarbeitungstechnologien so nicht vorhanden bzw. gegenüber den bestehenden deutlich überlegen sind. Jedoch sind zunächst auch manch vorherrschende Prozessattribute den etablierten Technologien in ihrer Leistungsfähigkeit stark unterlegen.

Diese Dissertation hat den Anspruch, das Potenzial der Rotationsschneidtechnologie aufzuzeigen, um die Erfolgsserie existierender Verarbeitungstechnologien in beherrschenden mechatronischen Anwendungen zu unterbrechen und abzulösen.

Zunächst werden in Kapitel 2 zum einen die aktuelle Verbreitung mit dem Stand der Technik zur Rotationsschneidtechnologie und zum anderen wichtige Funktionsfolien für die Serienfertigung von mechatronischen Produkten vorgestellt. Für die beiden Felder wird die Schnittmenge für eine erfolgreiche Anwendung analysiert, die bestehenden Herausforderungen extrahiert und ein Lösungsansatz zur Überwindung dieser definiert.

In Kapitel 3 werden die technologischen Merkmale des Rotationsschneidprozesses im Allgemeinen vorgestellt. Dieses grundlegende Verständnis bildet das Fundament für eine Interpretation, der in den folgenden Kapiteln erarbeiteten und auch letztendlich erreichten Prozessergebnisse.

Kapitel 4 liefert eine ausführliche Analyse und Kategorisierung verschiedener und im Rahmen dieser Dissertation weiterentwickelter rotativer Schneidverfahren und deren Grenzen in Bezug auf die allgemeine Anwendung in der Verarbeitung von Metallfolien für mechatronische Produkte.

Abschließend wird im Rahmen dieser Forschungsarbeit das Potenzial der Rotationsschneidtechnologie exemplarisch für zwei bedeutende, aber auch sehr verschiedene Beispielanwendungen angeführt: Kapitel 5 veranschaulicht die ganzheitliche Prozesskette zur Verarbeitung von Elektrobänd zu Elektroblechpaketen auf Basis rotativ ausgeschnittener Elektroblechlamellen und Kapitel 6 die rotative Verarbeitung von Kupferfolie zu Leiterbahnen, integriert in die angepasste Prozesskette zur Herstellung von LED-Leuchtmitteln. Damit wird der Nachweis für eine erfolgreiche Anwendung der Technologie in unterschiedlichsten Produktparten erbracht.

## **2 Applikationsanalyse der Rotations- schneidtechnologie für mechatronische Produkte<sup>1</sup>**

Eine der häufigsten Anforderungen seitens des Marktes an die Industrie ist die deutliche Reduktion der Produktionskosten bei gleichbleibender oder sogar verbesserter Fertigungs- und Produktqualität. Hierfür ist es unerlässlich, neue und innovative Produktionsverfahren zu erschließen. Eine vielversprechende Technologie, die diese Potenziale bereits für etliche Anwendungen in der Papier-, Kunststofffolien- und Metallprofilverarbeitung gehoben hat, ist das Rotationsschneiden.

Rotationsschneiden ist ein rein mechanisches Verarbeitungsverfahren, bei dem Vorschub- und Schneidbewegung kontinuierlich und zeitgleich stattfinden, was diese Technologie für die Massenverarbeitung prädestiniert. Daraus resultiert die Qualifikation dieses Verfahrens, sich auch im Serienprozess für die Herstellung mechatronischer Produkte, wie Elektrobandlammellen, Schaltungsträger, Stanzgitter und Lotstanzteilen durchzusetzen.

Um das Rotationsschneiden auch in der Fertigung komplexer mechatronischer Anwendungen grundsätzlich einsetzen zu können und dennoch die gewohnt hohe Produktqualität zu erreichen, müssen technologische Veränderungen und anwendungsbedingte Optimierungen in der Prozessstruktur der bisher eingesetzten Rotationsschneidtechnologie vorgenommen und auf die gesteigerten Anforderungen an Prozess, Werkzeug und Maschine adaptiert werden.

### **2.1 Allgemeine Verbreitung der Rotationsschneid- technologie**

Weite Verbreitung findet die Rotationsschneidtechnologie bereits in der Verpackungs-, Haushalts- und Hygieneindustrie, wo sie als bewährte Verarbeitungsweise etabliert und nicht mehr wegzudenken ist. Ihr Bekanntheitsgrad in der metallverarbeitenden Industrie ist bisher noch gering,

---

<sup>1</sup> In der Erarbeitung der Inhalte zu diesem Kapitel wurde ich unterstützt von F. Hollmann [Si].

jedoch wird sie zunehmend zur Endlosfertigung von gelochten Metallprofilen eingesetzt.

Verpackungs-, Haushalts- und Hygieneindustrie		Metallverarbeitende Industrie
<p><b>Papier</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Vorschubgeschwindigkeit bis zu 800 m/min</li> <li>Herstellung von Klebeetiketten, Falzschachteln, Kartonverpackungen etc.</li> </ul>	<p><b>Kunststoff</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Vorschubgeschwindigkeit bis zu 500 m/min</li> <li>Anwendung insbesondere für kontinuierliche Verfahren (Extrusion) etc.</li> </ul>	<p><b>Stahl</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Vorschubgeschwindigkeit bis zu 200 m/min</li> <li>Einsatz bei Bauprofilen, Elektroprofilen, Hutschienen, Regalbauprofile etc.</li> </ul>

Bild 1: Verbreitung der Rotationsschneidtechnologie in der verarbeitenden Industrie

Bild 1 gibt einen Überblick über die Verbreitung der Rotationsschneidtechnologie in der verarbeitenden Industrie, auf welche in den nachfolgenden Unterkapiteln näher eingegangen wird.

### 2.1.1 Rotationsschneidtechnologie in der Verpackungs-, Haushalts- und Hygieneindustrie

In der Verpackungs-, Haushalts- und Hygieneindustrie werden derzeit vorwiegend dünne Folien und Bänder aus Zellulose oder Kunststoffen in zig millionenfacher Stückzahl in Kombination mit Druck-, Laminier-, Schneid- und Prägeprozessen zu beispielsweise Kartonageverpackungen, Etiketten, Briefumschlägen, Damenbinden, Babywindeln oder Einweghandschuhen von Rolle zu Rolle oder Rolle zu Vereinzelung verarbeitet. [4-6]

Die meist weichen, biegeschlaffen und niedrigfesten zu verarbeitenden Folien und Bänder werden durch die eingesetzte rotative Schneidtechnologie besonders schonend bearbeitet. In diesem kontinuierlichen Verfahren treten kaum Beschleunigungen auf, was eine ruhige und konstante Bandführung und auch Verarbeitung bewirkt. Weitere Vorteile gegenüber herkömmlicher Verarbeitungstechnologien, u.a. dem Flachbettstanzen, sind die hohen Produktionsgeschwindigkeiten von bis zu 1.000 m/min und der reduzierte Stanzdruck. Hieraus rühren die unvergleichbar hohe Effizienz des Verfahrens sowie die niedrigen laufenden Produktionskosten bei nie dagewesenen Ausbringungsmengen. [4-6]

Im Bereich der Verpackungs-, Haushalts- und Hygieneindustrie kommen ausschließlich äußerst kompakte Maschinen zum Einsatz, die aufgrund der vibrationsarmen Prozessführung nur sehr geringe Anforderungen an die

Produktionsumgebung stellen. Damit ist die Anfangshürde für die initiale Anlageninvestition eher marginal.

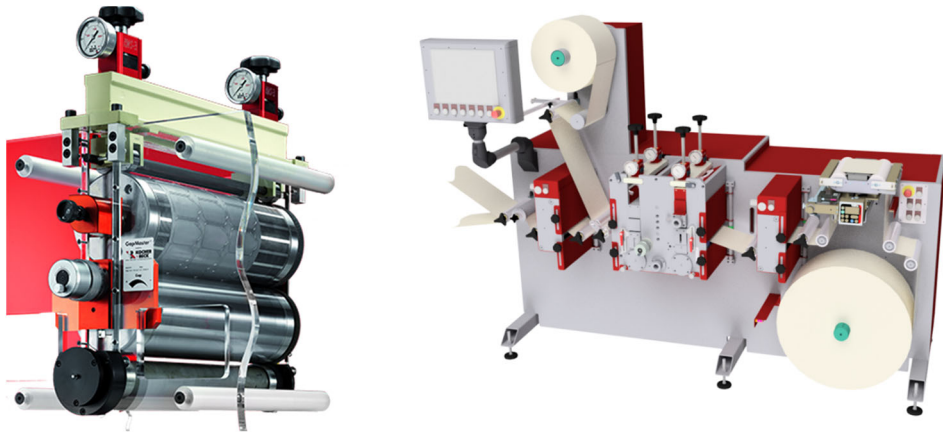


Bild 2: Werkzeugsystem (links) und Rotationsschneidanlage (rechts) zur Herstellung von Klebeetiketten [6]

Als rotatives Schneidverfahren hat sich in den zuvor genannten Branchen die Keilschneidtechnologie (auch Messerschneiden genannt) gegen einen planaren Gegenschneidzylinder (siehe Kapitel 4.2) durchgesetzt. Die Kontur wird als keilförmige Schneide aus dem Vollen der Mantelfläche des Werkzeugzylinders gefräst oder als vergleichsweise günstiges Stanzblech auf einen Magnetzylinder aufgebracht. Um die Werkzeugstandzeit zu erhöhen, kann zusätzlich die Schneidlinie lasergehärtet und die dem Schneidgut entgegengerichtete Oberfläche darüber hinaus antihafbeschichtet werden. Für ungebrochene Dauerläufer empfiehlt sich überdies der Einsatz von Hartmetallwerkzeugen. [4-6]

Anbieter und auch Weltmarktführer der Technologie sind einige wenige, insbesondere deutsche mittelständische Familienunternehmen, wie beispielsweise die Kocher + Beck GmbH + Co. Rotationsstanztechnik KG, die Schobertechnologies GmbH und die Spilker GmbH.

### 2.1.2 Rotationsschneidtechnologie in der metallverarbeitenden Industrie

In der Metallindustrie wird die Rotationsschneidtechnologie – oder auch das Rotationsstanzen – noch eher selten eingesetzt. Allerdings gibt es bereits einige Einsatzgebiete, in denen das Rotationsstanzen vermehrt Anwendung findet. In der Endlosfertigung von einfachen Metallprofilen, wie zum Beispiel Hutschienen für die Elektroindustrie oder Trockenbauprofile

für die Bauindustrie, erfreut sich das Verfahren zunehmender Beliebtheit. Innovativer Treiber dieser Technologie ist die Firma Baust GmbH mit besonders kompakten Anlagen und robusten Werkzeugen. [7–10]

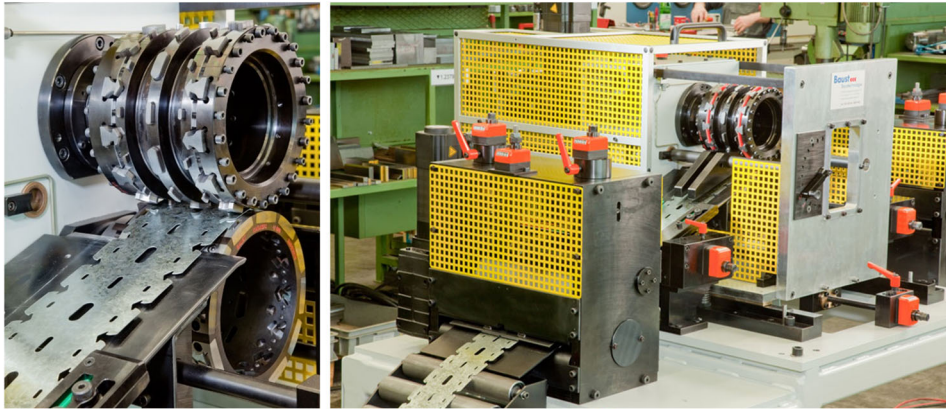


Bild 3: Werkzeugsystem (links) und Rotationsschneidanlage (rechts) zur Herstellung von Trockenbauprofilen [11]

Im Gegensatz zum intermittierenden Stanzen, wo das Werkzeug flächig auf das Material aufgesetzt wird sowie die Werkzeugbewegung und der Blechvorschub diskontinuierlich sind, wird das bis zu 3 mm dicke Band beim Rotationsstanzen kontinuierlich weiterbewegt und simultan bearbeitet. Die geänderte Kinematik führt zu Ungleichmäßigkeiten in der Schneidkantengeometrie. Durch das Abrollen des Werkzeuges auf dem Blech werden wesentlich geringere Kräfte zur Durchtrennung des Bleches als beim Hubstanzen benötigt. [12] Dadurch können kleinere und kompaktere Maschinen mit größerem Durchsatz pro Stunde, bei gleichzeitig ca. 50 % niedrigeren Investitionskosten, eingesetzt werden. [13]

In der Praxis wird die Rotationsschneidtechnologie häufig mit Walzprofilierprozessen kombiniert. Daraus resultieren Verarbeitungsgeschwindigkeiten von bis zu 200 m/min und erhöhen die Effizienz und Wirtschaftlichkeit in der Herstellung einfacher Metallprofile signifikant. Dabei handelt es sich um gelochte Meterware, die kostengünstig und in Massen hergestellt wird. Primäres Ziel in der Herstellung dieser Produkte sind nicht etwa niedrige Toleranzen oder eine gute Oberflächenbeschaffenheit, sondern hohe Stückzahlen, niedriger Werkzeugverschleiß und geringe Prozesskosten. Daraus resultieren auch die bekannten einfachen runden und quadratischen Geometrien der Lochungen. Der anfallende Lochbutzen innerhalb des Profils stellt dabei Verschnitt dar und wird über den Matrizenzyylinder abgeführt. Damit gestaltet sich die Verarbeitung des kontinuierlichen

Profils einfach und erfordert keine aufwendigen Auffang- und Sortiersysteme. [14]

Um dem anhaltenden Preisdruck zu begegnen, stellen passive Rotationsschneidaggregate eine weitere Steigerung in der Rotationsschneidtechnologie für Metallprofile dar. Diese werden ohne eigenen Antrieb in die Profilieranlage integriert, wo sie den Bandvorschub als Antrieb nutzen. Damit eröffnet sich erneut eine weitere massive Senkung der Investition und der laufenden Produktionskosten. [15]

### 2.1.3 Stand der Forschung

Neben den aufgelisteten etablierten Anwendungen haben sich bis heute mehrere wissenschaftliche Arbeiten mit der Rotationsschneidtechnologie befasst. Bereits 1974 haben die Ingenieure Gerhard Blumauer und Eberhard Köhler ihre gemeinsame Dissertation mit dem Titel „Beitrag zur Untersuchung des Rotationsstanzens von Karton“ verfasst. In der entstandenen Abhandlung werden zum einen die auftretenden Bewegungsverhältnisse und zum anderen die Kraft- und Spannungsverhältnisse des Rotationsstanzens erfasst, analysiert und validiert. Neben diesen theoretischen Erkenntnissen werden auch experimentelle Untersuchungen zur Rotationsstanzform durchgeführt und bewertet. Die Ergebnisse dieser Untersuchung bilden die Grundlage für die heute weit verbreiteten Stanzbleche. [16]

Aufbauend auf dieser Arbeit befasst sich Michael Noack 1982 in seiner Dissertation mit dem Thema „Technologische Untersuchungen zum Perforieren von Metallband mittels rotierender Werkzeuge“. Hier wird das Hauptaugenmerk auf die besonderen kinematischen Verhältnisse während des Schneidvorgangs gelegt. Insbesondere wird hierbei die spezielle Zykloidenbewegung betrachtet, die das rotierende Werkzeug auf dem Blech beschreibt. In seinen experimentellen Versuchen fokussiert sich Noack auf Kraft- und Drehmomentmessungen sowie auf Betrachtungen der Verfestigungen im Lochrandbereich und Messungen der Maß- und Formabweichungen. [17, 18]

Nach diesen beiden Veröffentlichungen findet sich erst im Jahr 2001 wieder eine relevante wissenschaftliche Arbeit zu dieser Thematik. Der Ingenieur Michael Schweitzer behandelt im Rahmen seiner Dissertation am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg) der Technischen Universität München (TUM) das Thema Rotationsschneiden. Neben etlichen wissenschaftlichen Abhandlungen verfasst er seine Dissertation mit dem Thema „Prozessspezifische Merkmale des Rotationsschneidens“, in

welcher er sich zunächst mit der Zykloidenkinematik befasst und dazu einen geeigneten Simulationsalgorithmus implementiert. Zudem betrachtet er den Werkzeugverschleiß, die Teilequalität und die auftretenden Prozesskräfte sowohl theoretisch als auch praktisch und leitet daraus sinnvolle Werkzeug- und Teileparameter für das Perforieren von Metallband ab. [18, 19]

Thomas Schmidt, ebenfalls Wissenschaftler am utg der TUM, befasst sich 2004 mit der „Verbesserung der Schnittfläche durch Anpassung der Stempelgeometrie an die Kinematik des Rotationsschneidens“. Da verfahrenstechnisch und aufgrund der bisher eingesetzten Werkzeuggeometrie eine schlechte Schnittflächenqualität beim Rotationsschneiden zu erwarten ist, passt er den Schneidstempel an die Kinematik und den Prozessablauf an. Die verbesserte Schneidstempelgeometrie wird über einen Hinterschliff des Stempels gewährleistet. Die Ergebnisse mit den neu gestalteten Werkzeugen validiert er anhand praktischer An- und Durchschneidversuche an Aluminiumblechen. [20]

## 2.2 Wichtige Funktionsfolien für die Serienfertigung von mechatronischen Produkten

In den vielseitigen mechatronischen Anwendungen kommen metallische und nichtmetallische Werkstoffe in verschiedensten Ausprägungen mit mechanischen, thermischen, chemischen, magnetischen, elektrischen und dielektrischen Funktionen zum Einsatz. [21, 22]

Folien und Bänder für mechatronische Anwendungen				Nichtmetallische Werkstoffe
Metallische Werkstoffe				
Elektroband für magnetische Kerne	Kupferfolie für Schaltungsverträger	Legiertes Band für Steckverbinder	Lotband für Preforms	Grafitfolie
				Isolationsfolie
				Hartpapier
				Keramikfolie
				Wärmeleitfolie

Bild 4: Überblick über den Einsatz metallischer und nichtmetallischer Folien und Bänder in mechatronischen Anwendungen

Die mit Bezug auf die Anwendung der Rotationsschneidtechnologie potenziell wichtigsten Vertreter der metallischen Folien und Bänder sind, wie in

Bild 4 dargestellt, Elektroband, Kupferfolie, legiertes Band und Lotband. Eine Gemeinsamkeit der betrachteten Folien und Bänder ist, dass sie massenhaft im ebenen Ausgangszustand unter komplexer Konturgebung verarbeitet werden und einen hohen Anspruch an ihre Verarbeitungsgüte stellen. Nichtmetallische Werkstoffe werden im Rahmen dieser wissenschaftlichen Abhandlung nicht explizit behandelt, da die Rotationsschneidtechnologie hierfür bereits oftmals eingesetzt wird. Die resultierenden Erkenntnisse sind jedoch prinzipiell auf diese übertrag- und anwendbar.

### 2.2.1 Elektroband für weichmagnetische Kerne

Elektroband ist eine Eisen-Silizium-Legierung und ein Vertreter der sogenannten weichmagnetischen Werkstoffe, die über ein äußeres Magnetfeld leicht magnetisiert werden. Der hohe Reinheitsgrad und der Massenanteil von Silizium von bis zu 4,5% und Aluminium von bis zu 1 % verantworten die auf die Anwendung angepassten Eigenschaften des Elektrobands. Dadurch und aufgrund der wirtschaftlichen Herstellung eignen sie sich besonders für einen Einsatz in weichmagnetischen Kernen von elektrischen und mechatronischen Systemen zur Erzeugung, Verteilung, Übertragung und Nutzbarmachung der elektrischen Energie. [23]

Mit einem Anteil von rund einem Prozent an der Welt-Rohstahlerzeugung, was einer jährlichen Menge von 9 bis 11 Mio. Tonnen entspricht [23], kommt dem Elektroband neben der Kupferfolie die größte Bedeutung für eine rotative Verarbeitung zu.

Grundlegend wird Elektroband in kornorientiert (GO [24] bzw. KO [25]) und nicht kornorientiert (NO [24] bzw. NKO [26]) klassifiziert. GO- bzw. KO-Elektroband wird für Anwendungen mit gerichtetem magnetischem Fluss, beispielsweise Transformatoren, eingesetzt. Die Bänder mit einer sogenannten Goss-Textur weisen ein anisotropes Materialverhalten auf und erfüllen besonders hohe Ansprüche an die magnetischen Eigenschaften. Anders verhält es sich beim NO- bzw. NKO-Elektroband. Die isotrope magnetische Beschaffenheit ermöglicht einen Einsatz in Anwendungen, in denen der magnetische Fluss seine Richtung ändert. Deren wichtigste Vertreter sind rotierende Anwendungen, wie der Elektromotor. [23]

Neben den geometrischen (Dicke, Breite, Balligkeit, Kantenschärfung), den mechanisch-technologischen (Streckgrenze, Zugfestigkeit, Härte, Dehnung, Verarbeitbarkeit) und anderen (chemische Zusammensetzung, Isolation, Wärmeleitfähigkeit und elektrische Leitfähigkeit) Werkstoffeigenschaften, sind besonders die magnetischen Merkmale, wie spezifische

Ummagnetisierungsverluste, Permeabilität und magnetische Polarisierung von hoher Relevanz. [23]

Um die Ummagnetisierungsverluste respektive deren Komponente, die Wirbelstromverluste, in der Anwendung zu reduzieren, wird der magnetische Kern lamelliert ausgeführt. Standardmäßige Stärken für NO-Elektroband sind 0,35 bis 1,00 mm [26]. Aufgrund gestiegener Anforderungen an das Verlustverhalten bei hohen Frequenzen im Automotive-Bereich [27] bietet der Markt aber auch zunehmend dünnere NO-Bänder [24]. NO-Elektrobänder kommen demzufolge optimalerweise mit Stärken zwischen 0,23 bis 0,35 mm [25] zum Einsatz. [23]

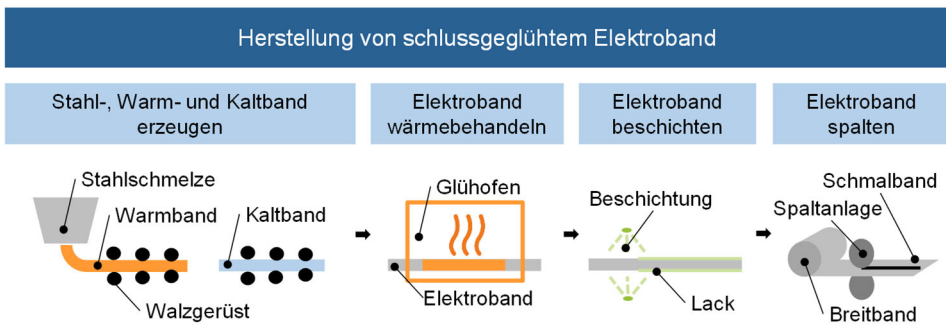


Bild 5: Prinzipielle Prozesskette zur Herstellung von schlussgeglühtem Elektroband [23]

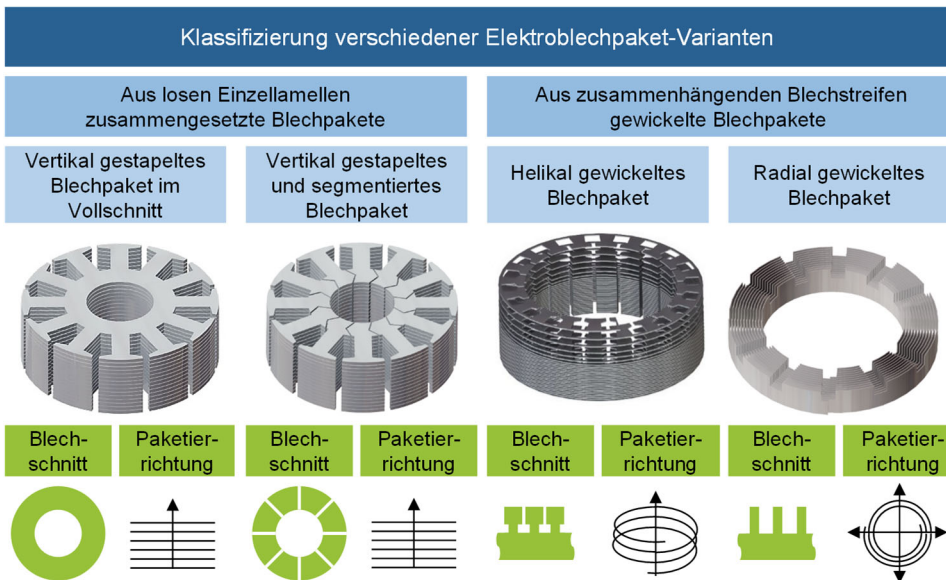


Bild 6: Verschiedene Arten von Elektroblechpaketen

In Bild 5 werden die wesentlichen Prozessschritte zur Herstellung von Elektrobändern skizziert. Ausgangsbasis ist die Stahl-, Warm- und Kaltbänderzeugung. Anschließend werden schlussgeglühte (fully-finished) Bänder [24–26] noch einer Wärmebehandlung zur Einstellung der magnetischen Eigenschaften und einer ein- bzw. beidseitigen Bandbeschichtung mit verschiedenen Lacksystemen [28] von 0,5 bis 10 µm je Seite unterzogen. Abschließend werden die Breitbänder bei Bedarf in Schmalbänder gespalten. Bei nicht schlussgeglühten (semi-finished) Bändern [29] werden diese Schritte erst abschließend nach der Verarbeitung zu Einzellamellen durchgeführt. Da die mechanischen und magnetischen Eigenschaften bei schlussgeglühten Bändern besser eingestellt werden können und eine nachträgliche Wärmebehandlung nicht mehr nötig ist, wird auf dem europäischen Markt nahezu ausschließlich schlussgeglühtes Elektrobänder angewandt. [23]

Die Verarbeitung von Elektrobändern zu Blechpaketen ist ebenso vielfältig, wie auch das fertige Produkt. Das Erzeugnis kann, wie in Bild 6 aufgeführt, als Rotor- und Statorpaket aus einzelnen Vollschnittblechen axial paketiert (klassisch), aber auch zusammengesetzt aus paketierte Zahnsegmenten sein. Weitere Varianten sind helikal (Slinky) oder radial (Axialflussmaschine) gewickelte Blechpakete.

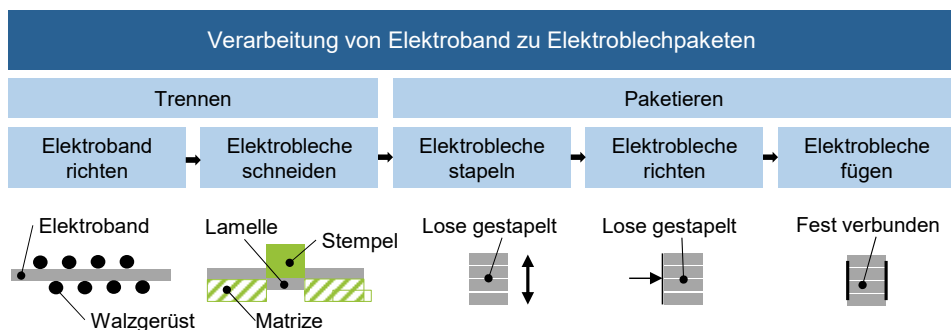


Bild 7: Prinzipielle Prozesskette zur Verarbeitung von Elektrobändern zu Blechpaketen

In der klassischen Prozesskette zur Massenfertigung magnetischer Kerne gemäß Bild 7, wird das Elektrobänder zunächst gerichtet, um eine exakte Ebenheit des Blechbänder sicherzustellen. Aus diesem werden die Einzelbleche im Komplet- oder Folgeschnittverfahren bzw. durch Einzelnutung mit Hubzahlen von 100 bis zu 800 Hüben in der Minute ausgeschnitten. Dabei werden mittlere Bandvorschubgeschwindigkeiten von bis zu 30 m/min erreicht. Die geschnittenen Einzelbleche werden anschließend gerichtet gestapelt und zu einem Paket verbunden. Als Paketierverfahren für die Massenfertigung finden, zumeist hoch integriert in die Prozesskette

oder darüber hinaus in das Werkzeug, das Durchsetzungsfüge- respektive das Stanzpaketieren, das Backlackpaketieren, das Laserstrahl-Schweißpaketieren und das flächige oder lokale Klebepaketieren Anwendung. [23]

Besonders im expandierenden Automotive-Bereich wächst das Interesse an immer leistungsfähigeren Blechpaketen in höchsten Stückzahlen stetig. Diesen Bedürfnissen werden vor allem Backlack-paketierte Blechpakete aus sehr dünnem Elektroband gerecht. Die deutliche Nachfrage nach sinkenden Materialstärken führt zu einer notwendigen Erhöhung der herzustellenden Stückzahlen und damit gleichzeitig zu Herausforderungen im bereits ausgereizten Stanzprozess, vorwiegend bei den Parametern Blechvorschubgeschwindigkeit und Positionierung in den Stufen sowie die Aufnahme der Schnittkräfte im Stanzvorgang. Zusätzlich führt der immer kleinere notwendige Schneidspalt zu engeren Werkzeugtoleranzen und damit verbundenem höheren Aufwand in der Präzision der Werkzeugherstellung. Dadurch sinkt die Wirtschaftlichkeit in der Herstellung von Blechpaketen signifikant, was im Resultat einen Kompromiss zwischen technischen und wirtschaftlichen Zielen erfordert. [27, P1]

### 2.2.2 Kupferfolie für Leiterzüge in Schaltungsträgern

Schaltungsträger sind essenziell für Elektronikanwendungen. Sie stellen eine elektrisch leitende Verbindung unter elektronischen Bauelementen her und übernehmen gleichzeitig weitere notwendige Funktionen, wie die mechanische Anbindung der Bauteile und die thermische Ableitung von elektrischen Verlusten. [30–32]

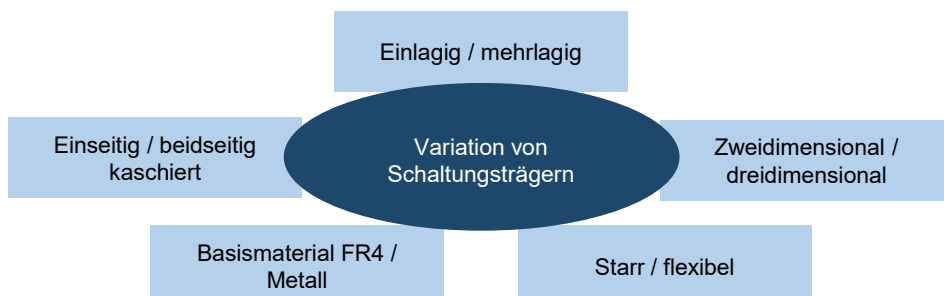


Bild 8: Variation von Schaltungsträgern

Ein Schaltungsträger besteht aus einem Isolierstoff, welcher als Basismaterial dient, auf dem die Leiterzüge aufgebracht sind. Aufgrund mannigfaltiger elektronischer Anwendungen haben sich in der industriellen Massenfertigung vielgestaltige Erscheinungsformen etabliert. Die wesentlichen

Ausprägungen sind starr oder flexibel, ein- oder beidseitig kaschiert, ein- oder mehrlagig sowie zwei- oder dreidimensional. [30, 31]

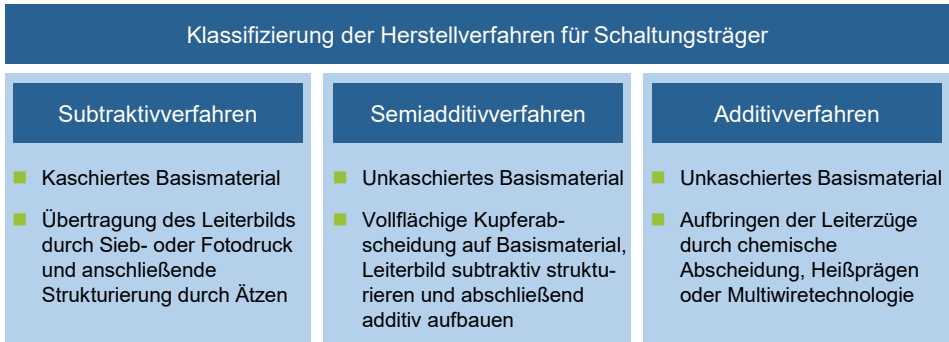


Bild 9: Klassifizierung der Herstellverfahren für Schaltungsträger [30]

Einhergehend mit den unterschiedlichen Charakteristika ist auch die Vielfalt an Verarbeitungstechnologien zur Herstellung der Leiterzüge auf dem Basismaterial. Diese werden, wie Bild 9 zeigt, unterschieden in Subtraktiv-, Semiadditiv- und Additivverfahren. [30]

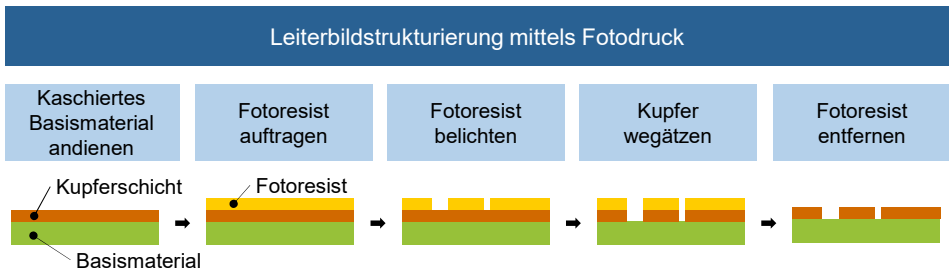


Bild 10: Prinzipielle Prozesskette zur subtraktiven Herstellung von Schaltungsträgern mittels Fotodruck [31]

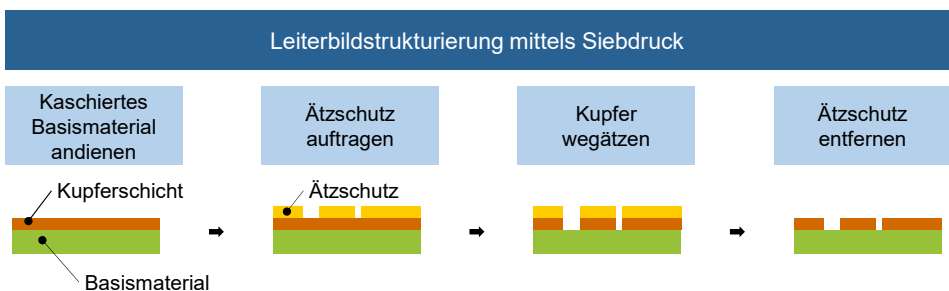


Bild 11: Prinzipielle Prozesskette zur subtraktiven Herstellung von Schaltungsträgern mittels Siebdruck [31]

Subtraktivverfahren sind für starre ein- oder zweiseitige Schaltungsträger Standard. Dabei wird mit verschiedenen Verfahren Kupfer von kupferkaschierten Basismaterialien abgetragen und so die Leiterzüge strukturiert. Weit verbreitet ist die Ätztechnik, bei der das Leiterbild mittels Sieb- oder Fotodruck (siehe Bild 10 und Bild 11) auf die Metallkaschierung übertragen und anschließend durch Ätzen strukturiert wird. Nachteilig sind hierbei besonders die hohen Kupferverluste sowie die Notwendigkeit des Einsatzes von galvanischen Prozessen. Mechanischen Verfahren, wie Abfräsen oder Laserabtragen, fällt aufgrund der geringen Wirtschaftlichkeit in der Serienfertigung kaum Bedeutung zu. [30–32]

In den Additivverfahren ist das Basismaterial immer unkaschiert und die Leiterzüge werden additiv, meist durch chemische Abscheidung, aufgebaut. Galvanische- und Ätzprozesse werden nicht angewandt. Die Vorteile der chemischen Abscheidung der Leiterzüge sind die geringe Anzahl an Prozessschritten sowie die besonders hohe Zuverlässigkeit der Leiterzüge. Nachteilig und damit Kostentreiber sind besonders der hohe Zeitaufwand zur Verarbeitung und die zusätzliche Notwendigkeit von höherwertigen Basismaterialien, die katalysiert oder kernkatalytisch vorbehandelt sind. Die Additivtechnologie ist besonders in der Herstellung dreidimensionaler Schaltungsträger (3D MID) [33] von hoher Relevanz und wird hierfür stetig weiterentwickelt. Weitere, sich etablierende Additivverfahren, sind das Heißprägen, das Plasmadust- [34] und das Aerosol-Jet-Verfahren [33], in denen der strukturierte Leiterzug direkt auf das Substrat appliziert wird. [30, 33]

Beim Semiadditivverfahren wird zunächst auf das unkaschierte Basismaterial mit katalytischer Beschichtung eine ca. 2 µm dicke Kupferschicht abgeschieden. Anschließend wird das Leiterbild als Negativ aufgebracht und die Leiterzüge durch galvanisches Kupfer aufgebaut. Abschließend wird mittels Differenzätzen die chemische Kupferschichtdicke abgetragen. Mit diesem Verfahren wird eine besonders homogene Schichtdicke erzielt und die Gefahr von Unterätzungen sinkt. Nachteilig ist die sehr aufwendige Prozessführung sowie die starke chemische Beanspruchung des Basismaterials. [30]

Kupferfolien werden in der Leiterplattenherstellung fast ausschließlich zum Kaschieren des Basismaterials verwendet. [35–37] Hierbei besonders hervorzuheben sind die ausgezeichneten Eigenschaften von Kupferfolie. Sie besitzt eine hohe elektrische Leitfähigkeit, ist sehr gut wärmeleitend, höchst duktil, ausgezeichnet lötbar und relativ preisgünstig. In starren Leiterplatten wird hauptsächlich elektrolytisch abgeschiedene Kupferfolie

(ED-Kupfer) eingesetzt, gewalzte Kupferfolie (RA-Kupfer) hingegen in flexiblen Schaltungsträgern. Diese Aufgliederung beruht auf den unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften: Während die Zugfestigkeit bei ED-Kupfer zwischen 200 bis 210 MPa liegt, beträgt sie bei RA-Kupfer lediglich 130 bis 140 MPa. Allerdings weist RA-Kupfer gegenüber ED-Kupfer eine höhere Biegefestigkeit und bessere Dehnungseigenschaften auf. Damit die Kupferfolie auf dem Basismaterial haftet, wird auf die matte Seite der Kupferfolie ein ca. 7 bis 10  $\mu\text{m}$  hohes „Treatment“ aufgebracht. Es besteht entweder aus Zink, was beim Verpressen unter Druck und Temperatur durch Diffusion aus der Kupferfolie zu Messing wird, oder direkt aus Messing. Am weitesten verbreitet sind starre Schaltungsträger mit Epoxidharzglasfasergewebe (FR4) als Basismaterial mit typischerweise 35  $\mu\text{m}$  dicker Kupferkassierung, aus der, wie in Bild 10 aufgezeigt, im Subtraktivverfahren die Leiterzüge strukturiert werden. [30–32]

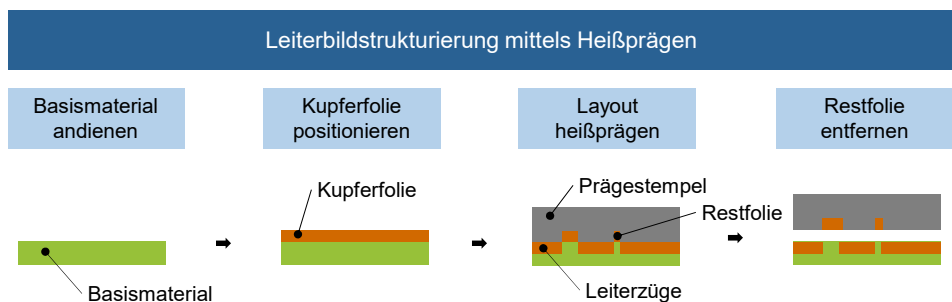


Bild 12: Prinzipielle Prozesskette zur additiven Herstellung von Schaltungsträgern mittels Heißprägen [33]

Weiter veredelt findet Kupferfolie mit der Heißprägetechnik in einem Additivverfahren Einsatz. Die Folie wird zusätzlich versprödet und mit einem einseitigen Hafttreatment, entweder thermisch aktiviertem Klebstoff oder einer Rauheitsstruktur, versehen. Im Heißprägeprozess wird mit einem heißen und dem Leiterbild strukturierten Stempel die Kupferfolie auf das Substrat gepresst und dabei ausgeschert. Dieser Prozess stellt hohe Ansprüche an die verwendete Kupferfolie, das Basismaterial und an die Prozessführung, um die Reproduzierbarkeit prozesssicher zu gewährleisten. Zudem sind die erreichbaren Strukturbreiten und -abstände auf ein Minimum von ca. 0,5 mm begrenzt. Positiv sind die wenigen erforderlichen Prozessschritte, die geringen Investitionskosten und vor allem die Vermeidung von toxischen Stoffen. [30, 33, 38]

### 2.2.3 Legiertes Kupferband für Stanzgitter und Steckverbinder

Stanzgitter sind aus einem Band herausgetrennte Platinen und werden ähnlich einem Schaltungsträger in Anwendungen mit hoher Strombelastung zur Energieverteilung eingesetzt. [39] Steckverbinder hingegen dienen zum Herstellen und Trennen eines elektrischen Kontakts. Legierte Kupferwerkstoffe sind die gebräuchlichsten Werkstoffe für Stanzgitter und Steckverbinder. Diese Werkstoffe sind kostengünstig und erfüllen höchste Anforderungen an elektrische und thermische Leitfähigkeit, Umform- und Stanzbarkeit, Federverhalten sowie Korrosionsbeständigkeit. [40, 41]

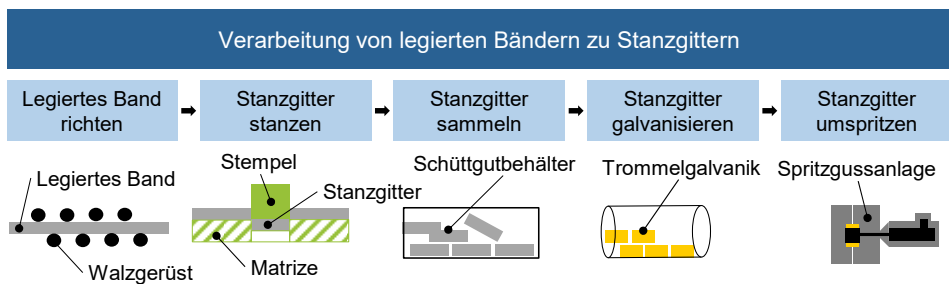


Bild 13: Prinzipielle Prozesskette zur Herstellung von Stanzgittern

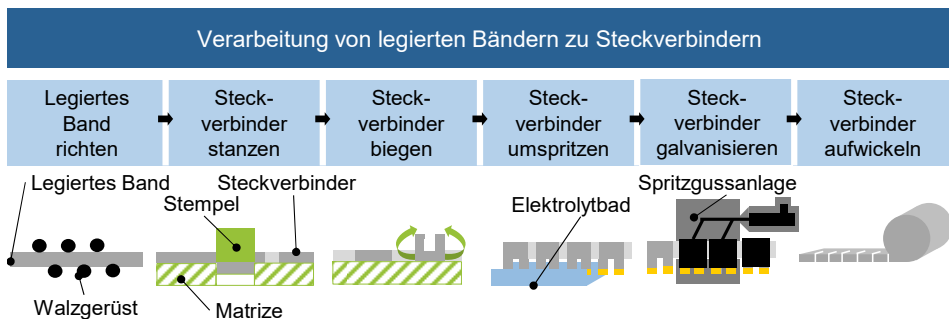


Bild 14: Prinzipielle Prozesskette zur Herstellung von Steckverbindern

Als Ausgangsmaterial für die Verarbeitung zum fertigen Erzeugnis kommen aus gegossenen Formaten gewalzte Bänder mit bis zu 350 mm Breite und mit Materialstärken zwischen 0,10 und 1,50 mm zum Einsatz. [35, 40–42] Stanzgitter und Steckverbinder werden, wie in Bild 13 und Bild 14 dargestellt, im Folgeschnitt bei bis zu 1.200 Hüben pro Minute hergestellt. Teilweise findet im sogenannten Folgeverbund noch eine zusätzliche Umformung statt. Stanzgitter werden in der Regel aus dem Band herausgetrennt, während Steckverbinder im Band verbleiben und wieder aufgewickelt werden. Vornehmlich werden sie nachfolgend offline durch

Oberflächenbehandlungstechniken weiter veredelt und im Kunststoffspritzguss eingehaust, bevor sie in der Elektronik eingesetzt werden. [39]

#### 2.2.4 Lotband für Lotstanz- und Lotformteile

Lotbänder werden industriell zu Lotstanzteilen oder Lotformteilen (Preforms) weiterverarbeitet, welche beispielsweise in der Leistungselektronik zur thermischen Anbindung von Kühlkörpern oder zur Herstellung von elektrischen Kontakten verwendet werden. In sogenannten Flächenlötungen stellen sie sicher, dass ein hoher Benetzungsgrad, einhergehend mit besten thermischen und elektrischen Eigenschaften, erzielt wird. [43–46]

Lote sind meist eutektische oder naheutektische Legierungen mit Anteilen an Zinn, Blei, Kupfer, Silber, Zink, Indium und Cadmium. [47–49] Für eine Verarbeitung zum Lotstanzteil werden diese zu Folien bzw. Bändern gewalzt.

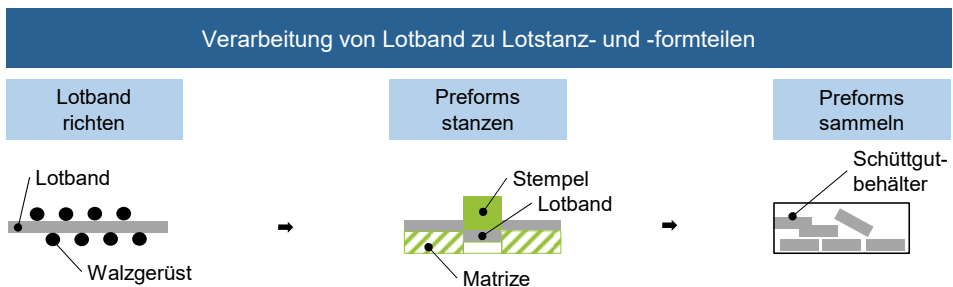


Bild 15: Prinzipielle Prozesskette zur Verarbeitung von Lotband zu Lotstanzteilen

In der klassischen Prozesskette für Lotstanzteile bzw. -formteile, siehe Bild 15, wird das Lotband gerichtet und anschließend ausgestanzt. Für die Weiterverarbeitung werden die einzelnen Lotstanzteile dann gerichtet in Gurten oder Umverpackungen, alternativ auch lose, in meist mit Pappe versteiften Poly-Beuteln verpackt. [50, 51]

### 2.3 Herausforderungen und Lösungsansatz

Die Stärken der Rotationsschneidtechnologie gehen aus den, in Kapitel 2.1 beschriebenen, bereits etablierten Anwendungen hervor. Der Schlüsselfaktor der Technologie für einen effizienten Einsatz in der Massenverarbeitung ist der kontinuierliche Bandvorschub bei gleichzeitiger Verarbeitung des Materials. Dies ermöglicht sehr hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten bei zugleich sehr geringen auftretenden Prozesskräften, resultierend in

kompakten Maschinen mit minimalem Platzbedarf und unwesentlichen Anforderungen an die Aufstellbedingungen. [P2]

Daraus eröffnen sich maßgebliche Chancen für die Anwendung der Rotationsschneidtechnologie auf die in Kapitel 2.1 beschriebenen Einsatzgebiete von metallischen Folien für mechatronische Anwendungen.

<p><b>Stärken</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>■ Kontinuierlicher Prozess</li><li>■ Kompakte Maschinen mit geringer Aufstellfläche</li><li>■ Geringe initiale Investition und Lebensdauerkosten</li><li>■ Geringe Werkzeugkosten</li><li>■ Ressourcenschonendes, energieeffizientes und umweltfreundliches Verfahren</li><li>■ Massentauglich</li></ul>	<p><b>Schwächen</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>■ Schneidprozess ist aufgrund seiner Kinematik sehr komplex</li><li>■ Wenig verfügbare Literatur und dünne Forschungslage</li><li>■ Industrielle Verbreitung fast ausschließlich für Nichtmetalle</li><li>■ Verarbeitung von Metallen nur für Profile mit einfachen Lochungen bei geringen Anforderungen an die Genauigkeit</li><li>■ Vollständig ausgeschnittene Teile erfordern aufwendige Auffang- und Sortiersysteme</li></ul>
<p><b>Chancen</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>■ Besser als bestehende Technologien in der Verarbeitung dünner Metalle</li><li>■ Wirtschaftlicher als Vergleichstechnologien</li><li>■ Einfache Integration in bestehende Wertschöpfungsketten</li><li>■ Zusammenführen von verteilten Wertschöpfungsketten</li></ul>	<p><b>Risiken</b></p> <ul style="list-style-type: none"><li>■ Rotative Schneidverfahren erfüllen nicht die Anforderungen hinsichtlich der Konturkomplexität</li><li>■ Trennvorgang und damit verbundene Beeinflussung der Schneidzone führt zur Beeinträchtigung der Materialfunktionen</li><li>■ Verfahrensgrenzen (Beschädigung an Werkzeug oder Produkt) zu eng für mechatronische Produkte</li></ul>

Bild 16: SWOT-Analyse zum Einsatz der Rotationsschneidtechnologie in der Verarbeitung von Metallfolien

Die Rotationsschneidtechnologie ist besonders prädestiniert für dünne Materialien und in diesem Bereich der Hubstanztechnologie deutlich überlegen. Anders als beim Hubstanzen ist der Materialvorschub hierbei nicht getaktet, sondern das Material wird fortlaufend und somit ohne Auftreten von Beschleunigungskräften, die Knitterbildung zur Folge haben, durch den Prozess geführt. Zudem entfallen aufwendige Positionierprozesse zwischen den einzelnen Fertigungsstufen. Dieser Umstand wird dadurch begünstigt, dass fortwährend nur ein partieller Werkzeugteil im Eingriff befindlich ist. Damit sind die auf das Material wirkenden Schneidkräfte gering und die Zielkontur kann in einer Werkzeugstufe schonend hergestellt werden. [P2]

Ein weiterer nennenswerter Aspekt ist, dass sich der Prozess relativ einfach in bestehende Wertschöpfungsketten integrieren lässt. Den einfachsten

Ansatz, die Rotationsschneidtechnologie für die Verarbeitung mechatronischer Produkte zu verwenden, stellt die Substitution von bereits vorhandenen Stanz- oder Schneidanlagen für Schüttgut dar. Die notwendige Anlagenerstinvestition fällt damit gering aus und die Effizienz- und Produktivitätssteigerung kann unmittelbar ausgeschöpft werden. Anwendungen, die diese Kriterien erfüllen, sind beispielsweise die in Kap 2.2 vorgestellte Verarbeitung von Lotband zu Lotstanz- oder -formteilen und die Erzeugung von Stanzgittern aus legiertem Kupferband.

Hubstanzanlagen haben aufgrund ihrer Größe und der beträchtlichen bewegten Massen oft sehr hohe Anforderungen an ihre Umgebung, insbesondere an das Bodenfundament. Deshalb können diese meist nicht direkt an der optimalen Wirkungsstelle im Fertigungsbereich installiert und integriert werden. Anders verhält sich dies bei Rotationsschneidanlagen, welche aufgrund ihrer Kompaktheit und geringen Anforderungen an die Produktionsumgebung und Infrastruktur nahezu uneingeschränkt aufgestellt werden können. [P2] So auch direkt innerhalb der Prozesskette, in der das hergestellte Halbzeug weiterverarbeitet wird. Damit lassen sich bisher zwangsläufig unterbrochene und verteilte Wertschöpfungsprozesse zukünftig wieder taktoptimiert und geschlossen lokalisieren.

Damit erreicht der Einsatz der Rotationsschneidtechnologie durch die Kompaktheit und Integrierbarkeit der Anlagen bei gleichzeitig deutlich höherer Ausbringung und Effizienz ein maßgeblich höheres Leistungsniveau. Bei gleichbleibender Qualität und Verfügbarkeit stellt dies ein enormes Potenzial zur Produktivitätssteigerung dar und der höhere Output pro Inputeinheit ist in der Anwendung für ein gesteigertes Wachstum oder eine größere Wettbewerbsfähigkeit verfügbar.

Neben den benannten Potenzialen weist die Rotationsschneidtechnologie allerdings auch nennenswerte Schwächen für die Verarbeitung von dünnen Metallfolien auf. Aufgrund seiner komplexen und inhomogenen Kinematik weist der Rotationsschneidprozess in jedem Punkt des Trennvorgans ein unterschiedliches Prozessverhalten auf. Damit ist er, trotz Kinematikanalysen und -simulationen mit einhergehenden Optimierungen [P3, 19, 52] der einzelnen Schneidphasen als Ganzes nur sehr schwer beherrschbar.

Das Verfahren ist, wie die Analyse zum Stand der Technik verdeutlicht, wenig erforscht und wie bereits erfolgreich umgesetzte Anwendungen belegen, ist das begrenzte Wissen unzugänglich in den technologieaffinen Unternehmen isoliert. Anwendung findet die Rotationsschneidtechnologie derzeit fast ausschließlich für Nichtmetalle sowie für offene Endloskonturen, bei welchen die Ausschnitte immer den Verschnitt bilden. Somit sind

Erfahrungswerte für die Verarbeitung von dünnen Metallen mit komplexen und geschlossenen Konturen sowie für effiziente Sortiersysteme kaum bis nicht vorhanden.

Die größten Risiken resultieren vorwiegend aus den hohen Anforderungen an die mechatronischen Produkte selbst. Die in Kap 2.1 vorgestellten Anwendungen mit eingesetzten Folien und Bändern, weisen nach ihrer Verarbeitung komplexe Strukturen auf und erfüllen zugleich wichtige mechanische, thermische, chemische, elektrische und magnetische Funktionen im späteren Enderzeugnis, z.B. in Schaltungsträgern oder bei Elektrobändlamellen. In der Papier- und Kunststoffverarbeitung, siehe auch Kapitel 2.2, werden bereits komplexere Geometrien rotativ geschnitten, geprägt und perforiert. Der Prozess ist aber nicht direkt auf die Verarbeitung dünner Metalle übertragbar, was besonders auf die unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften von Papier, Kunststoffen und Metallen zurückzuführen ist. Um Metalle zu schneiden, müssen die Werkzeuge im Vergleich zu denen der Papier- und Kunststoffverarbeitung deutlich robuster in Bezug auf ihre mechanische Festigkeit, Steifigkeit und Härte ausgeführt sein, um den auftretenden hohen Verarbeitungskräften Stand zu halten. Zusätzlich muss sichergestellt werden, dass die hohe Präzision und die gute Reproduzierbarkeit auch bei den unterschiedlichen Formen und Materialien, die in mechatronischen Produkten Verwendung finden, zuverlässig erhalten bleiben. Hierbei sind vor allem die in der Elektronikproduktion und allgemein in der Blechverarbeitung geringen Toleranzen zwingend zu erreichen.

Aber auch die Integration der Rotationsschneidtechnologie in die bestehenden Wertschöpfungsketten, siehe Kapitel 2.1, stellt ein weiteres prozessspezifisches Risiko dar. Ein allgemeingültiger Ansatz existiert nicht und die Verfahrensgrenzen müssen für den jeweiligen Anwendungsfall individuell analysiert und spezifiziert werden.

Wie die Schwächen und Risiken zeigen, ist eine pauschale Übertragbarkeit der Rotationsschneidtechnologie auf die Verarbeitung von dünnen Metallfolien für mechatronische Produkte ist nicht gegeben. Diese können allerdings gleichzeitig als Herausforderungen verstanden werden und werden im Folgenden dieser Dissertation adressiert.

### 3 Technologische Merkmale des Rotations-schneidprozesses<sup>2</sup>

Eine konventionelle Rotationsschneidanlage besteht im Wesentlichen aus zwei gegeneinander rotierenden Zylindern. Dieses Zylinderpaar bildet das Werkzeug, welchem das Schneidgut zugeführt wird und gleichzeitig in der Rotationsbewegung den Trennvorgang durchführt.

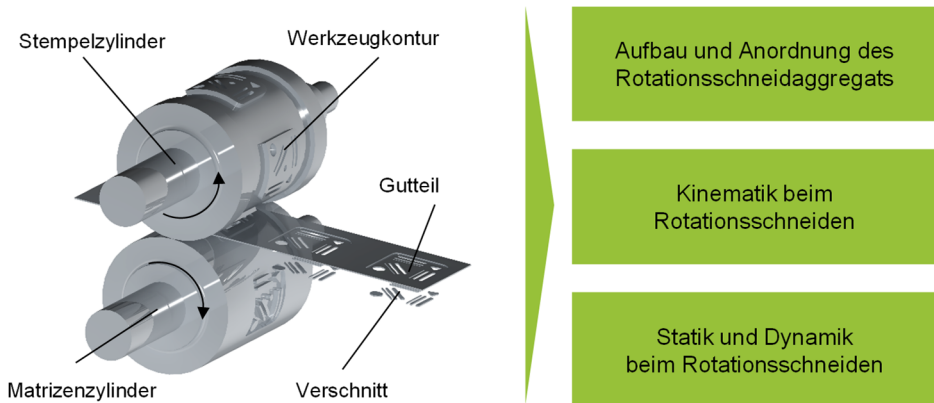


Bild 17: Abstraktion des Rotationsschneidprozesses in Anlagenaufbau, Kinematik und Dynamik

Zur Ausrichtung des Rotationsschneidprozesses auf die Verarbeitung mechatronischer Produkte bilden die Anlagen- sowie prozessspezifischen Parameter (gemäß Bild 17) das zentrale Fundament und werden nachfolgend im Allgemeinen dargestellt. Insbesondere wird zunächst unabhängig vom gewählten rotativen Schneidverfahren (siehe Kapitel 4) der allgemeine Prozessablauf mit den wichtigsten Parametern abgebildet.

#### 3.1 Anlagenaufbau und Werkzeuganordnung beim Rotationsschneiden

Der Anlagenaufbau hat wesentlichen Einfluss auf den Prozess. Besonders die geometrische Anordnung, die Schneidgutlage und die Schneidgutzufuhr sind bestimmend für den Schneidprozess und die damit verbundenen

---

<sup>2</sup> In der Erarbeitung der Inhalte zu diesem Kapitel wurde ich unterstützt von T. Müller [S2], H. Rosenow [S3], L. Spannraft [S4], M. Weigelt [S5] und M. Ziegler [S6].

verschiedenen Eingriffsphasen. Diese sind abhängig von der Vorschubrichtung, dem Auftreffwinkel, der Eingriffslänge sowie der spezifischen Verteilung der Gesamtkontur auf der Werkzeugmantelfläche.

### 3.1.1 Geometrische Anordnung der Werkzeugzylinder

Definiert wird der Aufbau der Prozessstruktur maßgeblich durch die geometrische Anordnung der Werkzeugzylinder zueinander sowie deren Durchmesser-Verhältnisse. Bild 18 zeigt eine Übersicht der geometrischen Parameter an Stempel- und Matrizenzylinder. Der Stempelzylinder ist entsprechend mit „ST“ oder „st“ und der Matrizenzylinder mit „MA“ oder „ma“ indiziert.

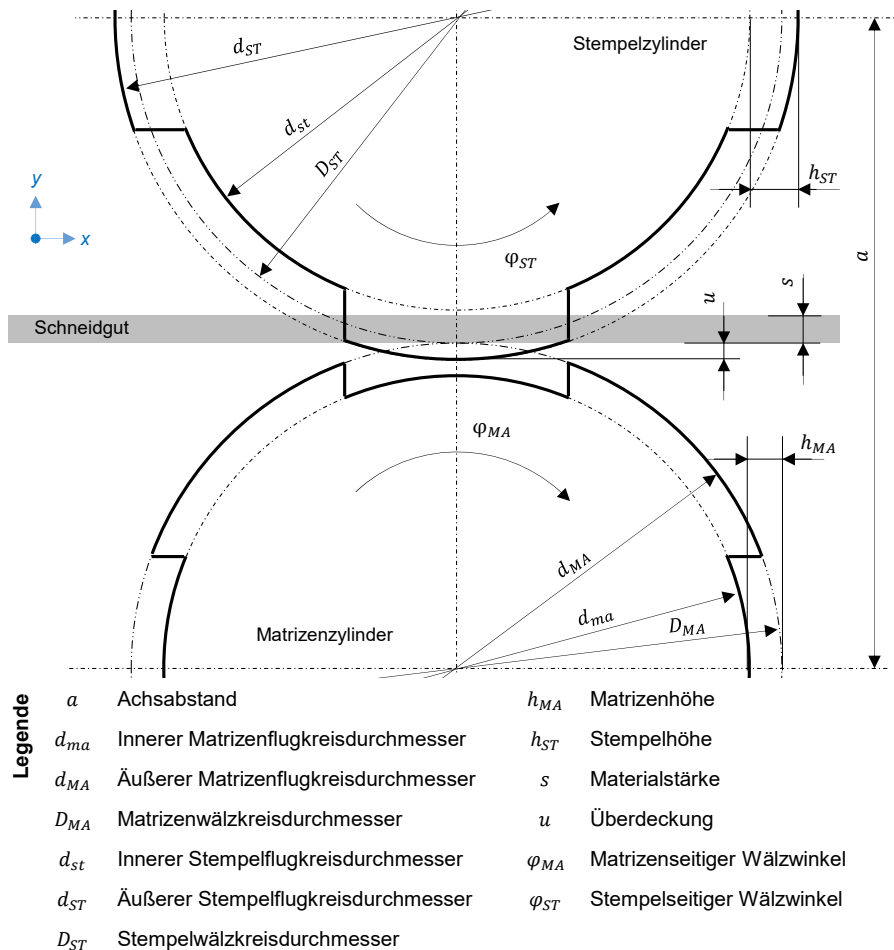


Bild 18: Geometrischer Aufbau der Prozessstruktur (angelehnt an [P4])

Der Stempel beschreibt bei seiner Drehung um die Zylinderachse eine Kreisbahn, die als äußerer bzw. innerer Flugkreisdurchmesser  $d_{ST}$  bzw.  $d_{st}$  bezeichnet wird. Analog dazu sind die beiden Matrizenflugkreisdurchmesser  $d_{MA}$  bzw.  $d_{ma}$  definiert. Die jeweiligen Wälzkreisdurchmesser  $D_{ST}$  bzw.  $D_{MA}$  beschreiben, wie die Werkzeuge gegenläufig aufeinander abrollen. Diese werden im Schneidaggregat häufig durch außenliegende, in die Werkzeugzylinder integrierte Laufflächen, den sogenannten Distanzringen, abgebildet.

Aus dem Verhältnis der Wälzkreisdurchmesser von Matrizenzylinder  $D_{MA}$  und Stempelzylinder  $D_{ST}$  resultiert auch das Übersetzungsverhältnis der Werkzeugpaarung  $i_W$ :

$$i_W = \frac{D_{ST}}{D_{MA}} \quad (1)$$

Für synchrone Werkzeugsysteme, wie beispielsweise der Stempel-Matrizenanordnung, muss sichergestellt sein, dass  $i_W$  einem rationalen, periodischen Verhältnis zwischen der Anzahl an Werkzeugnestern von Stempel und Matrize entspricht ( $i_W = \mathbb{Q}$ ). Für eine identische Nestanzahl resultiert  $i_W = 1$ . Für einseitige Werkzeugsysteme mit konturlosem Gegenwerkzeug empfiehlt es sich dagegen, ein irrationales, nicht periodisches Übersetzungsverhältnis einzustellen ( $i_W = \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ ), um eine inhomogene Abnutzung am Gegenwerkzeug herbeizuführen und somit die Werkzeugstandzeit zu erhöhen.

Der Achsabstand  $a$  der Werkzeugzylinder errechnet sich aus den Wälzkreisdurchmessern von Stempel  $D_{ST}$  und Matrize  $D_{MA}$ . Prinzipiell kann der Achsabstand  $a$  im Schneidaggregat neben dem vertikalen Versatz  $a_y$  auch einen horizontalen Versatz  $a_x$  aufweisen.

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2} = \frac{(D_{ST} + D_{MA})}{2} \quad (2)$$

Die Überdeckung  $u$  zwischen Stempel und Matrize errechnet sich aus dem Achsabstand  $a$  und den äußeren Flugkreisdurchmessern von Stempel  $d_{ST}$  und Matrize  $d_{MA}$ . Dringt der Stempel in die Matrize ein, ist die Überdeckung positiv  $u > 0$ , bleibt der Stempel vor der Matrize stehen, ist die Überdeckung negativ  $u < 0$ .

$$u = \frac{(d_{ST} + d_{MA})}{2} - a \quad (3)$$

Die Stempel- sowie Matrizenhöhe, definiert als  $h_{ST}$  respektive  $h_{MA}$ , errechnet sich aus der Differenz der äußeren ( $d_{ST}, d_{MA}$ ) bzw. inneren Flugkreisdurchmesser ( $d_{st}, d_{ma}$ ) der Schneidwerkzeuge.

$$h_{ST} = \frac{(d_{ST} - d_{st})}{2} \quad (4)$$

$$h_{MA} = \frac{(d_{MA} - d_{ma})}{2} \quad (5)$$

Um das Schneidgut nicht zwischen den Werkzeugzylindern zu quetschen und dem Schneidprozess genügend Freiraum einzuräumen, müssen die Werkzeughöhen  $h_{ST}$  und  $h_{MA}$  größer oder gleich der Materialstärke  $s$  addiert mit der Überdeckung  $u$  gewählt werden.

$$h_{ST}; h_{MA} \geq s + u \quad (6)$$

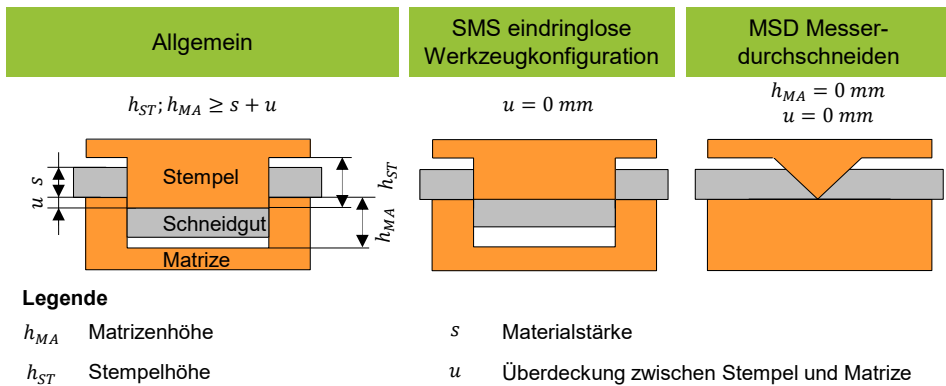


Bild 19: Ausprägungen von Überdeckung  $u$ , Materialstärke  $s$  und Werkzeughöhen  $h_{ST}$ ;  $h_{MA}$  zu Formel (6)

Gleichung (6) beschreibt hierbei den allgemeinen Fall und ist auf die jeweilige Ausprägung hin anzupassen (siehe Bild 19). Die zugehörige allgemeine Darstellung ist dabei so gewählt, dass das Verständnis über das Zusammenwirken möglichst transparent wird. Die beiden rechten Darstellung bedienen bereits Sonderfälle, bei denen der Stempel nicht in die Matrize eintaucht. Dadurch minimiert sich die Stempel- und Matrizenhöhe im Schneidbereich, was sich wiederum, durch die reduzierten Auslenkungen in der Zykloidenbewegung, positiv auf die Kinematik auswirkt. Besonders im Stempel-Matrize-Schneiden SMS stellt diese Konfiguration eine Innovation dar, auf welche in Kapitel 4 im Detail eingegangen wird.

### 3.1.2 Blech- bzw. Schneidgutlage

Im Rotationsschneidprozess kann das Schneidgut auf unterschiedlichen Höhenlagen bewegt werden. Hierbei wird von Blech- oder Schneidgutlagen  $BL$  gesprochen. Nach [16] handelt es sich um die Position des Schneidguts in Abhängigkeit zum Wälzkreisdurchmesser des Matrizenzylinders  $D_{MA}$ .

$$BL = k_{BL} \cdot s \quad (7)$$

Der Blechlagenfaktor  $k_{BL}$  wird mit nachfolgender Formel [16] berechnet:

$$k_{BL} = \frac{d_{MA} + s - D_{MA}}{2 \cdot s} \quad (8)$$

Die Schneidgutlage wird anlagen- bzw. werkzeugseitig eingestellt und lässt sich gegebenenfalls zusätzlich durch den Einsatz von Trägerfolien verändern. Im technischen Kontext haben sich drei Schneidgutlagen bewährt, die nachfolgend eingeführt werden:

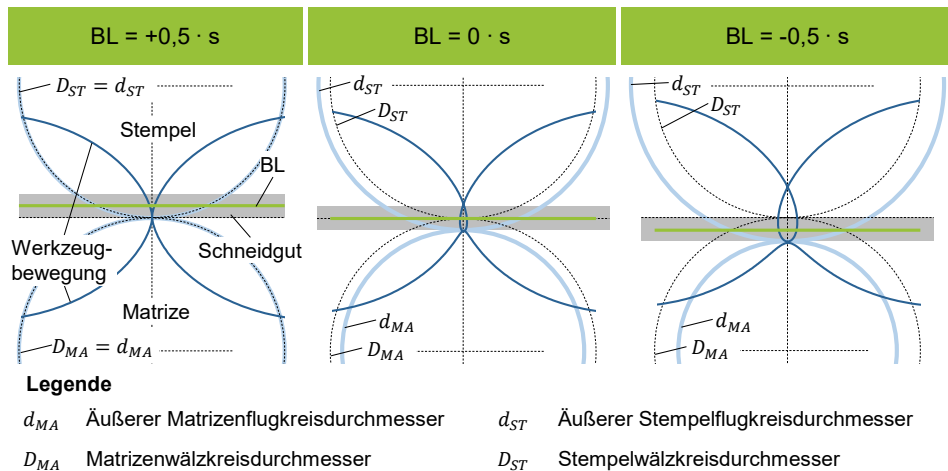


Bild 20: Gängige Schneidgutlagen im Rotationsschneidprozess (nach [16])

Bild 20 zeigt die gängigen Schneidgutlagen exemplarisch für synchronlaufende Werkzeugzylinder bei gleich großen Wälzkreisdurchmessern  $D_{ST} = D_{MA}$ .

Die Schneidgutlage  $BL = +0,5 \cdot s$  ist kinematisch die günstigste Schneidgutlage [16] und hat sich als Standardvariante in industriellen Anwendungen etabliert. Dabei liegt die Schneidgutunterseite auf den Wälzkreisdurchmessern auf und die Schneidgutmittelebene um die halbe

Materialstärke  $s$  versetzt darüber [16]. Für synchrone Werkzeugsysteme entsprechen die äußeren Flugkreisdurchmesser  $d_{ST}$  bzw.  $d_{MA}$  von Stempel und Matrize den jeweiligen Wälzkreisdurchmessern  $D_{ST}$  bzw.  $D_{MA}$ . Die resultierende Werkzeugbewegung nimmt die Form einer gewöhnlichen Epizykloide an (siehe Kapitel 3.2.2).

Ein weiterer Vorteil dieser Blechlage ist, dass der Einfluss, der aus den Epizykloidenbahnen resultierenden Werkstoffverdrängung und den damit verbundenen Tangentialkräften am geringsten ist und somit die resultierende Schneidkraft  $F_S$  um etwa 30 % niedriger gegenüber der Blechlage  $BL = 0 \cdot s$  ist. [17]

In der Schneidgutlage  $BL = 0 \cdot s$  treffen sich die beiden Wälzkreise  $D_{ST}$  und  $D_{MA}$  exakt in der Mittelebene des Schneidguts (vgl. Bild 20) [16]. Die äußere Stempelflugbahn entspricht damit einer verlängerten und die äußere Matrizenflugbahn einer verkürzten epizykloidalen Bewegung (siehe Kapitel 3.2.2).

In der Schneidgutlage  $BL = -0,5 \cdot s$  befindet sich die Schneidgutoberseite auf den beiden Wälzkreisen  $D_{ST}$  bzw.  $D_{MA}$  und die Schneidgutmittelebene um die halbe Materialstärke  $s$  nach unten versetzt [16]. Die Gegebenheiten, wie bei Schneidgutlage  $BL = 0 \cdot s$  beschrieben, verschärfen sich hier noch einmal zusätzlich.

Bei ungleichem Übersetzungsverhältnis  $i_W$ , z.B. bei planarem Gegenschneidzylinder, können sich die beiden Wälzkreisdurchmesser  $D_{ST}$  bzw.  $D_{MA}$  unterscheiden und somit den geometrischen Aufbau beeinflussen. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf die Schneidgutlage  $BL$  selbst.

Vor dem Hintergrund, dass sich  $BL = +0,5 \cdot s$  als industrieller Standard etabliert hat und die anderen Blechlagen sich, wie vorangehend beschrieben, negativ auf den Prozess auswirken, findet im Rahmen dieser Dissertation in den weiteren Ausführungen ausschließlich diese Blechlage Berücksichtigung.

### 3.1.3 Varianten der Schneidgutzufuhr

Wird das Schneidgut auf einer Ebene, die tangential auf dem Matrizenzylinder und parallel zur X-Achse (Vorschubrichtung) liegt, durch das Zylinderpaar geführt, so bewegen sich die Punkte auf dem Stempelzylinder relativ zum Schneidgut auf verkürzten, gemeinen oder verlängerten Zykloidenbahnen. Die Leitbahn ist dabei eine Gerade und kann, wie in Bild 21 links gezeigt, anschaulich als der ebene Schneidgutstreifen verstanden werden.

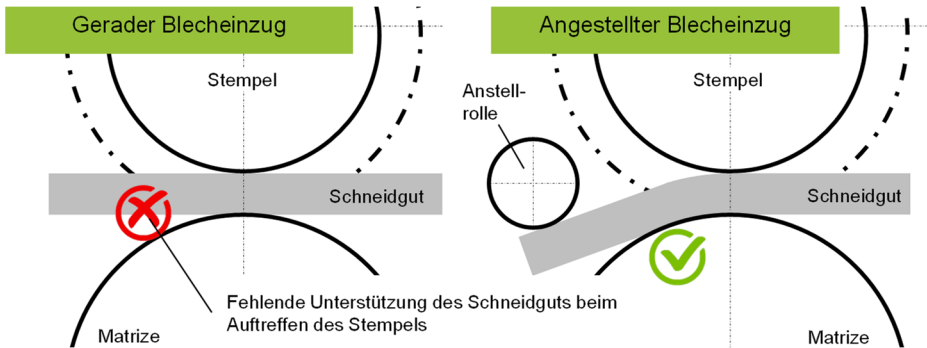


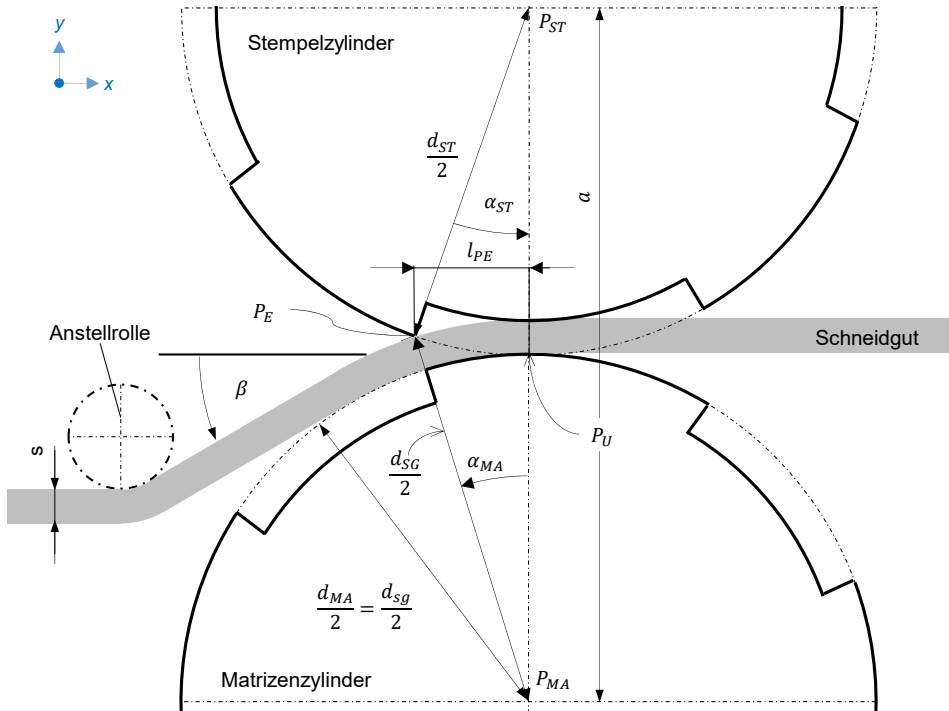
Bild 21: Gerader (l.) und angestellter (r.) Schneidguteinzug

Aufgrund des ziehenden Schnitts sowie des geraden Schneidguteinlaufs (siehe Bild 21 links) kommt es ab dem Zeitpunkt des Stempelgriffs durch die fehlende Anlage des Schneidguts an den Matrizenzyylinder zu Biegemomenten und somit zu einer Deformation desselben. Der Abstand zwischen dem Angriffspunkt der resultierenden Stempelkraft und der Rissfront in der Trennungszone bewirkt das Moment auf die Schneidgutbahn. Infolgedessen kommt es meist zu plastischer und somit dauerhafter Verformung des Werkstücks.

Das resultierende Biegemoment und das dadurch verursachte Wölben kann durch verschiedene Maßnahmen reduziert und sogar abgestellt werden. Dazu gehören beispielsweise der Schmierstoffeinsatz beim Schneidwerkzeug und dem Schneidgut, ein geringfügig größerer Durchmesser des Matrizenzyinders oder ein horizontaler Achsversatz  $a_x$ . Die gängigste Abstellmaßnahme ist die Anstellung des Schneidguts vor und nach dem Schneidgutein- bzw. -auslauf. Dies wird beispielsweise durch Anstellrollen, wie in Bild 21 rechts dargestellt, umgesetzt und ist nach diesem Prinzip in vielen der existierenden Anlagen realisiert. [19] Der Schneidgutstreifen wird dabei an der Oberfläche bzw. Mantelfläche des Matrizenzyinders angelegt. Es handelt sich um einen angestellten Schneidguteinlauf und -vorschub; das Maß für die Anstellung ist in Gleichung 11 (siehe Kap 3.1.4) als Anstellwinkel  $\beta$  definiert. Zusätzlich wird mit dieser Maßnahme die Auflagefläche des Schneidguts vergrößert und die Stabilität des Schneidgutlaufs nimmt zu.

### 3.1.4 Eingriffspunkt, -winkel und -länge

Der Eingriffspunkt  $P_E$  ist der Punkt, in dem der Stempel auf der Schneidgutoberseite auftrifft und der Schneidvorgang beginnt. Bild 22 veranschaulicht dies für die angestellte Schneidgutzufuhr.



<b>Legende</b>	$a$	Achsabstand	$P_E$	Punkt - Eingriff
	$d_{MA}$	Äußerer Matrizenflugkreisdurchmesser	$P_{MA}$	Mittelpunkt vom Durchmesser des Matrizenzylinders
	$D_{MA}$	Matrizenwälzkreisdurchmesser	$P_{ST}$	Mittelpunkt vom Durchmesser des Stempelzylinders
	$d_{sg}$	Durchmesser innere Krümmung Schneidgut	$P_U$	Punkt - Umkehr
	$d_{SG}$	Durchmesser äußere Krümmung Schneidgut	$s$	Materialstärke
	$d_{st}$	Innerer Stempelflugkreisdurchmesser	$\alpha_{MA}$	Matrizenseitiger Eingriffswinkel
	$d_{ST}$	Äußerer Stempelflugkreisdurchmesser	$\alpha_{ST}$	Stempelseitiger Eingriffswinkel
	$D_{ST}$	Stempelwälzkreisdurchmesser	$\beta$	Anstellwinkel am Stanzguteinlauf
	$l_{PE}$	Prozesseingriffslänge		

Bild 22: Geometrische Parameter des Schneidbereichs (angestellte Schneidgutzufuhr) [P4]

Durch das Anlegen des Schneidguts an den Matrizenzylinder wird die Oberfläche des Schneidguts im Auflagebereich zwischen den Anstellrollen als nahezu zylindrisch angenommen. Der untere Krümmungsdurchmesser des Schneidgutbands  $d_{sg}$  entspricht immer dem Matrizenaußendurchmesser  $d_{MA}$ :

$$d_{sg} = d_{MA} \quad (9)$$

Der Durchmesser der Schneidgutoberseite  $d_{SG}$  entspricht der Summe aus Matrizenaußendurchmesser  $d_{MA}$  und der zweifachen Materialstärke  $s$  (vgl. auch Bild 19):

$$d_{SG} = d_{MA} + 2 \cdot s \quad (10)$$

Der stempelseitige Eingriffswinkel  $\alpha_{ST}$  am Stempelzylinder beschreibt den Schnittwinkel zwischen der Y-Achse und dem zum Eingriffspunkt  $P_E$  von Stempel und Schneidgut gerichteten Vektor  $\vec{0, 5 \cdot d_{ST}}$ . Für ein Zerteilen des Schneidguts in Y-Richtung muss von Eingriffspunkt  $P_E$  bis Umkehrpunkt  $P_U$  für den stempelseitigen Wälzwinkel  $\varphi_{ST}$  das Intervall  $[\alpha_{ST}, 0^\circ]$  durchlaufen werden. Der Winkel  $\alpha_{MA}$  auf der Matrizenenseite bildet das Pedant zum Eingriffswinkel  $\alpha_{ST}$ , also das Intervall  $[0^\circ, \alpha_{MA}]$ .

Die beiden Werkzeugzylinder-Mittelpunkte  $P_{ST}$ , respektive  $P_{MA}$  sowie der Eingriffspunkt  $P_E$  auf der Schneidgutoberfläche definieren ein Dreieck mit den Seiten Achsabstand  $a$ , dem halben Stempeldurchmesser  $d_{ST}$  und dem halben Durchmesser auf der Schneidgutoberseite  $d_{SG}$ . Mit dem Kosinussatz lässt sich somit der Eingriffswinkel  $\alpha_{ST}$  in Abhängigkeit der Größen  $d_{ST}$ ,  $d_{SG}$  und  $a$  wie folgt ausdrücken:

$$\alpha_{ST} = -\cos^{-1} \left( \frac{\left(\frac{d_{ST}}{2}\right)^2 + a^2 - \left(\frac{d_{SG}}{2}\right)^2}{d_{ST} \cdot a} \right) \quad (11)$$

Für den Sonderfall, dass Stempel- und Matrizenaußendurchmesser den Wälzkreisdurchmessern entsprechen ( $D_{ST} = d_{ST}$ ;  $D_{MA} = d_{MA}$ ), der Stempel nicht in die Matrizenseite eintaucht, sondern auf dem Matrizenaußendurchmesser abrollt ( $u = 0$ ) und die beiden Wälzkreisdurchmesser identisch sind ( $D_{ST} = D_{MA}$ ), können die Werkzeugaußendurchmesser mit dem Achsabstand gleichgesetzt werden ( $a = d_{ST} = d_{MA}$ ). Daraus ergibt sich für den Winkel  $\alpha_{ST}$  folgende Vereinfachung, welche nur noch vom Verhältnis aus Materialstärke  $s$  zum Achsabstand  $a$  abhängig ist:

$$\alpha_{ST} = -\cos^{-1} \left( 1 - \frac{s}{a} - \left(\frac{s}{a}\right)^2 \right) \quad (12)$$

Der Eingriffswinkel der Matrizenseite  $\alpha_{MA}$  errechnet sich aus dem Verhältnis der Durchmesser  $d_{ST}$  und  $d_{MA}$ :

$$\alpha_{MA} = -\frac{d_{ST}}{d_{SG}} \cdot \alpha_{ST} \quad (13)$$

Die Winkel  $\alpha_{ST}$  und  $\alpha_{MA}$  definieren gleichzeitig die Stellung der Werkzeugflanken von Stempel und Matrize zu Schneidbeginn im Eingriffspunkt  $P_E$ .

Als Prozesseingriffslänge  $l_{PE}$  wird, wie in Bild 22 dargestellt, vereinfacht die Projektion des durch  $\alpha_{ST}$  eingeschlossenen Kreisbogens auf die X-Achse angenommen:

$$l_{PE} = \sin(|\alpha_{ST}|) \cdot \frac{d_{ST}}{2} \quad (14)$$

Um im Eingriffspunkt  $P_E$  eine tangential, an den Matrizenzylinder angeordnete Schneidgutbandzufuhr zu erreichen, wird das Schneidgut um den Schneidguteinlaufwinkel  $\beta$  angestellt. Um dabei eine vollständige Unterstützung des Schneidguts im Prozess zu gewährleisten, muss der Einlaufwinkel  $\beta$  vereinfacht ausgedrückt größer als der Matrizenauftreffwinkel  $\alpha_{MA}$  addiert mit einer zusätzlichen Sicherheit von mindestens zwei Grad sein. Siehe auch Kapitel 3.1.3.

$$\beta > \alpha_{MA} + 2^\circ \quad (15)$$

Für den geraden Schneidguteinlauf, welcher im Rahmen dieser Dissertation nicht weiter berücksichtigt wird, ist dieser Winkel  $\beta$  naturgemäß null.

### 3.1.5 Schneidphasen im Prozess

Anders als im Hubstanzprozess, wo das Werkzeug in Bezug auf die Blechebene eine senkrechte translatorische Bewegung durchführt und damit idealerweise in einem immer gleichen Schneidvorgang über die gesamte Kontur resultiert, führen die Werkzeuge im Rotationsschneidprozess eine in Vorschubrichtung zyklodische Bewegung aus (siehe Kap 3.2.2). Die Stellung der Schneidkonturprojektion in Bezug auf die Schneidgutbandvorschubrichtung hat einen maßgeblichen Einfluss auf den Schneidprozess: Steht die Schneide senkrecht zur Vorschubrichtung, spricht man von einem drückend-vollkantigen Schnitt; steht die Schneide längs zur Vorschubrichtung, tritt ein ziehend-kreuzender Schnitt ein [19]. Im Folgenden werden die verschiedenen Schneidphasen im Rotationsschneidprozess nach [19] exemplarisch an einer Rechteckkontur erläutert.

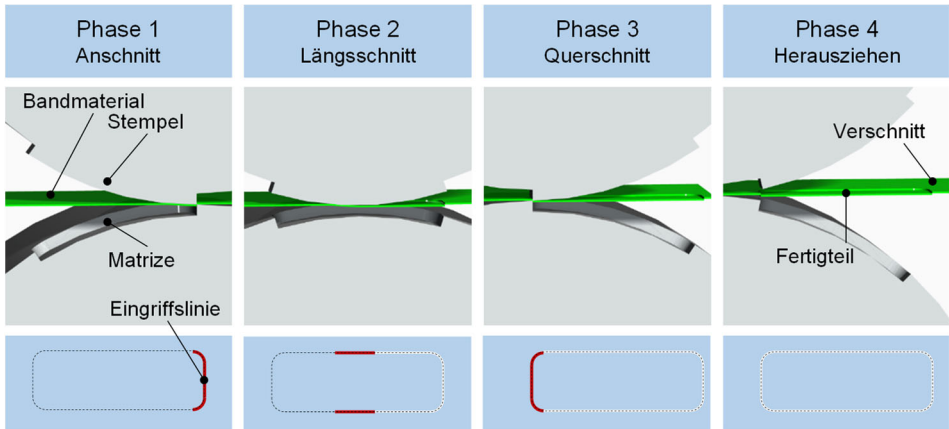


Bild 23: Phasen beim Rotationsschneiden [19] am Beispiel einer Rechteckkontur

In **Phase 1** berührt der Stempel mit der vorderen Schneide das Schneidgut und leitet so den drückend-vollkantigen Schnitt ein. Es kommt zu einem kontinuierlichen Anstieg der Schneidkraft, bis das Schneidgut durchstoßen wird.

In **Phase 2** reduziert sich die Kraft wieder und der Kraftangriffswinkel verlagert sich. Es kommt zum Ausformen der Seitenflächen durch ein ziehend-kreuzendes Schneiden. In dieser Phase bleibt der Kraftverlauf annähernd konstant und liegt unterhalb der Maximalkraft von Phase 1.

In **Phase 3** trifft die hintere Schneide auf das Schneidgut und beendet so durch einen annähernd drückend-vollkantigen Schnitt den Prozess. Dort kommt es zunächst zu einem Kraftanstieg und abschließend zu einem abrupten Kraftabfall nach Durchtrennung des Schneidguts.

In **Phase 4** wandert der Stempel aus dem Schnittbereich heraus. Dort treten keine großen Kräfte auf, jedoch kann es zu einem Abheben des Schneidguts vom Matrizenzylinder kommen, da der Stempel das Schneidgut mit nach oben zieht.

Die Schneidphasen treten im kontinuierlichen Prozess nicht isoliert voneinander auf, sondern unterwerfen sich einer ständigen Überlagerung.

### 3.1.6 Partielle Konturlänge im Prozesseingriff

Im Rotationsschneidprozess befindet sich, verglichen mit einem Vollschnitt im Hubstanzen, nie die gesamte Werkzeugkontur  $L_{KG}$  im Eingriff, sondern immer nur ein partieller Teil  $L_{KP}$ , ähnlich dem offenen Schnitt beim Hubstanzen.

Zur Ermittlung der partiellen Konturlänge im Prozesseingriff  $L_{KP}$  wird die gesamte Werkzeugkontur  $L_{KG}$  über die Vorschubrichtung in infinitesimale Teile zerlegt und die jeweilig im Prozesseingriff befindlichen Teile für den kongruenten Drehwinkel  $\varphi$  aufsummiert. Der Prozesseingriff entspricht dem Trennvorgang, der für jede Drehwinkelstellung  $\varphi$  im Intervall von Eingriffspunkt  $P_E$  bis Umkehrpunkt  $P_U$  stattfindet und ist definiert durch die Eingriffslänge  $l_{PE}$ .

$L_{KP}$  ist dabei sehr stark abhängig von  $l_{PE}$ : Je größer  $l_{PE}$ , desto größer wird auch die partiell im Eingriff befindliche Konturlänge  $L_{KP}$  für jeden Drehwinkel  $\varphi$ .

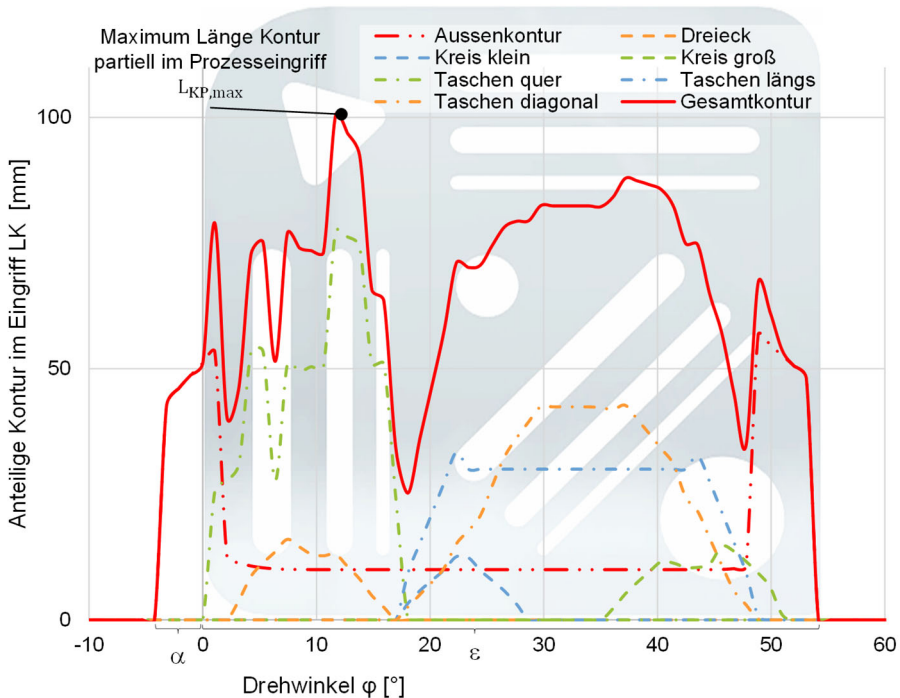


Bild 24: Anteilige Konturlänge im Eingriff  $L_{KP}$  exemplarisch für die Testkontur

In Bild 24 sind für die Testkontur, welche auch Untersuchungsgegenstand von Kap 4 ist, die partiell im Eingriff befindlichen Längen der Einzelkonturelemente  $L_{KPn}$  sowie der partiell im Eingriff befindlichen Gesamtkontur  $L_{KP}$  für jeden Drehwinkel  $\varphi$  aufgetragen.

Für jedes Einzelkonturelement startet der Trennvorgang jeweils um den Winkel  $\alpha_{ST}$  nach vorne verschoben in der Schneidphase 1, durchläuft eine Mischung aus den verschiedenen Schneidphasen und endet in Phase 3. Der Winkel  $\epsilon$  entspricht dabei dem Winkelbereich, den die Gesamtkontur  $L_{KG}$

am Umfang des Stempelwerkzeugs einnimmt. Der rote Verlauf im Diagramm entspricht hier exemplarisch der gesamten aufaddierten Kontur der Testgeometrie und somit dem eigentlichen  $L_{KP}$ .

Besonders zur Vorschubrichtung quer gerichtete Konturelemente führen zu steilen Flanken und Spitzen im Konturverlauf (vergleiche Bild 24 Ausrichtungen der Taschen), die zu einer periodischen Anregung des Werkzeugs führen können. Abhilfe schafft ein leichtes Schrägstellen der querliegenden Konturen in der Ausrichtung auf dem Werkzeug. [16]

Mit der partiellen Konturlänge  $L_{KP}$  und den jeweilig auftretenden Schneidphasen können der Schneidkraftverlauf und die maximal auftretenden Schneidkräfte (siehe auch Kap 3.3) prognostiziert werden. Versuche und Simulationen haben zudem gezeigt, dass diese und damit auch das Drehmoment annähernd äquivalent zu der im Eingriff befindlichen Konturlänge sind. [P3]

## 3.2 Kinematik des Rotationsschneidprozesses

Unter der Kinematik wird der Bewegungsablauf von Punkten unter räumlichen und zeitlichen Aspekten verstanden. [53] Zur Beschreibung dieser werden das Anlagen- und das Kinematikmodell für den Rotationsschneidprozess [20] herangezogen. Diese unterscheiden sich wesentlich in ihrem Bezugssystem voneinander. Während im Anlagenmodell der Bezug auf den globalen Anlagenaufbau gelegt wird und wichtige Geschwindigkeitsparameter dadurch vereinfacht bestimmt werden können, beschreibt das Kinematikmodell den komplexen Bewegungsablauf der Werkzeuge im Trennvorgang zueinander.

### 3.2.1 Geschwindigkeitsprofile im Anlagenmodell

Zur Bestimmung der Geschwindigkeitsparameter, wie der Schneid- und Vorschubgeschwindigkeit, werden Relativbewegungen zwischen Schneidgutband und Werkzeugzylindern im Rotationsschneidprozess als idealisiert angenommen, d. h. es werden ausschließlich die Wälzkreisdurchmesser  $D_{ST}$  und  $D_{MA}$  in die Betrachtung miteinbezogen und Effekte aufgrund des Zusammenwirkens unterschiedlicher Durchmesserhältnisse außen vorgelassen.

Grundlage für die Berechnung der Geschwindigkeiten bilden die Gleichungen für die Umfangsgeschwindigkeiten von Stempel- und Matrizenzylinder  $\mathbf{v}_{ST}$  und  $\mathbf{v}_{MA}$  mit Bezug auf die Wälzkreisdurchmesser  $D_{ST}$  und  $D_{MA}$ ,

die Drehzahl  $n$  bzw. die Winkelgeschwindigkeit  $\omega$ . Im Folgenden wird dieser Zusammenhang formeltechnisch beschrieben: [P4]

$$v_{ST} = D_{ST} \cdot \pi \cdot n_{ST} = \frac{D_{ST}}{2} \cdot \omega_{ST} \quad (16)$$

$$v_{MA} = D_{MA} \cdot \pi \cdot n_{MA} = \frac{D_{ST}}{2 \cdot i_W} \cdot \omega_{ST} \quad (17)$$

Bild 25 zeigt die kinematischen Gegebenheiten für zwei gleichgroße Werkzeugzylinder im Anlagenmodell; die zugehörige analytische Betrachtung ist jedoch allgemein basierend.

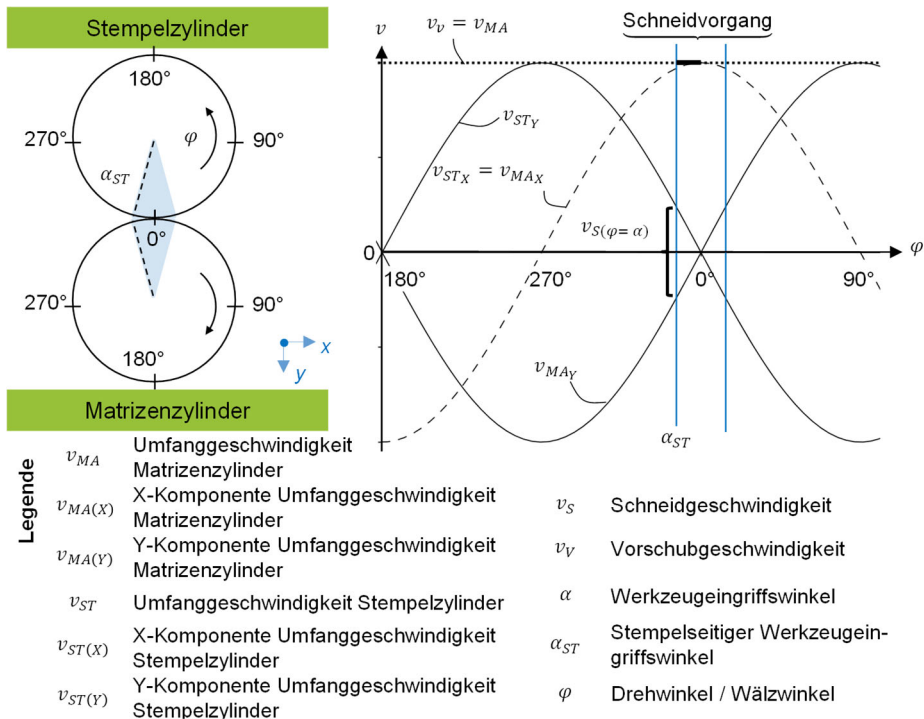


Bild 25: Anlagenmodell für gleichgroße Werkzeugzylinder (links) mit zugehörigem Geschwindigkeitsprofil (rechts) [P4]

Im Diagramm in Bild 25 sind die Umfangsgeschwindigkeiten der Werkzeugzylinder  $v_{ST}$  und  $v_{MA}$  aufgeteilt in ihre anteiligen x- und y-Komponenten über den Drehwinkel  $\varphi_{ST}$  aufgetragen (siehe Gleichungen (14) und (15)). Der eigentliche Schneidprozess findet für alle Drehwinkel  $\varphi_{ST}$  dabei ausschließlich im Bereich für  $\varphi_{ST} = \alpha_{ST}$  bis  $\varphi_{ST} = 0^\circ$  statt. Daraus lassen

sich die beiden prozessbestimmenden Geschwindigkeitsgrößen, der Bandvorschub  $v_V$  und die Schneidgeschwindigkeit  $v_S$  ermitteln. [P4]

Da das zu verarbeitende Schneidgut im Rotationsschneidprozess immer am Außendurchmesser des Matrizenzylinders  $d_{MA}$  anliegt, wird die Umfangsgeschwindigkeit des Matrizenzylinders  $v_{MA}$  direkt auf das Band übertragen. Damit entspricht die Vorschubgeschwindigkeit  $v_V$  der Umfangsgeschwindigkeit des Matrizenzylinders  $v_{MA}$  und ergibt sich aus nachfolgendem Zusammenhang: [P4]

$$v_V = v_{MA} = \frac{D_{MA} \cdot \pi}{i_W} \cdot n_{ST} = \frac{D_{MA}}{2 \cdot i_W} \cdot \omega_{ST} \quad (18)$$

Die Schneidgeschwindigkeit  $v_S$  beschreibt die Geschwindigkeit, mit welcher der Trennvorgang vollzogen wird. Diese entspricht der Relativbewegung der Y-Geschwindigkeitskomponenten  $v_{ST(Y)}$  und  $v_{MA(Y)}$  der rotierenden Zylinder im Intervall des eingeschlossenen Winkels  $\alpha_{ST}$  vom Eingriffspunkt  $P_E$  bis zum Umkehrpunkt  $P_U$  und wird durch folgende Formel beschrieben: [P4]

$$\begin{aligned} v_S = v_{ST(Y)} + v_{MA(Y)} &= \left(1 + \frac{1}{i_W^2}\right) D_{ST} \cdot \pi \cdot n_{ST} \cdot \sin \varphi_{ST} \\ &= \left(1 + \frac{1}{i_W^2}\right) \cdot \frac{D_{ST}}{2} \cdot \omega_{ST} \cdot \sin \varphi_{ST} \end{aligned} \quad (19)$$

Zu Beginn des Trennvorgangs im Bereich des Auftreffens  $P_E$  ist die Schneidgeschwindigkeit  $v_S$  maximal ( $v_{S(\varphi=\alpha)} = \mathbf{max}$ ), nimmt zunehmend ab und ist im Umkehrpunkt  $P_U$  bei  $\varphi = 0^\circ$  null ( $v_{S(\varphi=0^\circ)} = \mathbf{0}$ ). Aufgrund der im Vergleich zum Hubstanzen relativ langsamen maximalen Schneidgeschwindigkeiten  $v_S$  sowie der weiteren Stagnation, ist der Trennvorgang im Rotationsschneiden als quasistatisch einzuordnen. Die Grenze hierfür liegt bei  $v_S \leq 0,10 \text{ m/s}$  [54].

### 3.2.2 Werkzeugbewegung im Kinematikmodell

Wie in Kapitel 3.1.5 thematisiert, weicht die Werkzeugbewegung und damit die Kinematik stark vom Hubstanzen ab. Zur Beschreibung dieser Bewegung sind insbesondere Kurven geeignet, die dann entstehen, wenn Kreise ohne zu gleiten auf einer Leitgeraden (Zykloide) oder aufeinander (Epizykloide) abrollen [55, 56].

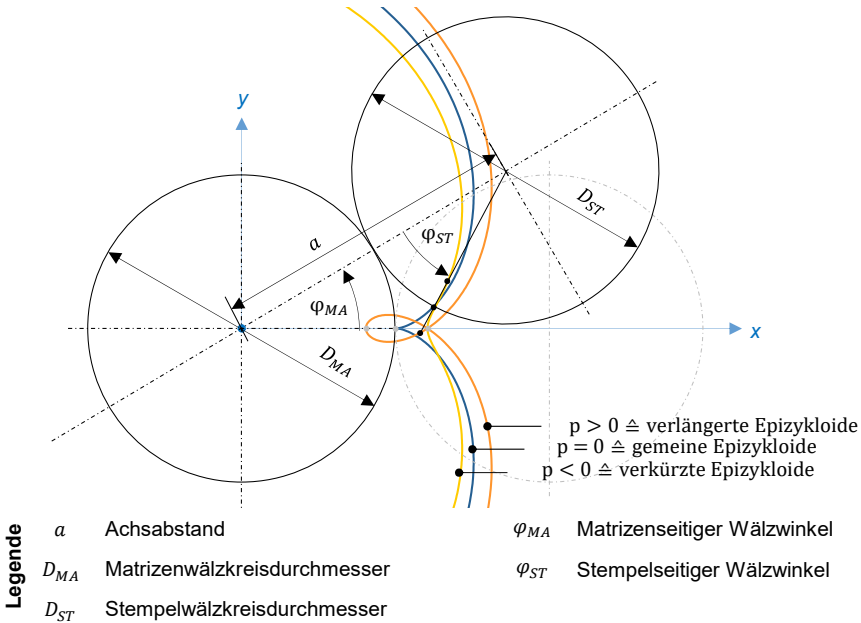


Bild 26: Bahnkurven zur verlängerten, gemeinen und verkürzten Epizykloide

Im Kontext des Matrizenzylinders (siehe Bild 26) rollt der Stempelwälzkreis auf der zylindrischen Lauffläche des Matrizenzylinders ab. Die Leitbahn entspricht somit dem Wälzkreis der Matrize. Die Punkte  $\mathbf{P}(X; Y)$ , die einem Punkt des Schneidstempels auf der Stirn- oder Mantelfläche mit dem Abstand  $p$  zum Stempelwälzkreisdurchmesser  $D_{ST}$  entsprechen, bewegen sich relativ zu einem in der Matrize fixierten Koordinatensystem auf Epizykloidenbahnen. Für die Punkte  $\mathbf{P}(X; Y)$  relativ zum Matrizenzylinder ergibt sich folgende allgemeine Bahnkurve: [56]

$$P(x; y) \tag{20}$$

$$x(\varphi_{ST}) = a \cdot \cos\left(\frac{D_{MA}}{D_{ST}} \cdot \varphi_{ST}\right) - \left(\frac{D_{ST}}{2} + p\right) \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot a}{D_{MA}} \cdot \varphi_{ST}\right)$$

$$y(\varphi_{ST}) = a \cdot \sin\left(\frac{D_{MA}}{D_{ST}} \cdot \varphi_{ST}\right) - \left(\frac{D_{ST}}{2} + p\right) \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot a}{D_{MA}} \cdot \varphi_{ST}\right)$$

$$(-\infty < \varphi_{ST} < \infty)$$

Der für den Rotationsschneidprozess relevante Bereich ist dabei das Intervall von Eintrittspunkt bis Austrittspunkt  $[\mathbf{P}_E; \mathbf{P}_A]$  über den Winkelbereich

( $-\alpha_{ST} \leq \varphi_{ST} \leq \alpha_{ST}$ ), den jeder Winkel  $\varphi_{ST}$  durchläuft. Außerhalb dieses Bereichs sind die Werkzeuge nicht im Prozesseingriff und somit für die Betrachtung irrelevant.

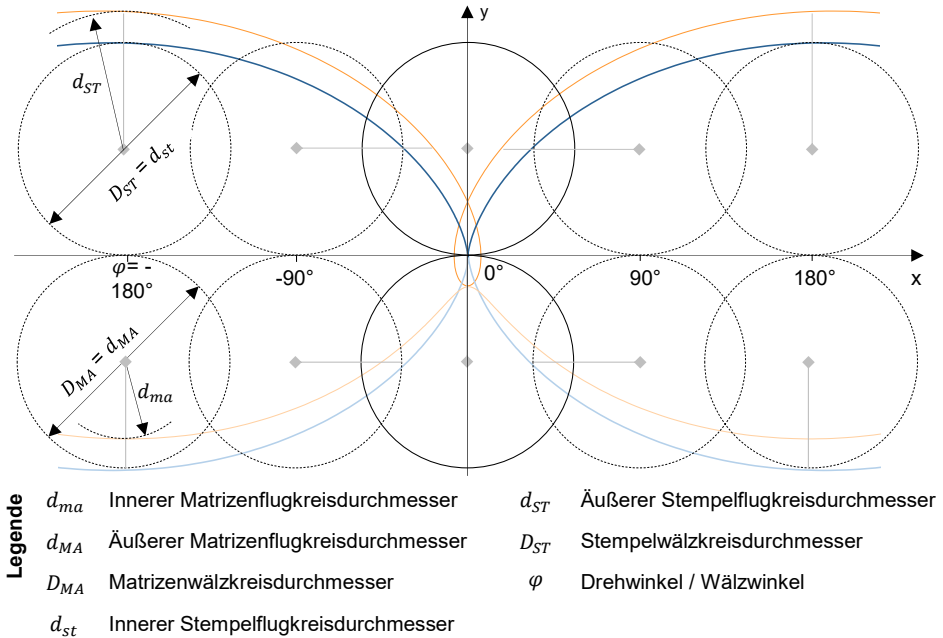


Bild 27: Grafische Darstellung der Werkzeugbewegungen mit auf die Mittelebene gelegtem Bezug (angelehnt an [19, 57])

Bild 27 zeigt die Werkzeugbewegung mit Bezug auf die Mittelebene. Während die auf den Wälzkreisdurchmessern  $D_{ST}$ ;  $D_{MA}$  liegenden Punkte jeweils die gemeine Zykloidenform annehmen, formen die zurückgesetzten Niveaus (im Bild 23  $d_{ma}$ ) eine verkürzte Zykloide, respektive die außerhalb liegenden Niveaus (im Bild 23  $d_{ST}$ ) eine verlängerte Zykloide aus.

### 3.2.3 Relativbewegungen im Rotationsschneidprozess

Im Rotationsschneidprozess laufen Stempel- und Matrizenzylinder mit konstanter Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  gegenläufig synchron zueinander. Jedoch kreuzen sich dabei Bereiche, die aufgrund differenter Durchmesser-niveaus unterschiedliche Geschwindigkeitsvektoren sowohl in Richtung als auch im Betrag aufweisen (siehe Bild 28). Die Grenzpaarungen bilden dabei die Schneidgutoberseite des Verschnitts gegen das zugehörige Niveau in Richtung Stempelgrund sowie die Schneidgutunterseite des Gutteils im Matrizengrund.

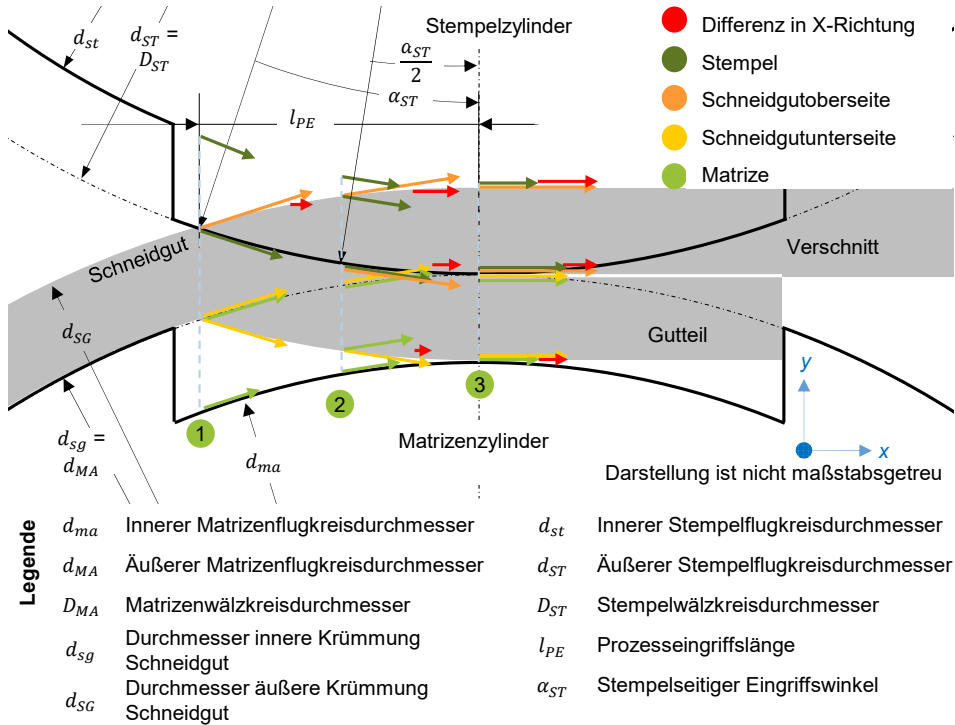


Bild 28: Übersicht der unterschiedlichen Geschwindigkeitsvektoren für Stempel, Matrize und Schneidgut zu den Drehwinkeln

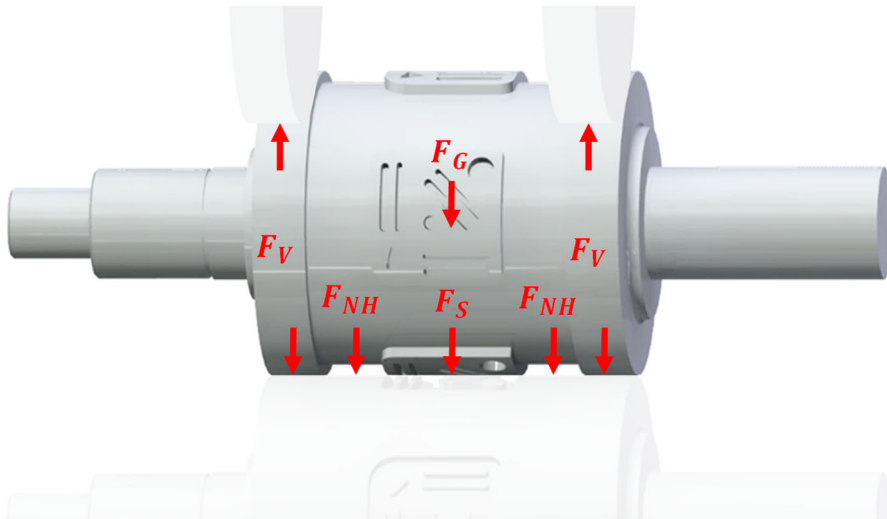
Diese ungleichen Geschwindigkeitsvektoren von Stempel, Matrize und Schneidgut führen zu entgegen gerichteten Bewegungen, die sich im Prozess fortsetzen. In Bild 28 sind diese für die Drehwinkel  $\varphi = \alpha_{ST}$ ,  $\varphi = \alpha_{ST}/2$  und  $\varphi = 0^\circ$  dargestellt. Ein Teil dieser Relativbewegungen trägt zum Schneidprozess selbst bei. Hierbei handelt es sich vornehmlich um die zwischen Stempel- und Matrizenzylinder senkrecht gerichteten Anteile (Y-Richtung). Der weitaus kleinere Teil führt zu horizontal gerichteten (X-Richtung) Relativbewegungen zwischen Werkzeug und Material. Zusätzlich zu diesen kommen noch Relativbewegungen aus der Verkipfung der Werkzeugseitenflächen, die ihr Maximum der Verkipfung im Winkel  $\alpha_{ST}$  annehmen und sich zum Nulldurchgang hin orthogonal zum Band ausrichten.

In Bereichen der Schneidphase 2 (kreuzend ziehender Schnitt) werden die Relativbewegungen weitestgehend in Reibenergie zwischen Werkzeug und Schneidgut umgewandelt. In Schneidphase 1 und 3 (vollkantig-drückender Schnitt) müssen die Relativbewegungen vom Material absorbiert und in elastische und plastische Verformungen umgewandelt werden.

Aktiv können diese Effekte durch die Reduktion der Werkzeugüberdeckung sowie einer optimal angepassten Schneidgutlage im Prozess reduziert werden. Mit sinkender Materialstärke verringern sich die Relativbewegungen zudem passiv. Einen tieferen Einblick in diese Thematik gewährt auch [20].

### 3.3 Statik und Dynamik beim Rotationsschneiden

Das Hauptaugenmerk der vorangegangenen Kapitel 3.1 und 3.2 liegt auf den prozessspezifischen geometrischen und kinematischen Parametern. Im Rotationsschneidprozess wirken jedoch auch statische und dynamische Größen, wie Kräfte und Momente. Die Kenntnis über diese Rahmenbedingungen ist essenziell für das Prozessverständnis sowie für die Auslegung der Antriebe, der Lagerung und der Dimensionierung der Komponenten.



#### Legende

$F_G$	Gewichtskraft	$F_S$	Schneidkraft
$F_{NH}$	Nieder- bzw. Gegenhaltekraft	$F_V$	Vorspannkraft

Bild 29: Gesamtübersicht der im Rotationsschneidprozess potenziell auftretenden Kräfte

In Bild 29 sind die wesentlichen prozessualen Kräfte, wie die Schneidkraft  $F_S$ , die Vorspannkraft  $F_V$ , die Nieder- bzw. Gegenhaltekräfte  $F_{NH}$  sowie die Gewichtskraft  $F_G$  für einen freigeschnittenen Werkzeugzylinder dargestellt.

Rotationsschneiden ist ein hochdynamischer Prozess, in welchem der Zustand wälzwinkelabhängig veränderlich und zu keinem Zeitpunkt konstant

ist. Dabei sind für die Auslegung und die Berechnung der Anlage besonders zwei Grenzzustände entscheidend: Der Leerlauf und der maximale Schneideingriff. In diesem Teilkapitel werden zunächst die einzelnen auftretenden Kraftkomponenten abgehandelt und abschließend für die beiden Grenzzustände zusammen mit den Momenten bilanziert.

### 3.3.1 Approximierte Schneidkraft

Die führende und prozessbestimmende Kraftkomponente im Rotationsschneidprozess ist die Schneidkraft  $F_S$ . Diese entsteht in der Wirkzone zwischen Schneidgut und Werkzeug und fasst alle Kraftkomponenten im Schneidbereich zusammen. Das sind maßgeblich die Umformkräfte  $F_U$  und die Reibungskräfte  $F_R$ . Die Kräfte wirken beim Rotationsschneiden nicht nur in eine Richtung, da der Stempelauftrittspunkt  $P_E$  über den Drehwinkel  $\varphi$  variiert. Die Gesamtkraft kann deshalb nur durch die vektorielle Summe von Radial- und Tangentialkräften ermittelt werden.

Die im Prozesseingriff resultierende Schneidkraft  $F_S$  ist proportional zur im Eingriff befindlichen Konturlänge  $L_{KP}$  (vgl. 3.1.6) und somit sehr stark geometrieabhängig.

Die Querkräfte sind nur minimal und können deshalb bei der approximativen Berechnung der Schneidkräfte  $F_S$  vernachlässigt werden.

Für die Auslegung und Berechnung von Werkzeugen, Anlage und Antriebs-einheit ist besonders die maximal auftretende Schneidkraft  $F_{S,max}$  entscheidend. Um diese zu approximieren, wird die Formel für das Hubstanzen verwendet. In dieser Gleichung leitet sich die maximale Schneidkraft  $F_{S,max}$  von der maximalen Scherfläche  $A_{S,max}$  und dem Scherwiderstand  $k_s$  ab. [19, 58, 59]

$$F_{S,max} = A_{S,max} \cdot k_s \quad (21)$$

Die Scherfläche  $A_S$  ist dabei über den Drehwinkel  $\varphi$  veränderlich und direkt proportional zur Eingriffslänge  $L_{KP}$ . Bei maximaler Eingriffslänge  $L_{KP,max}$  ist auch die Scherfläche maximal  $A_{S,max}$ . Daraus ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$A_{S,max} = L_{KP,max} \cdot s \quad (22)$$

Der Scherwiderstand  $k_s$  umfasst die Einflüsse von Schneidspalt, Werkzeugverschleiß, Werkstoffeigenschaften, Materialstärke sowie Schnittlinien-

form und beträgt dabei ungefähr das 0,8-fache der Zugfestigkeit des Werkstoffs  $R_m$ .

$$k_s = 0,8 \cdot R_m \quad (23)$$

Da in dieser Gleichung Einflussfaktoren wie Schneidspalt, Werkzeugverschleiß und Werkzeugeigenschaften nicht direkt berücksichtigt werden, kommt es zu Abweichungen im Ergebnis, die jedoch für die Werkzeugdimensionierung nicht weiter relevant sind. Zudem ist das Aufsetzen des Rotationsschneidwerkzeuges und das Durchwandern des Schneidbereichs mit dem Schneiden mit einem abgeschrägten Schneidstempel vergleichbar. Auf eine Multiplikation der Formel mit einem weiteren, dafür typischen Faktor von 0,7-0,8, der diesem Umstand Rechnung trägt, wird in Formel (21) verzichtet. Dieser Verzicht bildet somit einen zusätzlichen impliziten Sicherheitsfaktor. [54]

Nach [54] entsteht bei schnellen Verarbeitungsgeschwindigkeiten im Stanzprozess (z.B. beim Hochleistungsstanzen) eine zusätzliche dynamische Schneidkraftkomponente, die mit dem Dynamikfaktor charakterisiert wird. Dieser Dynamikfaktor ist im Wesentlichen von der Stempelaufreffgeschwindigkeit  $v_a$  und dem Verhältnis aus Streck- und Zuggrenze  $R_{p02}$  und  $R_m$  abhängig. [54] Die Stempelaufreffgeschwindigkeit entspricht der maximalen Schneidgeschwindigkeit  $v_{S(\varphi=\alpha)}$  (siehe Kapitel 3.2.1) und ist beim Rotationsschneiden vergleichsweise gering.

Zusätzlich hat Noack auch in [17] versuchstechnisch nachgewiesen, dass der Einfluss der Bandvorschubgeschwindigkeit nur einen sehr geringen Einfluss auf die Schneidkraft  $F_S$  hat. Deshalb wird in der Berechnung auf eine Berücksichtigung dieser dynamischen Anteile gänzlich verzichtet.

Detaillierte Schneidkraftverläufe lassen sich mit numerischen Lösungsverfahren simulieren. Besonders zielführend ist die Methode der Finiten Elemente mit einer expliziten Zeitintegration, da es sich beim Rotationsschneidprozess um einen hochdynamischen und hochgradig nichtlinearen Schneidvorgang handelt. Finite-Elemente-Berechnungen im Kontext von Rotationsschneidprozessen liefern z.B. [52, P3].

Alternativ können auch Schneidversuche durchgeführt werden, um die Schneidkraftverläufe zu erhalten. Diese gestalten sich jedoch als sehr aufwendig und können nur für sehr spezifische Konturen bzw. Schneidelemente durchgeführt werden. [17, 19, 20]

### 3.3.2 Nieder- bzw. Gegenhaltekraft der Elastomer-Matrix

Im Rotationsschneidprozess für mechatronische Produkte ist eine enge Führung und Stützung des Schneidguts eine wichtige Voraussetzung, um Verformungen zu unterdrücken und damit die Präzision und Prozessstabilität zu erhöhen. Dies wird mittels in die Werkzeuge integrierter Nieder- bzw. Gegenhalter aus Elastomeren erreicht. [60]

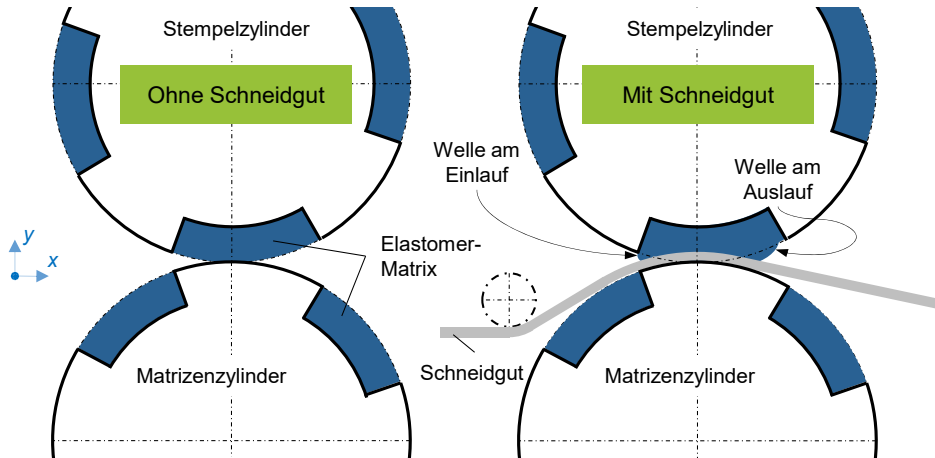


Bild 30: Ausprägung der Elastomer-Matrix ohne (links) und mit (rechts) Schneidgut

Die Elastomer-Matrix (siehe auch Kap. 4.2) füllt die Zwischenräume der Werkzeuge und ist ohne Schneidgut überdeckungslos ausgeführt, d.h. es werden keine Kräfte eingeleitet ( $F_{NH} = \mathbf{0N}$  / Bild 30 links). Erst mit dem Durchführen des Schneidguts entsteht eine Überdeckung zwischen Elastomer und Schneidgut (Bild 30 rechts), welche durch die Verdrängung eine Nieder- bzw. Gegenkraft  $F_{NH}$  initiiert. Im Bereich des Bandein- und des Bandauslaufs ist die Elastomer-Matrix nicht vollständig gefangen. In diesem Sektor verformt sich der Kunststoff nach außen und wirft eine voraus- und nachteilende Welle. Im Auslauf wird mit dem Auseinanderwandern der Werkzeuge das Schnittgut sowie der Verschnitt wieder aus den Kavitäten herausgedrückt. Die Elastomer-Matrix übernimmt somit zusätzlich die Funktion, das Schnittgut wieder vom Werkzeug zu trennen und fungiert damit als Auswerfeinheit.

Die Nieder- bzw. Gegenhaltekraft  $F_{NH}$  ist maßgeblich abhängig von den Werkzeugdurchmessern  $d_{MA}$  und  $d_{ST}$ , der Überdeckung  $u$ , der Geometrie der Werkzeugzylinder und den Materialkennwerten des Elastomers.

Darüber hinaus werden im Kontext des Elastomer-Schneidens (siehe auch Kap. 4.4) durch die Elastomer-Matrix die Schneidkräfte  $F_S$  in das Material

eingeleitet. Die erforderliche Überdeckung  $u$  muss daher deutlich größer als bei einer reinen Nieder- bzw. Gegenhaltefunktion ausgeführt werden. Damit sind auch die erforderliche Vorspannkraft  $F_V$  und das erforderliche Antriebsmoment  $M_A$  im Leerlauf ungleich höher. Beim rotativen Messerschneiden hingegen kommt in der Regel keine Elastomer-Matrix zum Einsatz.

### 3.3.3 Vorspannkraft der Werkzeugzylinder

Damit es weder zu einem Rückfedern noch zu einer elastischen Verformung der Werkzeugzylinder während des Schneidvorgangs kommt, muss eine konstante Flächenpressung zwischen Werkzeugzylinder und Werkzeugzylinder bzw. zwischen Werkzeugzylinder, Schneidgut und Werkzeugzylinder gegeben sein. Wird diese nicht durch die Steifigkeit des Walzenstuhls gewährleistet, muss dafür eine externe Anpress- bzw. Vorspannkraft  $F_V$  auf die Laufflächen der Zylinder aufgebracht werden. Dies ist insbesondere nötig, wenn die Werkzeugzylinderdurchmesser  $d_{ST}$  und  $d_{MA}$  klein und die Schneidkräfte  $F_S$  und Niederhaltekräfte  $F_{NH}$  groß sind. Die resultierende Anpresskraft  $F_V$  muss dabei die maximal benötigte Schneidkraft  $F_{S,max}$  und Niederhaltekraft  $F_{NH}$  deutlich übersteigen. Mit einer Sicherheit von zwei ergibt sich damit folgende Gleichung für die Vorspannkraft  $F_V$ :

$$F_V = S \cdot (F_{S,max} + F_{NH})$$

mit  $S = 2$  (24)

Dadurch wird ein Abheben der Werkzeugzylinder beim Auftreffen der Schnittkante auf das Schneidgut vermieden und die Schneide kann gleichmäßig tief in das Schneidgut einfahren. Bei Anlagen, die nach dem Prinzip des eindringlosen Schneidens agieren (vgl. Kapitel 4.3), ist eine hohe Steifigkeit und ausreichende Anpresskraft  $F_V$  essenziell für eine gute Schneidqualität.

Zusätzliche Stützwalzen unter- bzw. oberhalb der Werkzeugzylinder führen zudem zu einer reduzierten Verformung der Werkzeugzylinder beim Schneidvorgang. Zur Übertragung der Anpresskraft  $F_V$  ist eine entsprechende Anpresseinheit erforderlich. Dazu wird die erforderliche Kraft durch Anpressrollen auf die Laufflächen der Werkzeugzylinder übertragen (Linienkontakt). Die Vorspannkraft  $F_V$  muss beidseitig aufgebracht werden, damit die Kraftverteilung homogen ist.

### 3.3.4 Maximales Schneidmoment und Antriebsmoment

Für die Auslegung der Antriebe ist besonders das maximale erforderliche Drehmoment  $M_{S,max}$  im Prozesseingriff, auch maximales Schneidmoment genannt, entscheidend. Für eine einfache und überschlägige Bestimmung dessen, wird der Angriffspunkt der maximalen Schneidkraft  $F_{s,max}$  dem Eingriffspunkt  $P_E$  gleichgesetzt (siehe auch nachfolgendes Bild 31) und das maximale Drehmoment  $M_{S,max}$  im Prozesseingriff mit der Formel zur Berechnung der Rollreibung  $F_R$  [53] berechnet:

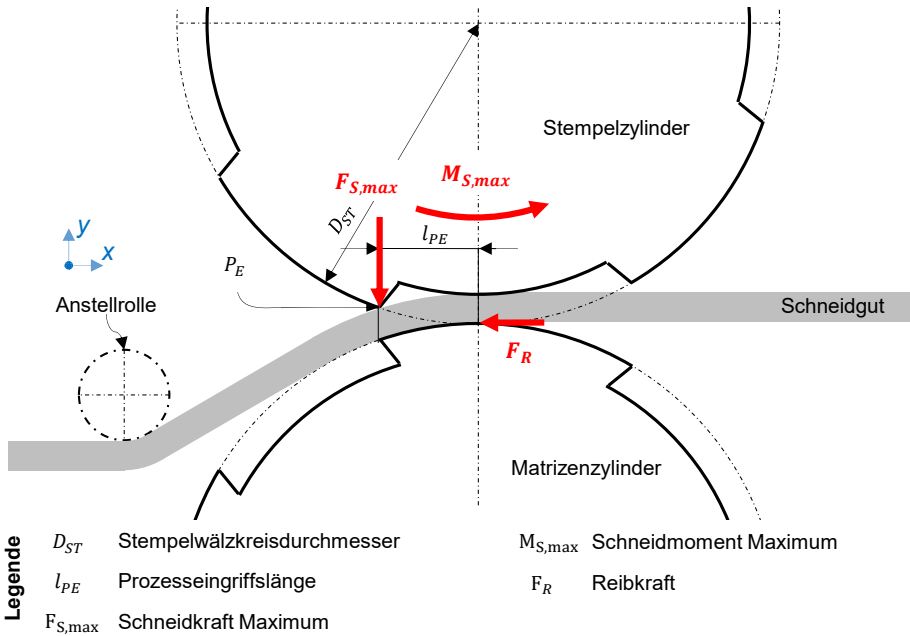


Bild 31: Maximales Drehmoment im Prozesseingriff  $M_{S,max}$

$$F_R = F_{s,max} \cdot \frac{2 \cdot l_{PE}}{D_{ST}} \quad (25)$$

$$M_{S,max} = F_R \cdot \frac{D_{ST}}{2} = F_{s,max} \cdot \frac{2 \cdot l_{PE}}{D_{ST}} \cdot \frac{D_{ST}}{2} = F_{s,max} \cdot l_{PE} \quad (26)$$

Dieses Drehmoment bezieht sich auf das Werkzeugsystem. Zur Umrechnung auf das erforderliche Antriebsmoment  $M_A$  muss noch die Übersetzung  $i_A$  zwischen Werkzeugsystem und Antrieb berücksichtigt werden. Mit der zusätzlichen Sicherheit von zwei bis zehn sind auch die Reibmomente der Lagerstellen, die Rollreibungsmomente aufgrund der Vorspannung

sowie die Widerstandsmomente aufgrund des Kunststoffniederhalte- und Auswerfesystems in der folgenden Formel berücksichtigt:

$$M_A = S \cdot i_A \cdot M_{S,max} \quad (27)$$

mit  $S = 2 \dots 10$

### 3.4 Einfluss und Zusammenwirken wesentlicher Parameter

Ergänzend zu den in den vorangegangenen Kapiteln allgemein beschriebenen Prozessparametern widmet sich dieses Kapitel dem Zusammenwirken der Parameter und deren Einfluss auf den Rotationsschneidprozess. Besonders der geometrische Aufbau und die Anordnung der Werkzeugzylinder zueinander legen den maßgeblichen Grundstein für den Prozess. Der wichtigste Prozessindikator ist hierbei der Eingriffswinkel  $\alpha_{ST}$ , wobei sich der Rotationschneidprozess mit abnehmendem Winkel an den Hubstanzprozess anlehnt. Der Eingriffswinkel  $\alpha_{ST}$  ist hierbei direkt abhängig vom Werkzeug-durchmesser  $d_{ST}$  und der Materialstärke  $s$ .

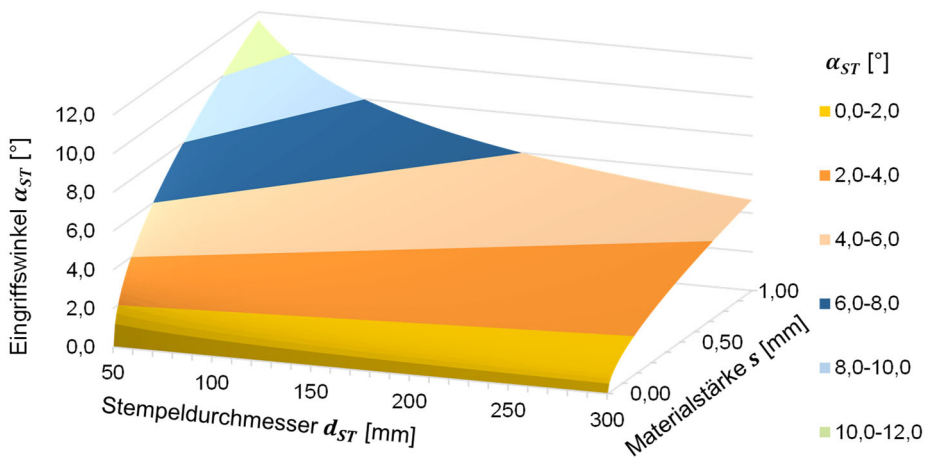


Bild 32: Abhängigkeit des Eingriffswinkels  $\alpha_{ST}$  von der Materialstärke  $s$  und dem Werkzeugdurchmesser  $d_{ST}$

Bild 32 verdeutlicht die Abhängigkeit des Eingriffswinkels  $\alpha_{ST}$  von der Materialstärke  $s$  und dem Werkzeugdurchmesser  $d_{ST}$  bzw. dem Achsabstand  $a$  (Formel (12)). Mit zunehmender Materialstärke  $s$  und abnehmendem Achsabstand  $a$  wächst der Eingriffswinkel  $\alpha_{ST}$ . Dieser Winkel

beeinflusst maßgeblich das Schneidergebnis, da mit steigendem Eingriffswinkel  $\alpha_{ST}$  auch die in Kapitel 3.2.3 beschriebenen Relativbewegungen zunehmen. Umgekehrt kann mit der Vergrößerung der Durchmesser  $d_{ST}$  und  $d_{MA}$  der Eingriffswinkel  $\alpha_{ST}$  reduziert werden. Zusätzlich verringern sich dadurch auch die plastischen Verformungen und die damit verbundenen Gefügeänderungen im Material. Diese entstehen durch das Anlegen des Materials am Matrizenzyylinder und sind mit einem Bandrichtprozess vergleichbar.

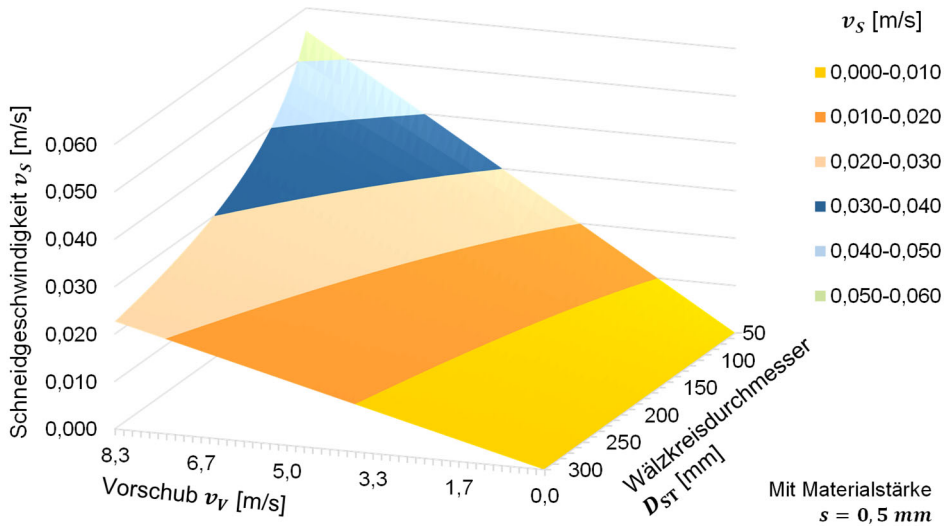
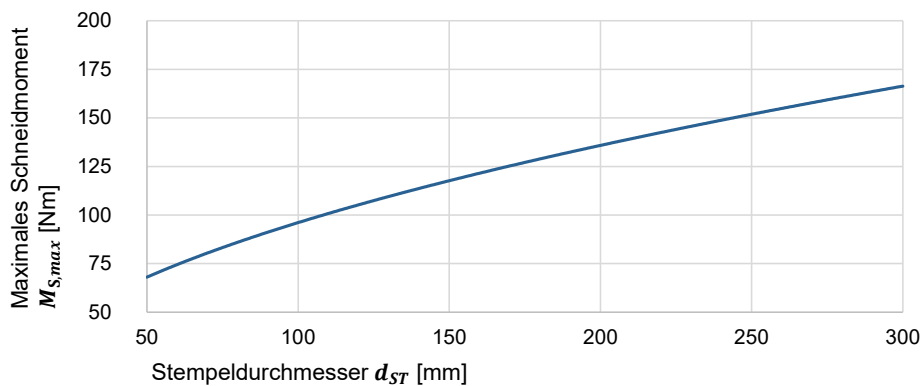


Bild 33: Abhängigkeit der Schneidgeschwindigkeit  $v_s$  von der Vorschubgeschwindigkeit  $v_v$  und dem Wälzkreisdurchmesser  $D_{ST}$



Mit Kontur im Eingriff  $L_{KP} = 100 \text{ mm}$ ; maximale Schneidkraft  $F_{s,max} = 23,2 \text{ kN}$ ;  
Elektroband M330-50A; Materialstärke  $s = 0,5 \text{ mm}$ ;  $R_m = 480 \text{ N/mm}^2$

Bild 34: Abhängigkeit des maximalen Schneidmoments  $M_{s,max}$  vom Werkzeugdurchmesser  $d_{ST}$

Neben dem Einfluss auf den Eingriffswinkel  $\alpha_{ST}$  hat der Durchmesser  $D_{ST}$  auch wesentlichen Einfluss auf die Schneidgeschwindigkeit  $v_S$  (Bild 33; Formel (19)). Diese steigt mit sinkendem Durchmesser  $D_{ST}$  und zunehmender Vorschubgeschwindigkeit  $v_V$  an. Trotz der im Rotationsschneiden sehr großen Vorschubgeschwindigkeiten  $v_V$  von über 8,3 m/s ( $\cong 500$  m/min) verhält sich der Schneidprozess aufgrund der vergleichsweise niedrigen Schneidgeschwindigkeiten  $v_S$  quasistatisch (siehe Kapitel 3.2.1).

Mit anwachsendem Durchmesser  $D_{ST}$  steigt auch das erforderliche Drehmoment  $M_{S,max}$  in der Wirkstelle (siehe Bild 34). Gleichzeitig sinkt jedoch die Drehzahl  $n_{ST}$  für einen konstant angenommenen Vorschub  $v_V$ . Dies kann in der Antriebsauslegung durch die geeignete Wahl der Antriebsübersetzung  $i_A$  berücksichtigt werden

Da in der Regel auf die Materialauswahl (Materialstärke  $s$ ) kein Einfluss besteht, ist der Werkzeugdurchmesser  $D_{ST}$  somit der zu bestimmende Parameter. Die Auswahl stellt hierbei immer einen Kompromiss zwischen Kosten und Nutzen dar. Mit wachsenden Durchmessern  $D_{ST}$  reduzieren sich die oben genannten nachteiligen Effekte, jedoch steigen auch die Werkzeug- und Anlagenkosten an.



## 4 Rotative Schneidverfahren für dünne metallische Folien und Bänder <sup>3</sup>

In der rotativen Verarbeitung haben sich verschiedene Schneidverfahren etabliert, welche in Werkzeugsystemen respektive den Schneidaggregaten umgesetzt sind. Besonders weit verbreitet ist das rotative Messerschneiden (MSD/MSA) für weiche Materialien und das rotative Stempel-Matrize-Schneiden (SMS) im Bereich der Metallverarbeitung. Letzteres wurde im Rahmen dieser Forschungsarbeit auf die Verarbeitung dünner metallischer Folien und Bänder angepasst. Darüber hinaus ist noch das Elastomer-Schneiden (ES) zu nennen. Dieses findet bisher kaum Verbreitung, bildet jedoch aufgrund seines einfachen Aufbaus und seiner Robustheit im Bereich der Verarbeitung dünner Metallfolien eine interessante Variante zur Erweiterung des Spektrums der verfügbaren rotativen Schneidverfahren. [P<sub>2</sub>]

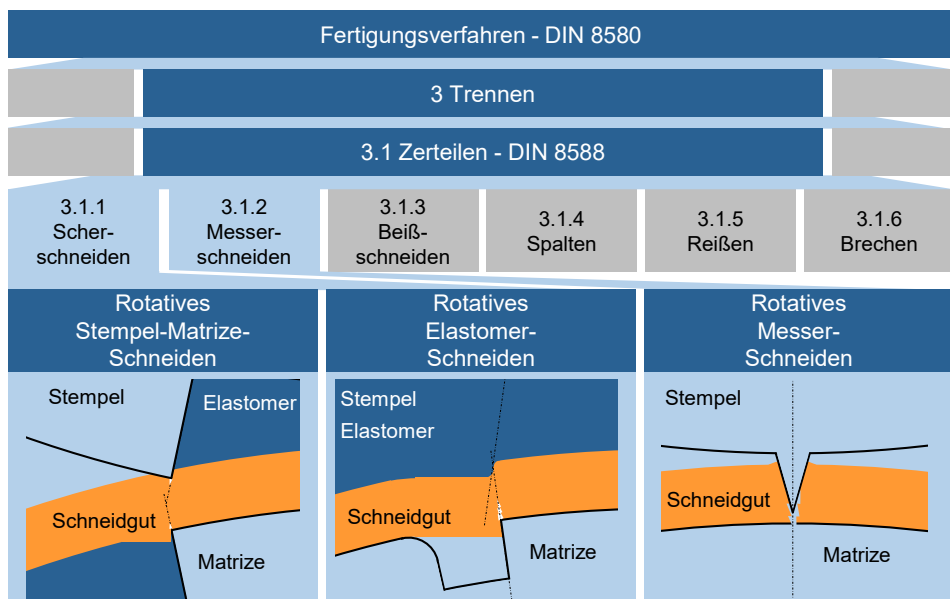


Bild 35: Einordnung der rotativen Schneidverfahren [P<sub>2</sub>] in die Untergruppe des Zerteilens nach DIN 8580 und DIN 8588 [61, 62]

<sup>3</sup> In der Erarbeitung der Inhalte zu diesem Kapitel wurde ich unterstützt von A. Bork [S7], A. Janowsky [S8], F. Lilge [S9], M. Meister [S10], M. Schober [S11], A. Spiegler [S12] und M. Ziegler [S13].

Eine normierte Einordnung der rotativen Schneidverfahren kann nach DIN 8580 [61] der Hauptgruppe 3 Trennen und deren Gruppe 3.1 Zerteilen nach DIN 8588 [62] vorgenommen werden. Rotatives Messerschneiden ist der Untergruppe 3.1.2 Messerschneiden und rotatives Stempel-Matrize-Schneiden sowie rotatives Elastomer-Schneiden der Untergruppe 3.1.1 Scherschneiden untergeordnet.

Die genannten drei rotativen Schneidverfahren unterscheiden sich nennenswert in ihrer Komplexität und Robustheit und entsprechen somit unterschiedlich stark den jeweiligen Anforderungen verschiedener Anwendungen in der Verarbeitung von dünnen Metallfolien für mechatronische Produkte. Im Folgenden werden die drei rotativen Schneidverfahren auf die Anwendung hin weiterentwickelt und eingehend analysiert sowie abschließend ihre Eignung für bestimmte Materialien bzw. Anwendungen klassifiziert.

#### 4.1 Begleitende versuchstechnische Untersuchung der rotativen Schneidverfahren

Die Charakterisierung der rotativen Schneidverfahren in diesem Kapitel wird versuchstechnisch gestützt. Dazu werden die verschiedenen dünnen Metallfolien bzw. -bänder mit derselben, auf das jeweilige rotative Schneidverfahren angepassten Testkontur verarbeitet. Somit ist die direkte Vergleichbarkeit der rotativen Schneidverfahren untereinander sichergestellt.

Kontur		Material		Schneidverfahren	
TK	Testkontur	K035	Kupferband 35 µm	SMS	Stempel-Matrize-Schneiden
		K105	Kupferband 105 µm	ES	Elastomerschneiden
		K500	Kupferband 500 µm	MSA	Messerschneiden Anschnneiden
		L044	Lotband 44 µm		
		L163	Lotband 163 µm	MSD	Messerschneiden Durchschneiden
		E200	Elektroband 200 µm		
		E350	Elektroband 350 µm		

Bsp.	TK	-	K105	-	ES	Testkontur - Kupferband 105 µm - Elastomerschneiden
------	----	---	------	---	----	---

Bild 36: Nomenklatur der Versuchspaarungen

Die Bezeichnung der Versuchspaarungen folgt der in Bild 36 dargestellten Nomenklatur. Die jeweiligen Kategorien werden in den folgenden

Unterkapiteln vorgestellt. Die nachfolgende Tabelle 1 zeigt die angewandte Versuchsmatrix, die diesem Hauptkapitel zugrunde liegt.

Tabelle 1: Versuchsmatrix zur Charakterisierung und Kategorisierung der rotativen Schneidverfahren

Test-kontur	Material	Schneidverfahren			
		SMS	ES	MSA	MSD
TK	K035	-	TK-K035-ES	TK-K035-MSA	TK-K035-MSD
TK	K105	-	TK-K105-ES	TK-K105-MSA	TK-K105-MSD
TK	K500	TK-K500-SMS	-	-	-
TK	L044	-	TK-L044-ES	TK-L044-MSA	TK-L044-MSD
TK	L163	-	TK-L163-ES	TK-L163-MSA	TK-L163-MSD
TK	E200	TK-E200-SMS	TK-E200-ES	-	-
TK	E350	TK-E350-SMS	-	-	-

Die Auswahl der Versuchspaarungen ist durch Vorversuche gestützt, auf welche nicht explizit im Rahmen dieser Dissertation eingegangen wird. Die Gründe für den jeweiligen Ausschluss der Versuchspaarung sind in den einzelnen Unterkapiteln aufgeführt und erläutert sowie abschließend in Kap. 4.5 zusammengefasst.

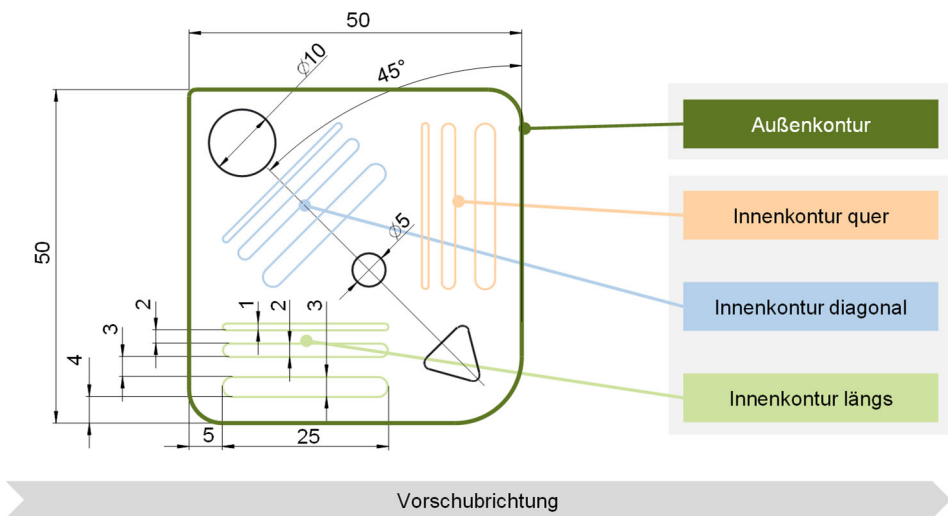


Bild 37: Testkontur zum Vergleich der rotativen Schneidverfahren (Darstellung ist nicht maßstabsgetreu)

#### 4.1.1 Geometrie der Testkontur

Die in den Versuchen zum Tragen kommende sowie in Bild 37 dargestellte Testkontur deckt die verschiedenen relevanten Schneidbereiche ab und gibt dadurch Aufschluss über die erreichbaren Grenzen der rotativen Schneidverfahren.

Die Testkontur beinhaltet zum einen Außen- und Innenkonturen, welche das Ausschneiden beziehungsweise das Lochen repräsentieren. Zum anderen sind Bereiche längs, quer und diagonal zur Vorschubrichtung angeordnet, welche im Rotationsschneidprozess aufgrund des inhomogenen Schneidablaufs jedoch jeweils ein sehr unterschiedliches Verhalten aufweisen. Zuletzt wird noch der Abstand zwischen den Einzelkonturelementen und die Elementbreite selbst variiert, um die erreichbaren minimalen Schnittabstände aufzuzeigen. Die Kreis- und Dreieckselemente werden bei Bedarf zusätzlich für die Ermittlung der Geometriehaltigkeit mit herangezogen.

Die Kontur ist durchgängig verrundet, was unbedingt in der Auslegung des Fertigteils berücksichtigt werden muss. Diese Besonderheit ist der Herstellung der Werkzeuge geschuldet. Unabhängig vom rotativen Schneidverfahren wird die Schneidlinie, respektive die Kontur, mehrdimensional in den Werkzeugkörper gefräst bzw. geschliffen. Damit entspricht der minimale Rundungsradius mindestens dem halben Durchmesser des Bearbeitungswerkzeugs. Scharfe Konturübergänge, also Ecken, lassen sich nur mit alternativen Verfahren, wie beispielsweise dem Erodieren, im Werkzeug realisieren und sind damit im Vergleich zu den vorher genannten Herstellverfahren deutlich aufwändiger.

In Bild 37 sind in den Längs-, Quer- und Diagonalblöcken Konturelemente mit 1 mm Breite dargestellt. Diese konnten bei allen drei rotativen Schneidverfahren aufgrund minimal notwendiger Schneidenabstände in der Werkzeugherstellung nicht umgesetzt werden und werden somit im weiteren Verlauf nicht mehr berücksichtigt.

#### 4.1.2 Auswahl der Materialien

Die für die begleitenden Versuche ausgewählten Materialien repräsentieren die wichtigsten, in Kap 2.1 vorgestellten Anwendungsbereiche. Einen Überblick darüber gibt Tabelle 2.

Bei den Materialien mit der Probenbezeichnung K035 und K105 handelt es sich um dünnes Elektrolytkupfer, wie es in der Schaltungsträgerherstellung

Anwendung findet. K500 mit 0,5 mm Materialstärke ist gewalztes Kupfer u.a. für Stanzgitter. Die Proben L044 und L163 sind Lotfolien aus Zinn-Silber-Legierungen zur Weiterverarbeitung in Lotpads. Diese Materialien weisen eine geringe bis mittlere Festigkeit auf und sind durch ihre kubisch-flächenzentrierte Gitterstruktur sehr gut plastisch verformbar.

Tabelle 2: Aufschlüsselung der Versuchsmaterialien [24, 26, 35, 36, 42, 48]

Proben-bez.	Material-bezeichnung	Dicke [µm]	Streckgrenze Rm [N/mm <sup>2</sup> ]	Gitter-struktur	Bruchdehnung [%]	E-Modul [GPa]
K035	Cu 35 HTE	35	< 200	kfz	25	130
K105	Cu 105 HTE	105	< 200	kfz	25	130
K500	CW004A	500	> 200	kfz	25	130
L044	Sn95,5Ag3,8Cu0,7	44	< 100	kfz	50	50
L163	Sn96Ag4	163	< 100	kfz	50	50
E200	NO20	200	> 450	krz	12	205
E350	M330-35A	350	~480	krz	12	205

Die Materialien E200 und E350 mit 200 µm, respektive 350 µm Materialstärke sind typische Elektrobändgütern nach DIN EN 10303 [24] und DIN EN 10106 [26], bestehend aus Eisen mit Silizium und Aluminium legiert. Zur elektrischen Isolation der Einzelbleche gegeneinander ist das Schneidgut zusätzlich mit einem organischen oder anorganischen Lack nach DIN EN 10342 [28] beschichtet. Dieser ist durch seine Haftung und Elastizität dem Trennvorgang zudem generell förderlich. Die Testbänder sind beidseitig mit Backlack der ASTM-Klasse C-3 vom Typ PE 75 W der Firma C.D. Wälzholz GmbH & Co. KG [63] beschichtet. In der Materialauswahl weisen die Elektrobänder die höchsten Festigkeiten auf und stellen somit maximale Ansprüche in Bezug auf Robustheit und Verschleiß an die Werkzeugsysteme.

Die Materialauswahl unterscheidet sich stark in ihren Ausprägungen und deckt somit ein breites Spektrum an Eigenschaften, wie Materialstärke, Festigkeit und Duktilität, ab. Eine ganzheitliche Charakterisierung mit abschließender Kategorisierung der rotativen Schneidverfahren in Bezug auf die anwendungsspezifischen Materialien ist somit sichergestellt.

### 4.1.3 Parameter der Auswertung

Um abschließend eine allgemeine Vergleichbarkeit der rotativen Schneidverfahren und die anwendungsspezifische Kategorisierung zu gewährleisten, werden produktteilspezifische Größen wie Schnittkanten,

Maßhaltigkeit und Verformung am Testteil bestimmt und ausgewertet. Die anwendungsbezogene prozessuale Eignung des jeweiligen rotativen Schneidverfahrens wird in den folgenden Unterkapiteln jeweils für sich betrachtet und fließt in die Kategorisierung mit ein.

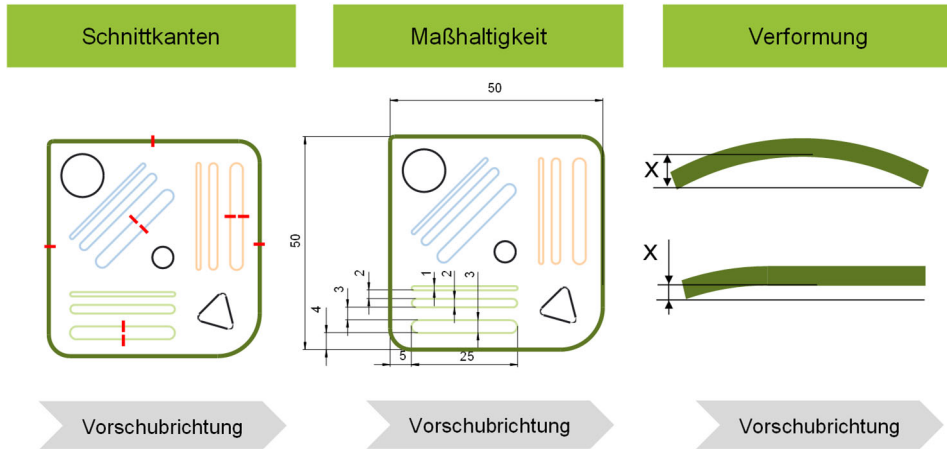


Bild 38: Übersicht über die ausgewählten Auswerteparameter

Der Rotationsschneidprozess ist, wie in Kap 3.1.5 beschrieben, stark richtungsabhängig. Daher müssen die Schnittkanten global für die verschiedenen Schneidphasen sowohl für Innen- als auch Außenkonturen betrachtet werden. Die wesentlichen Stellen sind in Bild 38 links rot markiert und werden mittels Schlibbildern analysiert. Eine Bewertung der Schnittflächengrößen findet nach VDI 2906 [64] statt.

Ein weiterer wesentlicher Parameter ist die Maßhaltigkeit (Bild 38 Mitte). Auch hier können vom Nennwert richtungsabhängige Abweichungen auftreten. Im Schneidprozess ist die Wiederholgenauigkeit sehr hoch, weshalb insbesondere in der Werkzeugauslegung dagegen gesteuert werden kann. Dazu müssen die Prozesseinflüsse des jeweiligen rotativen Schneidverfahrens auf die Ergebnisse bekannt sein. Die Maßhaltigkeit der Testteile wird mittels Konturvermessung im Durchlichtverfahren mit einem optischen Multisensorgerät (Werth Messtechnik Video Check IP 400 HA) und anschließendem Soll-Ist-Vergleich mit der Software BestFit von Werth ermittelt. Die abschließende Bewertung erfolgt durch Einordnung in Allgmeintoleranzklassen gemäß DIN 2768-1 [65].

Zuletzt wird die Verformung bestimmt. Zum einen die globale Verformung der Testteile, die erwartungsgemäß aufgrund der Prozessführung in Abhängigkeit der Werkzeugdurchmesser in Vorschubrichtung am größten

ist, zum anderen lokale Verformungen, die im Bereich der Schnittkanten-einzugsbereiche auftreten können. Die Verformungen werden mittels Auflage und Fixierung der Probe auf einer ebenen Platte und Vermessung der Höhendifferenz mit einer Messuhr mit Auflösung von  $1\ \mu\text{m}$  über einen Messbereich von  $0,300\ \text{mm}$  bestimmt. Die Verformung lässt sich hierbei nur für die formstabilen Testteile bestimmen. Bei den dünnen Kupfer- bzw. allen Lotfolien führen einfachste Manipulationen bereits zu Deformationen an den biegeschlaffen Teilen, welche wiederum zu einer gravierenden Verfälschung der Ergebnisse führen.

Durch die Verwendung der gleichen Testgeometrie in den verschiedenen zu untersuchenden rotativen Schneidverfahren können fertigteilabhängige Einflüsse gegenüber den verfahrensspezifischen Einflüssen klar differenziert werden. Dadurch ist die Vergleichbarkeit hergestellt und eine ganzheitliche Kategorisierung der rotativen Schneidverfahren in Bezug auf ihre jeweiligen Besonderheiten gewährleistet.

Neben den hier aufgelisteten Parametern der Auswertung gibt es noch funktionale Parameter, wie magnetische oder elektrische Eigenschaften. Diese sind sehr anwendungsspezifisch und sind daher nicht Bestandteil dieser Untersuchung, sondern werden in den nachfolgenden anwendungsspezifischen Kapiteln gemäß dem Einsatzzweck der Funktionsfolie weitergehend analysiert.

## **4.2 Rotatives Messerschneiden MSA/MSD**

Rotatives Messerschneiden findet bisher, wie bereits in Kap 2.2 beschrieben, die weiteste Verbreitung in der industriellen Anwendung. Dieses Unterkapitel stellt das rotativen Schneidverfahren allgemein in Bezug auf Gestaltung des Werkzeugsystems und Trennvorgang vor sowie analysiert dieses anwendungsorientiert am Testteil und beleuchtet somit seine prinzipielle Eignung in der Verarbeitung von dünnen Metallfolien. Dabei kommt ein am Markt verfügbares Schneidaggregat zum Einsatz, weshalb auch die Einstiegshürde in diese Verarbeitungstechnologie sehr gering ist.

### **4.2.1 Gestaltung des Werkzeugsystems MSD/MSA**

Ein Schneidaggregat zum rotativen Messerschneiden besteht prinzipiell aus einem Gestell mit Lagerung und Vorspanneinheit sowie dem Schneidzylinder und dem Gegenschneidzylinder mit integrierten Distanzringen. Um den strukturellen Aufbau zu verdeutlichen, ist nachfolgend das in den Versuchen angewandte Schneidaggregat abgebildet.

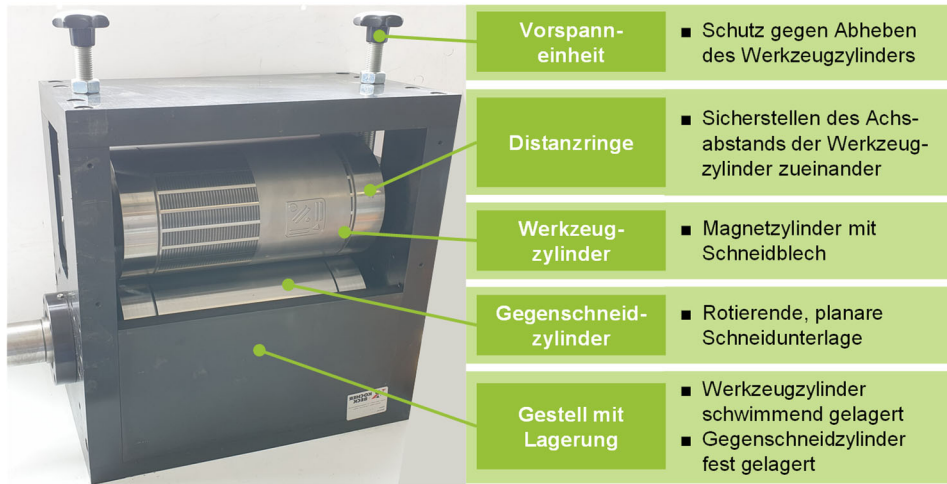


Bild 39: Schneidaggregat zum rotativen Messerschneiden in der Ausführung Magnetzylinder mit Stanzblech

Das Gestell wird durch eine massive, steife Stahlkonstruktion formiert, mit der Funktion, die Werkzeugzylinder im Betrieb zueinander zu führen. Der Gegenschneidzylinder ist im Gestell fest und der Schneidzylinder in Richtung des Achsabstandes  $a$  in einer Kulissee schwimmend gelagert. Dadurch kann die Vorspannkraft  $F_V$  eingebracht werden, ohne dass Durchbiegungen in den Werkzeugzylindern aufgrund einer überbestimmten Lagerung entstehen. Eine Vorspannung  $F_V$  ist notwendig, um ein Abheben der Zylinder im Werkzeugeingriff zu verhindern. Die Vorspanneinheit setzt dabei bei hohen Vorspannkraften  $F_V$  direkt an den Distanzringen oder, wie im verwendeten Schneidapparat, bei reduzierten Vorspannkraften  $F_V$  direkt an der Lagerung an. Diese deutlich kostengünstigere Ausführung ist aufgrund der niedrigen auftretenden Schneidkräfte  $F_S$  für dieses Werkzeugsystem vertretbar.

Die Kopplung zwischen Werkzeugzylinder und Gegenschneidzylinder findet durch die Distanzringe statt, worüber die Werkzeuge auch aufeinander abrollen. Damit entsprechen sie den Wälzkreisdurchmessern der Werkzeugzylinder  $D_{ST}$  bzw.  $D_{MA}$  und gewährleisten einen kontinuierlich konstanten Achsabstand  $a$ , respektive Werkzeugüberdeckung  $u$ . Damit ist sichergestellt, dass die Schneidelemente keinen Kontakt zum Gegenwerkzeug erhalten können und verschleifen [66]. Die Distanzringe selbst werden dabei in ihrer Breite so dimensioniert, dass sie die auftretenden Vorspannkraften  $F_V$  aufnehmen können, ohne dabei Lebensdauerverschleiß zu unterliegen. In der Regel ist, zur Ermöglichung eines schnellen Werkzeugwechsels, der Gegenschneidzylinder angetrieben und somit wird auch

zusätzlich das Schneidmoment  $M_S$  über die Distanzringe auf den Schneidzylinder übertragen. Dieser Aufbau ist für vielfältige Schneidaufgaben ausreichend und eine zusätzliche Werkzeugsynchronisation, beispielsweise durch Zahnräder oder Riemen [67], ist erst mit steigenden Schneidmomenten erforderlich.

Beim rotativen Messerschneiden handelt es sich generell um ein einseitiges Werkzeugsystem. Das bedeutet, dass die formgebende Schneide nicht in beide Werkzeugzylinder, sondern nur einseitig in den Schneidzylinder inkorporiert und die Gegenseite konturlos ist.

Der wesentliche Vorteil von einseitigen Werkzeugsystemen ist, dass die aufwendige Synchronisation und somit auch zeitintensive Ausrichtearbeit der Werkzeugzylinder zueinander entfallen. Dies reduziert deutlich die Komplexität im Werkzeugsystem und spart damit Kosten. Des Weiteren wird der Rüstvorgang durch den Entfall der Synchronisation dadurch begünstigt, dass der Schneidzylinder über die Kulissenlagerung schnell ausgetauscht werden kann.

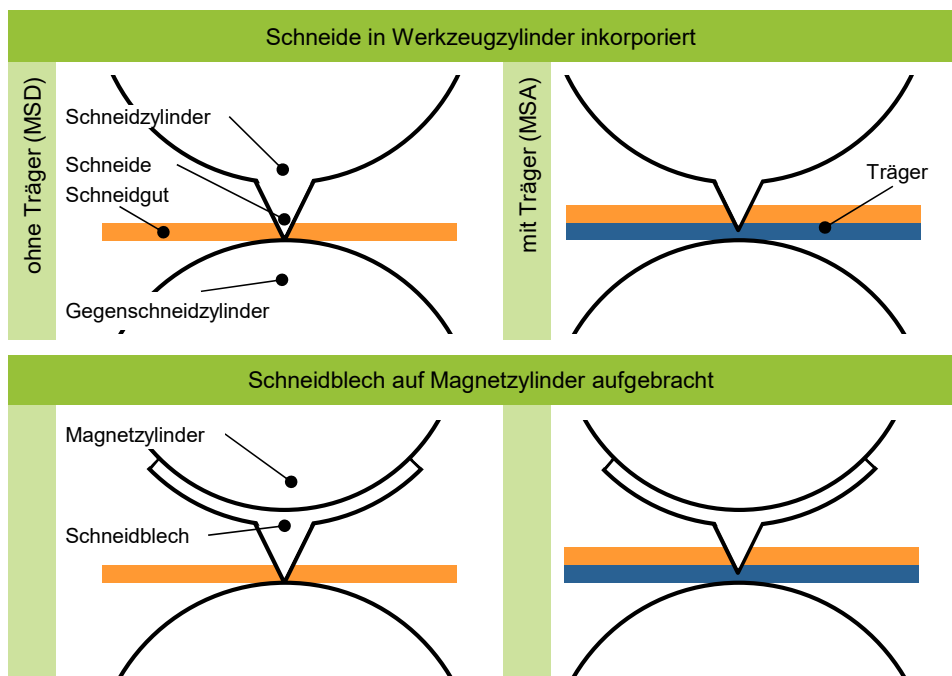


Bild 40: Prinzipielle Variationen im Werkzeugsystem zum rotativen Messerschneiden

Das Werkzeugsystem zum rotativen Messerschneiden (vgl. Bild 40) lässt sich zusätzlich noch in der Art der Aufbringung der Schneidelemente sowie in der Art der Materialzufuhr unterteilen. Die Schneidelemente können

dabei direkt in den Schneidzylinder eingearbeitet oder als Stanzblech ausgeführt sein. Die Art der Materialzufuhr unterscheidet sich in mit oder ohne Verwendung eines zusätzlichen Trägermaterials.

Bei der direkten Einarbeitung der Schneide in den Werkzeugzylinder können besonders hohe Schneidhöhen  $h_{ST}$  erreicht werden. Auch können diese unterschiedlich in der Höhe ausgeführt und somit gezielt auf die Anforderungen des jeweiligen Schneidbereichs abgestimmt werden. [5]

Deutlich kostengünstiger und flexibler ist die Verwendung von Schneidblechen. Diese werden im ebenen Zustand hergestellt und anschließend erst in der Aufbringung um den Magnetzylinder gebogen. Die Maßänderung der Schneidlinienkontur durch die Biegung wird dabei bereits in der Werkzeugherstellung berücksichtigt. Mit Schneidblechen können Schneidhöhen  $h_{ST}$  von 0,30 bis 1,5 mm und variable Schnittwinkel  $\kappa$  von  $30 - 110^\circ$  erreicht werden. Weitere Vorteile von Schneidblechen sind, dass sie kostengünstig sind sowie äußerst schnell bei minimalen Stillstandszeiten gewechselt werden können. [6]

Die Werkzeuge bzw. die Schneidlinien können zusätzlich noch gehärtet werden und damit Härten von bis zu 60 HRC [6] erreichen. Trotz dieses Veredelungsschrittes ist die Belastbarkeit der Schneide sehr gering, weil der „Unterbau“ der Schneide weiterhin weich ist. Bei festen Materialien mit hohem Widerstand gegen Eindringen führt der Schneidvorgang zu einer Stauchung der Schneidhöhe  $h_{ST}$  und das Material wird nicht mehr vollständig getrennt. Deshalb ist dieses rotative Schneidverfahren ausschließlich für weiche metallische Materialien geeignet.

Die Unterscheidung der Materialzufuhr in mit und ohne Träger hat prinzipiell den größten Einfluss auf das rotative Schneidverfahren. Wird das Material ohne Träger zugeführt, spricht man vom Messer-Durch-Schneiden (MSD), da die Schneidhöhe exakt bis auf den Gegenschneidzylinder ragt und somit das Material vollständig durchtrennt (Überdeckung  $u = 0 \text{ mm}$ ).

Wird das Material mit einem Träger laminiert zugeführt, bezeichnet man dies als Messer-An-Schneiden (MSA). Als Trägermaterial eignen sich insbesondere harte und formstabile sowie schwach klebende Polyesterfolien. Die Überdeckung  $u$  wird so eingestellt, dass das Schneidgut vollständig geschnitten und der Träger nur so gering wie möglich angeschnitten wird (Überdeckung  $u < 0 \text{ mm}$ ). Der wesentlichste Vorteil der Verwendung eines Trägers ist, dass das Schneidgut und der Verschnitt trotz vollständiger Trennung auf dem Träger zusammen und positioniert bleiben und somit sicher durch den Prozess transportiert werden. Dadurch lässt sich

nachvollziehbarerweise eine sehr gute Prozessführung und eine direkte Verarbeitung von Rolle zu Rolle realisieren.

Tabelle 3: Parameterauswahl des Versuchsaggregats zum rotativen Messerschneiden

Schneidverfahren				MSD	MSA
Material	Werkstoff	-	-	Kupfer	Kupfer + Träger
	Materialstärke	$s$	mm	0,035	0,075
	Zugfestigkeit	$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	100	100
Stempel	Wälzkreis	$D_{ST}$	mm	177,87	177,87
	Stempel innen	$d_{st}$	mm	176,87	176,83
	Stempel außen	$d_{SG}$	mm	177,87	177,83
	Stempelhöhe	$h_{ST}$	mm	0,50	0,50
Matrize	Wälzkreis	$D_{MA}$	mm	170,00	170,00
Anlage	Achsabstand	$a$	mm	173,94	173,94
	Übersetzung	$i_A$	-	1,05	1,05
	Überdeckung	$u$	mm	0,00	- 0,02
	Blechlage	-	-	0,50	0,50
Prozess	Alpha	$\alpha_{ST}$	°	-1,12	-1,41
	Eingriffslänge	$l_{PE}$	mm	1,74	2,19

Zusammenfassend sind in Tabelle 3 die wesentlichen Parameter des Versuchsaufbaus aufgeführt. Besonders hervorzuheben sind die unterschiedlichen Überdeckungen  $u$  zwischen MSD und MSA sowie die generell geringen Eingriffswinkel  $\alpha_{ST}$  und Eingriffslängen  $l_{PE}$ , die durch die niedrige Materialstärke  $s$  bedingt sind.

#### 4.2.2 Trennvorgang des rotativen Messerschneidens

Der Trennvorgang des Messerschneidens ist dadurch gekennzeichnet, dass eine keilförmige Schneide in das Material eindringt und es dabei auseinanderdrängt. Die einzelnen Phasen der idealisierten Trennung zeigt die nachfolgende Abbildung.

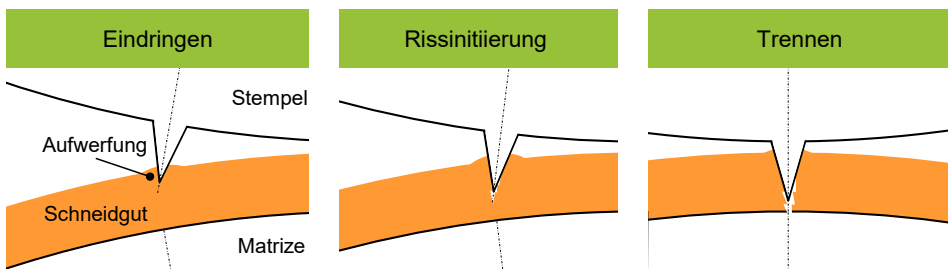


Bild 41: Idealisierter Trennvorgang beim rotativen Messerschneiden [68]

Die Schneide trifft im Eingriffspunkt  $P_E$  auf das Schneidgut auf und dringt dann zunächst elastisch und anschließend plastisch in das Material ein.

Durch die Materialverdrängung an den Flanken der Schneide entsteht eine Materialaufwerfung an der Schneidgutoberseite. Mit dem weiteren Eindringen und der wachsenden Materialverdrängung überschreiten die Schubspannungen die Schubdruckgrenze und Risse werden an der Schneidenspitze initiiert, welche zunehmend wachsen und zur vollständigen Trennung des Schneidguts in Gutteil und Verschnitt führen. [68]

Durch die schrägen Flanken der Schneide kommt es zu seitlichen Materialverdrängungen und -stauchungen. Versuche des Materials auszuweichen haben zur Folge, dass das Schneidgut vom Gegenschneidzylinder abhebt und sich im Schneidbereich verformt. [68] Dieses Phänomen ist auch deutlich in den Untersuchungen zu beobachten und wird im nachfolgenden Kapitel detailliert behandelt. Eine Anpassung von Schneidhöhe  $h_{ST}$  und Flankenwinkel  $\kappa$  kann hier Abhilfe leisten.

Die in Kapitel 3.1.5 benannten verschiedenen Schneidphasen im Rotations-schneidprozess behalten auch hier ihre Gültigkeit und beeinflussen den Trennvorgang entsprechend.

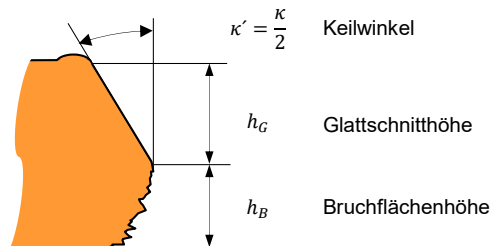


Bild 42: Schnittflächengrößen beim Messerschneiden nach VDI 2906 [64, 68]

Die Schnittflächengrößen sind nach VDI 2906 [64] kategorisiert und setzen sich durch die Glattschnitthöhe  $h_G$  und Bruchflächenhöhe  $h_B$  zusammen, wobei die Glattschnitthöhe  $h_G$  den halben Keilwinkel  $\kappa'$  abbildet. Bild 42 zeigt die zugehörige parametrisierte Schnittkante im Querschnitt.

### 4.2.3 Analyse des Schneidverfahrens MSD/MSA

Rotatives Messerschneiden ist, wie nachfolgende Ergebnisse implizieren, prinzipiell gut geeignet, sehr dünne und weiche Metallfolien zu verarbeiten. Mit einer spezifischen Anpassung der Werkzeugstruktur auf die jeweiligen Anforderungen der Anwendung ist zudem eine deutliche Verbesserung der Ergebnisse zu erwarten. Die Testresultate werden im ersten Schritt via Sichtprüfung analysiert.

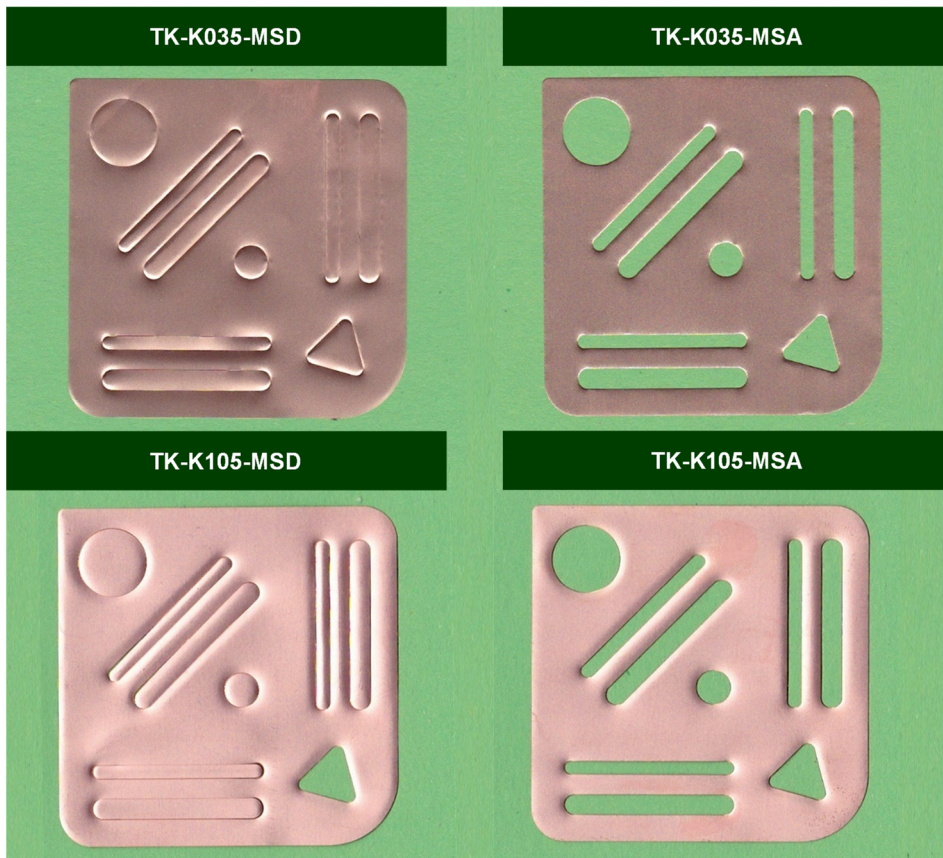


Bild 43: Testteile TK-K035-MSD/MSA (oben) und Testteile TK-K105-MSD/MSA (unten)

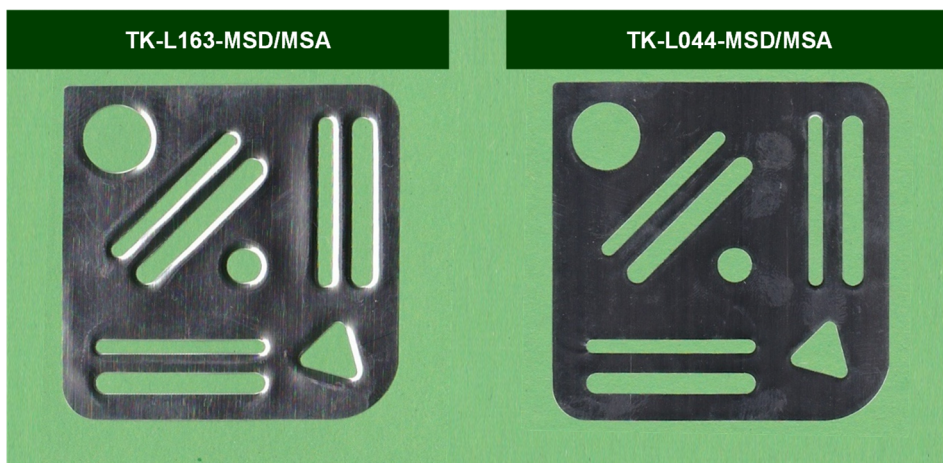


Bild 44: Testteile TK-L163-MSD/MSA und TK-L044-MSD/MSA

Die Testteile aus Kupferfolie K035 (Bild 43 oben) und K105 (Bild 43 unten) weisen ein ähnliches Gesamtbild auf. Die jeweils mit MSA prozessierten Teile sind unabhängig von der Materialstärke  $s$  vollständig getrennt, während bei den mit MSD prozessierten der Verschnitt noch fest in den Teilen verbleibt. Dies deutet auf eine unvollständige Trennung von Testteil und Verschnitt hin. Der herstellungsbedingte Hintergrund dazu wird im weiteren Verlauf bei der Betrachtung der Schnittkanten erläutert.

Bei den Testteilen aus Lotfolie L163 und L044 (Bild 44) ist kein Unterschied zwischen MSD und MSA erkennbar. Auch sind bei keinen Testteilen Verschnittreste zu beobachten, was auf eine vollständige Trennung hindeutet.

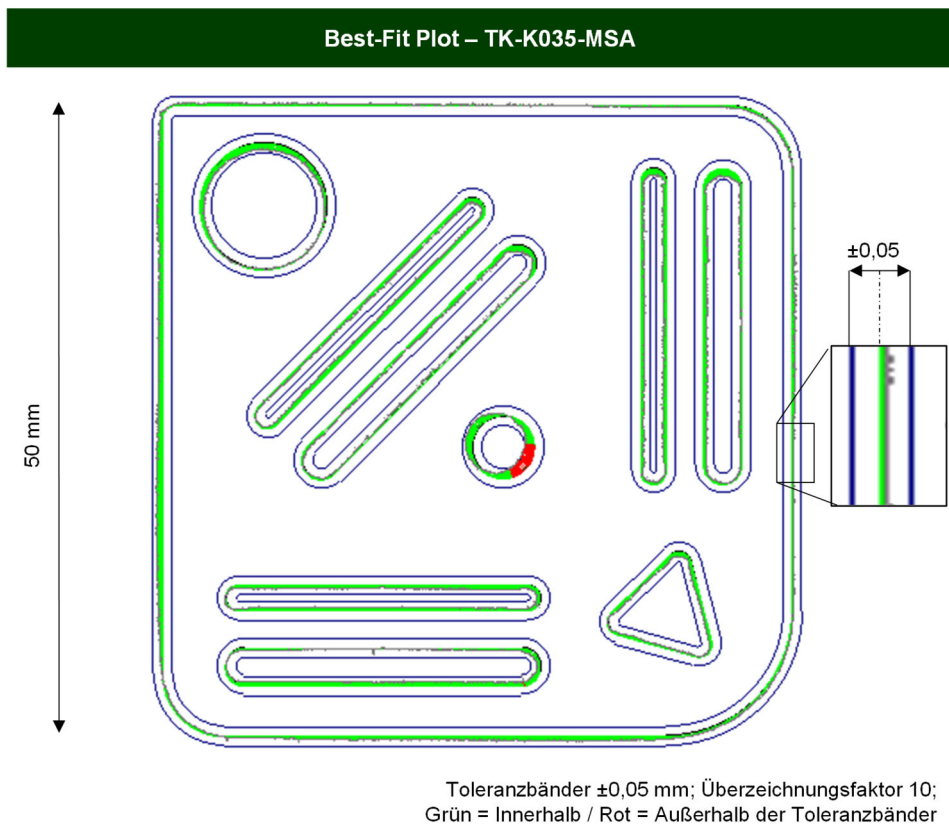


Bild 45: Soll-Ist-Konturvergleich des geschnittenen Testteils TK-K035-MSA

Eine globale Verformung ist insgesamt weder an den Kupfer- noch an den Lotband-Testteilen auszumachen. Dies ist aber auch auf die geringe Materialstärke  $s$  zurückzuführen. Zudem weisen keine Testteile augenscheinliche Knitter auf.

Auffällig ist jedoch, dass alle Testteile leichte bis größere lokale Verformungen am Schnittkanten-Einzugsbereich aufweisen. Diese lokalen Verformungen sind weitestgehend auf ein Abheben des Schneidguts vom Gegen-schneidzylinder zurückzuführen, welche sich mit ansteigender Materialstärke  $s$  zunehmend im Schnittkanten-Einzugsbereich plastisch manifestieren. Die absolut gemessenen Verformungswerte belaufen sich dabei von kaum nachweisbar bei Materialstärke  $s = 0,035$  bzw.  $0,44$  mm, über  $0,15$  mm Höhe und  $1,0$  mm Breite bei Materialstärke  $s = 0,105$  mm, bis zu  $0,20$  mm Höhe und  $1,3$  mm Breite bei Materialstärke  $s = 0,163$  mm.

Die globale Maßhaltigkeit ist über alle Testteile hinweg im Toleranzbereich von  $\pm 0,05$  mm und entspricht somit der Allgemeintoleranzklasse „fein“ nach DIN ISO 2768-1 [65]. Die Maßhaltigkeit wird maßgeblich von der Genauigkeit des Werkzeugsystems beeinflusst. Messeinflüssen aufgrund von Verformungen wurde durch ein vorhergehendes Richten der Testteile entgegengewirkt.

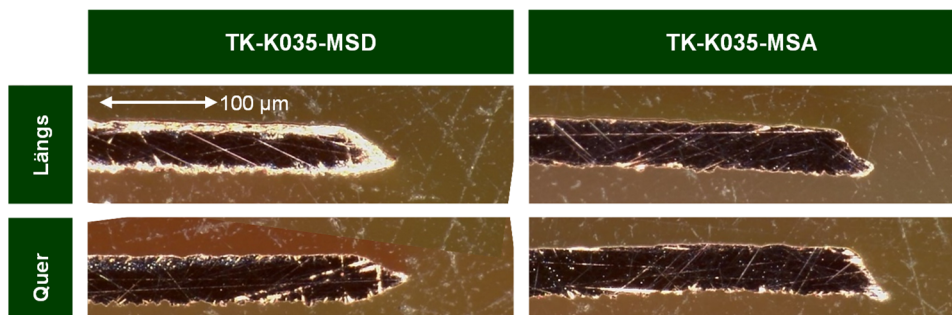


Bild 46: Schnittkanten zu Testteilen TK-K035-MSD/MSA

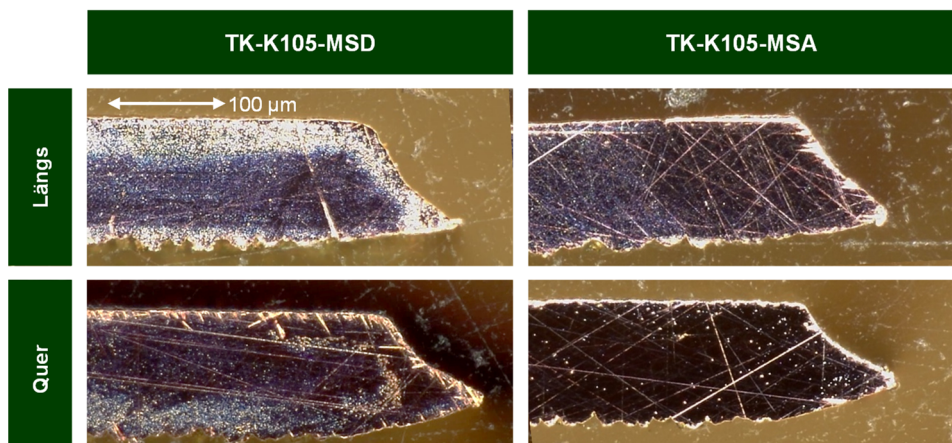


Bild 47: Schnittkanten zu Testteilen TK-K105-MSD/MSA

Die Schnittflächen aller Kupfertestteile entsprechen nicht den erwarteten Schnittflächen nach VDI 2906, wie sie in Bild 42 beschrieben sind. Insgesamt sind bei keinem der Testteile aus Kupferband Bruchzonen erkennbar. Der Glattschnittbereich bildet hier nicht den halben Keilwinkel  $\kappa$  ab, sondern der Winkel an den Testteilen ist deutlich größer. Der eigentliche Bruchbereich verläuft schräg und die Kante ist glatt. Die beiden Zonen treffen sich in einer scharfen Kante. Das Verhältnis von Glattschnitt zu Bruchzone ist zwei zu eins. Bei MSD sind zusätzlich an der Kante teilweise Zipfelbildungen erkennbar. Das weist darauf hin, dass die Teile nicht vollständig vom Verschnitt getrennt sind. Anhand nachfolgender Abbildung wird erklärt, wie die ungewöhnliche Ausbildung der Schnittkantenfläche zustande kommt:

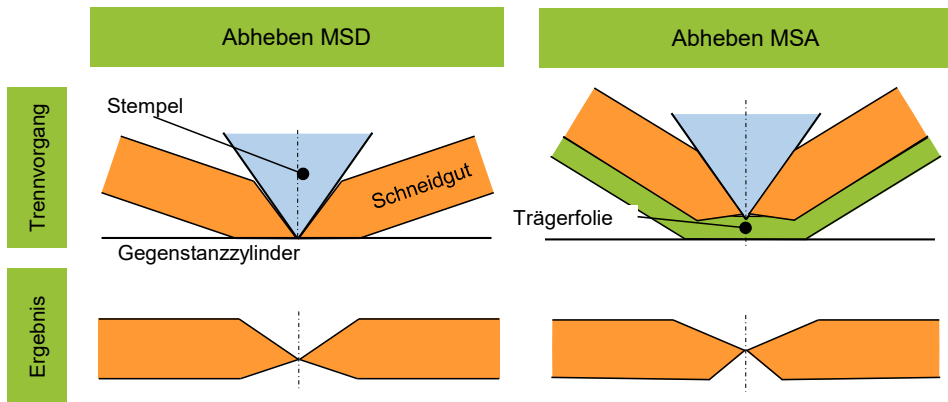


Bild 48: Einfluss des Material-Abhebens auf die Schnittkanten beim rotativen Messerschneiden (Darstellung anhand TK-K105-MSD/MSA)

Die Schnittkantenflächen sind in Bezug auf ihre Ausrichtung quer oder längs zur Vorschubrichtung nicht unterschiedlich ausgebildet. Daraus lässt sich ableiten, dass der Einfluss der Stempelkipfung auf die Schnittkantenfläche nur sehr gering ist. Vielmehr ist die Ausprägung der Schnittkantenfläche auf das Abheben des Materials vom Gegenschnidzylinder, verbunden mit einer plastischen Verformung der Bruchflächenzone, zurückzuführen (siehe Bild 48). Bei MSA wird das Schneidgut durch die höhere Eindringtiefe der Keilschneide in das Material deutlich weiter aufgestellt und damit stärker verformt als bei MSD. Auch ist aufgrund des Trägers die Ausprägung der geplatteten Bruchflächenzone geringer. Legt man den Bezug bei MSA nicht auf das Schneidgut allein, sondern auf das Laminat aus Schneidgut und Träger sind MSA und MSD vergleichbar.

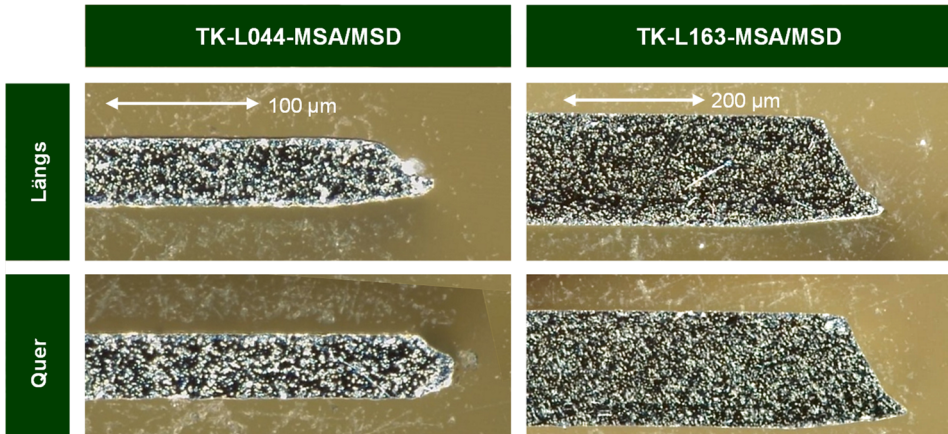


Bild 49: Schnittkanten zu Testteilen TK-Lo44/Li63-MSA/MSD

Auch in den Schnittkanten (siehe Bild 49) lassen sich bei den Lotfolien-Testteilen zwischen MSA und MSD keine Unterschiede ausmachen. Insgesamt sind die Ergebnisse direkt mit denen der Kupferfolie vergleichbar.

### 4.3 Rotatives Stempel-Matrize-Schneiden SMS

Das rotative Stempel-Matrize-Schneiden wird, wie bereits in Kap 2.1.2 erläutert, in der Verarbeitung von Metallbändern für einfache Lochungen eingesetzt. Dies ist die Ausgangsbasis für das im Rahmen dieser Forschungsarbeit auf die Verarbeitung von dünnen Metallfolien weiterentwickelte, optimierte und hier vorgestellte Werkzeugsystem zum SMS [60]. Zu den wesentlichen Neuerungen zählen erstens die Einführung des eindringlosen Schneidens zur Reduktion der Werkzeugrelativbewegungen im Trennvorgang und zweitens die integrierte Elastomer-Matrix mit Niederhalte- und Auswerfefunktion zur Stabilisierung des Schneidguts im, vor und nach dem Schneidvorgang. Die beiden Entwicklungen ermöglichen eine wesentlich engere Prozessführung in der Verarbeitung der dünnen metallischen Funktionsfolien, welche wiederum zu einer signifikanten Qualitätssteigerung im Ergebnis führt. Nachfolgende Unterkapitel beschreiben das optimierte Schneidaggregat sowie die angepasste Prozessführung im Detail und analysieren abschließend dessen Eignung in der Verarbeitung von dünnen Metallfolien für mechatronische Anwendungen.

#### 4.3.1 Gestaltung des Werkzeugsystems SMS

Das Schneidaggregat zum rotativen Stempel-Matrize-Schneiden besteht aus zwei Werkzeugzylindern, dem Stempel- und dem Matrizenzylinder,

die über ein Getriebe starr miteinander synchronisiert sind. Diese sind in einem höchst massiven und steifen Gestell gelagert und werden mithilfe einer, an den Distanzringen angreifenden Vorspanneinheit gesichert. Die Zwischenräume der Werkzeugzylinder sind mit einer Elastomer-Matrix [60] ausgegossen (vgl. Kapitel 3.3.2). Nachfolgende Abbildung zeigt den Aufbau des Schneidaggregats. [P5–P8]

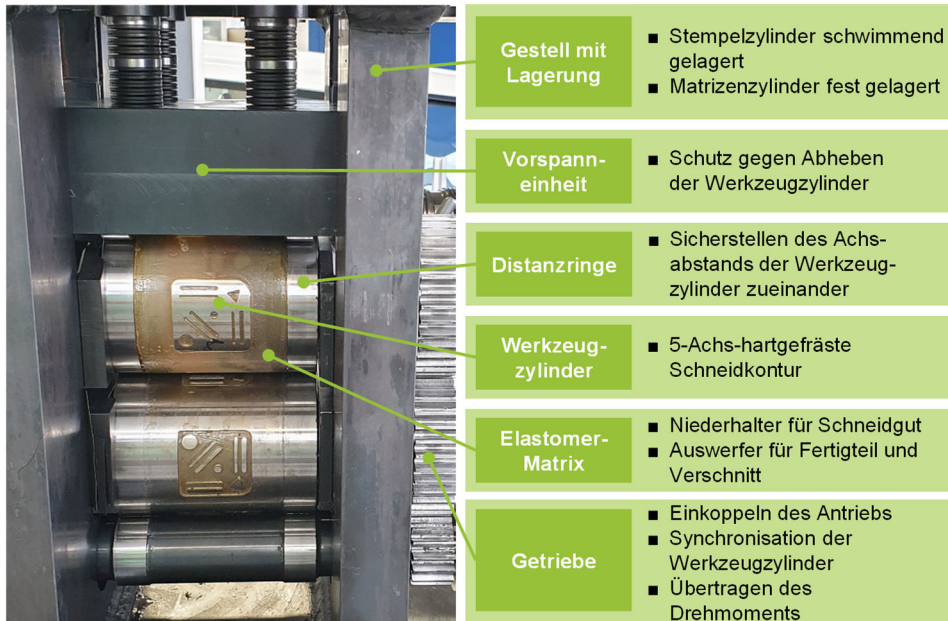


Bild 50: Am Lehrstuhl entwickeltes Schneidaggregat zum rotativen Stempel-Matrize-Schneiden [P5–P8]

Die auszuschneidende Kontur ist als Positiv in den Stempel- und als Negativ in den Matrizenzylinder inkorporiert. Damit handelt es sich beim SMS um ein zweiseitiges Werkzeugsystem. Dies macht es erforderlich, dass die beiden Zylinder axial und radial genauestens geführt werden, um die einander zugeordneten Schneidelemente im Prozess exakt korrespondierend auszurichten.

Anders als am Markt verfügbar ist in dieser Eigenentwicklung die Werkzeugkonfiguration im Setup des eindringlosen Schneidens ausgeführt [60]. Dabei taucht der Stempel nicht in die Matrize ein, sondern rollt im Umkehrpunkt  $P_U$  lediglich auf dieser ab. Dies hat den Vorteil, dass der Stempel nur eine gewöhnliche Epizykloide abfährt und keine Schleife bildet, wie sie bei der verlängerten Zyklode eintritt. Damit reduziert sich der Einfluss der Kinematik auf die Schnittkanten wodurch sich das Schnittbild, respektive

das Schneidergebnis, verbessert. Zudem kann der Schneidspalt  $u_s$  in dieser Variante beliebig eingestellt werden, prinzipiell sind auch negative Schneidspaltwerte möglich. Der exakte Achsabstand  $a$  wird im Prozess stetig über die Distanzringe sichergestellt und eingehalten. [P5–P8]

Als weitere Besonderheit sind beim SMS die beiden Werkzeugzylinder mit der integrierten Elastomer-Matrix [60] hervorzuheben. Die Elastomer-Matrix ist im Wesentlichen ein in die Kavitäten der Werkzeugzylinder vergossenes Polyurethan, welches das Schneidgut während der Verarbeitung gegen unkontrolliertes Verhalten elastisch fixiert. Die Funktion der Elastomer-Matrix wird im nachfolgendem Teilkapitel erläutert und es wird zusätzlich auf Kapitel 3.3.2 verwiesen. [P5–P8]

Tabelle 4: Parameterauswahl des Versuchsaggregats zum rotativen Stempel-Matrize-Schneiden

Schneidverfahren				SMS
Material	Werkstoff	-	-	E-Band
	Materialstärke	s	mm	0,500
	Zugfestigkeit	$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	580
Stempel	Wälzkreis	$D_{ST}$	mm	108,00
	Stempel innen	$d_{st}$	mm	100,00
	Stempel außen	$d_{SG}$	mm	108,00
	Stempelhöhe	$h_{ST}$	mm	4,00
Matrize	Wälzkreis	$D_{MA}$	mm	108,00
	Matrize innen	$d_{ma}$	mm	100,00
	Matrize außen	$d_{MA}$	mm	108,00
	Matrizenhöhe	$h_{MA}$	mm	4,00
Anlage	Achsabstand	a	mm	108,00
	Übersetzung	$i_A$	-	1,00
	Überdeckung	u	mm	0,00
	Blechlage	-	-	0,50
Prozess	Alpha	$\alpha_{ST}$	°	-5,53
	Eingriffslänge	$l_{PE}$	mm	5,20

Tabelle 4 zeigt abschließend einen kompakten Überblick zu den im Schneidaggregat angewandten Parametern, deren Kenngrößen sowie der jeweiligen Werte beim SMS.

#### 4.3.2 Trennvorgang des rotativen SMS

Der Trennvorgang beim rotativen Stempel-Matrize-Schneiden kann weitestgehend vom Hubstanzen abgeleitet werden. Allerdings weicht die Kinematik, wie in Kapitel 3.2 beschrieben, erheblich in Bewegungsablauf und Geschwindigkeiten vom Hubstanzen ab.

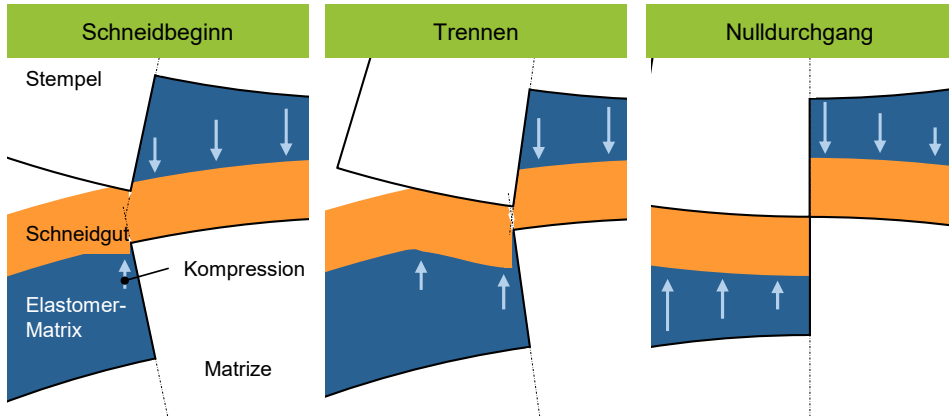


Bild 51: Idealisierter Trennvorgang beim rotativen Stempel-Matrize-Schneiden

Vor dem eigentlichen Schneidbeginn (Bild 51 links) wird das Schneidgut von der Elastomer-Matrix eingefangen und so auf den Matrizenzyylinder niedergehalten. Im Schneidbeginn trifft der Schneidstempel im Winkel  $\alpha_{ST}$  auf das Schneidgut auf und leitet elastische Biegungen [59] ein. Diese werden von der Elastomer-Matrix unterdrückt, was auch ein Abheben des Schneidguts vom Matrizenzyylinder verhindert. [P5]

Mit dem weiteren Eindringen des Stempels in das Schneidgut wird das Fertigteil in den Matrizenzyylinder gedrückt, wobei plastische Verformungen in das Material induziert werden. [59] Zunächst fließt das Schneidgut im Bereich der Scherzone unter Ausbildung des Kanteneinzugs. Jedoch erschöpft sich das Fließvermögen des Werkstoffs mit zunehmendem Stempelweg und es entstehen Risse, die von den Schneidkanten ausgehen. Diese wandern durch das Material aufeinander zu und führen, je nach Werkstoffeigenschaften, nach ca. 60% des Stempelwegs zur vollständigen Trennung des Schneidguts in Fertigteil und Verschnitt (Bild 51 links und Mitte). [59]

Abschließend wird das Material noch weiter in die Matrize geformt, bevor nach dem Umkehrpunkt Stempel und Matrize wieder auseinanderwandern. Dabei relaxiert die Elastomer-Matrix und presst Fertigteil und Verschnitt wieder aus den Schneidkavitäten heraus (Bild 51 rechts). [P5]

Wie aus Bild 51 Mitte ersichtlich, wird das Fertigteil der Stempeloberfläche folgend in die Matrize umgeformt. Diese plastische Einwirkung ist mit der eines Richtprozesses vergleichbar, welche im Ergebnis aber eher zu einer Vergrößerung der Deformation in Form einer globalen Biegung in Vorschubrichtung führt. Dabei können Materialschädigungen entstehen, die Auswirkungen auf die Materialfunktionen haben (Kapitel 5.2.2).

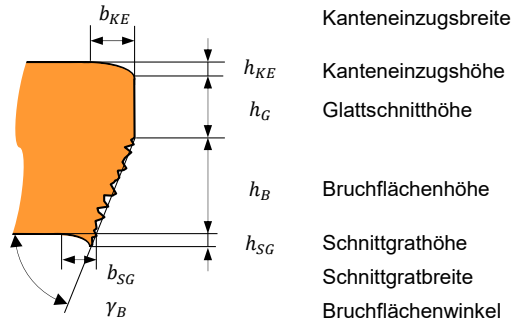


Bild 52: Schnittflächengrößen beim Scherschneiden nach VDI 2906 [64, 68]

Die Schnittkanten für das Scherschneiden sind nach VDI 2906 [64] kategorisiert und setzen sich aus der Kanteneinzugsbreite und -höhe, der Glattschnitthöhe, der Bruchflächenhöhe und dem -winkel sowie der Schnittgrathöhe und -breite zusammen. Aufgrund der geänderten Kinematik beim SMS wird jedoch ein abweichendes Schnittbild erwartet.

### 4.3.3 Analyse des Schneidverfahrens SMS

Im Gegensatz zum rotativen Schneidverfahren MSD/MSA lassen sich hiermit auch dickere Kupfer- und Stahlwerkstoffe verarbeiten, weshalb bei der Untersuchung neben 500  $\mu$  dickem Kupfer K500 auch Elektrobleche E200/E350 geschnitten wurden. Die Ergebnisse aus der Verarbeitung der Testmaterialien mit dem Stempel-Matrize-Werkzeug entsprechen noch keinem industriellen Standard, zeigen aber das Potenzial dieses rotativen Schneidverfahrens. Die Testteile sind nur teilweise ausgeschnitten, was auf Ungenauigkeiten in der Herstellung des Werkzeugs zur Testgeometrie und den dadurch entstehenden Abweichungen in der Ausrichtung der Schneidzylinder zurückzuführen ist.

Bild 53 zeigt die nicht vollständig vom Verschnitt getrennten Testteile. Die Außenkontur ist bis auf den Fertigschnittbereich (Phase 3) vollständig geschnitten. Die Innenkonturen sind in den Bereichen der Übergänge (Radien) nicht vollständig getrennt. Die geraden Konturanteile sind sowohl längs, quer und kombiniert vollständig getrennt. Ursache hierfür sind, trotz exakter Ausrichtung von Stempel und Matrize zueinander, Abweichungen im Schneidspalt in diesen Bereichen. Diese wurden mittels Papierschnittverfahren auch nachgewiesen und sind auf Maßabweichungen in der Schneidkontur zurückzuführen. Diese Maßabweichungen sind bereits bei der Werkzeugherstellung entstanden und können nicht mehr nachgearbeitet werden.

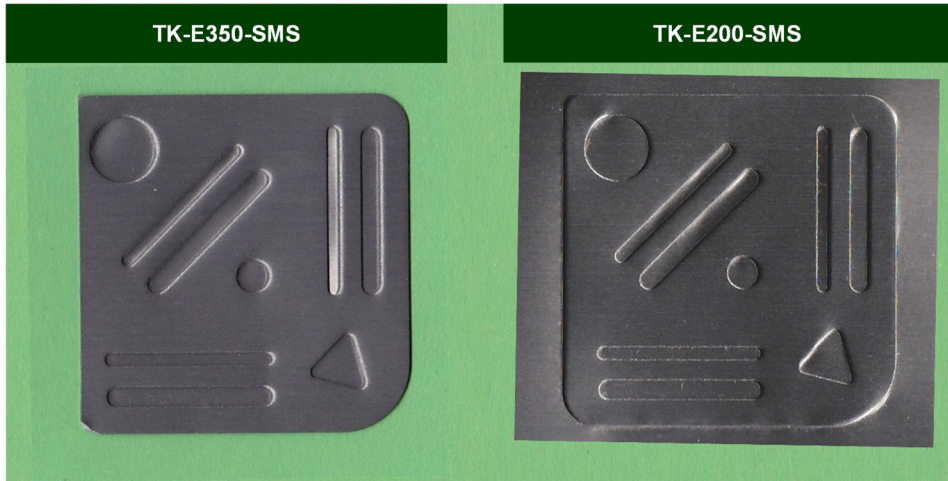


Bild 53: Testteile TK-E350-SMS und TK-E200-SMS

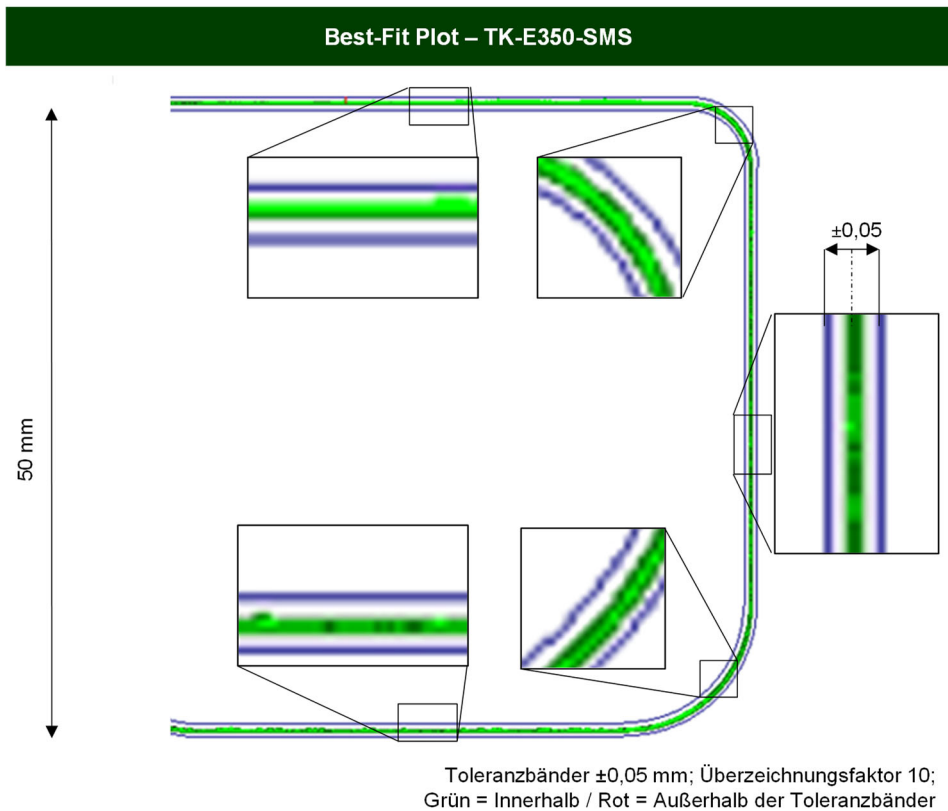
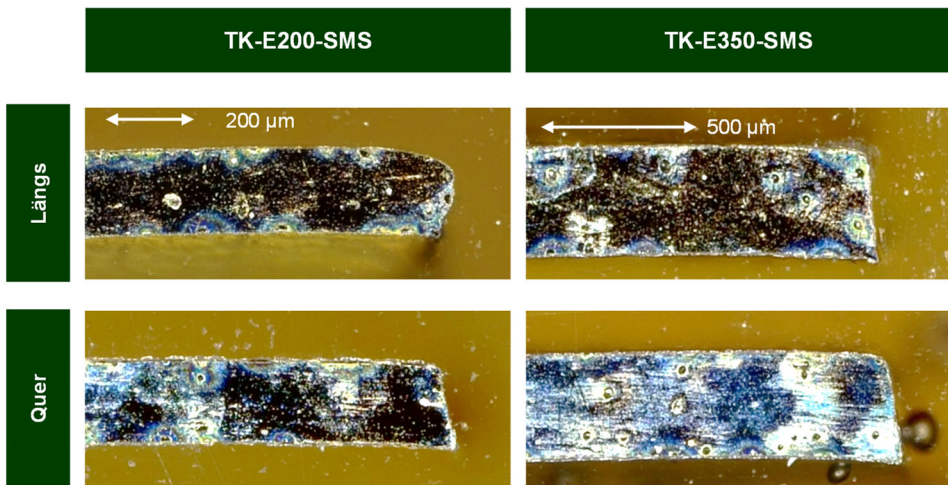


Bild 54: Soll-Ist-Konturvergleich des geschnittenen Testteils TK-E350-SMS

Die angewandten Werkzeuge in Kapitel 5 sind, abgesehen von der auszuscheidenden Kontur, identisch im Aufbau und in Ihrer Funktion. Daher wird auf eine Neubeschaffung der Werkzeuge mit Wiederholung der Versuche verzichtet und an dieser Stelle zusätzlich auf die weiterführenden Ergebnisse und Erkenntnisse aus Kapitel 5 verwiesen.

Der Soll-Ist-Vergleich (siehe Bild 54) zeigt einen aus den Testteilen extrahierten Konturausschnitt. Das Ergebnis ist nicht repräsentativ, zeigt aber, welche hohen Genauigkeiten im Stempel-Matrize-Schneiden erreicht werden können. Die Ist-Kontur ist konstant zwei hundertstel Millimeter kleiner als die Soll-Kontur. Diese systematische Abweichung ist abhängig von der Nennmaßauslegung und der Schneidspalttolerierung und kann damit in der Werkzeugauslegung abgestellt werden.

Die Versuche mit der weiteren Werkzeuggeometrie (siehe Kapitel 5.3) bestätigen die Ergebnisse des Konturvergleichs.



Unterschiedliche Skalen zur besseren Darstellung

Bild 55: Schnittkanten zu Testteilen TK-E200-SMS und TK-E350-SMS

Die Schnittkanten der mittels SMS hergestellten Elektroblech-Testteile (Bild 55) weisen einen hohen Traganteil auf, d.h. die Schnittfläche ist nahezu durchgängig vergleichbar mit der beim Feinschneiden. Bruchzonen sind teilweise vorhanden, aber nicht sehr groß ausgeprägt. Die längs geschnittenen Bereiche sind rechtwinklig abgeschert. Die quer geschnittenen Bereiche sind prozessbedingt aufgrund der Stempelkipfung leicht schräg abgeschert. Eine Gratbildung ist erkennbar.

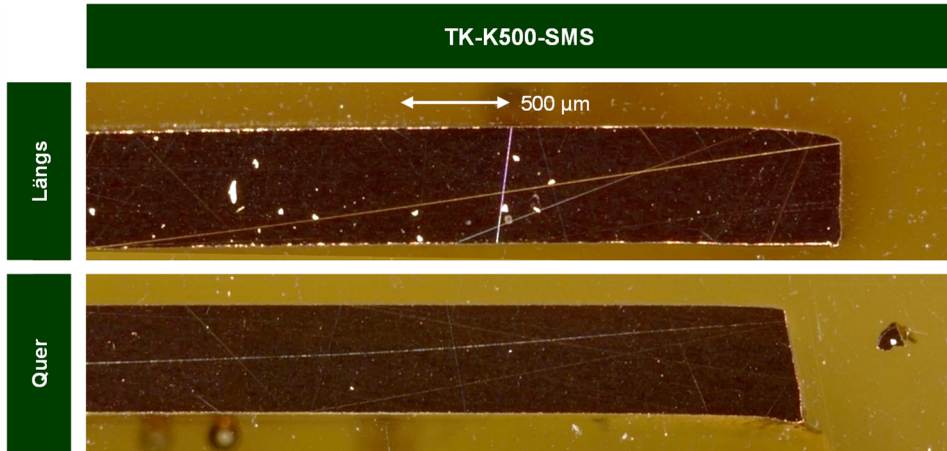


Bild 56: Schnittkanten zum Testteil TK-K500-SMS

Trotz der größeren Materialstärke  $s$  sind die Ergebnisse der Kupfer-Testteile TK-K500-SMS vergleichbar den Testteilen zum Elektroblech. Die Längsschnitte sind exakt rechtwinklig und die Querschnitte weisen eine Schrägstellung auf. Auch ist nur eine leichte Gratbildung zu verzeichnen.

#### 4.4 Rotatives Elastomer-Schneiden ES

Rotatives Elastomer-Schneiden ES ist ein rotatives Schneidverfahren, das bisher in keiner bekannten Anwendung zum industriellen Einsatz kommt. Wissenschaftliche Untersuchungen beschränken sich auf einfache Lochstanzungen in weiche Materialien [69–71]. Jedoch stellt es, wie nachfolgende, im Rahmen dieser Dissertation angestellte Betrachtungen zeigen, eine bedeutende Ergänzung zu den beiden bereits vorgestellten rotativen Schneidverfahren dar. Das große Potenzial liegt im einfachen und robusten Aufbau des Schneidaggregats, der sich aufgrund des homogenen Elastomerzylinders als flexible und elastische Schneidunterlage als einseitiges Werkzeugsystem gestaltet. Mit dieser Anordnung lassen sich verschiedenste dünne Materialien verarbeiten.

##### 4.4.1 Gestaltung des Werkzeugsystems ES

Ein Schneidaggregat zum rotativen Elastomer-Schneiden besteht, analog zu den anderen Werkzeugsystemen, aus einem massiven Gestell, welches den Werkzeugzylinder schwimmend und den Elastomerzylinder fest lagert sowie einer Vorspanneinheit, die beide Zylinder vorspannt und damit die Überdeckung  $u$  erzeugt.

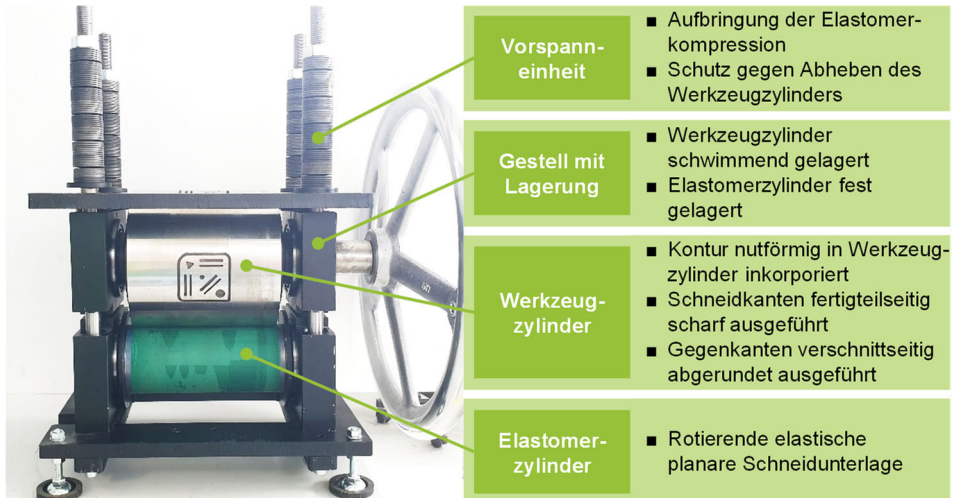


Bild 57: Prototypisches Schneidaggregat zum rotativen Elastomer-Schneiden

Das Gestell, die Lagerung und die Vorspanneinheit für dieses Werkzeugsystem sind von den Schneidaggregataufbauten der vorangehenden Kapitel abgeleitet und somit bereits ausführlich abgehandelt.

Der Werkzeugzylinder ist beim Elastomer-Schneiden sehr einfach in der Ausführung. Es handelt sich, wie nachfolgendes Bild 58 zeigt, um einen geschliffenen Zylinder, in den die Kavitäten als dreidimensionale Nuten hartgefräst sind und somit die Fertigteilkontur abbilden.

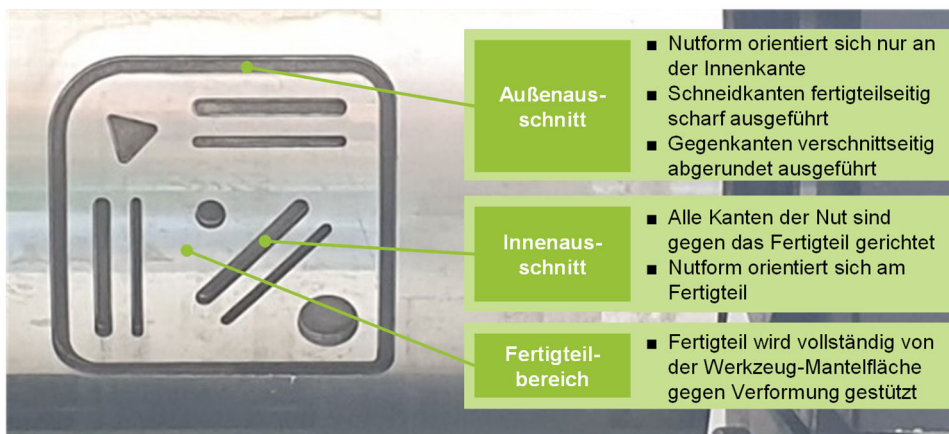


Bild 58: Werkzeugkavität zum rotativen Elastomer-Schneiden

Sind die Abstände zwischen den auszuschneidenden Konturelementen größer als 5 mm, ist die Nut einseitig an der auszuschneidenden Kontur

scharf und an der gegenüberliegenden Seite verrundet ausgeführt. Diese Nutform ist zudem typisch für Außenkanten. Liegen Konturelemente näher beisammen, sind beide Seiten der Nut scharf ausgeführt und tragen zum Ausschneiden bei. Der gewählte Grenzabstand von 5 mm ist durch Vorversuche sehr grob ermittelt, daher empfiehlt sich eine simulative und versuchstechnische Optimierung für das jeweilige Material und die jeweilige Anwendung.

Der Gegenzylinder, respektive der Elastomerzylinder, besteht aus einem Wellenkern, auf welchen das Elastomer, ein zähelastisches Polyurethan der Shore-Härte A95 sowie Dicke von 5 mm, aufvulkanisiert ist. Dadurch, dass der Elastomerzylinder unbelastet formlos ist und sich der „Stempel“ erst im Prozess ausformt, handelt es sich beim rotativen Elastomer-Schneiden um ein einseitiges Werkzeugsystem.

Um eine ungleiche Abnutzung der Elastomerbeschichtung hervorzurufen, ist möglichst eine irrationale Werkzeugübersetzung  $i_W$  zu wählen ( $i_W = \mathbb{R} \setminus \mathbb{Q}$ ).

In dieser Schneidaggregatausführung sind keine Distanzringe vorhanden, was eine flexibel einstellbare Überdeckung  $u$  ermöglicht. Sind die Prozessparameter, insbesondere die prozessbestimmende erforderliche Überdeckung  $u$ , für die jeweilige Schneidanwendung bekannt, kann die Verwendung von Distanzringen unter Verlust der Anlagenflexibilität helfen, den Prozess zu stabilisieren.

Tabelle 5: Parameterauswahl des Versuchsaggregats zum rotativen Elastomer-Schneiden

Schneidverfahren				ES
Material	Werkstoff	-	-	Kupfer
	Materialstärke	s	mm	0,035
	Zugfestigkeit	$R_m$	N/mm <sup>2</sup>	100
Stempel	Wälzkreis	$D_{ST}$	mm	98,00
	Stempel innen	$d_{st}$	mm	90,00
	Stempel außen	$d_{SG}$	mm	100,00
	Stempelhöhe	$h_{ST}$	mm	5,00
Matrize	Wälzkreis	$D_{MA}$	mm	200,00
	Matrize innen	$d_{ma}$	mm	196,00
	Matrize außen	$d_{MA}$	mm	200,00
	Matrizenhöhe	$h_{MA}$	mm	2,00
Anlage	Achsabstand	a	mm	149,00
	Übersetzung	$i_A$	-	0,49
	Überdeckung	u	mm	1,00
	Blechlage	-	-	0,50
Prozess	Alpha	$\alpha_{ST}$	°	- 9,54
	Eingriffslänge	$l_{PE}$	mm	8,29

Tabelle 5 zeigt die im Versuchsaggregat zum Tragen kommenden Parameter. Besonders hervorzuheben ist die negative Überdeckung  $u$ , die Grattmesser dafür ist, wie weit die Elastomer-Matrix in die Matrize eindringt. Durch die große Überdeckung resultieren trotz der vergleichsweise geringen Materialstärke  $s$  auch große Eingriffswinkel  $\alpha_{ST}$  und -längen  $l_{PE}$ . Diese hohe Eingriffsbreite hilft, den notwendigen Druck aufs Material aufzubringen und so den Trennvorgang zu vollziehen.

#### 4.4.2 Trennvorgang des rotativen ES

Der Trennvorgang beim rotativen Elastomer-Schneiden ähnelt dem des Hubstanzens, mit der Besonderheit, dass die Elastomer-Matrix gleichzeitig die Funktion des Stempels und des Niederhalters übernimmt.

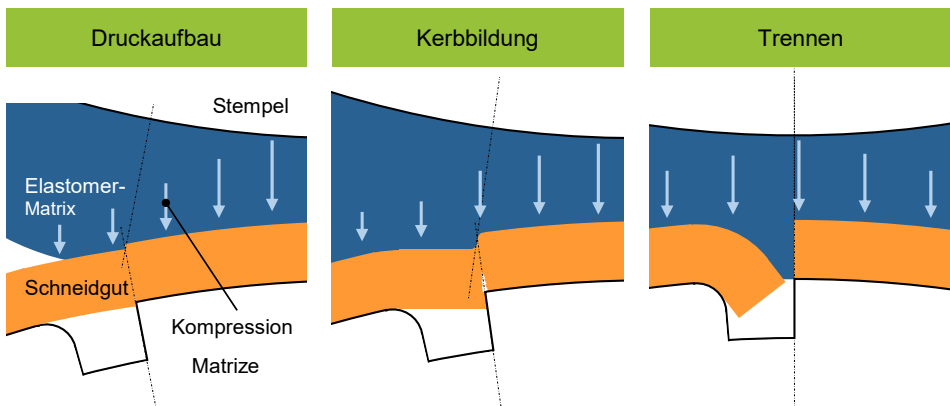


Bild 59: Idealisierter Trennvorgang beim rotativen Elastomer-Schneiden

Trifft der Elastomerzylinder, wie in Bild 59 links dargestellt, auf das Schneidgut auf, beginnt das Elastomer, aufgrund der eingestellten Überdeckung  $u$ , sich gegen das Schneidgut zu verformen und baut dabei Druck auf dieses auf. Ist das Schneidgut vom Werkzeugzylinder unterstützt, wirkt der Druck als Niederhalter und fixiert die Position. Damit ist das Gutteil vor Deformation oder Beschädigung im Prozess geschützt. Über den ausgesparten und somit nicht gestützten Bereichen verformt sich das Schneidgut zunächst elastisch und mit steigendem Druck plastisch in die Nut. Somit bringt der Druck in den gestützten Bereichen eine Niederhaltekraft  $F_{NH}$  auf und entwickelt in den ungestützten Bereichen die Schneidkraft  $F_S$  (Siehe Bild 29).

Im Bereich der scharfen Kante bildet sich eine Kerbe aus. Ausgehend von dieser Kerbe bilden sich nach Überschreitung der kritischen Schubspannungen Risse aus. Im Bereich der verrundeten Kante werden aufgrund der

fehlenden Kerbwirkung keine kritischen Schubspannungen erreicht und es entstehen somit auch keine Risse. In diesem Bereich wird das Schneidgut nur um die verrundete Kante geformt.

Die finale Überdeckung  $u$  wird erst im Umkehrpunkt  $P_U$  erreicht (Siehe Bild 22). Bis dahin verstärkt sich der Druck zunehmend und die Risse breiten sich weiter aus. Sind die Risse durch das komplette Schneidgut gewandert, ist die Trennung vollzogen und die Verschnittseite legt sich um die verrundete Kante in die Nut. Für kleine Innenausschnitte, bei welchen beide Kanten der Nut scharf gestaltet sind, vollzieht sich die Trennung theoretisch gleichzeitig.

Abschließend, beim Verlassen des Schneidbereichs, wird das Schnittgut wieder vom Niederhalter freigegeben und die Gutteile und der Verschnitt liegen getrennt voneinander vor.

Die sich durch Anwendung dieses Prozesses ausprägenden Schnittflächen sind nicht explizit in der DIN 2906 erwähnt. Die Auswertung wird daher an die Schnittflächengrößen des Scherschneidens angelehnt.

#### 4.4.3 Analyse des Schneidverfahrens ES

Im aktuellen Entwicklungsstand stößt das rotative Elastomer-Schneiden deutlich an seine Grenzen. Wie nachfolgende Ergebnisse zeigen, ist die Schnittqualität und die Prozessführung noch weit von einem industriellen Standard entfernt. Während die weichen Materialien wie Kupfer K035/K105 oder Lotfolie L044/L163 noch teilweise verarbeitet werden können, sind bei der Elektroblechprobe TK-E200-ES nur minimale Einprägungen entlang der Fertigteilkontur erkennbar. Aufgrund des nicht erfolgsversprechenden Ergebnisses in der Testreihe wird diese deshalb aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen und auf die vorher genannten rotativen Schneidverfahren verwiesen.

Wie Bild 60 und Bild 61 zeigen, weisen sowohl die Kupfer- als auch die Lotfolientestteile ein ähnliches Verhalten auf. Sämtliche Konturen sind nur teilweise geschnitten, einzig die Außenkontur beim Testteil TK-K105-ES ist komplett ausgeschnitten.

Die Innenkonturen sind weitestgehend nur einseitig geschnitten. Die Ursache ist darauf zurückzuführen, dass sobald eine Seite vollständig getrennt ist, das Material in die Nut ausweicht und dadurch die Spannung über der Schnittkante nachlässt. Dies hat zur Folge, dass die Scherkräfte auf der Gegenseite so weit absinken, dass sie nicht mehr für eine vollständige Materialtrennung ausreichen.

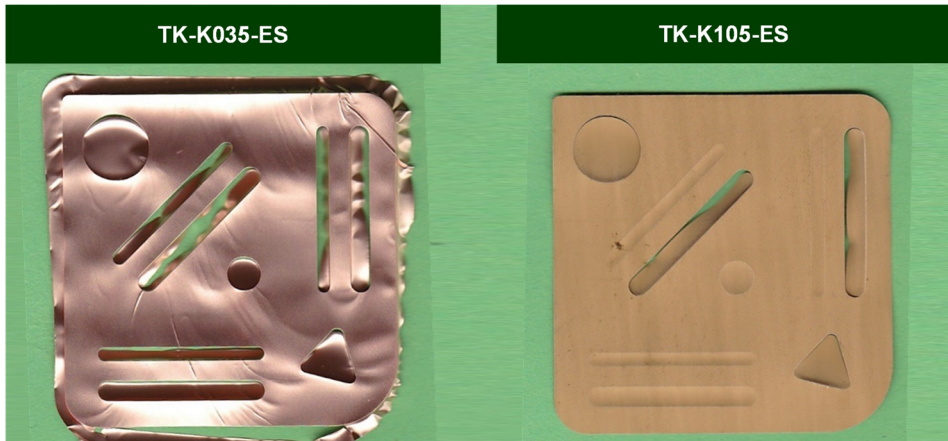


Bild 60: Testteile TK-K035-ES und TK-K105-ES

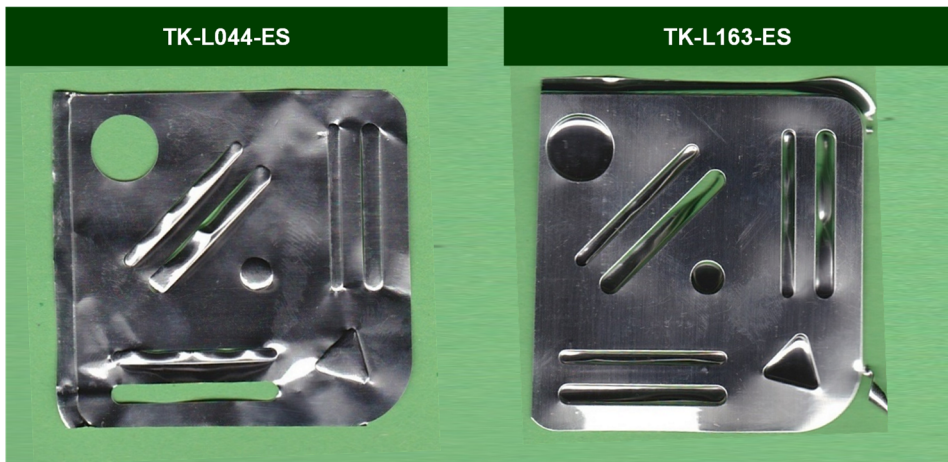


Bild 61: Testteile TK-L044-ES und TK-L163-ES

Die beiden dünnen Testteile TK-K035-ES und TK-L044-ES weisen deutliche Knitterbildung auf. Diese ist zum einen darauf zurückzuführen, dass das Material nicht die beim Einlaufen in den Prozess auftretende Verdrängung der Kunststoffmatrix aufnehmen kann und zum anderen darauf, dass die durch den Schneidprozess eingeleiteten Zugspannungen das Material in die Kavitäten ziehen und dadurch Materialaufwerfungen entstehen.

Bei den Testteilen TK-K105-ES und TK-L163-ES ist insgesamt keine Knitterbildung erkennbar. Sie weisen auch weder im Schnittkantenbereich noch global störende Verformungen auf. Dies resultiert aus der matrizenseitig vollflächigen Stützung des Fertigteils in Kombination mit dem stempelseitig, durch die Elastomerbeschichtung aufgetragenen Niederhaltdruck.

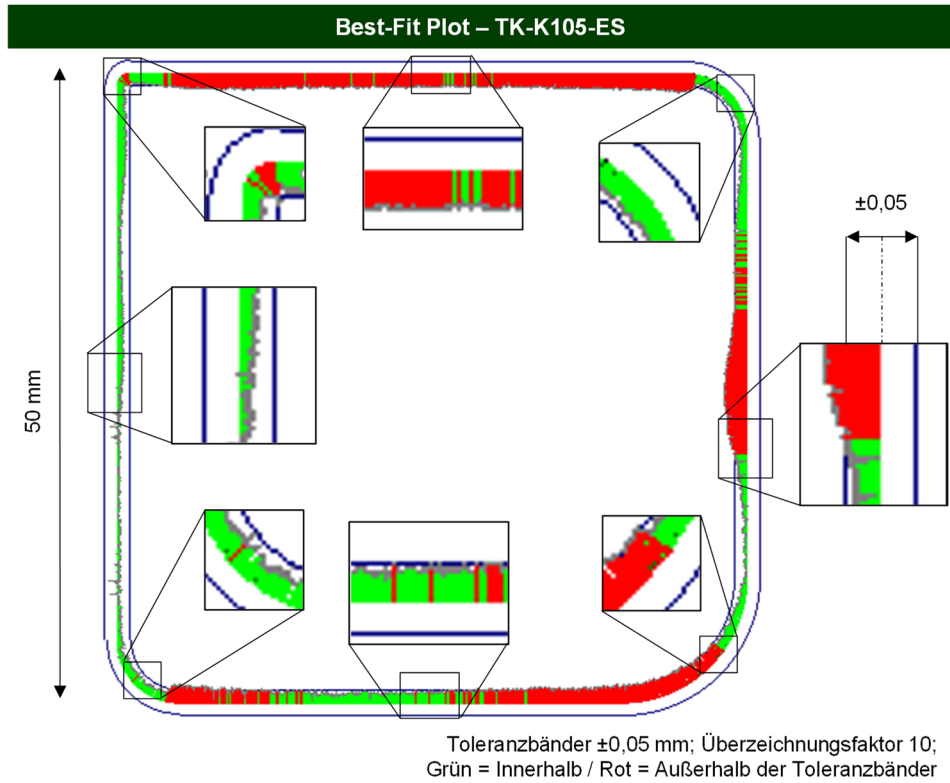


Bild 62: Soll-Ist-Konturvergleich des geschnittenen Testteils TK-K105-ES

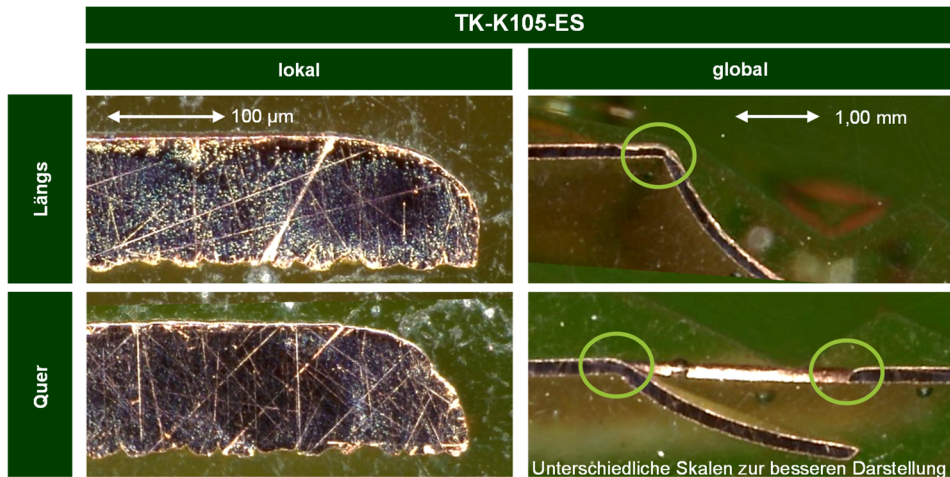


Bild 63: Schnittkanten zum Testteil TK-K105-ES

Der Soll-Ist-Vergleich der Kontur zum Testteil TK-K105-ES zeigt, dass das Teil insgesamt zu klein geschnitten ist. Im Bereich der Querschnitte ist die

Kontur auch leicht wellig, mit Absolutwerten von kleiner 0,050 mm jedoch nur geringfügig. Die Ursache der Abweichungen ist durch die eingeleiteten Zugspannungen ins Material begründet. Dadurch längt sich das Material elastisch und plastisch. Diese Verformungen werden nach Abschluss des Schneidvorgangs freigesetzt und beeinflussen so die Genauigkeit des Schneidergebnisses.

Die Schnittkanten, wie Bild 63 links zeigt, sind beim rotativen Elastomer-Schneiden an der Oberseite und sogar teilweise bis zur Unterkante hin stark verrundet. Die Ursache hierfür liegt darin, dass die Elastomer-Matrix beim Eindringen in die Matrize das Material um die Schneidkante in die Matrize schiebt und abschließend direkt an der Schneidkante abschert. Bild 63 rechts zeigt das beschriebene Umklappen des Schneidguts über der scharfen Kante, nachdem die Gegenseite durchtrennt ist, jeweils für eine quer und längs im Radius angeordnete Kante der 3 mm breiten und quer angeordneten Tasche. Insgesamt ist das Schneidergebnis reproduzierbar und gratfrei geschnitten. Damit sind die Schneidkanten, obwohl sie keinem genormten Standard unterworfen werden können, für eine Vielzahl von Anwendungen annehmbar.

## 4.5 Kategorisierung der rotativen Schneidverfahren

Die Bedeutung der in den vorangegangenen Unterkapiteln vorgestellten Erkenntnisse zu den untersuchten rotativen Schneidverfahren hängt fundamental vom jeweilig geplanten Einsatzzweck des Fertigteils ab. Eine pauschale Definition des idealen Schneidverfahrens für dünne Metallfolien kann somit nicht gegeben werden.

Tabelle 6: Kategorisierung der rotativen Schneidverfahren

Kriterium	Schneidverfahren			
	MSA	MSD	SMS	ES
Verarbeitung weicher Materialien	++	++	-	+
Verarbeitung dicker Materialien	--	--	++	-
Verarbeitung von geschlossenen Konturen	++	+	+	+
Einseitiges Werkzeugsystem	Ja	Ja	Nein	Ja
Robustheit	-	-	++	++
Geringe prozessbedingte Teileverformung	+	+	++	-
Schnittkantengüte	-	-	++	+

++ herausragend; + zufriedenstellend; - unzufriedenstellend; -- inakzeptabel

Tabelle 6 kategorisiert die Schneidverfahren allerdings bezüglich ihrer signifikanten Eigenschaften und hilft damit in der Auswahl des äquivalenten rotativen Schneidverfahrens für den spezifischen Anwendungsfall.

### **Kriterium: Material-Verarbeitbarkeit**

Rotatives Messerschneiden (MSA/MSD) und Elastomer-Schneiden (ES) sind besonders für weiche und dünne Materialien (NE-Metalle;  $s < 0,10 \text{ mm}$ ) geeignet. Bei MSA und MSD sind die filigranen Schneiden der limitierende Faktor für die Bearbeitung dickerer Materialien, bei ES ist es der begrenzte Druck, den die Elastomer-Matrix aufzubringen vermag.

Rotatives Stempel-Matrize-Schneiden (SMS) eignet sich hingegen besonders für festere und dickere Materialien ( $s > 0,20 \text{ mm}$ ). Dünne und weiche Materialien werden durch die Elastomer-Matrix zwischen den Kavitäten beschädigt.

### **Kriterium: Konturgebung**

Alle rotativen Schneidverfahren sind prinzipiell für sämtliche Konturen innerhalb ihrer werkzeugseitigen Bearbeitungsgrenzen gleichermaßen geeignet. Für geschlossene Konturen, also Einzelteile, ist besonders MSA geeignet, da hier die Verwendung eines Trägers das Fertigteil fixiert und damit aufwendige Sortiersysteme vermieden werden. Die anderen rotativen Schneidverfahren profitieren vor allem von offenen Konturen, respektive Endlostteilen, die eine durchgängige Prozessierung ermöglichen.

### **Kriterium: Aufbau des Werkzeugsystems**

Sowohl Messer- als auch Elastomer-Schneiden sind einseitige Werkzeugsysteme, die im Gegensatz zum Stempel-Matrize-Schneiden als zweiseitiges Werkzeugsystem ohne Synchronisation der Werkzeugzylinder zueinander auskommen. Dies reduziert deutlich die Komplexität im Aggregataufbau, was sich im Prozess und auch in den Anschaffungs- sowie Instandhaltungskosten widerspiegelt.

Besonders Stempel-Matrize-, als auch Elastomer-Schneiden verfügt über robuste Aufbauten ohne empfindliche Peripherie. Damit sind beide beim Einrichten und auch im laufenden Betrieb weitestgehend unempfindlich gegenüber unsachgemäßer Verwendung. Bedienerseitige Abweichungen von der fachgerechten Anwendung führen beim Messerschneiden sehr schnell zur Beschädigung der Schneidlinien und somit zum Werkzeugbruch.

Die Werkzeugstandzeiten können zudem noch durch den Einsatz von Hochleistungsstählen oder Hartmetallwerkzeugen analog wie im Hubstanzen ausgeweitet werden. [12]

### **Kriterium: Materialverformung**

Die Verformung des zu verarbeitenden Materials während des Verarbeitungsprozesses ist prinzipiell bei allen rotativen Schneidverfahren eine nicht zu vernachlässigende Herausforderung, jedoch beim Elastomer-Schneiden durch die durchgängige Stützung des Fertigteils im Prozess am geringsten. Beim Messerschneiden ist besonders die Kantenverformung zu nennen, die maßgeblichen Einfluss auf das Schneidergebnis nimmt. Beim Stempel-Matrize-Schneiden ist es abhängig vom Werkstoff, wo der Schneidprozess Kaltverfestigungen in die typischerweise dickeren und festeren zu verarbeitenden Materialien plastifiziert und somit das Gefüge schädigt. Im Falle des SMS sind metallographische Untersuchungen an Testteilen für den jeweiligen Anwendungsfall notwendig, um eine Beurteilung der prozessual bedingten Gefügeveränderung und deren Tolerierbarkeit vornehmen zu können.

### **Kriterium: Schnittkantengüte**

Die Schnittkanten sind besonders beim Stempel-Matrize- und beim Elastomer-Schneiden reproduzierbar und über alle Schneidphasen ähnlich. Beim Messerschneiden sind die Schnittkanten inhomogen über die Schneidphasen und laufen zudem stark keilförmig aus. Die Erkenntnisse aus den Schnittkantenbildern müssen in der Auslegung der jeweilig geplanten Anwendung berücksichtigt werden.

Insgesamt unterscheiden sich alle rotativen Schneidverfahren hinsichtlich der definierten Kriterien signifikant voneinander. Besonders technologisch ausgereift und somit unmittelbar geeignet zur Anwendung für dünne Metallfolien sind das Messerschneiden und das optimierte Stempel-Matrize-Schneiden. Beide versprechen eine hohe Prozesskontinuität und eine damit verbundene herausragende Werkstückqualität.

Das Elastomer-Schneiden liefert eine technologische Basis, welche allerdings für die Bearbeitung dünner Metallfolien noch intensiver Entwicklung und Testreihen mit Betrachtung der hier ansatzweise benannten Rahmenbedingungen und sämtlichen Einflussfaktoren bedarf.



## 5 Effiziente rotative Verarbeitung von Elektroband zu Stator- und Rotorpaketen<sup>4</sup>

Wie eingangs in Kapitel 2.2.1 erläutert, weist die rotative Verarbeitung von Elektroband zu Elektrobandlamellen bzw. Elektroblechpaketen ein enormes Potenzial auf. Besonders die technologischen (vergleichsweise große minimale verarbeitbare Materialstärken und niedrige Verarbeitungsgeschwindigkeiten) und wirtschaftlichen (vergleichsweise hohe Investitions- und Lebensdauerkosten) Grenzen des Hubstanzverfahrens lassen sich durch den Einsatz der Rotationsschneidtechnologie überwinden. [72] Dieses Kapitel widmet sich der exemplarischen Umsetzung einer Elektroblechanwendung mit dem Anspruch, einen realitätsnahen Beweis der Nutzbarmachung des Verfahrens zu erbringen.

### 5.1 Rahmenbedingungen zur rotativen Verarbeitung von Elektroband

Dieses Kapitel intensiviert, welche weichmagnetischen Kerne besonders von der rotativen Verarbeitung profitieren können und wie sich die zugehörigen Anwendungen zur Verarbeitung in der Umsetzung gestalten. Die Prozess- und Produktqualität ist dabei besonders abhängig von folgenden drei Kriterien nach Ishikawa [73]: Material, Maschine und Methode.

#### 5.1.1 Gestaltung des Blechschnitts

Die gewünschte Paketform ist bestimmend für die Auswahl des Fertigungsverfahrens. Während Hubstanzen seine Potenziale besonders in der Herstellung von Einzelblech- und segmentierten Blechpaketen durch in das Werkzeug integrierte Paketiervoll ausschöpfen kann, liegen die Potenziale der rotativen Verarbeitung verfahrensbedingt primär in langen zusammenhängenden oder auch endlos Blechschnitten, wie sie bei Polketten- [74], Slinky- oder Axialfluss-Blechpaketen Anwendung finden (siehe auch nachfolgende Abbildung).

---

<sup>4</sup> In der Erarbeitung der Inhalte zu diesem Kapitel wurde ich unterstützt von M. Deutsch [S14], C. Elsner [S15], T. Gelfert [S16], C. Kotzott [S17], C. Krappmann [S18], S. Kutter [S19], C. Lang [S20], Y. Liu [S21], M. Memic [S22], T. Schrembs [S23], C. Schwaderer [S24], J. Sparrer [S25], M. Wicke [S26], M. Ziegler [S27].

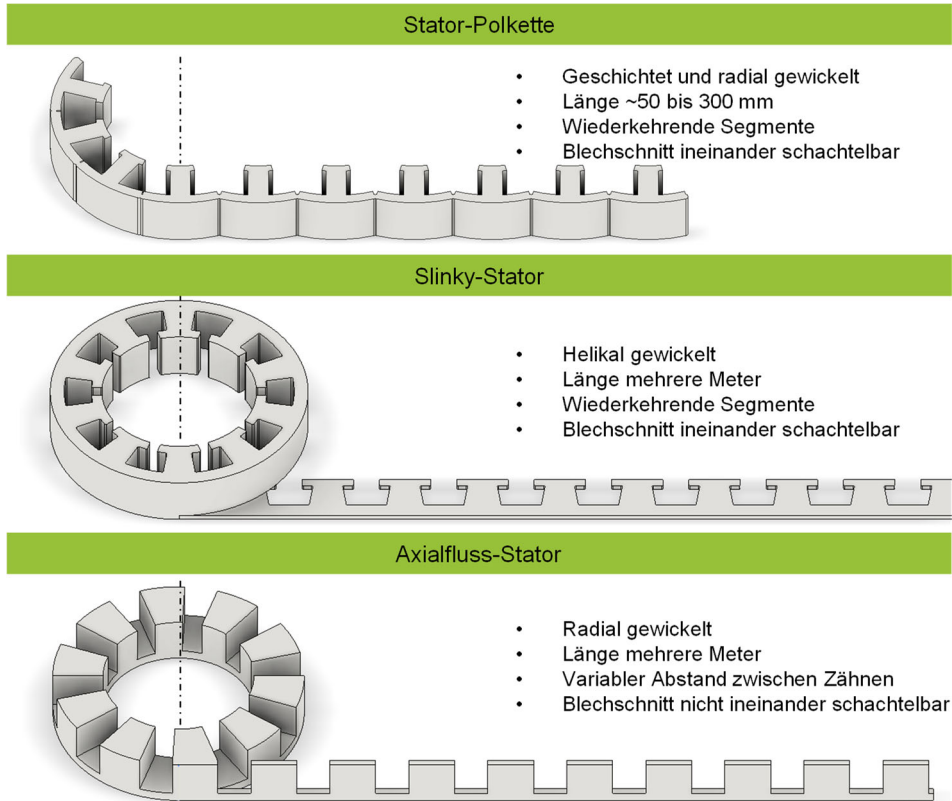


Bild 64: Übersicht der, für die rotative Verarbeitung geeigneten Blechschnitte bzw. Statoren

Die abgewickelte Länge der Polkette entspricht dem Umfang eines Blechpakets und bewegt sich bei Elektromotoren mit Paketdurchmessern von 50 mm bis 300 mm im dreistelligen Millimeterbereich. Die Länge des Slinky- bzw. Axialflussblechschnitts entspricht der Abwicklung des Durchmessers multipliziert mit der, zur Erreichung der Pakethöhe, erforderlichen Anzahl an Schichten bzw. Wicklungen. Aufgrund der hohen Anzahl sind hier Längen im zwei- bis dreistelligen Meterbereich üblich und nehmen mit sinkender Materialstärke weiterhin deutlich zu.

Die Polkette sowie der Slinky-Blechschnitt werden in der Praxis häufig auf dem Schneidgut verschachtelt angeordnet, was zu einer effizienten Ausnutzung der Blechdimensionen führt. Der Axialfluss-Blechschnitt kann aufgrund der sich verändernden Nutbreiten nicht verschachtelt werden.

Die sich verändernden Nutbreiten der Axialflussmaschine stellen zudem auch die Anlagentechnik vor prozessuale Herausforderungen. Entweder muss der Blechschnitt komplett abgewickelt auf den Werkzeugmantel-

flächen realisiert werden, was zu sehr großen Werkzeuglängen respektive Werkzeugzylinderdurchmessern führt. Oder alternativ können auch zwei Stufen, bei welchen der Schneidprozess vom Vorschub entkoppelt ist [75, 76], so hintereinander geschaltet und miteinander synchronisiert werden, dass deren Eingriff auf dem Blechschnitt überlappt und dadurch die gewünschte Nutbreite resultiert.

Auch Einzel- oder Segmentlamellen lassen sich rotativ herstellen. Jedoch kommt aufgrund der in sich geschlossenen Kontur, wie im nachfolgenden Kapitel ausgeführt, die gesteigerte Effizienz des Schneidprozesses im Packerprozess wieder abhanden.

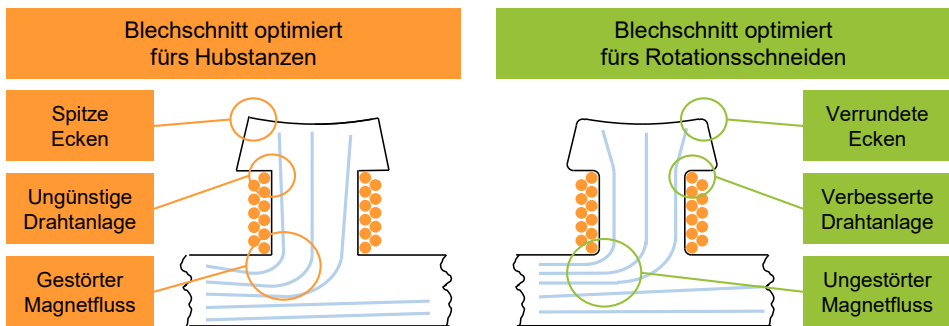


Bild 65: Gegenüberstellung von, auf das jeweilige Verfahren hin optimierten Blechschnitten [P2]

Die Herstellung der Werkzeuge erfordert, wie bereits in Kapitel 4.1.1 beschrieben, eine Verrundung der Kontur. In der Herstellung von Stanzwerkzeugen sind Konturverrundungen durch aufwendiges Profilschleifen dagegen unwirtschaftlich und somit zu vermeiden. Bild 65 links zeigt die ursprünglich für das Schneidwerkzeug ausgelegte und rechts die auf die rotative Verarbeitung optimierte Kontur im Vergleich. Die Rundungen können zusätzliche positive Effekte hervorrufen. Zum einen legt sich der Draht dadurch besser in der Rundung an, was die Entwärmung in den Ecken fördert und zum anderen wird der Magnetfluss besser um die Ecke geleitet, was wiederum die magnetische Materialausnutzung direkt verbessert. Im Bereich des Nutschlitzes können die Verrundungen zur lokalen Vergrößerung des Luftspalts führen und damit die magnetische Kopplung des Stators mit dem Rotor beeinflussen. Diese Gegebenheiten müssen unbedingt bereits in der Auslegung des Blechschnitts vorrangig berücksichtigt werden, um im Produkt die besten Ergebnisse zu erzielen. [P2]

Materialtechnisch können die gleichen Materialien wie im klassischen Schneidprozess verarbeitet werden. Jedoch ist der Rotationsschneid-

prozess, wie in Kapiteln 3 und 4 bereits begründet und im nachfolgenden Unterkapitel vertieft wird, insbesondere für dünne Materialien ( $\leq 0,35$  mm) geeignet.

### 5.1.2 Prozesskette zur durchgängigen Verarbeitung

Die konventionelle Verarbeitung von Elektroblechband zu Stator- bzw. Rotorpaketen ist aufgrund des Kostendrucks meist integriert und hoch automatisiert ausgeführt. Diesem Anspruch muss auch die Prozesskette auf Basis der rotativen Verarbeitung folgen. Die nachfolgend in Bild 66 dargestellte exemplarische Prozesskette für vertikal gewickelte und paketierte Statoren (Slinky-Statoren) ist von der konventionellen Prozesskette für Slinky-Statoren [77] abgeleitet und erlaubt eine durchgängige Verarbeitung des Elektroblechbands zu fertigen Elektroblechpaketen, respektive von Coil zu Coil.

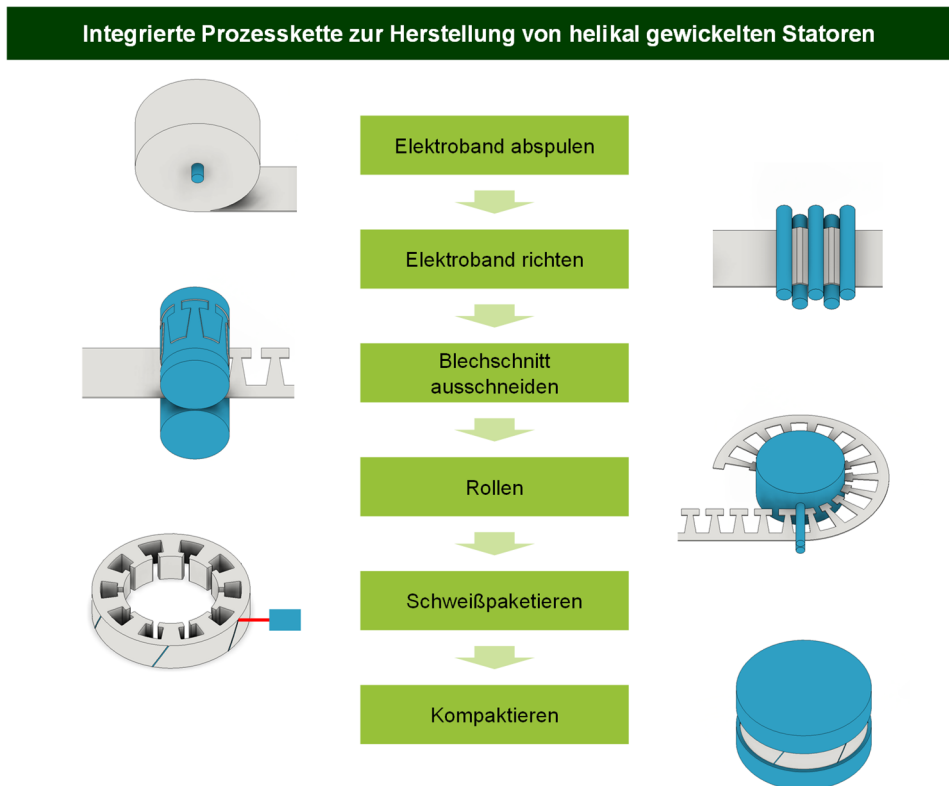


Bild 66: Durchgängige Prozesskette zur rotativen Verarbeitung von Elektroblechband zu Slinky-Blechnitten bzw. -Statoren

Die Prozesskette zur rotativen Verarbeitung von Elektrobänd zu Slinky-Statoren besteht im Wesentlichen aus den Prozessschritten Bänd abspulen, Bänd richten bzw. zuführen, Elektrobänd schneiden und Blechschnitt aufspulen oder vertikal zum Blechpaket wickeln. Bei letzterem muss der Endlosstreifen nach Erreichen der Pakethöhe noch getrennt und das Blechpaket abschließend gefügt werden. Klassisch wird hierfür Schweißen und Klammern als Fügeverfahren eingesetzt.

Alle Prozessschritte laufen über die gesamte Strecke hinweg kontinuierlich ab. Auch die im Prozesseingriff befindlichen, das Bänd manipulierenden Elemente sind allesamt rotierend. Damit treten im Prozess keine interkurrenten Beschleunigungen auf und es können sehr hohe Verarbeitungsgeschwindigkeiten von bis zu mehreren Hundert Metern pro Minute realisiert werden.

In der rotativen Verarbeitung von Einzel- bzw. Segmentlamellen muss die kontinuierliche Aufspul- bzw. Wickeleinheit durch ein Sortiersystem ersetzt werden, wodurch es zu Einschränkungen in der Effizienz kommt. Aufgrund der in sich geschlossenen Kontur werden die Fertigteile komplett aus dem Verschnitt herausgelöst und sind nicht mehr in sich zusammenhängend. Zusammen mit dem Umstand, dass die integrierten Paketiersysteme (Stanzpaketieren oder Stanzen in Nestern) aktuell noch nicht mit der rotativen Verarbeitung kombinierbar sind, geht der Vorteil der Kontinuität verloren und die Einzelbleche müssen getaktet sortiert und paketiert werden. Manipulierende Sortiersysteme erreichen die notwendigen Leistungen von mehreren Tausend bis Zehntausend Teilen in der Minute nur unter enormem Aufwand und sind damit als wenig wirtschaftlich anzusehen.

Die Verarbeitung von sehr dünnen Materialien ( $s < 0,20$  mm) stößt im klassischen Hubstanzen an ihre physikalische Grenze. Zum einen kann das Materialbänd im Materialvorschub durch die hohen auftretenden Beschleunigungen in der Taktung und den mit einhergehenden verbundenen Positionierprozessen nur sehr schwer beherrscht werden. Diese Restriktionen finden sich in der rotativen Verarbeitung nicht. Zum anderen ist im Hubstanzprozess zum Schutz der Werkzeuge ein gewisses Schneidspiel notwendig. Da das benötigte Schneidspiel mit abnehmender Materialstärke kleiner wird, ist die Werkzeugherstellung hier sehr komplex. Dieses Schneidspiel kann im Rotationsschneidprozess bei einem eindringlosen Werkzeugsystem (vgl. Kapitel 4.3) aufgrund des Werkzeugaufbaus auf null reduziert werden, was einen Einzug des Schneidguts in den dann nicht vorhandenen Schneidspalt verhindert und in Kombination mit dem partiellen Werkzeugeingriff zu einer schonenden Materialtrennung führt. Damit

ermöglicht der Rotationsschneidprozess die Grenzen in der Verarbeitung von dünnen Materialien auszuweiten und durch seine Effizienz auch wirtschaftlichen Nutzen zu schaffen.

### 5.1.3 Anlagenaufbau zur Abbildung der Prozesskette

Die Prozesskette für die nachstehenden Untersuchungen wird auf einer prototypischen und im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelten Anlage abgebildet. Die Basis hierfür ist das in Kapitel 4.3 vorgestellte Schneidaggregat zum rotativen Stempel-Matrize-Schneiden mit der zusätzlichen Peripherie und auf die jeweilige Untersuchung hin angepassten Werkzeugsätzen.

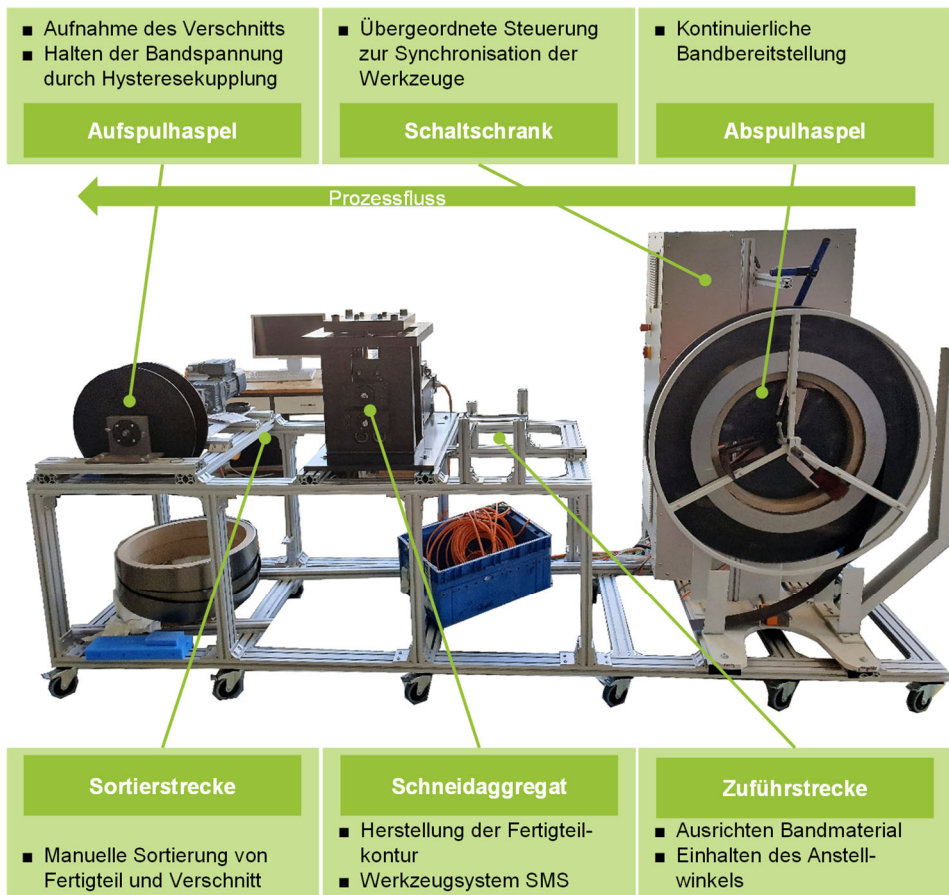


Bild 67: Prototypische Anlage zur durchgängigen Verarbeitung von Elektroband zu Elektroblechlamellen

Die Anlage ist, wie in Bild 67 dargestellt, auf einem sieben Meter langen und zwei Meter breiten Profilgestell aufgesetzt und besteht im Wesentlichen aus einem Schaltschrank, der Abspulhaspel, der Zuführ- bzw. Richtstrecke, dem Schneidaggregat, der Sortierstrecke und der Aufspulhaspel.

Das Elektroband wird von der angetriebenen Abspulhaspel abgespult und über die Zuführstrecke dem Schneidaggregat mit definiertem Anstellwinkel zugeführt. Ein vorheriges Richten des Elektrobands ist aufgrund der geringen Probenabmessungen nicht notwendig, weshalb keine Richtstrecke umgesetzt ist. Im Schneidaggregat werden die Probenkörper vollständig ausgeschnitten und abschließend, durch die in die Werkzeuge integrierte Elastomer-Matrix wieder leicht in den Verschnitt gedrückt. Beim Verlassen des Schneidbereichs lösen sich die Probenkörper im anschließenden Sortierbereich durch die fehlende Führung von selbst aus dem Bandverschnitt oder werden manuell herausgelöst. Der Bandverschnitt wird an der Aufspulhaspel wieder aufgewickelt.

Die insgesamt geringen Abmessungen verdeutlichen die Kompaktheit einer Rotationsschneidanlage im Vergleich zu klassischen Hubstanzanlagen. Mit der prototypischen Anlage werden in den Untersuchungen kontinuierliche Verarbeitungsgeschwindigkeiten von 20 m/min umgesetzt, was im Wesentlichen der mittleren Vorschubgeschwindigkeit in der klassischen Verarbeitung von Elektroband zu magnetischen Kernen entspricht, aber bei weitem nicht das volle Potenzial von mehreren hundert Metern pro Minute in der rotativen Verarbeitung ausschöpft. Zur Erreichung dieser Größenordnung ist eine, auf die hohen Vorschubgeschwindigkeiten abgestimmte Peripherie notwendig, die in dieser Anlage nicht zur Verfügung steht.

Die Sortierung und Weiterverarbeitung der rotativ geschnittenen Einzelblechlamellen erfolgt in den exemplarischen Untersuchungen aufgrund fehlender Automatisierung manuell.

## 5.2 Untersuchung Ringkernprobe

Ringkernprüfungen nach DIN EN 60404-6 [78, 79] ermöglichen eine umfassende Darstellung der magnetischen Eigenschaften von verarbeitetem Elektroband. Dieses Verfahren wird auch auf die Rotationsschneidtechnologie angewandt, um das Magnetisierungsverhalten und Verlustverhalten des verarbeiteten Materials im wechselnden Magnetfeld zu ermitteln. Mit der einfachen Ringkern-Geometrie ist es möglich, die Untersuchung

zunächst ohne zusätzliche Einflüsse durch komplexe Konturelemente, wie z.B. kleiner Radien, auf den grundlegenden Schneidprozess zu fokussieren und einen allgemeinen Vergleich des elektromagnetischen Verhaltens von rotativ geschnittenen Ringkernproben gegenüber alternativen Bearbeitungsverfahren, wie Erodieren oder Stanzen zu gewährleisten. [80, 81, P5, P6, P9, P10]

### 5.2.1 Aufbau und Herstellung der Ringkernprobe

Die in Bild 68 gezeigte Ringkernprobe ist auf der in Kapitel 5.1.3 vorgestellten Versuchsanlage mit eigens für die Ringkern-Untersuchung eingerichteten Werkzeugen hergestellt. Die jeweiligen Vergleichsproben zum Stanzen und Erodieren sind identisch zur Ringkernprobe für das Rotationsstanzen ausgeführt, womit eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse sichergestellt ist.

Ringkernproben-Test nach DIN IEC 60404-6

	Gestapelte Einzellamellen	<table border="0"> <tr><td>Material</td><td>M330-35A</td></tr> <tr><td>Materialstärke</td><td>0,35 mm</td></tr> <tr><td>Anzahl Einzellamellen</td><td>28</td></tr> </table>	Material	M330-35A	Materialstärke	0,35 mm	Anzahl Einzellamellen	28
Material	M330-35A							
Materialstärke	0,35 mm							
Anzahl Einzellamellen	28							
	Isolierter Probenkörper	<table border="0"> <tr><td>Innendurchmesser</td><td>45 mm</td></tr> <tr><td>Außendurchmesser</td><td>55 mm</td></tr> <tr><td>Gesamthöhe</td><td>10 mm</td></tr> </table>	Innendurchmesser	45 mm	Außendurchmesser	55 mm	Gesamthöhe	10 mm
Innendurchmesser	45 mm							
Außendurchmesser	55 mm							
Gesamthöhe	10 mm							
	Bewickelter Probenkörper	<table border="0"> <tr><td>Anzahl der Spulen</td><td>2</td></tr> <tr><td>Anzahl der Wicklungen</td><td>23</td></tr> </table>	Anzahl der Spulen	2	Anzahl der Wicklungen	23		
Anzahl der Spulen	2							
Anzahl der Wicklungen	23							

Bild 68: Rotativ hergestellter Ringkernprüfling nach DIN 60404-6 [P5, P6]

Der Innendurchmesser der Ringkernprüfkörper  $D_{RK,i}$  beträgt 45 mm und der Außendurchmesser  $D_{RK,a}$  55 mm. Die Stapellänge  $l_{RK}$  liegt bei 10 mm bestehend aus 28 Einzellamellen mit einer Materialstärke  $s$  von 0,35 mm. Die einzelnen Lamellen sind beidseitig isoliert, gestapelt und mit Klebeband umwickelt zu einem Ringkern paketierte. Zur Untersuchung der elektrischen und magnetischen Eigenschaften wird der Ringkern schließlich mit zwei Spulen (Primär- und Sekundärspule) zu je 23 Windungen bewickelt. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die herstellereigenspezifischen mechanischen und magnetischen Eigenschaften des für die Ringkernuntersuchungen verwendeten Ausgangsmaterials M330-35A [82] von C.D. Wälzholz GmbH & Co. KG [83]. [P5, P6, P9, P10]

Tabelle 7: Materialkarte zu M330-35A [82, 83]

Parameter	Einheit	Wert
Materialbezeichnung	EN 10027-2	M330-35A
Hersteller	C.D. Wälzholz GmbH & Co. KG	
Nennstärke	[mm]	0,35
Dichte	[kg/dm <sup>3</sup> ]	7,65
Maximale Hysterese- und Wirbelstromverluste	1,0 T / 50 Hz [W/kg]	1,30
	1,5 T / 50 Hz [W/kg]	3,30
Anisotropie der Verluste	[%]	±14
Minimale magnetische Polarisation	2.500 A/m [T]	1,49
	5.000 A/m [T]	1,60
	10.000 A/m [T]	1,70
Streckgrenze	$R_{p02}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	335
Zugfestigkeit	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	480
Härte	HV5	155
Biegekoeffizient	-	3

Das gewählte Material (siehe Tabelle 7) ist ein Vertreter der dünnsten Materialstärken gemäß der EN10027-2 Klassifizierung und bewegt sich im mittleren Verlustbereich. Damit repräsentiert das Material allgemein gemittelte Eigenschaften in der Bandbreite der Elektrobandklassifikation.

### 5.2.2 Ergebnisauswertung der Ringkernprobe

Die elektrischen und magnetischen Eigenschaften des rotativ geschnittenen Ringkerns sowie der Vergleichsproben werden mit einem Elektroblechmessgerät MPG 200 der Firma Dr. Brockhaus Messtechnik GmbH &

Co. KG [84] ermittelt. Zur Bestimmung der Hystereseschleife und der Hystereses- und Wirbelstromverluste werden Messungen im Wechselfeld bei sinusförmiger Polarisation von 1,0 bzw. 1,5 T, magnetischen Feldstärken  $H$  bis 2500 A/m und Frequenzen  $F$  zwischen 50 Hz und 400 Hz durchgeführt. [P5, P6, P9, P10]

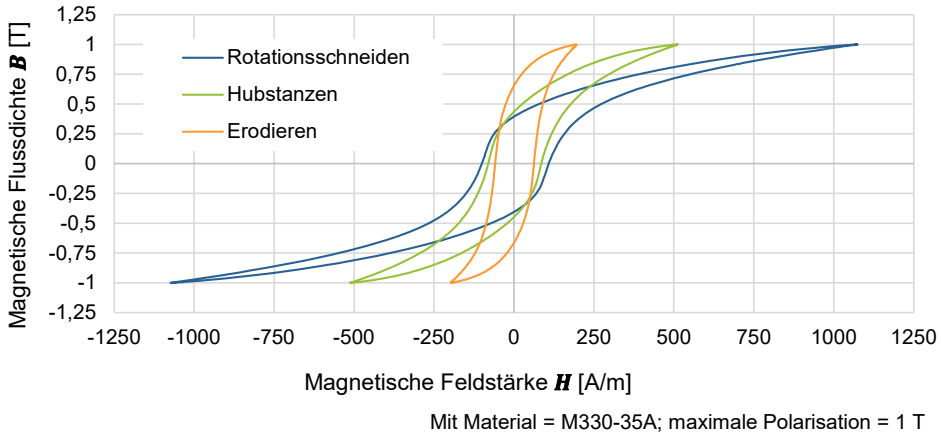


Bild 69: Vergleich der Hystereseschleifen für verschiedene Verarbeitungsverfahren bei einer Polarisation von 1,0 T [P5, P6, P10]

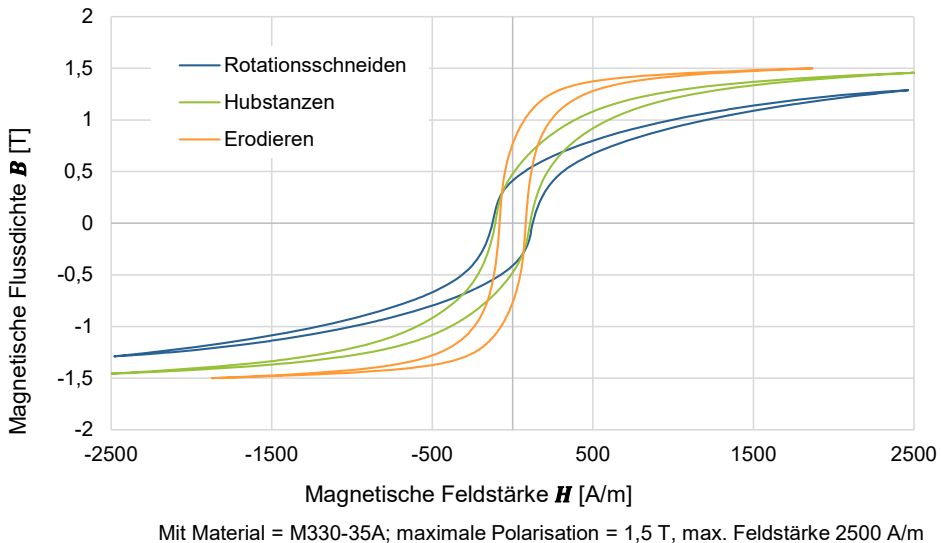


Bild 70: Vergleich der Hystereseschleifen für verschiedene Verarbeitungsverfahren bei einer Polarisation von 1,5 T [P5, P6, P10]

Die Diagramme in Bild 69 und Bild 70 zeigen die gemessenen Hystereseschleifen für eine rotativ verarbeitete Ringkernprobe im Vergleich mit einer erodierten und einer gestanzten Ringkernprobe. Die erodierte Ringkernprobe ist aufgrund der schonenden Verarbeitung annähernd mit dem unbearbeiteten Ausgangsmaterial vergleichbar. [81] Die gestanzte Ringkernprobe repräsentiert ein klassisches Verfahren, welches breite Anwendung in der Verarbeitung von Elektrobänd findet. Im Ergebnis sind die Differenzen zwischen den Kurven ein Maß für die Verarbeitungseinflüsse wie Schnittkanteneffekte, Gefügeänderungen und mechanische Spannungen im Material, die sich negativ auf die elektrischen und magnetischen Eigenschaften [80, 81] auswirken. [P5, P6, P10]

Die Hystereseschleifen in Bild 69 zeigen, dass die Kurven durch den Verarbeitungseinfluss stark abflachen. Die gewünschte Polarisierung von 1 T wird bei der erodierten Ringkernprobe bereits bei einer aufgeprägten magnetischen Feldstärke von 200 A/m erreicht, während die gestanzte Ringkernprobe diesen Wert erst bei einer magnetischen Feldstärke von 500 A/m und die rotativ verarbeitete Ringkernprobe erst bei 1100 A/m erreichen. Damit sinkt die Permeabilität durch den Verarbeitungseinfluss ab und der Magnetisierungsbedarf steigt an.

Noch deutlicher wird der Verarbeitungseinfluss in Bild 70. Die erodierte Probe erreicht eine Polarisierung von 1,5 T bereits bei einer magnetischen Feldstärke von deutlich unter 2.500 A/m. Die gestanzte Probe erreicht mit einer Polarisierung von 1,48 T bei einer Feldstärke 2.500 A/m noch annähernd die im Datenblatt genannte minimale Polarisierung von 1,49 T. Diesen Wert verfehlt die rotativ verarbeitete Ringkernprobe deutlich. Hier stellt sich bei einer magnetischen Feldstärke von 2.500 A/m nur eine Polarisierung von 1,3 T ein und liegt somit deutlich unter dem im Datenblatt ausgewiesenen Niveau.

Durch den Trennvorgang stellt sich ein inhomogener Verlauf der magnetischen Flussdichte über den Materialquerschnitt ein. Im Bereich der Schnittkante ist die magnetische Flussdichte deutlich niedriger als im Ausgangsmaterial und normalisiert sich wieder bei einem Abstand von ca. 10 mm zur Schnittkante hin. [85] Durch die schmale Breite der Ringkernprobe von 5,0 mm liegt somit der gesamte Probenquerschnitt im starken Einflussbereich der Schnittkanten.

Die magnetische Sättigung als Maß für die maximale Polarisierung des Materials ist hauptsächlich abhängig von der chemischen Zusammensetzung. [86] Damit wird sie sehr wahrscheinlich bei entsprechend hohen magnetischen Feldstärken außerhalb des Messbereichs, wie sie beispielsweise im

Volllastbereich der späteren Anwendung zum Tragen kommen, auch für die rotativ geschnittene Ringkernprobe erreicht. Somit ist in der Auslegung die Relevanz des Magnetisierungsbedarfs in der Regel auf die Teillastbereiche der Anwendung beschränkt.

Unabhängig vom Magnetisierungsbedarf sind noch die Eisenverluste in der Auslegung von großer Bedeutung. Diese werden im Folgenden als Gesamtverluste  $P_s$  bezeichnet und setzen sich aus den „statischen“ Hystereseverlusten  $P_h$  und den „dynamischen“ Wirbelstromverlusten  $P_e$  zusammen. [81]

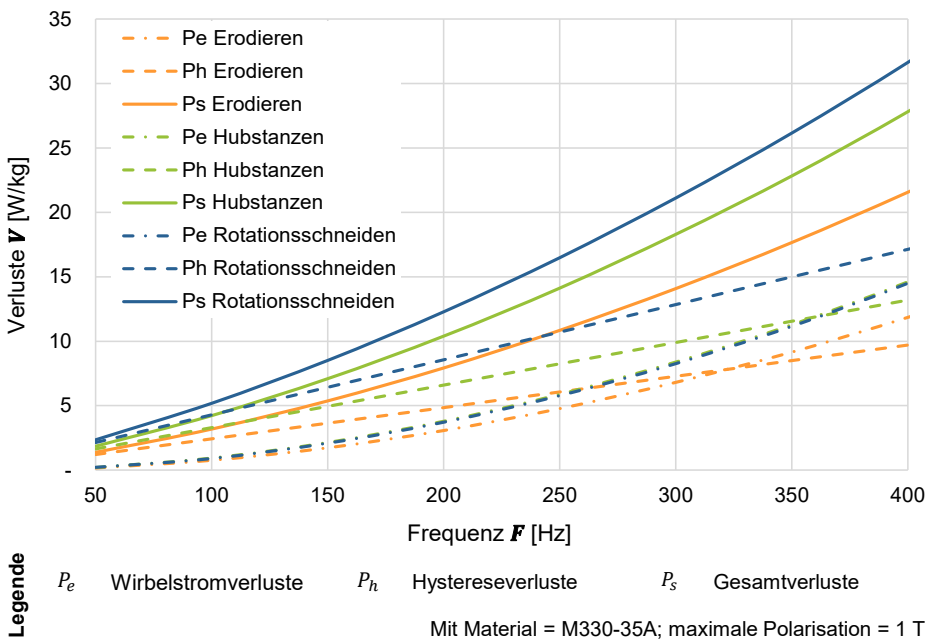


Bild 71: Vergleich der Hysterese-, Wirbelstrom- und Gesamtverluste für verschiedene Verarbeitungsverfahren [P6, P10]

Die Hysterese- und Wirbelstromverluste, die durch Unebenheiten, Gratbildung, Spannungen im Material und Luftspalte zwischen den einzelnen Blechen beeinflusst werden, sind im rotativ geschnittenen Ringkern deutlich höher als im Ausgangsmaterial M 330 - 35 A. Bild 71 zeigt die Gesamtverluste des Ringkerns bei verschiedenen Frequenzen  $F$ . Die Summe der Hysterese- und Wirbelstromverluste  $P_s$  im Ringkern bei  $F= 50$  Hz beträgt 4,46 W/kg. Der Ausgangswerkstoff M 330 - 35 A weist dagegen nur Verluste von max. 3,30 W/kg bei 50 Hz auf. Damit stellt sich eine Verschlechterung aufgrund von Verarbeitungseinflüssen von ca. 35 Prozent gegenüber des

Ausgangswerts ein. Um eine Verbesserung der elektrischen und magnetischen Eigenschaften zu erreichen, muss die Verformung beim Rotationschneiden durch die Weiterentwicklung des Verfahrens reduziert werden. [P5, P6]

## 5.3 Untersuchung Stator-Einzelzahnsegment

Die Erkenntnisse aus der Analyse zu den rotativen Schneidverfahren in Kapitel 4.3 sowie die in diesem Kapitel vorangegangenen Inhalte sollen abschließend anhand einer realitätsnahen Anwendung final validiert werden. Den Beleg für die prinzipielle Eignung des Verfahrens für den industriellen Einsatz bildet das, in diesem Kapitel vorgestellte, rotativ verarbeitete Stator-Einzelzahnsegment.

### 5.3.1 Aufbau und Herstellung des Stator-Einzelzahnsegments

Das Stator-Einzelzahnsegment hat eine Gesamtlänge von 85 mm und besteht aus  $243 \pm 1$  Einzelzahnlamellen der Elektrobandgüte M330-35A (Materialstärke  $s = 0,35$  mm) die mittels Backlacksystem miteinander paketiert sind.

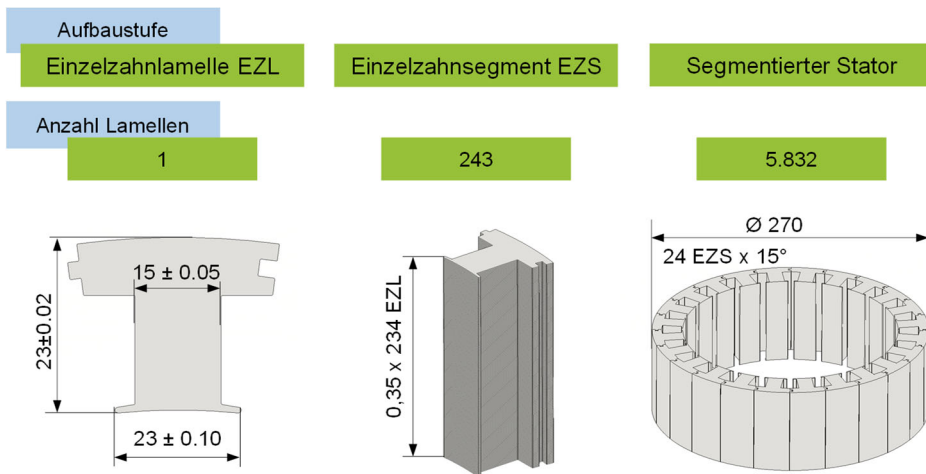


Bild 72: Verschiedene Aufbaustufen des segmentierten Statorpakets

Das segmentierte Statorpaket besteht gemäß seiner Anzahl an Nuten aus 24 Einzelzahnsegmenten, was bei 243 Einzelblechen pro Segment einer erforderlichen Gesamtmenge von 5.832 Einzelzahnlamellen pro Statorpaket entspricht. Bild 72 verdeutlicht die Größenordnungen, die in einer Großserienproduktion zu realisieren sind.

Wird beispielsweise die Materialstärke auf 0,20 mm (NO20) reduziert, steigert sich die erforderliche Ausbringungsmenge auf 10.206 und bei 0,10 mm (NO10) sogar auf 20.412 Einzelzahnlamellen pro Stator. Im konventionellen Stanzen entspricht das bei einer angenommenen Hubzahl von 1.000 Hub pro Minute einer Produktionsdauer von 5 bis 10 Minuten pro Stator.

Für die Fertigung der Einzelzahnlamellen wurde ein Werkzeugpaar mit vier Kavitäten eingesetzt. Aufgrund von Ungenauigkeiten in der Werkzeuggeometrie war nur eine Kavität fähig, Gutteile zu produzieren. Anschließend diese wurden analysiert und abschließend manuell zu Einzelzahnsegmenten paketierrt. Die Ergebnisse werden im nachfolgenden Kapitel vorgestellt.

### 5.3.2 Auswertung zum Stator-Einzelzahnsegment

Die Einzelzahnsegmentlamellen sind alle vollständig ausgeschnitten und die Schnittkanten entsprechen den Ergebnissen aus Kapitel 4.3. Die Abmessungen liegen innerhalb der vorgegebenen Toleranzen und weisen bezogen auf die gesamte Kontur des Blechschnitts eine Wiederholgenauigkeit mit Abweichungen kleiner 0,02 mm auf.

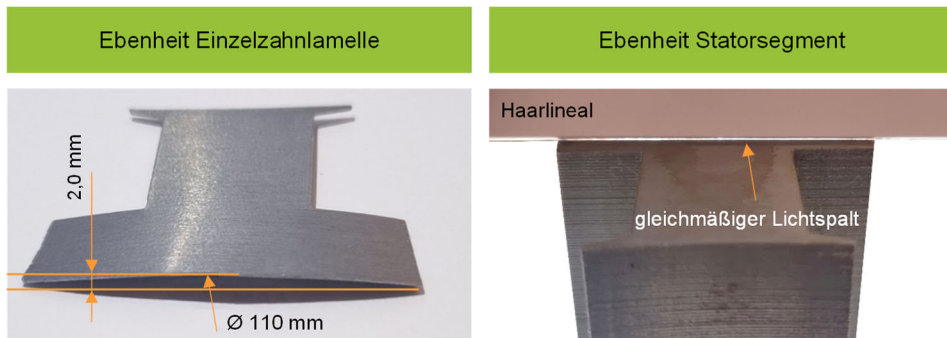


Bild 73: Ebenheitsauswertung zur rotativ geschnittenen Stator-Einzelzahnlamelle und zum paketierrten Einzelzahnsegment

Die Einzelbleche zeigen keine lokalen Verformungen auf und die globale Unebenheit folgt mit einem Durchmesser von 110 mm der Krümmung der Werkzeugzylinder. Dies darf allerdings nicht als allgemeingültig angenommen werden, da im Prozess individuelle plastische Verformungen ins Material induziert werden.

Auch in der klassischen Herstellung von Lamellen für Einzelzahnsegmente wird häufig auf den Einsatz einer Richtstrecke verzichtet und globale Unebenheiten akzeptiert. Diese können meist im nachfolgenden

Paketierverfahren ausgeglichen werden, was auch erfolgreich in dieser Anwendung umgesetzt ist. Die Lamellen sind nach der Aushärtung des Backlacks unter Druck und Wärme und der daraus resultierenden vollflächigen Verklebung exakt eben.

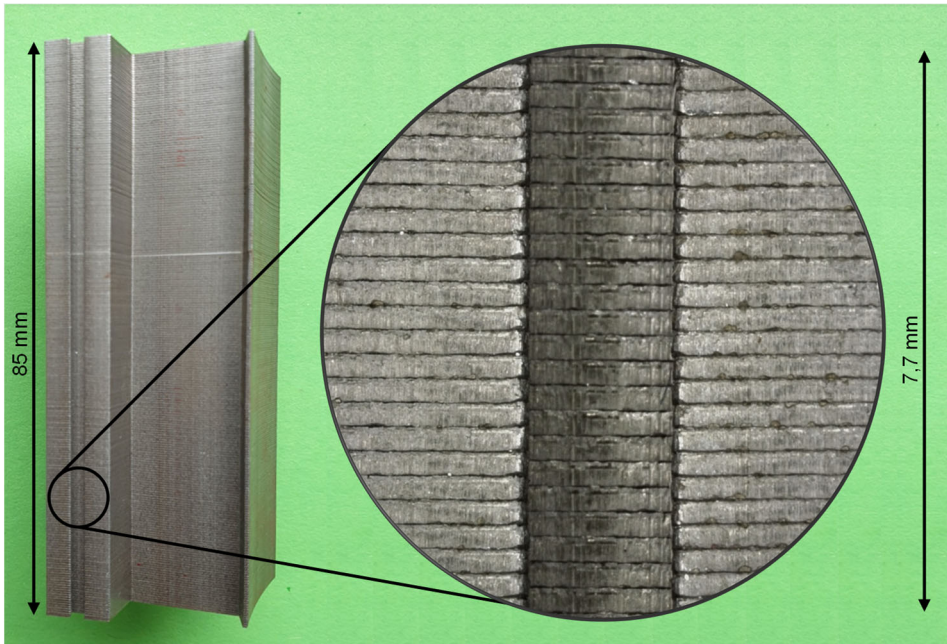


Bild 74: Rotativ geschnittenes und manuell pakettiertes Stator-Einzelzahnsegment

Die Paketiergüte des rotativ geschnittenen Einzelzahnsegments ist, wie Bild 74 zeigt, von sehr hoher Qualität. Die Schichtung der Einzelbleche ist exakt und auch die Schnittkantenflächen bilden eine ebene Oberfläche aus. Allerdings reicht das manuelle Ausrichten der Einzellamellen zum Segmentstapel nicht an die Güte einer maschinellen Stapelung heran, wie sie bei in das Werkzeug integrierten Nestern erreicht wird.

## 5.4 Fazit zur rotativen Verarbeitung von Elektroband

Die Rahmenbedingungen und Anforderungen an die rotative Verarbeitung von Elektroband zu magnetischen Kernen sind weitestgehend erfüllt und die Einsatzfähigkeit ist insgesamt sehr positiv zu bewerten. Die Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen zeigen, dass das Verfahren prinzipiell für einen Großserieneinsatz geeignet ist. Die Anwendungen (Ringkernprobe und Stator-Einzelzahnsegment), die im Rahmen dieser Dissertation erfolgreich umgesetzt sind, basieren beide auf Einzelblechlamellen.

Die fehlenden Sortierprozesse bringen das Verfahren schnell an seine Leistungsgrenze und verhindern die volle Ausschöpfung des eigentlichen Potenzials. Erst in Kombination mit geeigneten Blechschnitten, wie in Kapitel 5.1 beschrieben, wird die Sortierung durch alternative Stapelverfahren eliminiert und das Verfahren kann seinen Vorteil in der Verarbeitungsgeschwindigkeit durch die gewonnene Kontinuität im Prozess ausspielen.

Die Ringkernuntersuchung zeigt allerdings auch, dass die rotative Verarbeitung das Material deutlich stärker schädigt als beispielsweise das klassische Stanzen. Die Konsequenzen sind ein schlechteres Ummagnetisierungsverhalten und deutlich höhere Eisenverluste in der Anwendung. Daher ist das Verfahren im aktuellen Zustand nicht für hocheffiziente Anwendungen geeignet und es empfiehlt sich ein Einsatz in Anwendungen, wo die Effizienz nicht der maßgebliche Faktor ist.

Die Untersuchung zum Einzelzahnsegment zeigt das enorme Potenzial der Rotationsschneidtechnologie in der Massenfertigung. Die erreichte Verarbeitungsqualität in Kombination mit den kompakten Anlagen und hohen Verarbeitungsgeschwindigkeiten können dazu beitragen, die Grenzen für eine wirtschaftliche Verarbeitung von Elektroband zu Elektrolechpaketen deutlich auszuweiten. Rotationsschneiden stellt damit eine ernst zu nehmende Erweiterung für das fertigungstechnologische Spektrum zur Verarbeitung von Elektroband für einfache Anwendungen dar.

## 6 Effiziente rotative Verarbeitung von Kupferfolie in der Herstellung von Schaltungsträgern für LED-Leuchtmittel <sup>5</sup>

In der Beleuchtungstechnik findet derzeit ein unmittelbarer technologischer Umbruch statt. Klassische Leuchtmittel wie Glühbirne, Energiesparlampe und Leuchtstoffröhre werden durch innovative LED-Leuchtmittel abgelöst. Besonders die elementare allgemeine Beleuchtung weist aktuell ein sehr hohes Marktvolumen auf und es werden erwartungsgemäß weitere signifikante Wachstumsraten realisiert werden müssen. [87]

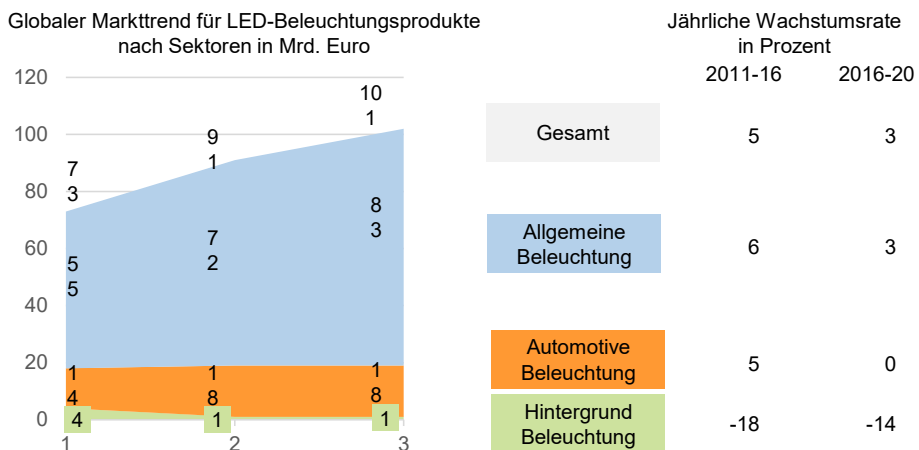


Bild 75: Globaler Markttrend für LED-Module [87]

Maßgebliches Kriterium für die Käuferakzeptanz bleibt weiterhin, neben teilweise untergeordneten Nachhaltigkeitsaspekten, der monetäre Faktor. LED-Leuchtmittel sind im gewerblichen Bereich derzeit jedoch immer noch teurer als ihre herkömmlichen Konkurrenzprodukte. Dies liegt allerdings nicht an der LED selbst, sondern vielmehr an ihren zusätzlich notwendigen Systemkomponenten. Um wirtschaftlich konkurrenzfähige LED-Produkte auf dem Markt zu verankern, ist es daher wichtig, den

<sup>5</sup> In der Erarbeitung der Inhalte zu diesem Kapitel wurde ich unterstützt von P. Beeger [S28], M. Egerer [S29], M. Meister [S30] und A. Zikeli [S31].

gesamtheitlichen Systemaufbau zu betrachten und auch prozessual zu optimieren. [88]

Im Folgenden werden zunächst die Potenziale des Systemaufbaus allgemeiner Beleuchtungssysteme dargestellt und analysiert. Anschließend wird auf Basis der Erfordernisse sowie der sich, durch die rotative Verarbeitung der Leiterbahnen ergebenden alternativen Prozesskette und den damit entstehenden Möglichkeiten ein LED-System vorgestellt, das einen ganzheitlichen Ansatz für die Applikation, das Produkt und den Wertstrom verfolgt. Besonders fokussiert wird dabei die Herstellprozesskette des LED-Leuchtmittels durch Rotationsschneiden. Die einzelnen Prozessschritte sowie das Produkt im Ergebnis werden dabei versuchstechnisch anhand eines LED-Leuchtmittels untermauert und damit die prinzipielle industrielle Realisierbarkeit der Anwendung nachgewiesen.

## 6.1 LED-Leuchtmittel basierend auf klassischen Schaltungsträgern

Im professionellen Umfeld unterstehen die Lichtqualität und Beleuchtungsstärke von Lichtapplikationen sehr hohen Standards. In Abhängigkeit vom Einsatzort der Lichtquelle und durch variierende kundenspezifische Anforderungen ist ein hohes Maß an Flexibilität und Modularität gefordert. Zur Erfüllung dieses flexiblen Anforderungsfelds werden angepasste Beleuchtungssysteme auf Basis hochwertiger Leuchtmittel, z.B. Mid-Power-LED-Module mit Metallkern-Schaltungsträger, eingesetzt. [89] Sie sind günstig in der Masse herstellbar und weisen sehr gute mechanische und thermische Eigenschaften auf. Damit entsprechen sie höchsten Anforderungen in Bezug auf Lichtausbeute und Lebensdauer. [89] Die herkömmlichen LED-Leuchtmittel in Form von kurzen Segmenten haben den Nachteil, dass sie nachträglich an Anfang und Ende verlötet werden müssen. Damit steigt der Aufwand in der Endapplikation und es sinkt die Gesamtqualität durch die hohe Anzahl an Kontaktstellen. [90]

Eine weitere Variante, um die Wirtschaftlichkeit zu steigern, stellt die Verwendung von Folienschaltungsträgern dar. Diese können durchgängig von Rolle zu Rolle prozessiert und direkt in die Beleuchtung integriert appliziert werden. [90] Sie besitzen jedoch den Nachteil, dass die zusätzliche Klebeschicht sowie der Folienschaltungsträger selbst den Wärmedurchgang reduzieren und somit die thermischen Eigenschaften stark verschlechtern. Daher werden diese vorwiegend im Konsumerbereich eingesetzt und haben sich noch nicht im professionellen Umfeld der Lichttechnik mit hohen Anforderungen an die Lebensdauer durchgesetzt.

Des Weiteren werden Leiterzüge in klassischen Metallkern-Schaltungsträgern und Folienschaltungsträgern, wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, unter dem Einsatz von Ätzprozessen chemisch hergestellt. Der erforderliche intensive Einsatz dieser umwelttechnisch sehr kritisch einzustufenden Chemikalien steht in Konflikt zu den europäischen Umweltstandards und ist hierzulande nur unter strengsten Auflagen und damit vergleichsweise unwirtschaftlich anwendbar. Dies ist maßgeblich einer der entscheidenden Faktoren, weshalb die Schaltungsträgerindustrie in Europa als nicht mehr wettbewerbsfähig angesehen wird und daher primär nach Asien abgewandert ist, was allerdings ausschließlich zu einer örtlichen Verlagerung des Umweltvergehens führt. [91] Das Konsumverhalten ist aufgrund von internationalen Handelsportalen dadurch weitestgehend uneingeschränkt.

Dieser, der Distanz geschuldete Bruch in der Wertschöpfungskette, führt zu langen Lieferzeiten von bis zu zwölf Wochen für Schaltungsträger und Leuchtmodulen, was wiederum zulasten der Flexibilität und Modularität für spezifische Kundenanwendungen geht. In dieser Konsequenz gestalten sich somit Produktumstellungen komplex und individuelle Anwendungen sind unter diesen Voraussetzungen nur unter enormem planerischen Aufwand zu realisieren.

## **6.2 LED-Leuchtmittel basierend auf rotativ verarbeiteten Schaltungsträgern**

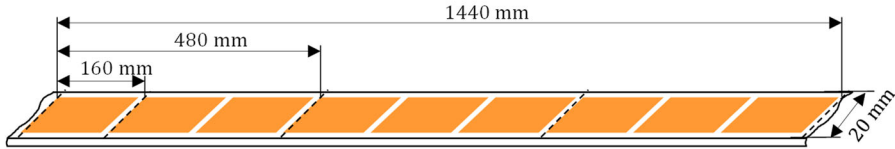
LED-Leuchtmittel auf Basis rotativ verarbeiteter Schaltungsträger eröffnen somit neue Potenziale. Mit der Rotationsschneidtechnologie steht ein herausragend ökonomisches und ökologisches Verfahren bereit, mit der Fähigkeit einen maßgeblichen Umschwung in der Beleuchtungsbranche auszulösen. Die Idee besteht darin, mittels einer Postponement-Strategie [92] die hohe Ausbringung der starren Rotationsschneidtechnologie mit einer späten Variantendifferenzierung im Leuchtmittel zu kombinieren und so einen Systembaukasten bereitzustellen, der flexibel auf Beleuchtungsanforderungen der jeweiligen Kundenanwendung angepasst werden kann.

### **6.2.1 Gestaltung des LED-Leuchtmittels**

Die grundlegende Basis des Leuchtmittels bildet ein Metallkern-Schaltungsträger mit einem Leiterbahnbild, welches sich zum einen in der Herstellung endlos sequenzieren lässt und zum anderen in der Anwendung eine flexible Bestückung und Verschaltung erlaubt.

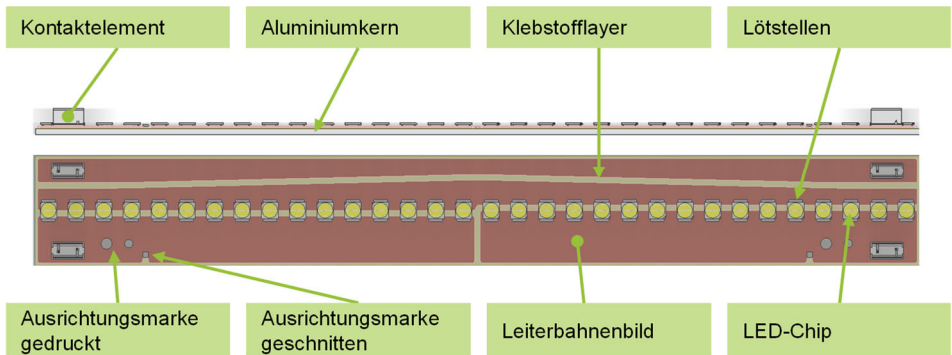
6 Effiziente rotative Verarbeitung von Kupferfolie in der Herstellung von Schaltungsträgern für LED-Leuchtmittel

Endlos sequenziertes Leiterbahnenlayout



Segment (Versuchsträger)		Block 3 Segmente		Modul 3 Blöcke	
Länge:	160 mm	Länge:	480 mm	Länge:	1440 mm
LEDs:	2 x 16	LEDs:	6 x 16	LEDs:	18 x 16
Spannung:	6 V	Spannung:	18 V	Spannung:	54 V
Strom:	1,6 A	Strom:	1,6 A	Strom:	1,6 A
Leistung:	9,6 W	Leistung:	28,8 W	Leistung:	86,4 W

Segment (Versuchsträger in Vorderansicht und Draufsicht)



Schaltplan zum Versuchsträger

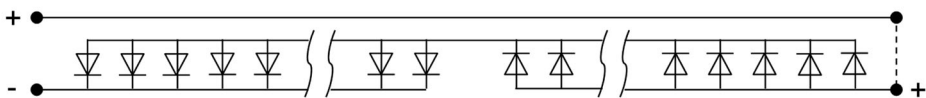


Bild 76: LED-Modul auf Basis rotativ hergestellter Schaltungsträger

Bild 76 zeigt ein eigens entwickeltes LED-Modul-Design, das an die neue Verarbeitungstechnologie adaptiert ist und den zuvor genannten Anforderungen entspricht.

Das Modul weist eine Gesamtlänge von 1.440 mm auf und ist somit auf gängige Beleuchtungsanwendungen abgestimmt. In sich ist es in drei Blöcke

von 480 mm mit jeweils drei wiederkehrenden Segmenten von 160 mm aufgeteilt. Die Module bzw. auch einzelne Blöcke oder Segmente können beliebig seriell oder parallel verschaltet und so für lineare oder flächige Beleuchtungsanwendungen eingesetzt werden. Die Ankontaktierung erfolgt prinzipiell über die Kontaktelemente (wie in Bild 76 dargestellt) oder auch direkt auf die Leiterbahn. Die LED-Chips sind mittig auf dem Schaltungsträger angeordnet und können längs im variablen Abstand zueinander ausgeführt werden. Damit ist eine späte und anpassungsfähige Variantenbildung sichergestellt und die Anforderungen an die Postponement-Strategie sind erfüllt.

Die Kupferpads der einzelnen Segmente sind dabei so angeordnet, dass der Verschnitt über das eigentliche Segment hinaus ein zusammenhängendes Gebilde formt. Die Erkennungsmarken für die Ausrichtung des Schaltungsträgers in der Elektronikproduktion sind offen gestaltet und somit an den Verschnitt angebunden. Dadurch wird in der Herstellung des Schaltungsträgers eine einfache Entformung sichergestellt. Eine Optimierung des Layouts in Bezug auf die Entformrichtung ist in diesem Layout-Design noch nicht berücksichtigt, jedoch generell anzustreben. Damit ist das Layout für eine kontinuierliche rotative Verarbeitung geeignet und wird weiterführend in nachfolgendem Kapitel 6.2.2 vertieft.



Bild 77: Lagenweiser Aufbau des LED-Moduls

Der Lagenaufbau des Moduls mit rotativ verarbeitetem Schaltungsträger ist in Bild 77 dargestellt. Die großflächigen Kupferpads führen zu einer Wärmespreizung und vergrößern zusätzlich die effektive Fläche für den Wärmedurchgang durch die Klebe-Isolationsschicht in den Aluminiumträger. Dieser puffert zunächst die Wärme und gibt diese an die Umgebung, respektive den Lampenkörper ab. Dieser Aufbau erfüllt höchste Anforderungen an eine sichere Entwärmung des LED-Chips und ermöglicht hohe Leistungen bei geringer thermischer Belastung. Dieses aufeinander

abgestimmte Konstrukt gewährleistet robuste Beleuchtungssysteme mit langlebigen LED-Modulen.

### 6.2.2 Herstellung von LED-Leuchtmitteln auf Basis rotativ geschnittener Leiterbahnen

Der Prozessfluss ist in zwei Abschnitte aufgliedert. Im ersten Abschnitt zur Herstellung des Schaltungsträgers, sind die Prozesse starr ausgeführt und wirken nach dem Push-Prinzip. Im zweiten Abschnitt, zur Weiterverarbeitung des Schaltungsträgers zum LED-Modul, sind die Prozesse flexibel ausgeführt und richten sich nach dem Pull-Prinzip. Damit lassen sich die erforderlich hohen Ausbringungen der Rotationsschneidtechnologie ideal mit der Erfüllung individueller Kundenanforderungen verbinden.

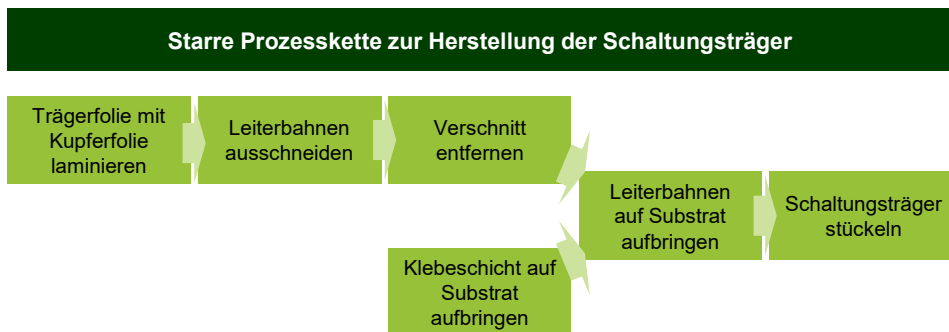


Bild 78: Starre Prozesskette zur Herstellung des Schaltungsträgers

Für die Verarbeitung dünner Kupferfolien eignet sich besonders, wie in Kapitel 4.5 ausgeführt, das rotative MSA-Verfahren. Voraussetzung hierfür ist die Verwendung eines zusätzlichen Trägermaterials. Die Prozesskette zur Herstellung der Schaltungsträger, wie in Bild 78 dargestellt, beginnt daher mit der Lamination von Träger- und Kupferfolie. Anschließend wird das Laminat dem Rotationsschneidprozess zugeführt und mit dem MSA-Verfahren das Leiterbahnenbild ausgeschnitten. Gutteil und Verschnitt bleiben dabei auf dem Träger fixiert und erst nach dem Verlassen des Prozesses wird der Verschnitt entfernt. In einem synchronisiert parallelen Pfad wird die Klebeschicht auf den Aluminiumträger aufgebracht. Abschließend werden beide Pfade zusammengeführt, das Leiterbahnenbild auf den Aluminiumträger aufgebracht und die Trägerfolie entfernt. Das Ergebnis ist der fertige Schaltungsträger zur Weiterverarbeitung.

Die Prozesskette zur Herstellung der Schaltungsträger für die LED-Module benötigt gemäß der angewandten Postponement-Strategie keine

Variantenbildung und ist damit starr ausgelegt, wodurch sie auf maximale Effizienz getrimmt werden kann. Erst im zweiten Schritt wird die unumgänglich notwendige Flexibilität eröffnet, um auf eine individuelle Kundenanwendung einzugehen.

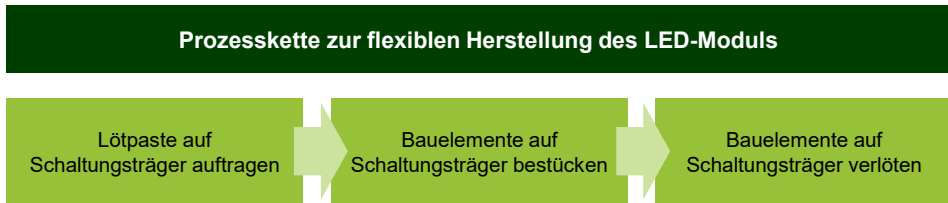


Bild 79: Flexible Prozesskette zur Herstellung des LED-Moduls

Für die Weiterverarbeitung der Schaltungsträger zu LED-Modulen kommt die klassische Prozesskette zur Elektronikproduktion (Bild 79) zum Einsatz. Diese besteht im Wesentlichen aus den Prozessschritten Lötpaste auf den Schaltungsträger auftragen, Bauelemente auf den Schaltungsträger bestücken und verlöten.

### 6.2.3 **Anlagenaufbau zur Abbildung der adaptierten Prozesskette**

Die Prozessschrittabfolge für die nachstehenden Untersuchungen ist analog der vorab beschriebenen Prozesskette in zwei Abschnitte aufgeteilt. Der erste Abschnitt zur Herstellung der Schaltungsträger ist, gemäß nachfolgender Abbildung, durch prototypische Einzelanlagen und Vorrichtungen realisiert.

Zur Vorbereitung des Laminats kommt eine klassische Bandspalanlage zum Einsatz. Mit dieser wird zunächst die Kupferfolie mit dem Trägermaterial laminiert, anschließend auf die gewünschte Verarbeitungsbreite gespalten und abschließend wieder aufgespult. Auch in der Großserie bietet es sich an, diesen Schritt offline zu gestalten, um so die Gesamtverfügbarkeit der Anlage durch eine zu starke Verkettung nicht weiter herabzusetzen.

Das Laminat wird anschließend im Rotationschneidaggregat weiterverarbeitet. Zum Einsatz kommt das in Kapitel 4.2 vorgestellte Schneidaggregat zum rotativen Messer-Anschneiden MSA. Dieses ist mit speziell auf den Versuchsträger angepassten Werkzeugen eingerichtet.

Abschließend wird der Schaltungsträger mit einfachen Laminiervorrichtungen sukzessive aufgebaut. Zunächst wird der Verschnitt von der

Trägerfolie abgezogen; der Verschnitt ist zusammenhängend gestaltet, so dass dieser Schritt kontinuierlich erfolgen kann. Anschließend wird das Leiterbahnbild optisch über dem Metallkern ausgerichtet und mittels einer Schaumstoffrolle aufgerollt. Abschließend wird die Trägerfolie abgezogen und ggf. die freiliegenden Klebeflächen mit Talkum eliminiert. In der Großserie muss dieser Teilprozess zur Erreichung einer Prozesskontinuität in einer integrierten Anlage abgebildet werden. Die maximale Ausbringung orientiert sich dabei am langsamsten Prozessschritt.



Bild 80: Versuchsanlagen und -vorrichtungen zur Herstellung des LED-Schaltungsträgers



Bild 8r: Verwendete SMT-Fertigungslinie zur Bestückung der LED-Module [93]

Zur Weiterverarbeitung der rotativ hergestellten Schaltungsträger zu LED-Modulen kommt die am Lehrstuhl FAPS vorhandene SMT Fertigungslinie zum Einsatz. Als begrenzende Faktoren sind hier im Wesentlichen der inflexible Schablonendruck sowie die begrenzt verfügbare Länge zur Verarbeitung des Substrats zu nennen. Alternativ empfiehlt es sich aufgrund der wenigen und großflächigen Lötstellen auf ein flexibles und integriertes Dispens- und Bestücksystem zurückzugreifen, wie es beispielsweise der SMD-Bestückautomat „Inoplacer Advance“ von ATN Produktionstechnik Nie-meier GmbH ist [94]. Zudem eignen sich bei größeren Chargen auch Prozessketten mit Rotations- oder Rollensiebdruck, um die Ausbringungsleistung weiter zu erhöhen.

### 6.3 Untersuchung des rotativ hergestellten LED-Leuchtmittels

Die Erkenntnisse aus der Analyse zu den rotativen Schneidverfahren in Kapitel 4.3 sowie die in diesem Kapitel vorangegangenen Inhalte sollen abschließend anhand einer realitätsnahen Anwendung final validiert werden. Den Beleg für die prinzipielle Eignung des Verfahrens für den industriellen Einsatz bildet das in diesem Kapitel vorgestellte LED-Modul auf Basis rotativ verarbeiteter Schaltungsträger.

### 6.3.1 Aufbau und Herstellung des LED-Leuchtmittels

Der LED-Modul-Versuchsträger ist ein Ausschnitt aus dem in Kap. 6.2.1 vorgestellten Design mit einer Gesamtlänge von 160 mm und einer Breite von 22 mm. Das Leiterbahnlayout ist flexibel bestückbar gestaltet und erfüllt somit höchste Anforderungen bezüglich auftragsorientierter Flexibilität. Die wichtigsten Aufbaustufen sind zusammengefasst in nachfolgender Abbildung dargestellt:

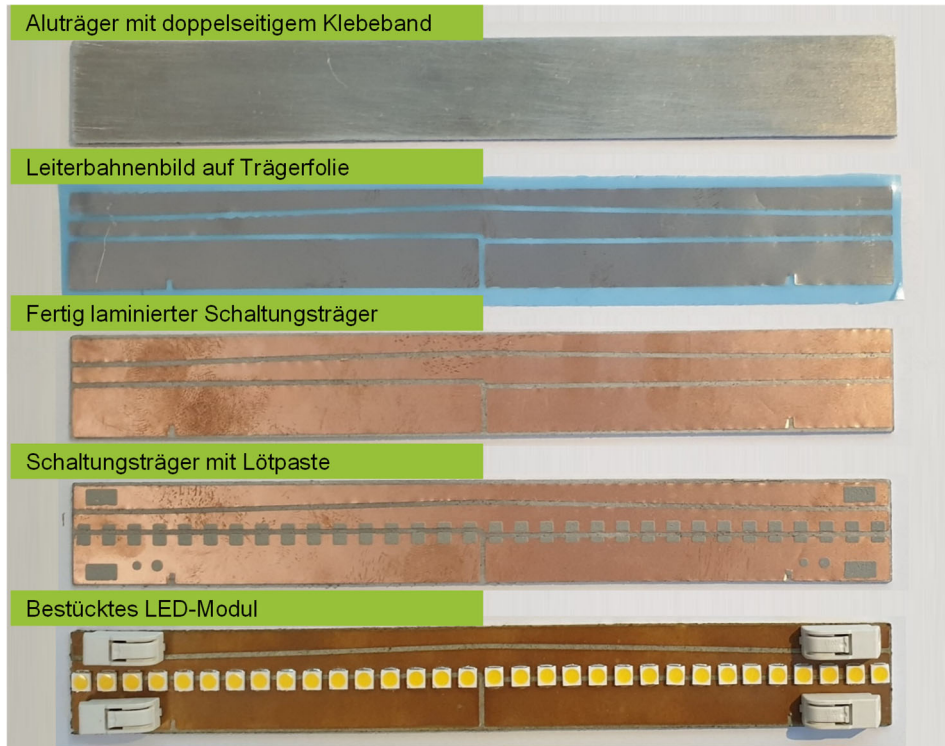


Bild 82: Verschiedene Aufbaustufen des LED-Modul-Versuchsträgers

Die Herstellung ist mit der in Kapitel 6.2.3 vorgestellten Anlagentechnik erfolgt. Die Simulation der Großserie mit den prototypischen Anlagen und Vorrichtungen bestätigt das Potenzial der Anwendung. Die Prozessverfügbarkeit ist stabil und die Ausschussrate äußerst gering. Insgesamt sind die Prozesse sehr robust und sehr gut skalierbar. Die Herstellung der Schaltungsträger erlaubt aufgrund der starren Fertigung hohe Automatisierungsgrade und kann damit auf eine maximale Ausbringung hin optimiert werden. Die Individualisierung des LED-Moduls findet erst im letzten Abschnitt der Herstellung, einer flexibilisierten Elektronikproduktion, statt. Die notwendige Flexibilität bezüglich der Anwendungsanforderungen lässt

sich damit wie erwartet hinauszögern und die erfolgreiche Implementation der Postponement-Strategie ist damit nachgewiesen.

### 6.3.2 Auswertung zum LED-Modul auf Basis rotativ verarbeiteter LED-Schaltungsträger

Die LED-Leuchtmittel-Versuchsträger entsprechen, wie nachgelagerte Ergebnisse zeigen, den Erwartungen.

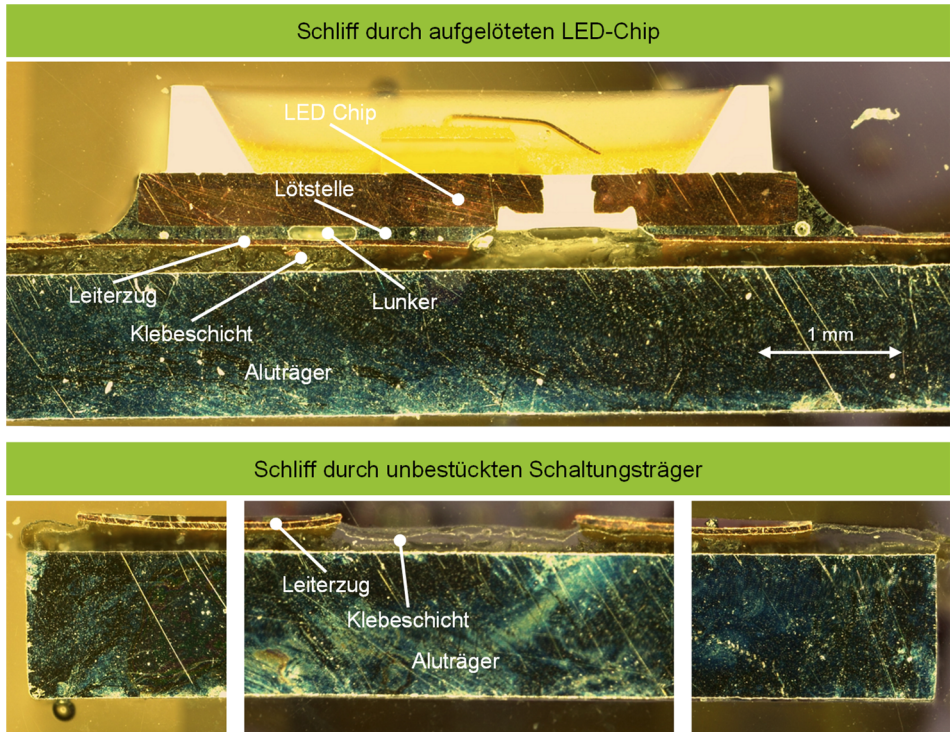


Bild 83: Schliffbilder der LED-Schaltungsträger – mit aufgelötetem LED-Chip (oben) und als unbestückter Bereich (unten)

Die Schliffe durch den LED-Chip (Bild 83 oben) sowie durch einen unbestückten Bereich (Bild 83 unten) veranschaulichen den vertikalen Aufbau des LED-Moduls. Die Kupferleiterbahnen sind durch die dielektrische Klebeschicht mit dem Aluminiumträger verbunden. Die Oberfläche weist dabei unerhebliche Unebenheiten auf, die aufgrund der Bauteilgröße zu keiner ersichtlichen Beeinträchtigung führen. Die LED-Chips sitzen satt auf dem Leiterzug und die Lötstellen gleichen die geringen Unebenheiten im Leiterzug aus. Unebenheiten in der Kupferschicht haben jedoch einen Einfluss auf die Porenbildung [95], welche auch nachweislich in den Lötstellen

vorhanden sind. Eine Beeinträchtigung der elektrischen und thermischen Anbindung der LED-Chips an das Substrat wurde nicht identifiziert, aber auch nicht eingehend untersucht. Hier empfiehlt sich eine ausführliche Analyse analog zu den Untersuchungen von Rauer [95]. Der Abstand zwischen Anode und Kathode ist aufgrund der in der Herstellung der Werkzeuge minimal einzuhaltenden Schneiden-abstände im Leiterzug größer als beim LED-Chip selbst. Dadurch entsteht ein Versatz in den miteinander zu verlötenden Flächen. Wie im Schliff ersichtlich, ist auch dieser Bereich entsprechend angebunden und kein negativer Einfluss aufgrund des Versatzes erkennbar.

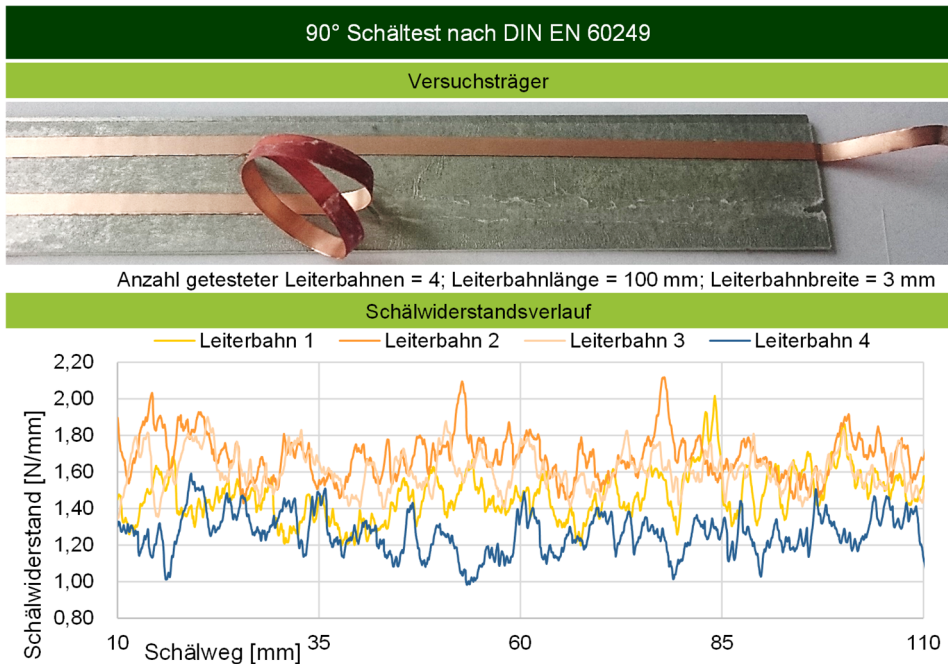


Bild 84: Schälwiderstandsverlauf für 90° Schältest nach DIN EN 60249

Die mechanische Stabilität der Schaltungsträger selbst sowie die fertig verarbeiteten LED-Module sind, wie nachfolgende Ergebnisse implizieren, der Anwendung entsprechend ausreichend dimensioniert.

Die Haftung der Leiterbahn auf dem Substrat ist eine bedeutsame Schlüsseleigenschaft und wird für einen Versuchsträger mit 90°-Schältest nach DIN EN 60249 ermittelt. Der dafür eingesetzte Versuchsträger ist mit den an Kapitel 6.2.2 angelehnten Prozessen hergestellt, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen. Bild 84 zeigt den Schälwiderstand für 4 Leiterbahnen mit 3 mm Leiterbahnbreite über einen Schälweg von 100 mm,

wobei die ersten und letzten 10 mm Schälweg nicht berücksichtigt sind. Der minimale Schälwiderstand liegt bei mindestens 1,0 N/mm und damit deutlich über dem in der Norm genannten Mindestwert von 0,6 N/mm. Die Werte liegen somit nachweislich im Bereich der Herstellangabe des Klebebands [96].

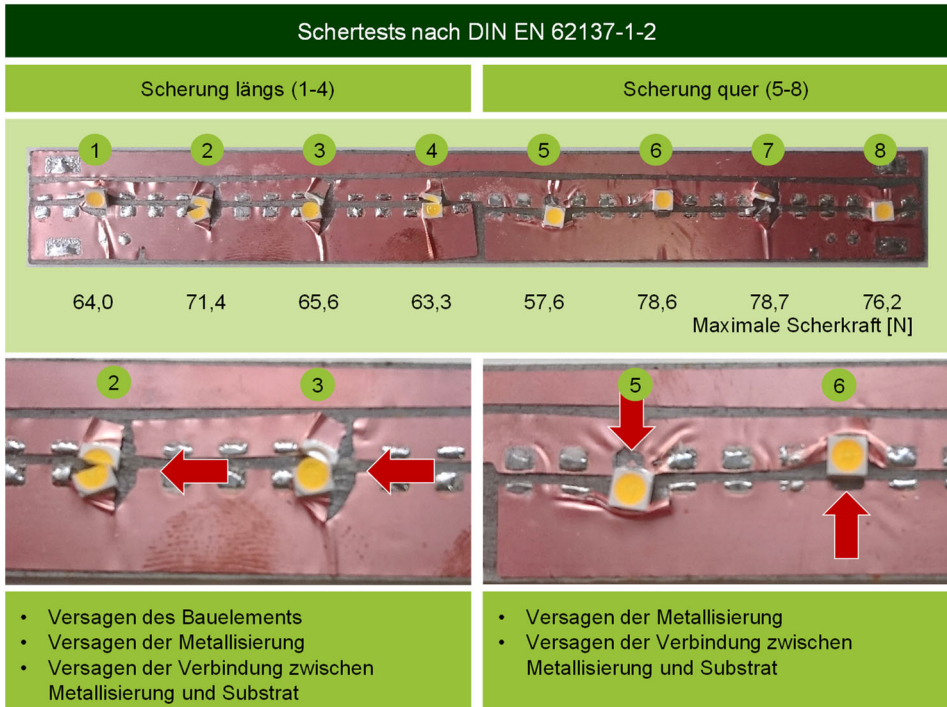


Bild 85: Scherkräfte von aufgelöteten LED-Chips für Schertest nach DIN EN 62137-1-2 [97]

Auch der Schertest nach DIN EN 62137-1-2 [97] (Bild 85) zeigt positive Ergebnisse für die Scherung in Längs- bzw. Querrichtung. Die im Versuch erreichten maximalen Scherkräfte von 57,6 N bis zu 78,7 N liegen weit über den Anforderungen der Anwendung. Bei allen Tests steigen die Scherkräfte ohne Auffälligkeiten im Verlauf bis auf ca. 20 N an, bevor erste Versagensmechanismen greifen. Aus den Kraftverläufen lässt sich schließen, dass die grundlegende Güte der Verbindungen zwischen den Einzelkomponenten beträchtlich hoch ist. Im Schertest längs ist das Endergebnis das Versagen der Bauelemente und im Schertest quer das Versagen der Metallisierung. Der eigentliche Versagensgrund in allen Tests liegt jedoch im Abgleiten der Metallisierung auf dem Klebeband. Diese tritt noch vor den genannten Versagensmechanismen ein und ist damit die Schwachstelle in der Verbindung.

6 Effiziente rotative Verarbeitung von Kupferfolie in der Herstellung von Schaltungsträgern für LED-Leuchtmittel

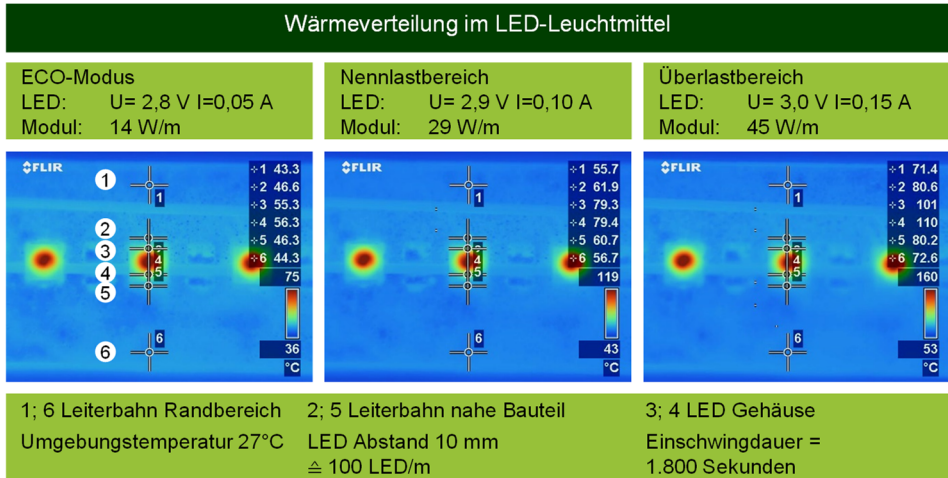


Bild 86: Wärmeverteilung im LED-Leuchtmittel bei verschiedenen stationären Leistungen  
Eine, die Lebensdauer eines LED-Chips [98] bestimmende wesentliche Größe, ist die Betriebstemperatur des LED-Chips, welche maßgeblich durch die Entwärmung dessen beeinflusst wird. [99] Bild 86 zeigt die Wärmeverteilung im LED-Modul-Versuchsträger für verschiedene Leistungsbereiche im stationären Zustand nach einer Einschwingdauer von 1.800 Sekunden.

Im ECO-Modus ist die Gehäusetemperatur bei 56 °C und das Temperaturgefälle zwischen Schaltungsträger und LED-Chip beträgt 13 °C. Auch im Nennlastbereich sind die Temperaturen unkritisch. Die Gehäusetemperatur liegt mit 79 °C ca. 50 % unterhalb der max. zulässigen Betriebstemperatur von 120 °C [98] und das Temperaturgefälle beträgt 18°C. Kritisch wird es im Überlastbereich. Hier liegt die Gehäusetemperatur nach der Einschwingdauer bereits bei 110 °C und auch der Träger erwärmt sich übermäßig stark. Dieser Anwendungsbereich wird jedoch für das beschriebene LED-Modul grundsätzlich nicht angestrebt, da die Effizienz (Lichtausbeute/Leistung - lm/W) der LED hierbei deutlich nachlässt.

Die ermittelten Versuchsergebnisse zeigen eindeutig, dass die Klebeverbindung zwischen Substrat und Leiterbahn die zu eliminierende Schwachstelle bildet. Zum einen trägt sie aufgrund ihrer flexiblen Oberflächenstruktur zu Unebenheiten bei und führt damit als erstes zu mechanischem Versagen. Zum anderen reduziert sie durch ihre Materialstärke von 0,13 mm den thermischen Durchgang zwischen Leiterbahn und Substrat und bildet damit einen steilen Temperaturgradienten in der Temperaturtreppe des LED-Moduls. [100] Alternativ empfiehlt sich daher der Ersatz

der Klebeschicht durch dünn-schichtige und vollständig aushärtende Klebesysteme.

## **6.4 Fazit zur rotativen Verarbeitung von Kupferleiterbahnen für LED-Module**

Die erfolgreiche Umsetzung der LED-Leuchtmittel-Anwendung bestätigt die Eignung der Rotationsschneidtechnologie für die Herstellung von einfachen Metallkern-Schaltungsträgern für leistungselektronische Anwendungen.

Die umwelt- und ressourcenschonende sowie hoch automatisierbare Prozesskette erfüllt hohe Standards hinsichtlich Herstellprozess, Materialeinsatz und Ressourcennachhaltigkeit bei gleichzeitig sehr hohen Ausbringungen und untermauert somit eine wirtschaftliche Produktion, auch in Deutschland. In Kombination mit dem vorgestellten Postponement-Konzept kann die Wertschöpfungskette lokal zusammengeführt und so flexibel auf die unterschiedlichsten Anwendungsanforderungen reagiert werden. Damit entfallen massive logistische und monetäre Aufwände, die durch Teilverlagerungen der Wertschöpfungskette zur Umgehung national verpflichtend einzuhaltender Umweltstandards oder Lohnkosten in beispielsweise asiatische Länder entstehen. Durch die kompakte Anlagentechnik sowie die hohe Effizienz der Prozesse sind die Investitions- und Lebensdauerkosten verhältnismäßig gering. Aufgrund dessen ist die Einstiegshürde in diese Technologie gering und auch für kleine und mittelständische Unternehmen stemmbar, die ihr Wertschöpfungsportfolio erweitern und in eine ökologisch verantwortungsvolle Technologie investieren möchten.

Beruhend auf den zuvor aufgezeigten Versuchsergebnissen, erfüllen die LED-Module auf Basis rotativ hergestellter Schaltungsträger, die heutigen technischen Anforderungen an flexibel adaptierbare Beleuchtungsanwendungen. Ein weiterführender kommerzieller Einsatz, aufbauend auf den bisher vorangegangenen Untersuchungen, unter Berücksichtigung des enormen technologischen und ökologischen Potenzials, wird somit faktenbasiert dringend empfohlen.



## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Rotationsschneiden ist eine eher wenig verbreitete Technologie und hat sich vornehmlich in der Verpackungs- und Hygieneindustrie als Verfahren für die Verarbeitung zahlreicher weicher und nichtmetallischer Materialien etabliert. Verbreitung in der Metallverarbeitung hat das Verfahren in der Kombination mit Profilierprozessen erlangt und sich auch in dieser Branche für einfache Profilanwendungen durchgesetzt. Damit belegt Rotationsschneiden als kontinuierliches Verfahren seine Potenziale in der Massenerarbeitung von dünnen Materialien, so auch hypothetisch von metallischen Funktionsfolien, die in mechatronischen Anwendungen zum Einsatz kommen. Wichtige Vertreter dieser Kategorie sind Elektroband für weichmagnetische Kerne, Kupferfolien für Schaltungsträger, legierte Kupferbänder für Stanzgitter und Lotband für Lotstanz- und Formteile.

Im Rahmen dieser Dissertation werden die Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie für die Verarbeitung dieser metallischen Funktionsfolien analysiert und Lösungswege aufgezeigt.

Anders als beispielsweise der klassische Hubstanzprozess ist der Rotationsschneidprozess allgemein wenig beleuchtet. Deshalb werden in Kapitel 3 zunächst die technologischen Prozessmerkmale zum Aufbau der Prozessstruktur, zur Kinematik des Prozesses sowie zur Statik und Dynamik beim Rotationsschneiden erfasst und auf die Gegebenheiten beim Rotationsschneiden von dünnen Metallfolien hin ausgerichtet. Dadurch ist das allgemeine Prozessverständnis zum Verfahren gewährleistet.

Im nachfolgenden Kapitel 4 werden geeignete rotative Schneidverfahrensalternativen für die Verarbeitung von dünnen Metallfolien für mechatronische Anwendungen identifiziert, auf die hohen Anforderungen mechatronischer Anwendungen hin angepasst und eingehend auf ihre Eignung für die Verarbeitung von ausgesuchten Vertretern für Funktionsfolien untersucht. Im Ergebnis sind drei rotative Schneidverfahren von Relevanz: Das rotative Messeranschneiden und Messerdurchschneiden (MSD/MSA), wie es am Markt verfügbar ist, das rotative Stempel-Matrize-Schneiden (SMS) mit den Neuerungen eindringloses Schneiden und Elastomer-Matrix sowie das rotative Elastomer-Schneiden (ES) als Neuheit. Abschließend werden die drei rotativen Schneidverfahren bezüglich verschiedener Kriterien kategorisiert, um eine Auswahl für den spezifischen Anwendungsfall anzubieten.

Abschließend betrachten zwei exemplarische Anwendungen die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf einen industriellen Einsatz der Rotationsschneidtechnologie für mechatronische Produkte.

Die erste betrachtete Anwendung ist die effiziente rotative Verarbeitung von Elektrobänd zu magnetischen Kernen in Kapitel 5. Hier werden zunächst die Rahmenbedingungen für die Gestaltung des Blechschnitts, die Prozesskette und Anlagentechnik definiert. Aufbauend darauf werden auf der prototypischen Anlage Ringkernproben hergestellt und ausgewertet, um den Einfluss der rotativen Verarbeitung auf die funktionalen Eigenschaften des Produkts zu belegen. Hier zeigt sich, dass die rotative Verarbeitung sehr stark das Ummagnetisierungs- und Verlustverhalten verschlechtert und im Ergebnis auch deutlich hinter klassisch hubgestanzten Proben liegt. Eine weitere Untersuchung zur rotativen Verarbeitung von Statoreinzelzahnsegmenten zeigt jedoch, dass die erreichbare Qualität, unabhängig von den Verlusten, den Erwartungen entspricht und untermauert durch die Anlagenkompaktheit und hohen Ausbringungsmengen das Potenzial für einen Großserieneinsatz für Anwendungen mit geringen Anforderungen des Produkts an die Effizienz.

Die zweite Anwendung befasst sich in Kapitel 6 mit der rotativen Verarbeitung von Leiterplatten für LED-Leuchtmittel. Aufgrund der relativ dünnen und weichen Kupferfolie wird hier das rotative Messeranschneiden ausgewählt. Die Untersuchung zeigt, dass sich die gesamte Prozesskette auf das neue Verfahren umstellen und sich zudem sehr gut mit einer Postpone-ment-Strategie vereinen lässt. Die damit verbundene späte Erzeugung der gewünschten Variantenvielfalt ermöglicht die effiziente Nutzung der Rotationsschneidtechnologie zur Herstellung der Schaltungsträger.

Damit geben die beiden vorgestellten exemplarischen Anwendungen der Rotationsschneidtechnologie einen Ausblick auf die gewaltigen technischen und prozessualen Potenziale in der Verarbeitung von dünnen Funktionsfolien für mechatronische Produkte und erinnern zugleich an den ökologischen und nachhaltigen Auftrag zukunftsweisender Bearbeitungsstrategien. Diese Dissertation legt damit den Grundstein zur Erschließung dieser, aber auch weiterer Anwendungsfelder mit der Rotationsschneidtechnologie.

In weiteren Forschungsaktivitäten empfiehlt es sich, die Grenzen der einzelnen rotativen Schneidverfahren weiter auszuloten, um so das nutzbare Parameterfeld auszudehnen und das Verfahren für eine Vielzahl von weiteren Anwendungen zu erschließen. Auch bieten sich, als Ergänzung zu den vorgestellten Ergebnissen, Langzeituntersuchungen unter seriennahen

Bedingungen an, um auch Erkenntnisse zu Werkzeugstandzeiten, Anlagenstabilität und Reproduzierbarkeit zu generieren.

Auch die rotative Verarbeitung von Kupferfolie zu Schaltungsträgern birgt enormes Potenzial für weitere Forschungsarbeiten. So besteht in der vorgestellten Prozesskette noch deutlicher Optimierungsbedarf insbesondere mit dem Fokus auf die durchgängige Verarbeitung. Ebenfalls dient der rotativ verarbeitete Schaltungsträger nur als ein erster Demonstrator, wobei eine Vielzahl von Fragestellungen bezüglich Designgrenzen, Lebensdauer, Effizienz und alternativ verwendbarer Materialien tiefergehend zu klären sind. In diesem Kontext bietet sich zudem eine weitergehende Untersuchung zum Einsatz der Rotationsschneidtechnologie auf flexible Schaltungsträger an.



## 8 Summary and outlook

Rotary cutting is a rather uncommon technology and has established itself primarily in the packaging and hygiene industry as a method for processing numerous soft and non-metallic materials. The method has become widespread in metal processing in combination with profiling processes and has also established itself in this industry for simple profile applications. As a continuous process, rotary cutting thus demonstrates its potential in the mass processing of thin materials, including, hypothetically, metallic functional foils used in mechatronic applications. Important representatives of this category are electrical steel for soft magnetic cores, copper foils for circuit carriers, alloyed copper strips for stamped grids and solder strips for preforms.

In this thesis, the application potential of rotary cutting technology for the processing of these metallic functional films is investigated and possible solutions are outlined.

Unlike the classic stamping process, the rotary cutting process is generally hardly investigated. For this reason, the technological process features relating to the process structure, the kinematics of the process, and the statics and dynamics of rotary cutting are first described in Chapter 3 and aligned with the conditions in the rotary cutting of thin metal foils. This ensures a general understanding of the method.

In the following chapter 4, suitable rotary cutting method alternatives for processing thin metal foils for mechatronic applications are identified, adapted to the high requirements of mechatronic applications, and examined in detail for their suitability for processing selected representatives of functional foils. As a result, three rotary cutting processes are of relevance: Rotary knife cutting (MSD/MSA) as available on the market, rotary stamp die cutting (SMS) with the innovations of non-penetrating cutting and elastomer matrix, and rotary elastomer cutting (ES) as a novelty. Finally, the three rotary cutting methods are categorized with respect to various criteria to offer a selection for the specific application.

Finally, two exemplary applications consider the transferability of the results to an industrial application of rotary cutting technology for mechatronic products.

The first application considered is the efficient rotary cutting of electrical steel into magnetic cores in chapter 5. Here, the framework for the design

of the lamination, the process chain and manufacturing equipment are first defined. Based on this, toroidal core samples are produced on the prototype line and evaluated to prove the influence of the rotary cutting process on the functional properties of the product. It is demonstrated that rotary cutting very strongly deteriorates the core magnetization and loss behavior, and the results are also significantly worse than those of conventional stamped specimens. However, a further investigation into rotary processing of stator single tooth segments shows that the achievable quality, irrespective of losses, is in line with expectations and underlines the potential for mass production use for applications with low product efficiency requirements due to the plant compactness and high output rates.

The second application in Chapter 6 focuses on the rotary processing of circuit boards for LED lights. Due to the relatively thin and soft copper foil, rotary knife cutting is selected for this application. The investigation shows that the entire process chain can be adapted to the new method and can also be combined very well with a postponement strategy. The associated late generation of the desired variety of variants enables the efficient use of rotary knife cutting technology to produce the circuit carriers.

The two exemplary applications of rotary cutting technology presented here thus provide an outlook on the enormous technical and process potential in the processing of metallic functional films for mechatronic products and at the same time remind us of the ecological and sustainable mission of forward-looking processing strategies. This thesis thus establishes the basis for the development of these as well as other fields of application with rotary cutting technology.

In future research activities, it is recommended to further investigate the limits of the individual rotary cutting processes to expand the usable parameter field and to open the process for many more applications. In addition to the results presented here, long-term investigations under near-series conditions are also advisable to generate knowledge on tool life, system stability and reproducibility.

The rotary processing of copper foil into circuit carriers also holds enormous potential for further research work. There is still a clear need for optimization in the process chain presented, especially with a focus on continuous processing. The rotary processed circuit carrier also serves only as an initial demonstrator, although many issues relating to design limits, service life, efficiency and alternative materials need to be clarified in greater detail. In this context, a further investigation of the use of rotary cutting technology on flexible circuit carriers is also advisable.

## Literaturverzeichnis

- [1] CHRISTENSEN, C.M. *The innovator's dilemma. When new technologies cause great firms to fail*. Boston, Mass.: Harvard Business Review Press, 2016. The management of innovation and change series. 2016: 1. ISBN 1633691780
- [2] SCHERRER, C. Mini-Mills: A New Growth Path for the U.S. Steel Industry? [online]. *Journal of Economic Issues*, 1988, 22(4), S. 1179-1200. Verfügbar unter: <http://www.jstor.org/stable/4226077>
- [3] CHAVEZ, L. The rise of the mini-steel mills [online]. *The New York Times*, 23. September 1981 [Zugriff am: 7. Dezember 2021]. Verfügbar unter: <https://www.nytimes.com/1981/09/23/business/the-rise-of-mini-steel-mills.html>
- [4] *Schobertechnologies GmbH* [online] [Zugriff am: 7. Dezember 2021]. Verfügbar unter: <http://www.schobertechnologies.de>
- [5] *Spilker GmbH* [online] [Zugriff am: 7. Dezember 2021]. Verfügbar unter: <https://www.spilker.com/de/>
- [6] *Kocher + Beck GmbH + Co. Rotationsstanztechnik KG* [online] [Zugriff am: 7. Dezember 2021]. Verfügbar unter: <https://www.kocher-beck.com/>
- [7] PYPER, M. Walzprofilieren stark im Kommen. Neue Verfahren und höherfeste Werkstoffe erschließen neue Anwendungen. *Blech - Sonderteil Rohre/ Profile/ Band*, 2007, 16(2), S. 86-91
- [8] OHNE AUTOR. *Rotationsstanzen – eine wenig bekannte Spitzentechnologie* [online] [Zugriff am: 20. April 2018]. Verfügbar unter: [https://www.blechrohreprofile.de/blechumformtechnik-fachartikel/rotationsstanzen-and-8211;-eine-wenig-bekannte-spitzentechnologie\\_3981\\_de/](https://www.blechrohreprofile.de/blechumformtechnik-fachartikel/rotationsstanzen-and-8211;-eine-wenig-bekannte-spitzentechnologie_3981_de/)
- [9] OHNE AUTOR. *Rotationsschneiden* [online] [Zugriff am: 18. November 2016]. Verfügbar unter: <http://www.baust.de/uploads/media/Artikel-utg.pdf>

- [10] LANGENSIEPEN, M. *Rotationsstanzen ermöglicht Bauprofile am laufenden Meter* [online], 2011 [Zugriff am: 7. Februar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/rotationsstanzen-ermoelicht-bauprofile-am-laufenden-meter-a-316202/>
- [11] *Baust Stanztechnologie GmbH* [online] [Zugriff am: 7. Dezember 2021]. Verfügbar unter: <https://www.baust.de/branchen-anwendungen/stanztechnologie/>
- [12] HOFFMANN, H., C. HEIN und S. HONG. Rotary blanking [online]. *Tool materials. Production Engineering*, 2007, **1**(3), S. 259-264. ISSN 0944-6524. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11740-007-0039-3
- [13] JOEST, R. *Rotationsstanzen erhöht die Produktivität deutlich* [online], 2008 [Zugriff am: 7. Februar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/rotationsstanzen-erhoeht-die-produktivitaet-deutlich-a-145160/index3.html>
- [14] BAUST, C. *Mit Rotationstanzen Endlosmaterialien schneller und genauer bearbeiten* [online], 2008 [Zugriff am: 7. Februar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/mit-rotationstanzen-endlosmaterialien-schneller-und-genauer-bearbeiten-a-146983/>
- [15] PLATE, M. *Den Dreh raus: Rotationsstanze für Profileranlage kommt ohne Motor aus* [online], 2016 [Zugriff am: 7. Februar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.maschinenmarkt.vogel.de/den-dreh-raus-rotationsstanze-fuer-profilieranlage-kommt-ohne-motor-aus-a-541577/>
- [16] BLUMAUER, G. und E. KÖHLER. *Beitrag zur Untersuchung des Rotationsstanzens von Karton*. Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt, Fakultät für Maschineningenieurwesen. Dissertation. Karl-Marx-Stadt, 17. Mai 1974
- [17] NOACK, M. *Technologische Untersuchungen zum Perforieren von Metallband mittels rotierender Werkzeuge*. Technische Hochschule Otto von Guericke Magdeburg, Fakultät für Technische Wissenschaften. Dissertation. Magdeburg, 20. April 1982
- [18] HOFFMANN, H., M. SCHWEITZER und J. MILBERG. Rotary Blanking [online]. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 1999, **48**(1), S. 213-216. ISSN 00078506. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0007-8506(07)63168-0

- [19] SCHWEITZER, M. *Prozessspezifische Merkmale des Rotations-schneidens*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen. Dissertation. 2001. München: Hieronymus, 2001. Utg-Forschungsberichte. 12. ISBN 3-89791-214-7
- [20] SCHMIDT, T.K. *Verbesserung der Schnittfläche durch Anpassung der Stempelgeometrie an die Kinematik des Rotationsschneidens*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen. Dissertation. 2003. München: Hieronymus, 2004. Utg-Forschungsberichte. 29. ISBN 3-89791-343-7
- [21] IVERS-TIFFÉE, E. und W.v. MÜNCH. *Werkstoffe der Elektrotechnik*. 10. Auflage. Stuttgart: Teubner, 2007. Lehrbuch: Elektrotechnik. ISBN 978-3-519-30115-8
- [22] HOFMANN, H. und J. SPINDLER. *Werkstoffe in der Elektrotechnik. Grundlagen - Struktur - Eigenschaften - Prüfung - Anwendung - Technologie*. 7. Auflage. München: Hanser, 2013. Lernbücher der Technik. ISBN 3446432205
- [23] WUPPERMANN, C.-D. und A. SCHOPPA. *Merkblatt 401. Elektroband und -blech*. Düsseldorf: Stahl-Informations-Zentrum
- [24] DIN EN 10303:2016-02. *Dünnes Elektroband und -blech aus Stahl zur Verwendung bei mittleren Frequenzen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [25] DIN EN 10107:2014-07. *Kornorientiertes Elektroband und -blech im schlussgeglühten Zustand*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [26] DIN EN 10106:2016-03. *Kaltgewalztes nicht kornorientiertes Elektroband und -blech im schlussgeglühten Zustand*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [27] BRACHTHÄUSER, N. Elektromobilität – Neue Herausforderungen an den Werkstoff Elektroband. In: P. GROCHE, Hg. *11. Umformtechnisches Kolloquium Darmstadt. Flexible Umformtechnik*. Bamberg: Meisenbach, 2012, S. 209-216. ISBN 9783875253269
- [28] DIN EN 10342:2005-09. *Einteilung der Isolationen auf Elektroblech und -band und daraus gefertigten Stanzteilen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH

- [29] DIN EN 10341:2006-08. *Kaltgewalztes Elektroblech und -band aus unlegierten und legierten Stählen im nicht schlussgeglühten Zustand*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [30] RISSE, A. *Fertigungsverfahren der Mechatronik, Feinwerk- und Präzisionsgerätetechnik*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012. ISBN 978-3-8348-1519-4
- [31] ZICKERT, G. *Leiterplatten. Stromlaufplan, Layout und Fertigung; ein Lehrbuch für Einsteiger*. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2015. ISBN 978-3-446-44289-4
- [32] HANKE, H.-J., Hg. *Baugruppenttechnologie der Elektronik. Leiterplatten*. Berlin: Verlag Technik, 1994. ISBN 3-341-01097-1
- [33] FRANKE, J., Hg. *Räumliche elektronische Baugruppen (3D-MID). Werkstoffe, Herstellung, Montage und Anwendungen für spritzgossene Schaltungsträger*. München: Hanser, 2013. ISBN 978-3-446-43778-4
- [34] SCHRAMM, R. *Strukturierte additive Metallisierung durch kaltaktives Atmosphärendruckplasma*. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS). Dissertation. Bamberg: Meisenbach, 2015. Fertigungstechnik - Erlangen. 273. ISBN 978-3-87525-396-2
- [35] DIN EN 13599:2014-12. *Kupfer und Kupferlegierungen – Platten, Bleche und Bänder aus Kupfer für die Anwendung in der Elektrotechnik*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [36] DIN EN 61249-5-1:1996-06. *Materialien für Verbindungsstrukturen - Teil 5: Rahmenspezifikationen für leitfähige Folien mit und ohne Beschichtungen - Hauptabschnitt 1; Kupferfolien (zur Herstellung von kupferkaschierten Basismaterialien)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [37] IPC 4562A-WAM1 with Amendment 1:2016-01. *Metal Foil for Printed Board Applications*. Bannockburn, Illinois: IPC
- [38] GOTH, C. *Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)*. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS). Dissertation. Bamberg: Meisenbach, 2013. Fertigungstechnik - Erlangen. 232. ISBN 978-3-87525-340-5

- [39] HÜTHIG GMBH. *Stanzgitter statt Leiterplatte. Stanzgitter für elektrotechnische Anwendungen als umweltfreundliche Alternative zur Leiterplatte.*, 29. April 2011
- [40] DEUTSCHES KUPFERINSTITUT BERUFSVERBAND E.V. *Niedriglegierte Kupferwerkstoffe. Eigenschaften, Verarbeitung, Verwendung.* Düsseldorf, 2012. Technologie Forum Kupfer
- [41] DEUTSCHES KUPFERINSTITUT BERUFSVERBAND E.V. *Kupfer-Zinn-Knetlegierungen (Zinnbronzen).* 07/2004. Düsseldorf
- [42] DIN EN 1654:1998-03. *Kupfer- und Kupferlegierungen - Bänder für Federn und Steckverbinder.* Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [43] TSCHÖPE, R. *Hartlötten mit Lotfolie* [online], 2014 [Zugriff am: 8. Februar 2021]. Verfügbar unter: [https://www.sonderlote.de/epages/62173412.sf/de\\_DE/?Object-Path=/Shops/62173412/Categories/Blog/Hartl\\_ten\\_mit\\_Lotfolie](https://www.sonderlote.de/epages/62173412.sf/de_DE/?Object-Path=/Shops/62173412/Categories/Blog/Hartl_ten_mit_Lotfolie)
- [44] DILSCH, R. *Optimale thermische Kopplung bei doppelseitiger Entwärmung* [online], 2016 [Zugriff am: 7. Dezember 2021]. Verfügbar unter: <https://www.elektronikpraxis.vogel.de/optimale-thermische-kopplung-bei-doppelseitiger-entwaermung-a-537950/>
- [45] PFLUCKE, K., E. BASTOW und M. FENNER. *Preform-Produkte aus bleifreiem Lot. Für untypische SMT- oder Wellenlötaufgaben.* Milton Keynes (UK), 15. September 2004
- [46] GRASER, F. *Lotformteile ohne Flussmittel* [online]. 2014 [Zugriff am: 7. Dezember 2021]. Verfügbar unter: <https://www.elektronikpraxis.vogel.de/lotformteile-ohne-flussmittel-a-454376/>
- [47] LAMBRACT, P. *Materialwissenschaftliche Aspekte bei der Entwicklung bleifreier Lotlegierungen.* Technischen Universität Darmstadt, Fachbereich Material- und Geowissenschaften. Dissertation. Darmstadt, 2002
- [48] DIN EN ISO 9453:2014-12. *Weichlote – Chemische Zusammensetzung und Lieferformen (ISO 9453:2014).* Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [49] DIN 1707-100:2017-10. *Weichlote – Chemische Zusammensetzung und Lieferformen als Ergänzung zur DIN EN ISO 9453:2014-12.* Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [50] INDIUM CORPORATION. *Lot-Preforms* [online]. *Produktdatenblatt* [Zugriff am: 7. Februar 2021]. Verfügbar unter:

- <https://www.indium.com/technical-documents/product-data-sheets/download/1736/>
- [51] INDIUM CORPORATION. *Integrierte Lot-Preforms* [online]. *Produktdatenblatt* [Zugriff am: 7. Februar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.indium.com/technical-documents/product-data-sheets/download/1737/>
- [52] HEIN, C., S. HONG, J. SUH, H. HOFFMANN und N. KIM. Finite element analysis of rotary blanking. Effects of punch geometries on cutting area and stress distribution. In: THE KOREAN SOCIETY OF AUTOMOTIVE ENGINEERS, Hg. *International Journal of Automotive Technology: The Korean Society of Automotive Engineers*; Springer, 2008, S. 211-216
- [53] GROTE, K.-H. und J. FELDHUSEN, Hg. *Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau*. 22. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2014. ISBN 978-3-540-49714-1
- [54] KOLBE, M. und W. HELLWIG. *Spanlose Fertigung Stanzen. Präzisionsstanzteile, Hochleistungswerkzeuge, Hochgeschwindigkeitspressen*. 11. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. ISBN 978-3-658-09947-3
- [55] WITTEL, H., D. MUHS, D. JANNASCH und J. VOßIEK. *Roloff/Matek Maschinenelemente. Normung, Berechnung, Gestaltung*. 22. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. ISBN 978-3-658-09081-4
- [56] PAPULA, L. *Mathematische Formelsammlung. Für Ingenieure und Naturwissenschaftler*. 12. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. ISBN 978-3-658-16194-1
- [57] RILL, D. *Clinchen von Stahl- und Aluminiumfeinblechen mit rotierenden Werkzeugen*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen. Dissertation. 2015
- [58] FRITZ, A.H. und G. SCHULZE, Hg. *Fertigungstechnik*. 11. Auflage. Berlin: Springer Vieweg, 2015. ISBN 978-3-662-46554-7
- [59] KLOCKE, F. und W. KÖNIG, Hg. *Fertigungsverfahren. Umformen*. 5. Auflage. Berlin: Springer, 2006. *Fertigungsverfahren*. 4. ISBN 978-3-540-23650-4

- [60] FRANKE, J.; HACKERT, J.; HUBERT, M. Anlage zum Rotations-schneiden von Elektroblechen. Erfinder: J. HACKERT. Anmeldung: 13. November 2013. Deutschland DE 10 2013 018 995
- [61] DIN 8580:2003-09. *Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [62] DIN 8588:2013-08. *Fertigungsverfahren Zerteilen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [63] C.D. WÄLZHOLZ GMBH & CO. KG. *Lacksysteme. Isolierlack, Backlack, Sonderlack*, 06/2017
- [64] VDI 2906:1994-05. *Schnittflächenqualität beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von Werkstücken aus Metall - Allgemeines, Kenngrößen, Werkstoffe*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [65] DIN ISO 2768-1:1991-06. *Allgemeintoleranzen - Teil 1: Toleranzen für Längen- und Winkelmaße ohne einzelne Toleranzeintragung*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [66] AICHELE WERKZEUGE GMBH. Schneidvorrichtung. Erfinder: H. VEES. Anmeldung: 29. Juli 1998. Deutschland DE 198 34 104 A1
- [67] MÄRDIAN WERKZEUG- UND MASCHINENBAU GMBH. Vorrichtung zum rotativen Stanzen von Stanzgut, insbesondere von extrudierten Endlosprofilen. Erfinder: F.-J. MÄRDIAN. Anmeldung: 8. November 2003 EP 1 419 861 A1
- [68] KOPP, C.M. *Einfluss der Schneidparameter beim Scher- und Keilschneiden von Magnesiumblechwerkstoffen*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen. Dissertation. München, 2011
- [69] LIU, Q., J.T. HAN, J. LIU und X.X. WANG. Experimental Investigation on Rotary Punching by the Compression of Polyurethane Pad [online]. *Advanced Materials Research*, 2014, **941-944**, S. 1802-1807. ISSN 1662-8985. Verfügbar unter: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.1802
- [70] LIU, Q., J.T. HAN, J. LIU und X.X. WANG. Research Status of Sheet Metal Blanking Processes [online]. *Advanced Materials Research*, 2014, **941-944**, S. 1827-1831. ISSN 1662-8985. Verfügbar unter: doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.1827
- [71] BLEY, ERICH. Rotatable resilient punch and die cutter apparatus. Erfinder: E. BLEY. Anmeldung: 25. Juni 1973. USA US3827321 A

- [72] TREMEL, J., J. HACKERT, V. THOMS und J. FRANKE. Rotational cutting of lamination sheets for electrical machines. In: *2012 2nd International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Piscataway, NJ: IEEE, 15. Oktober 2012 - 18. Oktober 2012, S. 1-4. ISBN 978-1-4673-3008-4
- [73] SYSKA, A. *Produktionsmanagement. Das A-Z wichtiger Methoden und Konzepte für die Produktion von heute*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2006. ISBN 978-3834902351
- [74] BRETTSCHEIDER, J., R. SPITZNER und R. BOEHM. Flexible mass production concept for segmented BLDC stators. In: *3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2013, S. 1-8. ISBN 978-1-4799-1102-8
- [75] GKN EVO EDRIVE SYSTEMS LIMITED. Variable pitch punch apparatus. Erfinder: M. LAMPERTH UND M. CORDNER. Anmeldung: 13. August 2014. Great Britain WO 2015/028778 A1
- [76] S + C MÄRKER GMBH. Stanzwalzgerüst und Rotationsstanzverfahren. Erfinder: M. LANGFORD UND C. KLEE. Anmeldung: 24. September 2008. Deutschland EP 2 042 279 A1
- [77] YOUSSEF, M.E., A. VAN GORP, S. CLENET, A. BENABOU, P. FAVEROLLE, J.-C. MIPO, Y. LAVALLEY, C. COUR und T. LECUPPE. Slinky stator: The impact of manufacturing process on the magnetic properties. In: *International Electric Machines and Drives Conference (IEMDC)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2017, S. 1-8. ISBN 978-1-5090-4281-4
- [78] DIN EN 60404-6:2004-10. *Magnetische Werkstoffe - Teil 6: Verfahren zur Messung der magnetischen Eigenschaften weichmagnetischer und pulverförmiger Werkstoffe bei Frequenzen im Bereich 20 Hz bis 200 kHz mit Hilfe von Ringproben (IEC 60404-6:2003)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [79] DIN EN 60404-6 Berichtigung 1:2009-05. *Magnetische Werkstoffe - Teil 6: Verfahren zur Messung der magnetischen Eigenschaften weichmagnetischer und pulverförmiger Werkstoffe bei Frequenzen im Bereich 20 Hz bis 200 kHz mit Hilfe von Ringproben (IEC 60404-6:2003)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [80] SCHOPPA, A., J. SCHNEIDER und C.-D. WUPPERMANN. Influence of the manufacturing process on the magnetic properties of non-oriented electrical steels [online]. *Journal of Magnetism and*

- Magnetic Materials*, 2000, **215-216**, S. 74-78. ISSN 03048853. Verfügbar unter: doi:10.1016/S0304-8853(00)00070-6
- [81] NAUMOSKI, H. *Untersuchung des Einflusses der Bearbeitung auf die magnetischen Eigenschaften von nichtkornorientiertem Elektroblech*. Universität Ulm, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Informatik und Psychologie. Dissertation. Ulm, 2018
- [82] DIN EN 10027-1:2005-10. *Bezeichnungssysteme für Stähle -Teil 1: Kurznamen*. Berlin: Beuth Verlag GmbH
- [83] C.D. WÄLZHOLZ GMBH & CO. KG. *EN 10106. Elektroband Standardgüten*, 06/2017
- [84] DR. BROCKHAUS MESSTECHNIK GMBH & CO. KG. *Measuring Unit MPG 200 D. Measuring Technology for Soft Magnetic Materials*
- [85] NAKATA, T., M. NAKANO und K. KAWAHARA. Effects of Stress Due to Cutting on Magnetic Characteristics of Silicon Steel [online]. *IEEE Translation Journal on Magnetics in Japan*, 1992, 7(6), S. 453-457. Verfügbar unter: doi:10.1109/TJM.1992.4565422
- [86] ZHANG, B. *Modellierung und hocheffiziente Berechnung der lastabhängigen Eisenverluste in permanentmagneterregten Synchronmaschinen*. Karlsruher Institut für Technik, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik. Dissertation. 2018. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2018. ISBN 978-3-7315-0928-8
- [87] MCKINSEY & COMPANY, INC. *Lighting the way: Perspectives on the global lighting market*. 2. Auflage, August 2012
- [88] GREINER, S. *Bei der LED-Entwicklung ist noch viel Luft nach oben* [online], 2013 [Zugriff am: 7. Februar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.elektronikpraxis.vogel.de/bei-der-led-entwicklung-ist-noch-viel-luft-nach-oben-a-400767>
- [89] MALLOK, C. *Metallkern-Leiterplatte lässt LEDs länger und gleichmäßiger leuchten* [online]. *Wärmemanagement für LED-Anwendungen*. Fachthema, 2008 [Zugriff am: 8. Februar 2021]. Verfügbar unter: <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/leiterplatten/articles/171824/>
- [90] OHNE AUTOR. *Intelligente Beleuchtung* [online]. *Vollautomatischer LED-Produktionsprozess von Rolle zu Rolle*, 2016 [Zugriff am:

8. Februar 2021]. Verfügbar unter: <http://epp.industrie.de/technik/applikationsbeschreibungen/intelligente-beleuchtung/>
- [91] GASCH, M. *Was tut sich in der Leiterplattenbranche? [online]. Leiterplatten-Verknappungen und Preiserhöhungen in Asien*, 2019. 12 November 2019 [Zugriff am: 26. Oktober 2020]. Verfügbar unter: <https://www.all-electronics.de/leiterplatten-verknappungen-und-preiserhoehungen-in-asien/>
- [92] REESE, J. *Management von Wertschöpfungsketten. Unternehmenskooperation ohne Märkte*. München: Verlag Franz Vahlen, 2016. ISBN 978-3-8006-5196-2
- [93] *SmartEP – Intelligente Nutzung der Betriebs- und Inspektionsdaten einer SMT-Linie zur Erhöhung der Qualität und der Flexibilität in der Elektronikproduktion – FAPS – Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik [online]* [Zugriff am: 14. Dezember 2020]. Verfügbar unter: <https://www.faps.fau.de/curforsch/intelligente-nutzung-der-betriebs-und-inspektionsdaten-einer-smt-linie-zur-erhoehung-der-qualitaet-und-der-flexibilitaet-in-der-elektronikproduktion/>
- [94] ATN PRODUKTIONSTECHNIK NIEMEIER GMBH. *SMD-Bestückautomat INOPLACER Advance*
- [95] RAUER, M. *Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden*. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik (FAPS). Dissertation. Erlangen: FAU University Press, 2018. FAU Studien aus dem Maschinenbau. 313. ISBN 978-3-96147-158-4
- [96] REINHARDT, A., V. LIEDKE, S. WEGE und H. SCHLESSMANN. *Voidarme Lötprozesse [online]. AVT-Herausforderungen der Leistungselektronik in der Praxis*, 2014 [Zugriff am: 8. Februar 2021]. Verfügbar unter: <http://www.all-electronics.de/voidarme-loetprozesse/>
- [97] DIN EN 62137-1-2:2008-02. *Oberflächenmontage-Technik - Verfahren zur Prüfung auf Umgebungseinflüsse und zur Prüfung der Haltbarkeit von Oberflächen-Lötverbindungen - Teil 1-2: Scherfestigkeitsprüfung (IEC 62137-1-2:2007)*. Berlin: Beuth Verlag GmbH

- [98] LUMILEDS HOLDING B.V. *Lumileds Luxeon 3535L Line. High efficacy in a 3535 package with full range of CCTs and CRIs*. MXA8-PW40-H001, 2020
- [99] LUTSCHOUNIG, F. *Schaltungsträger mit hoher Wärmeleitfähigkeit für LED-Applikationen* [online]. *IMS-Leiterplatten*, 2008 [Zugriff am: 7. Februar 2021]. Verfügbar unter: <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/leiterplatten/articles/120078/>
- [100] LEHNBERGER, C. *Durchblick schaffen* [online]. *PCB für leistungsintensive Applikationen*, 2016 [Zugriff am: 7. Dezember 2021]. Verfügbar unter: <http://www.elektroniknet.de/elektronik/elektronikfertigung/durchblick-schaffen-130080.html>

## Verzeichnis promotionsbezogener, eigener Publikationen

- [P1] FRANKE, J., M. SCHMIDT, M. HUBERT, F. RISCH, J. TREMEL und B. HOFMANN. Laserschneiden in der Elektroblechfertigung. Flexible und produktive Produktion dünner Elektrobleche für elektrische Traktionsmotoren in Elektrofahrzeugen. *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 2012, **107**(9), S. 642-646
- [P2] HUBERT, M., J. FRANKE und J. HACKERT. Continuous rotational cutting of laminations for electric drives: Cutting process and tool setups for rotational cutting of laminations. In: *4th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2014, S. 1-5. ISBN 978-1-4799-5008-9
- [P3] HUBERT, M., M. WEIGELT, M. SPAHR, J. FRANKE, J. HACKERT und M. MEHLHORN. Explicit finite element analysis for rotary cutting of electrical steel sheet. In: *6th International Annual Engineering Seminar (InAES)*: IEEE, 2016, S. 233-238. ISBN 978-1-5090-0741-7
- [P4] HUBERT, M., H. ROSENOW, J. FRANKE und J. HACKERT. Rotary cutting as an alternative method in the processing of electrical steel strip: Geometric and kinematic determination of the process setup. In: *5th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2015, S. 1-5. ISBN 978-1-4673-7511-5
- [P5] HUBERT, M., S. KUTTER, M. ZIEGLER, M. SCHNEIDER und J. FRANKE. Rotary Cutting of Electrical Steel Laminations – A Contrast to Traditional Stamping [online]. *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 2017, **2**(3), S. 1107-1113. ISSN 24156698. Verfügbar unter: doi:10.25046/aj0203140
- [P6] HUBERT, M., M. ZIEGLER, S. KUTTER, M. SCHNEIDER, M. WEIGELT, J. FRANKE, J. HACKERT und M. MEHLHORN. Analysis of the Rotary Cutting Process of Electrical Steel on Basis of a Toroidal Core Test. In: *6th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2016, S. 230-236. ISBN 978-1-5090-2908-2
- [P7] HUBERT, M. und J. FRANKE. Letter to the Editor: Rotary Cutting of Electrical Steel Laminations - an Innovative Method for Manufacturing Electrical Machines [online]. *Electric Power Components*

*and Systems*, 2016, **44**, S. 1-4. ISSN 1532-5008. Verfügbar unter: doi:10.1080/15325008.2016.1147107

- [P8] HUBERT, M., J. FRANKE und J. HACKERT. Elektrobend rotationschneiden [online]. *Draht*, 21. März 2016, **67**(2/2016), S. 86-88. Verfügbar unter: [http://www.umformtechnik.net/elektrobend-rotationsschneiden\\_32227\\_de/](http://www.umformtechnik.net/elektrobend-rotationsschneiden_32227_de/)
- [P9] SCHNEIDER, M., M. HUBERT und J. FRANKE. Influence of cutting edge on core loss induced through various manufacturing parameters. In: *6th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2016, S. 186-192. ISBN 978-1-5090-2908-2
- [P10] ZIEGLER, M., M. SCHNEIDER, M. HUBERT und J. FRANKE. Potentials of the Rotary Cutting Process for Electrical Steel Strip. A Comparison to Industrial Standard Processes. In: *8th International Electric Drives Production Conference (EDPC)*. Piscataway, NJ: IEEE, 2018, S. 1-6. ISBN 978-1-7281-0148-4

**Verzeichnis promotionsbezogener, studentischer Arbeiten**

- [S1] HOLLMANN, F. Steigerung der Effizienz in der Herstellung mechatronischer Produkte durch den Einsatz der Rotationsschneidtechnologie. Bachelorarbeit im Studiengang Maschinenbau. Erlangen, 2. Mai 2017
- [S2] MÜLLER, T. Grundlagen und Vorüberlegungen für eine FEM-Simulation des Rotationsschneidens. Bachelorarbeit. Erlangen, 30. April 2015
- [S3] ROSENOW, H. Analyse der Geometrie, Kinematik und Leistungsparameter beim Rotationsschneiden von Elektroband. Bachelorarbeit. Erlangen, 4. Mai 2015
- [S4] SPANNRAFT, L. Explicit Finite Element (FE) Analysis for Rotational Cutting of Electrical Steel Strip. Bachelorarbeit. Erlangen, 31. März 2015
- [S5] WEIGELT, M. Explizite FE-Analyse zum Rotationsschneiden von Elektroband. Masterarbeit. Erlangen, 7. März 2016
- [S6] ZIEGLER, M., M. HUBERT und J. FRANKE. Beschreibung und Analyse wichtiger Parameter im Rotationsschneidprozess für mechatronische Produkte. Projektarbeit. Erlangen, 30. November 2016
- [S7] BORK, A. Entwicklung und Validierung von Niederhalter- und Auswerfersystemen auf Polyurethanbasis für das rotative Stempel - Matrize - Schneiden von Elektroband. Bachelorarbeit im Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen. Erlangen, 24. Juli 2017
- [S8] JANOWSKY, A. Prozessuntersuchung und -optimierung zum Rotativen Elastomerschneiden von Kupferfolie für Leiterbahnen. Bachelorarbeit. Erlangen, 1. März 2018
- [S9] LILGE, F. Entwicklung und Konstruktion einer Rotationsschneidanlage mit kulissengeführten Werkzeugwalzen und integrierter Mess- und Stelleinheit. Bachelorarbeit. Erlangen, 28. Oktober 2016

- [S10] MEISTER, M. Entwicklung von Maßnahmen zur Unterdrückung der Faltenbildung beim rotativen Druckschneiden von LED-Leistungsleiterbahnen. Bachelorarbeit im Studiengang Maschinenbau. Erlangen, 30. April 2017
- [S11] SCHOBER, M. Entwicklung und Validierung von funktionalen Kunststoffen für das Rotationschneiden von dünnen Metallbändern. Bachelorarbeit. Erlangen, 2. Mai 2016
- [S12] SPIEGLER, A. Entwicklung und Validierung eines Rotationschneidprozesses für dünne Metallbänder nach dem Prinzip des Keilschneidens. Bachelorarbeit. Erlangen, 29. April 2016
- [S13] ZIEGLER, M. Entwicklung und Ausarbeitung von Werkzeugkonzepten zum Rotationschneiden von Elektroblech. Bachelorarbeit. Erlangen, 31. Juli 2014
- [S14] DEUTSCH, Implementierung und Programmierung einer Steuerung für eine Rotationsschneidanlage. Projektarbeit im Studiengang Wirtschaftsingenieurwesen. Erlangen, 1. Juni 2017
- [S15] ELSNER, C. Entwicklung einer Prozessstruktur zum Rotationschneiden, sowie Erarbeitung von Freiheitsgraden zur Produktgestaltung von Hybrid-Statoren. Bachelorarbeit. Erlangen, 1. September 2014
- [S16] GELFERT, T. Entwicklung eines Werkzeugkonzeptes zum Rotationschneiden von Elektrobänd. Projektarbeit. Erlangen, 20. August 2013
- [S17] KOTZOTT, C. Entwicklung und Implementierung einer übergreifenden Anlagensteuerung für den Rotationschneidprozess. Bachelorarbeit. Erlangen, 30. September 2016
- [S18] KRAPPMANN, C. Patentrecherche und Konzeptentwicklung zum Rotationschneiden von Elektrobänd. Bachelorarbeit. Erlangen, 29. Januar 2016

- [S19] KUTTER, S. Aufbau und Durchführung eines Versuchs zum Rotationsschneiden von Ringkernproben. Projektarbeit. Erlangen, 30. November 2016
- [S20] LANG, C. Entwicklung eines Produktionskonzeptes zur Herstellung von Statoreinzelzahnsegmenten. Projektarbeit im Studiengang Maschinenbau. Erlangen, 24. Juli 2017
- [S21] LIU, Y. Entwicklung, Aufbau und Inbetriebnahme einer Anlagensteuerung für eine Rotationsschneidanlage für Statoreinzelzahnlamellen. Masterarbeit. Erlangen, 27. März 2018
- [S22] MEMIC, M. Entwicklung und Durchführung einer Prozessanalyse zum Rotationsschneiden von Statoreinzelzähnen für Hybridanwendungen. Masterarbeit. Erlangen, 23. März 2018
- [S23] SCHREMBS, T. Analyse der Portabilität des Hubschneidprozesses auf das Rotationsschneiden von Elektroband. Bachelorarbeit. Erlangen, 30. September 2016
- [S24] SCHWADERER, C. Entwicklung und Konstruktion einer Sortierstrecke für rotationsgeschnittene Elektrobleche. Bachelorarbeit. Erlangen, 13. April 2015
- [S25] SPARRER, J. Entwicklung und Ausarbeitung von Anlagenkonzepten zum Rotationsschneiden von Elektroblechen. Projektarbeit. Erlangen, 22. Mai 2014
- [S26] WICKE, M. Entwicklung und Konstruktion eines Systems zur definierten Elektrobandzu- und -abfuhr für eine Rotationsschneidanlage. Bachelorarbeit im Studiengang Maschinenbau. Erlangen, 30. April 2017
- [S27] ZIEGLER, M. Konzepterstellung für das Paketieren rotationsgestanzter Einzelzähne für Hybridmodule. Masterarbeit im Studiengang Maschinenbau. Erlangen, 30. September 2017
- [S28] BEEGER, P. Konzeption einer Prozesskette zur Herstellung von High-Power-LED-Modulen mit rotativ geschnittenen Leiterbahn-Strukturen. Bachelorarbeit. Erlangen, 2. Januar 2017

- [S29] EGERER, M. Entwicklung eines Rotationsschneidprozesses zum Schneiden von Leiterbahnen für High-Power-LED-Anwendungen. Bachelorarbeit im Studiengang Mechatronik. Erlangen, 1. Juni 2017
- [S30] MEISTER, M. Entwicklung eines Produkt- und Prozesskonzepts für Metallkernleiterplatten auf Basis rotativ geschnittener Leiterbahnstrukturen. Projektarbeit im Studiengang Maschinenbau. Erlangen, 2. November 2017
- [S31] ZIKELI, A. Entwicklung einer Design for Six Sigma Strategie am Beispiel von rotativ geschnittenen LED-Modulen. Masterarbeit. Erlangen, 28. Februar 2018



## Reihenübersicht

Koordination der Reihe (Stand 2022):  
Geschäftsstelle Maschinenbau, Dr.-Ing. Oliver Kreis, [www.mb.fau.de/diss/](http://www.mb.fau.de/diss/)

Im Rahmen der Reihe sind bisher die nachfolgenden Bände erschienen.

Band 1 – 52  
Fertigungstechnik – Erlangen  
ISSN 1431-6226  
Carl Hanser Verlag, München

Band 53 – 307  
Fertigungstechnik – Erlangen  
ISSN 1431-6226  
Meisenbach Verlag, Bamberg

ab Band 308  
FAU Studien aus dem Maschinenbau  
ISSN 2625-9974  
FAU University Press, Erlangen

Die Zugehörigkeit zu den jeweiligen Lehrstühlen ist wie folgt gekennzeichnet:

Lehrstühle:

<b>FAPS</b>	Lehrstuhl für Fertigungsautomatisierung und Produktionssystematik
<b>FMT</b>	Lehrstuhl für Fertigungsmesstechnik
<b>KTmfk</b>	Lehrstuhl für Konstruktionstechnik
<b>LFT</b>	Lehrstuhl für Fertigungstechnologie
<b>LGT</b>	Lehrstuhl für Gießereitechnik
<b>LPT</b>	Lehrstuhl für Photonische Technologien
<b>REP</b>	Lehrstuhl für Ressourcen- und Energieeffiziente Produktionsmaschinen

**Band 1: Andreas Hemberger**

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

**Band 2: Detlef Classe**

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

**Band 3: Friedrich-Wilhelm Nolting**

Projektierung von Montagesystemen  
FAPS, 201 Seiten, 107 Bilder, 1 Tab. 1989.  
ISBN 3-446-15541-4.

**Band 4: Karsten Schlüter**

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

**Band 5: Shir-Kuan Lin**

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

**Band 6: Rudolf Nuss**

Untersuchungen zur Bearbeitungsqualität im Fertigungssystem Laserstrahlschneiden  
LFT, 206 Seiten, 115 Bilder, 6 Tab. 1989.  
ISBN 3-446-15783-2.

**Band 7: Wolfgang Scholz**

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

**Band 8: Hans-Jürgen Wißmeier**

Beitrag zur Beurteilung des Bruchverhaltens von Hartmetall-Fließpreßmatrizen  
LFT, 179 Seiten, 99 Bilder, 9 Tab. 1989.  
ISBN 3-446-15921-5.

**Band 9: Rainer Eisele**

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

**Band 10: Rolf Pfeiffer**

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

**Band 11: Herbert Fischer**

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

**Band 12: Gerhard Kleineidam**

CAD/CAP: Rechnergestützte Montagefeinplanung  
FAPS, 203 Seiten, 107 Bilder. 1990.  
ISBN 3-446-16112-0.

**Band 13: Frank Vollertsen**

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

**Band 14: Stephan Biermann**

Untersuchungen zur Anlagen- und Prozeßdiagnostik für das Schneiden mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern  
LFT, VIII u. 170 Seiten, 93 Bilder, 4 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16269-0.

**Band 15: Uwe Geißler**

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

**Band 16: Frank Oswald Hake**

Entwicklung eines rechnergestützten Diagnosesystems für automatisierte Montagezellen  
FAPS, XIV u. 166 Seiten, 77 Bilder. 1991.  
ISBN 3-446-16428-6.

**Band 17: Herbert Reichel**

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

**Band 18: Josef Scheller**

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

**Band 19: Arnold vom Ende**

Untersuchungen zum Biegeumformung mit elastischer Matrize  
LFT, 166 Seiten, 55 Bilder, 13 Tab. 1991.  
ISBN 3-446-16493-6.

**Band 20: Joachim Schmid**

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

**Band 21: Egon Sommer**

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

**Band 22: Georg Geyer**

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

**Band 23: Rainer Flohr**

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

**Band 24: Alfons Rief**

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

**Band 25: Christoph Thim**

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

**Band 26: Roland Müller**

CO<sub>2</sub>-Laserstrahlschneiden von kurzglasverstärkten Verbundwerkstoffen  
LFT, 141 Seiten, 107 Bilder, 4 Tab. 1992.  
ISBN 3-446-17104-5.

**Band 27: Günther Schäfer**

Integrierte Informationsverarbeitung bei der Montageplanung  
FAPS, 195 Seiten, 76 Bilder. 1992.  
ISBN 3-446-17117-7.

**Band 28: Martin Hoffmann**

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

**Band 29: Peter Hoffmann**

Verfahrensfolge Laserstrahlschneiden und -schweißen: Prozeßführung und Systemtechnik in der 3D-Laserstrahlbearbeitung von Blechformteilen  
LFT, 186 Seiten, 92 Bilder, 10 Tab. 1992. ISBN 3-446-17153-3.

**Band 30: Olaf Schrödel**

Flexible Werkstattsteuerung mit objektorientierten Softwarestrukturen  
FAPS, 180 Seiten, 84 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17242-4.

**Band 31: Hubert Reinisch**

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

**Band 32: Brigitte Bärnreuther**

Ein Beitrag zur Bewertung des Kommunikationsverhaltens von Automatisierungsgeräten in flexiblen Produktionszellen  
FAPS, XI u. 179 Seiten, 71 Bilder. 1992. ISBN 3-446-17451-6.

**Band 33: Joachim Hutfless**

Laserstrahlregelung und Optikdiagnostik in der Strahlführung einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage  
LFT, 175 Seiten, 70 Bilder, 17 Tab. 1993. ISBN 3-446-17532-6.

**Band 34: Uwe Günzel**

Entwicklung und Einsatz eines Simulationsverfahrens für operative und strategische Probleme der Produktionsplanung und -steuerung  
FAPS, XIV u. 170 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 1993. ISBN 3-446-17604-7.

**Band 35: Bertram Ehmann**

Operatives Fertigungscontrolling durch Optimierung auftragsbezogener Bearbeitungsabläufe in der Elektronikfertigung  
FAPS, XV u. 167 Seiten, 114 Bilder. 1993. ISBN 3-446-17658-6.

**Band 36: Harald Kolléra**

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

**Band 37: Stephanie Abels**

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

**Band 38: Robert Schmidt-Heibel**

Laserstrahlbohren durchflußbestimmender Durchgangslöcher  
LFT, 145 Seiten, 63 Bilder, 11 Tab. 1993. ISBN 3-446-17778-7.

**Band 39: Norbert Lutz**

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

**Band 40: Konrad Grampp**

Rechnerunterstützung bei Test und Schulung an Steuerungssystemen von SMD-Bestücklinien  
FAPS, 178 Seiten, 88 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18173-3.

**Band 41: Martin Koch**

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

**Band 42: Armin Gropp**

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

**Band 43: Werner Heckel**

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

**Band 44: Armin Rothhaupt**

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

**Band 45: Bernd Zöllner**

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

**Band 46: Bodo Vormann**

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

**Band 47: Peter Schnepf**

Zielkostenorientierte Montageplanung  
FAPS, 144 Seiten, 75 Bilder. 1995. ISBN 3-446-18397-3.

**Band 48: Rainer Klotzbücher**

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

**Band 49: Wolfgang Greska**

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

**Band 50: Jörg Franke**

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

**Band 51: Franz-Josef Zeller**

Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter  
FAPS, 190 Seiten, 102 Bilder, 9 Tab. 1995. ISBN 3-446-18601-8.

**Band 52: Michael Solvie**

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

**Band 53: Robert Hopperdietzel**

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

**Band 54: Thomas Rebhahn**

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

**Band 55: Henning Hanebuth**

Laserstrahlhartlöten mit Zweistrahltechnik  
LFT, 157 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.  
1996. ISBN 3-87525-074-5.

**Band 56: Uwe Schönherr**

Steuerung und Sensordatenintegration für flexible Fertigungszellen mitkooperierenden Robotern  
FAPS, 188 Seiten, 116 Bilder, 3 Tab.  
1996. ISBN 3-87525-076-1.

**Band 57: Stefan Holzer**

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

**Band 58: Markus Schultz**

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

**Band 59: Thomas Krebs**

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

**Band 60: Jürgen Sturm**

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

**Band 61: Andreas Brand**

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

**Band 62: Michael Kauf**

Regelung der Laserstrahlleistung und der Fokusparameter einer CO<sub>2</sub>-Hochleistungslaseranlage  
LFT, 140 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-083-4.

**Band 63: Peter Steinwasser**

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

**Band 64: Georg Liedl**

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

**Band 65: Andreas Otto**

Transiente Prozesse beim Laserstrahlschweißen  
LFT, 132 Seiten, 62 Bilder, 1 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-089-3.

**Band 66: Wolfgang Blöchl**

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

**Band 67: Klaus-Uwe Wolf**

Verbesserte Prozeßführung und Prozeßplanung zur Leistungs- und Qualitätssteigerung beim Spulnwickeln  
FAPS, 186 Seiten, 125 Bilder. 1997.  
ISBN 3-87525-092-3.

**Band 68: Frank Backes**

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

**Band 69: Jürgen Kraus**

Laserstrahlumformen von Profilen  
LFT, 137 Seiten, 72 Bilder, 8 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-094-X.

**Band 70: Norbert Neubauer**

Adaptive Strahlführungen für CO<sub>2</sub>-Laseranlagen  
LFT, 120 Seiten, 50 Bilder, 3 Tab.  
1997. ISBN 3-87525-095-8.

**Band 71: Michael Steber**

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

**Band 72: Markus Pfestorf**

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

**Band 73: Volker Franke**

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

**Band 74: Herbert Scheller**

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

**Band 75: Arthur Meßner**

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

**Band 76: Mathias Glasmacher**

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

**Band 77: Michael Schwind**

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

**Band 78: Manfred Gerhard**

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

**Band 79: Elke Rauh**

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

**Band 80: Sorin Niederkorn**

Mefseinrichtung zur Untersuchung der Wirkflächenreibung bei umformtechnischen Prozessen  
LFT, 99 Seiten, 46 Bilder, 6 Tab.  
1998. ISBN 3-87525-105-9.

**Band 81: Stefan Schubert**

Regelung der Fokuslage beim Schweißen mit CO<sub>2</sub>-Hochleistungslasern unter Einsatz von adaptiven Optiken  
LFT, 140 Seiten, 64 Bilder, 3 Tab.  
1998. ISBN 3-87525-106-7.

**Band 82: Armando Walter Colombo**

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

**Band 83: Otto Meedt**

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

**Band 84: Knuth Götz**

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

**Band 85: Ralf Luchs**

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

**Band 86: Frank Pöhlau**

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

**Band 87: Roland T. A. Kals**

Fundamentals on the miniaturization of sheet metal working processes  
LFT, 128 Seiten, 58 Bilder, 11 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-115-6.

**Band 88: Gerhard Luhn**

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

**Band 89: Axel Sprenger**

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

**Band 90: Hans-Jörg Pucher**

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

**Band 91: Horst Arnet**

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

**Band 92: Doris Schubart**

Prozeßmodellierung und Technologieentwicklung beim Abtragen mit CO<sub>2</sub>-Laserstrahlung  
LFT, 133 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-122-9.

**Band 93: Adrianus L. P.**

**Coremans**  
Laserstrahlsintern von Metallpulver - Prozeßmodellierung, Systemtechnik, Eigenschaften laserstrahlgesinterter Metallkörper  
LFT, 184 Seiten, 108 Bilder, 12 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-124-5.

**Band 94: Hans-Martin Biehler**

Optimierungskonzepte für Qualitätsdatenverarbeitung und Informationsbereitstellung in der Elektronikfertigung  
FAPS, 194 Seiten, 105 Bilder. 1999. ISBN 3-87525-126-1.

**Band 95: Wolfgang Becker**

Oberflächenausbildung und tribologische Eigenschaften excimerlaserstrahlbearbeiteter Hochleistungskeramiken  
LFT, 175 Seiten, 71 Bilder, 3 Tab.  
1999. ISBN 3-87525-127-X.

**Band 96: Philipp Hein**

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

**Band 97: Gunter Beitinger**

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

**Band 98: Jürgen Knoblach**

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

**Band 99: Frank Breitenbach**

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

**Band 100: Bernd Falk**

Simulationsbasierte Lebensdauer vorhersage für Werkzeuge der Kaltmassivumformung  
LFT, 134 Seiten, 44 Bilder, 15 Tab.  
2000. ISBN 3-87525-136-9.

**Band 101: Wolfgang Schlögl**

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

**Band 102: Christian Hinsel**

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

**Band 103: Stefan Bobbert**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Band 128: Achim Hofmann**

Erweiterung der Formgebungsgrenzen beim Umformen von Aluminiumwerkstoffen durch den Einsatz prozessangepasster Platinen  
LFT, 113 Seiten, 58 Bilder, 4 Tab.  
2002. ISBN 3-87525-182-2.

**Band 129: Ingo Kriebitzsch**

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

**Band 130: Thomas Pohl**

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

**Band 131: Matthias Wenk**

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

**Band 132: Matthias Negenandack**

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

**Band 133: Oliver Kreis**

Integrierte Fertigung - Verfahrensintegration durch Innenhochdruck-Umformen, Trennen und Laserstrahlschweißen in einem Werkzeug sowie ihre tele- und multimediale Präsentation  
LFT, 167 Seiten, 90 Bilder, 43 Tab.  
2002. ISBN 3-87525-176-8.

**Band 134: Stefan Trautner**

Technische Umsetzung produktbezogener Instrumente der Umweltpolitik bei Elektro- und Elektronikgeräten  
FAPS, 179 Seiten, 92 Bilder, 11 Tab.  
2002. ISBN 3-87525-177-6.

**Band 135: Roland Meier**

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

**Band 136: Jürgen Wunderlich**

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

**Band 137: Stefan Novotny**

Innenhochdruck-Umformen von Blechen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen bei erhöhter Temperatur  
LFT, 132 Seiten, 82 Bilder, 6 Tab.  
2002. ISBN 3-87525-185-7.

**Band 138: Andreas Licha**

Flexible Montageautomatisierung zur Komplettmontage flächenhafter Produktstrukturen durch kooperierende Industrieroboter  
FAPS, 158 Seiten, 87 Bilder, 8 Tab.  
2003. ISBN 3-87525-189-X.

**Band 139: Michael Eisenbarth**

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

**Band 140: Frank Christoph**

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

**Band 141: Hinnerk Hagenah**

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

**Band 142: Ralf Eckstein**

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

**Band 143: Frank H. Meyer-Pittroff**

Excimerlaserstrahlbiegen dünner metallischer Folien mit homogener Lichtlinie  
LFT, 138 Seiten, 60 Bilder, 16 Tab.  
2003. ISBN 3-87525-196-2.

**Band 144: Andreas Kach**

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

**Band 145: Stefan Hierl**

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

**Band 146: Thomas Neudecker**

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

**Band 147: Ulrich Wenger**

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

**Band 148: Stefan Slama**

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

**Band 149: Thomas Wurm**

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

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

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

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

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

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

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

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

**Band 157: Markus Meiler**  
Großserientauglichkeit trocken-schmierstoffbeschichteter Aluminiumbleche im Presswerk Grundlegende Untersuchungen zur Tribologie, zum Umformverhalten und Bauteilversuche  
LFT, 104 Seiten, 57 Bilder, 21 Tab.  
2005. ISBN 3-87525-221-7.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Band 175: Peter Wölflick**

Innovative Substrate und Prozesse mit feinsten Strukturen für blei-freie Mechatronik-Anwendungen  
FAPS, 177 Seiten, 148 Bilder, 24 Tab. 2006.

ISBN 978-3-87525-246-0.

**Band 176: Attila Komlodi**

Detection and Prevention of Hot Cracks during Laser Welding of Aluminium Alloys Using Advanced Simulation Methods

LFT, 155 Seiten, 89 Bilder, 14 Tab. 2006. ISBN 978-3-87525-248-4.

**Band 177: Uwe Popp**

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

**Band 178: Veit Rückel**

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

**Band 179: Manfred Dirscherl**

Nicht-thermische Mikrojustier-technik mittels ultrakurzer Laserpulse

LFT, 154 Seiten, 69 Bilder, 10 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-251-4.

**Band 180: Yong Zhuo**

Entwurf eines rechnergestützten integrierten Systems für Konstruktion und Fertigungsplanung räumlicher spritzgegossener Schal-tungsträger (3D-MID)

FAPS, 181 Seiten, 95 Bilder, 5 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-253-8.

**Band 181: Stefan Lang**

Durchgängige Mitarbeiterinforma-tion zur Steigerung von Effizienz und Prozesssicherheit in der Pro-duktion

FAPS, 172 Seiten, 93 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-257-6.

**Band 182: Hans-Joachim Krauß**

Laserstrahlinduzierte Pyrolyse prä-keramischer Polymere

LFT, 171 Seiten, 100 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-258-3.

**Band 183: Stefan Junker**

Technologien und Systemlösungen für die flexibel automatisierte Be-stückung permanent erregter Läu-fer mit oberflächenmontierten Dauermagneten

FAPS, 173 Seiten, 75 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-259-0.

**Band 184: Rainer Kohlbauer**

Wissensbasierte Methoden für die simulationsgestützte Auslegung wirkmedienbasierter Blechum-formprozesse

LFT, 135 Seiten, 50 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-260-6.

**Band 185: Klaus Lamprecht**

Wirkmedienbasierte Umformung tiefgezogener Vorformen unter besonderer Berücksichtigung maßge-schneiderter Halbzeuge

LFT, 135 Seiten, 81 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-265-1.

**Band 186: Bernd Zolleiß**

Optimierte Prozesse und Systeme für die Bestückung mechatroni-scherBaugruppen

FAPS, 180 Seiten, 117 Bilder. 2007. ISBN 978-3-87525-266-8.

**Band 187: Michael Kerausch**

Simulationsgestützte Prozessausle-gung für das Umformen lokal wär-mebehandelter Aluminiumplatin-en

LFT, 146 Seiten, 76 Bilder, 7 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-267-5.

**Band 188: Matthias Weber**

Unterstützung der Wandlungsfä-higkeit von Produktionsanlagen durch innovative Softwaresysteme  
FAPS, 183 Seiten, 122 Bilder, 3 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-269-9.

**Band 189: Thomas Frick**

Untersuchung der prozessbestim-menden Strahl-Stoff-Wechselwir-kungen beim Laserstrahlschwei-ßen von Kunststoffen

LFT, 104 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-268-2.

**Band 190: Joachim Hecht**

Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirk-medienbasierte Doppelblech-Um-formung von Magnesiumlegierun-gen

LFT, 107 Seiten, 91 Bilder, 2 Tab. 2007. ISBN 978-3-87525-270-5.

**Band 191: Ralf Völkl**

Stochastische Simulation zur Werkzeuglebensdaueroptimierung und Präzisionsfertigung in der Kaltmassivumformung

LFT, 178 Seiten, 75 Bilder, 12 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-272-9.

**Band 192: Massimo Tolazzi**

Innenhochdruck-Umformen ver-stärkter Blech-Rahmenstrukturen  
LFT, 164 Seiten, 85 Bilder, 7 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-273-6.

**Band 193: Cornelia Hoff**

Untersuchung der Prozesseinfluss-größen beim Presshärten des höchstfesten Vergütungsstahls 22MnB5

LFT, 133 Seiten, 92 Bilder, 5 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-275-0.

**Band 194: Christian Alvarez**

Simulationsgestützte Methoden zur effizienten Gestaltung von Löt-prozessen in der Elektronikpro-duktion

FAPS, 149 Seiten, 86 Bilder, 8 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-277-4.

**Band 195: Andreas Kunze**

Automatisierte Montage von mak-romechatronischen Modulen zur flexiblen Integration in hybride Pkw-Bordnetzsysteme

FAPS, 160 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab. 2008.

ISBN 978-3-87525-278-1.

**Band 196: Wolfgang Hußnätter**

Grundlegende Untersuchungen zur experimentellen Ermittlung und zur Modellierung von Fließ-ortkurven bei erhöhten Tempera-turen

LFT, 152 Seiten, 73 Bilder, 21 Tab. 2008. ISBN 978-3-87525-279-8.

**Band 197: Thomas Bigl**

Entwicklung, angepasste Herstellungsverfahren und erweiterte Qualitätssicherung von einsatzgerechten elektronischen Baugruppen  
FAPS, 175 Seiten, 107 Bilder, 14 Tab.  
2008.  
ISBN 978-3-87525-280-4.

**Band 198: Stephan Roth**

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

**Band 199: Artur Giera**

Prozesstechnische Untersuchungen zum Rührreißschweißen metallischer Werkstoffe  
LFT, 179 Seiten, 104 Bilder, 36 Tab.  
2008. ISBN 978-3-87525-282-8.

**Band 200: Jürgen Lechler**

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

**Band 201: Andreas Blankl**

Untersuchungen zur Erhöhung der Prozessrobustheit bei der Innenhochdruck-Umformung von flächigen Halbzeugen mit vor- bzw. nachgeschalteten Laserstrahlfügeoperationen  
LFT, 120 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.  
2009. ISBN 978-3-87525-287-3.

**Band 202: Andreas Schaller**

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

**Band 203: Claudius Schimpf**

Optimierung von Zuverlässigkeitsuntersuchungen, Prüfabläufen und Nacharbeitsprozessen in der Elektronikproduktion  
FAPS, 162 Seiten, 90 Bilder, 14 Tab.  
2009.  
ISBN 978-3-87525-290-3.

**Band 204: Simon Dietrich**

Sensoriken zur Schwerpunktslagebestimmung der optischen Prozessmissionen beim Laserstrahlfließschweißen  
LFT, 138 Seiten, 70 Bilder, 5 Tab.  
2009. ISBN 978-3-87525-292-7.

**Band 205: Wolfgang Wolf**

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

**Band 206: Steffen Polster**

Laserdurchstrahlschweißen transparenter Polymerbauteile  
LFT, 160 Seiten, 92 Bilder, 13 Tab.  
2009. ISBN 978-3-87525-294-1.

**Band 207: Stephan Manuel Dörfler**

Rührreißschweißen von walzplattiertem Halbzeug und Aluminiumblech zur Herstellung flächiger Aluminiumschaum-Sandwich-Verbundstrukturen  
LFT, 190 Seiten, 98 Bilder, 5 Tab.  
2009. ISBN 978-3-87525-295-8.

**Band 208: Uwe Vogt**

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

**Band 209: Till Laumann**

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

**Band 210: Alexander Diehl**

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

**Band 211: Detlev Staud**

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

**Band 212: Jens Ackermann**

Prozesssicherung beim Laserdurchstrahlschweißen thermoplastischer Kunststoffe  
LPT, 129 Seiten, 74 Bilder, 13 Tab.  
2010. ISBN 978-3-87525-305-4.

**Band 213: Stephan Weidel**

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

**Band 214: Stefan Geißdörfer**

Entwicklung eines mesoskopischen Modells zur Abbildung von Größeneffekten in der Kaltmassivumformung mit Methoden der FE-Simulation  
LFT, 133 Seiten, 83 Bilder, 11 Tab.  
2010. ISBN 978-3-87525-308-5.

**Band 215: Christian Matzner**

Konzeption produktspezifischer Lösungen zur Robustheitssteigerung elektronischer Systeme gegen die Einwirkung von Betaung im Automobil  
FAPS, 165 Seiten, 93 Bilder, 14 Tab.  
2010. ISBN 978-3-87525-309-2.

**Band 216: Florian Schüßler**

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

**Band 217: Massimo Cojutti**

Strategien zur Erweiterung der Prozessgrenzen bei der Innenhochdruck-Umformung von Rohren und Blechpaaren  
LFT, 125 Seiten, 56 Bilder, 9 Tab.  
2010. ISBN 978-3-87525-312-2.

**Band 218: Raoul Plettke**

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

**Band 219: Andreas Dobroschke**  
Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte

FAPS, 184 Seiten, 109 Bilder, 18 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-317-7.

**Band 220: Azhar Zam**

Optical Tissue Differentiation for Sensor-Controlled Tissue-Specific Laser Surgery

LPT, 99 Seiten, 45 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-318-4.

**Band 221: Michael Rösch**

Potenziale und Strategien zur Optimierung des Schablonendruckprozesses in der Elektronikproduktion

FAPS, 192 Seiten, 127 Bilder, 19 Tab. 2011.

ISBN 978-3-87525-319-1.

**Band 222: Thomas Rechtenwald**

Quasi-isothermes Laserstrahl-sintern von Hochtemperatur-Thermoplasten - Eine Betrachtung werkstoff-prozessspezifischer Aspekte am Beispiel PEEK

LPT, 150 Seiten, 62 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-320-7.

**Band 223: Daniel Craiovan**

Prozesse und Systemlösungen für die SMT-Montage optischer Bauelemente auf Substrate mit integrierten Lichtwellenleitern

FAPS, 165 Seiten, 85 Bilder, 8 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-324-5.

**Band 224: Kay Wagner**

Beanspruchungsangepasste Kaltmassivumformwerkzeuge durch lokal optimierte Werkzeugoberflächen

LFT, 147 Seiten, 103 Bilder, 17 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-325-2.

**Band 225: Martin Brandhuber**

Verbesserung der Prognosegüte des Versagens von Punktschweißverbindungen bei höchstfesten Stahlgüten

LFT, 155 Seiten, 91 Bilder, 19 Tab. 2011. ISBN 978-3-87525-327-6.

**Band 226: Peter Sebastian Feuer**

Ein Ansatz zur Herstellung von pressgehärteten Karosseriekomponenten mit maßgeschneiderten mechanischen Eigenschaften:

Temperierte Umformwerkzeuge. Prozessfenster, Prozesssimulation und funktionale Untersuchung LFT, 195 Seiten, 97 Bilder, 60 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-328-3.

**Band 227: Murat Arbak**

Material Adapted Design of Cold Forging Tools Exemplified by Powder Metallurgical Tool Steels and Ceramics

LFT, 109 Seiten, 56 Bilder, 8 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-330-6.

**Band 228: Indra Pitz**

Beschleunigte Simulation des Laserstrahlumformens von Aluminiumblechen

LPT, 137 Seiten, 45 Bilder, 27 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-333-7.

**Band 229: Alexander Grimm**

Prozessanalyse und -überwachung des Laserstrahlhartlötens mittels optischer Sensorik

LPT, 125 Seiten, 61 Bilder, 5 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-334-4.

**Band 230: Markus Kaupper**

Biegen von höhenfesten Stahlblechwerkstoffen - Umformverhalten und Grenzen der Biegebarkeit

LFT, 160 Seiten, 57 Bilder, 10 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-339-9.

**Band 231: Thomas Kroiß**

Modellbasierte Prozessauslegung unter Berücksichtigung der Werkzeug- und Pressenauffederung

LFT, 169 Seiten, 50 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-341-2.

**Band 232: Christian Goth**

Analyse und Optimierung der Entwicklung und Zuverlässigkeit räumlicher Schaltungsträger (3D-MID)

FAPS, 176 Seiten, 102 Bilder, 22 Tab. 2012.

ISBN 978-3-87525-340-5.

**Band 233: Christian Ziegler**

Ganzheitliche Automatisierung mechatronischer Systeme in der Medizin am Beispiel Strahlentherapie

FAPS, 170 Seiten, 71 Bilder, 19 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-342-9.

**Band 234: Florian Albert**

Automatisiertes Laserstrahl-löten und -reparaturlöten elektronischer Baugruppen

LPT, 127 Seiten, 78 Bilder, 11 Tab. 2012. ISBN 978-3-87525-344-3.

**Band 235: Thomas Stöhr**

Analyse und Beschreibung des mechanischen Werkstoffverhaltens von presshärtbaren Bor-Manganstählen

LFT, 118 Seiten, 74 Bilder, 18 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-346-7.

**Band 236: Christian Kägeler**

Prozessdynamik beim Laserstrahl-schweißen verzinkter Stahlbleche im Überlappstoß

LPT, 145 Seiten, 80 Bilder, 3 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-347-4.

**Band 237: Andreas Sulzberger**

Seriennahe Auslegung der Prozesskette zur wärmeunterstützten Umformung von Aluminiumblechwerkstoffen

LFT, 153 Seiten, 87 Bilder, 17 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-349-8.

**Band 238: Simon Opel**

Herstellung prozessangepasster Halbzeuge mit variabler Blechdicke durch die Anwendung von Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, 165 Seiten, 108 Bilder, 27 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-350-4.

**Band 239: Rajesh Kanawade**

In-vivo Monitoring of Epithelium Vessel and Capillary Density for the Application of Detection of Clinical Shock and Early Signs of Cancer Development

LPT, 124 Seiten, 58 Bilder, 15 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-351-1.

**Band 240: Stephan Busse**

Entwicklung und Qualifizierung eines Schneidclinchverfahrens

LFT, 119 Seiten, 86 Bilder, 20 Tab. 2013. ISBN 978-3-87525-352-8.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Band 264: Matthias Domke**

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

**Band 265: Johannes Götz**

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

**Band 266: Hung Nguyen**

Qualifizierung des Potentials von Verfestigungseffekten zur Erweiterung des Umformvermögens aus-härtbarer Aluminiumlegierungen  
LFT, 137 Seiten, 57 Bilder, 16 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-387-0.

**Band 267: Andreas Kuppert**

Erweiterung und Verbesserung von Versuchs- und Auswertetechniken für die Bestimmung von Grenzformänderungskurven  
LFT, 138 Seiten, 82 Bilder, 2 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-388-7.

**Band 268: Kathleen Klaus**

Erstellung eines Werkstofforientierten Fertigungsprozessfensters zur Steigerung des Formgebungsvermögens von Aluminiumlegierungen unter Anwendung einer zwischengeschalteten Wärmebehandlung  
LFT, 154 Seiten, 70 Bilder, 8 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-391-7.

**Band 269: Thomas Svec**

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

**Band 270: Tobias Schrader**

Grundlegende Untersuchungen zur Verschleißcharakterisierung beschichteter Kaltmassivumformwerkzeuge  
LFT, 164 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-393-1.

**Band 271: Matthäus Brela**

Untersuchung von Magnetfeld-Messmethoden zur ganzheitlichen Wertschöpfungsoptimierung und Fehlerdetektion an magnetischen Aktoren  
FAPS, 170 Seiten, 97 Bilder, 4 Tab.  
2015. ISBN 978-3-87525-394-8.

**Band 272: Michael Wieland**

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

**Band 273: René Schramm**

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

**Band 274: Michael Lechner**

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

**Band 275: Kolja Andreas**

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

**Band 276: Marcus Baum**

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

**Band 277: Thomas Schneider**

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

**Band 278: Jochen Merhof**

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

**Band 279: Fabian Zöller**

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

**Band 280: Christian Hezler**

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

**Band 281: Jochen Bönig**

Integration des Systemverhaltens von Automobil-Hochvoltleitungen in die virtuelle Absicherung durch strukturmechanische Simulation  
FAPS, 177 Seiten, 107 Bilder, 17 Tab.  
2016.  
ISBN 978-3-87525-405-1.

**Band 282: Johannes Kohl**

Automatisierte Datenerfassung für diskret ereignisorientierte Simulationen in der energieflexiblen Fabrik  
FAPS, 160 Seiten, 80 Bilder, 27 Tab.  
2016.  
ISBN 978-3-87525-406-8.

**Band 283: Peter Bechtold**

Mikroschockwellenumformung mittels ultrakurzer Laserpulse  
LPT, 155 Seiten, 59 Bilder, 10 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-407-5.

**Band 284: Stefan Berger**

Laserstrahlschweißen thermoplastischer Kohlenstoffaserverbundwerkstoffe mit spezifischem Zusatzdraht  
LPT, 118 Seiten, 68 Bilder, 9 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-408-2.

**Band 285: Martin Borschlegl**  
Methods-Energy Measurement -  
Eine Methode zur Energieplanung  
für Fügeverfahren im Karosseriebau  
FAPS, 136 Seiten, 72 Bilder, 46 Tab.  
2016.  
ISBN 978-3-87525-409-9.

**Band 286: Tobias Rackow**  
Erweiterung des Unternehmenscontrollings um die Dimension Energie  
FAPS, 164 Seiten, 82 Bilder, 29 Tab.  
2016.  
ISBN 978-3-87525-410-5.

**Band 287: Johannes Koch**  
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung zyklisch-symmetrischer Bauteile mit Nebenformelementen durch Blechmassivumformung  
LFT, 125 Seiten, 49 Bilder, 17 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-411-2.

**Band 288: Hans Ulrich Vierzigmann**  
Beitrag zur Untersuchung der tribologischen Bedingungen in der Blechmassivumformung - Bereitstellung von tribologischen Modellversuchen und Realisierung von Tailored Surfaces  
LFT, 174 Seiten, 102 Bilder, 34 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-412-9.

**Band 289: Thomas Senner**  
Methodik zur virtuellen Absicherung der formgebenden Operation des Nasspressprozesses von Gelege-Mehrschichtverbunden  
LFT, 156 Seiten, 96 Bilder, 21 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-414-3.

**Band 290: Sven Kreitlein**  
Der grundoperationsspezifische Mindestenergiebedarf als Referenzwert zur Bewertung der Energieeffizienz in der Produktion  
FAPS, 185 Seiten, 64 Bilder, 30 Tab.  
2016.  
ISBN 978-3-87525-415-0.

**Band 291: Christian Roos**  
Remote-Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche in Kehlnahtgeometrie  
LPT, 123 Seiten, 52 Bilder, 0 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-416-7.

**Band 292: Alexander Kahrmanidis**  
Thermisch unterstützte Umformung von Aluminiumblechen  
LFT, 165 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-417-4.

**Band 293: Jan Tremel**  
Flexible Systems for Permanent Magnet Assembly and Magnetic Rotor Measurement / Flexible Systeme zur Montage von Permanentmagneten und zur Messung magnetischer Rotoren  
FAPS, 152 Seiten, 91 Bilder, 12 Tab.  
2016. ISBN 978-3-87525-419-8.

**Band 294: Ioannis Tsoupis**  
Schädigungs- und Versagensverhalten hochfester Leichtbauwerkstoffe unter Biegebeanspruchung  
LFT, 176 Seiten, 51 Bilder, 6 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-420-4.

**Band 295: Sven Hilderer**  
Grundlegende Untersuchungen zum Prozessverhalten von Silizium als Werkzeugwerkstoff für das Mikroscherschneiden metallischer Folien  
LFT, 177 Seiten, 74 Bilder, 17 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-422-8.

**Band 296: Sasia Mareike Hertweck**  
Zeitliche Pulsformung in der Lasermikromaterialbearbeitung - Grundlegende Untersuchungen und Anwendungen  
LPT, 146 Seiten, 67 Bilder, 5 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-423-5.

**Band 297: Paryanto**  
Mechatronic Simulation Approach for the Process Planning of Energy-Efficient Handling Systems  
FAPS, 162 Seiten, 86 Bilder, 13 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-424-2.

**Band 298: Peer Stenzel**  
Großserientaugliche Nadelwickeltechnik für verteilte Wicklungen im Anwendungsfall der E-Traktionsantriebe  
FAPS, 239 Seiten, 147 Bilder, 20 Tab.  
2017.  
ISBN 978-3-87525-425-9.

**Band 299: Mario Lušić**  
Ein Vorgehensmodell zur Erstellung montageführender Werkerinformationssysteme simultan zum Produktentstehungsprozess  
FAPS, 174 Seiten, 79 Bilder, 22 Tab.  
2017.  
ISBN 978-3-87525-426-6.

**Band 300: Arnd Buschhaus**  
Hochpräzise adaptive Steuerung und Regelung robotergeführter Prozesse  
FAPS, 202 Seiten, 96 Bilder, 4 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-427-3.

**Band 301: Tobias Laumer**  
Erzeugung von thermoplastischen Werkstoffverbunden mittels simultanem, intensitätsselektivem Laserstrahlschmelzen  
LPT, 140 Seiten, 82 Bilder, 0 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-428-0.

**Band 302: Nora Unger**  
Untersuchung einer thermisch unterstützten Fertigungskette zur Herstellung umgeformter Bauteile aus der härtesten Aluminiumlegierung EN AW-7020  
LFT, 142 Seiten, 53 Bilder, 8 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-429-7.

**Band 303: Tommaso Stellin**  
Design of Manufacturing Processes for the Cold Bulk Forming of Small Metal Components from Metal Strip  
LFT, 146 Seiten, 67 Bilder, 7 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-430-3.

**Band 304: Bassim Bachy**  
Experimental Investigation, Modeling, Simulation and Optimization of Molded Interconnect Devices (MID) Based on Laser Direct Structuring (LDS) / Experimentelle Untersuchung, Modellierung, Simulation und Optimierung von Molded Interconnect Devices (MID) basierend auf Laser Direktstrukturierung (LDS)  
FAPS, 168 Seiten, 120 Bilder, 26 Tab.  
2017.  
ISBN 978-3-87525-431-0.

**Band 305: Michael Spahr**  
Automatisierte Kontaktierungsverfahren für flachleiterbasierte Pkw-Bordnetzsysteme  
FAPS, 197 Seiten, 98 Bilder, 17 Tab.  
2017. ISBN 978-3-87525-432-7.

**Band 306: Sebastian Suttner**  
Charakterisierung und Modellierung des spannungszustandsabhängigen Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31B für die numerische Prozessauslegung LFT, 150 Seiten, 84 Bilder, 19 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-433-4.

**Band 307: Bhargav Potdar**  
A reliable methodology to deduce thermo-mechanical flow behaviour of hot stamping steels LFT, 203 Seiten, 98 Bilder, 27 Tab. 2017. ISBN 978-3-87525-436-5.

**Band 308: Maria Löffler**  
Steuerung von Blechmassivumformprozessen durch maßgeschneiderte tribologische Systeme LFT, viii u. 166 Seiten, 90 Bilder, 5 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-133-1.

**Band 309: Martin Müller**  
Untersuchung des kombinierten Trenn- und Umformprozesses beim Fügen artungleicher Werkstoffe mittels Schneidclinverfahren LFT, xi u. 149 Seiten, 89 Bilder, 6 Tab. 2018. ISBN: 978-3-96147-135-5.

**Band 310: Christopher Kästle**  
Qualifizierung der Kupfer-Drahtbondtechnologie für integrierte Leistungsmodule in harschen Umgebungsbedingungen FAPS, xii u. 167 Seiten, 70 Bilder, 18 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-145-4.

**Band 311: Daniel Vipavc**  
Eine Simulationsmethode für das 3-Rollen-Schubbiegen LFT, xiii u. 121 Seiten, 56 Bilder, 17 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-147-8.

**Band 312: Christina Ramer**  
Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung FAPS, xiv u. 188 Seiten, 57 Bilder, 9 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-153-9.

**Band 313: Miriam Rauer**  
Der Einfluss von Poren auf die Zuverlässigkeit der Lötverbindungen von Hochleistungs-Leuchtdioden FAPS, xii u. 209 Seiten, 108 Bilder, 21 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-157-7.

**Band 314: Felix Tenner**  
Kamerabasierte Untersuchungen der Schmelze und Gasströmungen beim Laserstrahlschweißen verzinkter Stahlbleche LPT, xxiii u. 184 Seiten, 94 Bilder, 7 Tab. 2018. ISBN 978-3-96147-160-7.

**Band 315: Aarief Syed-Khaja**  
Diffusion Soldering for High-temperature Packaging of Power Electronics FAPS, x u. 202 Seiten, 144 Bilder, 32 Tab. 2018. ISBN 978-3-87525-162-1.

**Band 316: Adam Schaub**  
Grundlagenwissenschaftliche Untersuchung der kombinierten Prozesskette aus Umformen und Additive Fertigung LFT, xi u. 192 Seiten, 72 Bilder, 27 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-166-9.

**Band 317: Daniel Gröbel**  
Herstellung von Nebenformelementen unterschiedlicher Geometrie an Blechen mittels Fließpressverfahren der Blechmassivumformung LFT, x u. 165 Seiten, 96 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-168-3.

**Band 318: Philipp Hildenbrand**  
Entwicklung einer Methodik zur Herstellung von Tailored Blanks mit definierten Halbzeugeigenschaften durch einen Taumelprozess LFT, ix u. 153 Seiten, 77 Bilder, 4 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-174-4.

**Band 319: Tobias Konrad**  
Simulative Auslegung der Spann- und Fixierkonzepte im Karosserierohbau: Bewertung der Baugruppenmaßhaltigkeit unter Berücksichtigung schwankender Einflussgrößen LFT, x u. 203 Seiten, 134 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-176-8.

**Band 320: David Meinel**  
Architektur applikationsspezifischer Multi-Physics-Simulationskonfiguratoren am Beispiel modularer Triebzüge FAPS, xii u. 166 Seiten, 82 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-184-3.

**Band 321: Andrea Zimmermann**  
Grundlegende Untersuchungen zum Einfluss fertigungsbedingter Eigenschaften auf die Ermüdungsfestigkeit kaltmassivumgeformter Bauteile LFT, ix u. 160 Seiten, 66 Bilder, 5 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-190-4.

**Band 322: Christoph Amann**  
Simulative Prognose der Geometrie nassgepresster Karosseriebauteile aus Gelege-Mehrschichtverbunden LFT, xvi u. 169 Seiten, 80 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-194-2.

**Band 323: Jennifer Tenner**  
Realisierung schmierstofffreier Tiefziehprozesse durch maßgeschneiderte Werkzeugoberflächen LFT, x u. 187 Seiten, 68 Bilder, 13 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-196-6.

**Band 324: Susan Zöller**  
Mapping Individual Subjective Values to Product Design KTMfK, xi u. 223 Seiten, 81 Bilder, 25 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-202-4.

**Band 325: Stefan Lutz**  
Erarbeitung einer Methodik zur semiempirischen Ermittlung der Umwandlungskinetik durchhärtender Wälzlagerstähle für die Wärmebehandlungssimulation LFT, xiv u. 189 Seiten, 75 Bilder, 32 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-209-3.

**Band 326: Tobias Gnibl**  
Modellbasierte Prozesskettenabildung rührreibgeschweißter Aluminiumhalbzeuge zur umformtechnischen Herstellung höchstfester Leichtbau-strukturteile LFT, xii u. 167 Seiten, 68 Bilder, 17 Tab. 2019. ISBN 978-3-96147-217-8.

**Band 327: Johannes Bürner**  
Technisch-wirtschaftliche Optionen zur Lastflexibilisierung durch intelligente elektrische Wärmespeicher  
FAPS, xiv u. 233 Seiten, 89 Bilder, 27 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-219-2.

**Band 328: Wolfgang Böhm**  
Verbesserung des Umformverhaltens von mehrlagigen Aluminiumblechwerkstoffen mit ultrafeinkörnigem Gefüge  
LFT, ix u. 160 Seiten, 88 Bilder, 14 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-227-7.

**Band 329: Stefan Landkammer**  
Grundsatzuntersuchungen, mathematische Modellierung und Ableitung einer Auslegungsmethodik für Gelenkantriebe nach dem Spinnenbeinprinzip  
LFT, xii u. 200 Seiten, 83 Bilder, 13 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-229-1.

**Band 330: Stephan Rapp**  
Pump-Probe-Ellipsometrie zur Messung transients optischer Materialeigenschaften bei der Ultrakurzpuls-Lasermaterialbearbeitung  
LPT, xi u. 143 Seiten, 49 Bilder, 2 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-235-2.

**Band 331: Michael Scholz**  
Intralogistics Execution System mit integrierten autonomen, servicebasierten Transportentitäten  
FAPS, xi u. 195 Seiten, 55 Bilder, 11 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-237-6.

**Band 332: Eva Bogner**  
Strategien der Produktindividualisierung in der produzierenden Industrie im Kontext der Digitalisierung  
FAPS, ix u. 201 Seiten, 55 Bilder, 28 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-246-8.

**Band 333: Daniel Benjamin Krüger**  
Ein Ansatz zur CAD-integrierten muskuloskelettalen Analyse der Mensch-Maschine-Interaktion  
KTmfk, x u. 217 Seiten, 102 Bilder, 7 Tab. 2019.  
ISBN 978-3-96147-250-5.

**Band 334: Thomas Kuhn**  
Qualität und Zuverlässigkeit laserdirektstrukturierter mechatronisch integrierter Baugruppen (LDS-MID)  
FAPS, ix u. 152 Seiten, 69 Bilder, 12 Tab. 2019.  
ISBN: 978-3-96147-252-9.

**Band 335: Hans Fleischmann**  
Modellbasierte Zustands- und Prozessüberwachung auf Basis sozio-cyber-physischer Systeme  
FAPS, xi u. 214 Seiten, 111 Bilder, 18 Tab. 2019.  
ISBN: 978-3-96147-256-7.

**Band 336: Markus Michalski**  
Grundlegende Untersuchungen zum Prozess- und Werkstoffverhalten bei schwingungsüberlagerter Umformung  
LFT, xii u. 197 Seiten, 93 Bilder, 11 Tab. 2019.  
ISBN: 978-3-96147-270-3.

**Band 337: Markus Brandmeier**  
Ganzheitliches ontologiebasiertes Wissensmanagement im Umfeld der industriellen Produktion  
FAPS, xi u. 255 Seiten, 77 Bilder, 33 Tab. 2020.  
ISBN: 978-3-96147-275-8.

**Band 338: Stephan Purr**  
Datenerfassung für die Anwendung lernender Algorithmen bei der Herstellung von Blechformteilen  
LFT, ix u. 165 Seiten, 48 Bilder, 4 Tab. 2020.  
ISBN: 978-3-96147-281-9.

**Band 339: Christoph Kiener**  
Kaltfließpressen von gerad- und schrägverzahnten Zahnrädern  
LFT, viii u. 151 Seiten, 81 Bilder, 3 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-287-1.

**Band 340: Simon Spreng**  
Numerische, analytische und empirische Modellierung des Heißerimpprozesses  
FAPS, xix u. 204 Seiten, 91 Bilder, 27 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-293-2.

**Band 341: Patrik Schwingenschlögl**  
Erarbeitung eines Prozessverständnisses zur Verbesserung der tribologischen Bedingungen beim Presshärten  
LFT, x u. 177 Seiten, 81 Bilder, 8 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-297-0.

**Band 342: Emanuela Affronti**  
Evaluation of failure behaviour of sheet metals  
LFT, ix u. 136 Seiten, 57 Bilder, 20 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-303-8.

**Band 343: Julia Degner**  
Grundlegende Untersuchungen zur Herstellung hochfester Aluminiumblechbauteile in einem kombinierten Umform- und Abschreckprozess  
LFT, x u. 172 Seiten, 61 Bilder, 9 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-307-6.

**Band 344: Maximilian Wagner**  
Automatische Bahnplanung für die Aufteilung von Prozessbewegungen in synchrone Werkstück- und Werkzeugbewegungen mittels Multi-Roboter-Systemen  
FAPS, xxi u. 181 Seiten, 111 Bilder, 15 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-309-0.

**Band 345: Stefan Härter**  
Qualifizierung des Montageprozesses hochminiaturisierter elektronischer Bauelemente  
FAPS, ix u. 194 Seiten, 97 Bilder, 28 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-314-4.

**Band 346: Toni Donhauser**  
Ressourcenorientierte Auftragsregelung in einer hybriden Produktion mittels betriebsbegleitender Simulation  
FAPS, xix u. 242 Seiten, 97 Bilder, 17 Tab. 2020.  
ISBN 978-3-96147-316-8.

**Band 347: Philipp Amend**

Laserbasiertes Schmelzkleben von Thermoplasten mit Metallen LPT, xv u. 154 Seiten, 67 Bilder. 2020. ISBN 978-3-96147-326-7.

**Band 348: Matthias Ehlert**

Simulationsunterstützte funktionale Grenzlagenabsicherung KTmfk, xvi u. 300 Seiten, 101 Bilder, 73 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-328-1.

**Band 349: Thomas Sander**

Ein Beitrag zur Charakterisierung und Auslegung des Verbundes von Kunststoffsubstraten mit harten Dünnschichten KTmfk, xiv u. 178 Seiten, 88 Bilder, 21 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-330-4.

**Band 350: Florian Pilz**

Fließpressen von Verzahnungselementen an Blechen LFT, x u. 170 Seiten, 103 Bilder, 4 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-332-8.

**Band 351: Sebastian Josef Katona**

Evaluation und Aufbereitung von Produktsimulationen mittels abweichungsbehafteter Geometrie-Modelle KTmfk, ix u. 147 Seiten, 73 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-336-6.

**Band 352: Jürgen Herrmann**

Kumulatives Walzplattieren. Bewertung der Umformeigenschaften mehrlagiger Blechwerkstoffe der ausscheidungshärtbaren Legierung AA6014 LFT, x u. 157 Seiten, 64 Bilder, 5 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-344-1.

**Band 353: Christof Küstner**

Assistenzsystem zur Unterstützung der datengetriebenen Produktentwicklung KTmfk, xii u. 219 Seiten, 63 Bilder, 14 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-348-9.

**Band 354: Tobias Gläsel**

Prozessketten zum Laserstrahl-schweißen von flachleiterbasierten Formspulenumwicklungen für automobilen Traktionsantriebe FAPS, xiv u. 206 Seiten, 89 Bilder, 11 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-356-4.

**Band 355: Andreas Meinel**

Experimentelle Untersuchung der Auswirkungen von Axialschwingungen auf Reibung und Verschleiß in Zylinderrollenlagern KTmfk, xii u. 162 Seiten, 56 Bilder, 7 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-358-8.

**Band 356: Hannah Riedle**

Haptische, generische Modelle weicher anatomischer Strukturen für die chirurgische Simulation FAPS, xxx u. 179 Seiten, 82 Bilder, 35 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-367-0.

**Band 357: Maximilian Landgraf**

Leistungselektronik für den Einsatz dielektrischer Elastomere in aktorischen, sensorischen und integrierten sensomotorischen Systemen FAPS, xxiii u. 166 Seiten, 71 Bilder, 10 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-380-9.

**Band 358: Alireza Esfandiyari**

Multi-Objective Process Optimization for Overpressure Reflow Soldering in Electronics Production FAPS, xviii u. 175 Seiten, 57 Bilder, 23 Tab. 2020. ISBN 978-3-96147-382-3.

**Band 359: Christian Sand**

Prozessübergreifende Analyse komplexer Montageprozessketten mittels Data Mining FAPS, XV u. 168 Seiten, 61 Bilder, 12 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-398-4.

**Band 360: Ralf Merkl**

Closed-Loop Control of a Storage-Supported Hybrid Compensation System for Improving the Power Quality in Medium Voltage Networks FAPS, xxvii u. 200 Seiten, 102 Bilder, 2 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-402-8.

**Band 361: Thomas Reitberger**

Additive Fertigung polymerer optischer Wellenleiter im Aerosol-Jet-Verfahren FAPS, xix u. 141 Seiten, 65 Bilder, 11 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-400-4.

**Band 362: Marius Christian Fechter**

Modellierung von Vorentwürfen in der virtuellen Realität mit natürlicher Fingerinteraktion KTmfk, x u. 188 Seiten, 67 Bilder, 19 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-404-2.

**Band 363: Franziska Neubauer**

Oberflächenmodifizierung und Entwicklung einer Auswertemethodik zur Verschleißcharakterisierung im Presshärteprozess LFT, ix u. 177 Seiten, 42 Bilder, 6 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-406-6.

**Band 364: Eike Wolfram Schäfer**

Web- und wissensbasierter Engineering-Konfigurator für roboterzentrierte Automatisierungslösungen FAPS, xxiv u. 195 Seiten, 108 Bilder, 25 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-410-3.

**Band 365: Daniel Gross**

Untersuchungen zur kohlenstoffdioxidbasierten kryogenen Minimalmengenschmierung REP, xii u. 184 Seiten, 56 Bilder, 18 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-412-7.

**Band 366: Daniel Junker**

Qualifizierung laser-additiv gefertigter Komponenten für den Einsatz im Werkzeugbau der Massivumformung LFT, vii u. 142 Seiten, 62 Bilder, 5 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-416-5.

**Band 367: Tallal Javied**

Totally Integrated Ecology Management for Resource Efficient and Eco-Friendly Production FAPS, xv u. 160 Seiten, 60 Bilder, 13 Tab. 2021. ISBN 978-3-96147-418-9.

**Band 368: David Marco Hochrein**

Wälzlager im Beschleunigungsfeld – Eine Analysestrategie zur Bestimmung des Reibungs-, Axial-schub- und Temperaturverhaltens von Nadelkränzen –  
KTmfk, xiii u. 279 Seiten, 108 Bilder, 39 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-420-2.

**Band 369: Daniel Gräf**

Funktionalisierung technischer Oberflächen mittels prozessüberwachter aerosolbasierter Drucktechnologie  
FAPS, xxii u. 175 Seiten, 97 Bilder, 6 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-433-2.

**Band 370: Andreas Gröschl**

Hochfrequent fokusbandsmodulierte Konfokalsensoren für die Nanokoordinatenmesstechnik  
FMT, x u. 144 Seiten, 98 Bilder, 6 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-435-6.

**Band 371: Johann Tüchsen**

Konzeption, Entwicklung und Einführung des Assistenzsystems D-DAS für die Produktentwicklung elektrischer Motoren  
KTmfk, xii u. 178 Seiten, 92 Bilder, 12 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-437-0.

**Band 372: Max Marian**

Numerische Auslegung von Oberflächenmikrotexturen für geschmierte tribologische Kontakte  
KTmfk, xviii u. 276 Seiten, 85 Bilder, 45 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-439-4.

**Band 373: Johannes Strauß**

Die akustooptische Strahlformung in der Lasermaterialbearbeitung  
LPT, xvi u. 113 Seiten, 48 Bilder. 2021. ISBN 978-3-96147-441-7.

**Band 374: Martin Hohmann**

Machine learning and hyper spectral imaging: Multi Spectral Endoscopy in the Gastro Intestinal Tract towards Hyper Spectral Endoscopy  
LPT, x u. 137 Seiten, 62 Bilder, 29 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-445-5.

**Band 375: Timo Kordaß**

Lasergestütztes Verfahren zur selektiven Metallisierung von epoxidharzbasierten Duromeren zur Steigerung der Integrationsdichte für dreidimensionale mechatronische Package-Baugruppen  
FAPS, xviii u. 198 Seiten, 92 Bilder, 24 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-443-1.

**Band 376: Philipp Kestel**

Assistenzsystem für den wissensbasierten Aufbau konstruktionsbegleitender Finite-Elemente-Analysen  
KTmfk, xviii u. 209 Seiten, 57 Bilder, 17 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-457-8.

**Band 377: Martin Lerchen**

Messverfahren für die pulverbettbasierte additive Fertigung zur Sicherstellung der Konformität mit geometrischen Produktspezifikationen  
FMT, x u. 150 Seiten, 60 Bilder, 9 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-463-9.

**Band 378: Michael Schneider**

Inline-Prüfung der Permeabilität in weichmagnetischen Komponenten  
FAPS, xxii u. 189 Seiten, 79 Bilder, 14 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-465-3.

**Band 379: Tobias Sprügel**

Sphärische Detektorflächen als Unterstützung der Produktentwicklung zur Datenanalyse im Rahmen des Digital Engineering  
KTmfk, xiii u. 213 Seiten, 84 Bilder, 33 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-475-2.

**Band 380: Tom Häfner**

Multipulseffekte beim Mikro-Materialabtrag von Stahllegierungen mit Pikosekunden-Laserpulsen  
LPT, xxviii u. 159 Seiten, 57 Bilder, 13 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-479-0.

**Band 381: Björn Heling**

Einsatz und Validierung virtueller Absicherungsmethoden für abweichungs-behaftete Mechanismen im Kontext des Robust Design  
KTmfk, xi u. 169 Seiten, 63 Bilder, 27 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-487-5.

**Band 382: Tobias Kolb**

Laserstrahl-Schmelzen von Metallen mit einer Serienanlage – Prozesscharakterisierung und Erweiterung eines Überwachungssystems  
LPT, xv u. 170 Seiten, 128 Bilder, 16 Tab. 2021.  
ISBN 978-3-96147-491-2.

**Band 383: Mario Meinhardt**

Widerstandselementschweißen mit gestauchten Hilfsfügeelementen - Umformtechnische Wirkzusammenhänge zur Beeinflussung der Verbindungsfestigkeit  
LFT, xii u. 189 Seiten, 87 Bilder, 4 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-473-8.

**Band 384: Felix Bauer**

Ein Beitrag zur digitalen Auslegung von Fügeprozessen im Karosseriebau mit Fokus auf das Remote-Laserstrahlschweißen unter Einsatz flexibler Spanntechnik  
LFT, xi u. 185 Seiten, 74 Bilder, 12 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-498-1.

**Band 385: Jochen Zeitler**

Konzeption eines rechnergestützten Konstruktionssystems für optomechatronische Baugruppen  
FAPS, xix u. 172 Seiten, 88 Bilder, 11 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-499-8.

**Band 386: Vincent Mann**

Einfluss von Strahloszillation auf das Laserstrahlschweißen hochfester Stähle  
LPT, xiii u. 172 Seiten, 103 Bilder, 18 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-503-2.

**Band 387: Chen Chen**

Skin-equivalent opto-/elastofluidic in-vitro microphysiological vascular models for translational studies of optical biopsies

LPT, xx u. 126 Seiten, 60 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-505-6.

**Band 388: Stefan Stein**

Laser drop on demand joining as bonding method for electronics assembly and packaging with high thermal requirements

LPT, x u. 112 Seiten, 54 Bilder, 10 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-507-0

**Band 389: Nikolaus Urban**

Untersuchung des Laserstrahlschmelzens von Neodym-Eisen-Bor zur additiven Herstellung von Permanentmagneten

FAPS, x u. 174 Seiten, 88 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN: 978-3-96147-501-8.

**Band 390: Yiting Wu**

Großflächige Topographiemessungen mit einem Weißlichtinterferenzmikroskop und einem metrologischen Rasterkraftmikroskop FMT, xii u. 142 Seiten, 68 Bilder, 11 Tab. 2022.

ISBN: 978-3-96147-513-1.

**Band 391: Thomas Papke**

Untersuchungen zur Umformbarkeit hybrider Bauteile aus Blechgrundkörper und additiv gefertigter Struktur

LFT, xii u. 194 Seiten, 71 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-515-5.

**Band 392: Bastian Zimmermann**

Einfluss des Vormaterials auf die mehrstufige Kaltumformung vom Draht

LFT, xi u. 182 Seiten, 36 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-519-3.

**Band 393: Harald Völkl**

Ein simulationsbasierter Ansatz zur Auslegung additiv gefertigter FLM-Faserverbundstrukturen

KTmfk, xx u. 204 Seiten, 95 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-523-0.

**Band 394: Robert Schulte**

Auslegung und Anwendung prozessangepasster Halbzeuge für Verfahren der Blechmassivumformung

LFT, x u. 163 Seiten, 93 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-525-4.

**Band 395: Philipp Frey**

Umformtechnische Strukturierung metallischer Einleger im Folgeverbund für mediendichte Kunststoff-Metall-Hybridbauteile

LFT, ix u. 180 Seiten, 83 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-534-6.

**Band 396: Thomas Johann Luft**

Komplexitätsmanagement in der Produktentwicklung - Holistische Modellierung, Analyse, Visualisierung und Bewertung komplexer Systeme

KTmfk, xiii u. 510 Seiten, 166 Bilder, 16 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-540-7.

**Band 397: Li Wang**

Evaluierung der Einsetzbarkeit des lasergestützten Verfahrens zur selektiven Metallisierung für die Verbesserung passiver Intermodulation in Hochfrequenzanwendungen

FAPS, xxii u. 151 Seiten, 72 Bilder, 22 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-542-1.

**Band 398: Sebastian Reitelshöfer**

Der Aerosol-Jet-Druck Dielektrischer Elastomere als additives Fertigungsverfahren für elastische mechatronische Komponenten

FAPS, xxv u. 206 Seiten, 87 Bilder, 13 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-547-6.

**Band 399: Alexander Meyer**

Selektive Magnetmontage zur Verringerung des Rastmomentes permanenterregter Synchronmotoren

FAPS, xv u. 164 Seiten, 90 Bilder, 18 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-555-1.

**Band 400: Rong Zhao**

Design verschleißreduzierender amorpher Kohlenstoffschichtsysteme für trockene tribologische Gleitkontakte

KTmfk, x u. 148 Seiten, 69 Bilder, 14 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-557-5.

**Band 401: Christian P. J. Schwarzer**

Kupfersintern als Fügetechnologie für Leistungselektronik

FAPS, xxvii u. 234 Seiten, 125 Bilder, 24 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-566-7.

**Band 402: Alexander Horn**

Grundlegende Untersuchungen zur Gradierung der mechanischen Eigenschaften pressgehärteter Bauteile durch eine örtlich begrenzte Aufkohlung

LFT, xii u. 204 Seiten, 58 Bilder, 6 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-568-1.

**Band 403: Artur Klos**

Werkstoff- und umformtechnische Bewertung von hochfesten Aluminiumblechwerkstoffen für den Karosseriebau

LFT, x u. 192 Seiten, 73 Bilder, 12 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-572-8.

**Band 404: Harald Schmid**

Ganzheitliche Erarbeitung eines Prozessverständnisses von Tiefziehprozessen mit Ziehstücken auf Basis mechanischer und tribologischer Analysen

LFT, xiii u. 211 Seiten, 78 Bilder, 5 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-577-3.

**Band 405: Johannes Henneberg**

Blechmassivumformung von Funktionsbauteilen aus Bandmaterial

LFT, viii u. 176 Seiten, 101 Bilder, 2 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-579-7.

**Band 406: Anton Schmailzl**

Festigkeits- und zeitoptimierte Prozessführung beim quasi-simultanen Laser-Durchstrahlschweißen

LPT, xiii u. 157 Seiten, 84 Bilder, 7 Tab. 2022.

ISBN 978-3-96147-583-4.

**Band 407: Alexander Wolf**

Modellierung und Vorhersage  
menschlichen Interaktionsverhaltens zur Analyse der Mensch-  
Produkt Interaktion  
KTmfk, x u. 207 Seiten, 69 Bilder,  
10 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-585-8.

**Band 408: Tim Weikert**

Modifikationen amorpher Kohlen-  
stoffschichten zur Anpassung der  
Reibungsbedingungen und zur  
Erhöhung des Verschleißschutzes  
KTmfk, xvii u. 258 Seiten, 91 Bilder,  
9 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-589-6.

**Band 409: Stefan Götz**

Frühzeitiges konstruktionsbeglei-  
tendes Toleranzmanagement  
KTmfk, ix u. 276 Seiten, 127 Bilder,  
13 Tab. 2022.  
ISBN 978-3-96147-593-3.

**Band 410: Markus Hubert**

Einsatzpotenziale der  
Rotationsschneidtechnologie in  
der Verarbeitung von metallischen  
Funktionsfolien für  
mechatronische Produkte  
FAPS, xviii u. 139 Seiten, 86 Bilder,  
7 Tab. 2022  
ISBN 978-3-96147-603-9.

## Abstract

Rotary cutting is not very widespread and has established itself primarily in the packaging and hygiene industries as a process for processing numerous soft and non-metallic materials. In metal processing, the process has become established in combination with profiling processes for simple profile applications. As a continuous process, rotary cutting is thus convincing with its potential in the mass processing of thin materials, including hypothetically metallic functional foils used in mechatronic applications. Representatives of this category are electrical steel for magnetic cores, copper foils for circuit carriers or stamped grids and brazing foils for preforms.

In this thesis, the application potential of rotary cutting technology for processing the above-mentioned metallic functional films is analyzed in more detail and possible solutions are identified. For precisely this purpose, the technological process characteristics for rotational cutting are recorded. Subsequently, rotary knife cutting, rotary die cutting and rotary elastomer cutting are investigated and categorized as suitable process alternatives in order to offer a selection assistance for the specific application case.

Finally, two exemplary applications provide an outlook on the technical and process-related potentials in industrial processing. The first examines the rotary processing of electrical steel into magnetic cores and the second describes the rotary processing of circuit carriers for LED lighting.

Rotationsschneiden ist eine eher gering verbreite Technologie und hat sich vornehmlich in der Verpackungs- und Hygieneindustrie als Verfahren für die Verarbeitung zahlreicher weicher und nichtmetallischer Materialien etabliert. Anwendung in der Metallverarbeitung hat das Verfahren in Kombination mit Profilierprozessen erlangt und sich auch in dieser Branche für einfache Profilanwendungen durchgesetzt. Damit überzeugt das Rotationsschneiden als kontinuierliches Verfahren mit seinen Potenzialen in der Massenverarbeitung von dünnen Materialien, so auch hypothetisch von metallischen Funktionsfolien, die in mechatronischen Anwendungen zum Einsatz kommen. Wichtige Vertreter dieser Kategorie sind Elektroband für weichmagnetische Kerne, Kupferfolien für Schaltungsträger, legierte Kupferbänder für Stanzgitter und Lotband für Lotstanz- und Formteile.

Im Rahmen dieser Dissertation werden die Einsatzpotenziale der Rotationsschneidtechnologie für die Verarbeitung dieser metallischen Funktionsfolien tiefgehend analysiert und Lösungswege aufgezeigt. Zunächst werden die technologischen Prozessmerkmale zum Aufbau der Prozessstruktur, zur Kinematik des Prozesses sowie zur Statik und Dynamik beim Rotationsschneiden erfasst und auf die Gegebenheiten beim Rotationsschneiden von dünnen Metallfolien hin ausgerichtet.

Anschließend werden das rotative Messerschneiden, das rotative Stempel-Matrize-Schneiden und das rotative Elastomer-Schneiden als geeignete Verfahrensalternativen für die Verarbeitung von dünnen Metallfolien für mechatronische Anwendungen identifiziert, auf die hohen Anforderungen mechatronischer Anwendungen hin angepasst und eingehend auf ihre Eignung für die Verarbeitung von ausgesuchten Vertretern für Funktionsfolien untersucht. Abschließend werden die drei rotativen Schneidverfahren bezüglich verschiedener Kriterien kategorisiert, um eine Auswahlhilfe für den spezifischen Anwendungsfall anzubieten.

Zuletzt geben zwei exemplarische Anwendungen einen Ausblick auf die gewaltigen technischen und prozessualen Potenziale in der industriellen Verarbeitung von metallischen Funktionsfolien für mechatronische Produkte. Die erste betrachtete Anwendung ist die effiziente rotative Verarbeitung von Elektroband zu magnetischen Kernen. Die zweite Anwendung befasst sich mit der rotativen Verarbeitung von Schaltungsträgern für LED-Leuchtmittel.

