

Forschungsberichte aus dem  
wbk Institut für Produktionstechnik  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer  
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza  
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Christoph Kühlewein

**Untersuchung und Optimierung des  
Wälzsälverfahrens mit Hilfe von  
3D-FEM-Simulation**

3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation

Band 174



# **Untersuchung und Optimierung des Wälzschälverfahrens mit Hilfe von 3D-FEM-Simulation**

3D-FEM Kinematik- und Spanbildungssimulation

Zur Erlangung des akademischen Grades

**Doktor der Ingenieurwissenschaften**

der Fakultät für Maschinenbau

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte

**Dissertation**

von

Christoph Kühlewein

aus Karlsruhe

Tag der mündlichen Prüfung: 11.03.2013

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Bernhard Karpuschewski



## **Vorwort des Herausgebers**

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund soll im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) der Universität Karlsruhe (TH) berichtet werden. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von Fertigungsverfahren und zugehörigen Werkzeugmaschinen- und Handhabungstechnologien als auch mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung des gesamten Produktionssystems. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza



## Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

An dieser Stelle möchte ich mich besonders bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze für das mir entgegengebrachte Vertrauen bedanken. Die vielen fachlichen Diskussionen und Gespräche haben meine berufliche und persönliche Entwicklung stark geprägt. Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Bernhard Karpuschewski danke ich für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des Korreferates. Auch gilt mein Dank dem Prüfungsvorsitzenden Herrn Prof. Dr.-Ing. Sven Matthiesen. Ich danke auch Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer für seine Unterstützung und Förderung während meiner Laufbahn am Institut sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Felten für die zahlreichen fachlichen Diskussionen zur Verzahntechnik.

Nicht zuletzt gebührt mein Dank allen Mitarbeitern des Instituts für die langjährige Unterstützung hier insbesondere den Herren Thomas Hildenbrand, Klaus Simon und Ralf Dorsner für ihre Hilfe bei vielen schwierigen Aufgaben rund um die Prototypenmaschine, dem SC EDV, insbesondere Frau Margit Scheidt für den außerordentlich guten Support und meiner Gruppe F(W)T für die jederzeit motivierende und angenehme Arbeitsatmosphäre. Einen wesentlichen Beitrag haben die Korrekturleser Carsten Schmidt und Rüdiger Pabst geleistet. Für die tatkräftige Unterstützung bei allen Simulationsthemen danke ich besonders Frederik Zanger. Vielen Dank außerdem allen Studenten, mit denen ich zusammenarbeiten durfte, besonders Johannes Seebach für sein großes Engagement und die langjährige sehr angenehme Zusammenarbeit.

In allerhöchstem Maße dankbar bin ich meiner ganzen Familie für die Unterstützung und den Rückhalt während meines gesamten Werdeganges.

Karlsruhe, im März 2013

Christoph Kühlewein





## **Abstract**

Skiving arises recently as a powerful alternative to the established gear cutting processes and furthermore provides a great potential in terms of flexibility and process integration. Considering the fact that the skiving process was invented and patented more than 100 years ago it developed in a short time to a highly regarded and demanded technology. However, the studies according to the current state of art also showed deficits in particular in the understanding of the process. For a sustainable establishment on the market and for the control of the process instabilities the entire understanding of the process is required.

In this thesis, the skiving process is fundamentally scientifically analyzed using finite element methods regarding the kinematic conditions and the mechanisms of the formation of the process-specific multi-flank chips. For this purpose, 3D FEM simulation models of the kinematics and the chip formation with the software ABAQUS/Explicit were developed. Thereby detailed insights in the process were gained, which are not achievable or only under great efforts with conventional methods.

The modeling and analysis of the pure trajectory of the cutting edge during the meshing of tool and workpiece and thereby the extension of systematic knowledge about the effects and interactions of the cutting parameters on, for example, the tool tooth loads provide an essential assistance for the understanding, control and design of the process. The findings on the actual load conditions on the cutting edge with high temporal and local resolution are a valuable support in the selection or development of suitable combinations of cutting material and coating. As a basis for the development of the simulation models and to validate the results extensive experimental work has been conducted for skiving in soft machining. In addition to the information obtained thereby to the behavior of the process, such as forces-, workpiece- and chip-temperature-behavior under the variation of the process parameters axial feed, cutting strategy and cutting velocity in particular by a initially conducted systematical fundamental investigation of the specific kinematics and chip formation mechanisms a broad knowledge base was generated for a basic understanding of the process.



## Über dieses Buch

Das Wälzschälverfahren stellt eine leistungsfähige Alternative zu den etablierten Verzahnverfahren dar und bietet zusätzlich noch großes Potential in Bezug auf Flexibilität sowie Verfahrensintegration. In Anbetracht der Tatsache, dass das Wälzschälverfahren bereits vor über 100 Jahren erdacht und patentiert wurde, entwickelte es sich jüngst innerhalb kurzer Zeit zu einem vielbeachteten und stark nachgefragten Verfahren. Die Untersuchungen nach aktuellem Stand der Technik zeigten aber auch Defizite insbesondere beim Prozessverständnis sowie hinsichtlich Prozessinstabilitäten auf. Zur nachhaltigen Etablierung am Markt und zur Beherrschung der verfahrensspezifischen Instabilitäten ist das vollständige Prozessverständnis gefordert.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Wälzschälen hinsichtlich der kinematischen Verhältnisse und der Mechanismen der Bildung des Dreiflankenspanns grundlegend wissenschaftlich mit Hilfe von FE Methoden untersucht. Hierzu wurden 3D-FEM Simulationsmodelle der Kinematik und der Spanbildung mit der Software ABAQUS/Explicit entwickelt. Damit werden Einblicke in den Prozess ermöglicht, die mit herkömmlichen Methoden nicht oder nur stark eingeschränkt möglich sind. Die Modellierung und Analyse der reinen Schneidenbewegungsbahn beim Eingriff in das Werkstückmaterial und dabei die systematische Erweiterung der Erkenntnisse über die Einflüsse und Wechselwirkung der Prozessparameter, beispielsweise auf die Werkzeugzahnbelastung, dienen als wichtige Unterstützung zum Verständnis und Beherrschung des Prozesses sowie bei der Werkzeug- und Prozessauslegung. Die Erkenntnisse zu den tatsächlichen Belastungszuständen an der Schneide mit hoher zeitlicher und lokaler Auflösung stellen eine wertvolle Unterstützung bei der Auswahl oder Entwicklung geeigneter Schneidstoff-Beschichtungskombinationen dar. Als Basis für den Aufbau der Simulationsmodelle und zur Validierung wurden umfangreiche experimentelle Arbeiten in der Weichbearbeitung durchgeführt. Durch die gewonnenen Erkenntnissen zu den kinematischen Verhältnissen und der Bildung des Dreiflankenspannes bei Variation der Prozessparameter wurde eine breite Wissensbasis zum grundlegenden Prozessverständnis generiert.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>I</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung und Motivation</b>	<b>1</b>
1.1 Antriebstechnik (und Verzahntechnik)	1
1.2 Verfahrensabgrenzung	1
1.3 Motivation der Arbeit	5
1.4 Aufbau der Arbeit	6
1.5 Begriffsdefinition	7
<b>2 Stand der Forschung und Technik</b>	<b>8</b>
2.1 Wälzschälverfahren	8
2.1.1 Stand der Erkenntnisse	9
2.1.2 Verfahrenseigenschaften	24
2.2 Spanbildung mit geometrisch bestimmter Schneide	41
2.2.1 Theorie der Spanbildung	41
2.2.2 Mehrflankenspäne	44
2.3 Ansätze zur simulationsgestützten Untersuchung von Zerspanprozessen	44
2.3.1 Modellierung von Zerspanprozessen mit FEM	46
2.4 Fazit	48
<b>3 Zielsetzung der Arbeit und Vorgehensweise</b>	<b>52</b>
3.1 Zielsetzung	52
3.2 Vorgehensweise	53
<b>4 Versuchseinrichtungen und -durchführung</b>	<b>55</b>
4.1 Versuchsmaschine	55

---

4.2	Versuchswerkzeuge	57
4.3	Versuchswerkstücke	61
4.4	Prozess	62
4.5	Charakterisierung der Prozessergebnisse	63
4.5.1	Kraftmessungen	63
4.5.2	Temperaturmessungen	64
4.5.3	Spancharakterisierungen	70
4.6	Simulationsumfeld	71
4.7	Bestimmung und Modellierung des Materialverhaltens	75
4.7.1	Modellierung des Materialverhaltens	75
4.7.2	Versuche zur Bestimmung der Materialparameter	79
<b>5</b>	<b>Experimentelle Prozessanalyse</b>	<b>84</b>
5.1	Zerspankräfte	84
5.1.1	Charakteristischer Verlauf	86
5.1.2	Variation der Prozessparameter	89
5.2	Temperatur im Werkstück	95
5.2.1	Charakteristischer Verlauf	96
5.2.2	Variation der Prozessparameter	99
5.3	Temperatur der Späne	101
5.3.1	Charakteristischer Verlauf	103
5.3.2	Variation der Prozessparameter	107
5.4	Charakterisierung der Späne	109
5.4.1	Spangestalt	110
5.4.2	Spanklemmer	112
5.4.3	Aufbauschneiden	115
5.4.4	Bestimmung der Spanraumzahl beim Wälzschälen	116
5.4.5	Qualitative Merkmale	118

---

5.4.6	Spangewicht	123
5.4.7	Abmaße der Späne	125
5.4.8	Variation der Prozessparameter	127
5.5	Diskussion und Fazit	127
<b>6</b>	<b>Simulationsgestützte Prozessanalyse</b>	<b>130</b>
6.1	Materialmodell	130
6.2	Modellierungsansätze Wälzschälprozess	131
6.2.1	Abbildung der Geometrie und des Erzeugungstriebes	132
6.2.2	Abbildung der Kinematik/des Erzeugungstriebes (Schneidenbewegung)	139
6.3	Massenskalierung	147
6.3.1	Kraftverlauf	149
6.3.2	Temperaturverlauf	151
6.3.3	Spanform	152
6.3.4	Fazit	153
6.4	Übertragbarkeit der Simulationsmodelle	154
6.5	Anwendung der Simulationsmodelle zur Analyse des Wälzschälprozesses	155
6.5.1	Kinematiksimulation	156
6.5.2	Spanbildungssimulation	166
6.6	Diskussion und Fazit	187
<b>7</b>	<b>Vergleichende Bewertung von Experiment und Simulation</b>	<b>192</b>
7.1	Schneidenbewegung und Spanbildung	192
7.2	Spanform	193
7.3	Bewegungsverhalten der abgelösten Späne	196
7.4	Temperatur im Werkstück	199
7.5	Temperatur der Späne	202
7.6	Zerspankräfte	206

7.7	Diskussion und Fazit	210
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>213</b>
8.1	Zusammenfassung	213
8.2	Ausblick	217
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>I</b>
	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XVII</b>
	<b>Anhang</b>	<b>XXII</b>



## Abkürzungen

Formelzeichen	Größe	Einheit
$\alpha$	Freiwinkel	°
$\alpha_n$	Normaleingriffswinkel	
$\beta_{0,2}$	Schrägungswinkel Werkzeug/Werkstück	°
$\gamma$	Spanwinkel	°
$\varepsilon$	Verformungsgrad	
$\dot{\varepsilon}_p$	plastischen Dehnrates	
$\vartheta$	Querkontraktionszahl	
$\Sigma$	Achskreuzwinkel	°
$\tau$	Treppenwinkel	°
1-/3ZW	Einzahn-/Dreizahn-Analogiewerkzeug	
A	Spanungsquerschnitt	mm <sup>2</sup>
$a_0$	Achsabstand Erzeugungsgetriebe	mm
AF	Auslaufende Flanke	
b	Breite	mm
d	Teilkreisdurchmesser	mm
$d_0$	Grundkreisdurchmesser	mm
$d_a$	Kopfkreisdurchmesser	mm
$d_f$	Fußkreisdurchmesser	mm

e	Spanflächenversatz	mm
E	Elastizitätsmodul	MPa
EDM	Electrical Discharge Maschining	
EF	Einlaufende Flanke	
f	Frequenz	1/s
F	Kraft	[N]
$F_c$	Gesamtschnittkraft	N
$F_{xy}$	Schnittkraftkomponente in radialer Richtung	N
$F_z$	Schnittkraftkomponente in Richtung der z-Achse	N
FEM	Finite Elemente Methode	
FPM	Finite Pointset Methode	
FFT	Fast Fourier Transformation	
h	Höhe	mm
HM	Hartmetall	
(PM-)HSS	(pulvermetallurgisch hergestellter) Schnellarbeitsstahl	
i	Übersetzungsverhältnis	
$k_b$	Boltzmannkonstante	
$k_c$	spezifische Schnittkraft	N/mm <sup>2</sup>
KSS	Kühlschmierstoff	

$l_e$	Einlaufweg	mm
$l_{\ddot{u}}$	Überlaufweg	mm
LWL	Lichtwellenleiter	
$m_n$	Normalmodul	mm
$n_{0,2}$	Drehzahl Werkzeug/Werkstück	1/min
r	Radius	mm
$R_p$	Streckgrenze	MPa
$R_m$	Zugfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>
RZ	Spanraumzahl	
$s_{ax}$	Axialvorschub	mm/WSU
$s_D$	Differentialvorschub	1/WSU
$s_{rad}$	Radialvorschub	mm/min
SKP	Schneidkantenpunkt	
T	Schnittstrategie	%
U	Spannung	V
$v_c$	Schnittgeschwindigkeit	m/min
$v_{u,0}$	Umfangsgeschwindigkeit Werkzeug	m/min
$v_{u,2}$	Umfangsgeschwindigkeit Werkstück	m/min
VWZ	Vollwerkzeug	
WS	Werkstück	

---

WSU	Werkstückumdrehung	1/min
WZ	Werkzeug	
WZU	Werkzeugumdrehung	1/min
x	Profilverschiebungsfaktor	
$z_{0,2}$	Zähnezahl Werkzeug/Werkstück	

# 1 Einleitung und Motivation

## 1.1 Antriebstechnik (und Verzahntechnik)

„Die Antriebstechnik hält die Welt in Bewegung.“ Dieser oft gebrauchte Werbeslogan begründet sich in vielerlei Hinsicht. Im wörtlichen Sinne stellt die Mobilität von Menschen und Gütern ein zentrales Element aller wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Aktivitäten dar. So finden sich Produkte der Antriebstechnik in unzähligen Bereichen des täglichen Lebens und sind im privaten wie beruflichen Alltag nicht mehr wegzudenken. Zum anderen im übertragenen Sinne, die Antriebstechnik ist als der größte und umsatzstärkste Fachzweig eine wichtige Säule des deutschen Maschinenbaus. Nach dramatischen Umsatzeinbrüchen in 2009, ausgelöst durch die weltweite Finanzkrise, erholt sich die Antriebstechnik überdurchschnittlich gut, mit einem in 2010 unerwartet stark um 81% gestiegenen Auftragseingang [VDM-10]. Die Entwicklung im Jahr 2011 übersteigt die Erwartungen noch einmal deutlich.

Die deutsche Antriebstechnik hält zusammen mit der Fluidtechnik im internationalen Wettbewerb einen Marktanteil von ca. 30% und ist als Nr. 1 hervorragend positioniert. Die Antriebstechnik als Branche hält somit weiterhin eine absolute Schlüsselstellung für die industrielle Produktion inne und ist ein wichtiger Indikator für die wirtschaftliche Dynamik der gesamten Industrie [VDM-10]. So titelte bereits das Handelsblatt: *„Der deutsche Maschinenbau ist das Zahnrad der Welt“* [SCH-07].

## 1.2 Verfahrensabgrenzung

Vor diesem Hintergrund sehen sich auch die am Markt etablierten Fertigungstechnologien besonderen Anforderungen gegenüber. So werden immer höhere Produktivität sowie maximale Flexibilität der Verzahnverfahren erforderlich, um die besondere Stellung der Branche weiterhin sicherstellen zu können. Für die Herstellung von Verzahnungen stehen am Markt verschiedene Verfahren

zur Verfügung. In der Weichbearbeitung sind dies insbesondere die Verfahren Wälzfräsen, Wälzstoßen und Räumen. Diese Verfahren sind technologisch bereits seit Jahren hoch entwickelt und vom Markt nicht mehr wegzudenken.

Jedes dieser Verfahren fügt sich mit seinen jeweiligen Vor- und Nachteilen, seinen unterschiedlichen Werkzeugmaschinen und Werkzeugtechnologien in die Fertigung von Verzahnungen ein, hat somit sein günstiges aber begrenztes Anwendungsfeld gefunden [FEL-08]. Das Wälzfräsen als produktivstes Verfahren ist auf die Bearbeitung von Außenverzahnungen beschränkt und ist hier wegen erforderlicher Auslaufwege des Werkzeugs bei der Bearbeitung gegen eine Wellenschulter oder einen Bund eingeschränkt. Das Wälzstoßen ist aufgrund seiner Kinematik mit einer erforderlichen Rückhubbewegung deutlich weniger produktiv. Die hohen Werkzeugkosten beim Räumen machen eine hohe Stückzahl für die Anwendung des Verfahrens erforderlich [BEC-06, SCH-09].

Die fehlende Flexibilität bedeutet eine Einschränkung für den Anwender, für einzelne unterschiedliche Verzahnungsaufgaben sind gegebenenfalls jeweils geeignete Maschinen und Werkzeuge im Betrieb vorzuhalten. Insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen bedeutet dies einen erheblichen Investitionsaufwand. Auch immer kürzere Produktlebenszyklen, steigende Produktvielfalt und damit reduzierte Losgrößen machen eine Flexibilisierung der Fertigung insgesamt notwendig.

Des Weiteren führt der sehr hohe Entwicklungsstand der etablierten Verfahren dazu, dass weitere Fortschritte, beispielsweise im Bereich der Produktivitätserhöhung, nur mit besonderen Anstrengungen möglich sind, bzw. bereits physikalische Grenzen erreicht sind und eine weitere Optimierung der Verfahren unmöglich wird.

Der Forderung nach einem flexiblen und gleichzeitig hochproduktiven Verfahren können die etablierten Verfahren aufgrund der oben aufgeführten Umstände nur schwer nachkommen und so sind es innovative und hochproduktive Alternativen, die die etablierten Verfahren sinnvoll ergänzen oder teilweise

substituieren werden. In den letzten Jahren wurde insbesondere mit den Fortschritten beim Wälzschälverfahren gezeigt, dass diese Alternativen existieren und über enormes Potential verfügen, hochproduktive und gleichzeitig hochflexible Verzahnungsherstellung sicherzustellen [HÜH-02, BEC-06, SCH-09, FLE-06].

Das Bauteilspektrum des Wälzschälverfahrens umfasst prinzipiell sämtliche rotationssymmetrischen periodischen Strukturen. Das Verfahren ist demnach sowohl für Innen- als auch für Außenverzahnungen geeignet. Es erfordert deutlich geringere Aus- und Überlaufwege als das Wälzfräsverfahren. Das Wälzschälverfahren findet Einsatz sowohl bei wälzfräsbaren und räumbaren Verzahnungen als auch in Teilbereichen des Bauteilspektrums des Wälzstoßens. In der Prozesskette der Zahnradfertigung gibt es das Wälzschälen sowohl im Bereich der Weichbearbeitung, als auch in der sich der Wärmebehandlung anschließenden Hartfeinbearbeitung [HÜH-02, BEC-06, FEL-08].

In einem Hauptzeitvergleich stellt [HÜH-02] anhand der maximal erreichbaren Anzahl der Schnitte pro Zeiteinheit heraus, dass das Wälzschälverfahren theoretisch eine Verkürzung der Hauptzeit um den Faktor 5 gegenüber dem damaligen Serienstand beim Wälzfräsen ermöglicht. Umfangreiche praktische Untersuchungen von [FLE-05] zeigen, dass nach aktuellem Stand der Technik bei einem außenverzahnten Referenzbauteil eine Reduzierung der Fertigungshauptzeit um ca. 25 % bereits erreicht werden kann. Neuere Ansätze zur weiteren Steigerung der Produktivität beim Wälzfräsen [KAR-12] sind hierbei noch nicht vollständig berücksichtigt. Ein sehr viel höheres Potential ist im Vergleich zum Wälzstoßen zu sehen, beispielsweise bei der Bearbeitung von Innenverzahnungen.

Das Wälzschälverfahren steht somit in der Weichbearbeitung von Verzahnungen insbesondere in Konkurrenz zu den etablierten Verfahren Wälzfräsen, Wälzstoßen und Räumen. Eine übersichtliche Aufstellung der jeweiligen Vor- und Nachteile zeigt Abbildung 1.1. Wie bereits oben ausgeführt, vereint das Wälzschälverfahren hohe Produktivität mit hoher Flexibilität. Die einfache Ge-

stalt und Herstellung der Schälräder ist mit dem Wälzstoßen vergleichbar - die Werkzeuge sind preiswert und handlich, beispielsweise im Vergleich zu Räumwerkzeugen. Die Werkzeuge können im Vergleich zu Wälzfräsen deutlich einfacher aufbereitet werden. Ebenso ist die für das Wälzschälen erforderliche Maschinenteknik als einfach anzusehen, so kann das Verfahren wie in verschiedenen Beispielen bereits erfolgt, in eine Wälzfräsmaschine, ein konventionelles Bearbeitungszentrum oder eine Drehmaschine implementiert werden. Dadurch wird häufig eine Prozesskettenverkürzung bei gleichzeitiger Variantenflexibilität ermöglicht, der Platzbedarf an Maschinen und Anlagen sowie kosten- und fehlerintensive Umrüst- und Umspannoperationen können vielfach entfallen.



**Abbildung 1.1: Verfahrensvergleich Wälzschälen mit etablierten Verfahren der Weichbearbeitung**



Als weitere Aufzählungspunkte werden in Abbildung 1.1 die Nachteile des Verfahrens aufgeführt. So ist bisher nur wenig Prozesswissen vorhanden, viele grundsätzliche Verfahrenseigenschaften und -besonderheiten sind noch nicht vollständig untersucht und verstanden. Die Werkzeug- und Prozessauslegung insbesondere für neue Bauteile muss daher noch iterativ erfolgen. Bei der Vorstellung des Standes der Forschung und Technik in Kapitel 2.1 wird dies noch weiter präzisiert. Als weiterer Nachteil wäre aufzuführen, dass der maximale Werkstückaußendurchmesser je nach Größe der Maschinenaufnahme begrenzt ist. Mit steigender Vielfalt an am Markt erhältlichen Wälzschälmaschinen wird der bearbeitbare Bauteildurchmesser weniger begrenzt bleiben.

### **1.3 Motivation der Arbeit**

Das Wälzschälverfahren wurde bereits vor über 100 Jahren erfunden und patentiert [PIT-10], eine nachhaltige Durchsetzung am Markt konnte aufgrund der hohen Anforderungen an die Technik und wegen der anspruchsvollen Prozesskinematik bislang nicht erreicht werden. Im Vergleich zu den etablierten Verfahren bietet das Wälzschälverfahren ein enormes Potential, so dass weitere Anstrengungen unternommen wurden, das Verfahren nach aktuellem Stand der Technik fortzuentwickeln. Verbesserungen im Bereich der Schneidstoffe und Beschichtungen, die Weiterentwicklung der Maschinen- und Steuerungstechnik sowie Möglichkeiten der rechnerunterstützten Werkzeug- und Prozessauslegung haben das Verfahren in den letzten Jahren wieder aufleben lassen [FLE-05, FLE-06]. Neueste Untersuchungen haben das Potenzial und die Vorteile des Verfahrens aufgezeigt, so dass auch seitens der Industrie wieder aktiv an der Umsetzung des Wälzschälverfahrens gearbeitet wird und heute bereits mehrere Serienmaschinen verfügbar bzw. angekündigt sind [SCH-09b, PRO-09, BAU-11].

Die stetig wachsende Verbreitung erhöht zunehmend auch die Nachfrage nach der universellen Anwendbarkeit des Verfahrens. Eine Werkzeug- und Prozessauslegung für neue Bauteile muss heute vielfach noch iterativ erfolgen,

da die Kenntnisse zu den grundlegenden Verfahreigenschaften noch nicht ausreichend vorhanden sind und die vorliegenden experimentelle Ergebnisse nur eingeschränkt auf neue Bauteile übertragen werden können.

Weiterhin kommt es im Bearbeitungsprozess, abhängig von der Werkstückgeometrie, der Werkzeug- und Prozessauslegung und den Prozessparametern, zu Störungen der Prozesssicherheit. Dies zeigt sich insbesondere dadurch, dass statistisch verteilt Späne nicht vollständig abgeschält werden oder Späne nicht aus dem Bereich der Prozesszone abgeführt werden können. Dies hat beschädigte Bauteiloberflächen und erhöhten Werkzeugverschleiß zur Folge. Eine prozessichere Bearbeitung kann dann möglicherweise nicht mehr gewährleistet werden [FLE-05, BEC-06, SCH-09].

Die aufgrund der komplexen Verfahrenskinetik spezifischen Spanbildungsmechanismen wurden bisher noch nicht ausreichend wissenschaftlich untersucht, so fehlen wichtige Erkenntnisse zum Verständnis des Prozesses. Eine Akzeptanz des „neuen“ Verfahrens Wälzschälens am Markt kann nur dann gelingen, wenn diese grundsätzlichen Verfahreigenschaften umfassend untersucht und verstanden sind und damit die Prozesssicherheit gewährleistet werden kann.

## **1.4 Aufbau der Arbeit**

Aufbauend auf den zum Verständnis des Prozesses und des Vorgehens bei der Prozessmodellierung im Verlauf der Arbeit wichtigen grundlegenden Verfahreigenschaften des Wälzschälens, wird in Kapitel 2 der Stand der Erkenntnisse in Forschung und Industrie systematisch aufgezeigt. Hierzu wird chronologisch auf die wichtigsten Entwicklungsstufen und -tätigkeiten rund um das Verfahren eingegangen. Schließlich wird daraus in Kapitel 3 die Motivation für diese Arbeit abgeleitet, indem die Entwicklung und die weiteren Möglichkeiten des Wälzschälverfahrens aufgezeigt werden. Weiterhin wird die Vorgehensweise zur Erreichung der Zielsetzung in Kapitel 3 vorgestellt. In Kapitel 4 folgt die Beschreibung der Methoden und Hilfsmittel, die im Rahmen

der Forschungsarbeiten zur Verfügung standen und zur Durchführung der Experimente sowie der Simulationsrechnungen eingesetzt wurden. In Kapitel 5 werden die experimentellen Untersuchungen zum Wälzschälen vorgestellt, die dem grundlegenden Prozessverständnis und insbesondere als Basis für die Simulationsmodelle dienen. Das Kapitel 6 behandelt den Aufbau der Simulationsmodelle und die Untersuchungen des Verfahrens mittels FEM unter Verwendung des Simulationstools ABAQUS. Die Kapitel zu den experimentellen und simulativen Arbeiten behandeln jeweils die durchgeführten Variationsrechnungen mit zugehöriger Auswertung. Das Kapitel 7 beinhaltet die Validierung der Simulationsmodelle durch den Abgleich mit dem Realprozess. Es folgt eine zusammenfassende Diskussion der gewonnenen Erkenntnisse mit einem Ausblick auf die vielfältigen Möglichkeiten der Anwendung der Simulation zur Untersuchung des Wälzschälverfahrens.

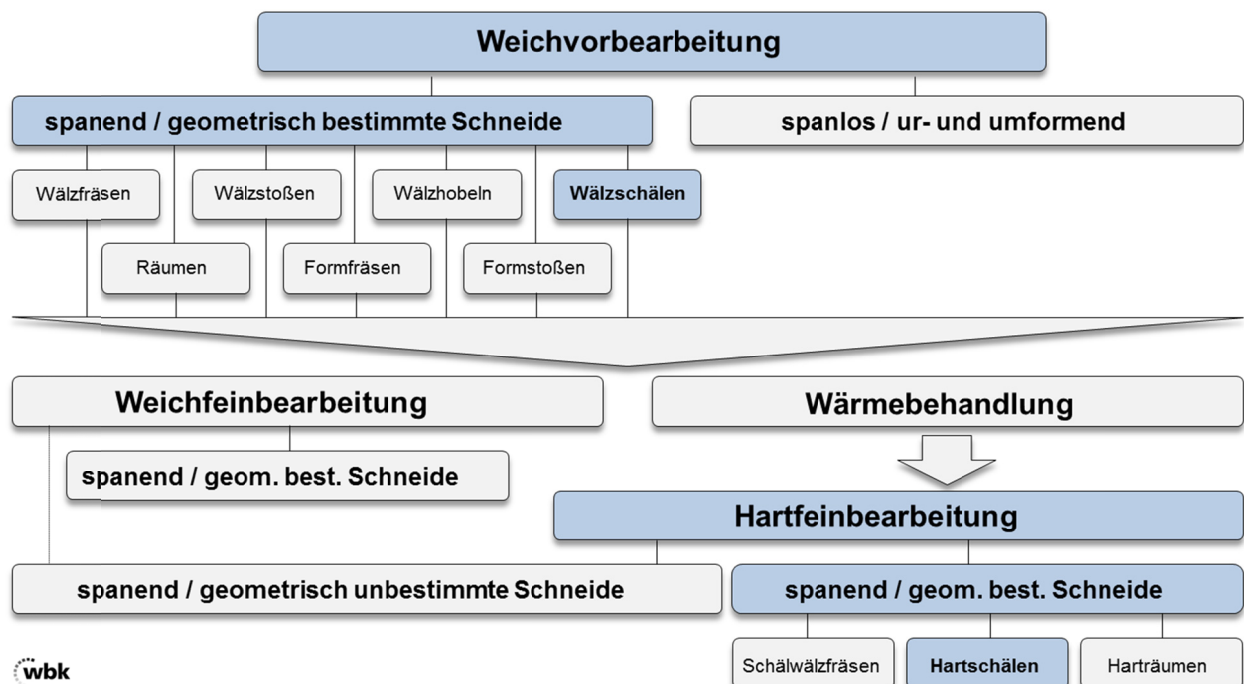
## 1.5 Begriffsdefinition

Verfahren, die auf dem Prinzip der Wälzschältechnologie basieren, werden teilweise mit verschiedenen, nicht eindeutig definierten Namen bezeichnet. Dadurch kann es häufig zu Verwechslungen mit anderen Verfahren kommen, z.B. dem Hartschälwälzfräsen, Drehverfahren oder verschiedene Verfahren zur Gewindeherstellung. Der Begriffszusatz Schälen wird häufig verwendet bei Verfahren, die einen negativen Spanwinkel aufweisen. In den folgenden Ausführungen wird für die Weichbearbeitung der Begriff „Wälzschälen“, für die Hartbearbeitung der Begriff „Hartschälen“ verwendet. Die Begriffe „Außenschälen“ bzw. „Innenschälen“ bezeichnen dabei verkürzt das Verfahren für die Bearbeitung von Außenverzahnungen bzw. Innenverzahnungen. Dabei werden prinzipiell auch sämtliche andere Verfahren mit eingeschlossen, die der Kinematik und den Grundprinzipien des Wälzschälverfahrens folgen. Als englische Bezeichnung des Verfahrens haben sich die Begriffe „skiving“ und „hard-skiving“ etabliert.

## 2 Stand der Forschung und Technik

### 2.1 Wälzschälverfahren

Wälzschälen ist ein kontinuierliches spanabhebendes Verfahren zur Herstellung von Zahnrädern und rotationssymmetrischen Bauteilen mit periodischen Strukturen. Unter der Gruppe der Verfahren zur Herstellung von Zahnrädern lässt sich das Wälzschälen der Gruppe der spanenden Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide zuordnen (Abbildung 2.1). Außerdem gehört es zu den kontinuierlich wälzenden Verzahnverfahren, womit es in einer Reihe mit den etablierten und verbreiteten Verfahren Wälzstoßen und Wälzfräsen zu sehen ist. In der Prozesskette der Zahradfertigung gibt es das Wälzschälen sowohl im Bereich der Weichbearbeitung, als auch in der sich der Wärmebehandlung anschließenden Hartfeinbearbeitung [BEC-06, FEL-08].



wbk

Abbildung 2.1: Einordnung des Wälzschälens innerhalb der Verfahrensmatrix für die Zahnradherstellung [FEL-08]

## 2.1.1 Stand der Erkenntnisse

### 2.1.1.1 Wälzschäl-Historie

Das Wälzschälverfahren wurde bereits vor knapp 100 Jahren zu Beginn des 20. Jahrhunderts durch Wilhelm von Pittler erdacht, im Jahr 1910 erfolgte die Patenterteilung unter der Bezeichnung „Verfahren zum Schneiden von Zahnrädern mittels eines zahnradartigen, an den Stirnflächen der Zähne mit Schneidkanten versehenen Schneidwerkzeugs“ [PIT-10].

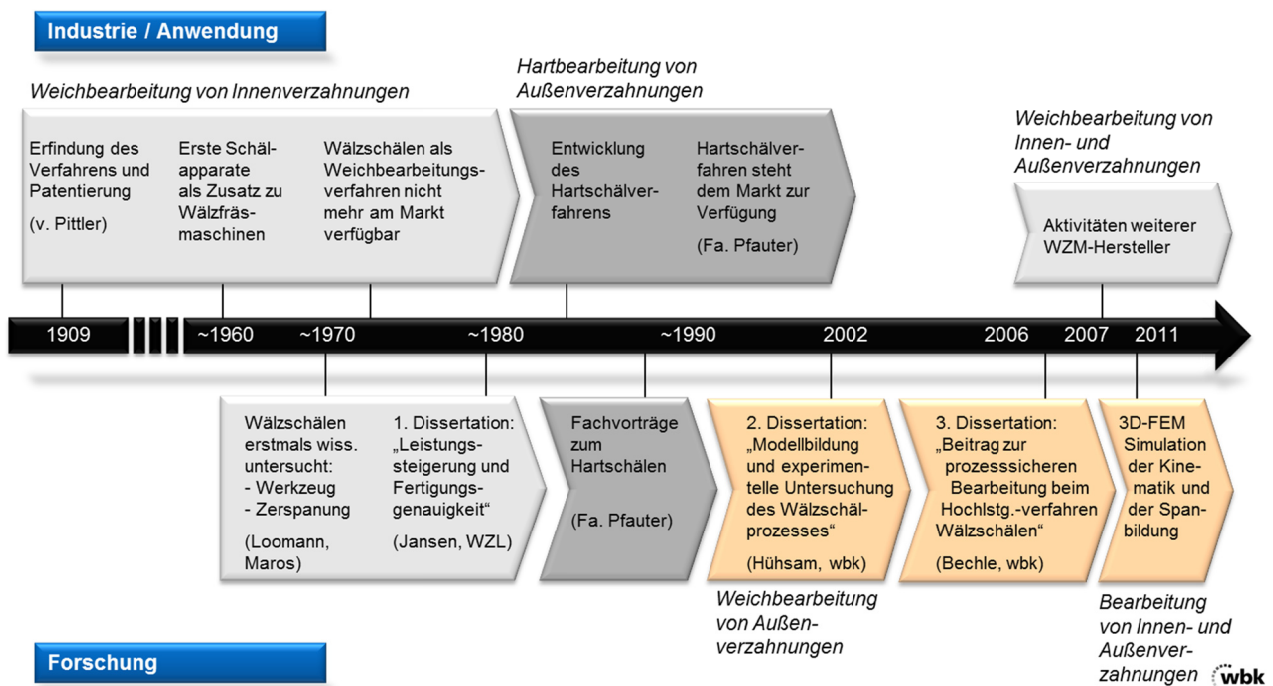


Abbildung 2.2: Chronologische Entwicklung des Wälzschälverfahrens [erweitert nach HÜH-02]

Die Entwicklung des Wälzschälverfahrens mit den wichtigsten bekannten Entwicklungsstufen seit seiner Patentierung zeigt der in Abbildung 2.2 dargestellte Zeitstrahl. In dieser Übersicht wird zwischen Themen aus Industrie und Anwendung (oben) sowie hervorzuhebenden forschungsseitigen Untersuchungen (unten) grob unterschieden. Die nachfolgende Darstellung berücksichtigt den chronologischen Ablauf; die jüngsten Aktivitäten verschiedener Werkzeugmaschinenhersteller werden in Unterkapitel 2.1.1.7 zusammengefasst.

### 2.1.1.2 Patente

Eine vollständige Aufstellung der bekannten, das Wälzschälen betreffenden Patentschriften, Gebrauchsmuster und relevanten Offenlegungsschriften ist im Anhang dieser Arbeit aufgeführt.

Die Patenterteilung für die Erfindung des Verfahrens durch Wilhelm von Pittler erfolgte durch das Kaiserliche Patentamt am 1.2.1912 unter der Patent-Nr. 243514 auf von Pittlers Rechtsnachfolger George Adams, London (Abbildung 2.3). Die Patentschrift zeigt bereits die detaillierte Verfahrenskinematik mit einer Zeichnung des Erzeugungsgetriebes, samt schrägverzahntem Werkzeug und geradverzahnter Innenverzahnung als Werkstück. Die Bearbeitung mit geradverzahntem Werkzeug wird ebenfalls beschrieben, insbesondere die Bedeutung des Verfahrens für die Bearbeitung von Innenverzahnungen wird betont. Hervorzuheben ist ebenso die detaillierte Beschreibung des Zahnvorschubes, der als schräge Nut bezeichnet wird und damit das charakteristische Auslaufen der Verzahnung im Werkstück beschreibt [PIT-10].

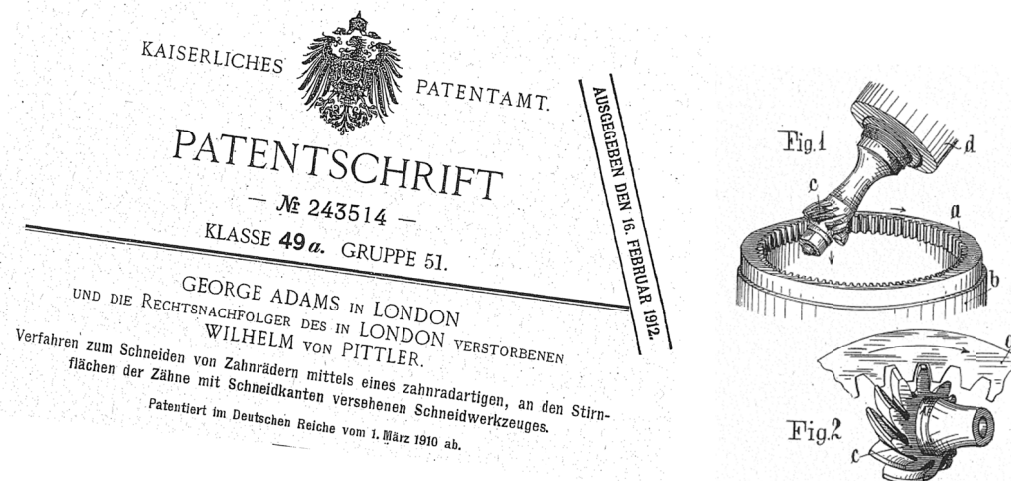


Abbildung 2.3: Auszug Originalpatentschrift Wilhelm von Pittler [PIT-10]

Im Jahr 1919 wurde durch das United States Patent Office eine Patentschrift von Charles Havelock Taylor veröffentlicht, die die erste Beschreibung einer Werkzeugmaschine zum Wälzschälen auf Basis einer Drehmaschine enthält [TAY-19]. Darin wird detailliert die mechanische Kopplung der Werkzeug- und

Werkstückachse mittels eines Zahnradwechselgetriebes gezeigt. Das nächste nennenswerte bekannte Patent betrifft die Erfindung von Nishijima und Kojima bezüglich eines Satzwerkzeuges mit hintereinander angeordnetem Vor- und Fertigschälrad [NIS-76; NIS-78]. Bemerkenswert ist dabei, dass das Werkzeug zur Vorbearbeitung zylindrisch ist, das Fertigbearbeitungswerkzeug eine konische Grundform besitzt. Der Vorteil ist dabei, dass das stärker verschleißende Werkzeug zum Schruppen einfach nachgeschliffen werden kann und es dabei nicht zu einer Veränderung des Werkzeugbezugsprofils kommt. Diverse Gebrauchsmuster, Offenlegungsschriften sowie Patentschriften von Faulstich und der Firma Pfauter zeigen die Entwicklungstätigkeiten hauptsächlich rund um das Hartschälverfahren an (siehe Anhang). Die Firma Präwema widmete sich zunächst der Herstellung von Hinterlegungen durch das Wälzschälverfahren. Es folgten Patentanmeldungen zur universellen Anwendung des Verfahrens zur Herstellung periodischer Strukturen sowie einer Verfahrenskombination von Wälzschälen und Schaben auf einer Maschine.

Grundsätzlich ist das Verfahren heute frei verfügbar und nicht patentrechtlich geschützt. Aktuelle Patentschriften liegen insbesondere von der Firma Profilat vor und beziehen sich auf spezielle Maschinenausrüstungen und Verfahrensvarianten. Allerdings sind teilweise auch grundsätzliche Verfahrenseigenschaften aufgeführt, die dem Stand der Technik entsprechen.

### **2.1.1.3 Erste Anwendungen des Verfahrens**

Eine Umsetzung des Verfahrens fand nach der Erfindung des Verfahrens zunächst aufgrund der hohen Anforderungen an die Werkzeugmaschine, die Maschinensteuerung sowie den Schneidstoff und die Werkzeugbeschichtung noch nicht statt. Die ersten Fortschritte wurden erzielt durch Entwicklungsarbeiten und Untersuchungen des Wälzschälverfahrens von Seiten der Industrie [LOO-71, FAU-77]. So sind erste Schälapparate als anzuflanschende Zusatzausstattung für konventionelle Wälzfräsmaschinen aus den 1960er bis in die 1970er-Jahre hinein bekannt. Die Firma Pfauter hatte eigenständige Maschinen zum Wälzschälen im Angebot, die prinzipiell auf Wälzfräsmaschinen auf-

bauten [ROH-80]. Die Anwendung bezog sich hier auf die Vorbearbeitung von Innenverzahnungen und insbesondere auf große Modul- und Durchmesserbereiche (Bsp.:  $m_n = 6,5 \text{ mm}$ ,  $d_0 = 351 \text{ mm}$  [LOO-71, FAU-77]). Mit dem Verfahren konnten jedoch keine qualitativ hochwertigen Verzahnungen realisiert werden, wofür hier zwei Ursachen angegeben werden können: Zunächst gelang zu dieser Zeit keine exakte Bestimmung der Profilgeometrie der Schälwerkzeuge, die durch die zugrunde liegende Kinematik des Wälzschälverfahrens erheblich erschwert ist [MAR-71, MAR-73] und anfänglich nur experimentell gelang [LOO-71, JAN-80]. Zudem war die verfügbare Maschinenteknik nicht in der Lage, mit den eingesetzten mechanischen Zahnradwechselgetrieben die geforderte Güte des Synchronlaufes der gekoppelten Achsen sicherzustellen. Beim Wälzfräsen wurde üblicherweise mit einem Übersetzungsverhältnis zwischen Werkzeug und Werkstück im Bereich von 12-24 gearbeitet. Die Übertragungsfehler der Kopplungsgetriebe der Werkzeugmaschinen wirkten sich durch das niedrige Übersetzungsverhältnis von 1-3 beim Wälzschälen direkt auf die Verzahnungsqualität aus. Trotz einer aufgrund der qualitativ schlechten Verzahnungsqualität erforderlichen Nachbearbeitung der Bauteile mittels Wälzstoßen konnte eine Verkürzung der Fertigungshauptzeiten mit der Applikation des Wälzschälverfahrens erreicht werden [HÜH-02].

Der chronologische Ablauf der Entwicklung des Verfahrens seit seiner Patentierung zeigt in Abbildung 2.2, dass diese ersten Anwendungen in der Weichbearbeitung von Innenverzahnungen dennoch nicht fortgeführt wurden. Das Verfahren verschwand Ende der 1970er-Jahre als Weichbearbeitungsverfahren zunächst vom Markt [FAU-77, JAN-80, BAU-11].

#### **2.1.1.4 Erste Forschungsansätze**

Erste Untersuchungen nach wissenschaftlichen Methoden sind nach [EGG-68 aus JAN-80] bekannt aus dem Jahr 1968. Hier werden in einer empirischen Vorgehensweise aufgrund von Erfahrungswerten die Zähnezahzahl und der Schrägungswinkel eines Werkzeuges frei gewählt und anschließend zeichnerisch und rechnerisch auf Kopfverschnitt und Kollision geprüft. Erst der prakti-



sche Versuch mit einem gefertigten Schälräd und der Vermessung eines Versuchswerkstücks ergibt die erforderlichen Korrekturen an der Schneide.

Die wissenschaftliche Untersuchung des Wälzschälverfahrens bezog sich zunächst insbesondere auf die mathematische Beschreibung der Prozesskinematik zur Werkzeugauslegung. Die Arbeiten von Maros, Looman und Sulzer [MAR-71, LOO-71, SUL-74] beschreiben erstmals auch eine EDV-unterstützte Vorgehensweise.

Looman bezieht sich in seinen Ausführungen [LOO-71, LOO-82] auf die Bearbeitung von großen Innenverzahnungen. Basierend auf der durch Gleichungen beschriebenen Kinematik und einer vorausgewählten Geometrie des Werkzeugzahnprofils mit entsprechender Einstellung der Maschine wird eine rechnerunterstützte Fertigungssimulation zur Berechnung der resultierenden Istgeometrie des Werkstücks in drei Durchmesserbereichen ermöglicht. Bei Abweichungen werden bei diesem iterativen Vorgehen die Parameter des Werkzeuges und/oder der Kinematik so lange geändert, bis die Sollgeometrie erreicht wird.

Die Methode von Maros [MAR-71, MAR-73, MAR-77] erlaubte die punktweise maschinelle Berechnung der Schneidkantenprofile von Werkzeugen sowohl für die Herstellung von Innen- als auch Außenverzahnungen. Gegenüber den Arbeiten von Looman stellt die Vorgehensweise von Maros einen deutlichen Fortschritt dar, zudem beschränkte sich Looman auf die Herstellung von Innenverzahnungen. Es erfolgte erstmals eine mathematische Beschreibung der Kinematik auf Basis von Koordinatentransformationen. Die Methode arbeitet sehr schnell - als Berechnungszeit für die ausgelegten Werkzeugprofile werden nur 30 Sekunden angegeben, das beschriebene Programm erlaubt die Ausgabe der Geometrie des Werkzeugzahnes in einer beliebigen Schnittebene im berechneten Werkzeug. Es wird jedoch auch erwähnt, dass die Auslegung auf bestimmte Werkstückgeometrien beschränkt bleibt und nicht universell anwendbar ist.

Sulzer befasste sich ausgehend von den Erfahrungen beim Wälzfräsen und in Ergänzung zu Maros neben der Werkzeugauslegung mit der Berechnung von Spannungszuständen beim Wälzschälen. Hierzu wurde ein „Digitalrechenprogramm SCHAEL“ entwickelt, um die Durchdringung von Schneidzahnbahn und Werkstücklücke zu betrachten [SUL-74]. Aus den berechneten unverformten Spannungsdicken und Spannungsquerschnitten konnte die Werkzeugbelastung abgeschätzt werden, auch Profilverchiebungen des Werkzeuges wurden berücksichtigt. Eine experimentelle Verifikation erfolgte hier jedoch nicht.

Bei den bisherigen Autoren erfolgte die Auslegung des Werkzeugprofils iterativ, die Genauigkeit dieser Vorgehensweise ist von der Anzahl der Berechnungszyklen abhängig und die Auslegung entsprechend aufwändig. Die Berücksichtigung eines Spanflächenversatzes ist bei den Methoden nicht möglich, es können nur korrigierte evolventische Werkzeugprofile ausgelegt werden [MAR-73, SUL-74, LOO-82].

In einem Forschungsbeitrag von Kojima [KOJ-77] werden Berechnungen für die Verwendung von zylindrischen Werkzeugen vorgestellt. Das eingesetzte Berechnungsprogramm berücksichtigt dafür bei der Modellierung der Kinematik des „offset skiving“ [KOJ-77] den Mittenversatz  $e$  genannten Spanflächenversatz und berechnet die erforderlichen Korrekturen des Schneidenprofils sowie die Beträge der Freiwinkel beim Eingriff des Werkzeuges. Für die Dauer der Berechnungsläufe werden sehr kurze 4 Sekunden CPU-Zeit angegeben. Die Validierung erfolgte anhand von Referenzwerkstücken mit Modul  $m_n = 3 \text{ mm}$  und Modul  $m_n = 10 \text{ mm}$  auf einer Pfauter P630WS bzw. P1501WS Wälzschälmaschine.

In Erweiterung der theoretischen Betrachtung durch Sulzer wurden an der RWTH Aachen durch Jansen experimentelle Untersuchungen zum Wälzschälen durchgeführt [SUL-74, KOE-78, JAN-80]. Ziel der Arbeiten war es, eine Leistungssteigerung und Verbesserung der Fertigungsgenauigkeit zu erreichen und die Möglichkeiten gegenüber den etablierten Verfahren darzustellen. Für die methodischen Untersuchungen wurde die von Sulzer vorgestellte Berech-

nungssoftware genutzt. Von Jansen wurden umfangreiche Standmengenversuche zur Bestimmung der Werkzeugbelastung und des resultierenden Verschleißes durchgeführt, beschränkt auf die Bearbeitung von geradverzahnten Hohlrädern mit großem Durchmesser. Jansen konnte die durch das Verfahrensprinzip bedingte Überlegenheit des Wälzschälverfahrens prinzipiell darstellen, jedoch noch nicht vollständig ausspielen. Die nach damaligem Stand der Technik zur Verfügung stehenden Schneidstoffe aus pulvermetallurgisch hergestelltem Schnellarbeitsstahl ohne Beschichtung erlaubten nur Schnittgeschwindigkeiten von maximal  $v_c = 40$  m/min [JAN-80]. Auch die erzielten Standmengen waren zu dieser Zeit noch nicht konkurrenzfähig. In den folgenden Jahren wurden daher zunächst keine weiteren Anstrengungen unternommen, das Wälzschälen in der Weichbearbeitung fortzuentwickeln. Jansen führt dies in seiner Arbeit insbesondere auf Restriktionen seitens der Maschinen-, Auslegungs- und Werkzeugtechnologie sowie die mangelnden Kenntnisse über die Verfahrensgrundlagen und -eigenschaften zurück.

#### **2.1.1.5 Hartschälen**

Der zunehmende Bedarf an gehärteten Zylinderrädern mit hoher Tragfähigkeit und geringer Geräuschanregung führte Mitte der 1980er-Jahre dazu, dass das Wälzschälen für eine neue Anwendung zugänglich gemacht wurde, die hauptsächlich den Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide vorbehalten ist [FEL-08, KAR-08]. Das Hartschälverfahren als ein Schlichtwälzschälen für gehärtete Bauteile wurde entwickelt und stand fortan dem Markt zur Verfügung [NN-85, FAU-86, FAU-90]. Ermöglicht wurde diese Entwicklung durch Fortschritte insbesondere im Bereich der Werkzeugtechnik, Hartmetallwerkzeuge wurden eingesetzt, um gehärtete Verzahnungen fertig zu bearbeiten. Eine verbesserte Maschinenteknik mit der Einführung von elektronischen Getriebezügen verhalf zu einem exakteren Synchronlauf der Werkzeug- und Werkstückspindeln, die Genauigkeit hartgeschälter Zahnräder war vergleichbar mit anderen Hartfeinbearbeitungsverfahren. Die Firma Hermann Pfauter GmbH & Co. bediente den Markt exklusiv mit zwei Generationen von Hartschälma-

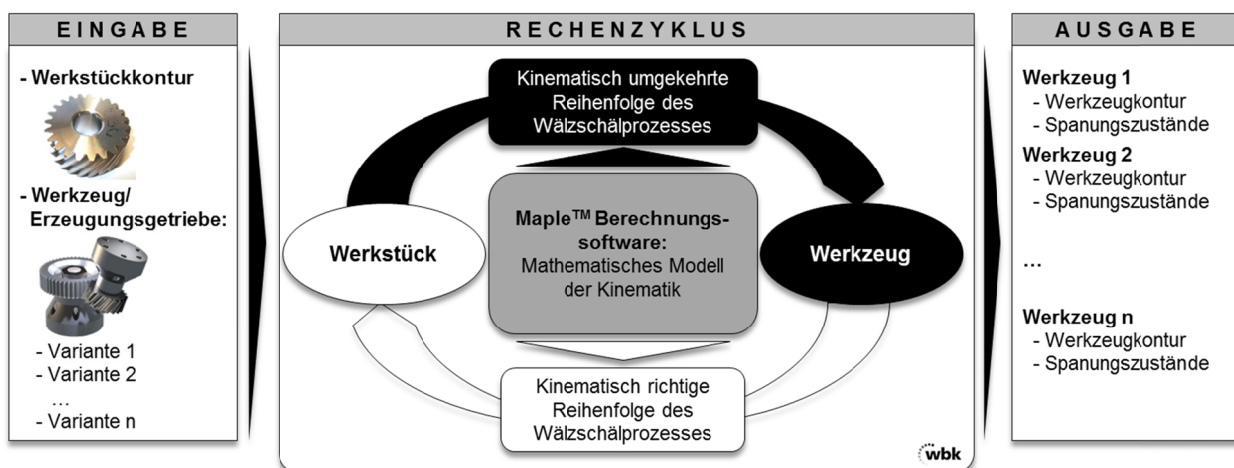
schinen [FAU-87, NN-85, FAU-88], die in kleiner Stückzahl hauptsächlich an Automobilkonzerne geliefert wurden. Die Maschinen vom Typ PF150 und PF200CNC waren für die Großserienfertigung schrägverzahnter Zylinderräder (Außen- und Innenverzahnungen, Modul 1 bis 3 mm, Durchmesser 10 bis 200 mm) ausgelegt [GLE-05]. Eine Weiterentwicklung der Maschinen erfolgte dann allerdings nicht mehr, das Verfahren war noch bis nach der Jahrtausendwende nahezu unverändert im Einsatz, verschwand jedoch aufgrund der veralteten Technologie. Der Einsatz von Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide war für viele Anwendungen geeigneter, zumal die Möglichkeiten von Verzahnungskorrekturen hier deutlich früher beherrscht wurden.

Die Entwicklung und Anwendung des Hartschälverfahrens zeigte die erreichbare hohe Genauigkeit des Verfahrens. Die Herstellbarkeit von konventionellen Verzahnungsflankenkorrekturen wie Breiten- oder Höhenballigkeiten konnte ebenfalls in zahlreichen Arbeiten von Faulstich nachgewiesen werden [FAU-87, FAU-88, FAU-90], hier fehlten allerdings noch geeignete Berechnungstools und ausreichendes Prozessverständnis [HÜH-02]. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens wurde in diesem Zusammenhang nachgewiesen: Die Bearbeitungsspuren verlaufen beim Wälzsälren schräg über die Zahnflanken, was zu einer geringen Geräusentwicklung im Betrieb führt und eine gute Ölhaltefähigkeit bewirkt [GLE-92, BAU-94, HÜH-02].

#### **2.1.1.6 Aktuelle Forschungsansätze**

Die aktuellen Weiterentwicklungen des Wälzsälverfahrens in der Weichbearbeitung, die zu einem deutlichen Aufleben des Interesses am Verfahren und einer zunehmenden Verbreitung geführt haben, erfolgen beginnend mit der Programmierung eines Softwareprogramms zur rechnerischen Auslegung von Schälradern durch Hühsam [HÜH-02] und in Ergänzung dazu mit einer umfangreichen experimentellen Untersuchung der Möglichkeiten der Außen- und Innenbearbeitung mittels Wälzsälren am Institut für Produktionstechnik (wbk) [BEC-06, SCH-09].

Ziel der Arbeiten von Hühsam war es, den Wälzschälprozess mit einem ganzheitlichen mathematischen Ansatz zu beschreiben, mit diesem mathematischen Modell die Kinematik des Verfahrens allgemein zugänglich zu machen und somit die Grundlage für eine nachhaltige Etablierung am Markt zu bilden [SCH-01, HÜH-02, SPA-02]. Erstmals macht Hühsam dabei die Vorteile des Einsatzes von zylindrischen Werkzeugen nutzbar, indem er die Verwendung des Spanflächenversatzes zur Erzeugung eines effektiven Freiwinkels berücksichtigt. Hier ist die Berechnung des Schneidkantenprofils des Werkzeuges im Vergleich zu konischen Werkzeugen deutlich komplizierter. Hühsam musste daher die Ansätze von Looman, Maros und Sulzer erweitern, um auch nicht-evolventische Werkzeuge berechnen zu können. Die resultierende Form des Werkzeugzahnprofils ist zusätzlich zur nicht-evolventischen Gestalt noch aufgrund der Schrägstellung beim Versatz des Berührungspunktes aus dem Achskreuzpunkt an rechter und linker Flanke unterschiedlich. Des Weiteren können Außen- und Innenverzahnungen betrachtet werden. Aufgrund der Möglichkeit der Beschreibung des Tauschnittes des Werkzeuges funktioniert die Methode von Hühsam für Gerad- und Schrägverzahnungen [HÜH-02]. Die Vorgehensweise bei der Methode von [HÜH-02] zeigt Abbildung 2.4.



**Abbildung 2.4: Prinzipielle Vorgehensweise bei der Simulation des Wälzschälprozesses; erweitert nach [HÜH-02]**

Der Kern der Vorgehensweise sind die Berechnungen im zentral dargestellten Rechenzyklus mit Hilfe eines am Institut für Produktionstechnik (wbk) entwi-

ckelten Maple™-Softwareprogramms. Das Programm beinhaltet das von Hüh-sam entwickelte, ganzheitliche mathematische Modell der Wälzschälkinematik und erlaubt durch Verschneidungsrechnung die Bestimmung der Werkzeugkontur und verschiedener zugehöriger Prozessparameter und Spannungszustände. Die Vorgehensweise zur Auslegung von Werkzeug und Prozess für ein neues Bauteil sieht dabei prinzipiell vor, dass der zentrale Zyklus mehrfach durchlaufen werden muss. Die festen Eingangsgrößen sind dabei die Angaben zum herzustellenden Werkstück, zusätzlich sind erste Vorauslegungen zum Werkzeug sowie zum Erzeugungsgetriebe erforderlich. Für das Werkzeug sind dies die Zähnezahl  $z_0$  und damit das Übersetzungsverhältnis  $i$ , die Profilver-schiebung  $x_0$  sowie der Schrägungswinkel  $\beta_0$  des Werkzeuges, für das Erzeu-gungsgetriebe müssen der Spanflächenversatz  $e$ , Achskreuzwinkel  $\Sigma$ , Achsab-stand  $a$ , Axialvorschub  $s_{ax}$  und Tauchtiefe  $T$  angegeben werden. Diese Einga-begrößen hängen teilweise voneinander ab, beruhen aber zunächst einmal auf Erfahrungswerten. Insbesondere bei gänzlich neuen Werkstückgeometrien be-deutet dies einen erhöhten Zeitaufwand. Die Ausgabegrößen der Software erlauben eine Beurteilung des Prozesses anhand der berechneten Frei- und Spanwinkel sowie Schnittgeschwindigkeit und abgeschätzte Bearbeitungskräf-te. Auf Basis der Ansätze von früheren Arbeiten werden auch die unverform-ten Spannungsbereiche und -dicken berechnet und erlauben dem erfahrenen Anwender eine Abschätzung der jeweiligen zu variierenden Eingangsgrößen.

Das mathematische Modell der Wälzschälkinematik und die entwickelte Aus-legungssoftware wurden anhand von zwei unterschiedlichen Referenzwerkstü-cken verifiziert. Hierbei wurden zylindrische Werkzeuge zur Herstellung einer Außenverzahnung mit Modul  $m_n = 1,5$  mm und eines homokinetischen Ring-gelenks (zirka  $m_n = 16$  mm) eingesetzt. Die gefertigten Genauigkeiten der hergestellten Referenzwerkstücke befanden sich nach [HÜH-02] in einem ak-zeptablen Bereich. Deutlich wurden bei den Untersuchungen aber auch Defizi-te bei der Beherrschung des Verfahrens. Die erreichten Schnittgeschwindigkei-ten und Standwege lassen erkennen, dass weder eine prozesssichere noch ei-

ne dem Hochleistungscharakter des Verfahrens entsprechende Fertigung möglich war [BEC-06]. Die Belastung überforderte das verwendete beschichtete Hartmetall insbesondere bezüglich der Schneidkantenverrundung am Kopf. Hierbei hervorzuheben ist noch, dass in den Simulationsläufen allein anhand der Winkelbeiträge und unverformten Spanbereiche der Kopf als gefährdeter Bereich eingestuft werden konnte [HÜH-02].

Die sich an Hühsam anschließenden Untersuchungen von Bechle [BEC-06] waren im Schwerpunkt von experimentellem Charakter und hatten zum Ziel, einen Beitrag zur Steigerung der Prozesssicherheit beim Wälzschälen in der Weichbearbeitung zu leisten. Dabei sollte insbesondere der Hochleistungscharakter des Verfahrens nach aktuellem Stand der Technik herausgearbeitet werden. Die Arbeiten zur Dissertation von Bechle wurden im Rahmen des BMBF-Verbundprojektes „HopeS – Hochleistungsbearbeitung von periodischen Strukturen“ durchgeführt [FLE-05].

Es wurde ein methodischer Ansatz nach Abbildung 2.5 gewählt, der zunächst vorsieht, anhand von Analogieversuchen unterstützt durch Simulationsläufe mit der Software von Hühsam [HÜH-02] fundiertes Grundlagenwissen hinsichtlich des Schneidstoffs, der Werkzeugbeschichtung sowie der Schneidenmakro- und Schneidenmikrogeometrie zu generieren [BEC-06]. Die Analogieversuche erfolgten mittels eines Ein-Zahn-Versuchswerkzeuges und an Außenverzahnungen. Die Mechanismen der Spanbildung sind prinzipiell vom Außenschälen zum Innenschälen und umgekehrt übertragbar - so dass auf dieser Grundlage im nächsten Schritt Versuche mit sogenannten „best-of“-Vollwerkzeugen an Innen- und Außenverzahnungen durchgeführt wurden. Damit sind nach [BEC-06] die Werkzeuge gemeint, die nach den Ergebnissen der Grundlagenuntersuchungen hinsichtlich Feingestaltung sowie Substrat und Beschichtung gefertigt wurden. Bei den Experimenten mit Vollwerkzeugen wurden dann umfangreiche Standwegversuche gefahren und die Prozessparameter Schnittgeschwindigkeit, Vorschub, Schnittstrategie und Prozesskühlung variiert bzw. optimiert.



*Abbildung 2.5: Methodische Vorgehensweise zur Verbesserung der Prozesssicherheit beim Wälzschälen [BEC-06]*

Einen zentralen Punkt stellen bei [BEC-06] die Tests verschiedener Schneidstoffe und Beschichtungen dar. Es wurden umfangreiche Standwegversuche mit pulvermetallurgisch hergestelltem Schnellarbeitsstahl (PM-HSS) sowie zehn verschiedenen Sorten Hartmetall (HM) durchgeführt. Die Applikation von polykristallinem kubischen Bornitrid (PCBN) brachte nicht die erhofften zufriedenstellenden Ergebnisse. Es trat sehr schnell zu hoher Verschleiß auf, die Versagensmechanismen und der damit einhergehende rapide Kräfteanstieg wurden jedoch nicht weiter untersucht. Die besten Ergebnisse und damit die Entscheidung für die folgenden Versuchsreihen brachte die Verwendung von Hartmetall mit möglichst hoher Härte ( $1850 \text{ N/mm}^2$  HV30) und möglichst feinsten Korngröße ( $0,4\text{-}0,5 \mu\text{m}$  mittlere Korngröße) [BEC-06]. Diese Substrate wurden bei der Herstellung von Außenverzahnungen mit einer geeigneten Hartstoffschicht, die höchste Druckeigenstress aufweist, bei Schnittgeschwindigkeiten von bis zu  $220 \text{ m/min}$  eingesetzt.

Einen Ausblick auf weiteres Potential des Verfahrens durch die Verwendung von verbesserten Hartmetall-Schneidstoffen, ermöglichte Bechle in einem Stichversuch mit Hartmetall von noch höherer Härte sowie größerer Dichte ( $14,9 \text{ g/cm}^3$ ) und geringerer Zähigkeit, bei dem deutlich gesteigerte Stand-



mengen zu verzeichnen waren. Der in der Entwicklung befindliche Schneidstoff wurde bei weiteren Versuchsläufen jedoch nicht weiter berücksichtigt, da dieser als Rohmaterial in den Abmessungen der anzufertigenden Vollwerkzeuge nicht zur Verfügung stand.

In weiteren Versuchsreihen wurden unterschiedliche Prinzipien bei der Prozesskühlung getestet. Demnach ist das Wälzschälen prinzipiell auch trocken anwendbar, bessere Standwegergebnisse wurden allerdings mit Minimalmengenschmierung (MMS) erzielt. Die zusätzliche Schmierwirkung durch den minimalen Ölanteil wirkte sich dabei positiv aus [BEC-06].

Als Referenzbauteile wurden bei [BEC-06] Serienteile herangezogen, die bei den Industriepartnern des Vorhabens HopeS in großen Stückzahlen mittels Wälzfräsen bzw. Räumen oder Wälzstoßen gefertigt werden [SCH-04, FLE-05]. Dadurch konnten die Forschungsergebnisse direkt mit industriellen Serienprozessen verglichen werden und die Prozessfähigkeit und –kosten des Verfahrens in Vergleich mit den etablierten Prozessen gestellt werden.

Bei der Bearbeitung einer Außenverzahnung ( $m_n = 1,75 \text{ mm}$ ,  $z_2 = 23$ ), die in der Serie mittels Wälzfräsen hergestellt wird, konnten von Bechle die Leistungs- und Konkurrenzfähigkeit des Wälzschälverfahrens deutlich aufgezeigt werden. So wurden - bei fast identischen Prozesskosten pro gefertigtes Werkstück - hohe Verzahnungsqualitäten erreicht, die nach Aussage Bechles durchaus im Bereich der Feinbearbeitung zu sehen sind. Dabei konnte eine Reduzierung der Fertigungshauptzeit gegenüber dem Referenzprozess um zirka 25 % realisiert werden [FLE-05].

Dem gegenüber steht jedoch die Beherrschung der Prozesssicherheit, die im Rahmen der Arbeiten von Bechle nicht vollständig geklärt werden konnte. So zeigte sich bei fast allen Standwegversuchen eine starke Streuung der Standwegergebnisse. Häufig kam es aus nur bedingt identifizierbarer Ursache zu Spanklemmern, die zu erhöhtem Werkzeugverschleiß, fehlerhaften Bauteilen und insbesondere zur Störung der Prozessstabilität führten [BEC-06].

Insbesondere bei der Bearbeitung einer Innenverzahnung ( $m_n = 1,25 \text{ mm}$ ,  $z_2 = -103$ ) zeigten sich die Probleme bei der Prozessbeherrschung. Hinzu kamen hier noch technologische Herausforderungen mit der Werkstückspannung und der Spanabfuhr im Prozess. Die Standwegergebnisse waren hier nur bedingt interpretierbar, es kam zu hohen Rundlauf- und Teilungsabweichungen an den gefertigten Werkstücken [FLE-05].

Die experimentellen Arbeiten von Hühsam und Bechle wurden auf einer prototypischen Versuchsmaschine in Form von zur Wälzschälbearbeitung modifizierten Vertikaldrehmaschinen durchgeführt. Dem aktuellen Stand der Technik entsprechende eigenständige Wälzschälmaschinen waren nicht am Markt verfügbar [HÜH-02, BEC-06].

### **2.1.1.7 Aktuelle Aktivitäten von Werkzeugmaschinenherstellern**

Die neueren wissenschaftlichen Untersuchungen nach aktuellem Stand der Technik und die dabei aufgezeigten Fortschritte im Bereich der Maschinentechnik, der Schneidstoff- und Beschichtungstechnologie sowie der Werkzeug- und Prozessauslegung führten dazu, dass sich die Nachfrage seitens potentieller Anwender des Wälzschälverfahrens in jüngster Zeit deutlich erhöht hat. Die überzeugende Darstellung der Leistungs- und Konkurrenzfähigkeit in den Arbeiten am Institut für Produktionstechnik (wbk) [HÜH-02, FLE-05, BEC-06; SCH-09] motivierte auch diverse Maschinenhersteller und Prozessanbieter, aktiv an der Entwicklung des Verfahrens und geeigneter Werkzeugmaschinen zu arbeiten.

Im Herbst 2007 wurde daraufhin auf der EMO Werkzeugmaschinenmesse in Hannover erstmals wieder eine Maschine nach neuester Generation zum Wälzschälen vorgestellt. Die Firma Profilator GmbH & Co. KG als Mitglied der Wera-Gruppe, Wuppertal, bietet seitdem die Wälzschältechnologie als Erweiterung für sein flexibles, modular aufgebautes Baukastensystem von Werkzeugmaschinen zunächst unter der Bezeichnung Wälzschälen, später dann unter der Bezeichnung „Scudding®“, an. Grundsätzlich unterscheidet sich das

Scudding® technologisch nicht vom Wälzschälen, im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird daher mit dem Begriff Wälzschälen die Profikator-Technologie mit eingeschlossen. Profikator verwendet beim Scudding® konische Werkzeuge zur Bearbeitung von gerad- oder schrägverzahnten Innen- und Außenverzahnungen. Der bearbeitbare Verzahnungsdurchmesser wird mit maximal ca. 180 mm angegeben, das größte bearbeitbare Modul mit  $m_n = 5$  mm. Wie bereits bei weiter oben beschriebenen Untersuchungen werden hohe Verzahnungsqualitäten von DIN IT5-7 bei gleichzeitig geringer Oberflächenrauheit ( $R_z$  2-3  $\mu\text{m}$ ) erreicht [PRO-09].

Die Bearbeitung vom Rohteil bis zum Fertigteil einer Schiebemuffe mittels Wälzschälen sowie Rast-, Hinterlegungs- und Abdachfräsen auf einer Maschine zur Verkürzung der Prozesskette war das erste Beispiel, mit dem Profikator die Vorteile des Verfahrens aufzeigen wollte [PRO-07]. Bekannt sind diverse weitere Anwendungen von  $m_n = 0,79$  mm bis zu  $m_n = 2,8$  mm im Bereich von PKW-Getriebebauteilen. Profikator möchte weiterhin die Anwendung auf die Bearbeitung von Bauteilen  $>200$  mm (LKW Hohlräder) sowie auf die Bearbeitung gehärteter Verzahnungen ausweiten. Dabei ist anzumerken, dass die Werkzeug- und Prozessauslegung durch die Firma Profikator erfolgen muss und daher nicht als allgemeiner Stand der Technik angesehen werden kann [PRO-09; PRO-11].

Die Firma Pittler T+S GmbH, Dietzenbach, stellte auf der Internationalen Ausstellung für Metallbearbeitung AMB in Stuttgart im Herbst 2010 ebenfalls eine Maschine zur Wälzschälbearbeitung aus. Realisiert wurde das Verfahren bei einer Innenschragverzahnung auf einem PV3 1250 1-1 Y Vertikaldrehbearbeitungszentrum mit 5-Achs-Simultan-Bearbeitung [DVS-10]. Die Firma Pittler T+S ist Mitglied der DVS-Gruppe, die diverse Hersteller von Maschinen und Werkzeugen sowie Dienstleistungsanbieter vereint. Dadurch wird die Wälzschältechnologie derzeit auch durch die Präwema Antriebstechnik GmbH, Eschwege, vertrieben und für die Bearbeitung mit zylindrischen Werkzeugen von Antriebs-, Gang-, Hohl-, Schiebe-, Planeten und Sonnenrädern sowie Syn-

chronkörpern und Radnaben eingesetzt. Die Unternehmensgruppe gibt an, dass das Wälzschälverfahren das Potential hat, sich bei Innenverzahnungen und Verzahnungsoperationen gegen Störkonturen gegen die etablierten Verfahren durchzusetzen. Auch die Verfahrenskombination und somit steigende Flexibilität wird dabei hervorgehoben [DVS-10; PRÄ-11].

Zur EMO Messe im September 2011 stellte die Firma Klingelberg den Wälzschälprozess auf einer Oerlikon C29 Kegelradwälzfräsmaschine vor. Das Unternehmen ist nach eigener Aussage vom Durchbruch des Wälzschälens als Fertigungsverfahren überzeugt. Die Besonderheit bei der Vorgehensweise von Klingelberg ist ein Werkzeugsystem, das auf den Erfahrungen der Firma im Bereich der Kegelradfertigung mit Stabmessersystemen beruht. Das Stabmessersystem „SKIVON“ bietet als gebautes Werkzeug eine sehr hohe Flexibilität und kann signifikant zu Kosteneinsparungen bei der Werkzeugherstellung für das Wälzschälen beitragen [KLI-11].

Von mehreren weiteren Werkzeugmaschinenherstellern sind Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zum Wälzschälverfahren bekannt. Demnach werden auf den kommenden Werkzeugmaschinenmessen weitere Wälzschälmaschinen und -anwendungen hinzukommen und das Marktangebot sicherlich stetig anwachsen.

### **2.1.2 Verfahrenseigenschaften**

Eine Weiterentwicklung des Wälzschälverfahrens erfordert eine detaillierte Beschreibung der Verfahrensgrundlagen sowie der bisherigen wissenschaftlichen Untersuchungen zu diesem Verfahren. Zum Verständnis des Prozesses gliedert sich die Beschreibung im Folgenden in die wichtigsten grundlegenden Verfahrenseigenschaften und bisherigen Erkenntnisse des Wälzschälverfahrens, die wichtigsten Grundlagen zur Spanbildung sowie deren Modellierung auf.

### 2.1.2.1 Werkzeug

Die Grundform eines Wälzschälrades kann sowohl konisch als auch zylindrisch ausgeführt sein und einem gerad- oder schrägverzahnten Stirnrad entsprechen [JAN-80] (Abbildung 2.6).



Abbildung 2.6: Grundformen von Wälzschälwerkzeugen (li.+ Mitte li.: zylindrisch; Mitte re.: konisch, re.: gebaut [KLI-11])

Beim Wälzschälen kommt dem Werkzeug, der Werkzeuggrundform und insbesondere der Feingestalt der Werkzeugzähne eine zentrale Rolle zu. Während eines Zahneingriffes ist die gesamte Schneidkante von der einlaufenden Flanke (EF) über den Kopf bis zur auslaufenden Flanke (AF) an der Spanbildung beteiligt (siehe Abbildung 2.7). Aus diesem Grund werden an beiden Flanken sowie am Kopf ausreichende Freiwinkel benötigt. In dieser Darstellung sind die Rotationsbewegung und die Richtung des Axialvorschubes angezeigt, im Erzeugungsgetriebe beschreibt nur das Werkstück diese Bewegungskomponente.

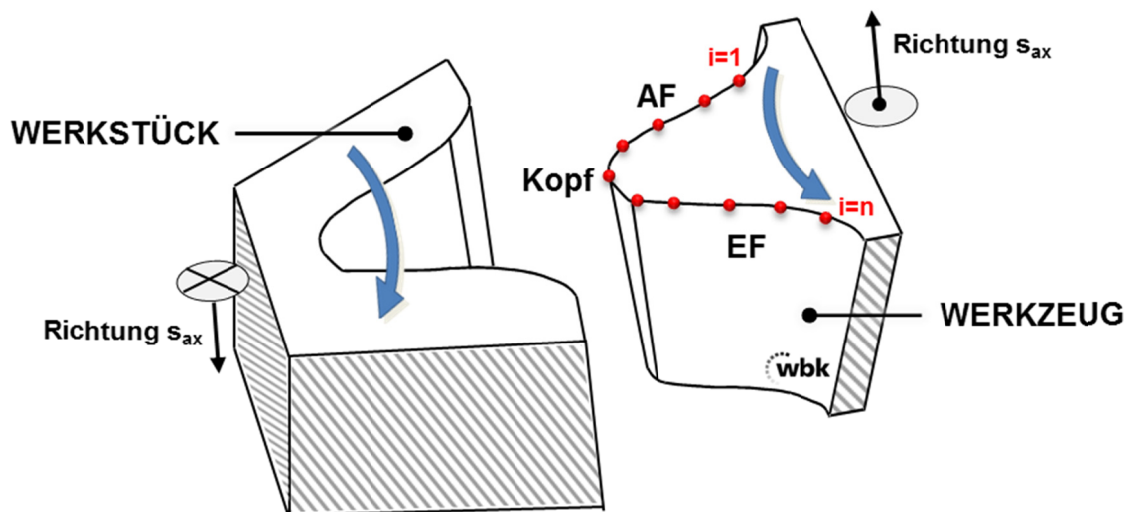


Abbildung 2.7: Bezeichnungen am Werkzeugzahn

Bei schrägverzahnten konischen und zylindrischen Werkzeugen wird ein Treppenschliff (Hinterschliffwinkel [JAN-80]) auf der Spanfläche erforderlich (vgl. Abbildung 2.6 re.), damit die Spanfläche senkrecht auf den Flanken des Werkzeugzahns steht. Der Nachschliff wird damit bei schrägverzahnten Schneidrädern wegen des Treppenschliffs komplizierter. Die Werkzeugzähne müssen einzeln bearbeitet werden, ein einfaches Nachsetzen einer planen Fläche um den Betrag des Verschleißes ist nicht möglich.

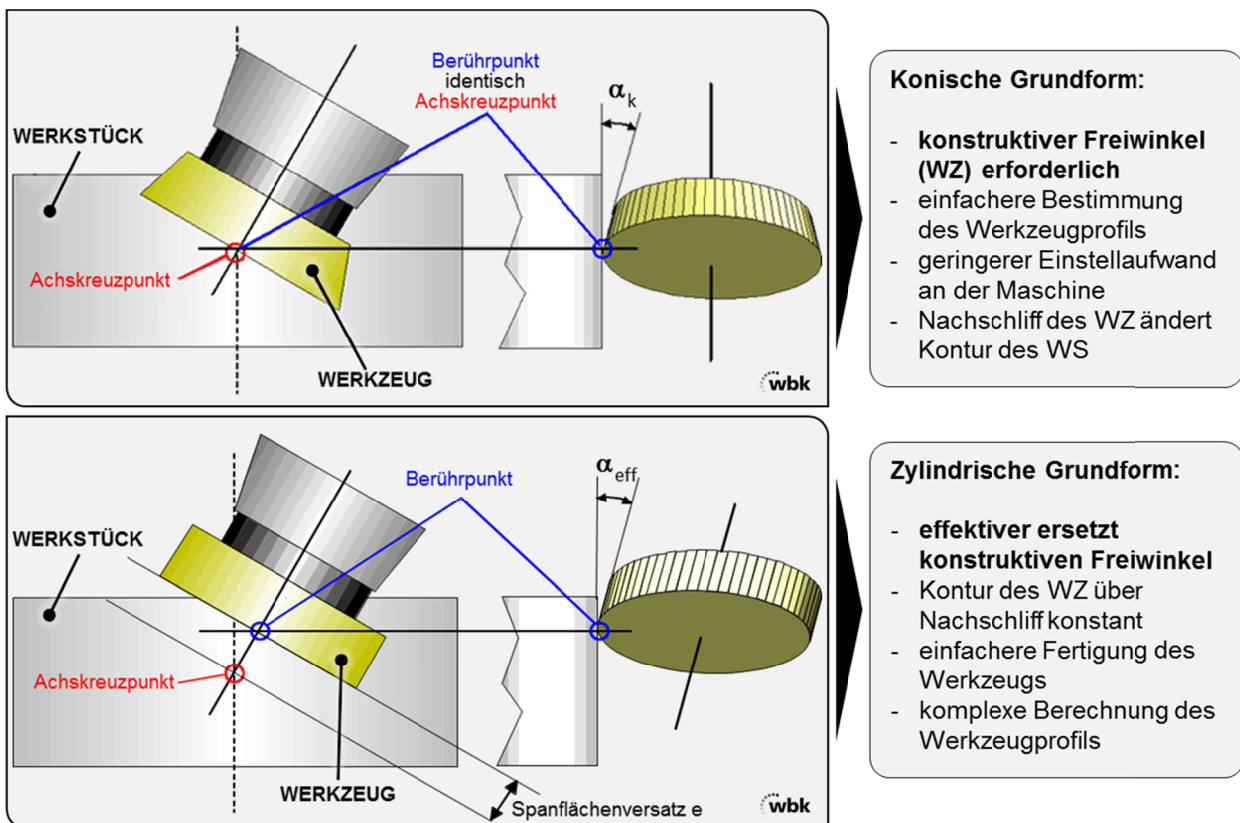
Bei konischen Werkzeugen (Keilwinkel kleiner  $90^\circ$ ) nimmt der Kopfkreisdurchmesser von der Werkzeugoberseite in axialer Richtung stetig ab, es ergeben sich somit die erforderlichen Kopf- und Flankenfreiwinkel direkt konstruktiv aus der Schneidenform. Bei der Werkzeugaufbereitung durch einen Nachschliff der Spanfläche führt allerdings der abnehmende Kopfkreisdurchmesser zu einer reduzierten Profilverschiebung. Die Eingriffsverhältnisse verändern sich, die geänderte Werkzeuggeometrie muss nach einer Neuberechnung des Achsabstandes durch die Maschineneinstellung kompensiert werden [BEC-06]. Prinzipiell kann das Werkzeugprofil nur für einen begrenzten Nachschliffbereich optimal berechnet und ausgelegt sein, die veränderten Eingriffsverhältnisse können nicht vollständig kompensiert werden. Nach [HÜH-02] sind die Effekte der Profilverschiebung beim Nachschleifen von Wälzschälrrädern deutlich größer als beim Wälzstoßen, so dass Abweichungen im Zahnprofil auftreten können.

Eine zylindrische Werkzeuggrundform verfügt zwar weder am Werkzeugzahnkopf noch an den -schneidenflanken über konstruktive Freiwinkel. Die beschriebenen Nachteile, die durch den begrenzten nutzbaren Bereich eines konischen Werkzeuges entstehen und auch negative Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens haben, entfallen dafür aber. Der Werkzeugdurchmesser und die Profilverschiebung bleiben beim Nachschliff konstant. Nach der Aufbereitung ist nur ein Nachstellen des Werkzeugs um den nachgeschliffenen Betrag in axialer Richtung erforderlich. Ein zylindrisches und geradverzahntes Werkzeug stellt den einfachsten Fall bei der Aufbereitung dar.

Auch die Werkzeugherstellung ist bei einer zylindrischen Grundform prinzipiell einfacher und weniger fehleranfällig.

### **Spanflächenversatz**

Die bei der Spannbildung also im Werkzeugeingriff unbedingt erforderlichen Freiwinkel müssen kinematisch durch entsprechende Korrekturen der Maschineneinstellung erzeugt werden. Vergleichbar mit dem Aufspannen eines Drehmeißels unter Mitte, wird dies beim Wälzschälen in Form des Spanflächenversatzes  $e$  bzw. der Exzentrizität vorgenommen [HÜH-02]. Durch den axialen Versatz der Spanfläche des Werkzeuges aus dem Achskreuzpunkt wird ein effektiver Freiwinkel  $\alpha_{\text{eff}}$  erzeugt (Abbildung 2.8).



**Abbildung 2.8: Erzeugung eines effektiven Freiwinkels [nach FLE-05]**

Der Spanflächenversatz  $e$  wird als positiv angegeben, wenn er zu einer Verlängerung der Trägerachse des Werkzeuges in der Maschinenspindel beiträgt. Ein negativer Spanflächenversatz  $e$  bedeutet, dass die Trägerachse verkürzt wird. Bei der Bearbeitung von Innenverzahnungen kann ein positiver Spanflä-

chenversatz eingestellt werden, ein negativer Spanflächenversatz kann bei Außenverzahnungen verwendet werden.

Durch die Wirkung des Spanflächenversatzes unterscheidet sich das Profil von linker und rechter Flanke des Werkzeugzahnes. Die Berechnung des Werkzeugprofils wird dadurch aufwändiger; das Profil ist aber für die gesamte Werkzeughöhe unverändert, es müssen keine Einflüsse verschiedener Kopfkreisdurchmesser und Profilverchiebungen berücksichtigt werden.

Auch Hohlräder mit als Werkzeugschneiden ausgeführter Innenverzahnung oder Satzschälräder zur Vor- und Fertigbearbeitung in einer Vorschubbewegung sind möglich. Diese spielen jedoch in der Praxis derzeit noch keine Rolle und sollen daher im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter behandelt werden.

### **2.1.2.2 Kinematik**

Die Erzeugungsgetriebe kontinuierlich wälzender Verzahnverfahren werden zur Beschreibung der zugrundeliegenden kinematischen Beziehungen von Werkzeug und Werkstück nach Vorbildern von Getrieben aus der Antriebstechnik bezeichnet. Die Kinematik des Wälzfräsverfahrens entspricht einem Schneckenradgetriebe, das Werkzeug stellt hier die Schnecke dar und das Werkstück das Schneckenrad. Dem Erzeugungsgetriebe des Wälzstoßverfahrens liegt ein einfaches Stirnradgetriebe zugrunde. Werkzeug und Werkstück sind hier als Stirnräder ausgeführt und wälzen im Prozess aufeinander ab.

Das Wälzschälverfahren liegt kinematisch zwischen dem Wälzfräsen und dem Wälzstoßen, das Erzeugungsgetriebe gleicht einem Schraubradgetriebe. Kennzeichnend ist hier die windschiefe Anordnung von Werkzeug- und Werkstückachse. Das Verfahren lässt sich nach [FEL-08] ausgehend von der Kinematik des Wälzstoßens sehr anschaulich beschreiben. Die Anordnung von Werkzeug- und Werkstückachse beim Wälzstoßen ist achsparallel, der Kreuzungswinkel beträgt  $0^\circ$ . Wird dieser als Achskreuzwinkel  $\Sigma$  vergrößert, wird aus der Wälzbewegung eine Schraubwälzbewegung. Mit zunehmender Vergrößerung des Achskreuzwinkels nimmt der wälzende Anteil im Erzeugungsgetriebe ab,



der schraubende Anteil nimmt zu und bewirkt schließlich eine Bewegungskomponente der Werkzeugschneiden in Richtung der Zahnflanken des Werkstücks (vgl. Abbildung 2.9 unten). Zur Erzeugung der Schnittbewegung wird beim Wälzschälen der Gleitanteil der kämmenden Bewegung der sich im Eingriff befindlichen Zahnräder des Schraubradgetriebes ausgenutzt. Der Gleitanteil der Bewegung ergibt sich beim Wälzschälen aus der Achsanordnung des Erzeugungsgetriebes. Ein in der Auslegung gewählter Achskreuzwinkel  $\Sigma$  gibt den Gleitanteil demnach als konstanten Faktor vor. Die absolute Größe des Gleitanteils und die daraus resultierende Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  lassen sich im Prozess, bei vorgegebenem Durchmesser von Werkzeug und Werkstück sowie vorgegebenem Achskreuzwinkel, nur durch die Rotationsgeschwindigkeiten der Achsen beeinflussen. Der Achskreuzwinkel  $\Sigma$  ist beim Wälzschälverfahren demnach so zu wählen, dass im Prozess die zur Spanabnahme erforderliche Schnittgeschwindigkeit erreicht wird, ohne dass das Werkzeug eine zusätzliche Hubbewegung wie beim Wälzstoßen ausführen muss. Zur Bearbeitung der gesamten Verzahnungsbreite wird beim Wälzschälen der Werkzeugrotation ein Axialvorschub  $s_{ax}$  überlagert [LOO-71, JAN-80, HÜH-02, FEL-08].

Eine Schemadarstellung der Verfahrenskinematik und die für den Wälzschälprozess erforderlichen Maschinenbewegungsfreiheitsgrade finden sich in Abbildung 2.9. Die Rotationsbewegungen von Werkzeug und Werkstück sowie der Differential-, Axial- und Radialvorschub stellen die Hauptbewegungskomponenten dar. Als Zusatzbewegungen sind noch Verfahrensmöglichkeiten der Maschinenachsen zur Einstellung des Achskreuzwinkels und der Achsabstandskorrekturen erforderlich. Nachfolgend werden die relevanten Haupt- und Zusatzbewegungen des Erzeugungsgetriebes des Wälzschälverfahrens im Detail erläutert.

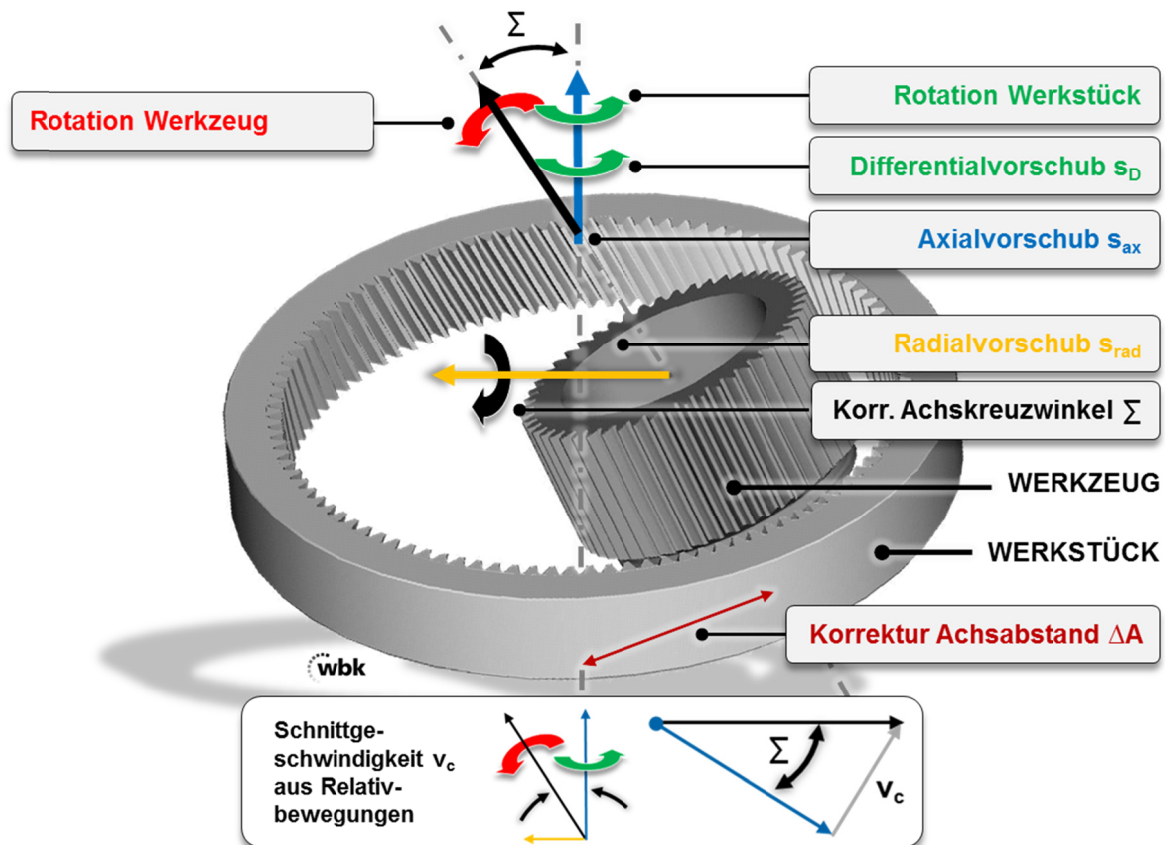


Abbildung 2.9: Schemadarstellung Verfahrenskinetik

### Achskreuzwinkel

Die Lage der zueinander windschief angeordneten Werkzeug- und Werkstückachse im Erzeugungsgetriebe wird durch den Achskreuzwinkel  $\Sigma$  und den in der Auslegungsrechnung bestimmten Achsabstand angegeben. Der Achskreuzwinkel berechnet sich aus den Schrägungswinkeln von Werkzeug  $\beta_0$  und Werkstück  $\beta_2$  gemäß Formel 2-1. Die Schrägungswinkel sind dabei nach DIN3960 bei Außenverzahnungen für eine nach rechts steigende Flanke positiv definiert, ein zu linkssteigender Flankenrichtung gehörender Schrägungswinkel als negativ. Bei innenverzahnten Zahnrädern dreht sich das Vorzeichen um [DIN 3960]. Das innenverzahnte Werkstück in Abbildung 2.9 besitzt demnach einen positiven Schrägungswinkel.

$$\Sigma = \begin{cases} \beta_0 + \beta_2 & \text{für Außenverzahnungen } (z_2 > 0) \\ \beta_0 - \beta_2 & \text{für Innenverzahnungen } (z_2 < 0) \end{cases} \quad \text{Formel 2-1}$$

Anhand der Formel lässt sich auch leicht erkennen, dass sich zum Beispiel mit einem geradverzahnten Werkzeug (vgl. Abbildung 2.9) aufgrund der Notwendigkeit eines Achskreuzwinkels für die Schnittbewegung nur schrägverzahnte Zahnräder herstellen lassen.

Als Verfahrensoptimum haben sich in der Praxis Achskreuzwinkel im Bereich von  $20^\circ$  bis  $30^\circ$  ergeben. Bei großen Werkzeugdurchmessern sind für ausreichende Schnittgeschwindigkeiten auch kleinere Achskreuzwinkel realisierbar.

Bei der Herstellung von Innenverzahnungen müssen bei der Wahl des Achskreuzwinkels die räumlichen Verhältnisse beachtet werden. Es besteht infolge der notwendigen Durchdringung von Werkzeug und innenverzahntem Werkstück eine erhöhte Kollisionsgefahr des Werkstücks mit dem Werkzeug sowie der Werkzeugaufnahme an der Maschinenspindel. Diese Gefahr besteht insbesondere bei großen Verzahnungsbreiten, kleinen Werkstückdurchmessern und stabil ausgeführten Schälrüsseln (Werkzeug mit zugehöriger Aufnahme) [JAN-80].

Die in Abbildung 2.9 angegebene Korrektur des Achskreuzwinkels wird zunächst für die Einstellung der Maschinenachsen auf den Schrägungswinkel benötigt. Während der Bearbeitung werden über diese Bewegung gewünschte Korrekturen des Flankenlinienwinkels über die Verzahnbreite ermöglicht.

### ***Axialvorschub***

Wie bereits oben beschrieben, wird zur Bearbeitung der vollständigen Verzahnbreite ein Axialvorschub  $s_{ax}$  benötigt. Der Axialvorschub wird üblicherweise analog zum Drehen oder Wälzfräsen in der Einheit [mm/WSU] oder in der Einheit [mm/min] angegeben.

### ***Differentialvorschub***

Bei schrägverzahnten Werkstücken ist für den Betrieb des Erzeugungsgetriebes ein Differentialvorschub  $s_D$  [1/WSU] erforderlich. Dieser ist abhängig vom Schrägungswinkel des Werkstücks und wird im Prozess gekoppelt an den Axi-

alvorschub als Zusatzbewegung der Werkstückrotation überlagert. Der Differentialvorschub errechnet sich gemäß Formel 2-2.

$$s_D = \frac{s_{rad} \cdot \tan \beta_2}{z_2 \cdot m_n \cdot \pi} \quad \text{Formel 2-2}$$

$$\text{mit } [s_D] = \frac{1}{WSU}, [s_{ax}] = \frac{mm}{WSU} \text{ und } [m_n] = mm .$$

### **Radialvorschub**

Der Radialvorschub  $s_{rad}$  wird bei der Einstellung des Erzeugungsgetriebes zur Zustellung des Werkzeugs auf die Bearbeitungstiefe genutzt und dient damit auch bei einer eventuellen Mehrschnittstrategie der Schnittaufteilung auf die verschiedenen Schnitttiefen. Während der Bearbeitung ermöglicht der Radialvorschub mit der Korrektur des Achsabstandes die Erzeugung variabler Profile über die Verzahnbreite, wie beispielsweise Balligkeiten.

#### **2.1.2.3 Prozesskenngrößen**

##### **Schnittgeschwindigkeit**

Die Bewegungskomponente in Richtung der Zahnlücken des Werkstücks ergibt sich aus der Differenz der um den Betrag des Achskreuzwinkels zueinander geneigten Geschwindigkeitsvektoren der Rotationsachsen von Werkzeug und Werkstück (vgl. Abbildung 2.9 unten). Durch die Schrägstellung liegen nach [FAU-77] die Umfangsgeschwindigkeiten von Werkzeug und Werkstück für alle Berührungspunkte zwischen beiden Elementen in unterschiedlichen Ebenen. Die Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  ist die daraus resultierende geometrische Differenz der Umfangsgeschwindigkeiten (Formel 2-3).

$$\vec{v}_c = \vec{v}_{u,0} - \vec{v}_{u,2} \quad \text{Formel 2-3}$$

$$\begin{aligned} \text{mit } \vec{v}_{u,0} &= \text{Umfangsgeschwindigkeit Werkzeug} \\ \vec{v}_{u,2} &= \text{Umfangsgeschwindigkeit Werkstück} \end{aligned}$$

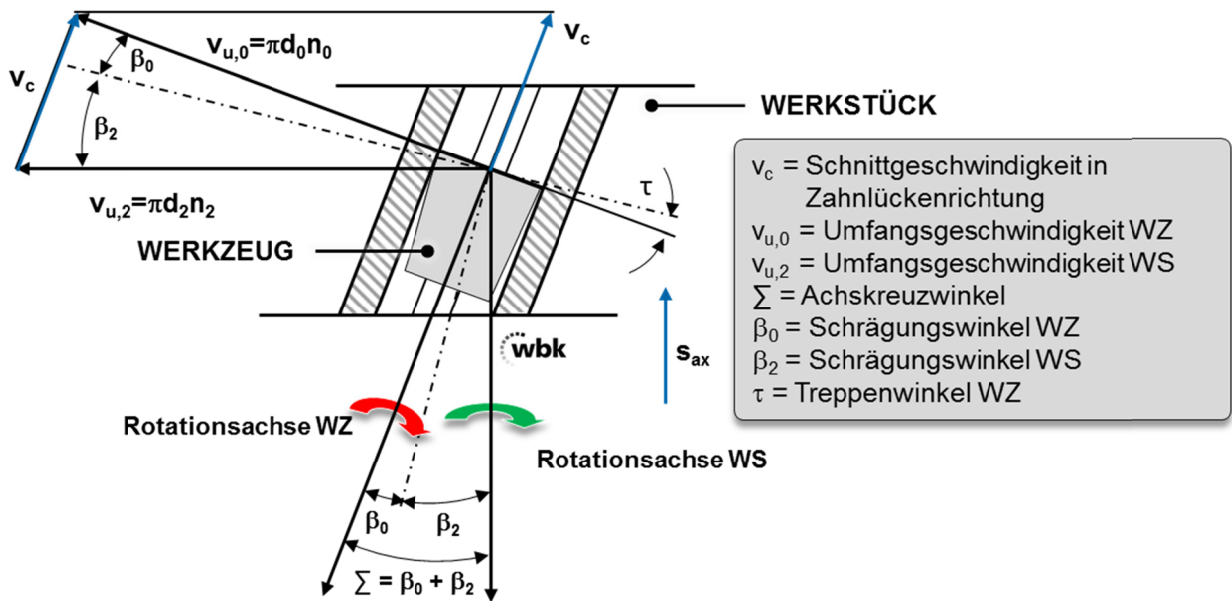


Abbildung 2.10: Komponenten der Schnittgeschwindigkeit

Die Berechnung der Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  kann durch entsprechendes Auflösen der Formel anhand der Umfangsgeschwindigkeit  $v_u$  im Teilkreisradius von Werkstück oder Werkzeug erfolgen (Formel 2-4).

$$v_c = v_{u,0} \cdot (\tan \beta_2 \cdot \cos \beta_0 + \sin \beta_0) \quad \text{Formel 2-4}$$

Diese Beziehung gilt nach [FAU-77] näherungsweise auch dann, wenn das Werkzeug um den Spanflächenversatz  $e$  korrigiert eingestellt ist. Somit folgt allgemein:

$$v_c \approx v_{u,0} \cdot \frac{\sin \Sigma}{\cos \beta_2} = \pi \cdot d_0 \cdot n_0 \cdot \frac{\sin \Sigma}{\cos \beta_2} \quad \text{Formel 2-5}$$

mit  $d_0$  = Teilkreisdurchmesser Werkzeug  
 $n_0$  = Nenndrehzahl Werkzeug

Praktisch sind der Axialvorschub  $s_{ax}$  und gegebenenfalls auch der Differentialvorschub  $s_D$  noch der Bewegung überlagert und vergrößern die Schnittgeschwindigkeit  $v_c$ . Aufgrund deren geringer Anteile können diese allerdings vernachlässigt werden [JAN-80]. Allgemein gilt somit der Zusammenhang:

$$v_c = f(d_{0/2}, n_{0/2}, \beta_{0/2}, \Sigma) \quad \text{Formel 2-6}$$

## Schnittkraft

Die Berechnung der Schnittkräfte für das Wälzschälen beruht wie beim Wälzstoßen und Wälzfräsen auf den Erkenntnissen beim Drehen [HÜH-02] und kann daher mit der Schnittkraftformel von Kienzle [KIE-57] erfolgen.

$$F_c = b \cdot h \cdot k_c = A \cdot k_c \quad \text{Formel 2-7}$$

mit  $k_c = \text{spezifische Schnittkraft [n/mm}^2\text{]}$

$A = \text{Spanungsquerschnitt [mm}^2\text{]}$

Beim Wälzschälen ändern sich im Gegensatz zum Drehen die Spanungsgeometrie und somit auch die Zerspankraftkomponenten während der Spanentstehung. Diese Besonderheit des Verfahrens erschwert die Berechnung der Schnittkraft [JAN-80]. Auch die spezifische Schnittkraft  $k_c$  ist neben dem Werkstoff von der Spanungsdicke und der Werkzeuggeometrie abhängig. Um die Gesamtschnittkraft eines Zahns anzugeben, wird beim Wälzschälen die Schneide in einzelne Bereiche unterteilt (Abbildung 2.11) und die Einzelschnittkräfte dieser Bereiche werden schließlich aufsummiert.

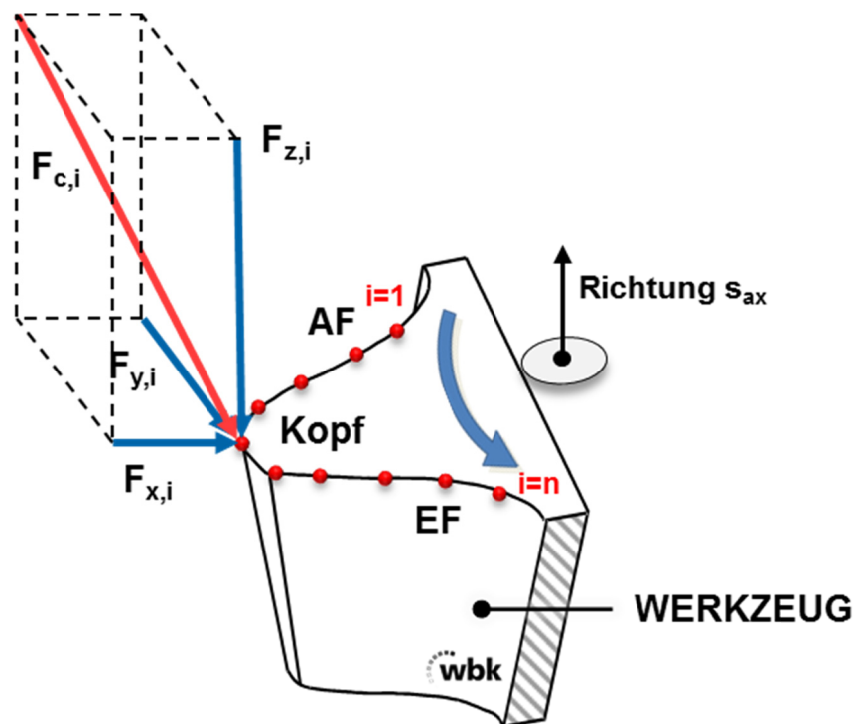


Abbildung 2.11: Schnittkraftvektoren an einem Schneidkantenelement der Schneide [FLE-05]

Die Schneidkante wird dabei gemäß der Definition in einzelne Schneidkantenpunkte (SKP) eingeteilt. Diese sieht vor, dass die Schneidkantenpunkte entsprechend der Drehrichtung und somit von der auslaufenden Flanke über den Kopf zur einlaufenden Flanke gezählt werden.

Die Schnittkraft pro Zahn beträgt

$$F_c = \sum_{i=1}^n F_{c,i} \quad \text{Formel 2-8}$$

mit der Summe der Einzelschnittkräfte der sich im Eingriff befindlichen Schneidkantenelemente:

$$F_{c,i} = A_i \cdot k_c \quad \text{Formel 2-9}$$

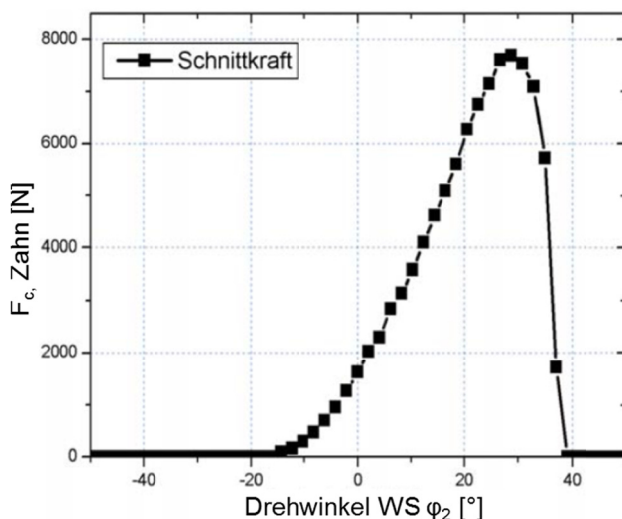


Abbildung 2.12: Schnittkraftverlauf an einem Schneidkantenelement [SCH-02]

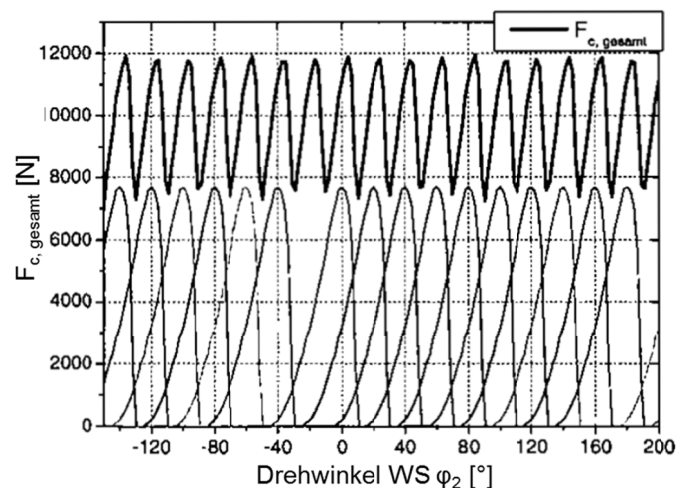


Abbildung 2.13: Gesamtschnittkraftverlauf [HÜH-02]

Aufgrund der Drehbewegung des Werkzeugzahns in der Werkstücklücke ist der Kraftverlauf über einen Schneideneingriff nicht konstant (Abbildung 2.11), somit ist die Darstellung der Schnittkraft in Abhängigkeit des Drehwinkels des Werkzeugzahns sinnvoll [SCH-02, HÜH-02, BEC-06].

Die Gesamtkraft, dargestellt in Abbildung 2.13, sinkt im Gegensatz zu den Einzelkräften der Zähne nie auf null, sondern schwankt um einen konstanten Mit-

telwert. Dieser wirkt als statische Kraft auf die Wälzschälmaschine ein. Bei gleichzeitigem Eingriff nur weniger Zähne ist die Amplitude und somit die Wechselbelastung auf die Maschine groß. Bei großer Überdeckung ist der statische Anteil durch die vielen Zähne größer, die Amplitude jedoch kleiner [HÜH-02].

### ***Ein- und Überlaufweg***

Als Einlaufweg  $l_e$  wird nach [JAN-80] derjenige Weg verstanden, den das Werkzeug in axialer Richtung vom ersten Ankratzen bis zum Erreichen der vollen Tauchtiefe durchlaufen muss. Der Überlaufweg  $l_{\ddot{u}}$  ist der Weg, den das Werkzeug vom ersten Durchstoßpunkt in der unteren Werkstückstirnebene bis zur vollständigen Bearbeitung der Lücke zurücklegen muss.

Die Berechnung der Ein- und Überlaufwege erfolgt nach [JAN-80] und [HÜH-02] anhand einer Betrachtung der Schnittpunkte der Außendurchmesser von Werkzeug und Werkstück in der Stirnebene des Werkstücks, also in Richtung des Axialvorschubs. Das Werkzeug erscheint somit in Abbildung 2.14 als Ellipse. Der erste Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück erfolgt am Schnittpunkt  $P_e$ , der letzte Kontakt am Schnittpunkt  $P_{\ddot{u}}$ .

Die Berechnung der jeweiligen Schnittpunktkoordinaten  $x_e$  und  $x_{\ddot{u}}$  (vgl. Abbildung 2.14) erlaubt nun die Bestimmung der Zusatzwege nach Formel 2-10 und Formel 2-11.

$$l_e = (x_e + e \cdot \sin \Sigma) \cdot \tan \Sigma \quad \text{Formel 2-10}$$

$$l_{\ddot{u}} = (x_{\ddot{u}} + e \cdot \sin \Sigma) \cdot \tan \Sigma \quad \text{Formel 2-11}$$

Neben der Schrägstellung um den Achskreuzwinkel und dem Ausrücken des Werkzeugs um den Betrag des Spanflächenversatzes, ist noch der Werkzeugdurchmesser mitbestimmend für die Größe der Ein- und Überlaufwege. Mit vorgegebenem Modul von Werkstück und somit Werkzeug ergibt sich folgender Zusammenhang (Formel 2-12).

$$l_{e,\ddot{u}} = f(z_0, e, \Sigma) \quad \text{Formel 2-12}$$



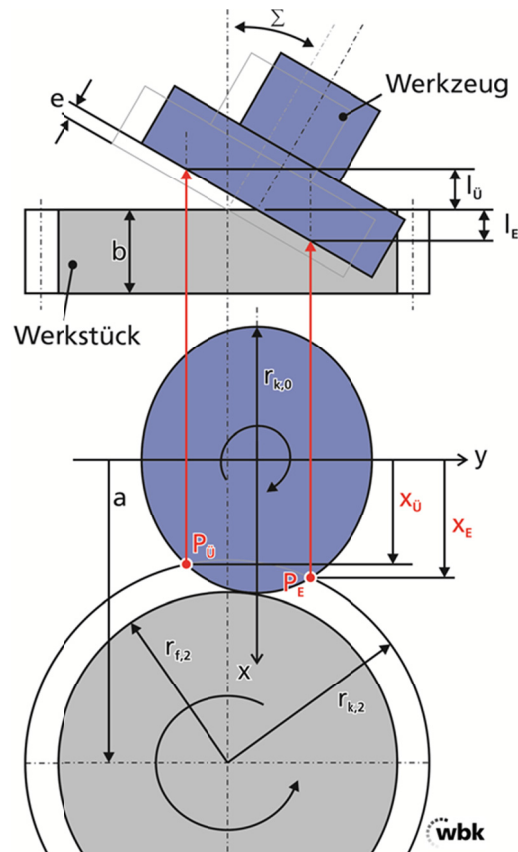


Abbildung 2.14: Ein- und Überlaufwege beim Wälzschälen

### Fertigungshauptzeit

Die Fertigungshauptzeit  $t_h$  beim Wälzschälen ist abhängig von der Rotationsgeschwindigkeit, dem Zähnezahlverhältnis zwischen Werkzeug und Werkstück, dem Betrag des Axialvorschubs sowie des Gesamtbearbeitungswegs. Der Gesamtbearbeitungsweg ist aufgrund der Schrägstellung des Werkzeugs länger als die Verzahnungsbreite  $b$ . Die zusätzlichen Wege werden als Einlaufweg  $l_e$  und Überlaufweg  $l_ü$  bezeichnet und bestimmen die Fertigungshauptzeit wesentlich mit, da sie im Arbeitsvorschub des Prozesses durchlaufen werden müssen. Insbesondere bei kleiner Verzahnungsbreite ist der prozentuale Anteil von Ein- und Überlaufweg von großer wirtschaftlicher Bedeutung.

Die Fertigungshauptzeit berechnet sich mit Kenntnis der erforderlichen Längen nach Formel 2-13.

$$t_h = \frac{Z_2}{z_0 \cdot n_0 \cdot s_{ax}} (b + l_e + l_ü)$$

Formel 2-13

## Prozesswinkel

In den Ausführungen zum Schnittkraftverlauf entlang der Eingriffspunkte ( $i = 1 \dots n$ ) der Schneide, wurde die beim Wälzschälen übliche Darstellung der Eingriffsverhältnisse bereits eingeführt. Analog hierzu zeigt Abbildung 2.15 die Verläufe der effektiven Prozesswinkel beim Werkzeugeingriff. Die dargestellten Prozesswinkelverläufe stehen hierbei exemplarisch für typische Verläufe bei der Bearbeitung einer Außenverzahnung mit einem zylindrischen Werkzeug (Keilwinkel  $\gamma = 90^\circ$ ) und wurden mit der Software zur Werkzeug- und Prozessauslegung von Hühsam berechnet [HÜH-02, BEC-06]. Dabei werden die eingeschlossenen Winkel aus der Richtungsinformation der Schnittgeschwindigkeitsvektoren durch Berechnung des eingeschlossenen Winkels zwischen der Einhüllenden des Werkzeugzahnes bzw. des Schneidkeils und der Richtung des Vektors bestimmt. Dabei setzt die Berechnung der effektiven Freiwinkel die Kenntnis der Spannungszustände voraus [HÜH-02].

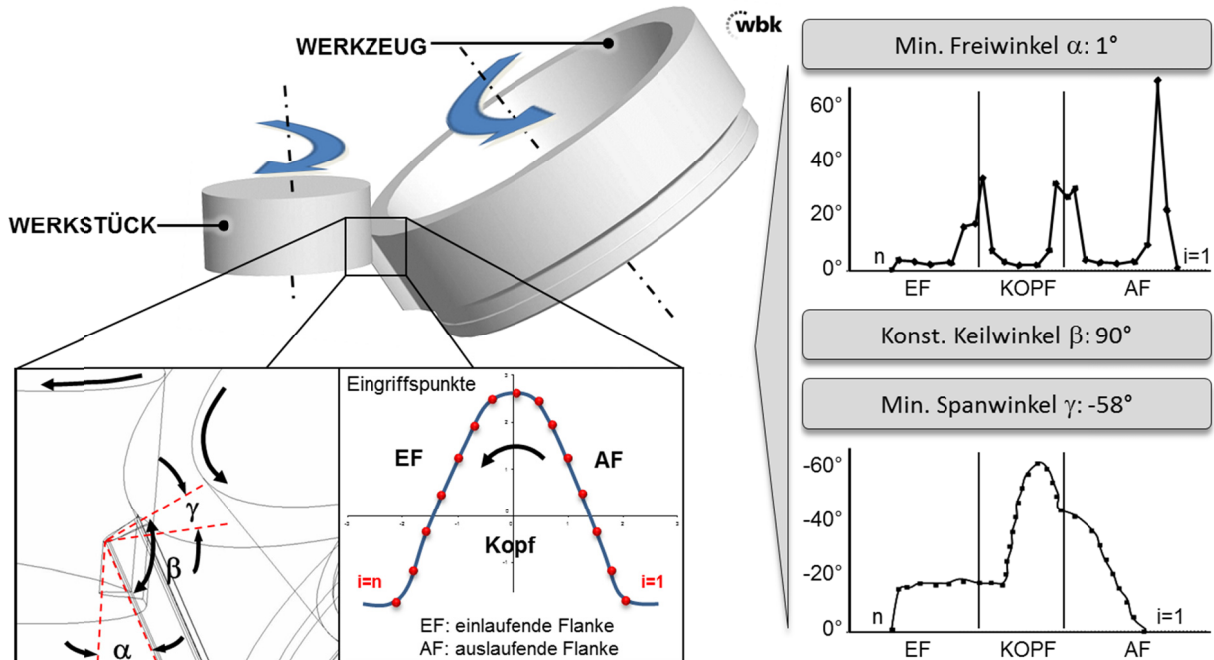


Abbildung 2.15: Verlauf der effektiven Prozesswinkel beim Werkzeugeingriff

Aufgrund der Schneidendrehbewegung beim Werkzeugeingriff ändert sich der Winkel und die Richtung des Schnittvektors kontinuierlich von einem geringen

zu einem großen effektiven Freiwinkel, berücksichtigt werden nur die relevanten Wälzstellungen und ausgegeben in Abbildung 2.15 werden jeweils die minimalen Beträge für die einzelnen Schneidkantenpunkte. Die Eingriffspunkte werden entlang der Schneidkante entsprechend der Drehbewegung bezeichnet. Die Freiwinkelminima liegen im Bereich des Werkzeugkopfes, der effektive Freiwinkel kann hier bis auf nur  $1^\circ$  bis  $2^\circ$  abfallen. Entlang der Flanken lassen sich ebenfalls geringe Freiwinkelbeträge ablesen, im Bereich der Übergänge der Flanken zum Kopf werden aufgrund der Krümmung des Zahnes relativ große Freiwinkel von bis zu ca.  $\alpha = 35^\circ$  erreicht. Beim Wälzschälen liegt immer ein negativer Spanwinkel vor. Beim Eintritt des Werkzeugs über die EF ins Werkstück liegt der Spanwinkel in diesem Beispiel zunächst konstant bei ca.  $-20^\circ$ , fällt im Bereich des Übergangs zum Kopf jedoch auf die Minimalwerte von fast  $-60^\circ$  ab. Vom Kopf bis zum Austritt des Werkzeugzahnes fällt der Spanwinkel entlang der auslaufenden Flanke kontinuierlich ab. Nach [HÜH-02] sind beim Innenschälen ungefähr  $2-3^\circ$  größere effektive Freiwinkel im Kopfbereich zu erwarten, die Spanwinkel sollen ungefähr halbiert werden. Damit liegen bei der Herstellung von Innenverzahnungen nach [HÜH-02] prinzipiell günstigere Zerspanbedingungen vor.

#### **2.1.2.4 Auslegungskenngrößen**

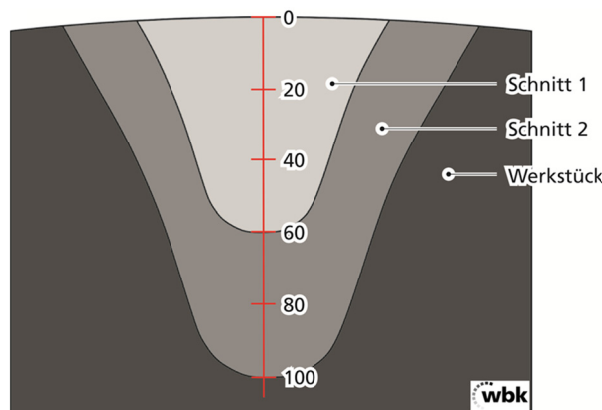
Bei der Werkzeug- und Prozessauslegung für neue Bauteile werden folgende Parameter gewählt bzw. variiert: Übersetzungsverhältnis (Zähnezahl Werkzeug), Achskreuzwinkel (Schrägungswinkel Werkzeug), Profilverschiebung des Werkzeuges, Spanflächenversatz, Drehzahl, Axialvorschub, Schnittstrategie. Die Parameter der Werkzeug- und Prozessauslegung, die bei der Beschreibung der Verfahrensgrundlagen bisher noch nicht beschrieben wurden, sollen im Folgenden erklärt werden.

#### ***Schnittstrategie***

Die Schnittstrategie T sagt aus, wie oft ein Werkstück den Bearbeitungszyklus durchläuft, bis die volle Bearbeitungstiefe erreicht ist. Die Bezeichnung der

Schnittstrategie mit T60/40 gibt zusätzlich an, wie viel Prozent der Gesamtzu-  
stellung bei jedem einzelnen Schnitt bearbeitet werden. In diesem Fall werden  
zunächst 60% zugestellt, die restlichen 40% werden im 2. Schnitt bearbeitet  
(Abbildung 2.16) [HÜH-02].

Grundsätzlich können bei der Auslegung der Schnittstrategie beliebig viele  
Schnittaufteilungen gewählt werden, die höchste Produktivität des Verfahrens  
wird bei einem Vollschnitt (1-Schnittstrategie) erreicht. Die Auslegung muss  
bauteilspezifisch erfolgen, dabei werden die jeweiligen Spannungsbereiche und  
-dicken sowie die Werkzeugbelastungsgrößen berücksichtigt. Die Verwendung  
einer Mehrschnittstrategie erlaubt außerdem, entsprechend einer Schrupp-  
und Schlichtbearbeitung die Drehzahl sowie den Axialvorschub zu variieren.



*Abbildung 2.16: Aufteilung der Einzelschnitte bei einer 2-Schnitt-Strategie  
„Schnittstrategie T60/40“*

### ***Übersetzungsverhältnis***

Das Übersetzungsverhältnis  $i$  gibt das Verhältnis zwischen der Zähnezahl des  
Werkstückes  $z_2$  und des Werkzeuges  $z_0$  an. Im Vergleich zum Wälzfräsen ist  
das Übersetzungsverhältnis beim Wälzschälen deutlich geringer. Bei der Pro-  
zessauslegung besteht die Schwierigkeit, dass einerseits eine große Zähnezahl  
am Werkzeug für hohe Standwege günstig zu beurteilen sind, andererseits  
vergrößert sich dadurch der Werkzeugdurchmesser bei vorgegebenem Modul,  
womit eine größere Überdeckung im Eingriff und damit steigende Bearbei-  
tungskräfte einhergehen. Insbesondere bei der Bearbeitung von Hohlrädern

ist hier der Werkzeugdurchmesser begrenzt. Um die Übertragung und den Einfluss von eventuellen Teilungs- und Rundlauffehlern des Werkzeuges auf das Werkstück zu minimieren, ist ein ungeradzahliges Zähnezahlverhältnis im Erzeugungsgetriebe anzustreben.

## **2.2 Spanbildung mit geometrisch bestimmter Schneide**

### **2.2.1 Theorie der Spanbildung**

Das Eindringen einer Werkzeugschneide verursacht zunächst eine starke Stauchung sowie eine große Scherbeanspruchung des Werkstückmaterials. Im Detail lässt sich die Theorie der Spanbildung am einfachsten anhand des orthogonalen Schnittprozesses beschreiben. Die Spanentstehung wird dabei als zweidimensionaler Vorgang in einer Ebene senkrecht zur Schneide betrachtet [FRI-08]. Die eigentliche Spanabnahme erfolgt durch eine kontinuierliche elastische und plastische Verformung des Materials an der Spitze der Schneide, wenn diese relativ zur Werkstückoberfläche bewegt wird und es dabei zu einer Überschreitung der kritischen werkstoffabhängigen Schubspannung in der Scherebene kommt. Vereinfacht nach dem Scherebenenmodell gleitet dann das Werkstückmaterial lamellenförmig entlang der Scherebene ab (Abbildung 2.17). Die Verformung im Bereich der Scherebene äußert sich in Strukturlinien, die sich am Span nachweisen lassen. Nach Warnecke werden die an der Spanentstehung beteiligten Bereiche des Werkstückes mit einzelnen Zonen (Zonen 1 bis 5, siehe Abbildung 2.17) bezeichnet [WAR-74]. Als unmittelbare Spanentstehungszone wird die primäre Scherzone (Zone 1) bezeichnet. Der Mikrostrukturverlauf im Werkstück geht hier durch einfaches Scheren in den Mikrostrukturverlauf des Spanes über [KLO-08].

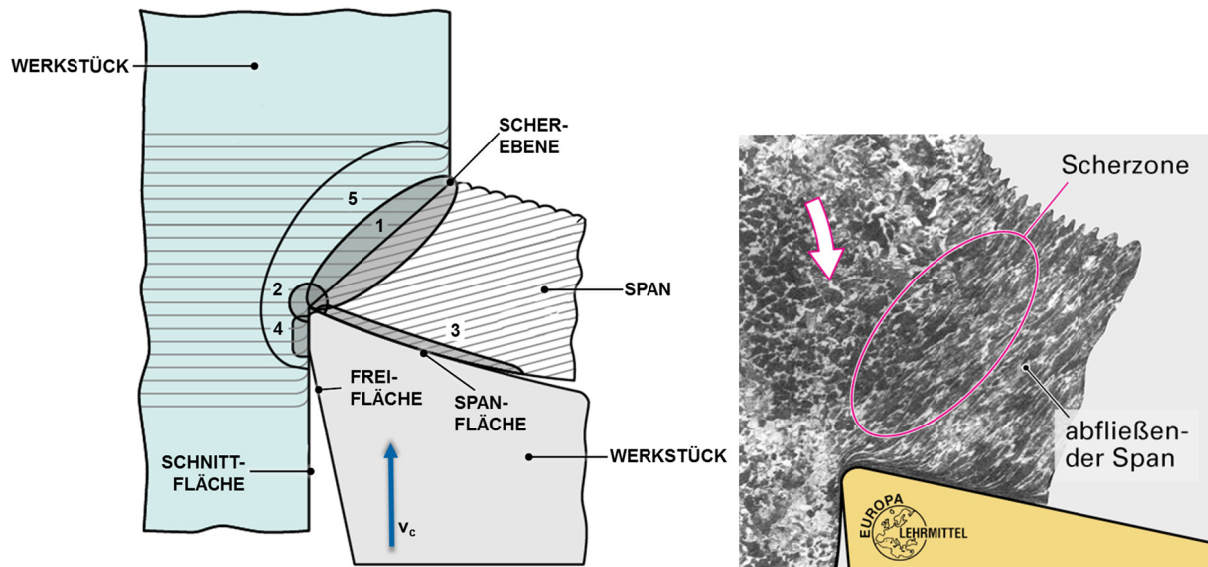


Abbildung 2.17: Spanbildungsmodell und Aufnahme einer Spanwurzel [KLO-08 nach WAR-74; DOB-03]

Bei spröden Werkstoffen kann bereits hier durch eine geringe Verformung die Werkstofftrennung in der Scherebene erfolgen. Bei größerer Verformungsfähigkeit des Werkstoffes erfolgt die Trennung erst vor der Schneidkante im Trenngebiet (Zone 2). Die kontinuierlichen plastischen Verformungen in den sekundären Scherzonen (3, 4) werden hervorgerufen durch Reibung zwischen Werkzeugspanfläche und Spanunterseite (Zone 3) bzw. zwischen Werkzeugfreifläche und gefertigter Werkstückoberfläche (Zone 4). In der Verformungsvorlaufzone (Zone 5) entstehen durch den Spanentstehungsprozess hohe Spannungen, die elastische und plastische Verformungen im Werkstück hervorrufen [FRI-08].

In der Industrie und Forschung werden verschiedene Späne unterschieden. Grundsätzlich werden Späne eingeteilt nach der Art der Entstehung (Spanart) oder nach ihrer Form und Größe (Spanform). Die Art des Spanes hängt zunächst vom Verformungsverhalten des Werkstoffes ab; wesentliche Einflussgrößen des Prozesses sind der Spanwinkel, die Schnittgeschwindigkeit und die Spanungsgrößen. Die Spanarten sind in der Literatur beschrieben [KLO-08].

Als zweites Kriterium beschreibt die Spanform den gebildeten Span. Diese Kategorisierung erfolgt, um einen Zerspanprozess objektiv hinsichtlich der

Handhabung bewerten zu können. Diese Bewertung ist insbesondere bei Verfahren, bei denen sehr unterschiedliche Späne entstehen können, wie z.B. beim Drehen wichtig.

Eine Spanstauchung entsteht durch die genannten Verformungs- und Reibungsvorgänge in den Spanbildungszonen und bewirkt, dass die Spanlänge kürzer als der von der Schneide zurückgelegte Weg durch das Werkstück ist [FRI-08].

Bei unterbrochenem Schnitt, hartem Werkstückmaterial sowie bei der Verwendung von Schneiden aus Hartmetall oder Schneidkeramik ist ein negativer Spanwinkel zu bevorzugen. Weiterhin liegt der Vorteil eines negativen Spanwinkels in der Art der Beanspruchung der Schneide, die eher im Bereich der Druckbeanspruchung liegt und somit günstiger bei stoßartiger Bearbeitung und stoßempfindlichen Schneidstoffen zu beurteilen ist. Beim Wälzschälen liegt durchgängig ein negativer Spanwinkel an, der zusätzlich noch stark variiert. Aufgrund der geringen Spanungsdicken wird der effektive Spanwinkel beispielsweise durch Schneidkantenmodifikationen stark beeinflusst. Der effektive Spanwinkel stellt eine wesentliche Einflussgröße auf die Spanbildung dar. Nimmt beispielsweise der Schneidkantenradius größere Werte als die Spanungsdicke an, so tritt der Einfluss des nominalen Spanwinkels in den Hintergrund, da mit steigendem Schneidkantenradius der effektive Spanwinkel immer stärker negativ wird. Bei Unterschreitung einer Mindestspanungsdicke erfolgt keine Werkstofftrennung und somit keine Spanbildung mehr, die Werkzeugschneide deformiert dann den Werkstoff ausschließlich. Es kommt zusätzlich zu einem Materialstau vor der Schneide, das Material wird gepresst, gequetscht und gleitet an der Freifläche ab. Dieser Vorgang wurde von [ALB-60] beim Orthogonaldrehen untersucht und als „Ploughing-Effect“ bezeichnet, ein Pflügen der Schneidkante durch den Werkstoff.

### **2.2.2 Mehrflankenspäne**

Beim Wälzschälverfahren werden im Vollschnitt üblicherweise Dreiflankenspäne gebildet. Verschiedene Untersuchungen bei anderen Verfahren, bei denen ebenfalls Mehrflankenspäne auftreten, haben gezeigt, dass hierdurch Probleme bei der Spanentstehung auftreten können und ein erhöhter Verschleiß am Werkzeugeckenradius verursacht werden kann [KLO-06, KLO-07]. In den Arbeiten von [KLO-07], die sich mit der Bildung von Mehrflankenspänen beim Kegelradfräsen beschäftigen, wird aufgeführt, dass es im Bereich des Eckenradius zwischen zwei benachbarten Schneiden zu einem erhöhten Volumenstrom an abfließendem Werkstückmaterial kommen muss [KLO-07]. Dann tritt beim Verzahnungsfräsen ein beschleunigter, nicht vorhersagbarer Verschleiß oder Ausbrüche am Eckenradius der Werkzeuge auf. Eine zuverlässige Vorhersage der Werkzeugstandwege und der Bauteilqualität sowie eine prozesssichere Bearbeitung sind damit nur eingeschränkt möglich. In den weiteren Untersuchungen ist vorgesehen, den Einfluss der Werkzeuggeometrie auf die Belastung beim Kegelradfräsen zu untersuchen. Dies erfolgt experimentell und insbesondere simulativ. Bei dem untersuchten Verfahren wird der Mehrflankenspan bei einem gleichzeitigen Eingriff der zusammenhängenden Schneiden erzeugt.

## **2.3 Ansätze zur simulationsgestützten Untersuchung von Zerspanprozessen**

Ziel der Simulation eines Zerspanprozesses ist nach [SCH-06] die Abbildung von zerspanungstechnologischen Vorgängen mit modernen Rechnern, um zukünftig eine Substitution von zeit- und kostenintensiven Zerspanungsversuchen zu ermöglichen. Bei manchen Prozessen, beispielsweise bei Hochleistungszerspanverfahren wie dem Wälzschälen, erlaubt die Simulationstechnologie zudem Einblicke in den Prozess, die mit konventionellen Verfahren nicht oder mit sehr hohem Aufwand möglich sind. Die Simulationstechnologie kann hier - sinnvoll eingesetzt - ein wichtiges Werkzeug zur Generierung des erfor-



derlichen grundsätzlichen Prozessverständnis sein und damit die Möglichkeit der Prozessbeherrschung und -optimierung bieten. Die Simulation ist eine Nachbildung der Realität, die auf Vereinfachungen basiert. Das Ergebnis einer Simulation muss dabei stets überprüft und gegebenenfalls anhand realer Experimente verifiziert werden.

In der Literatur finden sich verschiedene Vorschläge zur Klassifizierung der Ansätze zur Prozesssimulation [zusammengefasst in ZAB-10]. Bei der simulationsgestützten Untersuchung von Zerspanprozessen werden nach [DEN-11] je nach Zielsetzung und Detaillierungsgrad zwei wesentliche Ansätze verfolgt. Bei der kinematischen Simulation wird eine geometrische Simulation des Materialabtrages vorgenommen. Dabei wird die Form des am Werkstück zerspannten Bereichs in diskreten Zeitschritten ermittelt. Zielsetzung dieser Simulationen ist bislang hauptsächlich die Visualisierung und Überprüfung der Prozessplanung. Zukünftig sollen nach [DEN-11] zunehmend die ermittelten geometrischen Informationen zur Berechnung von technologischen Größen, wie z.B. Prozesskräften oder Temperaturen, verwendet werden.

Bei numerischen Berechnungsverfahren wird überwiegend die Finite-Elemente-Methode (FEM) herangezogen. Diese Ansätze betrachten die Vorgänge der Zerspanung sehr viel detaillierter. Dabei kann aber nur ein sehr viel kleineres zeitliches Inkrement und ein kleinerer geometrischer Bereich abgebildet werden. Die Methode sieht zur Beschreibung komplexer geometrischer Strukturen die Diskretisierung durch viele kleine, einfach zu beschreibende Elemente vor [SÖH-03]. Die Lösung des Problems wird zunächst für jedes einzelne Element formuliert. Zur Beschreibung des Verhaltens des Gesamtsystems werden die Elementmatrizen zu einer globalen Matrix angenähert [KLO-08, PAU-10]. Zusätzlich sind Randbedingungen definiert, die auf das System einwirken. Die Zerspannsimulation auf Grundlage netzbasierter numerischer Modelle mit Finite-Elemente Programmen bietet heute die genaueste Möglichkeit, Prozesskenngrößen zu berechnen und einen Zerspanprozess bis hin zu einer detaillierten Spanbildung abzubilden. Ein neuartiger Ansatz neben der

FEM stellt die Finite Pointset Methode (FPM) von [UHL-07] dar. Die Methode erlaubt die Abbildung der hohen Dehnungsraten bei der Zerspanung und des Fließens des Werkstoffs in der Scherzone durch einen gitterfreien Aufbau des Modells.

### **2.3.1 Modellierung von Zerspanprozessen mit FEM**

Die FEM-Zerspannsimulation hat sich in den letzten Jahren zu einem Standardwerkzeug entwickelt. Im industriellen Einsatz wird die FEM zur Optimierung des Zerspanprozesses hinsichtlich der Verringerung des Werkzeugverschleißes und der Reduktion der Schnittkräfte eingesetzt und findet aufgrund der fortschreitenden Entwicklung von Hard- und Softwarekomponenten zunehmend Verbreitung. Die Simulation zu Forschungszwecken hat das Studium der physikalischen Vorgänge bei der Spanbildung zum Ziel und dient dem Aufbau von grundlegendem Prozesswissen. So beschreibt die FEM-Simulation z.B. Temperaturgradienten und Spannungsverteilungen auf der Werkzeugschneide, berechnet Spanformen oder gibt Auskunft über die Relativbewegungen zwischen Span und Werkzeug sowohl in makroskopischen als auch in mikroskopischen Teilgebieten der Schneide. An den wissenschaftlichen Grundlagen der FEM zur Spanbildungssimulation wurde verbreitet gearbeitet [CER-99, BÄK-02, BYR-03, SÖH-03, XIE-04, FOR-06]. Ein allgemeiner Überblick hierzu kann [BÄK-04] entnommen werden.

Nach [VAN-98] können 2D- und 3D-FEM-Simulationen des orthogonalen Schnitts unter Berücksichtigung der thermomechanischen Kopplung als Stand der Technik angesehen werden. In der Anwendung sind bislang zweidimensionale Modelle, oft zur Betrachtung des orthogonalen Schnitts, deutlich stärker vertreten als dreidimensionale Modelle. Die Komplexität der resultierenden Gleichungen steigt bei einem Übergang von zwei auf drei Dimensionen stark an. Damit erhöht sich der Rechen- und Speicheraufwand zur Lösung der sich ergebenden Gleichungssysteme erheblich [PAU-08].

### ***Software für die Modellierung von Zerspanprozessen***

Auf Grund der extrem hohen Verformungen und der komplexen Randbedingungen (Wärmeübergang, Kontakt und Reibung) werden Zerspansimulationen heute nahezu ausschließlich mit kommerziellen FE-Programmen vorgenommen. Eine Übersicht über die verfügbaren Softwaretools sowie deren Verbreitung beim Einsatz für die Modellierung von Zerspanprozessen gibt [HEI-09] zurück bis ins Jahr 1996. Die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Software ABAQUS ist bereits seit vielen Jahren in diesem Bereich stark vertreten.

### ***Anwendungen bei der Untersuchung der Spanbildung***

Zahlreiche Untersuchungen des freien orthogonalen Schnitts zur zweidimensionalen Analyse des Spanablaufes für reale Werkzeuggeometrien mit verrundeten oder auch von verschleißenden Schneidkanten mit kommerziell verfügbaren FEM-Programmen sind bekannt [ALT-03, LEO-04, DEN-05, SIN-07, HÖV-10]. In [SEM-96, MCC-00] wurden dabei auch die Einflüsse komplexer Spanleitgeometrien am Werkzeug auf den Spanablauf simulativ untersucht.

Ebenso wie bei der Untersuchung des Orthogonalschnitts in 2D, ist auch bei diversen Ansätzen eine erfolgreiche Umsetzung von dreidimensionalen FE-Modellen bekannt, die sich auf den Bereich der Analyse von Spanbildungsmechanismen und zur Optimierung von spanenden Prozessen beziehen [FIS-03, SIN-03, ARR-06, ARR-09, AUR-06, DEN-06, UHL-07, ESS-10]. In [PIE-07] wird dabei auch der Einfluss der Reibungs- und Materialgesetze, die im Simulationstool hinterlegt werden, berücksichtigt. Um eine aufwändige dreidimensionale Modellierung beispielsweise kinematischer Bewegungsabläufe und um prinzipiell ressourcenintensive dreidimensionale Simulationsrechnungen zu vermeiden, wird bei Zerspanungs- und Spanbildungssimulationen häufig noch auf vereinfachte Modelle oder Analogieprozesse zurückgegriffen.

Zur Untersuchung der Ablaufbehinderungen der Späne und der Werkzeugbelastung beim Wälz- und Kegelradwälzfräsen wird bei den in Kapitel 2.2.2 erwähnten Untersuchungen von [KLO-07, KLO-11] neben den experimentellen

Untersuchungen insbesondere die Simulation mittels der Simulationssoftware DEFORM 3D eingesetzt. Die Bildung des Mehrflankenspanes wird hier unter strömungsmechanischen Gesichtspunkten betrachtet, die auftretenden Effekte des Werkzeugverschleißes werden erhöhten Materialflussgeschwindigkeiten oder Materialströmen zugeordnet. Bei den Untersuchungen werden geeignete Analogieprozesse nachgebildet, bei denen die simulierte Geometrie einem Ausschnitt des Werkstückes entspricht, der Schnittweg sowie der tragende Körper werden verkürzt dargestellt. Der Werkstückkörper wird mit dreidimensionalen Volumenelementen dargestellt, die Elementkantenlänge beträgt 0,027 mm. Die Bewegung des Werkzeugs entspricht der linearen Bewegung des Werkzeugs im Prüfstand.

Ein weiterer Ansatz zur Simulation des Mehrflankenspanes beim Wälzfräsen mit einem Vergleich des Gleich- und GegenlaufräSENS stellen die Untersuchungen von [BOU-02; BOU-08] dar. Aufbauend auf MATLAB-Berechnungen der resultierenden Zahnücke, werden dreidimensionale FEM-Simulationen durchgeführt, bei denen das Hauptaugenmerk auf der Verifikation der im Realprozess entstehenden Spanform liegt. Dies erfolgt unter Berücksichtigung verschiedener Lösungsverfahren unter Verwendung von DEFORM 3D.

## 2.4 Fazit

Das Wälzschälverfahren stellt eine hochproduktive und flexible Alternative zu den etablierten Verfahren zur Herstellung von Verzahnungen dar, in [FLE-05] wurde eine um 25% geringere Hauptzeit im Vergleich zum Wälzfräsen nachgewiesen. Darüber hinaus bietet das Wälzschälen die Möglichkeit zur Bearbeitung eines erweiterten Bauteilspektrums sowie die Möglichkeit einer Verfahrensintegration. Dem sehr hohen Entwicklungs- und Erfahrungsstand bei den etablierten Verfahren steht beim Wälzschälen, obwohl bereits vor 100 Jahren patentiert und in verschiedenen Ansätzen untersucht, nur ein beschränkter grundlegender Prozesswissensstand gegenüber.

Die ersten Anwendungen des Verfahrens mit Schälapparaten als anzuflansschende Zusatzeinrichtungen für konventionelle Wälzfräsmaschinen scheiterten zunächst aufgrund der ungeeigneten verfügbaren Technologie an Maschinen, Schneidstoffen und Beschichtungen [JAN-80], aber insbesondere an der mangelnden Kenntnis über die Werkzeug- und Prozessauslegung. Die Auslegungen wurden zunächst rein empirisch vorgenommen [EGG-68 aus JAN-80]. In den ersten Untersuchungen des Verfahrens nach wissenschaftlichen Methoden wurde eine rechnerunterstützte Vorgehensweise bei der Auslegung der Werkzeuge und des Prozesses angestrebt [LOO-82, MAR-71, SUL-74, KOJ-77].

Mit den Arbeiten von [HÜH-02] wurde schließlich ein Softwareprogramm zur rechnerischen Auslegung von Schälrädern verfügbar, bei dem ein ganzheitlicher mathematischer Ansatz verfolgt wurde und die Kinematik des Verfahrens abgebildet werden konnte. Dieser und andere Simulationsansätze zum Wälzschälen erfolgten rein mathematisch mit Verschneidungsalgorithmen. Dies erlaubte die Auslegung des Prozesses auf der Basis von berechneten Prozesskenngrößen. Die Bestimmung von Span- und Freiwinkeln im Prozess, unverformten Spanbereichen sowie eine erste qualitative Abschätzung der Prozesskräfte auf Basis von empirischen Modellen, dient als wichtige Entscheidungsgrundlage für die Prozessauslegung.

In umfangreichen experimentellen Untersuchungen zum Wälzschälen wurde die Leistungsfähigkeit des Verfahrens mit Maschinen, Steuerungen, Schneidstoffen und Beschichtungen nach aktuellem Stand der Technik aufgezeigt [BEC-06]. Die Leistungsfähigkeit wurde anhand einzelner Beispielbauteile nachgewiesen, eine universelle Anwendbarkeit kann daraus ohne umfassendes Prozessverständnis allerdings nur schwer abgeleitet werden. Bei den neuesten Untersuchungen wurden zudem auch Defizite bei der Beherrschung des Verfahrens aufgezeigt. Hier sind insbesondere Störungen bei der Spanentstehung zu nennen, die zu Spänenestern und Spanklemmern führen und einer prozesssicheren Serienanwendung entgegenstehen.

Die bis dahin vermuteten Spanbildungsmechanismen mit der Bildung von Mehrflankenspänen und gleichzeitig im Eingriff befindlicher Werkzeugschneiden bedeuten besondere Herausforderungen für die Prozessoptimierung und auch die Werkzeug- und Maschinentechologie. Das grundlegende wissenschaftliche Prozessverständnis fehlt hier jedoch bisher aufgrund fehlender Untersuchungen. Die Werkzeug- und Prozessauslegung muss iterativ erfolgen, die verfügbaren rein mathematischen Prozessmodelle sowie die Erfahrungen aus experimentellen Untersuchungen sind nicht ausreichend, um bei der Prozessauslegung mit Zielkonflikten umzugehen. Aufgrund der nur unzureichenden Kenntnisse über die Belastungszustände an der Werkzeugschneide kann bisher keine zielgerichtete Auswahl und verfahrensspezifische Optimierung der Werkzeuggestalt vorgenommen werden. Die Kenntnis der verfahrensspezifischen Anforderungen ist eine wichtige Basis bei der Auswahl der Werkzeugsubstrate und -beschichtung. Die im Prozess auftretenden Störungen der Spanbildung können aufgrund der komplexen Verfahrenskinetik und der weitestgehend unbekanntesten Spanbildungsmechanismen nur schwer beurteilt werden. Die Zugänglichkeit für eine Untersuchung des Verfahrens ist aufgrund der kinematischen Verhältnisse zusätzlich erschwert.

Gleichzeitig wurde mit den neueren wissenschaftlichen Untersuchungen das Potential des Verfahrens deutlich aufgezeigt. Trotz der teilweise noch unsicheren Prozessbeherrschung ist eine zunehmende Nachfrage von Seiten der potentiellen Anwender des Verfahrens zu verzeichnen. Nachdem dem Markt bisher keine serienmäßigen Wälzschälmaschinen nach aktuellem Stand der Technik zur Verfügung standen, finden sich seit 2007 zunehmend Werkzeugmaschinenhersteller, die Maschinen anbieten oder an der Umsetzung des Verfahrens arbeiten.

Die Bildung von Mehrflankenspänen stellt auch bei anderen Verfahren eine besondere Herausforderung dar. Ziel der Untersuchungen sind hier vermehrt die Beschreibung und Analyse der Spanbildungsmechanismen zur Erklärung zu hohen Werkzeugverschleißes oder Störungen der Prozesssicherheit.

Die FEM-Prozesssimulation hat sich in den letzten Jahren zu einem leistungsfähigen Werkzeug für die Untersuchung und Optimierung von Zerspanprozessen entwickelt. Die FEM wird dabei häufig eingesetzt, um Kosteneinsparung bei der Durchführung umfangreicher Parameterstudien zu erreichen. Bei der Beherrschung von Hochleistungszerspanverfahren, schwierig von außen zugänglichen Prozessen oder einer komplexen Verfahrenskinetik stellt die FEM zudem häufig die einzige Möglichkeit dar, einen detaillierten, zeitlich und lokal hoch aufgelösten Einblick in Spanbildungsmechanismen zu erhalten.

## **3 Zielsetzung der Arbeit und Vorgehensweise**

### **3.1 Zielsetzung**

Die Zielsetzung der Arbeit leitet sich direkt aus dem dargestellten Stand der Technik zum Wälzschälverfahren und den daraus abgeleiteten Defiziten ab, die einer vollständigen Beherrschung des Wälzschälverfahrens entgegenstehen. Das Verfahren stellt demnach eine leistungsfähige Alternative zu den etablierten Verfahren dar und bietet neben der Leistungsfähigkeit insbesondere hohes Potential in Bezug auf die Flexibilität sowie die Möglichkeit einer Verfahrensintegration. Zur nachhaltigen Etablierung am Markt und zur Beherrschung der verfahrensspezifischen Prozessinstabilitäten ist das vollständige Prozessverständnis zu den kinematischen Verhältnissen und insbesondere den Spanbildungsmechanismen gefordert. Aus Voruntersuchungen ist bekannt, dass es beim Wälzschälen zu einer eingeschränkten Prozesssicherheit kommen kann. Dies zeigt sich insbesondere dadurch, dass statistisch verteilt Späne nicht vollständig abgeschält oder Späne nicht aus dem Bereich der Prozesszone abgeführt werden. Die Erarbeitung eines umfassenden Prozessverständnisses über die kinematischen Verhältnisse im Prozess, die bezogen auf das Werkstück durch das Werkzeug beschriebene Bewegungsbahn und insbesondere die wirkenden Spanbildungsmechanismen wird es gestatten, das Wälzschälverfahren zu verstehen und hinsichtlich der Prozesssicherheit zu optimieren.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, die Bildung des Dreiflankenspans beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen wissenschaftlich zu durchdringen und qualitative Kriterien abzuleiten, die die Entstehung von Spanklemmern vermeiden helfen sowie eine Optimierung der Prozesssicherheit ermöglichen. Die Erarbeitung eines umfassenden Verständnisses mit Hilfe von experimentellen und numerischen Untersuchungen über die wirkenden Spanbildungsmechanismen und die im Prozess herrschenden kinematischen Verhältnisse wird es gestatten, basierend auf so bereitgestellten Prozessmodellen das Wälzschäl-



verfahren hinsichtlich der Prozessstabilität zu optimieren. Mit den in dieser Arbeit zu erarbeitenden Erkenntnissen soll eine Auslegung der Werkzeuge und des Prozesses für neuartige Bauteile unterstützt werden.

### 3.2 Vorgehensweise



*Abbildung 3.1: Darstellung der Vorgehensweise bei dieser Arbeit*

Aufbauend auf den bereits bekannten Grundlagen und Besonderheiten des Wälzsälverfahrens besteht der Lösungsansatz zur Erreichung der Zielsetzung in dieser Arbeit darin, zunächst in Versuchen die Basis zum Prozessverständnis zu erweitern und somit die Voraussetzung für die Modellierung des Prozesses zu schaffen. Dazu wird auf einer geeigneten Werkzeugmaschine ein Versuchsaufbau zur Charakterisierung des Prozesses eingerichtet, der die Bestimmung

der Prozesskräfte, relevanter Prozesskenngrößen und der Temperaturen im Werkstück sowie unmittelbar an der Zerspanstelle am Span ermöglicht. Ebenso erfolgt die Untersuchung des Prozesses mittels eines High-Speed Videosystems und eine Charakterisierung der für das Wälzschälen spezifischen Dreiflankenspäne aus den Experimenten.

Einen zentralen Punkt dieser Arbeit stellt die Modellierung des Wälzschälverfahrens mit der FEM-Software ABAQUS/Explicit dar. Mit Hilfe von Kinematikmodellen wird dann die Ablaufbehinderung der Späne dargestellt und untersucht. Daneben werden Spanbildungsmodelle in der Prozesssimulation genutzt, um die Spanentstehung zu beschreiben und gezielt Maßnahmen zu identifizieren, um diese günstig zu beeinflussen. Hierzu wird als Werkstückstoff normalisierter 20MnCr5 exemplarisch herangezogen, der als gängiger Werkstoff bei der Zahnradherstellung zum Einsatz kommt. Die Prozessuntersuchung erfolgt in der Weichbearbeitung. Die bereitgestellten Finiten Elemente Simulationstools können für die Auslegung des Innen- und Außenwälzschälprozesses dienen und auch für die Untersuchung des Hartschälverfahrens angewendet werden.

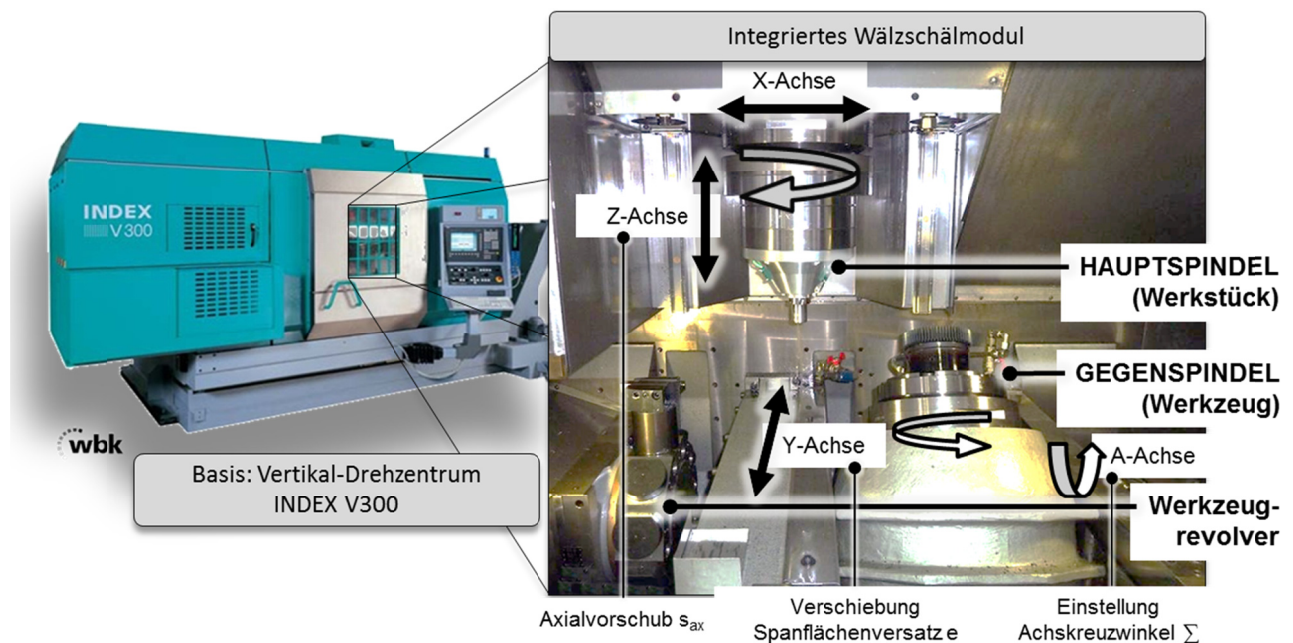
## 4 Versuchseinrichtungen und -durchführung

Im folgenden Kapitel werden die Randbedingungen für die Experimente dargestellt. Dabei werden die relevanten Komponenten der Versuchsmaschine, die Zusatzeinrichtungen zur Bestimmung der Prozesskenngößen, die Werkzeuge und Werkstücke sowie die eingesetzte Mess- und Analysetechnik vorgestellt.

### 4.1 Versuchsmaschine

Die experimentellen Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden auf einer prototypischen Versuchsmaschine durchgeführt, die am Institut für Produktionstechnik (wbk) zur Verfügung steht und speziell für das Wälzschälverfahren modifiziert wurde. Die Maschine basiert auf einem konventionellen vertikalen Drehzentrum für die Schwerzerspannung der Firma INDEX mit der Bezeichnung V300Sonder und stellt die zweite Generation dieses Typs dar, die entsprechend der Erkenntnisse aus Voruntersuchungen optimiert wurde [FLE-05]. In verschiedenen Entwicklungs- und Forschungsprojekten wurde die Eignung der Maschine für die Wälzschälbearbeitung bereits nachgewiesen [SCH-03, FLE-05, BEC-06]. Das Basismodell verfügt standardmäßig über eine vertikal angeordnete Hauptspindel, die für die Wälzschälbearbeitung als Werkstückaufnahme genutzt wird. Die Hauptspindel realisiert die Vorschubbewegungen in x- und z-Richtung sowie die Rotationsbewegung des Werkstücks. In die Maschine wurde ein sogenanntes Wälzschälmodul implementiert (Abbildung 4.1) das die Maschine um eine Gegenspindel erweitert und auf der das Wälzschälwerkzeug montiert wird. Das Wälzschälmodul verfügt neben der Rotationsspindel über eine Vorschubachse in y-Richtung und eine Schwenkachse senkrecht zur y-z-Ebene. Das Modul erlaubt damit die CNC-gesteuerte Einstellung des Achskreuzwinkels durch Schwenken um die A-Achse. Die Einstellung des Spanflächenversatzes wird durch das Modul zusammen mit der Hauptspindel realisiert, indem die komplette Spindeleinheit der Wälzschälbaugruppe in y-Richtung verschoben wird und die Hauptspindel in z-Richtung zur

Korrektur des Achsabstandes nachgeführt wird. Die radiale Zustellung erfolgt durch die Einstellung des Achsabstandes in x-Richtung durch die Hauptspindel. Nach der Einstellung werden die Achsen des Moduls automatisch geklemmt, um ein Spiel bzw. Nachgiebigkeit während der Bearbeitung auszuschließen. Die im Wälzschälmodul verbaute Spindel verfügt über identische Leistungsdaten wie die Hauptspindel, um optimale Bedingungen bezüglich der Leistungscharakteristik und des Synchronlaufverhaltens zu erreichen. Als Maschinensteuerung wird eine SIEMENS Sinumerik 840Dpowerline CNC-Steuerung mit INDEX C200-4D Bedienpult eingesetzt.



**Abbildung 4.1: Versuchsmaschine INDEX V300 Sonder mit integrierter Wälzschälereinheit**

Das Maschinenkonzept verfügt über eine sehr steife Grundkonstruktion und gute Möglichkeiten zur Automatisierung des Prozesses. Die Werkstückspindel erlaubt die automatisierte Aufnahme der Bauteile nach dem „Pick-Up“-Prinzip, die Werkstücke können auf einem Umlaufband bereitgestellt werden. Der große und von vorne und seitlich frei zugängliche Arbeitsraum zeichnete die Maschine besonders für diese Umrüstung aus, das Wälzschälmodul konnte unter Beibehaltung des serienmäßigen 12-fach-Werkzeugrevolvers implementiert werden. Dadurch ist die Maschine für eine Komplettbearbeitung von Ver-

zahnungsbauteilen ohne Umspannoperationen geeignet und auch ohne Umrüstaufwand für andere Prozesse einsetzbar. Im Versuchsbetrieb werden Drehmeißel im Werkzeugrevolver für Entgrat- und Anfasoperationen eingesetzt.

Die freie Zugänglichkeit der Hauptspindel, des Wälzschälmoduls und allgemein zum Arbeitsraum der Maschine ermöglicht den Einsatz verschiedener Einrichtungen zur Prozessüberwachung in unmittelbarer Nähe zur Wirkstelle. Die Beschreibung der Messeinrichtungen zur Kraft- und Temperaturmessung sowie zur Protokollierung verschiedener relevanter Maschinenparameter erfolgt in Kapitel 4.5.

## 4.2 Versuchswerkzeuge

Für die experimentellen Untersuchungen des Wälzschälprozesses wurden sowohl Vollwerkzeuge als auch Analogiewerkzeuge in Form von 3- und 1-Zahn-Versuchswerkzeugträgern eingesetzt.

Die Auslegung der Werkzeuggeometrie erfolgte für alle verwendeten Ausführungen mit Hilfe der Auslegungssoftware des Instituts für Produktionstechnik (wbk), die von Hühsam entwickelt wurde [HÜH-02]. Die Grundform ist zylindrisch, die Werkzeuge sind geradverzahnt und weisen daher keinen Treppenschliff auf. Der für die Auslegung zugrunde liegende Spanflächenversatz beträgt  $e = -20$  mm. Daraus ergeben sich somit für die linke und rechte Flanke der Werkzeugzähne jeweils eigene Profile, die von der Evolventenform abweichend sind.

Die Werkzeuge werden von einem externen Lieferanten bezogen, der auf die Herstellung von Präzisionswerkzeugen spezialisiert ist. Hierfür werden aus den Berechnungen der Auslegungssoftware 3D-CAD-Daten generiert, für eine hohe Profil- und Konturgenauigkeit erfolgt die Angabe des Werkzeugzahnprofils zusätzlich durch hochaufgelöste Splines. Der Herstellprozess sieht zunächst eine Vorverzahnung des Werkzeugrohlings mittels Drahterodieren vor. Die Zahnflanken werden dann im Profilschleifverfahren fertig bearbeitet. Dabei

kann der Schleifzyklus mehrmals durchlaufen werden, nach jedem Durchgang erfolgen die Vermessung mit einer Koordinatenmessmaschine zur Qualitätssicherung und daraus die Ableitung der Korrekturen für den NC-Abrichtprozess [FLE-05].

Die Daten, die sowohl den Vollwerkzeugen als auch den Analogiewerkzeugen zugrunde liegen, finden sich in Tabelle 4.1.

$m_n$	$z_0$	$x_0$	$\beta_0$	$\alpha_0$	$d_a$	$d_0$
[mm]	[-]	[-]	[°]	[°]	[mm]	[mm]
1,75	69 ( 3 / )	0	0	20	125,692	120,75

**Tabelle 4.1: Angaben Vollwerkzeug/Analogiewerkzeug**

Als Grundsubstrat der Vollwerkzeuge (Abbildung 4.2) wurde Feinstkornhartmetall der Sorte TSF22/K30 (Härte 1930 HV30; Dichte 14,55 g/cm<sup>3</sup>) sowie PM-HSS S390 (Härte 68 HRC) eingesetzt (Zusammensetzung siehe Tabelle 4.2). Beschichtet wurden die Werkzeuge mit BALINIT® ALCRONA der Firma Oerlikon Balzers. Vor der Beschichtung erfolgte eine Substratvorbehandlung mittels Mikrostrahlen. Die Vollwerkzeuge wurden eingesetzt für Versuchsreihen zur Kraftmessung, zur Protokollierung von Maschinenvariablen, zur Temperaturmessung im Werkstückinnern sowie zur Spancharakterisierung.

	mittl. Korngröße	% Co	% WC					Biegebruchfestigkeit
TSF22 (K30)	0,4 µm	8,2	91					4400 MPA
	mittl. Korngröße	% Co	% Cr	% Mo	% V	% W	% C	
PM-HSS S390	100 µm	8,0	4,8	2,0	4,8	10,4	1,6	4000 MPA

**Tabelle 4.2: Zusammensetzung Grundsubstrat TSF22 Versuchswerkzeuge**



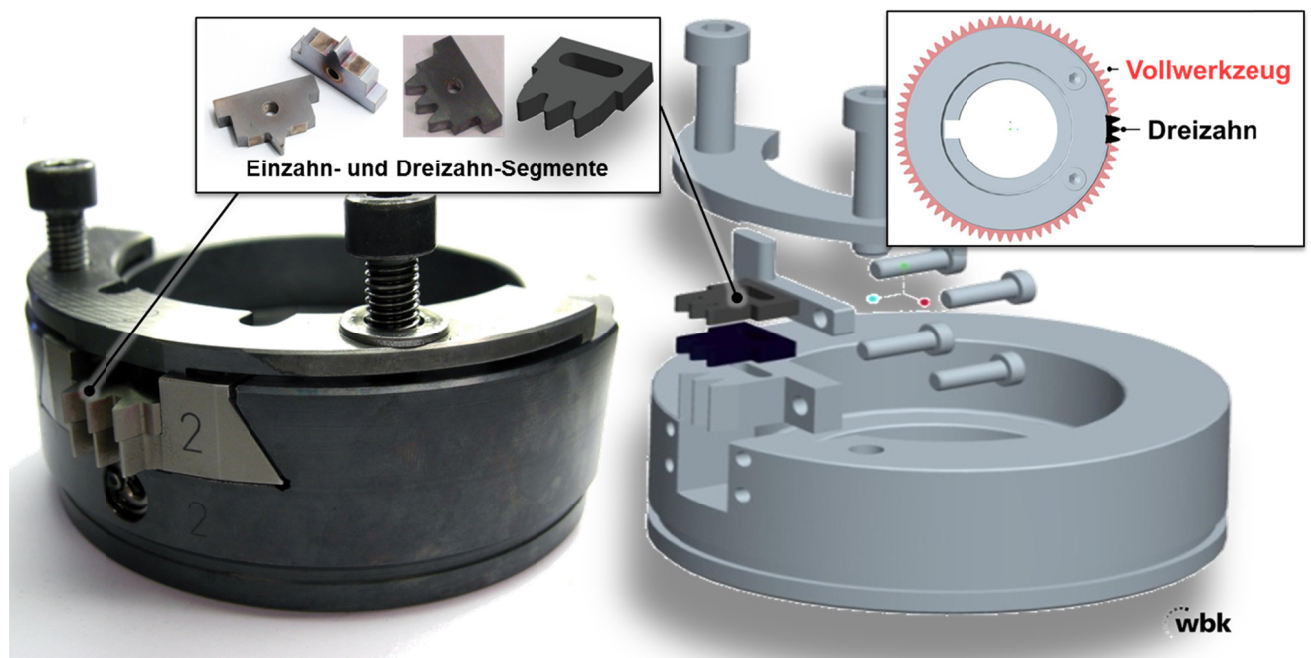
*Abbildung 4.2: Versuchswerkzeug: Vollwerkzeug*

Für verschiedene Versuchsreihen wurden außerdem Analogiewerkzeuge in Form eines Versuchswerkzeugträgers mit eingesetzten Drei-Zahn- und Ein-Zahn-Segmenten verwendet. Dies erfolgte einerseits zur Reduzierung der Kosten und des Zeitaufwandes für die Beschaffung bzw. Handhabung von Versuchswerkzeugen und des Versuchswerkstückmaterials, aber insbesondere zur Durchführung von Versuchsreihen mit einem modifizierten Werkzeug beispielsweise zur Temperaturbestimmung unmittelbar an der Werkzeugschneide sowie zur Erfassung der Spantemperaturen mittels einer pyrometrischen Messeinrichtung. Die Durchführung von Ein- oder Mehr-Zahn-Versuchen als Analogieprozess unter Beibehaltung der Prozesskinematik ist eine verbreitete Methode zur Durchführung von Versuchsreihen. Bereits bei vorherigen Untersuchungen und auch bei anderen Verfahren wurde nachgewiesen, dass eine direkte Übertragung der Erkenntnisse auf den Realprozess möglich ist [DOE-98, BEC-06]. In dieser Arbeit werden 3-Zahn-Werkzeugsegmente eingesetzt, somit werden gegenseitige Beeinflussungen von direkt benachbarten Werkzeugzähnen mit berücksichtigt. Zudem stellt diese Vorgehensweise eine Möglichkeit dar, Ergebnisse der Simulationsrechnungen mit dem Realprozess zu vergleichen. Dies ist insbesondere dann erforderlich, wenn Prozessgrößen von

der Anzahl der im Eingriff befindlichen Schneiden abhängig sind und eine Umrechnung nicht möglich ist.

Für eine vollständige Vergleichbarkeit und einfache Validierung entspricht das Analogiewerkzeug mit 3 Schneiden oder einer Schneide exakt einem Ausschnitt des Vollwerkzeuges (Piktogrammdarstellung in Abbildung 4.3 rechts). Die Abbildung zeigt eine Aufnahme des Werkzeugträgers sowie eine 3D-CAD-Darstellung.

Die Segmente wurden zusätzlich zu den Ausführungen aus Hartmetall (Sorte TSF44, wie Vollwerkzeuge) auch mit PM-HSS als Grundsubstrat eingesetzt. Die PM-HSS-Versionen wurden zunächst für Versuche verwendet, bei denen Modifikationen an der Schneidplatte für Temperaturmessungen mittels Pyrometrie erforderlich wurden. Bei den entsprechenden Versuchsergebnissen wurden die unterschiedlichen Grundsubstrate berücksichtigt. Bei den erfassten Messgrößen unterscheiden sich die verschiedenen Substrate jedoch lediglich hinsichtlich der erreichten Standmengen.

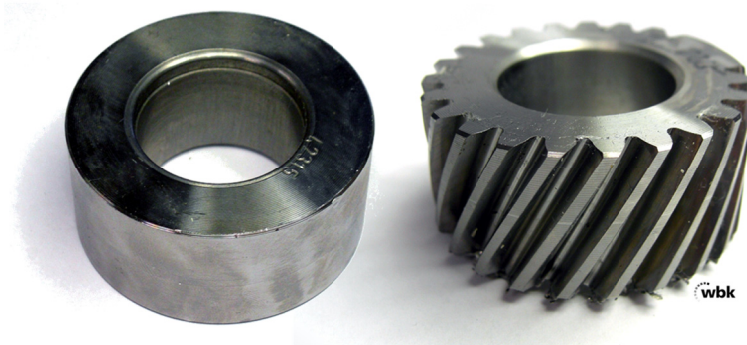


*Abbildung 4.3: Versuchswerkzeug: Analogiewerkzeugträger mit zugehörigem Ein- und Drei-Zahn-Segment*



### 4.3 Versuchswerkstücke

Für die durchgeführten experimentellen Untersuchungen wurde ein Versuchswerkstück herangezogen, das aufgrund der Abmessungen, der Zähnezahl, des Moduls und der Eingriffs- sowie Schrägungswinkel ein Standardbauteil darstellt, welches in ähnlicher Form in der Industrie in hohen Stückzahlen zu finden ist (Abbildung 4.4).



*Abbildung 4.4: Rohling und bearbeitetes Versuchswerkstück*

Die gefertigten Bauteile sind schrägverzahnnte Stirnräder mit einem Normalmodul von  $m_n = 1,75$  mm und einer Zahnhöhe von  $h = 4,22$  mm. Eine vollständige Aufstellung der relevanten Verzahnungsangaben sind in Tabelle 4.3 zu finden.

$m_n$	$z_2$	$x_2$	$\beta_2$	$\alpha_n$	$b$	$d_a$	$d_f$	$d$	$d_0$
[mm]	[-]	[-]	[°]	[°]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
1,75	23	+0,270	28,5	20	23	50,245	41,803	45,8	42,315

*Tabelle 4.3: Angaben Referenzbauteil*

Als Material kam konventioneller, für Getriebeteile häufig verwendeter Cr-Mn-legierter Einsatzstahl (20MnCr5, EN10084, 1.7147, SAE5120), im Rohmaterial als gewalzter Rundstahl (nach DIN1013) geliefert, zum Einsatz. Im weichgeglühten Zustand (DIN EN 10058) besitzt der Werkstoff eine maximale Härte von 217 HB. Je nach Herstellmethode und Probengeometrie weist der Werkstoff eine Zugfestigkeit  $R_m$  von ca.  $720$  N/mm<sup>2</sup> auf. Der Prozess des Weich-

glühens erfolgte bei 650°C/1h mit einer anschließenden Abkühlung im Ofen. Das Material kann im Anschluss an die Weichbearbeitung einsatzgehärtet werden. Die Legierungsbestandteile gemäß Vorgaben sind in Tabelle 4.4 aufgeführt.

C	Si	Mn	Cr	S	Ni	Mo	Cu	Al
[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
0,212	0,169	1,333	1,276	0,011	0,059	0,025	0,025	0,033

*Tabelle 4.4: Zusammensetzung 20MnCr5*

Durch die Material- und Bauteilwahl ist sichergestellt, dass das entwickelte Materialmodell, die Modelle des Wälzschälprozesses und die nachfolgend dargestellten Erkenntnisse einfach auf weitere Anwendungsfälle übertragbar sind.

#### 4.4 Prozess

Für die untersuchte Werkzeug-Werkstück-Kombination ergeben sich damit nachfolgende Grundparameter des Erzeugungsgetriebes (Tabelle 4.5).

$\Sigma$	i (WZ:WS)	e	$a_0$
[°]	[-]	[mm]	[mm]
28,5	3:1	-20	83,7476

*Tabelle 4.5: Parameter des Erzeugungsgetriebes*

Zum Vergleich der in den Untersuchungen variierten Schnittstrategie und zur Beurteilung der Prozessergebnisse werden in Tabelle 4.6 die zugehörigen Spanvolumina der Einzelschnitte angegeben. Die aufgeführten Werte sind auf einen Axialvorschub von  $s_{ax} = 0,15$  mm/WSU bezogen. Wie bereits oben ausgeführt ergibt sich aus der Angabe der Schnittstrategie die prozentuale Aufteilung der Zustelltiefe für den jeweiligen Schnitt. Dies ist nicht gleichzusetz-

ten mit dem jeweils vorliegenden Anteil am Spannungsvolumen. In Tabelle 4.6 werden diese Angaben zusätzlich in Klammern angegeben.

	T100/0	T70/30	T60/40	T30/70
	[mm <sup>3</sup> ]	[mm <sup>3</sup> ]	[mm <sup>3</sup> ]	[mm <sup>3</sup> ]
Schnitt 1	3,6673 (100%)	2,0537 (56%)	1,6869 (46%)	0,5868 (16%)
Schnitt 2	-	1,6136 (44%)	1,0115 (54%)	3,0805 (84%)

*Tabelle 4.6: Vergleich der Spannungsvolumina pro Schnitt verschiedener Schnittstrategien*

## 4.5 Charakterisierung der Prozessergebnisse

### 4.5.1 Kraftmessungen

Die Zerspankraftmessungen wurden mit Hilfe einer am Institut für Produktionstechnik (wbk) [FLE-05, BEC-06] für die Wälzschälmaschine INDEX V300Sonder entwickelten Kraftmessplattform durchgeführt, die hinter dem Werkstückspanndorn in der Hauptspindel der Versuchsmaschine angebracht ist und dadurch eine direkte und wirkstellennahe Messung ermöglicht. Die Kräfte werden damit im Prozess mit Hilfe von piezo-elektrischen Elementen an der rotierenden Werkstückspindel aufgenommen und über eine Drehübertragungseinheit zur stehenden Auswerteperipherie übertragen (Explosions- und Schemazeichnung siehe Abbildung 4.5).

Die Verwendung von Piezoelementen bietet den Vorteil einer nahezu weglosen Messung mit geringer Temperaturabhängigkeit und hoher Eigenfrequenz sowie einer geringen Empfindlichkeit gegenüber Störgrößen. Durch die kompakte Baugröße der Sensoren konnten sämtliche Komponenten in die Spindel integriert werden.

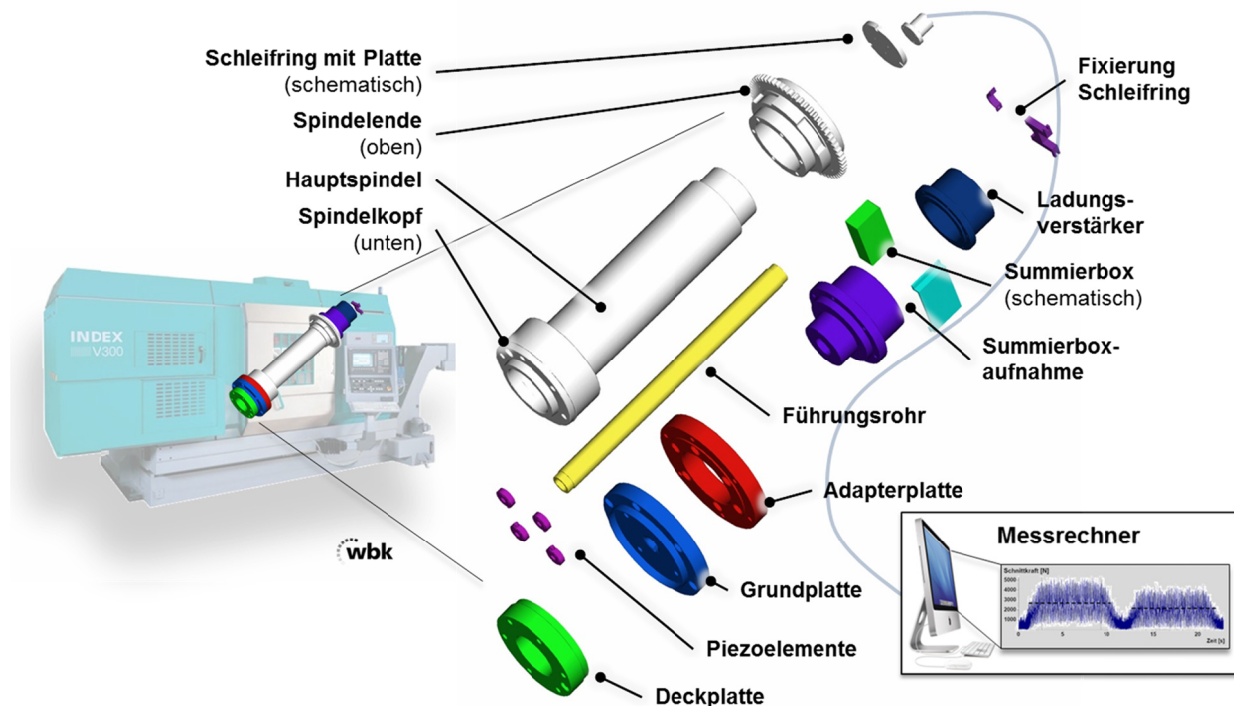


Abbildung 4.5: INDEX V300 wbk-Kraftmessplattform

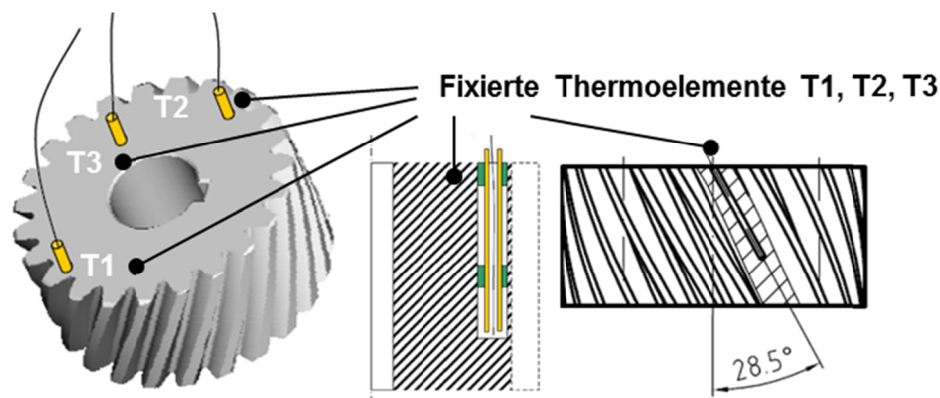
Die Bearbeitungskräfte werden über die Deckplatte in das System eingeleitet und auf den Kraftsensor mit drei baugleichen Quarzkristall-Plattenpaaren zur Bestimmung der x-, y- und z-Komponenten übertragen. Die Sensoren der x- und y-Komponenten werden auf Schub beansprucht, die der z-Komponenten auf Zug. Die Messgrößen werden in ihre 3 Komponenten zerlegt, das Messsignal über ein magnetisch abgeschirmtes Führungsrohr auf den Schleifringdrehüberträger geleitet und von dort an den Messrechner weitergegeben und verarbeitet. Die Kalibrierung der einzelnen Kanäle wurde mittels einer genormten Zugmaschine durchgeführt.

#### 4.5.2 Temperaturmessungen

Als weitere wesentliche Prozesscharakterisierung wurden der zeitlich und lokal aufgelöste Temperaturverlauf und die Temperaturverteilung im Rahmen dieser Arbeit während des Zerspanprozesses bestimmt. Hierzu wurde die Temperatur an verschiedenen Stellen im Bauteil sowie direkt an der Schneidkante und der Spanunterseite experimentell bestimmt.

### ***Temperaturmessung im Werkstückinnern***

Zur Temperaturbestimmung im Bauteilinnern wurden Mantelthermoelemente mit sehr kurzer Ansprechzeit verwendet, bei denen die Thermopaare gegen den Mantel isoliert verschweißt sind. Die Isolierung ist erforderlich, da sich die Enden der Thermoelemente bei der Messung in Bohrungen im Bauteilinnern befinden und störende Einflüsse des Maschinensystems zu vermeiden sind. Die Temperaturmessung kann Aufschluss über die eingebrachte Wärmemenge zur Verifikation der Simulationsmodelle geben, die über eine reine Messung im oberflächennahen Bereich nicht möglich wäre. Für die Versuche ist eine spezielle Präparation der Versuchswerkstücke vorgesehen, indem Bohrungen gemäß Abbildung 4.6 eingebracht werden.



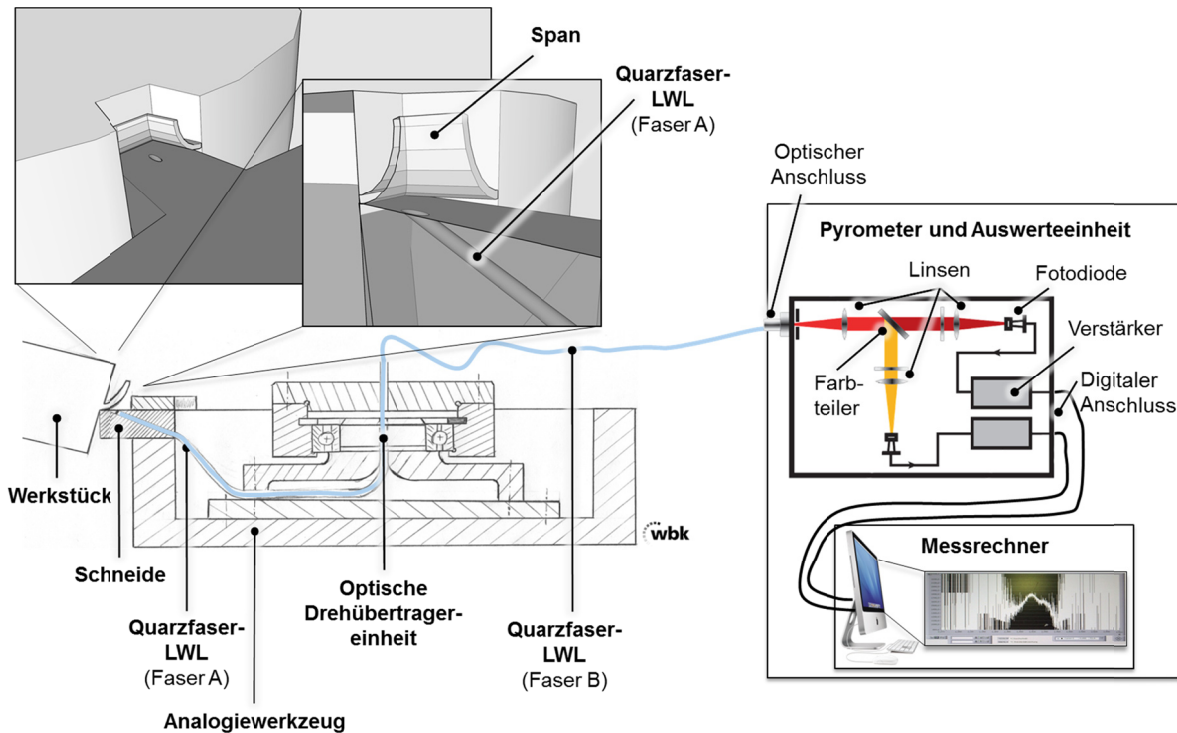
***Abbildung 4.6: Temperaturmessung an 3 Messpositionen im Bauteilinnern mittels Thermoelementen***

Der Versuchsaufbau zur Temperaturbestimmung im Bauteilinnern besteht aus 3 Stück Nickel-Chrom-Nickel (NiCr-Ni)-Thermoelementen vom Typ K mit einer Genauigkeit von  $\pm 1,5^\circ\text{C}$  über den Messbereich von  $-40^\circ\text{C}$  bis  $1000^\circ\text{C}$ . Es wird an 3 verschiedenen Positionen gemessen, diese sind versetzt auf verschiedenen Radien angeordnet (T1, T2 und T3; vgl. Abbildung 4.6). Die Messungen sollten dabei möglichst nahe an der Zerspanstelle erfolgen, Messposition T1 liegt direkt im Werkstückzahn zwischen zwei Zahnlücken auf dem Teilkreisradius und muss daher entsprechend des Schrägungswinkels  $\beta_2$  des Bauteils geneigt sein, um bei der Bearbeitung nicht beschädigt zu werden. Eine exakte Ausrichtung der Drehwinkelposition des Bauteils ist ebenfalls erforderlich. Um

den Wärmeübergang vom Werkstück zum Thermoelement zu fördern, wird in den Bohrungen Thermopaste eingebracht und die Thermoelemente so fixiert. Die Ausgleichsleitungen werden innerhalb der rotierenden Hauptspindel nach oben geführt, das Messsignal wird dann über eine Temperatur-Messumformerplatine GNTP sowie einen Schleifringdrehübertrager auf die Auswerteeinheit übergeben. Die Signalverarbeitung erfolgt mit der Messwertfassungssoftware DASyLab 6, als Auswertungssoftware kommt das Datenanalyseprogramm OriginPro 8.5 zum Einsatz.

### ***Temperaturmessungen im Bereich der Zerspanstelle***

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Messungen unmittelbar im Bereich der Werkzeugschneide zur Erfassung der Temperatur an der Unterseite der in der Entstehung befindlichen Späne durchgeführt. Aufgrund der Kinematik des Wälzschälverfahrens mit der entsprechenden Anordnung von Werkzeug und Werkstück und des somit im Eingriffsmoment schwer zugänglichen Untersuchungsbereichs, des Weiteren wegen der sehr kurzen Eingriffsdauer pro Schnitt und den zwei rotierenden Spindeln wurde ein spezieller Versuchsaufbau mit einer pyrometrischen Messeinrichtung realisiert. Der Einsatz eines Pyrometers ermöglicht eine hochaufgelöste Erfassung der Temperaturen im interessanten Bereich und eine Signalübertragung mittels Glasfasertechnik von der rotierenden Messstelle bis zur stehenden Auswerteeinheit (Abbildung 4.7). Die Messungen wurden mit einem faseroptischen Zwei-Farben-Pyrometer mit einer hohen zeitlichen Auflösung durchgeführt. Das verwendete Gerät mit der Bezeichnung FIRE-2 (Fibre-optic ration pyrometer) ist eine Entwicklung des Lehrstuhles für Wärme- und Stoffübertragung der RWTH Aachen [LEL-05].



**Abbildung 4.7: Schematischer Versuchsaufbau zur Temperaturmessung im Bereich der Zerspanstelle (Pyrometeraufbau nach [MÜL-04])**

Das gesamte vom Objekt abgestrahlte Spektrum an Infrarotstrahlung wird an der zu messenden Oberfläche aufgefangen, Quarzfasern leiten die Strahlung in das Pyrometer. Im Pyrometer wird die Strahlung mit einer achromatischen Linse parallelisiert und mit einem dichroitischen Spiegel (Farbteller) in 2 Spektren (1650 und 1950 nm) aufgespalten. Im Innern des Gerätes filtern Bandpassfilter dann 100 nm breite Wellenlängenbereiche heraus. Mit Linsen werden die beiden Strahlen schließlich zur Messung auf zwei verschiedene Fotodetektoren fokussiert. Aus dem Verhältnis der beiden Intensitäten kann dann unter Zuhilfenahme der Strahlungsgesetze die Temperatur errechnet werden [MÜL-00; MÜL-04]. Neben der sehr hohen zeitlichen Auflösung erlaubt die berührungslose Messung mit dem FIRE-2 die hochgenaue Messung der Absoluttemperatur an Oberflächen mit unbekanntem Emissionsgraden.

Der Versuchsaufbau (Abbildung 4.7) sieht vor, dass das Quarzfaserkabel (Lichtwellenleiter LWL Faser A) in das Schneidwerkzeug eingebettet ist. Hierzu wurden exakt ausgerichtete Bohrungen mit dem EDM-Verfahren eingebracht

und die Faser (Durchmesser 450  $\mu\text{m}$ ) darin fixiert. Der Lichtwellenleiter wird vom hinteren, unteren Teil des Drei-Zahnsegmentes schräg nach oben in den Bereich der Hauptschnittfläche des Werkzeuges geführt und ist durch den Austrittswinkel direkt auf die Unterseite des entstehenden Spanes gerichtet. Die erfasste Strahlung wird durch Faser A ausgehend vom Werkzeug in den mitdrehenden Teil des Drehübertragers geleitet, in dem Faser A endet. Aufgrund der besonderen Anforderungen wegen des begrenzten zur Verfügung stehenden Bauraumes und der hohen Drehzahlen konnte auf keine handelsübliche Komponente zurückgegriffen werden. Für den Versuchsaufbau wurde ein spezieller Drehübertrager entwickelt, der in den Analogieversuchswerkzeugträger integriert wurde. Die Übertragung von Faser A auf Faser B, die im optischen Anschluss der Pyrometerhaupteinheit endet, erfolgt über einen Luftspalt. Die beiden Fasern sind in Messingbuchsen jeweils in der stehenden bzw. drehenden Komponente fixiert und kollinear zueinander ausgerichtet. Die stehende Komponente wird mit zwei Halterungsblechen ausgerichtet und fixiert.

Nach Untersuchungen von [SAT-07] wirkt sich die durch die Übertragung über den Luftspalt entstehende Dämpfung nicht auf das Messergebnis aus. Zwar wird die Intensität der Strahlung dadurch insgesamt gemindert, das für die Temperaturbestimmung notwendige Verhältnis der Strahlungsintensitäten bleibt jedoch gleich. Da die Dämpfung des Signals mit steigender Größe des Luftspalts ansteigt, wurde beim wbk-Drehübertrager der Abstand zwischen Faser A und Faser B mit ca. 150  $\mu\text{m}$  sehr gering gehalten. Die Lagebeziehung der Faserachsen wirkt sich ebenfalls auf die Dämpfung aus, die Fixierung und exakte kollineare Ausrichtung der Komponenten ist durch die Anordnung und Verwendung von geeigneten Kugellagern gewährleistet.



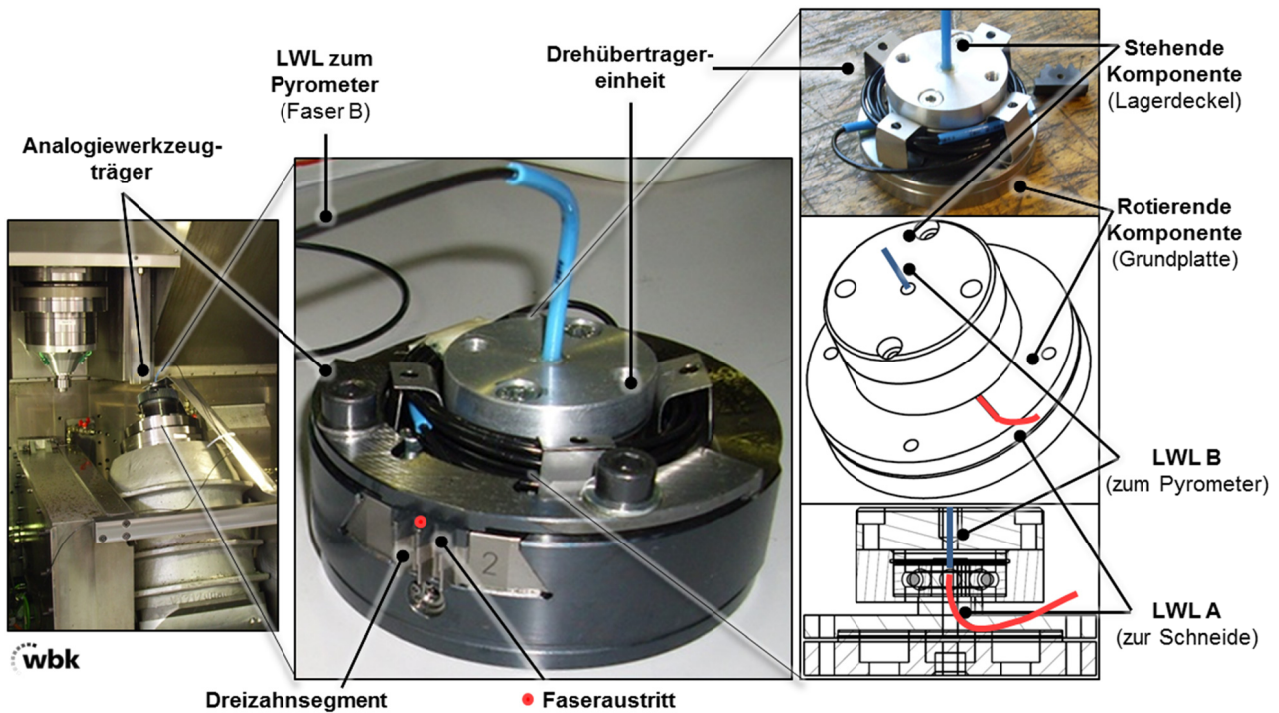


Abbildung 4.8: Drehübertragereinheit

Der Versuchsaufbau wurde bei Werkzeugdrehzahlen von bis zu  $n_0 = 1200$  1/min getestet und mit Vergleichsmessungen bei direkt am Pyrometer angeschlossenen Lichtwellenleitern abgeglichen. Dabei wurde ein Prüfkörper auf eine Temperatur von  $500^\circ\text{C}$  erwärmt und gemessen. Die Referenzmessung erfolgte mit einem geeichten Infrarot-Pyrometer (Impac IN530). Dabei wurde eine gemittelte Abweichung von  $\Delta T = +12,2^\circ\text{C}$  festgestellt. Dieser Wert wurde als Kalibrierungskorrekturwert verwendet. Aufgrund des stärkeren Rauschens des Messsignals ist davon auszugehen, dass die Abweichung insbesondere durch zusätzlich erforderliche Glättungen der Messkurven auftritt.

Bei den Versuchsläufen zur Temperaturmessung im Bereich der Zerspanstelle wurde Kühlschmierstoff (KSS) eingesetzt. Dabei wurde bei der Anordnung und Ausrichtung der Spüleinrichtungen sichergestellt, dass es zu keiner Beeinflussung des Messergebnisses durch direkten KSS-Kontakt kommen konnte. Bei Vergleichsmessungen mit und ohne KSS zeigte sich kein verfälschtes Ergebnis. Bei Pyrometermessungen beim Drehen mit einer ähnlichen Vorgehensweise konnte [UED-06] ebenfalls in seinen Arbeiten nachweisen, dass mit der ent-

sprechenden Anordnung sichergestellt werden kann, dass kein Kühlschmierstoff in die Kontaktzone zwischen Span und Werkzeug gelangt und dass so das Ergebnis unbeeinflusst bleibt.

### 4.5.3 Spancharakterisierungen

Zur mikroskopischen und makroskopischen Charakterisierung der Späne des Wälzschälprozesses wurde im Rahmen der Arbeit eine einheitliche Vorgehensweise zum Sammeln, Vorbereiten, Lagern und Auswerten der Proben festgelegt. Zum Auffangen und Sammeln der Späne wurde eine Vorrichtung im Arbeitsraum der Maschine integriert. Diese besteht aus Winkelblechen, die die Späne auffangen, und einer Sammelbox mit einer Grundfläche von 10 cm x 7 cm. Die Position und Ausrichtung der Auffangvorrichtung ist für alle Versuche einheitlich und wurde so gewählt, dass für sämtliche Untersuchungsparameter die Spanflugrichtung berücksichtigt ist und reproduzierbar für alle Variationen einheitlich die Späne für die weitere Untersuchung gesammelt werden können. Insbesondere bei Variation der Drehzahlen verändert sich die Hauptflugrichtung der Späne. Die gesammelten Späne werden anschließend mit Lösungsmittel gewaschen, um evtl. anhaftendes Kühlschmiermittel zu entfernen. Die Proben wurden dann auf einem Reinigungsgestell mit Stoffbezug getrocknet und schließlich in Papiertüten gelagert.

Zur Untersuchung der Proben wurde ein Mikroskop der Firma Zeiss des Typs Stemi SV11 mit ringförmiger Kaltlichtquelle (KL1500electronic) und integrierter Farbdigitalkamera (AxioCam) eingesetzt. Die Aufnahme der Bilder und anschließende Auswertung erfolgte am PC mit der Software AxioVision der Firma Zeiss. Die Vorgehensweise sah vor, dass jeweils Aufnahmen von 10 charakteristischen Spänen einer Parameterkombination erstellt und diese mit Hilfe der Software manuell digital vermessen sowie untersucht wurden.

Zur Ermittlung des Gewichts der Späne wurde eine Waage mit einer Anzeigegenauigkeit von  $1 \times 10^{-4}$  g verwendet. Dies ist bei Einzelgewichten der Späne zwischen  $7 \times 10^{-3}$  g und  $50 \times 10^{-3}$  g notwendig, um eine ausreichende Genauig-

keit der Messungen zu gewährleisten. Um Fehler aufgrund der Varianz des Gewichts einzelner Späne einer Probe und aufgrund von Ungenauigkeiten in der Messung zu minimieren, wurden immer mehrere Späne gleichen Typs gewogen und daraus das mittlere Gewicht eines Einzelspans bestimmt.

## 4.6 Simulationsumfeld

Die Finite-Elemente Methode (FEM) ist ein mathematisches Verfahren, das zur Lösung von Differentialgleichungen verwendet werden kann, um das Verhalten von Strukturen zu beschreiben. Finite-Elemente Simulationen stellen heutzutage einen Standard dar, wenn es um die Modellierung von Prozessen in der Produktionstechnik zur systematischen Analyse geht. Im Rahmen dieser Arbeit wird zur dreidimensionalen modellhaften Beschreibung des Wälzschälverfahrens das Finite-Elemente Programm ABAQUS FEA der Firma SIMULIA® in der Version 6.10-2 und 6-11 eingesetzt. Die eingesetzte Software ist ein Multi-Purpose-Tool, eine Software, die nicht speziell für die Spanbildungssimulation entwickelt wurde, sondern durch ihre vielfältige Funktionalität für eine sehr große Anwendungsbreite geeignet ist. Der dynamische Prozessablauf bei der Spanbildung des Verfahrens macht die Verwendung des expliziten Gleichungslösers der Software ABAQUS/Explicit erforderlich.

Die prinzipielle Vorgehensweise bei der Erstellung der Modelle und der Durchführung der Simulationsstudien in dieser Arbeit orientiert sich dabei am grundlegenden Ablauf von Untersuchungen mittels Finite-Elemente Simulation. Entsprechend dieser Vorgehensweise sind die einzelnen Schritte Abbildung 4.9 zu entnehmen und werden im Folgenden allgemeiner erläutert. Die einzelnen Schritte werden dann detailliert bei der Beschreibung der Modellierung und der Durchführung der Simulationsstudien im Verlaufe dieser Arbeit aufgegriffen.

Ausgehend vom Realprozess erfolgt im **Preprocessing** zunächst die Teilegenerierung oder gegebenenfalls der Import der Geometrie. Dabei kommt der Idealisierung eine besondere Bedeutung zu. So muss eine Vereinfachung vor-

genommen werden, ohne dabei relevante Merkmale zu verlieren. Beim Wälzschälverfahren, bei dem im Realprozess zahlreiche über den Werkzeugumfang angeordnete Schneiden am Prozess beteiligt sind, kommt im Rahmen der Idealisierung auch der Festlegung auf einen geeigneten Ausschnitt des Gesamtsystems eine wichtige Bedeutung zu. Für eine wirtschaftliche Durchführbarkeit einer Simulationsstudie ist ein möglichst hoher Abstrahierungsgrad zu finden.

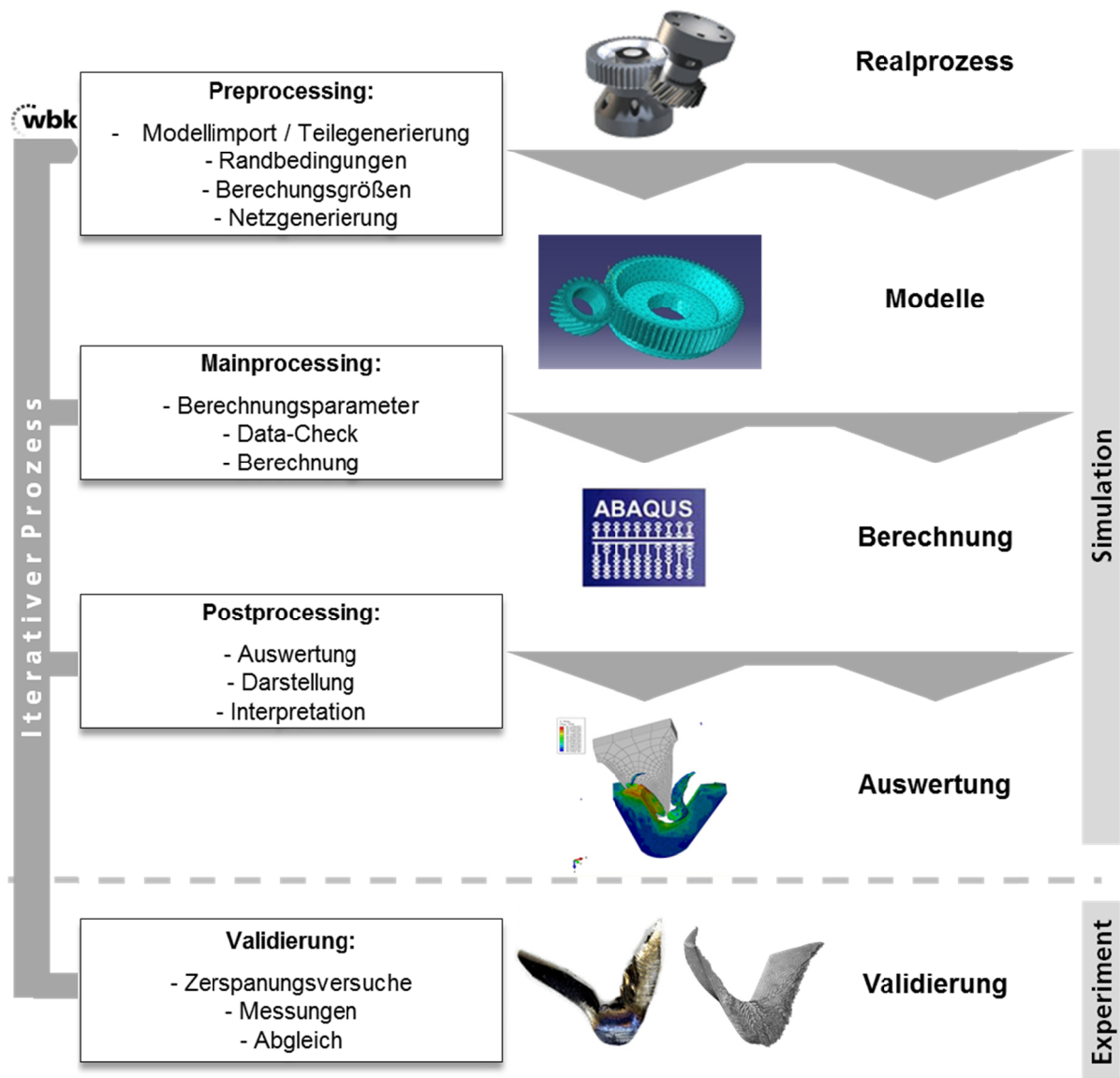


Abbildung 4.9: Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie mit FEM

Die Generierung des Netzes, das die vereinfachte Geometrie in finite Elemente und Knoten aufteilt, ist ein weiterer elementarer Schritt im Preprocessing. Die

Netzgenerierung wird als Diskretisierung bezeichnet und hat zum Ziel ein FE-Netz zu erstellen, bei dem die Elemente eine möglichst geringe Abweichung von der Idealform darstellen sowie an relevanten Stellen eine ausreichend feine Vernetzung mit Elementen geringer Kantenlänge vorliegt.

Der Netzstruktur werden dann die Randbedingungen aufgeprägt und die Bewegungsabläufe sowie die Ausgabevariablen definiert. Die Randbedingungen stellen unter anderem die Bewegungsfreiheitsgrade und Bewegungsabläufe dar. Im Rahmen dieser Arbeit werden 3D-FEM-Modelle entwickelt, die komplexe Kinematik des Wälzsälverfahrens macht eine Modellierung der Bewegungsabläufe aufwändig, hier sind geeignete Lösungen zu finden.

Im Preprocessing werden durch die Wahl des Lösungsverfahrens und der Art der Elemente sowie deren Anzahl maßgeblich die erreichbare Genauigkeit und die erforderliche Rechendauer festgelegt. Wie bereits oben ausgeführt, werden explizite Gleichungslöser bei den Simulationsstudien zur Untersuchung der Spanbildungsmechanismen beim Wälzsälverfahren genutzt.

Im Rahmen des Preprocessing ist weiterhin die Modellierung des Materialverhaltens vorgesehen. Das Materialmodell für die Zerspansimulation, das im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung stand, wurde in Form einer benutzerdefinierten Materialroutine VUHARD für ABAQUS/Explicit am Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffkunde (IAM-WK) entwickelt. Die Beschreibung des Vorgehens mit der experimentellen Bestimmung der Materialparameter und der Modellierung des Materialverhaltens erfolgt in Kapitel 4.7.

Als Ergebnis des Preprocessing liegen die Modelle des Prozesses und des Versuchswerkstoffes vor, die an das Mainprocessing weitergegeben werden.

Das **Mainprocessing** bildet mit der eigentlichen Berechnung den Kern der FEM-Simulationsstudie. Das Mainprocessing erfolgt dabei nahezu vollständig automatisiert. Das Modell wird an den Solver übergeben, der zunächst diverse Plausibilitätschecks vornimmt und die Elemente auf die Einhaltung der vorgegebenen Kriterien überprüft. Der Solver erzeugt für alle Elemente eine Steifig-

keitsmatrix und fasst diese zu einer Gesamtsteifigkeitsmatrix für die Berechnung zusammen.

Im Rahmen dieser Arbeit standen für die Berechnungsläufe verschiedene Hochleistungsrechner des Steinbuch Centre for Computing (SCC) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) zur Verfügung. Der KIT-Hochleistungsrechner HP XC3000 (hc3) stellt bei Nutzung von 12 Rechenknoten mit jeweils 8 Kernen je Knoten bis zu 144 GB Hauptspeicher bereit. Ein einzelner Rechenknoten hat eine theoretische Spitzenleistung von 81,0 GFLOPS, so dass sich eine theoretische Spitzenleistung von 30,8 TFLOPS für das gesamte System ergibt. Der Hauptspeicher über alle Rechenknoten hinweg beträgt 10,8 TB [SCC-11]. Ein weiterer hybrider massiv paralleler Hochleistungsrechner (IC1) mit maximal 200 Rechenknoten bei jeweils 8 Kernen und 16 GB Hauptspeicher pro Kern stand insbesondere für die Durchführung von Langzeitberechnungen zur Verfügung. Ein einzelner Rechenknoten hat eine theoretische Spitzenleistung von 85,3 GFLOPS, so dass sich eine theoretische Spitzenleistung von 17,57 TFLOPS für das gesamte System ergibt. Der Hauptspeicher über alle Rechenknoten hinweg beträgt 3,3 TB [SCC-11].

Das **Postprocessing** stellt die Auswertung des Problems dar. Hier werden die im Preprocessing definierten Werte visuell am Modell oder zeitabhängig an vorher definierten Punkten ausgegeben. Das Postprocessing beinhaltet die grafische Auswertung sowie die Erfassung der ermittelten Daten. Bei der Untersuchung des Wälzschälverfahrens kommt der Visualisierung der Prozessabläufe eine besonders hohe Bedeutung zu. Hier können Erkenntnisse beispielsweise über die kinematischen Verhältnisse während des Prozessablaufes oder die Spanbildungsmechanismen gewonnen werden und ein wichtiger Beitrag zur Erhöhung des grundlegenden Prozessverständnisses geleistet werden.

Zum Postprocessing kann auch die Validierung der Simulationsstudie gezählt werden. Hier werden die weiter oben aufgeführten und experimentell ermittelten Prozesskenngrößen zwischen Simulation und Realprozess abgeglichen und so die Güte der Simulationsergebnisse sichergestellt.

## 4.7 Bestimmung und Modellierung des Materialverhaltens

Bei der Simulation von Spanbildungsvorgängen kommt der Modellierung des Materialverhaltens bei hohen Verformungsgeschwindigkeiten, der Kopplung der mechanischen und der thermischen Vorgänge und der Implementierung eines Trennkriteriums eine entscheidende Bedeutung zu.

Die Arbeiten zur Entwicklung eines Werkstoffmodells für 20MnCr5 in normalisiertem Zustand und zur experimentellen Bestimmung der entsprechenden Materialparameter wurden am Institut für Angewandte Materialien - Werkstoffkunde (IAM-WK, ehemals Institut für Werkstoffkunde I - IWK I) im Rahmen eines gemeinsamen Forschungsvorhabens durchgeführt.

### 4.7.1 Modellierung des Materialverhaltens

Die Modellierung des Materialverhaltens erfolgte in Form einer User Subroutine für ABAQUS/Explicit. Die Basis für diese Materialroutine VUHARD wurde IAM-WK im Rahmen von Arbeiten zur Simulation von Stirnplanfräsprozessen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten und von Mikroumfangsfräsprozessen entwickelt [BIE-01; KOT-03; DEL-05; WEB-07, AUT-10]. Diese User Subroutine VUHARD wurde am IAM-WK anhand umfangreicher experimenteller Untersuchungen an den Untersuchungswerkstoff 20MnCr5 im normalisierten Zustand angepasst und eine Abschätzung des Reibkoeffizienten für die Werkstoffpaarung 20MnCr5/Hartmetall vorgenommen.

Zur Beschreibung der Fließspannung des Materials wurde ein isotropes Fließspannungsmodell mit einem Fließkriterium nach von Mises gewählt. Die Fließspannung ist dabei in Abhängigkeit der akkumulierten plastischen Dehnung  $\bar{\epsilon}_p$ , der plastischen Dehnrates  $\dot{\bar{\epsilon}}_p$  und der Temperatur  $T$  beschrieben. Demnach setzt sich die Fließspannung  $\sigma_y$  unterhalb einer kritischen, von der Verformungsgeschwindigkeit abhängigen Temperatur  $T_0$ , additiv aus einem athermischen (nur im Ausmaß des Schubmoduls  $G$  bzw. des Elastizitätsmoduls  $E$  von der Temperatur abhängigen) Anteil  $\sigma_G$  und einem thermischen Fließ-

spannungsanteil  $\sigma^*$  zusammen und kann gemäß Formel 4-1 dargestellt werden.

$$\sigma_y = \sigma_G + \sigma^* \quad \text{Formel 4-1}$$

mit dem athermischen Anteil der Fließspannung:

$$\sigma_G = \sigma_{G0} + (\sigma_1 + \theta_1 \cdot \bar{\varepsilon}_p) \left( 1 - \exp\left(-\frac{\theta_1 \bar{\varepsilon}_p}{\theta_0}\right) \right) \cdot \frac{G(T)}{G(0K)} \cdot g(T, T_{\dot{\gamma}})$$

und dem thermischen Anteil der Fließspannung:

$$\sigma^* = \sigma_0^* \left( 1 - \left( \frac{T}{T_0} \right)^n \right)^m$$

Der athermische Fließspannungsanteil  $\sigma_G$  beruht auf der Wechselwirkung weitreichender Gleithindernisse, wie beispielsweise das Spannungsfeld gelöster Fremdatome, das Spannungsfeld anderer Versetzungen, Korngrenzen oder Teilchen mit gleitenden Versetzungen. Die Festigkeit des Materials im athermischen Fließspannungsanteil wird durch  $\sigma_{G0}$  charakterisiert. Die Materialverfestigung mit steigender akkumulierter plastischer Dehnung wird innerhalb von  $\sigma_G$  mittels eines erweiterten Ansatzes nach Voce beschrieben. Das Verfestigungsverhalten des Materials wird über die Materialparameter  $\sigma_1$ ,  $\theta_0$  und  $\theta_1$  angepasst. Der athermische Anteil der Fließspannung  $\sigma_G$  ist über den Schubmodul  $G(T)$  (vgl. Formel 4-2) schwach an die Temperatur gekoppelt.

$$G(T) = \frac{E(T)}{2 \cdot (1 + \vartheta(T))} \quad \text{Formel 4-2}$$

Die Ansätze zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls und der Querkontraktionszahl sind in Formel 4-3 und Formel 4-4 dargestellt.

$$E(T) = E(273K) + e_1 \cdot (T - 273K) + e_2 \cdot (T - 273K)^2 \quad \text{Formel 4-3}$$

$$\vartheta(T) = \vartheta(273K) + \Delta\vartheta \cdot (T - 273K) \quad \text{Formel 4-4}$$



Die Beschreibung der Entfestigung des Materials bei stark erhöhten Temperaturen wird mittels eines Hochtemperaturentfestigungsterms  $g(T, T_{\ddot{U}})$  gemäß Formel 4-5 vorgenommen, der auf den athermischen Fließspannungsanteil angewendet wird.

$$g(T, T_{\ddot{U}}) = \begin{cases} 1 & \text{für } T \leq T_{\ddot{U}} \\ \left(1 - \left(\frac{T - T_{\ddot{U}}(\dot{\epsilon}_p)}{T_S - T_{\ddot{U}}(\dot{\epsilon}_p)}\right)^\xi\right)^\zeta & \text{für } T > T_{\ddot{U}} \end{cases} \quad \text{Formel 4-5}$$

Die Form des Fließspannungsabfalls bei hohen Temperaturen kann über die Parameter  $\xi$  und  $\zeta$  an das Materialverhalten angepasst werden. Die dehnratenabhängige Übergangstemperatur  $T_{\ddot{U}}$  oberhalb der der Term  $g(T, T_{\ddot{U}})$  aktiv wird, ist nach Formel 4-6 definiert und kann über die Parameter  $\vartheta_0$  und  $\Delta\vartheta$  angepasst werden.

$$T_{\ddot{U}}(\dot{\epsilon}_p) = \vartheta_0 + \Delta\vartheta \cdot \ln\left(1 + \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_n}\right) \quad \text{Formel 4-6}$$

Der thermische Fließspannungsanteil  $\sigma^*$  ist auf die Wirkung kurzreichender Gleithindernisse wie des periodischen Gitterpotentials (Peierlspotential) oder des Schneidprozesses zwischen Versetzungen zurückzuführen und wird mit Hilfe thermischer Gitterenergieschwankungen überwunden [AUT-10].

Die Parameter  $m$  und  $n$  im Term des thermischen Fließspannungsanteil  $\sigma^*$  beschreiben die Form des Hindernisses,  $\sigma_0^*$  die bei  $T = 0\text{K}$  vorliegende thermische Fließspannung. Die dehnratenabhängige Übergangstemperatur  $T_0$  oberhalb der der thermische Fließspannungsanteil verschwindet, wird gemäß Formel 4-7 beschrieben.

$$T_0 = \frac{\Delta G_0}{k_B \ln\left(\frac{\dot{\epsilon}_0}{\dot{\epsilon}_p}\right)} \quad \text{Formel 4-7}$$

Dabei sind  $\Delta G_0$  die zur Überwindung eines Hindernisses bei 0 K notwendige freie Enthalpie,  $\dot{\epsilon}_0$  eine durch die Gleitversetzungsdichte, den Burgersvektor,

die Debye-Frequenz und die Kristallstruktur bestimmte kritische Dehngeschwindigkeit und  $k_b$  die Boltzmannkonstante.

### **Realisierung der Materialtrennung**

Die Realisierung der Materialauftrennung des FE-Netzes wird bei den Simulationen mit ABAQUS/Explicit durch die VUHARD Subroutine nach dem Versagenskriterium nach Johnson-Cook realisiert [JOH-85]. Hierzu wurde die Subroutine durch ein Versagenskriterium für duktile Metalle erweitert, in dem eine akkumulierte Schädigung des Elements berechnet wird. Die akkumulierte Schädigung errechnet sich nach Formel 4-8. Das Element versagt vollständig, wenn die akkumulierte Schädigung  $D$  den Wert 1 erreicht.

$$D(t) = \int_0^t \frac{\dot{\varepsilon}_p(\tau)}{\varepsilon_f(\tau)} d\tau \quad \text{Formel 4-8}$$

$$\text{mit } \varepsilon_f = f_1\left(\frac{p}{\sigma_v}\right) \cdot f_2(\dot{\varepsilon}_p) \cdot f_3(T)$$

Die anhand experimenteller Befunde bestimmten Einflussfunktionen  $f_1$ ,  $f_2$  und  $f_3$  werden dabei gemäß Formel 4-9 bis Formel 4-11 gewählt.

$$f_1\left(\frac{p}{\sigma}\right) = D_1 \cdot \exp\left(-D_2 \cdot \frac{p}{\sigma}\right) \quad \text{Formel 4-9}$$

$$f_2(\dot{\varepsilon}) = 1 \quad \text{Formel 4-10}$$

$$f_3(T) = \begin{cases} 1 & , T \leq T_{\ddot{U}V} \\ D_3 - (D_3 - 1) \left(1 - \left(\frac{T - T_{\ddot{U}V}}{T_{melt} - T_{\ddot{U}V}}\right)^{D_4}\right)^{D_5} & , T > T_{\ddot{U}V} \end{cases} \quad \text{Formel 4-11}$$

Die Abhängigkeit der Versagensdehnung von der Spannungsmehrachsigkeit  $p/\sigma_v$  wird mittels einer Exponentialfunktion beschrieben. Die Versagensdehnung ist zudem unabhängig von der Belastungsgeschwindigkeit. Die Versagensdehnung bleibt bis zur Übergangstemperatur  $T_{\ddot{U}V}$  konstant, steigt anschließend stark an und nähert sich dem Grenzwert  $D_3$  an. Der Übergang wird mittels einer Potenzfunktion beschrieben.

## 4.7.2 Versuche zur Bestimmung der Materialparameter

### *Versuchsbeschreibung*

Im Folgenden werden die experimentellen Arbeiten sowie Auszüge der Ergebnisse zur Bestimmung des Materialverhaltens beschrieben. Die in Diagrammform dargestellten Ergebnisse zeigen zum Vergleich die Simulationsergebnisse, die mit dem beschriebenen Materialmodell bestimmt wurden.

In quasistatischen und dynamischen Zugversuchen wurde für normalisierten 20MnCr5 der Einfluss der Verformungsgeschwindigkeit (im Bereich von  $10^{-4}$  1/s bis  $10^3$  1/s) und der Temperatur (im Bereich von  $-196^{\circ}\text{C}$  bis  $1000^{\circ}\text{C}$ ) auf das Verformungsverhalten experimentell ermittelt. Zur Durchführung der quasistatischen Zugversuche bei  $\dot{\varepsilon}_t = 1 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  wurde eine elektromagnetische Universalprüfmaschine der Bauart Zwick mit einer maximalen Prüfkraft von 100 kN verwendet. Die Temperaturen unterhalb Raumtemperatur wurden über eine Klimakammer mit Umluftgebläse eingestellt. Für die erhöhten Temperaturen kam ein Spiegelofen zum Einsatz. Zur Regelung des Versuchs wurde ein Temperaturregler der Bauart Bryson verwendet, wobei die Proben temperatur mittels eines punktgeschweißten NiCr-Ni-Thermoelements bestimmt wurde. Die Druckversuche wurden mit einer elektromechanischen Universalprüfmaschine der Bauart Zwick bei Raumtemperatur unter quasistatischen Bedingungen durchgeführt. Die maximale Totaldehnung bei den Versuchen betrug  $\varepsilon_t = 0,20$ . Aus den Tieftemperaturversuchen und den hochdynamischen Zugversuchen kann auf Basis der Theorie der thermisch aktivierten Versetzungsbewegung auf die Dehnratenabhängigkeit der Fließspannung bei Verformungsgeschwindigkeiten bis zu  $10^4$  geschlossen werden.

Zur Bewertung der Verfestigung bei hohen plastischen Verformungen wurden ergänzend Torsionsversuche durchgeführt. Die Verfestigungsparameter für das Werkstoffmodell wurden mittels Finite-Elemente Simulation bestimmt. Zur Beschreibung des Versagensverhaltens von 20MnCr5 wurden die Einflussfunktionen der Spannungsmehrachsigkeit und der Temperatur auf die Versa-

gensdehnung bestimmt und deren Parameter angepasst. Für die Variation der Spannungsmehrachsigkeit stand eine Zug-Torsionsmaschine zur Verfügung. Die Versuche wurden auf einer servohydraulischen Prüfmaschine mit einem Lastrahmen der Bauart Schenck und einer Steuerung der Bauart MTS durchgeführt. Die maximale Nennkraft der Maschine betrug 250 kN und das maximale Torsionsmoment 4 kNm. Die Temperaturabhängigkeit der Versagensdehnung wurde aus den durchgeführten Zugversuchen abgeleitet.

### ***Parameteridentifikation***

Zur Optimierung der Materialparameter für das verwendete Materialmodell wurde das Mathematikprogramm MATLAB verwendet.

<b>Thermischer Fließspannungsanteil</b>					
$\sigma_0^*$	[MPa]	1885	$\dot{\epsilon}_0$	[s <sup>-1</sup> ]	1·10 <sup>7</sup>
$m$	[]	1,78	$\Delta G_0$	[Js]	1,03·10 <sup>-19</sup>
$n$	[]	0,50	$k_b$	[JK <sup>-1</sup> ]	1,38·10 <sup>-23</sup>

<b>Athermischer Fließspannungsanteil</b>					
$\sigma_{G0}$	[MPa]	400	$\sigma_1$	[MPa]	339
$\theta_0$	[MPa]	5,55	$\theta_1$	[MPa]	100
$E(273K)$	[MPa]	2,1·10 <sup>5</sup>	$\nu(273K)$	[]	0,283
$e_1$	[MPaK <sup>-1</sup> ]	-52	$e_2$	[MPaK <sup>-2</sup> ]	-4,7·10 <sup>-2</sup>
$\Delta\nu$	[K <sup>-1</sup> ]	4·10 <sup>-5</sup>			

<b>Hochtemperaturentfestigung</b>					
$\vartheta_0$	[K]	681	$\Delta\vartheta$	[K]	90
$\xi$	[]	1,57	$\varsigma$	[]	9,36
$T_s$	[K]	1793			

**Tabelle 4.7: Materialparameter für die Beschreibung der Fließspannung von normalisiertem 20MnCr5 [IAM-WK]**

Hiermit wurden die Temperatur- und Dehnratenabhängigkeit der Fließspannung bestmöglich angenähert. Die bestimmten Materialparameter für 20MnCr5 im normalisierten Zustand sind in Tabelle 4.7 zusammengestellt.

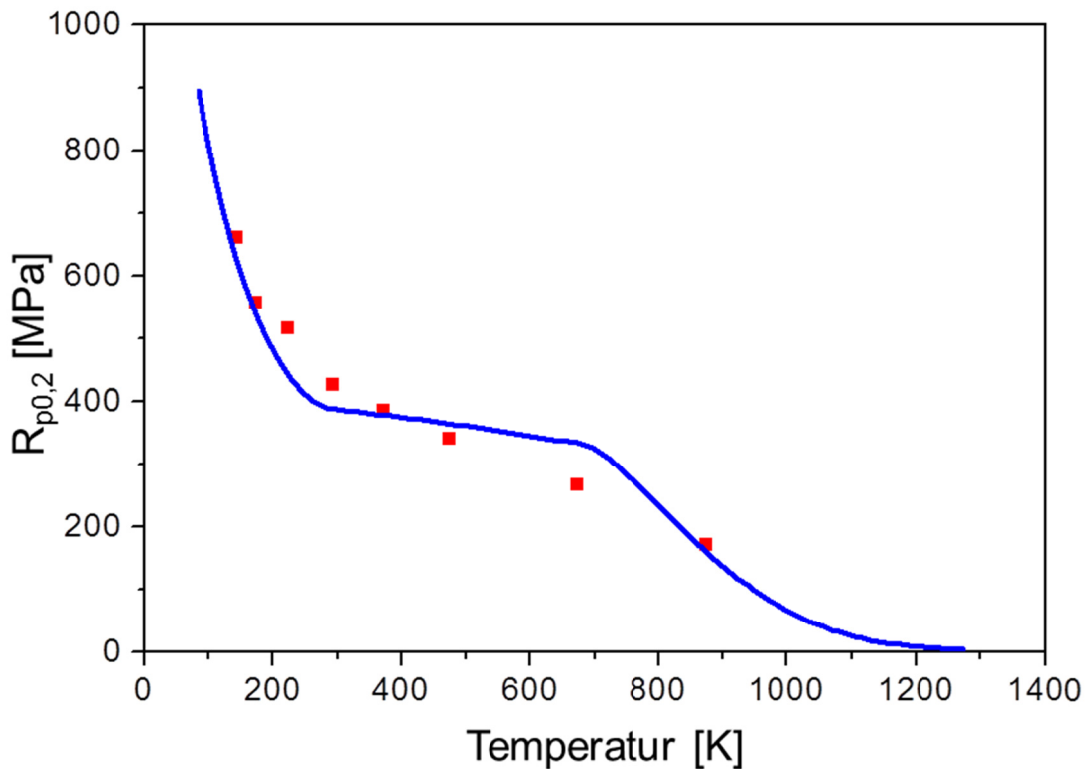
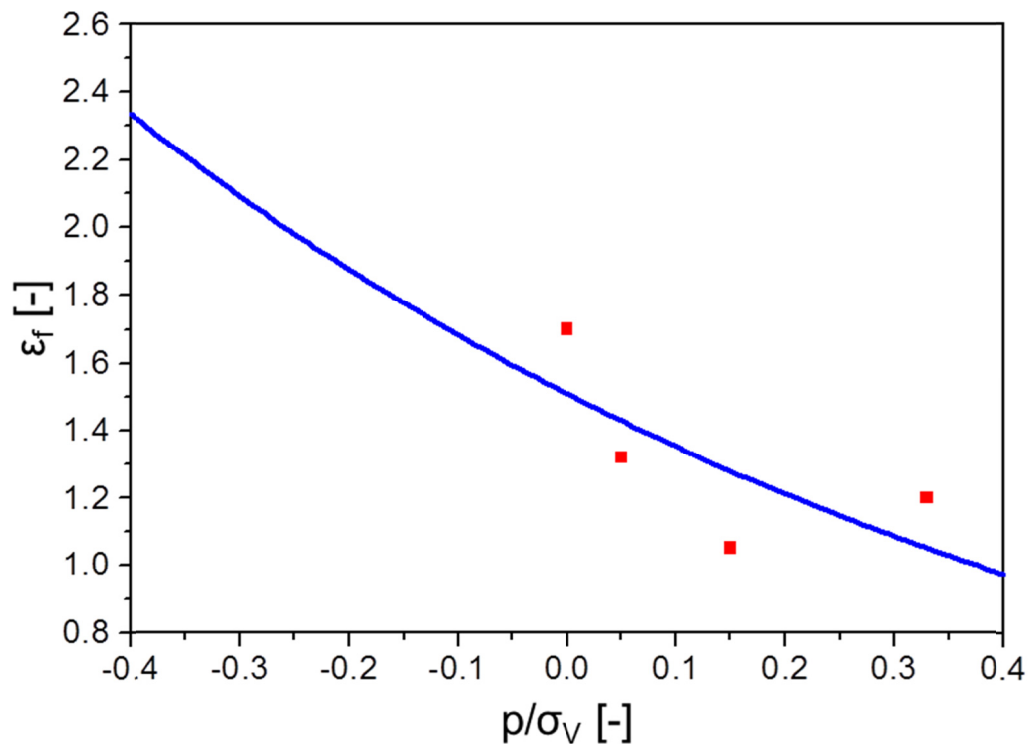


Abbildung 4.10: Temperatur- und Dehnratenabhängigkeit der  $R_{p0,2}$  Streckgrenze von normalisiertem 20MnCr5 [IAM-WK]

Die Streckgrenze bei einer plastischen Verformung 0,2 %,  $R_{p0,2}$ , ist in Abbildung 4.10 über die Temperatur aufgetragen. Wie aus dem Verlauf ersichtlich, kann die Temperatur- und die Dehnratenabhängigkeit des Werkstoffes gut mit dem verwendeten Materialmodell, das durch die blau eingezeichnete Linie repräsentiert wird, beschrieben werden.

Die Abhängigkeit der wahren Versagensdehnung von der Spannungsmehrachsigkeit sowie das durch das Modell beschriebene Verhalten (blaue Kurve) zeigt Abbildung 4.11. Die Beschreibung der Abhängigkeit durch das Modell wird in der Abbildung durch die blaue Kurve dargestellt, der verwendete exponentielle Ansatz zeigt eine gute Beschreibung der experimentellen Daten. Die Erhöhung der Spannungsmehrachsigkeit führt hierbei zu einem Abfall der Versa-

gensdehnung. Die Versagensdehnung wurde aus dem Versagenswinkel simulativ bestimmt.



*Abbildung 4.11: Temperatur- und Dehnratenabhängigkeit der  $R_{p,0,2}$  Streckgrenze von normiertem 20MnCr5 [IAM-WVK]*

Abbildung 4.12 zeigt den Einfluss der Temperatur auf das Versagensverhalten. Die Abhängigkeit der normierten wahren Versagensdehnung, die anhand der Einschnürdehnung bestimmt wurde, verläuft gemäß Abbildung 4.12 bis etwa 500 K konstant und zeigt danach einen ausgeprägten Anstieg. Es können somit deutlich zwei unterschiedliche Bereiche voneinander unterschieden werden, die mit dem verwendeten Modell, das durch die blaue Kurve repräsentiert ist, beschrieben werden können.

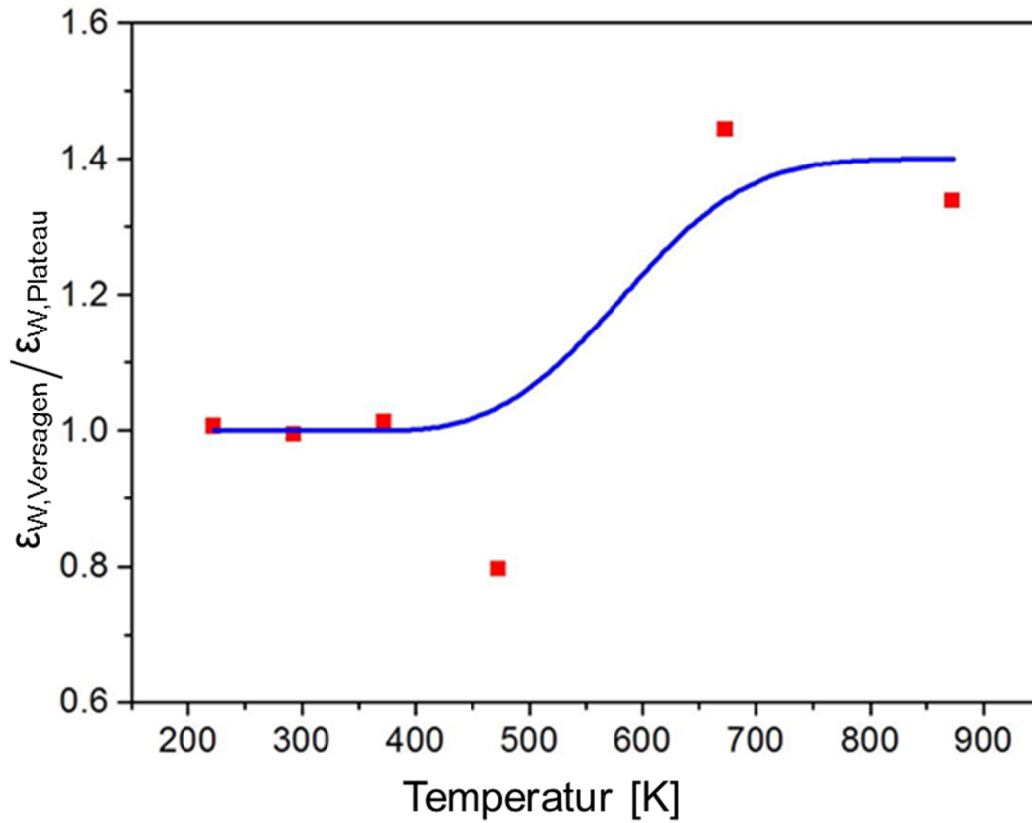


Abbildung 4.12: Abhängigkeit der wahren normierten Versagensdehnung von der Temperatur und Beschreibung durch das Modell (blau) [IAM-WK]

Die bestimmten Materialparameter zur Definition der Materialtrennung für normalisierten 20MnCr5 sind in Tabelle 4.8 aufgeführt.

D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>	D <sub>5</sub>	T <sub>ÜV</sub>
[]	[]	[]	[]	[]	[K]
1,508	1,094	1,4	3,033	187,204	357

Tabelle 4.8: Materialparameter für die Beschreibung der Fließspannung von normiertem 20MnCr5 [IAM-WK]

## 5 Experimentelle Prozessanalyse

Im folgenden Kapitel werden die experimentellen Untersuchungen dargestellt. Die zerspantechnologischen Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, dienen in erster Linie als Basis für die Modellierung des Prozesses und der Bereitstellung von Bewertungsgrößen zur Validierung der Modelle und der Simulationsergebnisse. Die experimentellen Ergebnisse bieten darüber hinaus die Möglichkeit für ein tieferes Verständnis des Wälzschälverfahrens und weiteres Potential zur Verbesserung des Prozesses. Eine erstmalige systematische Charakterisierung und Untersuchung der für das Wälzschälverfahren typischen Dreiflankenspäne stellt eine zusätzliche wichtige Erweiterung des Prozessverständnisses dar.

### 5.1 Zerspankräfte

Eine wesentliche Prozesskenngroße wird durch die Messung der Zerspankraftkomponenten im Wälzschälprozess verfügbar gemacht. Damit sind Rückschlüsse auf Veränderungen der parameterabhängigen Spanbildungsmechanismen möglich und Erkenntnisse über die Belastung der Werkzeugmaschine sowie der Werkzeuge zu gewinnen. Die ermittelten Zusammenhänge dienen zum einen der Optimierung der Prozessparameter, zum anderen stellen die Messungen eine wesentliche Basis für die Validierung der aufgebauten Simulationsmodelle dar, um deren Zuverlässigkeit zu überprüfen.

Die Zerspankraftmessungen erfolgen unter Verwendung von Vollwerkzeugen sowie Analogiewerkzeugen mittels der in Kapitel 4.5.1 beschriebenen Versuchseinrichtung. Während des Prozesses werden die Kraftkomponenten in x-, y- und z-Richtung erfasst. Die z-Komponente zeigt in axialer Richtung der Werkstückachse und ist dabei die aussagekräftigste für die Beschreibung des Prozessablaufes und betragsmäßig die höchste Komponente. Die x- und y-Messungen zeigen, zueinander um 90° versetzt angeordnet, die radialen Komponenten der Kraft, die von der Kraftmesseinrichtung bauartbedingt mitrotierend mit der Werkstückspindel aufgenommen werden. Die Versuchsein-



richtungen sehen nicht vor, dass die Auswertung der radialen Komponenten zusammen mit der absoluten Winkelposition der Werkstückspindel vorgenommen werden kann. Die Gesamtschnittkraft  $F$  wird üblicherweise durch Betragbildung aus den Einzelkomponenten berechnet. Im Folgenden werden die Einzelkomponenten separat dargestellt und ausgewertet, da so die eindeutige Zuordnung der Bewertungskenngößen zwischen Experiment und Simulation ermöglicht werden kann. Eine sinnvolle Ergänzung durch die Simulation, die in den folgenden Kapiteln aufgebaut wird, ist, dass die frei wählbare mitrotierende und insbesondere feste Richtungsorientierung der Auswertung der Kraftkomponenten beim Wälzschälen ermöglicht wird.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Versuchsreihen zur Messung der Prozesskräfte durchgeführt; zum einen mit dem Vollwerkzeug und zum anderen mit dem Einzahn-Analogiewerkzeug (vgl. Kapitel 4.2). In Stichversuchen wurden außerdem noch Dreizahn-Segmente eingesetzt. Bei der Vorbereitung von Simulationsexperimenten gilt es, den Abstraktionsgrad möglichst hoch anzusetzen und durch Vereinfachung der Modelle sowie durch Beschränkung auf relevante Modellausschnitte eine wirtschaftliche Durchführung der Berechnungsläufe zu gewährleisten. Für eine Vergleichbarkeit von Experiment und Simulation werden bei der Validierung die Einzahn-Experimente und die entsprechenden Simulationen mit einer Werkzeugschneide herangezogen.

Bei Verwendung eines Vollwerkzeuges lässt sich die Anzahl der gleichzeitig im Eingriff befindlichen Schneiden prinzipiell mit der Überdeckung angeben. Eine vollständige Vergleichbarkeit mit Übertragung auf eine abweichende Überdeckung und ein Ausschließen sonstiger Einflüsse beim Einsatz des Vollwerkzeuges lässt sich jedoch nicht vollständig belegen. Zum Abgleich mit den Ein- und Dreizahnversuchen, zur experimentellen Untersuchung des Prozesses und damit auch zur Beurteilung des Verhaltens der Werkzeugmaschine wurden zusätzlich die Parametervariationen mit Vollwerkzeugen durchgeführt.

$n_0$ [1/min] $s_{ax}$ [mm/WSU]	200 $v_c=41\text{m/min}$	400 $v_c=82\text{m/min}$	600 $v_c=124\text{m/min}$	800 $v_c=165\text{m/min}$	1000 $v_c=206\text{m/min}$	1200 $v_c=247\text{m/min}$	
0,010				24	30	36	$s_{ax}$ [mm/min]
0,025		30	45	60	75	90	$s_{ax}$ [mm/min]
0,050		60	90	120	150	180	$s_{ax}$ [mm/min]
0,075	45	90	135	180	225		$s_{ax}$ [mm/min]
0,100	60		180	240			$s_{ax}$ [mm/min]
0,125			225	300			$s_{ax}$ [mm/min]
0,150	90		270				$s_{ax}$ [mm/min]

*Tabelle 5.1: Versuchsmatrix Kraftmessung (Angabe der Schnittgeschwindigkeit und der Geschwindigkeit des Axialvorschubs)*

Tabelle 5.1 gibt einen Überblick über die variierten Prozessparameter bei den Versuchen zur Kraftmessung mit der Schnittstrategie T60/40. Die Angaben der Drehzahl [WZU/min] und des Axialvorschubes in der Einheit mm/WSU sind jeweils versehen mit der entsprechenden Schnittgeschwindigkeit sowie der Geschwindigkeit des Axialvorschubs in mm/min. Die dargestellten Kombinationen ohne diese Angaben waren nicht Umfang der durchgeführten Versuchsreihen. Zudem wurden die Schnittstrategien T60/40 und T70/30 eingestellt sowie Versuche im Vollschnitt (T100/0) durchgeführt. Die Aufteilung der Spannungsvolumina auf die einzelnen Schnitte einer Mehrschnittstrategie lässt sich Tabelle 4.6 in Kapitel 4.4 entnehmen. Darin ist die prozentuale Aufteilung angegeben sowie das Spannungsvolumen der Einzelschnitte für den Axialvorschub  $s_{ax} = 0,2$  mm.

### 5.1.1 Charakteristischer Verlauf

Für die in Abbildung 5.1 bis Abbildung 5.3 beispielhaft dargestellten für das Wälzschälen typischen Verläufe der aufgezeichneten Kräfte wurde ein Vollwerkzeug in einer Schnittstrategie T70/30 und den angegebenen Prozessparametern eingesetzt. Die einzelnen Prozessabschnitte sind mit Markern

(Schnitt 1, Schnitt 2,  $t_0$  bis  $t_4$ ) versehen. Durch die Verwendung eines Vollwerkzeuges mit 69 Zähnen sind die beiden Schnitte der verwendeten Zweischnittstrategie direkt im Verlauf ablesbar, da sich während der einzelnen Schnitte Werkstück und Werkzeug permanent im Eingriff befinden. Abbildung 5.1 zeigt den Verlauf der z-Komponente, in Abbildung 5.2 wird der Betrag der xy-Komponente der Kraft dargestellt. Die gefilterten Kraftverläufe sind jeweils mit den ungefilterten Messsignalen grau hinterlegt abgebildet. Die relativ große Schwankungsbreite des aufgezeichneten Messsignals resultiert daraus, dass Störsignale durch die angetriebene Werkstückspindel, durch die die Zuleitungen der Kraftmesseinheit zur Auswerteeinheit geführt werden, nicht vollständig ausgeschlossen werden können. Wie oben bereits ausgeführt, kommt bei der xy-Komponente die Rotation des Koordinatensystems in der x- und y-Achse hinzu und resultiert in den einzelnen Signalen in einer überlagerten Sinusschwankung.

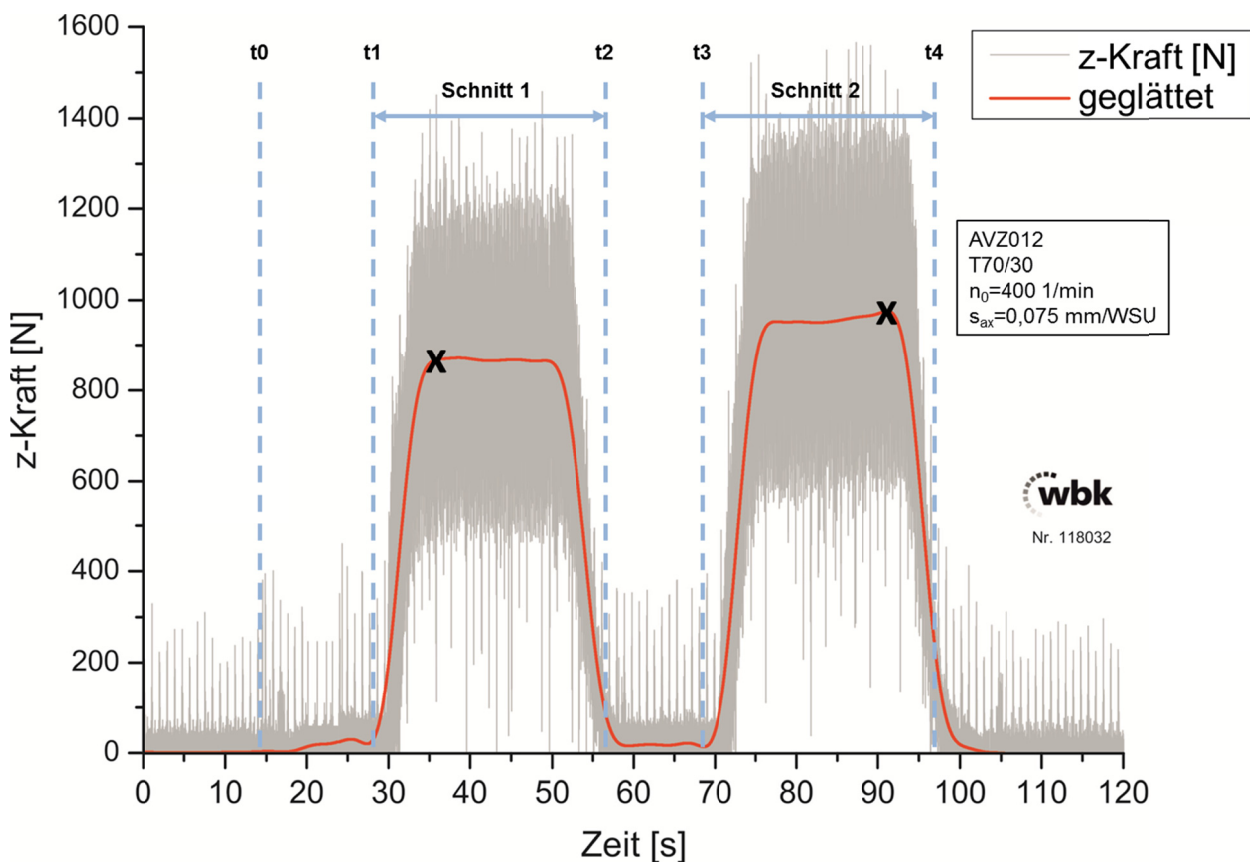


Abbildung 5.1: Kraftverlauf der z-Komponente (Axialkraft)

Den dargestellten Verläufen sind die einzelnen Prozessabschnitte direkt zuzuordnen. Das NC-Programm wird zum Zeitpunkt  $t_0$  gestartet. Erste Maschinenbewegungen werden in geringfügigen Ausschlägen der  $x$ -,  $y$ - sowie  $z$ -Signale erkennbar. Zum Zeitpunkt  $t_1$  kann anhand des Kraftanstieges der beginnende Einlauf der Werkzeugzähne in den Rohling abgelesen werden. Die Maximalwerte werden im Bereich des Vollschnitts erreicht. Während die Radialkraft ( $xy$ -Komponente) im dargestellten Beispiel bei beiden Schnitten etwa die gleichen Werte erreicht, steigen im zweiten Schnitt die Kräfte der Axialkraft ( $z$ -Komponente) gegenüber dem ersten Schnitt an. Aufgrund der Schnittaufteilung von 70% auf den ersten und 30% auf den zweiten Schnitt ist der Anstieg im Beispiel eher moderat (ca. 100 N im Beispiel). Bei einer Schnittstrategie T60/40 oder T30/70 ist die Differenz größer und kann darauf zurückgeführt werden, dass im zweiten Schnitt die vollständige Schneidkante in Eingriff kommt.

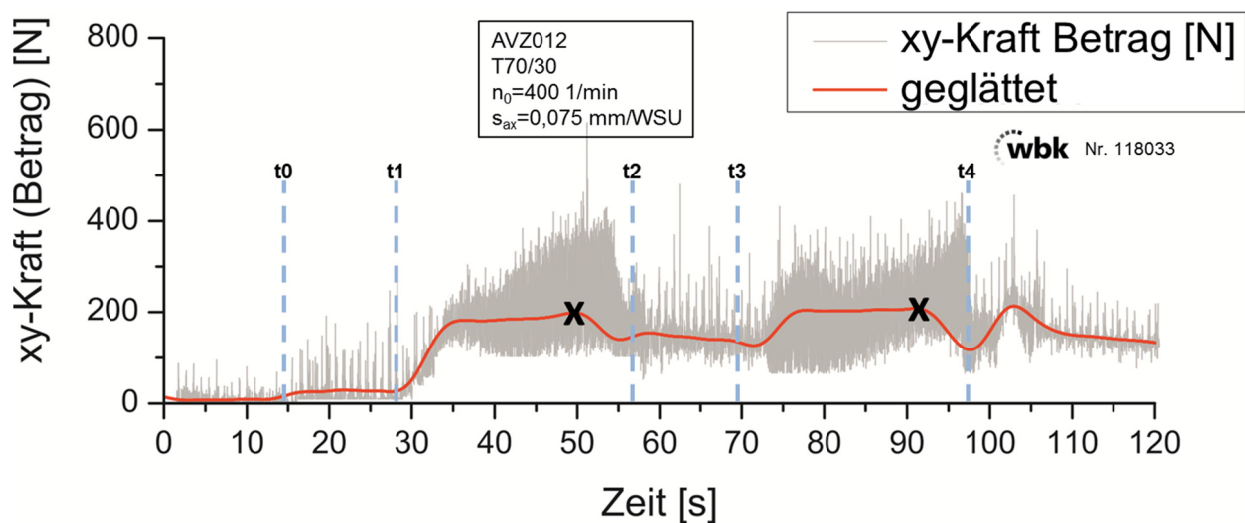


Abbildung 5.2: Kraftverlauf des Betrages der  $x$ - $y$ -Komponenten (Radialkraft)

Die aus den Beträgen der oben dargestellten Einzelkräfte errechnete Zerspankraft  $F$  wird zur vollständigen Darstellung der charakteristischen Verläufe in Abbildung 5.3 gezeigt. Die Auswertung der Versuchsreihen erfolgt anhand der Maximalwerte der geglätteten Verläufe über die einzelnen Schnitte (Markierung  $x$  in Abbildung 5.2 bis Abbildung 5.3).

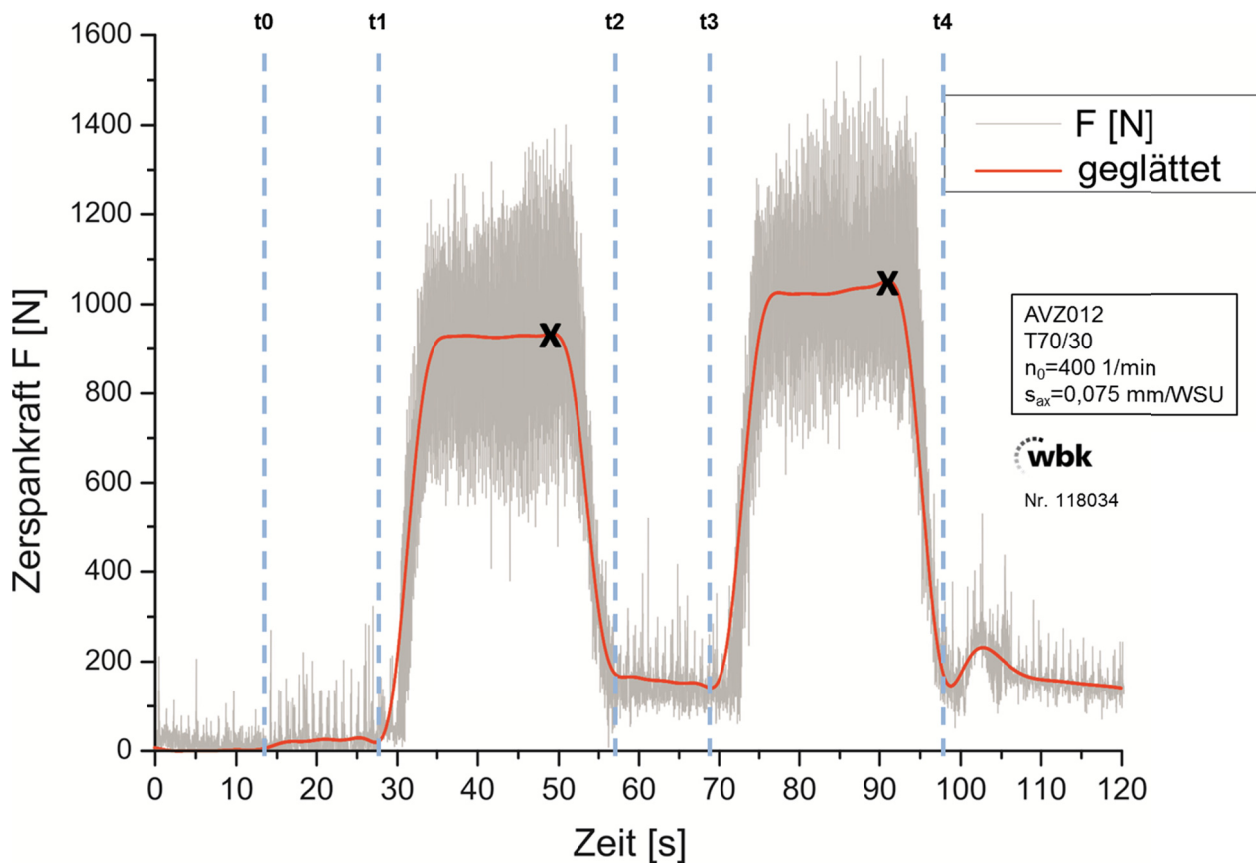


Abbildung 5.3: Verlauf der Zerspankraft  $F$  (Gesamtkraft)

### 5.1.2 Variation der Prozessparameter

Die Beurteilung der Einflüsse der untersuchten Parameter auf das Prozessverhalten wird, wie oben bereits ausgeführt, insbesondere anhand der z-Kraftkomponente ermöglicht. Anhand der Darstellungen der Kraftverläufe der z-Komponente in Abbildung 5.4 und Abbildung 5.5 werden die Einflüsse der Prozessparameter Axialvorschub und Schnittgeschwindigkeit (Drehzahl) innerhalb des untersuchten Parameterbereichs gezeigt und diskutiert. Hierbei wurden Versuche unter Verwendung von Vollwerkzeugen (VWZ, Abbildung 5.4, Abbildung 5.5) durchgeführt. Im Weiteren werden die insbesondere für die Validierung der Simulation benötigten Versuchsläufe mit 1-Zahn-Analogiewerkzeugen (1ZW) beschrieben und in Abbildung 5.7 zum Vollwerkzeug und 3-Zahn-Analogiewerkzeug in Vergleich gebracht.

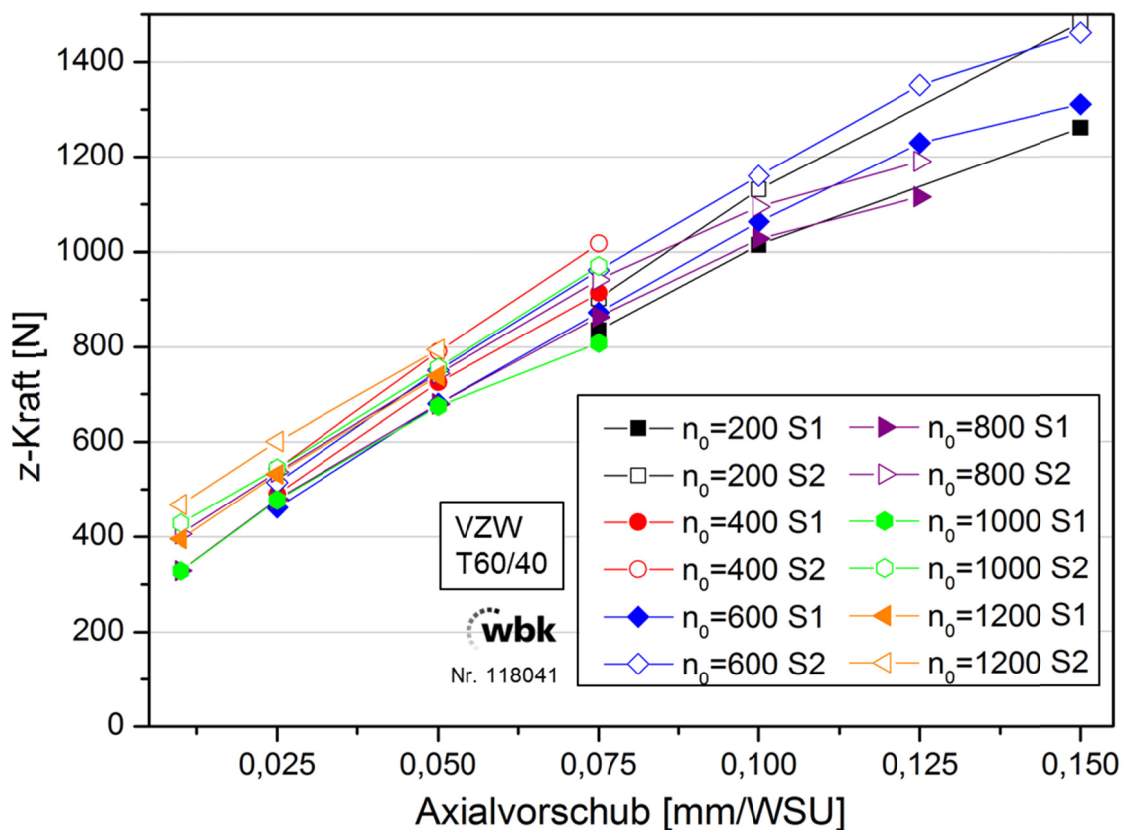


Abbildung 5.4: Verlauf der z-Kraft mit zunehmendem Axialvorschub (Vollwerkzeug, T60/40)

Mit zunehmendem Axialvorschub in der beim Wälzschälen übliche Angabe mm pro Werkstückumdrehung [mm/WSU] nimmt über alle untersuchten Drehzahlen von 200 bis zu 1200 WZU/min die gemessene Kraft in z-Richtung mit nahezu gleichem Verhältnis zu (Abbildung 5.4). In dieser Darstellung zeigt sich bereits, dass bei den jeweiligen Axialvorschubwerten die gemessenen Kräfte sehr eng beieinander liegen und die Kurvenverläufe bei Erhöhung des Axialvorschubes vergleichbare Steigungen und ein lineares Verhalten aufweisen. Bei Erhöhung des Axialvorschubes um 0,025 mm/WSU steigen die z-Kräfte um ca. 180-210 N an. Bei höheren Axialvorschüben zeichnet sich in Abbildung 5.4 beim Schritt von 0,1 auf 0,125mm/WSU sowie 0,125 auf 0,15 mm/WSU ab, dass schwächere Anstiege der z-Kraft auftreten. Bei einer Drehzahl von 600 WZU/min wurden hier nur 89 N höhere Kräfte gemessen. Das eindeutige Verhaltensmuster mit einem Anstieg der Schnittkräfte bei zu-

nehmendem Axialvorschub kann in allen aufgezeichneten Kraftkomponenten nachgewiesen werden.

Die bei konstanten Axialvorschüben über die Drehzahlvariation im Rahmen der Signifikanz gleichbleibende Kraftkomponente in z-Richtung wird anhand der Kraftverläufe in Abbildung 5.5 deutlich. Die Versuchsreihen mit einem Axialvorschub von 0,075 mm/WSU bis 0,1 mm/WSU zeigen über den untersuchten breiten Drehzahlbereich kein eindeutiges Verhaltensmuster. Der Zusammenhang des Schnittkraftverlaufes von der Drehzahl ist dabei unsystematisch. Die bei einem Axialvorschub von  $s_{ax} = 0,125$  mm/WSU zwischen  $n_0 = 600$  und 800 WZU/min mit über 160N deutlich abfallenden Kräfte weichen dabei von dem beschriebenen Verhalten ab.

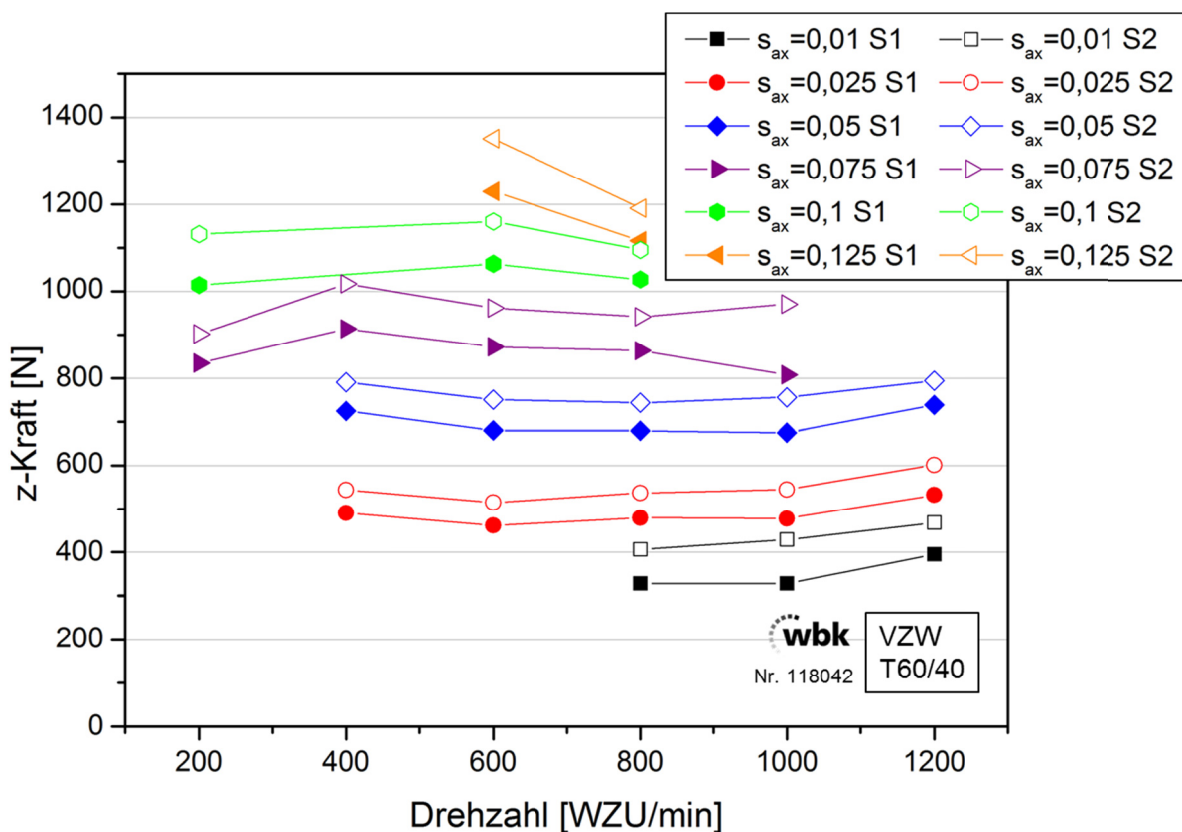


Abbildung 5.5: Verlauf der z-Kraft mit zunehmender Drehzahl (Vollwerkzeug, T60/40)

Bei der vorliegenden Schnittstrategie T60/40 liegen die gemessenen Schnittkräfte des zweiten Schnitts (Abbildung 5.4 und Abbildung 5.5 Kennzeichnung S2) durchweg über den Messwerten des ersten Schnitts (S1). Dabei entfallen

bei einer Schnittstrategie T60/40 60% Schnitttiefe auf den ersten Schnitt und 40% auf den zweiten Schnitt, was nicht mit dem jeweiligen vorliegenden Schnittvolumen gleichzusetzen ist. Erst im zweiten Schnitt befindet sich die vollständige Schneidkante im Eingriff und erfährt damit die höheren Kräfte. Die prozentuale Aufteilung der Spannungsvolumina auf die einzelnen Schnitte einer Mehrschnittstrategie lässt sich Tabelle 4.6 in Kapitel 4.4 entnehmen. Insbesondere bei hohen Axialvorschüben lässt sich die ungünstige Aufteilung einer Schnittstrategie T30/70 zu Lasten des zweiten Schnitts ableiten.

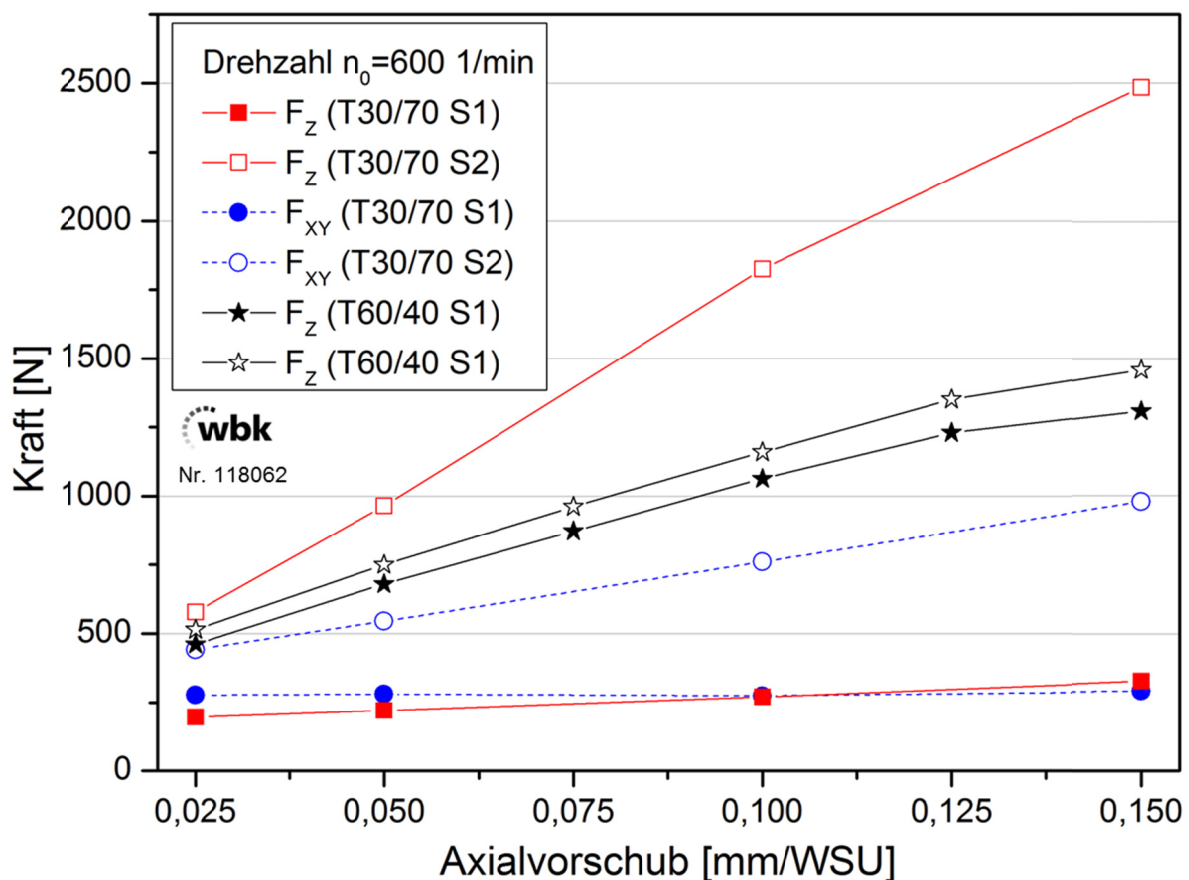


Abbildung 5.6: Vergleich der Schnittstrategie bei zunehmendem Axialvorschub (Vollwerkzeug)

Die Versuche mit variiertem Schnittstrategie zeigten, dass durchweg beim zweiten Schnitt einer Mehrschnittstrategie, bei dann vollständig an der Zerspanung beteiligter Schneidkante des Werkzeuges, die höchsten Kräfte vorliegen. Abbildung 5.6 zeigt den Verlauf der z-Komponente sowie die xy-Komponente der gemessenen Schnittkraft für die Drehzahl 600 WZU/min bei



der Durchführung einer T30/70 Schnittstrategie. Die deutliche Erhöhung des Schnittanteils auf 70% in der zweiten Zustellung resultiert dann in einer starken Erhöhung des Spanvolumens im zweiten Schnitt. Zusätzlich mit der beim zweiten Schnitt vollständig in Eingriff befindlichen Schneidkante kommt es damit zu einer deutlichen Erhöhung der gemessenen Schnittkräfte insbesondere bei höheren Axialvorschüben. In Abbildung 5.6 ist zum Vergleich zusätzlich die Aufteilung der Schnittkräfte der z-Komponente auf die Einzelschnitte dargestellt.

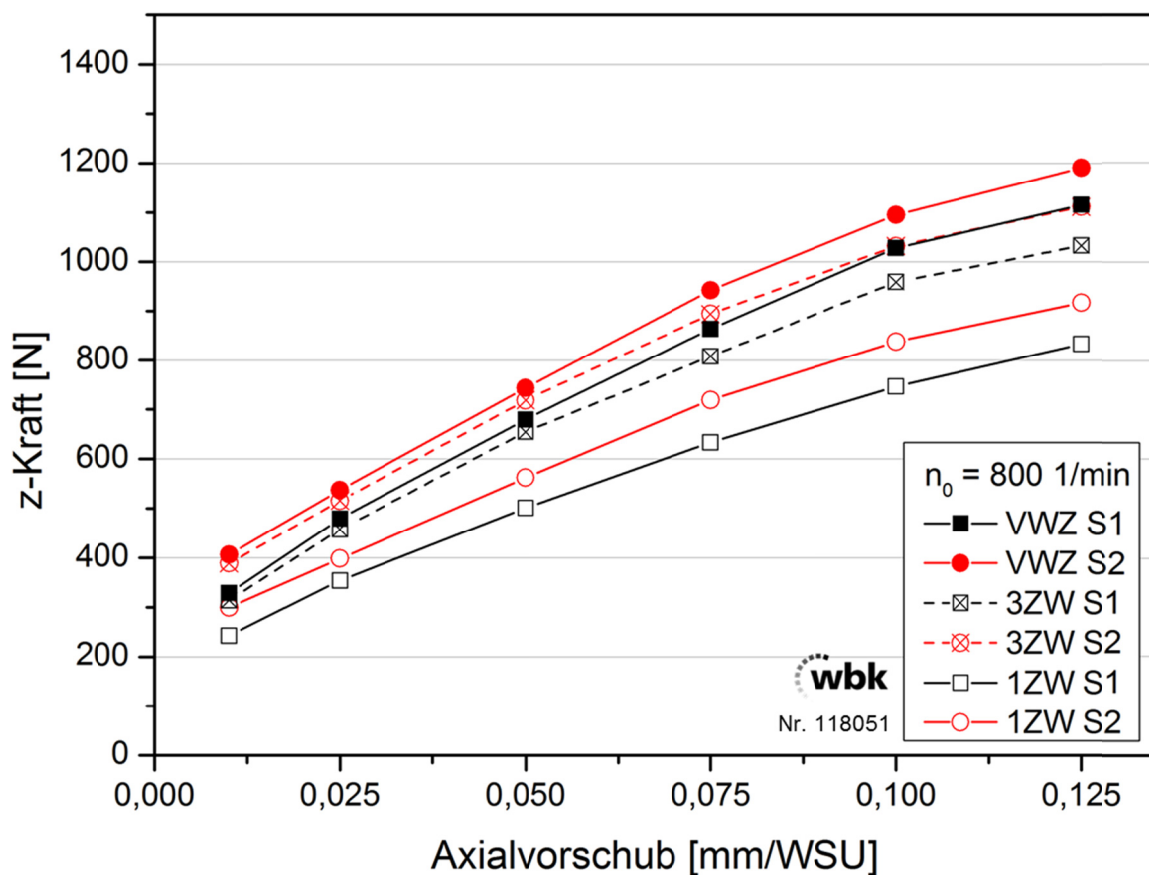


Abbildung 5.7: Verlauf der z-Kraft mit zunehmendem Axialvorschub, Vergleich VWZ und 3ZW, 800 WZU/min

Abbildung 5.7 zeigt den Verlauf der z-Kraftkomponente bei Verwendung eines Vollwerkzeuges (VWZ) sowie eines Analogiewerkzeuges (1ZW bzw. 3ZW) im direkten Vergleich bei einer Drehzahl von 800 WZU/min. Hierbei ist festzustellen, dass bei Verwendung des Analogiewerkzeuges bei allen Parameterkombinationen die gemessenen Werte unterhalb denen des Vollwerkzeuges liegen.

Die Überdeckung des Vollwerkzeuges liegt bei 2,674. Somit sind beim Dreizahnwerkzeug durchschnittlich nicht weniger Zähne im Eingriff, dies ist ausschlaggebend für den Messwert der Maximalkraft. Das Verhalten des Messschriebs dient als Unterstützung bei der Auswertung des Kraftverlaufes des Einzahnwerkzeuges. Nach [HÜH-02] führt die geringere Überdeckung zu einer größeren Amplitude der Kraftkomponente. Abbildung 5.7 zeigt die Messergebnisse bei der Verwendung des Einzahnwerkzeuges, die ca. 25-30% unterhalb derer des Vollwerkzeuges liegen. Dies zeigte sich in ähnlicher Form in [BEC-06] und konnte bereits von [HÜH-02] rechnerisch bestimmt werden.

Die Messwerte des Dreizahnwerkzeuges liegen nur moderat unterhalb der Ergebnisse des Vollwerkzeuges. Es zeigt sich dabei, dass mit abnehmendem Axialvorschub auch die Differenz der beiden Messwerte kleiner wird. Dieses Verhalten ist in Zusammenhang mit dem beim Analogiewerkzeug vom Vollwerkzeug abweichenden Vorschubgeschwindigkeiten zu sehen. Beim Vollwerkzeug geraten, aufgrund des Übersetzungsverhältnisses, pro Werkzeugumdrehung in einer einzelnen Lücke des Werkstückes 3 verschiedene Schneiden in Eingriff. Beim Analogiewerkzeug liegt das gleiche Übersetzungsverhältnis vor, allerdings sind hier nur 3 Schneiden direkt nebeneinander angeordnet bzw. eine einzelne Schneide vorhanden. Die weiteren Schneiden über dem Werkzeugumfang, die beim Vollwerkzeug während einer Umdrehung in Schnitt geraten, fehlen beim Analogiewerkzeug. Damit bei den Versuchen mit beiden Werkzeugsystemen identische Spanbereiche pro Schneideneingriff vorliegen und die Versuchsergebnisse vergleichbar sind, beträgt der Axialvorschub beim Analogiewerkzeug nur 1/3 des Axialvorschubes des VWZ. Daraus resultiert ein identischer Spanbereich, jedoch eine niedrigere Vorschubgeschwindigkeit. Hinsichtlich der Schnittgeschwindigkeit und damit der prinzipiellen Spanbildungsmechanismen ist hier kein signifikanter Unterschied vorhanden, da der Axialvorschub betragsmäßig gegenüber der Schnittgeschwindigkeit eine untergeordnete Rolle spielt. Bei dem in Abbildung 5.7 gezeigten Verhalten der z-Kraftkomponente ist jedoch ein moderater Einfluss zu

erkennen. Bei der Zunahme des Axialvorschubes ist eine deutlich betragsmäßig zunehmende Differenz der Axialvorschubgeschwindigkeiten von VWZ und 3ZW zu verzeichnen, die sich damit deutlicher auf die gemessenen Kraftbeiträge auswirkt. Der beschriebene Zusammenhang zwischen Axialvorschubgeschwindigkeit und unterschiedlichen Kraftbeiträgen von Analogiewerkzeug und VWZ wird zudem dadurch gestützt, dass mit zunehmender Drehzahl und damit höheren Schnittgeschwindigkeiten der Einfluss der beim 3ZW geringeren Axialvorschubgeschwindigkeit abnimmt und sich die Kräfte des 3ZW denen des VWZ annähern.

## 5.2 Temperatur im Werkstück

Die Vorgehensweise bei der Messung der Temperaturen im Bauteilinnern erfolgte wie in Kapitel 4.5.2 vorgestellt. In den hier vorgestellten Versuchsreihen wurden die Prozessparameter Drehzahl und damit Schnittgeschwindigkeit, Axialvorschub sowie Schnittstrategie gemäß der Matrix in Tabelle 5.2 variiert. Dabei wurde die Drehzahlen von  $n_0 = 200$  1/min bis zu  $n_0 = 1200$  1/min (Schnittgeschwindigkeitsbereich  $v_c = 41 - 247$  m/min) variiert und Axialvorschübe bei verschiedenen Drehzahlen entsprechend der Darstellung zwischen  $s_{ax} = 0,025$  mm/WSU und  $s_{ax} = 0,15$  mm/WSU, welche Axialvorschubgeschwindigkeit von bis zu 360 mm/min entsprechen, gewählt. Durch die zusätzliche Variation der Schnittstrategie ist eine Untersuchung der Abhängigkeit der Temperaturverläufe über die Variation der Versuchsparameter möglich. Zur Absicherung der Messergebnisse wurden je Parametervariation mindestens 4 Versuchsdurchläufe durchgeführt und daraus die Mittelwerte für die Auswertung bestimmt.

Für die Überprüfung der Güte der im Verlauf dieser Arbeit aufgebauten Simulationsmodelle wurden zusätzlich zu den Experimenten mit Vollwerkzeugen, Temperaturmessungen beim Einsatz des in Kapitel 0 vorgestellten Dreizahn-Analogiewerkzeuges durchgeführt und Messungen an den Positionen T1, T2 und T3 vorgenommen. Beim Vergleich der Versuchsergebnisse zeigte sich,

dass die eingesetzten Thermoelemente eine lokal begrenzte Messung ermöglichen und die zusätzliche Erwärmung bei der Verwendung eines Vollwerkzeuges an den beiden betrachteten Messstellen T1 und T2 als geringfügig angesehen werden kann.

$n_0$ [1/min] $s_{ax}$ [mm/WSU]	200 $v_c=41\text{m/min}$	400 $v_c=82\text{m/min}$	600 $v_c=124\text{m/min}$	800 $v_c=165\text{m/min}$	1000 $v_c=206\text{m/min}$	1200 $v_c=247\text{m/min}$	
0,010							$s_{ax}$ [mm/min]
0,025			45	60	75		$s_{ax}$ [mm/min]
0,050	30	60	90	120	150	180	$s_{ax}$ [mm/min]
0,075	45	90	135	180	225	270	$s_{ax}$ [mm/min]
0,100	60	120	180	240	300	360	$s_{ax}$ [mm/min]
0,125	75		225				$s_{ax}$ [mm/min]
0,150	90		270				$s_{ax}$ [mm/min]

*Tabelle 5.2: Versuchsmatrix Temperatur im Bauteil (Angabe der Schnittgeschwindigkeit und der Geschwindigkeit des Axialvorschubs)*

Die durchgeführten Temperaturmessungen können außerdem Aufschluss über die eingebrachte Wärmemenge zur Verifikation der Simulation geben, die über eine reine Messung im oberflächennahen Bereich nicht möglich wäre. Zudem lässt die Wahl der Messpositionen im Bauteil und die entsprechende Präparation der Rohlinge eine Analyse des durch die Prozesswärme verursachten Wärmeeintrages in das Werkstück zu. Durch die Anordnung der Messstellen auf unterschiedlichen Radien im Bauteil kann so die Kenntnis über den radialen Temperaturverlauf im Werkstück gewonnen werden.

### 5.2.1 Charakteristischer Verlauf

In Abbildung 5.8 wird beispielhaft der charakteristische Verlauf des Temperaturmessergebnisses über die Zeit gezeigt. Für eine anschauliche Darstellung ist hier das Ergebnis einer Messung bei Verwendung eines Vollwerkzeuges in ei-

ner Zweischnittstrategie T30/70 mit der Drehzahl von 1200 WZU/min und einem Vorschub von  $s_{ax} = 0,025$  mm/WSU gewählt.

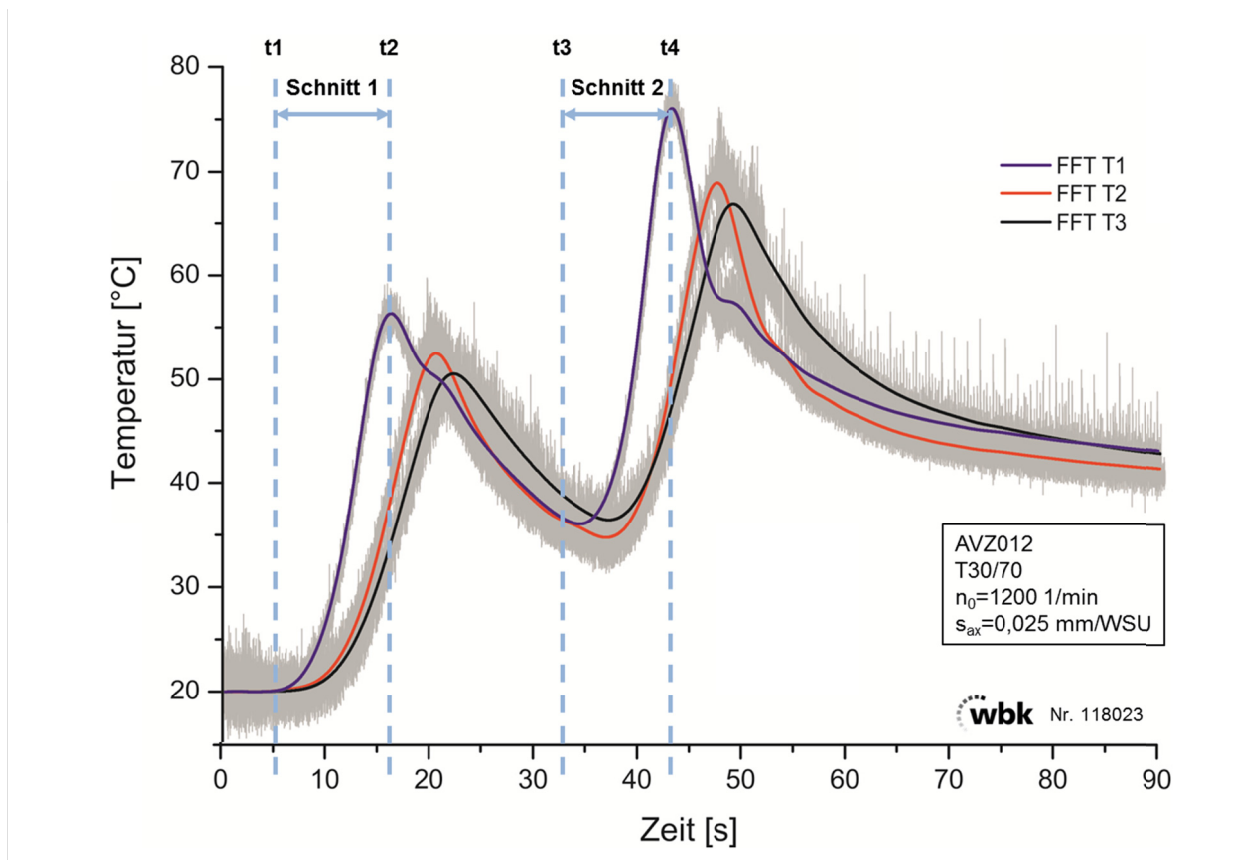


Abbildung 5.8: Temperaturmessung im Bauteil: Schnittstrategie T30/70

Es werden die 3 Messpositionen T1, T2 und T3 gemäß Abbildung 4.6 aufgetragen, zudem sind die einzelnen Prozessabschnitte mit Markern (Schnitt 1, Schnitt 2, t1 bis t4) versehen. Das Thermoelement T1 befindet sich unmittelbar im Werkstückzahnkopf (Zahnhöhe  $h = 4$  mm) auf einem Radius von  $r_{T1} = 22,65$  mm, Thermoelement T2 auf einem Radius ( $r_{T2} = 20,05$  mm) unterhalb des Fußkreises und Thermoelement T3 auf einem Radius von  $r_{T3} = 17,05$  mm, um den Wärmeeintrag radial ins Bauteil darzustellen. Der Kurvenverlauf mit dem zweimaligen Anstieg der Temperatur ist geprägt von der hier verwendeten Zweischnittstrategie mit zwei Zustellungen und jeweiligen Temperaturmaximalwerten. Für die folgende Auswertung wurden die jeweiligen Temperaturmaxima der einzelnen Schnitte sowie die jeweiligen Temperaturerhöhungen ermittelt. Dadurch werden beim zweiten Schnitt die unter-

schiedliche Abkühlung an den Messpositionen zwischen den einzelnen Schnitten mit variierten Prozessparametern sowie geringfügig unterschiedliche Starttemperaturen der Bauteile, die bei ca. 20°C gehalten wurden, berücksichtigt. Die Kurven in Abbildung 5.8 zeigen auch, dass die Thermoelemente T1, T2 und T3 einen verzögerten Anstieg der gemessenen Temperaturen zeigen. Thermoelement T1 ist der Zerspanstelle am nächsten positioniert, sobald die Bearbeitung zum Zeitpunkt  $t_1$  gestartet wurde, wird der im Vergleich mit den anderen Messstellen stärkste Temperaturanstieg gemessen. Thermoelement T3, das ca. 3 mm weiter innen als der Fußkreis liegt, zeigt einen verzögerten Temperaturanstieg. Auch nach Ende des ersten Schnitts zum Zeitpunkt  $t_2$  steigt die Temperatur in Messposition T2 und T3 weiter an, während an Messposition T1 die Temperatur wieder absinkt. Zum Zeitpunkt  $t_2$  beginnt die Rückbewegung des Werkzeuges zur Anfangsposition, bis zum Zeitpunkt  $t_3$  befindet sich das Werkzeug dann nicht im Eingriff. Zum Zeitpunkt  $t_3$  beginnt dann der zweite Schnitt, zu diesem Zeitpunkt hat sich im Bauteil wieder eine nahezu homogene Temperaturverteilung eingestellt. Im Beispiel liegt die Temperatur an Thermoelement T3 um ca. 2,5°C über den Messwerten der anderen Messstellen, die dagegen auf den gleichen Wert abgekühlt sind. Während des zweiten Schnittes bis zum Zeitpunkt  $t_4$  zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie bereits bei Schnitt 1 beschrieben wurde. Auch nach dem Ende des zweiten Schnitts beginnt an Messstelle T1 die Temperatur zu sinken, die Messstellen T2 und T3 verzeichnen weiter einen Temperaturanstieg. Der Wärmeeintrag erfolgt weiter in radialer Richtung in das Bauteil, eine Abkühlung kann hier noch nicht erfolgen. Nach beiden Schnitten wurde mit den in Abbildung 5.8 verwendeten Parametern an Messstelle T1 die höchste Temperatur gemessen. Das beschriebene Verhalten zeigt sich grundsätzlich in ähnlicher Form mit unterschiedlicher Ausprägung bei den verschiedenen Parameterkombinationen.

## 5.2.2 Variation der Prozessparameter

Bei der Variation der Prozessparameter Axialvorschub und Drehzahl werden die Maximaltemperaturen an den drei Messstellen in den Einzelschnitten ausgewertet und beurteilt. Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10 zeigen für die Drehzahlen  $n_0 = 600$  1/min bzw.  $n_0 = 1000$  1/min die charakteristischen Verläufe, die sich bei den Versuchen entsprechend der Matrix (Tabelle 5.2) bei der Verwendung eines Dreizahnwerkzeuges darstellen. Beim ersten und zweiten Schnitt (S1 und S2) zeigte sich über alle Versuchsläufe weitgehend ein übereinstimmendes Verhalten bezüglich der Variation der Prozessparameter. Bei der in Abbildung 5.9 dargestellten Drehzahl von 600 1/min zeigte sich zunächst ein konstanter Verlauf über die Variation des Axialvorschubes, bei sehr großen Axialvorschüben kommt es dann zu moderat sinkenden Maximaltemperaturen an sämtlichen Messpositionen. Hier ist davon auszugehen, dass die sich mit ansteigenden Axialvorschüben pro Werkstückumdrehung ergebenden größeren Späne entsprechend mehr Wärme ableiten können.

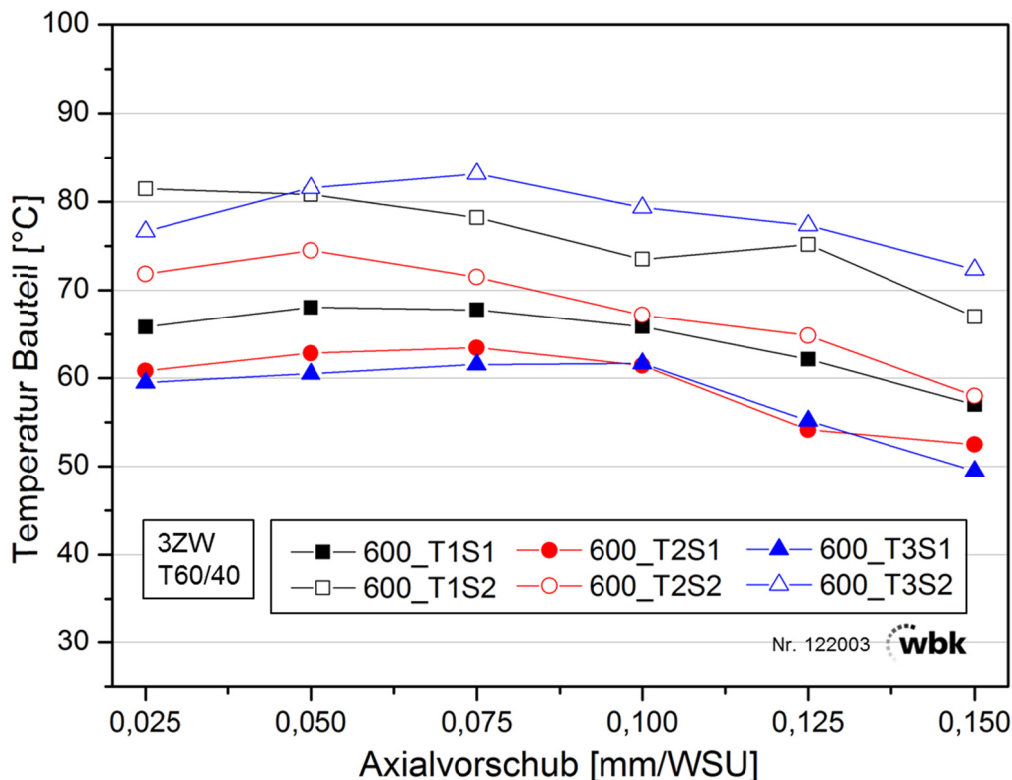


Abbildung 5.9: Verlauf Temperatur im Bauteil über die Variation des Axialvorschubes [ $n_0 = 600$  1/min]

Bei höheren Drehzahlen (vgl. Abbildung 5.10 mit  $n_0 = 1000$  1/min) zeigte sich kaum Einfluss des Axialvorschubes auf die Messergebnisse. Innerhalb des untersuchten Bereichs von  $s_{ax} = 0,025$  mm/WSU und  $s_{ax} = 0,1$  mm/WSU wurden durchweg konstante Maximaltemperaturen gemessen. Die Ergebnisse lassen darauf schließen, dass mit abnehmender Prozesszeit die Möglichkeit des Wärmeeintrags ins Bauteil reduziert wird und sich daraus geringere Maximaltemperaturen ergeben. Bei hohen Drehzahlen ist die Prozesszeit insgesamt kürzer, der Einfluss des Axialvorschubes nimmt hier ab.

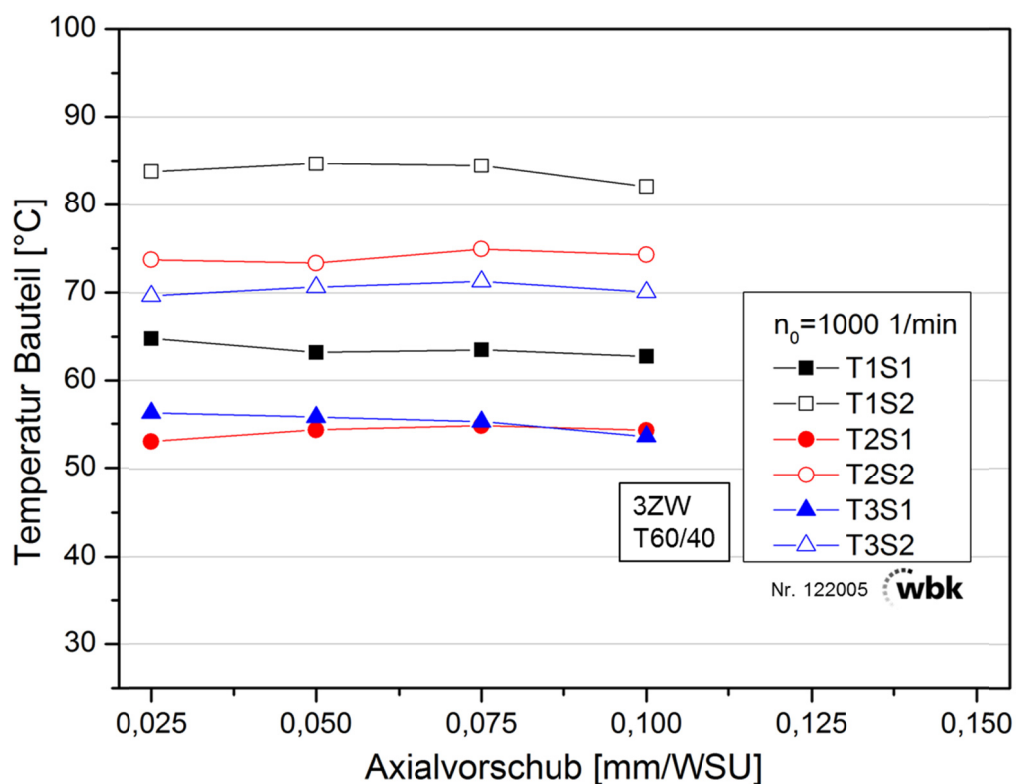


Abbildung 5.10: Verlauf Temperatur im Bauteil über die Variation des Axialvorschubes [ $n_0 = 1000$  1/min]

Der Verlauf der über die Variation der Drehzahl und somit der Schnittgeschwindigkeit an Messposition T1 anliegenden Maximaltemperatur über den vollständigen ersten Eingriff zeigt Abbildung 5.11. Die Erhöhung der Drehzahl resultiert hier insbesondere bei kleinen Drehzahlen in einer geringeren gemessenen Temperatur an allen Messpositionen. Die Reduzierung der gemessenen Werte bei Betrachtung der gesamten Bandbreite der Drehzahl von 200 1/min bis zu 1200 1/min reicht von maximal  $-20^\circ\text{C}$  bei einem Axialvor-



schub von  $s_{ax} = 0,1 \text{ mm/WSU}$  bis zu minimal  $-11^\circ\text{C}$  bei  $s_{ax} = 0,05 \text{ mm/WSU}$ . Dieses Verhalten mit bei zunehmender Drehzahl sinkenden Maximaltemperaturen konnte an allen 3 Messpositionen über sämtliche Axialvorschübe nachgewiesen werden.

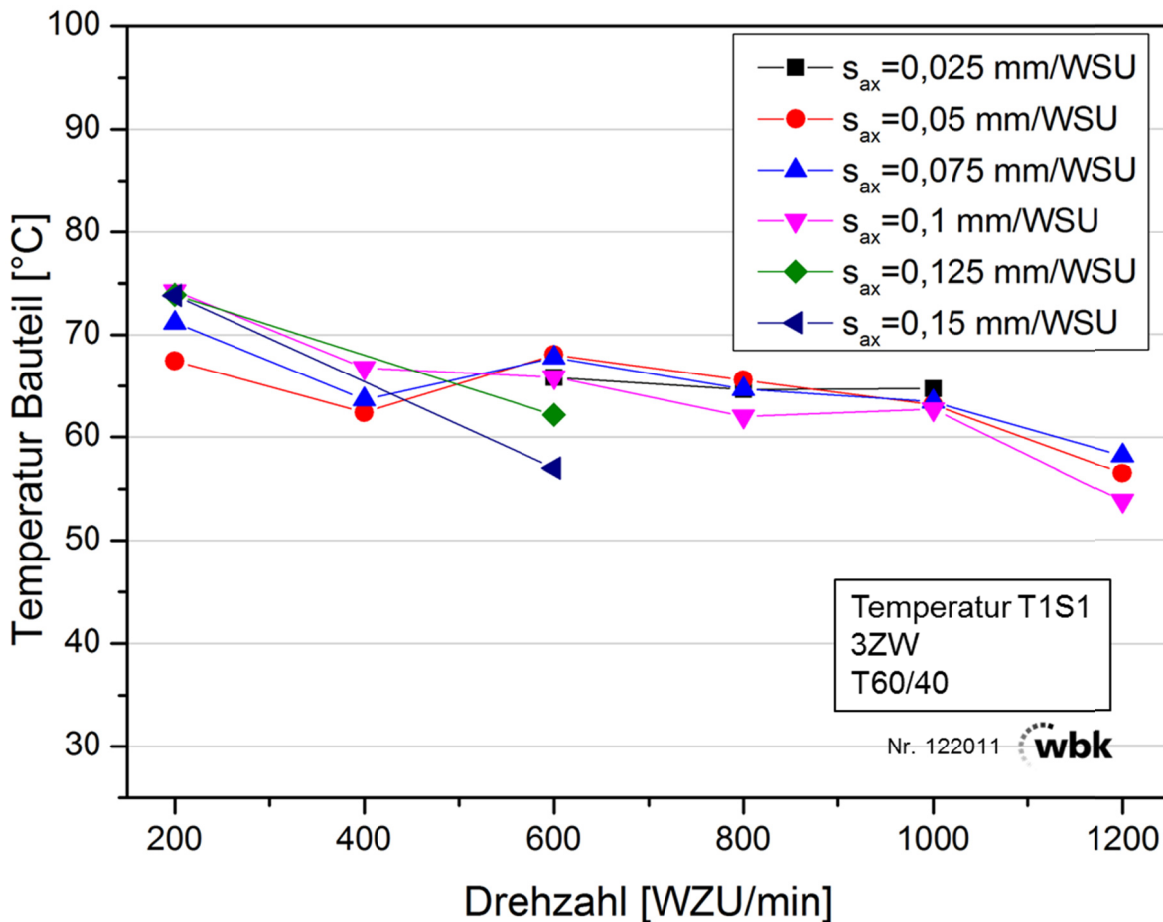


Abbildung 5.11: Verlauf Temperatur im Bauteil über die Variation der Drehzahl (Messstelle T1, Schnitt 1)

### 5.3 Temperatur der Späne

Zur Validierung der Simulationsmodelle wurde die Erfassung der auftretenden Temperaturen der Späne unter realen Bedingungen vorgenommen. Der am Institut für Produktionstechnik (wbk) speziell für das Wälzschälverfahren entwickelte Versuchsaufbau zur Durchführung der Messungen mittels Zwei-Farben-Pyrometrie ist in Kapitel 4.5.2 ausführlich dargestellt. Die Erfassung der Oberflächenstrahlung erfolgt dabei über ein in den Schneidenzahn eingebettetes Quarzfaserkabel. In der Vorbereitung der Versuche mussten zunächst die

geeigneten Einstellungen für die Messeinrichtung aus Testmessungen mit unterschiedlichen Parametern und theoretischen Überlegungen abgeleitet werden. Wichtig ist hierbei die Wahl einer geeigneten Abtastrate. Dazu muss ein erster Überblick über die Signaldauer gewonnen werden. Der Begriff der Signaldauer wird im Folgenden verwendet, um das Zeitintervall auszudrücken, in dem die relevante Temperaturmessung stattfindet. Aufgrund der Besonderheiten der Verfahrenskinetik und des Versuchsaufbaus ist die Signaldauer sehr kurz, es ist somit eine ausreichend hohe Abtastrate zu wählen. Bei Versuchen mit  $n_0 = 800 \text{ 1/min}$  wird beispielsweise eine Abtastfrequenz von mindestens  $f_{\text{Abtast}} = 14 \text{ kHz}$  erforderlich, um ein aussagekräftiges Messergebnis und dennoch handhabbare Datenmengen zu erhalten. Das verwendete Pyrometer FIRE2 erlaubt die Einstellung von Abtastraten bis zu maximal 5 MHz bei entsprechend verkürzter Gesamtmessdauer.

Bei den Experimenten zur Temperaturmessung mittels Pyrometrie wurden die Einflüsse der Drehzahl und damit der Schnittgeschwindigkeit sowie des Axialvorschubes auf die Spantemperatur im Vollschnitt untersucht. Die Versuchsmatrix in Tabelle 5.3 zeigt die einzelnen Parameterkombinationen, jeweils mit der entsprechenden Schnittgeschwindigkeit sowie der Angabe der Geschwindigkeit des Axialvorschubes. Die dargestellten Kombinationen ohne diese Angabe waren nicht im Umfang der durchgeführten Versuchsreihen enthalten. Weiterhin wurde in einzelnen Versuchsreihen die Schnittstrategie variiert. Die Durchführung der Versuche ist sehr aufwändig, es wurde in erster Linie auf die Absicherung der einzelnen Messergebnisse Wert gelegt, indem pro Parameterkombination mindestens 6 und bis zu 10 Wiederholmessungen durchgeführt wurden und der Mittelwert der Messungen ausgewertet wurde.

$n_0$ [1/min] $s_{ax}$ [mm/WSU]	200 $v_c=41\text{m/min}$	400 $v_c=82\text{m/min}$	600 $v_c=124\text{m/min}$	800 $v_c=165\text{m/min}$	1000 $v_c=206\text{m/min}$	1200 $v_c=247\text{m/min}$	
0,010							$s_{ax}$ [mm/min]
0,025		30	45	60	75	90	$s_{ax}$ [mm/min]
0,050	30	60	90	120	150	180	$s_{ax}$ [mm/min]
0,075	45	90	135	180	225		$s_{ax}$ [mm/min]
0,100	60	120	180	240			$s_{ax}$ [mm/min]
0,125		150					$s_{ax}$ [mm/min]
0,150							$s_{ax}$ [mm/min]

*Tabelle 5.3: Versuchsmatrix Spantemperatur (Angabe der Schnittgeschwindigkeit und der Geschwindigkeit des Axialvorschubs)*

### 5.3.1 Charakteristischer Verlauf

Die Messdaten liegen im ASCII Format vor und werden mit dem Datenanalyseprogramm OriginPro ausgewertet. Es werden die Zeit der Aufnahme der einzelnen Messungen, die Spannungssignale U1 und U2 des Pyrometers ausgegeben sowie die aus den Spannungssignalen berechnete Temperatur. Die Ausgabe des Temperaturverlaufes ist dadurch gekennzeichnet, dass neben der eigentlichen Messung innerhalb der Signaldauer über einen Werkzeugumlauf der Bereich des Luftschnittes mit starkem Nullrauschen sichtbar wird (vgl. Abbildung 5.12 oben). Das Nullrauschen entsteht bei Messungen von Temperaturen von unter 250°C bzw., wenn zu wenig Strahlung auf die Detektoren trifft und somit bei jedem Luftschnitt. Ein ähnliches Verhalten wird auch von [UED-06] beschrieben, der Nullrauschen im Bereich des Luftschnittes erhält. Durch die Wahl der Skalierung in Abbildung 5.12 ist ersichtlich, dass das Nullrauschen sehr stark ausgeprägt ist und für die Auswertung der einzelnen Messstellen eine geeignete Methode gefunden werden muss.

Ein Herausfiltern der Bereiche der Messungen ist mit Hilfe der Spannungssignale möglich, der Verlauf der aufgezeichneten Spannungssignale ist durch Peaks gekennzeichnet (vgl. Abbildung 5.12 Mitte und unten). Da die Span-

nung die Messgröße für die spezifische Ausstrahlung ist, können an ihr Bereiche höherer Temperatur besser erkannt werden, weil die Gesamtabstrahlung mit der vierten Potenz der Temperatur ansteigt. Prinzipiell sind beide Spannungssignale  $U_1$  und  $U_2$  für die Methode verwendbar, für die nachfolgenden Auswertungen eignet sich insbesondere die durchweg höhere Spannung  $U_2$  (Abbildung 5.12 unten).

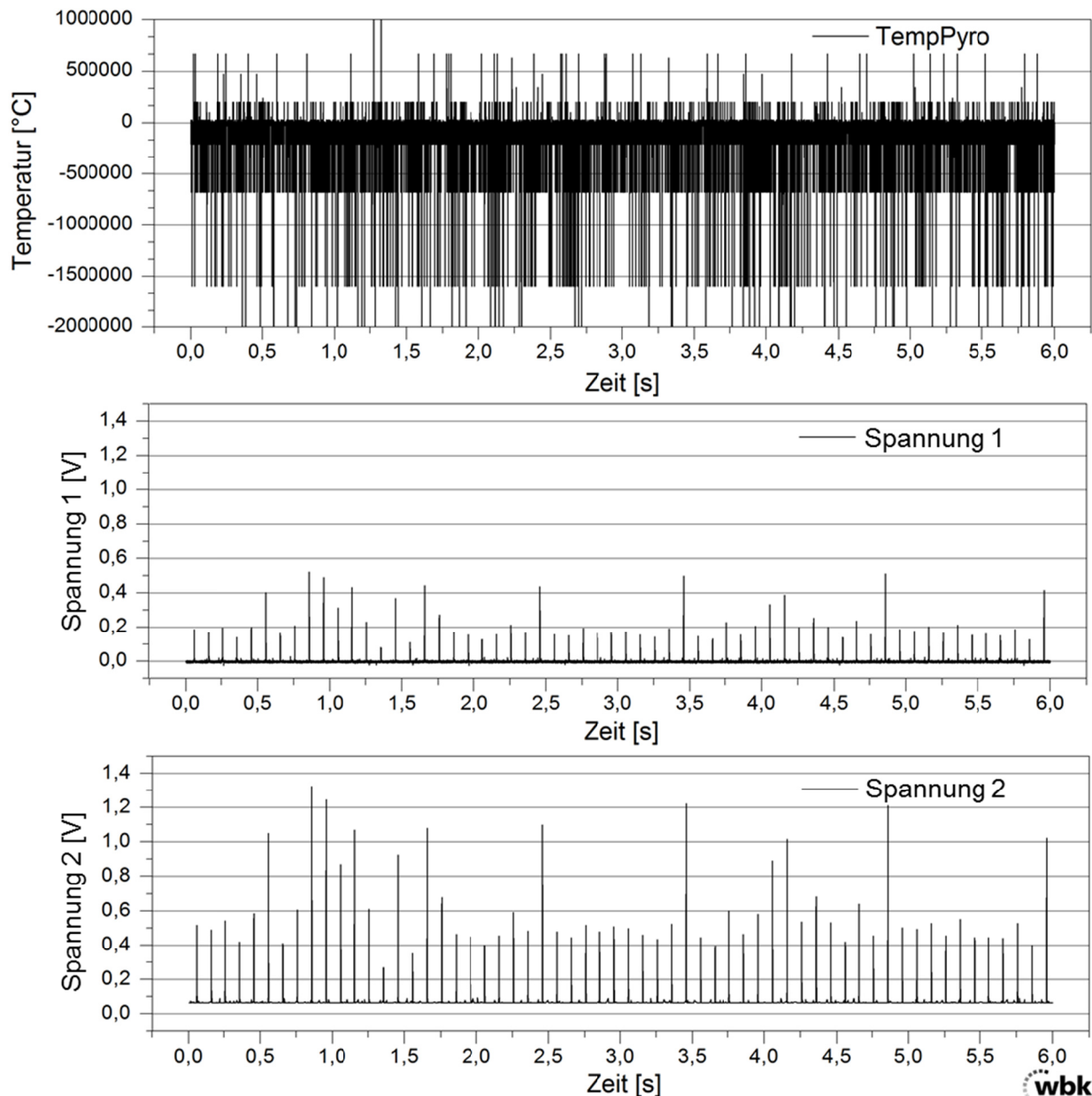
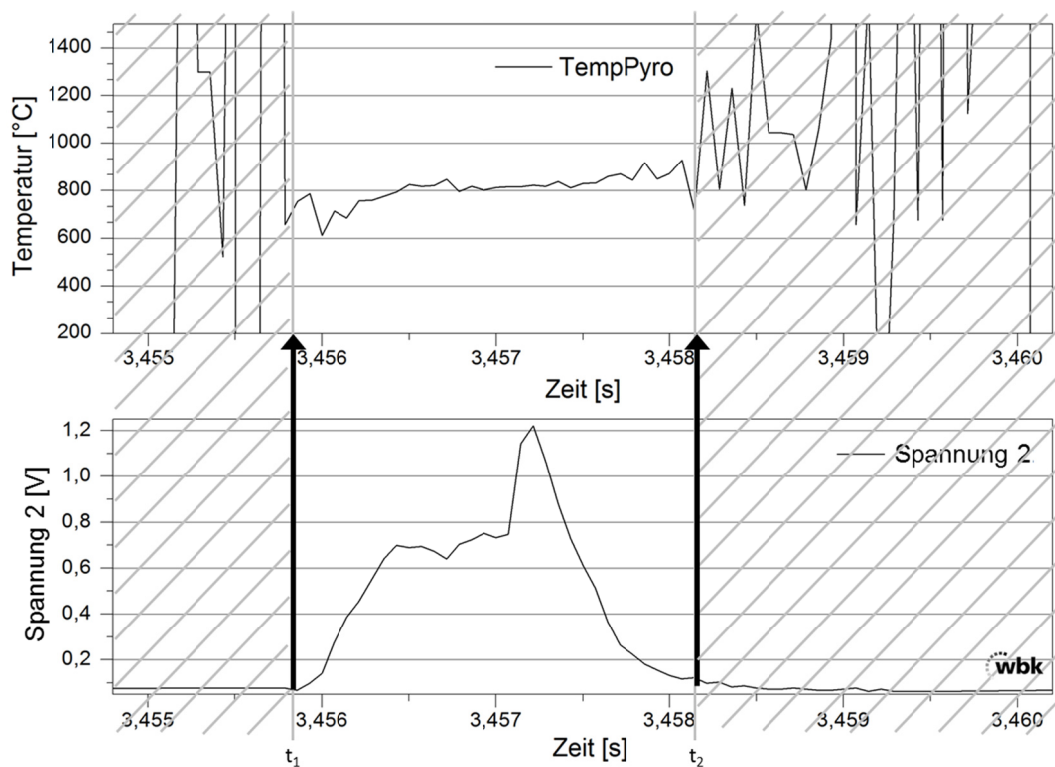


Abbildung 5.12: Ausgabe der Pyrometermessung: Temperaturverlauf (oben) und Spannung  $U_1$ ,  $U_2$  (Mitte und unten)

Die Lage der Peaks zeigt also die Bereiche an, in denen höhere Temperaturen gemessen wurden und erlaubt dadurch die Eingrenzung der Auswertung auf die Temperaturmessung während eines Schneideneingriffs. In Abbildung 5.13 wird ein so identifizierter Bereich herausvergrößert dargestellt. Eine Messstelle ist daran zu erkennen, dass sie ein zum umgebenden Messschrieb vergleichsweise geringes Rauschen aufweist. Es ist bis zum Zeitpunkt  $t_1 = 3,45575$  s und wieder ab dem Zeitpunkt  $t_2 = 3,4582$  s ein übermäßig starkes Rauschen zu erkennen. Die Messstelle befindet sich also zwischen den beiden Zeitpunkten  $t_1$  und  $t_2$ .



**Abbildung 5.13: Bereichsausschnitt der Pyrometermessung: Temperaturverlauf (oben) und Spannung U2 (unten)**

Messungen im Rahmen von experimentellen Untersuchungen unter immer von Idealbedingungen - ohne Hintergrundrauschen und unter Verwendung eines dämpfungsfreien Versuchsaufbaus - abweichenden Randbedingungen, erfordern häufig die Einstellung eines ausreichend großen Verstärkungsfaktors für das Signal. Die starke Dämpfung und die Wahl eines großen Verstärkungsfaktors führt dazu, dass das Messsignal vom Rauschen des Verstärkers überla-

gert wird und macht eine Filterung des Messsignals mit geeigneten Glättungsmethoden erforderlich. Hierzu werden die Messstellen extrahiert und ausgewertet (Abbildung 5.14).

Der in Abbildung 5.14 oben beispielhaft dargestellte Temperaturverlauf während der Messung zeigt, dass das Signal von einem sichtbaren Rauschen überlagert ist. Im Beispiel ließe sich die Temperatur jedoch noch ausreichend gut ohne Filterung des Signals ablesen. Die vorliegenden Rauschamplituden von ca. 75°C liegen eher in einem unterdurchschnittlichen Bereich für die durchgeführten Messungen. In Abbildung 5.14 unten ist der gemäß der obigen Erklärung zur Eingrenzung der Messstelle charakteristische Verlauf des Spannungssignals dargestellt. Für die Auswertung wird der Maximalwert des geglätteten Temperaturverlaufes im Bereich des isolierten Messbereichs herangezogen (vgl. Markierung Abbildung 5.14). Die Maximaltemperatur fällt dabei nicht bei jeder Messung mit dem Spannungsmaximum des Signals  $U_2$  zusammen, da sich die Temperatur aus der Differenz der Spannungen  $U_1$  und  $U_2$  ergibt.

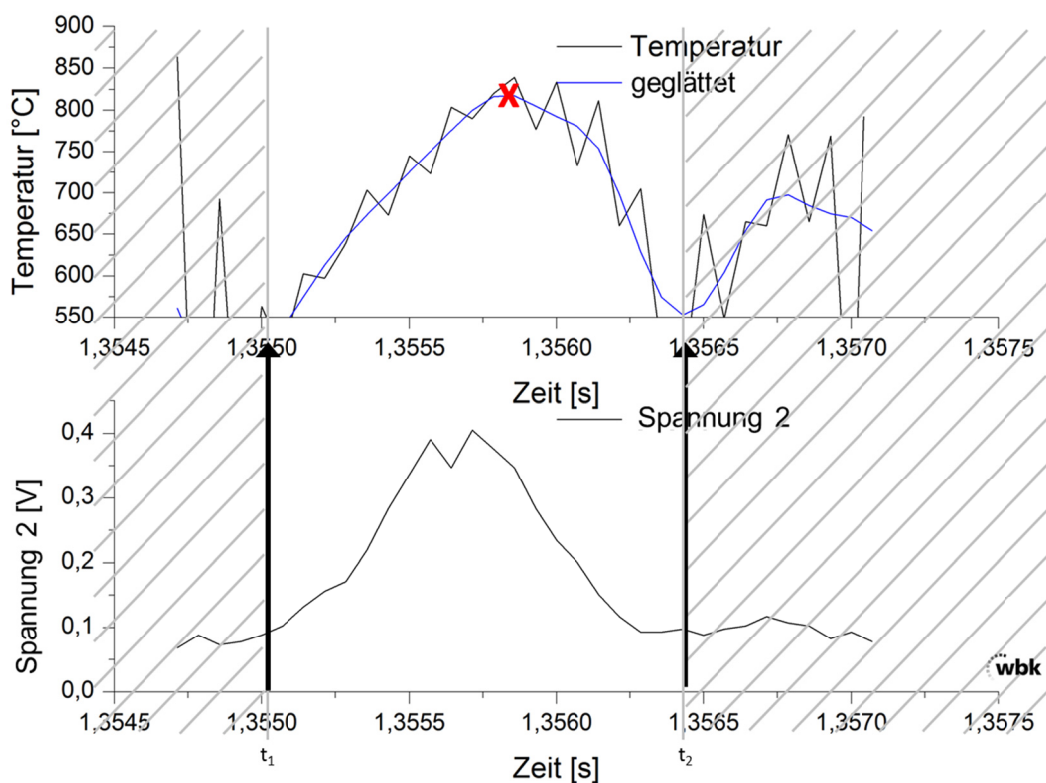


Abbildung 5.14: Extrahierte Messstelle mit FFT-geglättetem Verlauf

### 5.3.2 Variation der Prozessparameter

Tabelle 5.3 gibt die untersuchten Parameterkombinationen bei den Messungen der Spantemperatur an. Anhand Abbildung 5.15 und Abbildung 5.16 werden im Folgenden zur Veranschaulichung Ergebnisse dargestellt und die Einflüsse der Prozessparameter Schnittstrategie (Drehzahl) und Axialvorschub auf die Temperatur im Span diskutiert. Abbildung 5.15 zeigt den Verlauf der gemessenen Temperatur des Spanes über dem Axialvorschub bei den Drehzahlen 400 WZU/min, 800 WZU/min und 1200 WZU/min. In Abbildung 5.16 werden für 3 Axialvorschübe (0,025 mm/WSU, 0,050 mm/WSU, 0,075 mm/WSU) die Ergebnisse über der Drehzahl und somit Schnittgeschwindigkeit dargestellt. Dabei werden die Mittelwerte aus den Einzelmessungen angegeben, die Y-Fehlerbalken geben die Abweichungen der 6 bis maximal 10 Messungen an.

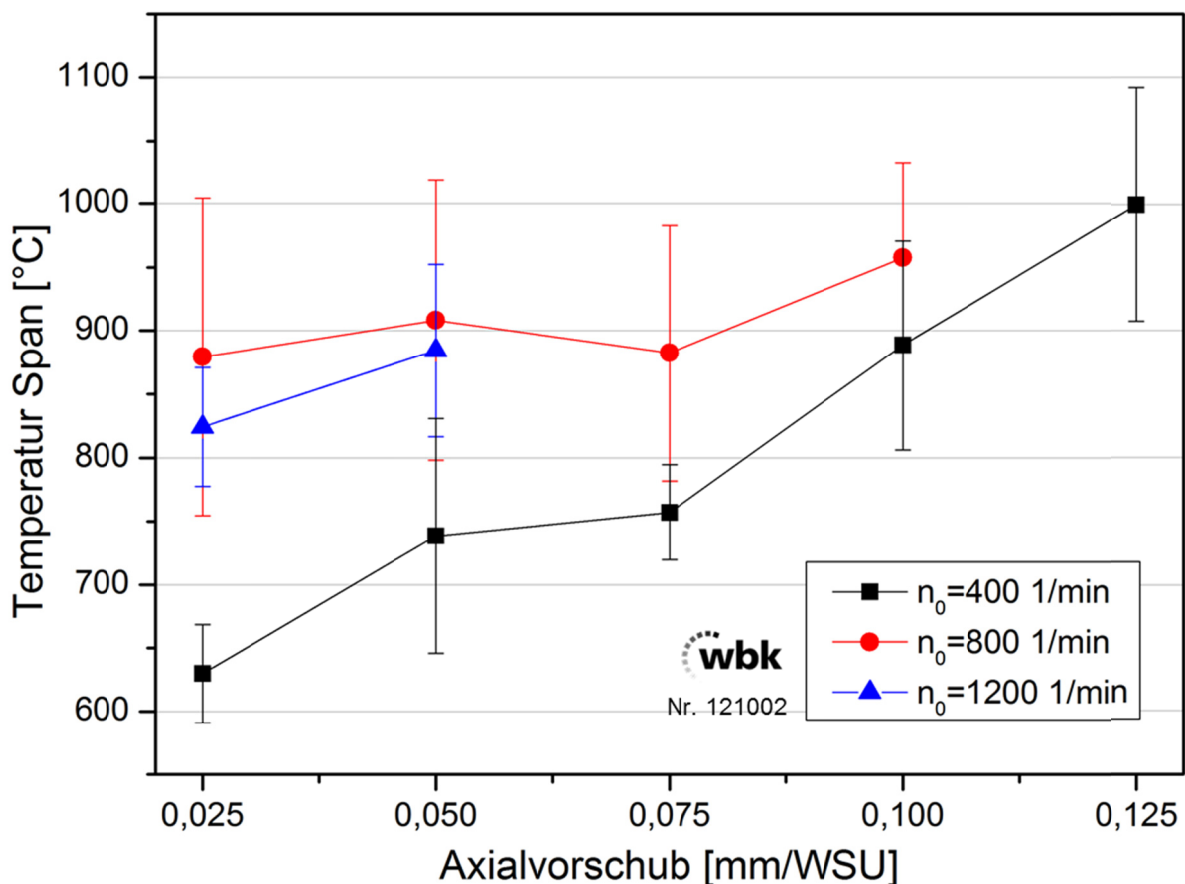


Abbildung 5.15: Spantemperatur in Abhängigkeit des Axialvorschubs

In diesem Zusammenhang zeigt sich in Abbildung 5.15 eine über alle Drehzahlen hinweg mit zunehmendem Axialvorschub ansteigende Spantemperatur. Der direkte Zusammenhang zwischen steigenden Messwerten bei zunehmendem Axialvorschub lässt sich bei allen untersuchten Drehzahlen feststellen. Der beobachtete Verlauf der Temperaturen bei einer Drehzahl von  $n_0 = 800$  1/min im Bereich kleiner Axialvorschübe und die dabei höheren gemessenen Temperaturen als bei den Messungen mit 1200 WZU/min gehen einher mit deutlich streuenden Einzelmessungen. Es ist davon auszugehen, dass bei weiterer Optimierung der Messeinrichtungen hier ein eindeutiger Zusammenhang zwischen höherer Temperatur im Span bei höheren Drehzahlen darstellbar wäre.

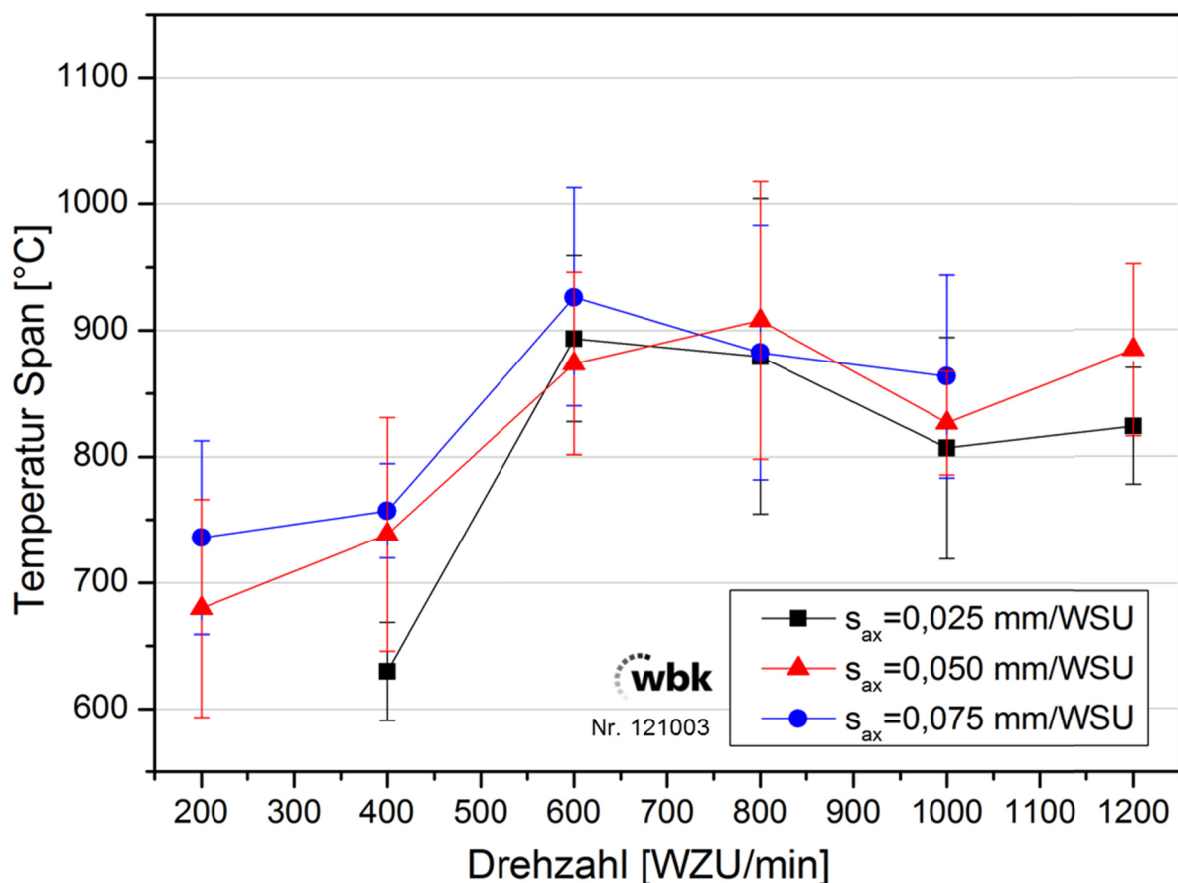


Abbildung 5.16: Spantemperatur in Abhängigkeit der Drehzahl

Bei der Erhöhung der Drehzahl und der daraus resultierenden Schnittgeschwindigkeit (vgl. Abbildung 5.16) zeigen sich ebenfalls zunächst ansteigende Spantemperaturen. Im Bereich von ca. 600 WZU/min ergeben sich ein Maxi-



mum und daran anschließend ein leichter Abfall der Spantemperatur. In dem Bereich der niedrigen Schnittgeschwindigkeiten ist von einer Störung der Spanbildung, beispielsweise in Form von Aufbauschneiden auszugehen, die bei einer Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit nicht mehr auftritt.

## 5.4 Charakterisierung der Späne

Die Charakterisierung der Späne ermöglicht ein tieferes Verständnis der Spanbildungsmechanismen und dient im Rahmen dieser Arbeit insbesondere der Verifikation der Simulationsergebnisse. Die Verschleißentwicklung ist beim Wälzschälen typischerweise nicht ausschließlich von der Schnittgeschwindigkeit oder der Höhe des gewählten Axialvorschubs abhängig, da für den Verschleiß des Werkzeugzahnes nicht nur die Höhe der Zerspanleistung ausschlaggebend ist, sondern insbesondere auch die Art der Spanentstehung und des Spanablaufs.

Beim Wälzschälen treten Mehrflankenspäne auf. Als Mehrflankenspäne werden generell Späne bezeichnet, die in einem Zerspanprozess mit geometrisch bestimmter Schneide von einem Werkzeug gebildet werden, das mehrere, zusammenhängende Schneiden aufweist. Dabei wird in der Literatur üblicherweise davon ausgegangen, dass die zusammenhängenden Schneiden gleichzeitig schneiden [KLO-07]. Die so bezeichneten Mehrflankenspäne treten bei unterschiedlichen Prozessen aus allen Bereichen der Zerspantechnik auf. Es werden die Verfahren Profildrehen, Wälzfräsen, Kegelradfräsen, Wälzstoßen und Räumen aufgeführt.

Die Späne beim Wälzschälen stellen eine Besonderheit dar. Es sind Dreiflankenspäne. Die zusammenhängenden Schneiden des Werkzeuges schneiden dabei nacheinander und sind nur teilweise gleichzeitig im Eingriff. Die Übergänge von der einlaufenden Flanke (EF) zum Kopf und schließlich zur auslaufenden Flanke (AF) (vgl. Abbildung 2.7) sind hierbei fließend. Eine ausführliche Untersuchung und Beschreibung der Spanbildungsmechanismen erfolgt im Verlauf dieser Arbeit anhand der Simulation.

$n_0$ [1/min] $s_{ax}$ [mm/WSU]	200 $v_c=41\text{m/min}$	400 $v_c=82\text{m/min}$	600 $v_c=124\text{m/min}$	800 $v_c=165\text{m/min}$	1000 $v_c=206\text{m/min}$	1200 $v_c=247\text{m/min}$	
0,010				24	30		$S_{ax}$ [mm/min]
0,025		30	45	60	75		$S_{ax}$ [mm/min]
0,050	30	60	90	120	150		$S_{ax}$ [mm/min]
0,075	45	90	135	180	225		$S_{ax}$ [mm/min]
0,100	60	120	180	240			$S_{ax}$ [mm/min]
0,125		150					$S_{ax}$ [mm/min]
0,150							$S_{ax}$ [mm/min]

*Tabelle 5.4: Versuchsmatrix Späne (Angabe der Schnittgeschwindigkeit und der Geschwindigkeit des Axialvorschubs)*

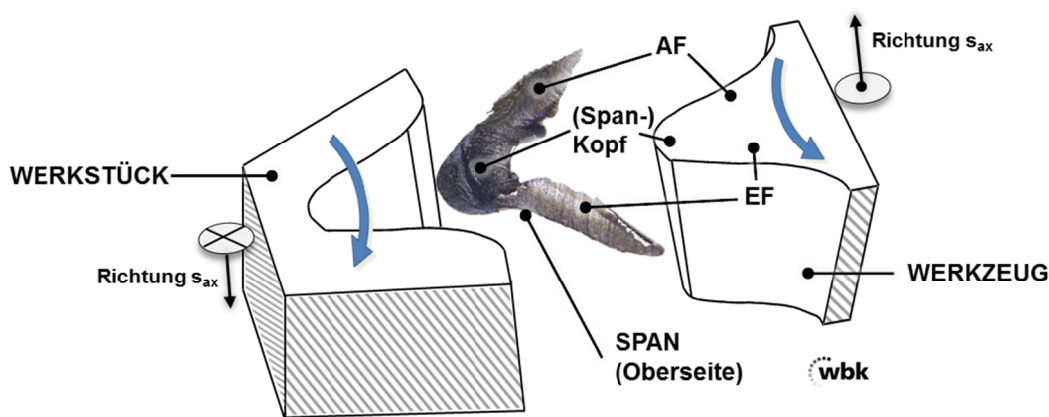
Im Rahmen der Experimente wurden die Einflüsse der Drehzahl und damit der Schnittgeschwindigkeit sowie des Axialvorschubes untersucht und in Kontext mit den beim Wälzschälen typischen Charakteristika der Späne gesetzt. Die Versuchsmatrix in Tabelle 5.4 zeigt die einzelnen Parameterkombinationen jeweils mit der entsprechenden Schnittgeschwindigkeit sowie der Angabe der Geschwindigkeit des Axialvorschubs. Die dargestellten Kombinationen ohne diese Angabe waren nicht im Umfang der durchgeführten Versuchsreihen enthalten. Weiterhin wurde in einzelnen Versuchsreihen die Schnittstrategie variiert. Es wurde die Schnittstrategie T60/40 verglichen mit einer T70/30 Schnittstrategie. Weiterhin wurden Stichversuche mit Vollschnitt (T100/0) durchgeführt.

#### 5.4.1 Spangestalt

In der Literatur sind bisher nur vereinzelt Späne aus dem Wälzschälprozess untersucht und die einzelnen Merkmale und Spansegmente des Dreiflankenpanes teilweise widersprüchlich bezeichnet worden [JAN-80; BEC-06]. Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen unter Variation der Prozessparameter erlauben eine vollständige Charakterisierung der typischen Späne des Verfahrens. Die weitergehende Untersuchung und insbesondere ein

Vergleich von Prozessparametern macht außerdem eine einheitliche Bezeichnung der Merkmale und Segmente am Span erforderlich. Bei den folgenden Ausführungen werden die Bezeichnungen und die Terminologie aus der Literatur berücksichtigt, soweit diese sinnvoll und eindeutig sind. Die Bezeichnungen orientieren sich an der Gestalt des Werkzeuges (Abbildung 5.17).

Alle beim Wälzschälen im Vollschnitt entstehenden Dreiflankenspäne gleichen sich in ihren Grundzügen. Sie besitzen die Gesamtform des Umrisses einer Verzahnungslücke. Die Späne bestehen zusammenhängend aus der einlaufenden Flanke, dem Kopf und der auslaufenden Flanke. Dies entspricht an einem Werkzeugzahn den entsprechenden Schneiden der Zahnflanken und der Schneide am Kopfkreis. Die Zuordnung wird in Abbildung 5.17 deutlich.



*Abbildung 5.17: Definition der Spangestalt an der Entstehungskinematik*

Abbildung 5.18 zeigt die Definitionen der Spanansichten, der einzelnen Spananteile und der eindeutigen Spanmerkmale sowie einige qualitative Merkmale und Eigenschaften des Spanes, die bei folgenden Prozessparametern teilweise unterschiedlich ausgeprägt sein können.

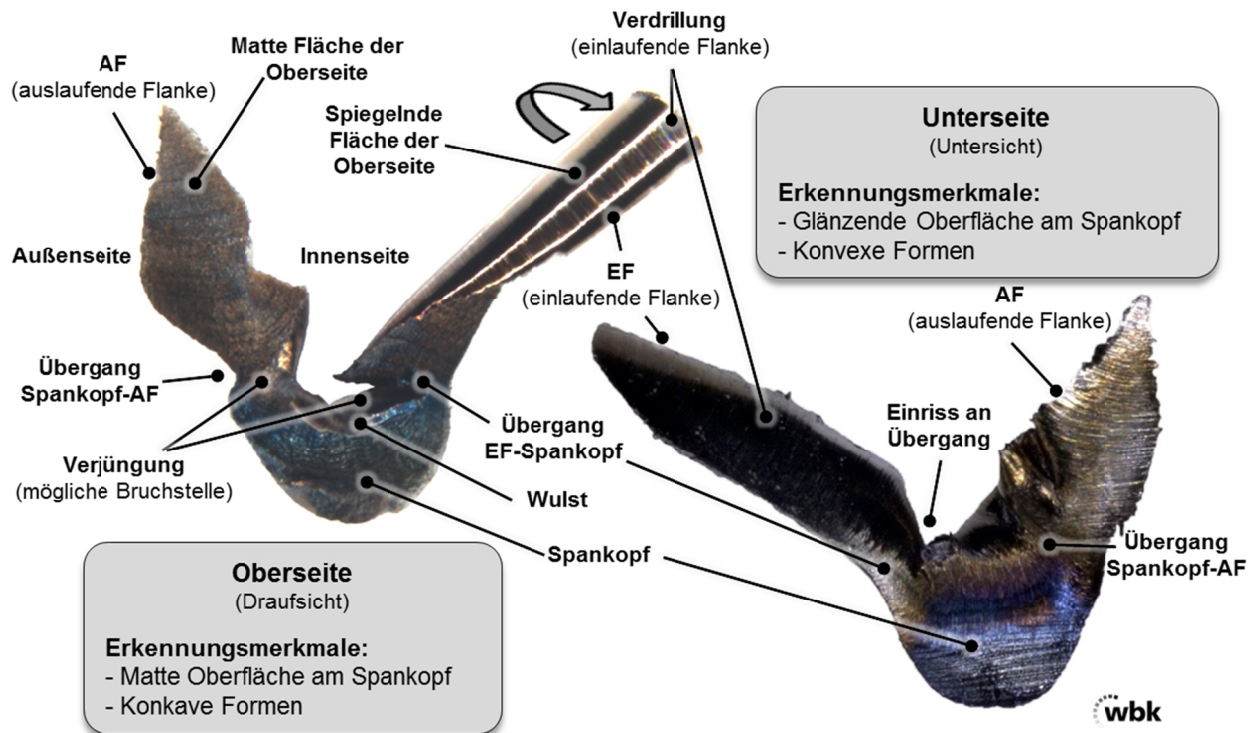


Abbildung 5.18: Spanansichten, -teile und Merkmale am Wälzschälspan

Demnach werden, wie in der Literatur üblich [JAN-80, MÜL-04], die beim Schnittvorgang entstehende Fläche des Spans mit Unterseite und die Fläche, die schon vor dem Schnitt existierte und somit die ehemalige Oberfläche des Halbzeugs darstellt, mit Oberseite des Spans bezeichnet. Da die beiden Schenkel (Flanken) möglicherweise in sich verdrillt sein können, ist die Zuordnung an ihnen teilweise nicht eindeutig vorzunehmen. Der Spankopf zeigt vereinzelt eine kleine Wulst, die Zuordnung zu Ober- bzw. Unterseite ist hier jedoch zuverlässig möglich. Ein weiteres Indiz für die Orientierung bilden die Krümmungen der Strukturen. Ähnlich wie beim einflankigen Span krümmen sich die verschiedenen Spanabschnitte zur Spanoberseite hin. Die Spanoberseite ist somit durch konkave Formen und die Spanunterseite durch konvexe Formen geprägt.

#### 5.4.2 Spanklemmer

Als Spanklemmer werden Späne bezeichnet, die nicht abgeführt werden können, sondern sich vielmehr weiterhin im Bereich der Zerspansstelle befinden

und dabei den Prozess stören können. Dadurch kann die Spanbildung bei nachfolgenden Werkzeugeingriffen negativ beeinflusst werden, die Oberfläche des Bauteils kann durch Beschädigungen verschlechtert oder gar unbrauchbar gemacht werden und es kann zu erhöhtem Verschleiß oder Ausbrüchen am Werkzeug kommen. Spanklemmer wurden auch in vorangegangenen Untersuchungen zum Wälzschälen [FLE-05, BEC-06], beim Bohren oder Gewindebohren [OPH-98] sowie weiteren Verfahren [KLO-07] festgestellt und als kritisch für die Prozessstabilität und Automatisierbarkeit von Prozessen angesehen.

Beim Wälzschälen können Spanklemmer hinsichtlich ihrer Entstehung in zwei Kategorien eingeteilt werden (Abbildung 5.19). Spanklemmer der ersten Kategorie wurden zunächst vollständig vom Werkstück abgetrennt, gelangen anschließend jedoch zurück in den Bereich der Zerspanstelle und stören damit den Zerspanvorgang.

Spanklemmer der ersten Kategorie treten vor allem beim Fertigen von Innenverzahnungen auf. Hier wird ihr Abtransport mit Hilfe von Fliehkräften durch das Werkstück selbst behindert, durch das hohe Zeitspanvolumen können sich Spänenester bilden, die in kurzer Zeit wegbefördert werden müssen. Eine effektive Spül- oder Späneabblaseeinrichtung, Bürsten und eine entsprechend ausgelegte Spannvorrichtung des Werkstücks können hier erforderlich werden. Von [BEC-06] wurde bereits angemerkt, dass Teile des Dreiflankenspanes während des Zerspanprozesses in den verbreiterten keilförmigen Spalt zwischen Werkzeug und Werkstück geraten und mit der Werkstückflanke verpresst werden können. Die Platzverhältnisse müssen bei der Prozessauslegung entsprechend berücksichtigt werden. Hier kann die Kinematiksimulation ein wichtiges Werkzeug darstellen.

Erweitert werden kann diese Erkenntnis durch die Späne zweiter Kategorie. Die zweite Kategorie bezeichnet Späne, die während der Bearbeitung nicht gänzlich vom Werkstück getrennt wurden und dadurch weiterhin im Bereich der Bearbeitung verbleiben. Dabei ist insbesondere kritisch zu beurteilen, dass die Späne der zweiten Kategorie noch stoffschlüssig mit dem Bauteil verbun-

den bleiben und sich beim nächsten Eingriff eines Werkzeugzahnes im Bereich des Hüllschnittes des vorangegangenen Zahneingriffs befinden. Bei Spänen dieser Kategorie spielen unterbrochene Spanbereiche, die Unterschreitung einer Mindestspanungsdicke und Mechanismen des Ploughing-Effektes eine entscheidende Rolle. Eine Beurteilung der Entstehungs- und der daraus resultierenden Vermeidungsmechanismen kann nicht allein durch die Betrachtung der unverformten Spanungsbereiche erfolgen, die durch die bisher zur Verfügung stehende Software zur Werkzeug- und Prozessauslegung ermöglicht wird. Hier kann die simulative Abbildung des Spanbildungsprozesses eine ganzheitliche Betrachtung ermöglichen, indem zusätzlich die Spanwinkel, die Spanablaufrichtungen und -geschwindigkeiten mit in Betracht gezogen werden können.

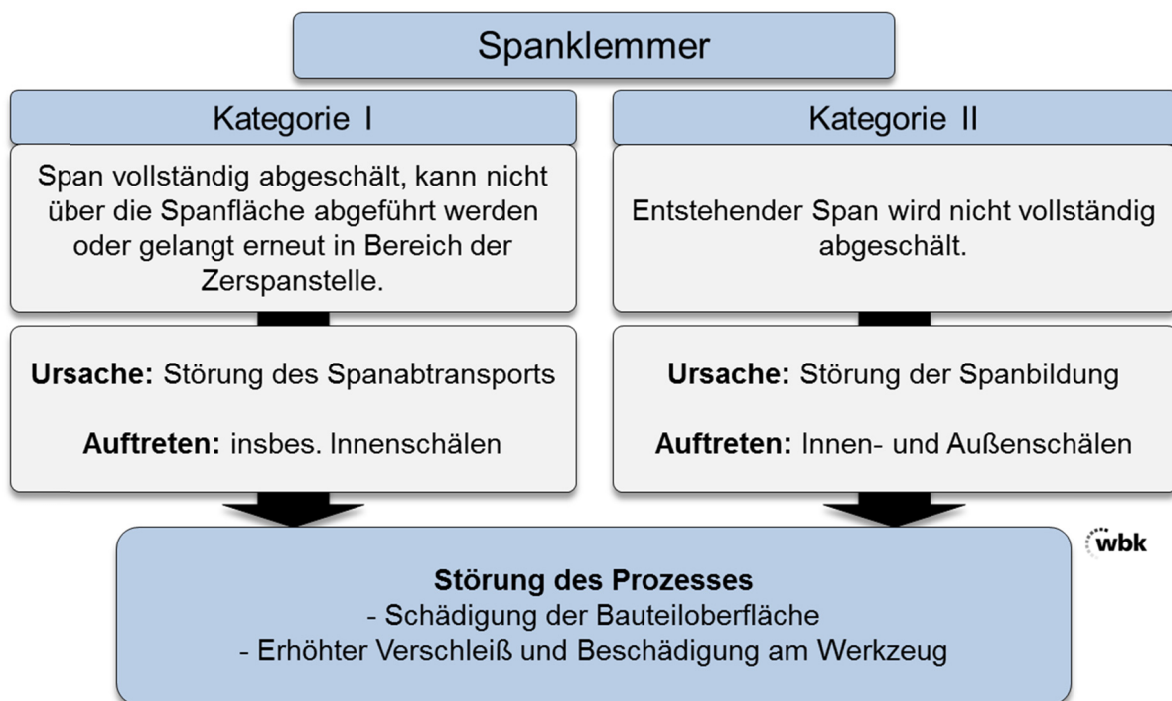


Abbildung 5.19: Einteilung der Spanklemmer nach Art der Entstehung

Je nachdem, wie der Span nach dem Prozess vorliegt, wird außerdem zwischen festen und lösbaren Spanklemmern unterschieden (Abbildung 5.20). Feste Spanklemmer sind fest mit der Oberfläche des Bauteils verbunden. Der Werkzeugzahn hat Teile des Dreiflankenspanes überfahren und den Span mit der Oberfläche verpresst. Mechanisch lässt sich der feste Spanklemmer mit

Bürsten oder anderen Gegenständen nicht entfernen. In den nachfolgenden Prozessschritten Härten oder Feinbearbeitung könnte sich der Span lösen. Es ist allerdings davon auszugehen, dass eine Beschädigung der Bauteiloberfläche zurückbleibt. Im Gegensatz dazu lassen sich lose Spanklemmer ohne Schwierigkeiten manuell leicht lösen und entfernen. Abbildung 5.20 zeigt Zahnflanken wälzgeschälter Bauteile mit a) festem Spanklemmer, b) lösbarem Teil eines Spanes sowie die Oberfläche nach Entfernung des lösbaren Spanklemmers.

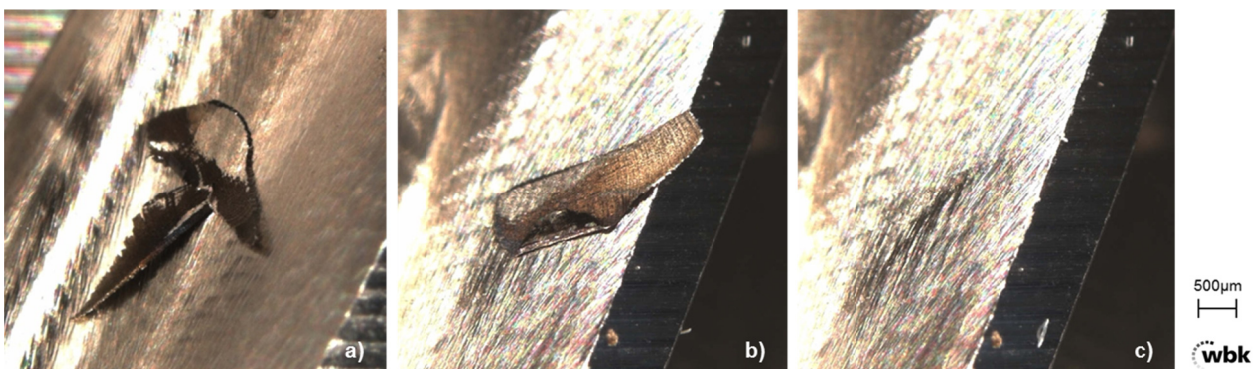


Abbildung 5.20: Feste und lösbare Spanklemmer [BEC-06]

### 5.4.3 Aufbauschneiden

Bei den Versuchen mit sehr niedrigen Drehzahlen von 200 WZU/min wurde die Bildung von Aufbauschneiden in Form von Ablagerungen auf der Werkzeugschneide beobachtet. Während den Versuchsläufen kam es zu hohen Vibrationen der Maschine mit lauten Klopferäuschen, die normalerweise in dieser Form nicht auftreten. Nach Abbruch der Bearbeitung bei der Parameterkombination mit einem Axialvorschub  $s_{ax} = 30 \text{ mm/min}$  (entspricht  $0,05 \text{ mm/WSU}$ ) waren auf einigen Werkzeugzähnen Ablagerungen des zerspannten Materials zu finden (siehe Abbildung 5.21). Die Ablagerungen sind deutlich massiger als alle untersuchten Späne. Sie besitzen ein durchschnittliches Gewicht von  $147 \times 10^{-4} \text{ g}$ . Die Unterseite ist sehr glatt, während die Oberseite ebenso wie die Späne eine matte Oberfläche aufweist. Die Ablagerungen lassen sich ohne Schwierigkeiten per Hand vom Werkzeug entfernen. Nach der Literatur treten Aufbauschneiden in einem bestimmten Schnittgeschwin-

digkeitsbereich auf. Das Auftreten kann vermieden werden, indem die Schnittgeschwindigkeit erhöht wird. Schon bei Drehzahlen von 400 WZU/min konnten die beschriebenen Ablagerungen nach der Bearbeitung nicht mehr nachgewiesen werden. Da hier verbunden mit niedrigen Axialvorschüben jedoch ebenso Vibrationen und Klopfgeräusche während des Prozesses festgestellt wurden, ist auch hier von einem Auftreten auszugehen, die Ausprägung ist jedoch deutlich reduziert. Bei Drehzahlen von 600 WZU/min liegt ein normales Prozess- und Maschinenverhalten vor. In der Praxis sind derart niedrige Drehzahlen von 200 U/min nicht üblich, es kann demnach davon ausgegangen werden, dass Aufbauschneiden beim Wälzschälverfahren normalerweise keine Bedeutung haben. Sofern ähnliche Phänomene im Prozess auftreten, sollte die Kinematik jedoch hinsichtlich der lokalen Schnittgeschwindigkeiten überprüft werden.



Abbildung 5.21: Aufbauschneiden (am Werkzeug, Unter- bzw. Oberseite)

#### 5.4.4 Bestimmung der Spanraumzahl beim Wälzschälen

Die dimensionslose Spanraumzahl  $RZ$  gibt das Verhältnis des Volumens der Späne  $Q_{\text{Span}}$  (Schüttvolumen) pro Zeiteinheit zum Volumen des in dieser Zeit zerspannten Materials  $Q_{\text{W}}$  (Zeitspannvolumen) an. Eine große Zahl steht dabei für einen hohen Raumbedarf der Späne. Normalerweise wird eine kleine Spanraumzahl angestrebt. Das Wissen um die Größenordnung dieser Kenngröße ist wichtig, um das makroskopische Verhalten der Späne einzustufen zu können. Diese "Sperrigkeit" der Späne dient der Bemessung von Arbeitsräumen der Werkzeugmaschine, von Spantransporteinrichtungen und Spanräu-



men der Werkzeuge. Ebenso lässt es die Verhältnisse unmittelbar an der Schneide beurteilen.

Verglichen mit anderen Verfahren entstehen beim Wälzschälen sehr kleine Späne. Spanformen, die eine sehr hohe Varianz der Spanraumzahl hervorrufen und dann in Vergleich gezogen werden könnten, sind beim Wälzschälen auch bei unterschiedlichsten Parameterkombinationen prozessbedingt nicht zu erwarten. Um das Wälzschälverfahren jedoch gegenüber anderen Verfahren einordnen zu können, wurde die durchschnittliche Spanraumzahl über einen Querschnitt von Versuchen mit unterschiedlichen Prozessparametern ermittelt. Hierzu wurde eine größere Menge an Spänen gesammelt und die Spanraumzahl experimentell ermittelt. Die so bei unterschiedlichen Parameterkombinationen entstandenen Späne ergeben dabei einen für den abgedeckten Parameterbereich gemittelten Wert für die Spanraumzahl. Die beiden Größen, aus denen sich die Spanraumzahl berechnen lässt, sind auf den gleichen Zeitraum bezogen. Um im Folgenden die Spanraumzahl zu bestimmen, wurde das Schüttvolumen einer bestimmten Menge Späne und anschließend das reale Volumen des Spanmaterials über das jeweils verdrängte Volumen in einem Messbecher ermittelt. Die Späne wurden zunächst mit Lösungsmittel gereinigt, um das Öl zu entfernen und danach getrocknet. Um das Schüttvolumen der Probe zu bestimmen, wurden die Späne in einer geeigneten Folien kompakt verfüllt, jedoch ohne sie zu verdichten und damit das Messergebnis zu verfälschen. Das Spanvolumen wurde zusätzlich anhand der bekannten Dichte des Werkstoffes noch über das Gewicht der Probe überprüft. Als Spanraumzahl für das Wälzschälverfahren wurde der Wert  $RZ = 8$  ermittelt. Eine vergleichende Betrachtung der Spanraumzahl verschiedener Prozessparameter hat sich aus oben genannten Gründen im Verlauf der Arbeiten als nicht zweckmäßig herausgestellt. Die ermittelte Spanraumzahl  $RZ = 8$  liegt im plausiblen Bereich zwischen üblichen Bröckelspänen ( $RZ \geq 2$ ) und Spanlocken ( $RZ \approx 5 \dots 20$ ). Sie ist etwas größer als bei Bröckelspänen. Dies kann damit erklärt werden, dass

die Späne beim Wälzschälen aufgrund der Mehrflankigkeit einen größeren Raumbedarf haben.

#### **5.4.5 Qualitative Merkmale**

Viele Merkmale, die die Dreiflankenspäne des Wälzschälverfahrens auszeichnen, lassen sich statistisch erfassen. Im Folgenden werden die beschrieben, die besonders markant für das Verfahren sind. Die verwendeten Bezeichnungen, Merkmale und Abschnitte des Spanes werden in Abbildung 5.18 aufgeführt. Für die Auswertung der qualitativen Beurteilung der Spanproben werden Parametertabellen nach gleichem Schema dargestellt.

##### ***Fehlende Flanken***

Bei der Untersuchung von Spänen des Vollschnitts bei unterschiedlichen Parameterkombinationen kann festgestellt werden, dass bei manchen Proben fast ausschließlich komplette Dreiflankenspäne enthalten sind, während bei anderen Versuchen beim Großteil der Späne eine Flanke abgebrochen ist. Bei unvollständigen Spänen wird in dieser Arbeit immer der Teil als eigentlicher Span bezeichnet, welcher aus Kopf und einer Flanke besteht. Den fehlenden Teil stellt dann eine einzelne Flanke dar. Ein abgebrochener Teil am Span kann hier als Indiz für die Störung der Ausbildung des Dreiflankenspanes beurteilt werden.

In Abbildung 5.22 wird bei der qualitativen Beurteilung des Auftretens fehlender Spanteile 3 Stufen unterschieden. Das Prädikat „überwiegend“ wird verwendet, wenn von der Gesamtheit der untersuchten Späne pro Probe bei ca. 75-100% fehlende Flanken vorkommen und das Prädikat „häufig“ bei ca. 40-75% Häufigkeit.

Ein Zusammenhang unvollständiger Späne mit den Prozessparametern ist beim 1. Schnitt insbesondere mit dem Axialvorschub ausgeprägt. Das überwiegende Fehlen einer Flanke ist vor allem bei niedrigen Axialvorschüben zu verzeichnen. Der Zusammenhang ist also mit der Länge der Vorschubbewe-

gung pro Schnitt zu sehen, der schlankere Span zeigt geringere Stabilität und damit eine Neigung zum Bruch an den kritischen Übergangsstellen zwischen Spankopf und -flanke.

Beim 2. Schnitt ist der dargestellten Schnittstrategie T60/40 ergibt sich nach Auswertung der Spanproben das gleiche Grundmuster, jedoch weniger deutlich ausgeprägt. Insgesamt ist die Häufigkeit fehlender Flanken geringer als beim 1. Schnitt. Die Tatsache, dass beim zweiten Eingriff des Werkzeugs in eine vorgeschnittene Lücke, insbesondere im Bereich des Kopfes weniger Material vorhanden ist, bedeutet für die Späne einen homogeneren Querschnitt sowie Übergang von den Flanken zum Kopf.

1. Schnitt T60/40	n0	200	400	600	800	1000
	sax 1/min	1/min	1/min	1/min	1/min	1/min
0,010 mm/WSU					++	++
0,025 mm/WSU			++	++	+	++
0,050 mm/WSU	+	+	+	+	+	+
0,075 mm/WSU	+	o	o	o	o	o
0,100 mm/WSU	+	o	o	o		
0,125 mm/WSU		o				

2. Schnitt T60/40	n0	200	400	600	800	1000
	sax 1/min	1/min	1/min	1/min	1/min	1/min
0,010 mm/WSU					++	++
0,025 mm/WSU			++	+	+	+
0,050 mm/WSU	+	+	o	o	o	o
0,075 mm/WSU	o	o	o	o	o	o
0,100 mm/WSU	o	o	o	o		
0,125 mm/WSU		o				

<b>Angaben zur Ausprägung:</b>	gering: o	häufig: +	überwiegend: ++	
--------------------------------	-----------	-----------	-----------------	--

Abbildung 5.22: Ergebnisse Beurteilung der Häufigkeit fehlender Flanken am Span

**Verfärbung der Späne**

Die untersuchten Späne weisen über ihre Oberfläche eine Farbveränderung auf. Exemplarisch ist hierzu in Abbildung 5.23 die Ober- bzw. Unterseite eines Spanes dargestellt.

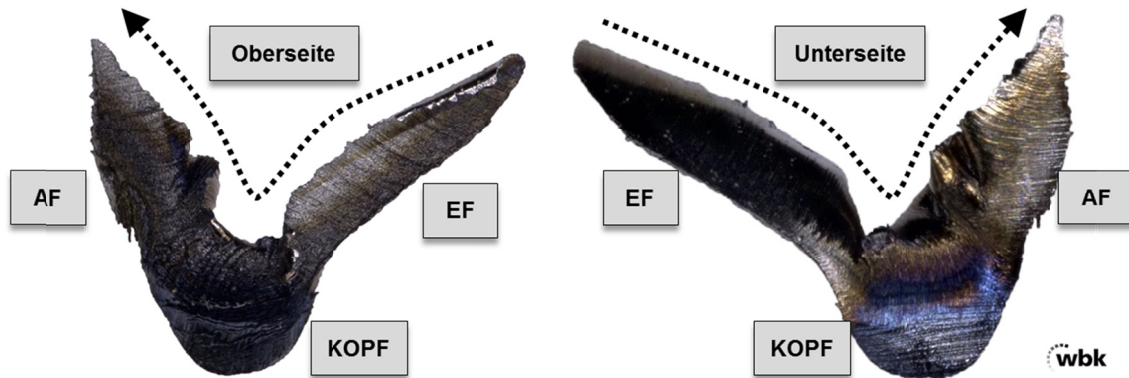


Abbildung 5.23: Verfärbung der Späne

Betrachtet man den abgewickelten Span von der einlaufenden Flanke über den Kopf zur auslaufenden Flanke (Pfeil), so ist ein auffälliger Farbverlauf längs des Spans erkennbar. Die Farben werden von beiden Seiten zum Kopf hin dunkler. Auch quer zur Richtung des abgewickelten Spans ist eine farbliche Änderung erkennbar. Der Span wird von der innen im V liegenden Kontur zur Außenkontur hin dunkler. Der beschriebene Sachverhalt deutet auf unterschiedliche Temperaturen in den einzelnen Spanabschnitten während der Spanbildung hin. Der Verlauf der Farbänderung zeigt an, dass die Temperaturen längs des Spanes zum Kopf hin und quer zum Spanverlauf zur Außenkontur hin zunehmen. Der Temperaturanstieg lässt sich mit einem Anstieg der Spanungsdicke insbesondere im Bereich des Kopfes und einem daraus folgenden erhöhten Umformgrad, sowie einem Anstieg der Schnittgeschwindigkeit im Verlauf der Schnittbewegung erklären.

### ***Wulst auf Kopfinnenseite***

Eine große Zahl an untersuchten Spänen zeigt auf ihrer Innenseite einen Wulst, der in Richtung Oberseite des Spans gewölbt ist (vgl. Abbildung 5.18 links). Dieser Wulst kann mit dem Verlauf des Spanungsquerschnittes über einen Schnitt erklärt werden. Er besteht aus dem Material des Schnittbeginns am Kopf. Durch die niedrigere Spanungsdicke liegt ein geringerer Querschnitt vor, welcher weniger Widerstand gegen eine Verformung darstellt. Mit der Bewegung der Schneide über den Kopf hin zur auslaufenden Flanke nimmt die Spanungsdicke zu, zusätzlich verändert sich der Spanwinkel und das Mate-

rial wird gestaucht. Das später als Wulst ausgebildete Material wird durch nachfließendes Material zur Mitte der Zahnücke hin gedrängt, um die hierbei entstehenden Spannungen abzubauen, wölbt sich das Material nach oben. Bei diesem Vorgang kann es zu Einrissen der Innenkante kommen (vgl. Abbildung 5.18). Diese Einrisse treten vor allem an Stellen mit starker Krümmung im Spanverlauf auf, wo die Belastungen besonders groß sind. Zu der beschriebenen Theorie der Wulstentstehung passt außerdem, dass der Wulst insbesondere in Bereichen auftritt, bei denen gegen Ende des Schnitts der Spanungsquerschnitt deutlich zunimmt.

Exemplarische Abbildung von Spänen als Richtwert für die qualitative Bewertung des Kopfwulstes sind in Abbildung 5.24 dargestellt. Ein komplettes Fehlen eines Wulstes konnte nur bei Proben der Drehzahl 200 WZU/min beobachtet werden. Bereits bei der Beschreibung der Aufbauschneidenbildung wurde die Sonderstellung dieses Drehzahlbereiches erläutert, für die weitere Betrachtung wird diese daher nicht weitergehend untersucht. Des Weiteren ist eine ausgeprägte Wulstbildung insbesondere beim 2. Schnitt einer Mehrschnittstrategie zu finden.

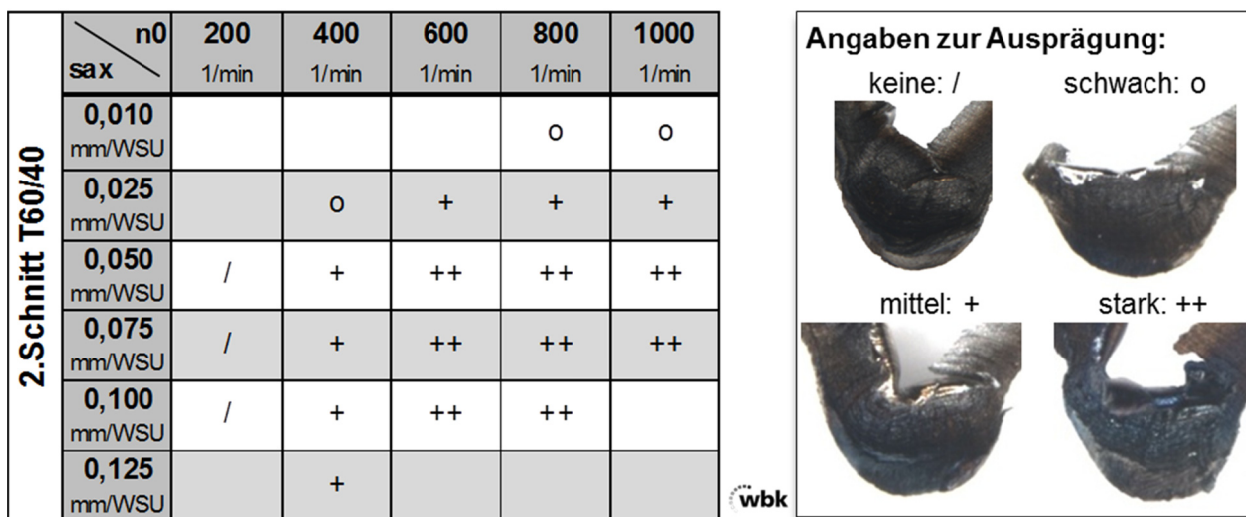


Abbildung 5.24: Ergebnisse Beurteilung der Ausprägung des Wulstes

Nach Abbildung 5.24 ist ein Zusammenhang der Wulstgröße mit dem Axialvorschub in mm/WSU zu erkennen. Bei kleinen Vorschüben bildet sich eine

kleinere Wulst aus. Eine Abhängigkeit von der Drehzahl äußert sich darin, dass sich bei geringen Drehzahlen von 400 WZU/min eine schwächere Ausprägung verzeichnen lässt. Die Späne sind hier massiver aufgebaut, ein Aufwölben der Innenkante zu einer Wulst ist weniger deutlich ausgeprägt, die Struktur bricht eher an den kritischen Stellen und die Bruchbereiche schieben sich übereinander. Bei Proben der Versuche mit  $n_0 \geq 600$  1/min ist ein Einfluss der Drehzahl auf die Ausprägung des Wulstes weniger deutlich.

1. Schnitt T60/40	$n_0$	200	400	600	800	1000
	sax	1/min	1/min	1/min	1/min	1/min
0,010 mm/WSU					EFo	EF ++
0,025 mm/WSU			/	EFo	EFo	EF ++
0,050 mm/WSU	/	/	/	EFo	EF+	EF ++
0,075 mm/WSU	/	/	/	/	EFo	EF ++
0,100 mm/WSU	/	/	/	EFo	EFo	
0,125 mm/WSU			/			


  

2. Schnitt T60/40	$n_0$	200	400	600	800	1000
	sax	1/min	1/min	1/min	1/min	1/min
0,010 mm/WSU					EF +	EF ++
0,025 mm/WSU			EFo	EF +	EF +	EF ++
0,050 mm/WSU	/	/	/	EF +	EF+	EF ++
0,075 mm/WSU	/	/	EFo	EF +	EF +	EF ++
0,100 mm/WSU	/	/	EFo	EF +	EF +	
0,125 mm/WSU			EFo			


  

**Angaben zur Ausprägung an entspr. Flanke:**


Keine Verdrillung

/ 


Kleiner Ansatz erkennbar

EFo 

Fl. deutlich verdrillt

EF+ 

Fl. stark verdrillt

EF++ 




Abbildung 5.25: Ergebnisse Beurteilung der Verdrillung

### ***Verdrillung der Flanken***

Ein Einfluss der Schnittgeschwindigkeit ist bei der Verdrillung der einlaufenden Flanke EF festzustellen. Während bei Drehzahlen unter 600 WZU/min keine bzw. nur ein kleiner Ansatz einer Verdrillung der Flanke zu erkennen ist, bewirkt eine höhere Schnittgeschwindigkeit eine zunehmende Ausprägung.

Ab einer Drehzahl von 1000 WZU/min tritt eine deutlich stärkere Verdrillung auf. Die Vermessung von Spänen aus Versuchen mit  $n_0 = 1000$  1/min zeigte, dass hier ein Bereich von bis zu ca.  $330^\circ$  umschlossen wird. Betrachtet man die Gesamtverdrehung des Spanes, so liegt fast eine komplette Drehung vor.

Der Auswertung in Abbildung 5.25 ist zu entnehmen, dass ein Einfluss des Axialvorschubes auf die Ausprägung der Verdrillung nicht vorhanden ist. Ebenso ist zu erkennen, dass das Auftreten dieses Merkmals bei der dargestellten Schnittstrategie T60/40 im zweiten Schnitt früher eintritt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass hier die am Schnitt beteiligte Länge der einlaufenden Flanke des Werkzeuges deutlich größer ist und somit auch die Länge der einlaufenden Flanke des Spanes länger wird und über die Länge verdrillt werden kann. Auch in der Literatur wird bei anderen Verfahren die Veränderung des Aufrollradius des Spanes bei Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit beschrieben. Eine höhere Schnittgeschwindigkeit hat nach [MÜL-04] ein stärkeres Aufrollen des Spanes, welches hier als Verdrillung bezeichnet wird, zur Folge.

#### **5.4.6 Spangewicht**

Zur Ermittlung des Gewichts eines Spanes je Parameterkombination wurde gemäß der Beschreibung in Kapitel 4.5.3 vorgegangen und der Mittelwert aus mehreren Späne gleichen Typs bestimmt. In Abbildung 5.26 sind darüber hinaus zur Darstellung der Abhängigkeit des Spangewichts vom Axialvorschub die Spangewichte gemittelt über die untersuchten Drehzahlen aufgetragen, die Standardabweichung gibt hier jeweils die Bandbreite des ermittelten Gewichts über die verschiedenen Drehzahlen wieder. Über die Erhöhung des

Axialvorschubes kann gemäß den erzielten ansteigenden Spanvolumina ein annähernd linearer Zusammenhang festgestellt werden. Die Ergebnisse zeigen hier das Verhalten bei der Einstellung einer Schnittstrategie T60/40, bei allen Variationen der Schnittstrategie konnte ein vergleichbares Verhalten nachgewiesen werden.

Die Auswertung der Versuche in Abbildung 5.27 zeigt, dass erwartungsgemäß bei Erhöhung der Drehzahl und damit der Schnittgeschwindigkeit das mittlere Spangewicht nahezu konstant bleibt, es ist nur ein marginaler Anstieg der Gewichtsverläufe feststellbar. In der Darstellung ist das mittlere Spangewicht bei der Einstellung einer Schnittstrategie T60/40 über die Drehzahlen bei verschiedenen Axialvorschüben in mm/WSU jeweils für den ersten (S1) und zweiten Schnitt (S2) aufgetragen.

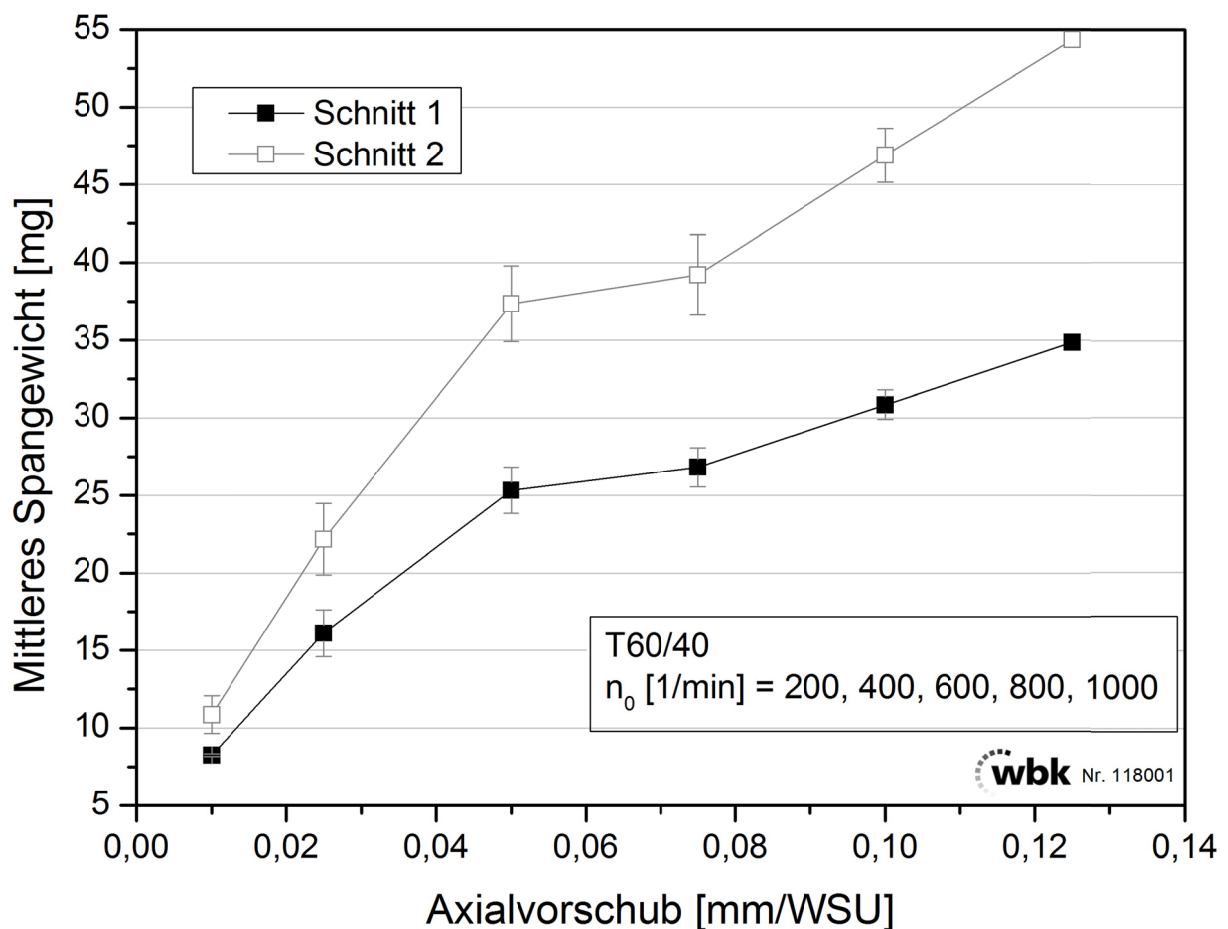


Abbildung 5.26: Mittleres Spangewicht über Axialvorschub T60/40



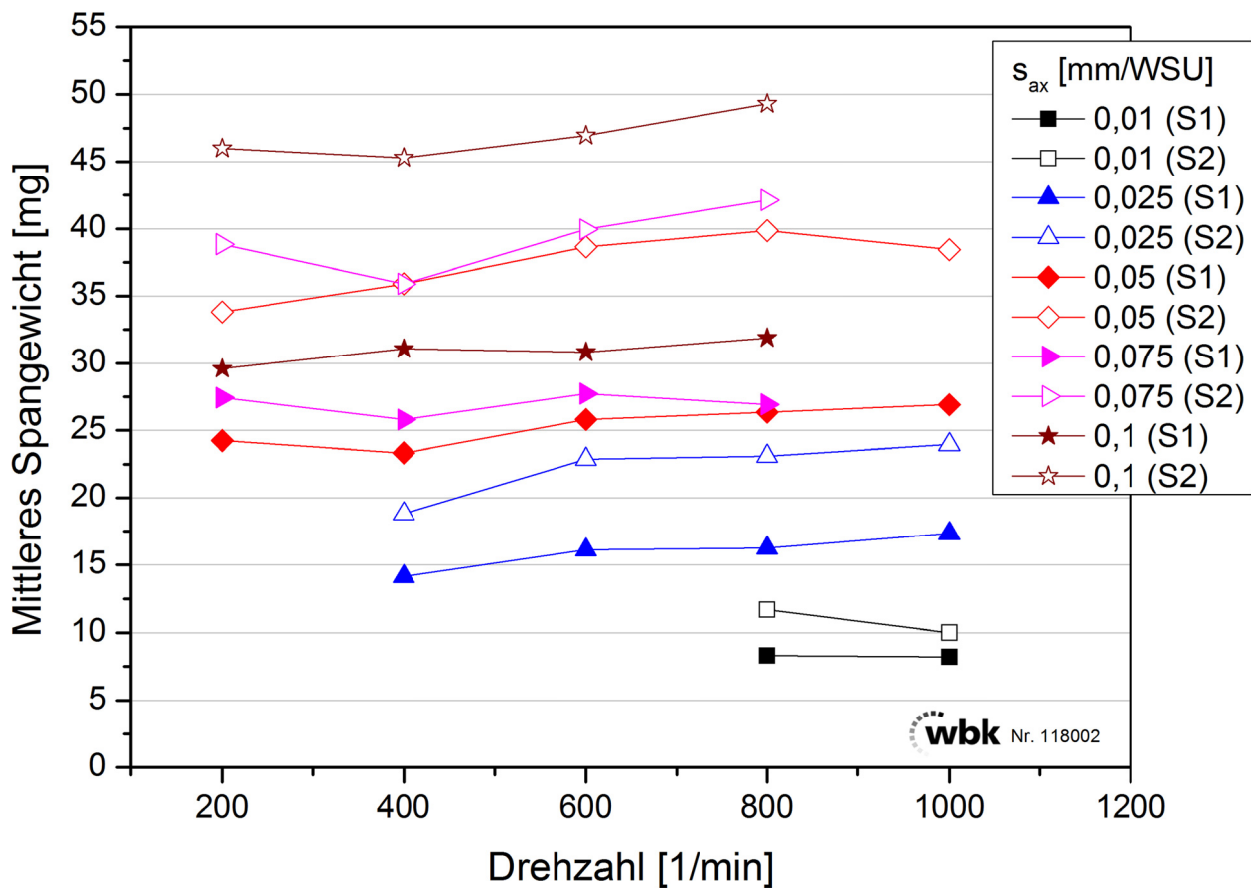


Abbildung 5.27: Mittleres Spangewicht über Drehzahl T60/40

### 5.4.7 Abmaße der Späne

Um die Abmessungen der einzelnen Spanabschnitte in Abhängigkeit der Parameterkombination vergleichen zu können, wurden die in Abbildung 5.28 dargestellten Größen an charakteristischen Spänen des Vollschnitts der einzelnen Parameterkombinationen bestimmt und sind im Folgenden zusammenfassend dargestellt. Die Bezeichnungen Länge und Breite wurden dabei an einem abgewickelten Span orientiert, als Trennung der einzelnen Spanteile wurden gemäß der anderen Spandarstellungen die Bereiche der Einschnürung im Übergang vom Kopf zu den Flanken gewählt. Es wurden von jeder Probe bis zu 10 charakteristische Späne des Vollschnitts ausgemessen und daraus jeweils der Mittelwert bestimmt.

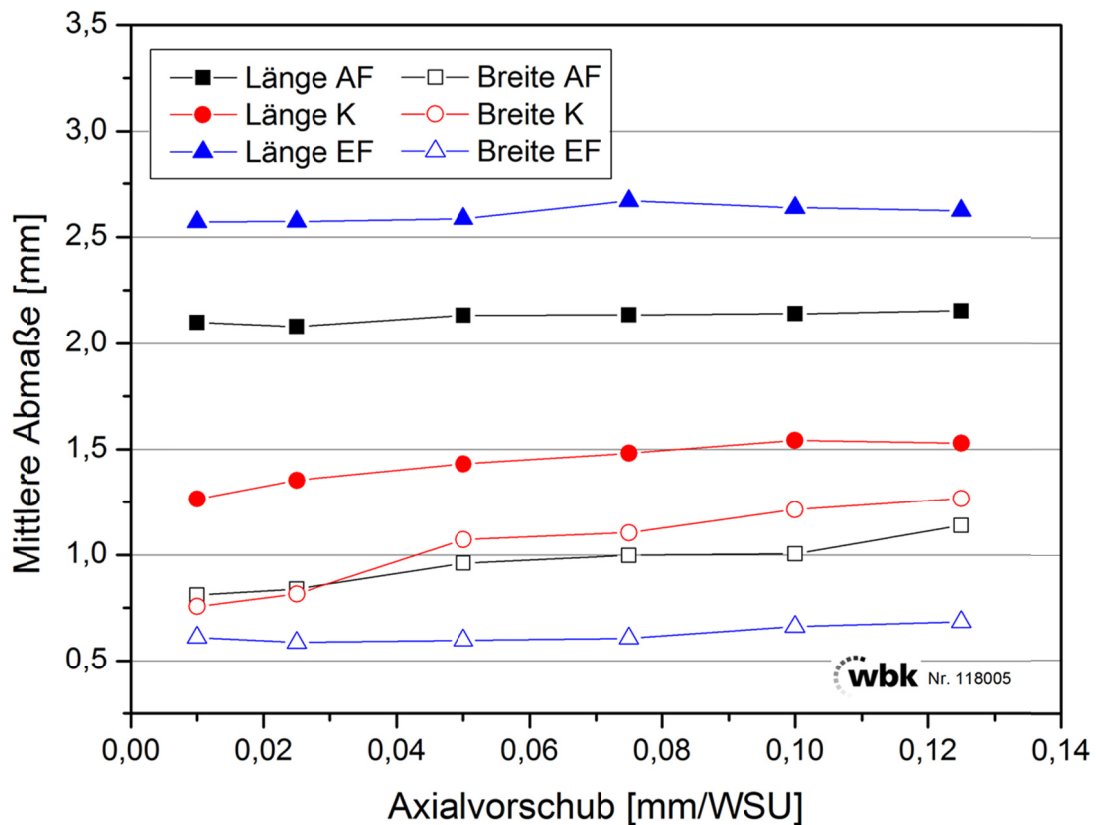


Abbildung 5.28: Ermittelte Größen am Span, Darstellung über Axialvorschub

Ein Einfluss der Schnittgeschwindigkeit konnte nicht festgestellt werden, so werden die Abmaße der Späne in Abbildung 5.28 über alle Drehzahlen gemessen. Die einlaufende Flanke EF ist dabei stets länger als die auslaufende Flanke AF. Die Breite des Kopfes und der AF steigen mit zunehmendem Vorschub pro WSU leicht an. Je größer der Spanungsquerschnitt des 2. Schnitts ist, also je kleiner die Zustellung ist, desto breiter sind die Köpfe der Späne des 2. Schnitts. Für die EF konnte eine Verbreiterung des Kopfes nicht eindeutig belegt werden. Generell ist der Anstieg der Breite für größere Vorschübe mit der größeren Eingriffsstrecke eines Schnitts in Richtung der Zahnlücke in Zusammenhang zu sehen. Eine anders gerichtete Verdrängung oder Stauung des Materials bei der Bildung der EF konnte nicht dargestellt werden, zusätzlich macht die Verdrillung der EF hier eine exakte Messung mit ausreichender Genauigkeit schwierig und nicht belastbar. Die Länge des Kopfes nimmt mit größerem Axialvorschub pro WSU zu, die Schnittstrategie hat hier keinen Einfluss.

### 5.4.8 Variation der Prozessparameter

Bei der Einstellung eines Vollschnitts (Schnittstrategie T100/0) mit einer einzigen Zustellung ähneln die entstehenden Späne in ihrer Gestalt eher Spänen des 1. Schnitts einer Mehrschnittstrategie. Sie sind allerdings in ihren Ausmaßen entsprechend größer. Bei einer Einschnittstrategie treten deutlich mehr Späne mit fehlenden Flanken auf als bei der entsprechenden Parameterkombination mit 2 Schnitten. Das Abbrechen der Flanken kann in Zusammenhang mit den höheren Bearbeitungskräften aufgrund der hohen Spannungsdicken gesehen werden. Auch die Mechanismen, die im Vorherigen in Zusammenhang mit den im ersten Schnitt häufiger auftretenden unvollständigen Spänen beschrieben wurden, kommen hier zum Tragen.

## 5.5 Diskussion und Fazit

Im vorangegangenen Kapitel wurden die im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten experimentellen Ergebnisse zum Wälzschälverfahren vorgestellt und analysiert. Diese bilden die Grundlage für die Modellierung des Prozesses und stellen insbesondere die erforderlichen Bewertungsgrößen für die Validierung der Simulationsmodelle und -ergebnisse dar. Des Weiteren bilden die zerspanntechnologischen Versuche eine wichtige systematische Erweiterung des Prozesswissens zum Wälzschälen.

Die Zusammenhänge zwischen den variierten Prozessparameter Axialvorschub  $s_{ax}$ , Drehzahl  $n_0$  (somit Schnittgeschwindigkeit  $v_c$ ) sowie Schnittstrategie T und den in den Experimenten betrachteten Bewertungsgrößen Zerspankraft, Bauteil- und Spantemperatur sowie Späne zeigt Tabelle 5.5 in einer Übersicht. Die aufgeführten Bewertungsgrößen werden dabei mit Symbolen versehen, die einen signifikanten ( $\uparrow$ ) bzw. mittleren ( $\nearrow$ ) Anstieg und eine Reduzierung ( $\downarrow$  bzw.  $\searrow$ ) angeben. Die Markierung  $\leftrightarrow$  zeigt dabei an, dass nur sehr moderate bzw. keine Veränderungen auftraten oder dabei ggf. kein typisches Verhaltensmuster nachgewiesen werden konnte.

Zerspankraft	$s_{ax} \uparrow$	$F_c \rightleftarrows$	Gestalt Span	$s_{ax} \uparrow$	fehlende Fl. $\downarrow$
	$n_0 \uparrow$	$F_c \rightleftarrows$		$n_0 \uparrow$	fehlende Fl. $\uparrow$
	$T(S2) \uparrow$	$F_c \uparrow\uparrow$		$s_{ax} \uparrow$	Stauchung $\rightleftarrows$
Temp. Bauteil	$s_{ax} \uparrow$	$T_{WS} \rightleftarrows$		$n_0 \uparrow$	Stauchung $\uparrow$
	$n_0 \uparrow$	$T_{WS} \rightleftarrows$		$s_{ax} \uparrow$	Verdrillung $\rightleftarrows$
Temp. Span	$s_{ax} \uparrow$	$T_{Span} \uparrow$		$n_0 \uparrow$	Verdrillung $\uparrow$
	$n_0 \uparrow$	$T_{Span} \uparrow$		$s_{ax} \uparrow$	Gewicht $\uparrow$
				$n_0 \uparrow$	Gewicht $\rightleftarrows$

wbk

*Tabelle 5.5: Übersicht Bewertungsgrößen aus den experimentellen Untersuchungen*

Ein Einfluss der Schnittgeschwindigkeit ist bei der Untersuchung der Verdrillung der Flanken feststellbar. Wie oben gezeigt, bewirkt eine zunehmende Schnittgeschwindigkeit eine höhere Verdrillung. Das Gewicht der einzelnen Späne ändert sich nicht mit der Drehzahl und ist nur vom Axialvorschub abhängig. Einen erheblich größeren Einfluss hat dagegen der Axialvorschub auf die Gestalt der Späne beim Wälzschälen.

Die Zerspankraft wird insbesondere beeinflusst durch die Veränderung der Schnittstrategie. Im Versuch wurde bei der Schnittaufteilung T30/70 ein deutlich erhöhter Betrag der z-Komponente festgestellt. In diesem Fall liegt eine für den zweiten Schnitt ungünstige Aufteilung des Spanvolumens vor. Auf den zweiten Schnitt fallen 84% des Volumens, zusätzlich ist hier die vollständige Schneidkante im Eingriff. Die Erhöhung des Axialvorschubes, die ebenso wie die Schnittstrategie zu einer Erhöhung des Spanvolumens führt, resultierte ebenso in erhöhten Messwerten. Ein deutlicher Einfluss der Schnittgeschwindigkeit, die aus der Variation der Drehzahl resultiert, konnte bei den Versuchen nicht festgestellt werden. Bei der Messung der Temperaturen im Werkstück konnten Erkenntnisse zum charakteristischen Verlauf der Temperaturen an drei verschiedenen Messstellen gewonnen werden. Während der Bearbeitung zeigte sich bei der Erhöhung des Axialvorschubes keine Veränderung bei

höheren Drehzahlen, bei Versuchen mit geringeren Drehzahlen konnten leicht reduzierte Temperaturen bei zunehmendem Axialvorschub festgestellt werden. Die Temperaturen im Bauteil sinken bei Erhöhung der Drehzahl und des Axialvorschubes, die Spantemperaturen steigen hingegen an. Bei der Messung der Spantemperaturen zeigte sich sowohl bei steigenden Axialvorschüben als auch bei steigender Drehzahl ein deutliches Verhaltensmuster. Es wird demnach mehr Wärme im Span vom Bauteil wegtransportiert. Zusätzlich führt aber auch eine geringere Prozesszeit dazu, dass insgesamt über einen kürzeren Zeitraum hinweg eine gewisse Wärmemenge ins Bauteil eingebracht werden muss. Bei der Charakterisierung der Späne wurden mehrere Bewertungsgrößen herangezogen. Bei den qualitativen Merkmalen konnte ein gegensätzliches Verhalten hinsichtlich fehlender Flanken bei Erhöhung des Axialvorschubes bzw. der Drehzahl festgestellt werden. Die Stauchung insbesondere des Spankopfes nimmt in beiden Fällen zu, die Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit führt zu stärker verdrillten Spanflanken. Die oben bereits beschriebene Erhöhung des Spanvolumens hauptsächlich bei zunehmendem Axialvorschub zeigt ebenso eine Erhöhung des Spangewichts.

## 6 Simulationsgestützte Prozessanalyse

Für die numerische Modellbildung zur Untersuchung des Wälzschälverfahrens sind verschiedene Teilmodelle erforderlich. Als erstes wichtiges Teilmodell ist die Abbildung der Materialeigenschaften und des Materialverhaltens bis hin zur Beschreibung des Materialversagens zu nennen. Weiterhin beinhaltet das Grundprozessmodell des Wälzschälverfahrens die Darstellung der Geometrie von Werkzeug und Werkstück sowie die Modellierung des Erzeugungsgetriebes mit den erforderlichen geometrischen Größen und des charakteristischen Bewegungsablaufes von Werkzeug und Werkstück. Für die Untersuchung der Kinematik und der Spanbildungsmechanismen wird dann im weiteren Verlauf jeweils das Grundmodell abgewandelt und für die Simulationsstudien im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt. Hier bestehen Unterschiede beim Modellausschnitt, der Vernetzungsstrategie sowie Modifikationen am Materialmodell. Im folgenden Kapitel werden verschiedene untersuchte Ansätze zum Aufbau der Simulationsmodelle dargestellt und der grundlegende Aufbau der für die Simulationsstudien verwendeten Modelle beschrieben.

### 6.1 Materialmodell

Bei der Simulation von Spanbildungsvorgängen kommt der Modellierung des Materialverhaltens des im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Werkstoffes 20MnCr5S bei hohen Verformungsgeschwindigkeiten, der Kopplung der mechanischen und thermischen Vorgänge und der Implementierung eines Trennkriteriums eine entscheidende Bedeutung zu. Das für die Simulation des Wälzschälverfahrens entwickelte Material- und Versagensmodell von 20MnCr5S liegt in Form einer benutzerdefinierten Materialroutine (VUHARD) für ABAQUS/Explicit vor. Die experimentellen Arbeiten und die Entwicklung des entsprechenden Materialmodells in Form der VUHARD Subroutine wurden im Rahmen gemeinsamer Forschungsprojekte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Angewandte Materialien – Werkstoffkunde (IAM-WK) durchgeführt. Die

detaillierte Beschreibung der VUHARD Materialroutine erfolgte daher in Kapitel 4.7.

Die Materialauftrennung des FE-Netzes vor der Schneide auf Grundlage von Grenzwerten der akkumulierten Schädigung für die Auftrennung von Elementen und Knoten wird ebenfalls durch die VUHARD Subroutine in Form eines Versagenskriteriums für duktile Metalle definiert. Die Formulierung des Versagenskriteriums erfolgte ebenfalls in Zusammenarbeit mit dem IAM-WK und wird ebenso in Kapitel 4.7 näher erläutert.

## **6.2 Modellierungsansätze Wälzschälprozess**

Der Aufbau des Grundmodells zur Abbildung des Wälzschälverfahrens erfolgte in mehreren Schritten. Im Folgenden werden einzelne wesentliche Schritte vorgestellt, um den prinzipiellen Ablauf bei der Modellierung aufzuzeigen und das Modell vorzustellen. Zunächst erfolgten die Erstellung der Geometriemodelle sowie die grundlegende Abbildung des Erzeugungsgetriebes mit dem Einbau von Werkzeug und Werkstück unter der entsprechenden Anordnung. Hierbei wurden geeignete Idealisierungsstufen untersucht und eine Auswahl der Modellausschnitte festgelegt. Ein weiterer wesentlicher Schritt des Preprocessing stellt die Diskretisierung des Modells dar, dabei wurde der geeignete Elementtyp bestimmt sowie geeignete Vernetzungsstrategien entwickelt. Im nächsten Schritt wurden die vollständigen Bewegungsabläufe des Verfahrens nachmodelliert und somit die Abbildung der kompletten Kinematik vervollständigt. Der Abbildung der Schneidenbewegung kommt bei der Untersuchung des Wälzschälverfahrens eine besondere Bedeutung zu, insbesondere hier sind die charakteristischen Spanbildungsmechanismen des Verfahrens sowie die kinematischen Verhältnisse im Prozessablauf begründet. Auch experimentell hat sich hier und in vorangegangenen Arbeiten gezeigt, dass abstrahierte Analogiebewegungen nur eingeschränkt für eine Untersuchung nützlich sind. In der Simulation kann nur eine realitätsgetreue, dreidimensionale Abbil-

dung des Prozessablaufes als geeignet angesehen werden, diese charakteristischen Mechanismen zu untersuchen.

### **6.2.1 Abbildung der Geometrie und des Erzeugungstriebes**

Die Modellierung des Wälzschälverfahrens im Rahmen dieser Arbeit erfolgte auch unter der Zielsetzung, ein Simulationstool zu entwickeln, das eine möglichst universelle Anwendung zur Untersuchung des Verfahrens ermöglicht. In Kapitel 6.3 wird hierzu weiter auf die universelle Anwendbarkeit der Modelle eingegangen. Ein zentrales Element beispielsweise zur Variation der Werkzeuggeometrie bei der Bearbeitung der hier untersuchten Außenverzahnung, aber auch grundlegend anderer Werkzeug-Werkstück-Kombinationen, stellt die Möglichkeit dar, eine beliebige Geometrie aus konventionellen CAD-Systemen zu importieren und einfach reproduzierbar im Erzeugungstrieb zu positionieren.

#### ***Erstellung der Geometriemodelle***

Prinzipiell bietet das Zeichnungsmodul der eingesetzten FEM-Software ABAQUS die Möglichkeit, beliebige Geometrien zu generieren, so dass einzelne Modifikationen an den importierten Bauteilen möglich sind oder Bauteile vollständig mit dem ABAQUS Zeichnungsmodul erstellt werden können. Bei komplexen Geometrien ist die Modellierung mittels einer CAD-Software vorzuziehen. Die Erstellung der 3D-Geometrie-Modelle von Werkzeug und Werkstück für die Simulationsstudien erfolgte im Rahmen dieser Arbeit mit dem 3D-CAD-System PTC Pro/ENGINEER Wildfire 5.0 (im Jahr 2011 umbenannt in Creo Elements/Pro). Als Ausgangsgeometrie wurden vollständige Werkzeuge und Werkstückrohlinge modelliert, die Reduzierung erfolgte dann später mittels geeigneter Schnitte (Cut Extrude) innerhalb der Baugruppe im Zeichnungsmodul von ABAQUS. Für den Import stellt SIMULIA das Interface Elysium zur Verfügung, welches als Plug-In in das CAD-System implementiert werden kann. Elysium wandelt .prt-Dateien in .enf\_abq-Dateien um, die dann als Steady-State-Dateien von ABAQUS importiert werden können. Innerhalb der



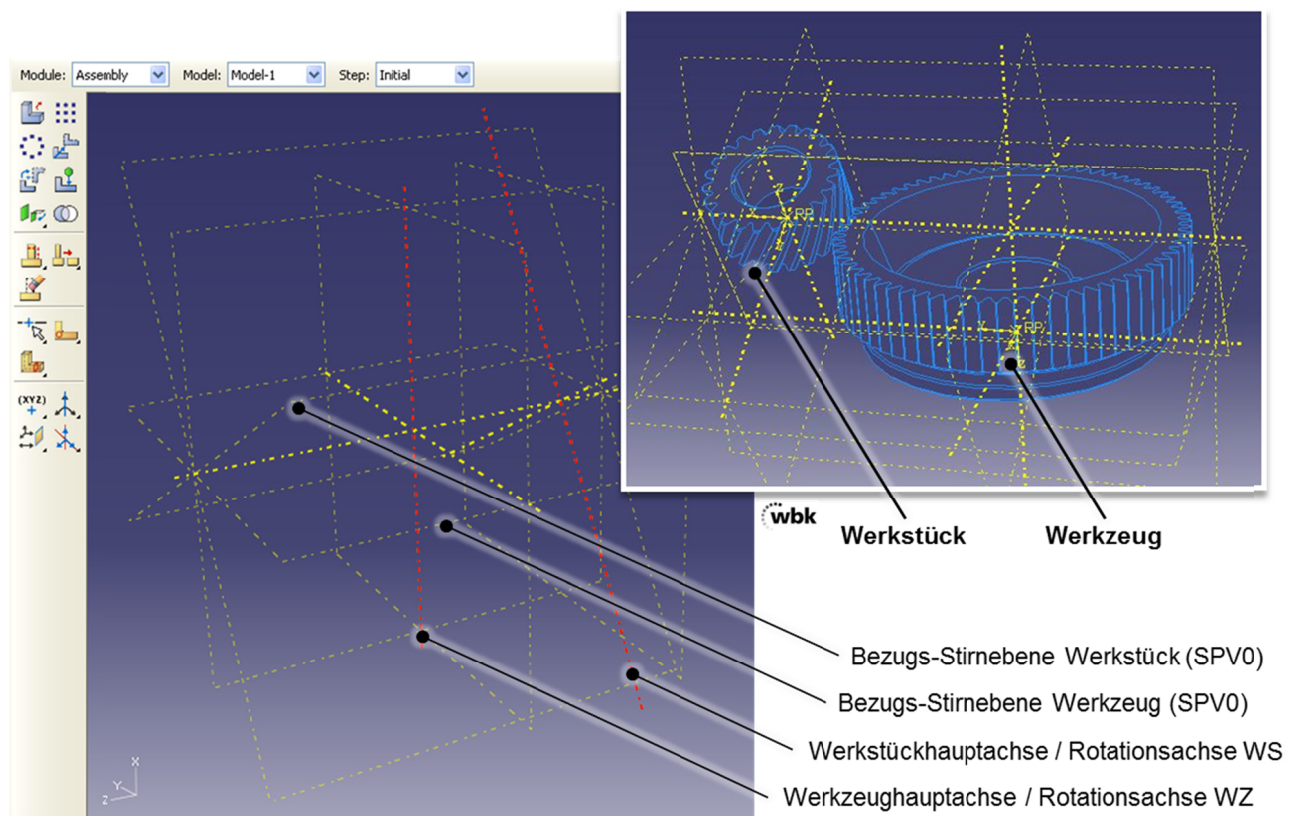
Geometrie können in Pro/ENGINEER verschiedene Größen als Parameter definiert und verwendet werden. Die Schnittstelle zwischen Pro/ENGINEER und ABAQUS kann für den assoziativen Geometrieimport freigeschaltet werden. Hierbei werden, bei simultanem Betrieb beider Programme, Parameteränderungen jeweils übernommen und ermöglichen damit die halbautomatisierte Durchführung von Simulationsstudien unter Variation verschiedener Geometrieparameter. Bereits im CAD-System wurden den Bauteilen zusätzliche Geometrieebenen als Hilfeebenen zugewiesen, um beim Import in ABAQUS die Bauteile exakt orientieren und positionieren zu können.

### ***Abbildung des Erzeugungsgetriebes (geometrische Größen)***

Das Erzeugungsgetriebe des Realprozesses gibt die Kinematik vor und definiert den Achskreuzwinkel  $\sum_i$ , den Spanflächenversatz  $e$  zur Erzeugung des konstruktiven Freiwinkels  $\alpha_{\text{eff}}$  sowie den Profilverchiebungsfaktor  $x$ . Ebenso sind die Bewegungsfreiheitsgrade vorzusehen, die Modellierung der Rotationsbewegung ( $n_0, n_2$ ), des Übersetzungsverhältnisses  $i$ , des Axialvorschubes  $s_{\text{ax}}$  und des Differentialvorschubes  $s_{\text{D}}$  werden in Kapitel 6.2.2 vorgestellt. Zur Positionierung der importierten Geometriemodelle von Werkzeug und Werkstück entsprechend den geometrischen Größen des Erzeugungsgetriebes des Realprozesses wurde im Rahmen dieser Arbeit ein sogenanntes Skelettmodell im Assembly-Modul von ABAQUS entwickelt, welches die relevanten Ebenen und Achsen des Realprozesses repräsentiert. Die wichtigsten Bezugsebenen und -achsen, welche im Skelettmodell vorgesehen sind, zeigt Abbildung 6.1 links.

Dabei sind die Werkstück- und Werkzeugachsen rot hervorgehoben sowie die jeweiligen Bezugsebenen für den Spanflächenversatz  $e = 0 \text{ mm}$  (SPV0) markiert. Die Einstellung der geometrischen Größen des Erzeugungsgetriebes erfolgt durch Zuordnung mit entsprechenden Lage- und Abstandsbeziehungen (einfache Beziehungen/Constraints mit Distanzangaben nach „Face-to-Face“, „Coaxial“). Der Spanflächenversatz folgt aus der Werkzeug- und Prozessauslegung und wird in der Einheit mm angegeben. Die Orientierung der Bezugsebenen ist im Skelettmodell so gewählt, dass eine direkte Übertra-

gung aus der Auslegungsrechnung erfolgen kann. Abbildung 6.1 rechts oben zeigt das Skelettmodell mit eingesetztem Werkzeug und Werkstück ohne die nachfolgenden Idealisierungsstufen und zur Veranschaulichung unter Verwendung eines verzahnten Fertigbauteils aus dem CAD-System. Weiterhin sind ein übergeordnetes Koordinatensystem sowie jeweils ein Koordinatensystem für Werkstück und Werkzeug definiert und Referenzpunkte zur Realisierung der Bewegungen zugewiesen.



**Abbildung 6.1: Skelettmodell in ABAQUS**

Durch das Skelettmodell wird der Einbau bzw. die Anordnung von Werkzeug und Werkstück im Erzeugungsgetriebe unterstützt, indem die im CAD-System den Bauteilen jeweils zugewiesenen Hilfsebenen den Ebenen und Achsen des Skelettmodells zugeordnet werden. In Abbildung 6.1 wird die Anordnung der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Außenverzahnung gezeigt, das Skelettmodell ist darüber hinaus nach entsprechender Anpassung für die Modellierung der Bearbeitung von beliebigen Innen- oder Außenverzahnungen einsetzbar. Eine Einstellung der Winkel und Abstände im Erzeugungsgetriebe zur

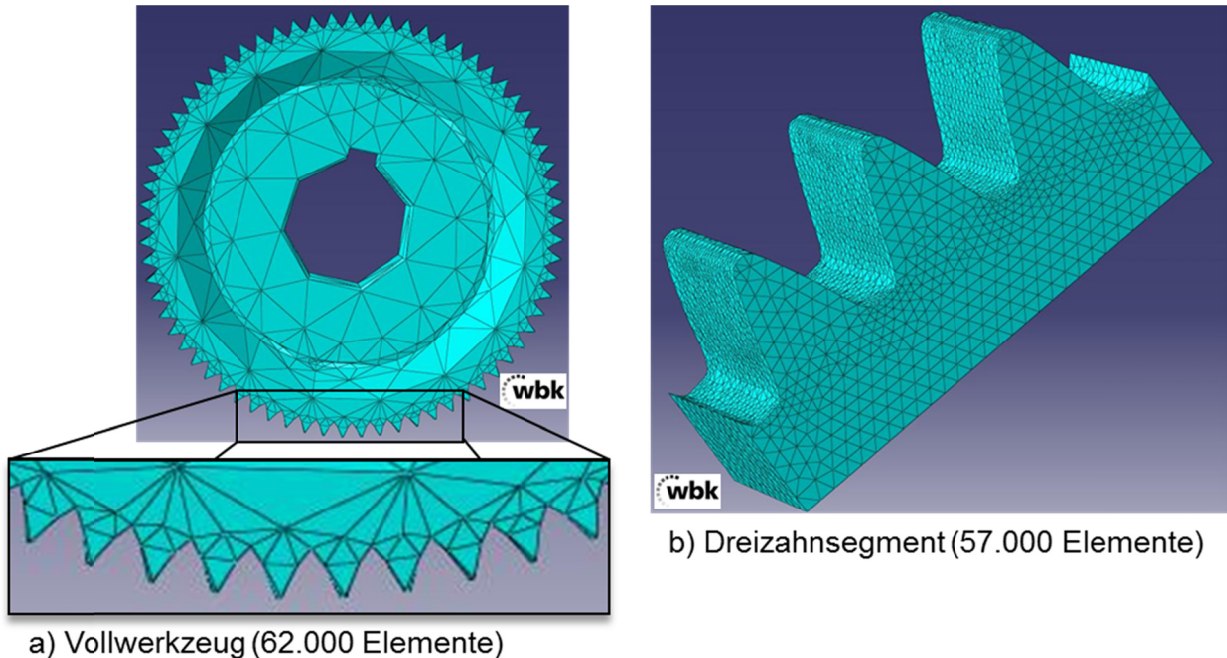
Variation von kinematischen Prozesskenngrößen, wie Achskreuzwinkel, Spanflächenversatz oder Schnittstrategie, kann damit einfach und angelehnt an die Einrichtung der Werkzeugmaschine im Realprozess erfolgen. Für die Umrechnung der verschiedenen Größen vom Realprozess in das Modell wurde ein MS Excel-Formular programmiert, das die Eingabeparameter umrechnet und ausgibt.

### ***Idealisierung und Diskretisierung der Geometrie sowie Randbedingungen***

Nach Import und Einbau der Geometriemodelle von Werkzeug und Werkstück aus dem CAD-System gemäß oben beschriebener Vorgehensweise erfolgte die Festlegung geeigneter Modellausschnitte und gegebenenfalls eine Partitionierung der Elemente, um verschiedene Vernetzungsstrategien zu realisieren sowie eine parallelisierte Rechnung im Main-Processing einzurichten. Die Festlegung des Modellausschnitts erfolgt vorrangig unter der Zielsetzung der Reduzierung der Komplexität und Größe des Modells für die Einsparung von Rechenzeit bei hoher Modellgenauigkeit. Hierzu wurden Werkzeug und Werkstück einzeln betrachtet und jeweils relevante Details und Ausschnitte identifiziert sowie eine Vorgehensweise bei der Vereinfachung der Geometrie und dem Weglassen unwichtiger Details entwickelt.

Die Durchführung von Simulationsstudien unter Berücksichtigung der vollständigen Geometrie, wie beispielsweise des Vollwerkzeuges, ist nur in Ausnahmefällen sinnvoll. Ein offensichtlicher Idealisierungsschritt bei der Untersuchung der kinematischen Verhältnisse im Eingriff und der grundlegenden Spanbildungsmechanismen beim Wälzschälverfahren ist die isolierte Betrachtung einzelner Werkzeugschneiden. Abbildung 6.2 zeigt im Vergleich die Vereinfachung der Geometrie des Wälzschälrades in zwei verschiedenen Idealisierungsstufen. Zugrunde liegt hier die vereinfachte Annahme einer konstanten erforderlichen Rechenleistung und -dauer für eine gleichbleibende Anzahl an Elementen. Es wird dabei deutlich, dass bei Zuweisung einer identischen Anzahl an Elementen (im Beispiel ca. 60.000 Elemente) die resultierende Elementgröße stark unterschiedlich ist und damit die Formtreue mit größer wer-

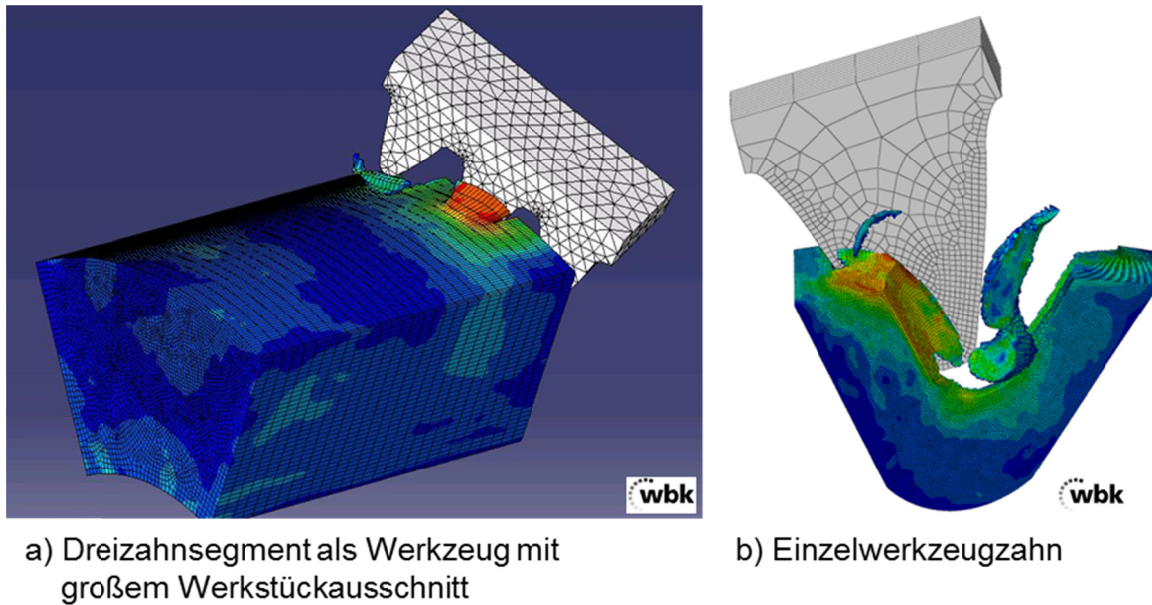
dender Elementkantenlänge stark abnimmt. Bei Berücksichtigung eines Vollwerkzeuges (siehe Abbildung 6.2 a) wird die resultierende Werkzeugzahnform zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis führen.



**Abbildung 6.2: Geometrietreue bei gleichbleibender Elementzahl (ca. 60.000 Elemente)**

Bei den Simulationsstudien im Rahmen dieser Arbeit wurden je nach Anwendungsfall und auch in Hinblick auf die zur Validierung herangezogenen Experimente einzelne Werkzeugzähne oder Dreizahnsegmente betrachtet (Abbildung 6.3). Bei der Idealisierung des Werkstücks wird analog hierzu vorgegangen und ein geeigneter Ausschnitt des Rohlings gewählt. Dabei wird je nach Schnittparameter und der zu betrachtenden Schnittanzahl die Gesamteingriffslänge angepasst. Der Ausschnitt des Werkstücks wird auf die wesentlichen Spanbereiche reduziert, wobei beispielsweise auch zu referenzierende Messpositionen des zur Validierung heranzuziehenden Experiments berücksichtigt werden müssen. Zudem wurde den Geometriemodellen ein optimiertes und lokal verfeinertes Netz zugewiesen. Die Verwendung von zwei grundsätzlichen, verschiedenen Geometriemodellen wird aufgrund der oben beschriebenen Geometrietreue und der Sicherstellung der Wirtschaftlichkeit bei der Durchführung von Simulationsstudien erforderlich. Insbesondere bei der

Durchführung von speicherintensiven 3D-FEM-Simulationen ist, auch bei Verwendung von leistungsfähigen Großrechnern, ein Kompromiss zwischen Speicherbedarf des Modells und Begrenzung der Modellausschnitte zu finden.



**Abbildung 6.3: Simulationsmodelle mit Dreizahnsegment und Einzelwerkzeugzahn**

Abbildung 6.3 zeigt die zwei entwickelten Grundmodelle für die unterschiedlichen Anforderungen. Das Modell mit einem Dreizahnsegment als Werkzeug (Abbildung 6.3 links) wurde beispielsweise für die Durchführung von Simulationsstudien zur Bestimmung der Werkstücktemperatur an verschiedenen Messpositionen eingesetzt. Die Temperaturbestimmung im Realprozess wurde unter Verwendung des Dreizahnanalogiewerkzeuges durchgeführt. Weiterhin ist die Abbildung der Bearbeitung einer entsprechenden Anzahl an Werkzeugeingriffen sowie mit einer entsprechenden Gesamteingriffslänge für die Validierung der Bauteiltemperatur vorzusehen. Dies ist nur mit einer angepassten Vernetzung mit einer Elementkantenlänge von bis zu  $l_{EK} = 0,3$  mm möglich, die Vernetzung in den Spanbereichen wurde gezielt feiner vorgenommen, das Ergebnis der Simulationsläufe ist dennoch nicht ausreichend für die Untersuchung der Spanbildungsmechanismen. Für eine realitätsgetreue Abbildung der ablaufenden Späne hat sich eine Elementkantenlänge von ca.  $l_{EK} = 0,03$  mm herausgestellt. Die Modelle mit dieser deutlich reduzierten Elementgröße sind

aufgrund der damit einhergehenden stark gestiegenen Elementanzahl für eine Durchführung von Parameterstudien zur Bestimmung der Werkstücktemperatur nach mehreren Werkzeugeingriffen nicht einsetzbar, da die Anforderungen an die Rechenzeit- und -leistung und insbesondere der Bedarf an Hauptspeicher die zur Verfügung stehenden Ressourcen im Mainprocessing übersteigen. Zur Diskretisierung des Werkstücks werden hexagonale Elemente (dreidimensionale, sechsflächige Elemente, ABAQUS: hexahedral) vom Typ C3D8RT (Eigenschaften: 8 nodes thermally coupled brick, trilinear displacement and temperature, reduced integration, hourglass control [DAS-11]) der Elementfamilie „explicit“ verwendet. Das Verhalten des Elementtyps ist für Temperatur- und Spannungsänderungen gültig. Es handelt sich um lineare Elemente, die keinen weiteren Integrationspunkt zwischen den Ecken entlang der Elementkanten aufweisen und für hochdynamische Oberflächenveränderungen einsetzbar sind [DAS-11]. Zur Rechenzeitverkürzung wird die Methode der reduzierten Integration eingesetzt, die Integration wird anstatt an den 8 Knoten über einen zentral gelegenen Punkt in der Mitte des Elements durchgeführt. Bei linearen Elementen mit reduzierter Integration wird eine sog. „hourglass control“ verwendet. Dadurch werden unkontrollierte Verzerrungen der Elemente, die zu Nullspannungen o.ä. führen, verhindert.

Die Vernetzung des Werkstücks erfolgt strukturiert („structured“) oder je nach Form des Werkstücks orientiert („sweep“). Im Modus sweep sind auch Elementkantenwinkel  $>$  oder  $<$   $90^\circ$  möglich. Bei der Definition des Netzes für das Werkstück wird eine Verzerrungsprüfung („distortion control“) aktiviert, um zu starke Verzerrungen während der Vernetzung zu vermeiden. Der eingestellte Wert von 0,1 steuert, dass Elemente bei der Vernetzung maximal bis zu 10 % ihrer vorgegebenen Länge, Breite oder Höhe vergrößert oder verkleinert werden können.

Wie bereits im Kapitel zur verwendeten Material-Subroutine ausgeführt, werden die Elemente gesteuert durch die VUHARD-Subroutine nach dem Erreichen des Elementlöschungskriteriums ausgeblendet.

Das Modell des Werkzeugs wird als Starrkörper (rigid body) definiert. Auch hier kommen hexagonale Elemente zum Einsatz, jedoch kann auf die oben beschriebenen Verzerrungsprüfungen verzichtet werden. Die Vernetzung des Werkzeugs erfolgt angepasst und wird ebenfalls strukturiert oder orientiert eingestellt.

Die Oberflächendefinition im Kontaktmodul von ABAQUS legt fest, wie sich die Oberflächen und Teile der Modelle beim gegenseitigen Kontakt verhalten. Eine Definition des Verhaltens bei Selbstkontakt muss in der FEM üblicherweise separat vorgenommen werden. In den vorliegenden Modellen wurde ein „General Contact“ Algorithmus implementiert, der mögliche Netzüberschneidungen automatisch erkennt und nicht zulässt. Dafür müssen alle möglichen Oberflächen in den „General Contact“ integriert werden, explizite Oberflächendefinitionen sind nicht erforderlich.

### **6.2.2 Abbildung der Kinematik/des Erzeugungsgetriebes (Schneidenbewegung)**

Die exakte Abbildung der Bewegungsabläufe der Werkzeugschneide ist prinzipielle Voraussetzung für die grundlegende Untersuchung der charakteristischen Spanbildungsmechanismen und der kinematischen Verhältnisse im Prozessablauf des Wälzschälverfahrens. Hierfür sind wie bereits weiter oben ausgeführt die dreidimensionale Abbildung der vollständigen realen Schneidenbewegung im Bereich des Eingriffs und so die Durchführung von 3D-Simulationsstudien über die gesamte Eingriffsstrecke des Werkzeugs erforderlich. Eine Analogiebewegungsbahn oder die Reduzierung auf eine zweidimensionale Betrachtung stellte sich als nicht ausreichend dar.

In ersten Machbarkeitsuntersuchungen sowie zu Validierungszwecken wurde versucht, die Modellierung der Bewegung des Wälzschälprozesses getreu dem Realprozess durch einfache Übertragung der Bewegungskomponenten von Werkzeug und Werkstück auf die Modelle zu realisieren. Hierbei beschränkt sich die Modellierung der Bewegungen auf die Beschreibung der Rotation von

Werkzeug und Werkstück sowie konstanten Verschiebungsgeschwindigkeiten des Werkstücks in axialer Richtung. Die realgetreue Darstellung des Bewegungsablaufs von Werkzeug und Werkstück entspricht demnach der Rotation beider Körper um deren Drehachse. Der Differentialvorschub wird dabei den Rotationsgeschwindigkeiten überlagert. Der Axialvorschub kann als lineare Bewegung des Werkstücks entlang seiner Drehachse dargestellt werden.

Wie bei der Idealisierung der Geometrie durch geeignete Modellausschnitte hinsichtlich der wesentlichen Bereiche und der Abstraktion auf die minimal nötige Struktur, hat sich auch bei der Modellierung der Bewegung gezeigt, dass ohne eine Vereinfachung bzw. Idealisierung der Bewegungsabläufe ein Simulationsmodell als wirtschaftlich und technologisch ungeeignet für die vorgesehenen Untersuchungen angesehen werden muss. Die Restriktionen bezüglich Rechenleistung und -zeit sowie Speicherbedarf, somit die prinzipielle Machbarkeit und wirtschaftliche Realisierbarkeit der Simulationsstudien, geben vor, die Betrachtung auf die relevanten Abschnitte der Bewegungsbahn der Werkzeugschneide und des Werkstücks im Moment des Eingriffs zu beschränken. Ein einzelner Werkzeugzahn befindet sich im Realprozess nach dem Austritt aus dem Werkstück in einer Rotationsbewegung um die Werkzeugachse und ist bis zum nächsten Eingriff nicht an der Zerspanung beteiligt. Dieser - für die Untersuchung der kinematischen Eingriffsverhältnisse und der Spanbildungsmechanismen uninteressante - Luftschnitt muss im Prozessmodell weitestgehend vermieden oder reduziert werden, ohne den Prozess dadurch negativ zu beeinflussen und beispielsweise Temperatur- oder Massenträgheitseffekte zu verfälschen. Auch die Abbildung von sämtlichen Korrekturen im Erzeugungsgetriebe bezüglich der Schneidenbewegung, beispielsweise bei Variation der Schnittstrategie, muss erhalten bleiben. Der Luftschnitt, also der Zeitraum bzw. Verlauf der Schneidenbewegung, in dem es zu keiner Zerspanung kommt, verursacht bei der reinen Rotation beider Körper bei der Betrachtung der im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Werkzeug-Werkstück-



Kombination mit einem Übersetzungsverhältnis von 3:1 bis zu ca. 90 % der Gesamtrechenzeit.

Aus der systematischen Untersuchung verschiedener Varianten, den realgetreuen Bewegungsablauf der Werkzeugschneide abzubilden und dabei den Luftschnitt aus der Betrachtung herauszulösen, zu verkürzen oder beschleunigt ablaufen zu lassen, ging hervor, dass bei der Modellierung eine reine Bewegung des Werkzeugkörpers, der wie oben ausgeführt im Modell als Starrkörper definiert ist, anzustreben ist. Dieses Vorgehen ermöglicht die Realisierung einer Ersatzbewegung, ohne die Schneidenbewegung im Eingriffsmoment zu verändern. Neben der verkürzten Bewegungsbahn und dem reduzierten Berechnungsaufwand bieten sich durch dieses Vorgehen verschiedene Möglichkeiten und Vereinfachungen bei der Auswertung der Simulationsstudien. Hierzu zählt die Möglichkeit, die Untersuchung der kinematischen Bewegungsabläufe der Werkzeugschneide durch explizite Visualisierung der Bewegungsbahn mit Rotationsanteilen und linearen Bewegungskomponenten vorzunehmen.

### ***Zerlegung der Bewegungskomponenten***

Die Bewegung der Werkzeugschneide wird aus dem Realprozess ermittelt. Die Kinematik des Verfahrens stellt sich bei der Beschreibung in Kapitel 2.1.2.2 (vgl. Schemadarstellung in Abbildung 2.9) prinzipiell einfach dar, die resultierende Bewegungsbahn der Werkzeugschneide im Eingriff mit dem Werkstück ist dagegen sehr viel komplexer. In der folgenden Beschreibung wird vereinfacht die Bewegung eines einzelnen Punktes an der Spitze der Schneide während des Wälzschälprozesses betrachtet. Zunächst ergibt sich durch Festhalten des Werkstücks eine Rotationsbewegung des Werkzeuges um das Werkstück herum. Die von einem Punkt auf einem Kreisumfang beschriebene Bewegungsbahn lässt sich hier gemäß der Theorie der Erzeugung einer Zykloidenverzahnungen darstellen. Durch Abrollen des Werkzeuges auf dem Werkstück beschreibt der Punkt eine Epizykloide, einen Spezialfall der Zykloide. Die voll-

ständige Bewegung der Werkzeugschneide bei stehendem Werkstück lässt sich somit in vier Komponenten zerlegen (vgl. auch Abbildung 6.4):

- Bewegungsbahn der Werkzeugspitze in der Stirnebene in Form einer Epizykloiden
- Schnittgeschwindigkeit in Richtung der Zahnücke
- Axialvorschub in Richtung der Werkstück-Drehachse
- Differentialvorschub

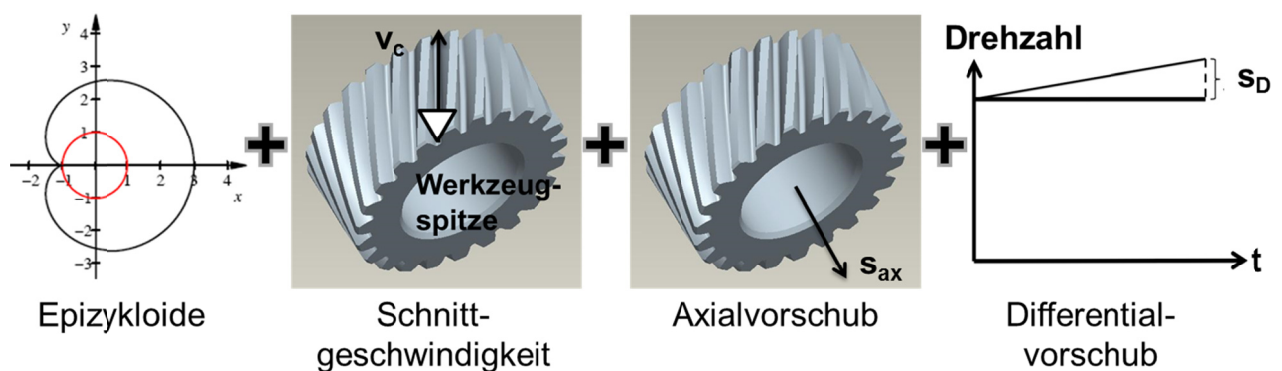


Abbildung 6.4: Einzelne Komponenten der Schneidenbewegung

Die Darstellung der Epizykloide in Abbildung 6.4 erfolgt vereinfacht, ohne Berücksichtigung des Übersetzungsverhältnisses. Zur Übertragung der Schneidenbewegungsbahn in das Simulationsmodell wurden diese als kontinuierliche Bewegung formuliert und dabei geeignete Vereinfachungen vorgenommen und der Spanbereich isoliert betrachtet.

### **Schneidenbewegungsbahn: Epizykloide**

Bei isolierter Betrachtung des Spanbereiches kann die Bewegungsbahn der Schneide weiter reduziert werden auf eine unter flachem Winkel eintretende Tauchbewegung, die ihren Umkehrpunkt im Zahngrund hat (Abbildung 6.5). In der dreidimensionalen Betrachtung eines vollständigen Schneidenzahnes statt eines einzelnen Punktes wird dieser Bewegung eine Rotation der Schneide überlagert sowie eine Bewegung entlang der Zahnückenrichtung.

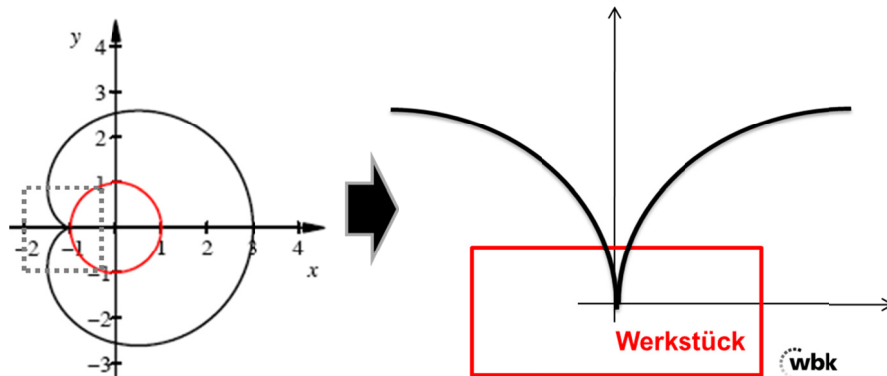


Abbildung 6.5: Ausschnitt der Epizykloide im relevanten Bereich

Außerdem wird so ermöglicht, die Beschreibung der Bewegung in ABAQUS direkt innerhalb eines Koordinatensystems zu formulieren. Die Bewegungsvorschrift für den Schneidenzahn für eine vollständige Epizykloide hätte die gleichzeitige Zuordnung des Referenzpunktes und des Mittelpunktes des Werkzeugkörpers (WZ-Zentrum) in zwei unterschiedlichen Koordinatensystemen erforderlich gemacht. Hierfür wäre eine FORTRAN 90 VUDISP Input-Routine erforderlich geworden, da eine solche Zuordnung in ABAQUS nicht unterstützt wird.

Um die Bewegungsvorschriften für die Modelle zu ermitteln, wurden folgende Sachverhalte herangezogen:

- Tauchbewegung: Die Bewegung eines Punktes auf einer Kreisbahn wird im ortsfesten Koordinatensystem als Sinusfunktion beschrieben
- Eintritt unter flachem Winkel: Lineare Verschiebung des Werkzeugs parallel zur Werkstückoberfläche
- Rotation: Rotationsgeschwindigkeit durch Festhalten des Werkstücks entspricht der Summe aus  $v_{rot,WZ}$  und  $v_{rot,WS}$
- Vorschub: Überlagerung aus Schnittgeschwindigkeit und Axialvorschub

Die aufgeführten Punkte wurden als Grundlage für die Zuordnung der Bewegungen auf den Werkzeugmittelpunkt (WZ-Zentrum) sowie einen Referenzpunkt (RF) herangezogen (Abbildung 6.6). Abbildung 6.6 links zeigt die in die

Stirnebene des Werkzeugs projizierte Bewegungsbahn. Die rechte Abbildung zeigt die zugehörige Basisanordnung der Geometriemodelle zueinander.

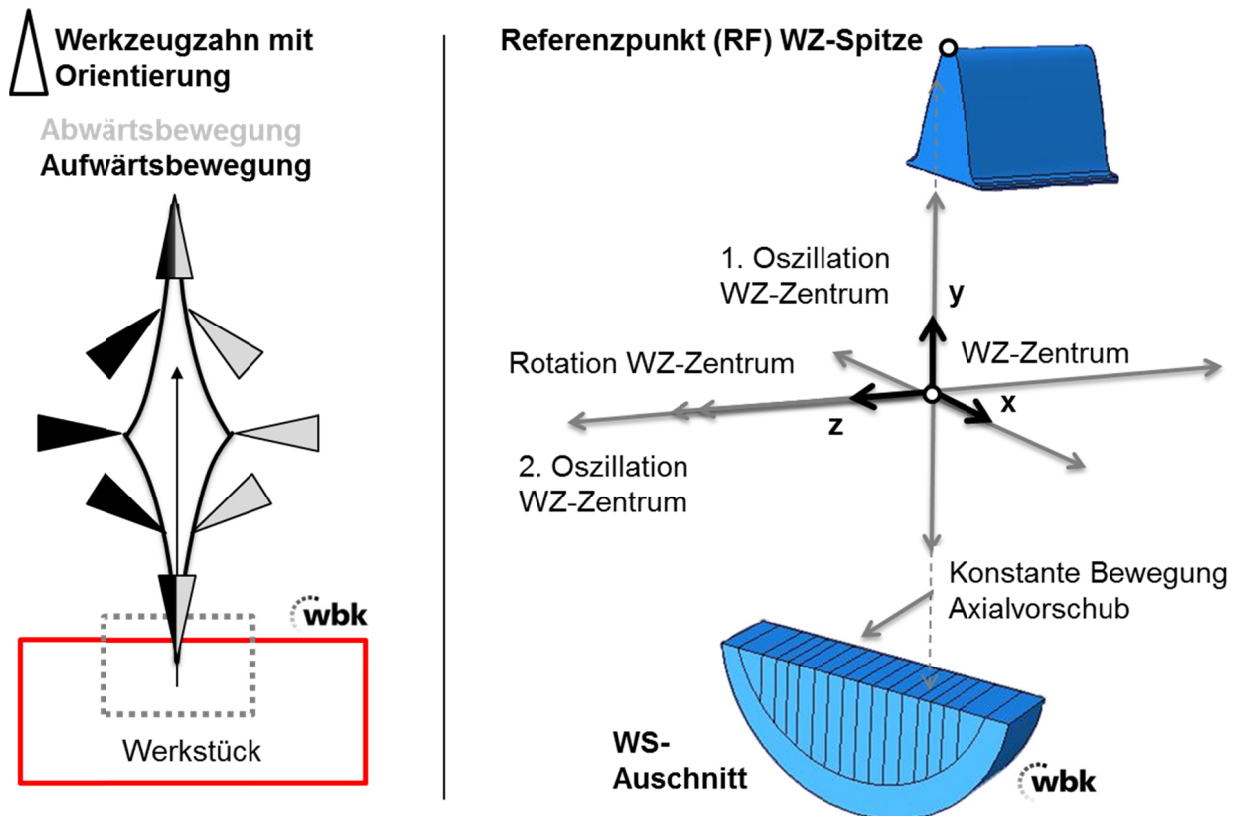


Abbildung 6.6: Periodische Ersatzbewegung des Werkzeugs in ABAQUS

Die Formulierung der Bewegung in ABAQUS erfolgt durch die Beschreibung von periodischen Verschiebungen. Dies ermöglicht eine geschlossene Darstellung der sich wiederholenden Bewegungen. Die Kreisfrequenz  $\omega$  der trigonometrischen Funktionen errechnet sich aus den Technologieparametern des Realprozesses. Die Zuordnung und Formulierung der einzelnen Bewegungskomponenten zeigt Abbildung 6.7.

Die Bewegung des Werkzeugkörpers wird über seinen Mittelpunkt (WZ-Zentrum) vorgegeben, dieser ist über eine Zwangsbedingung mit dem Körper verbunden. Zur Realisierung der Basisbewegung in der Stirnebene rotiert der Werkzeugkörper um seinen Mittelpunkt. Zusätzlich wird der Werkzeugmittelpunkt entlang der x-Achse gemäß einer Sinusfunktion verschoben. Der Faktor

$A_x$  gibt dabei den Betrag der Verschiebung entlang der x-Achse an, das Vorzeichen dient der Orientierung und Richtung der Bewegung.

**Schnittgeschwindigkeit**

Die Schnittgeschwindigkeit lässt sich durch eine sinusförmige Verschiebung des Werkzeugmittelpunktes entlang der z-Achse definieren. Die Anordnung der Körper ermöglicht es, dieselbe trigonometrische Funktion zu verwenden, die schon für die Erzeugung der Bewegung in der Stirnebene herangezogen wurde. Der Werkzeugmittelpunkt muss sich zunächst in positive Richtung der z-Achse bewegen. Da der Werkzeugkörper vom Werkzeug weg versetzt angeordnet ist und die trigonometrische Funktion  $-A_z \cdot \cos(\omega t)$  lautet, muss die Verschiebung  $A_z$  positiv gerichtet sein.

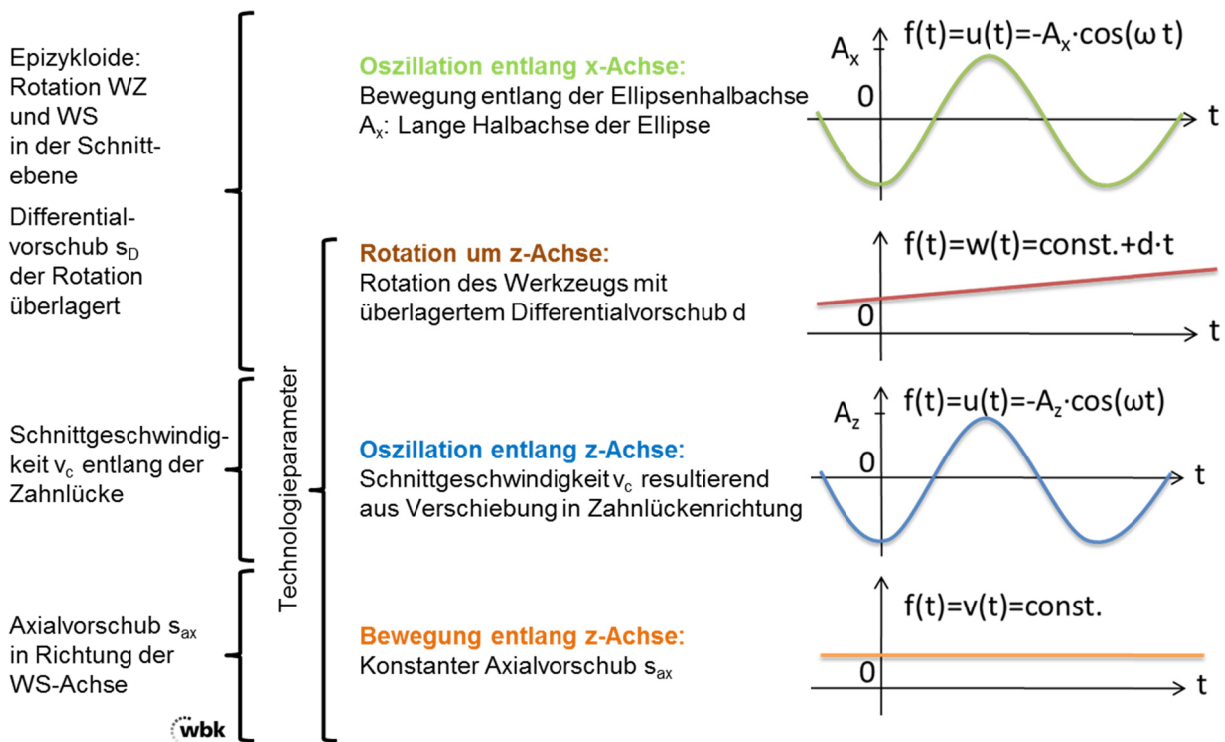


Abbildung 6.7: Bewegungsvorschriften zur Ersatzbewegung der Schneide

**Axialvorschub**

Der Axialvorschub kann als lineare, konstante Bewegung in Richtung der Werkstückachse beschrieben werden.

### ***Differentialvorschub***

Der Differentialvorschub wird der gleichförmigen Rotation des Werkzeugs überlagert. Dabei nimmt die Rotationsgeschwindigkeit linear bis zum Ende der Bearbeitung zu. Hierfür wird in den Randbedingungen die Rotationsgeschwindigkeit definiert und eine lineare Funktion überlagert, die während der Berechnungszeit von 1 auf den um den Wert des Differentialvorschubes erhöhten Wert ansteigt.

### ***Spanflächenversatz***

Der Spanflächenversatz  $e$  wird in der Praxis derzeit im Prozessablauf noch nicht variiert und wird daher bei der Abbildung der geometrischen Größen des Erzeugungsgetriebes im Skelettmodell berücksichtigt (Kapitel 6.2.1). Eine Variation über den Axialvorschub wäre dann sinnvoll, wenn gezielt die Prozesswinkel in der Bearbeitung beeinflusst werden sollten. Dies wäre beispielsweise bei einer Mehrschnittstrategie in den ersten Zustellungen denkbar. Eine Umsetzung des damit geänderten Bewegungsablaufes der Schneide könnte einfach mit einer weiteren überlagerten translatorischen Bewegung erfolgen.

### ***Technologieparameter***

Zur Umrechnung der Technologieparameter des Realprozesses in die Eingabegrößen der Simulationsmodelle wurde wie bei der Übertragung der geometrischen Größen für das Erzeugungsgetriebe ein MS-Excel-Tool programmiert. Aus den Eingabegrößen wie Verzahnungsdaten, Drehzahlen von Werkzeug und Werkstück, Axialvorschub, Differentialvorschub und Schnittstrategie erfolgt die Berechnung der Werte zur Beschreibung der periodischen Bewegungsvorschriften mit Amplitude, Winkelgeschwindigkeit und Periodendauer zur Durchführung der Simulationsstudien. Des Weiteren werden sämtliche Einstellwerte für die Simulationsmodelle wie Zeitintervalle der Prozessabschnitte, Inkrementdauer und -schrittweite ausgegeben.

### 6.3 Massenskalierung

Nach der Literatur [ABE-04, HÖV-07, SIN-07, KLE-10] kann bei umfangreichen Rechnungen mit explizitem Algorithmus zur Reduzierung der erforderlichen Rechenzeit eine manuelle Zeitschrittvorgabe durch den Benutzer erfolgen. Dabei wird die Eingabe eines größeren Zeitschritts im FE-Programm und somit eine künstliche Erhöhung der Dichte der kleinsten Elemente vorgenommen. Diese Vorgehensweise wird als „Massenskalierung“ bezeichnet. Die Komplexität der Verfahrenskinematik und der Spanbildungsvorgänge beim Wälzschälen mit der eingesetzten dreidimensionalen Modellierung macht den Einsatz der Massenskalierung im Rahmen dieser Arbeit unbedingt erforderlich. Nur mit der damit erreichbaren Rechenzeitverkürzung ist es möglich, Simulationsstudien eines vollständigen Eingriffs unter Beibehaltung der kinematischen Verhältnisse des Realprozesses durchzuführen und dabei die Rechenzeit auf ein vertretbares Maß zu senken. Bei der Verwendung von Massenskalierung kann durch zu große Trägheitseffekte unerwünschtes dynamisches Verhalten des Modells auftreten, das sich in Schwankungen in der berechneten Kraft-Verschiebungs-Kurve auswirkt [ABE-04].

Zur Sicherstellung der Ergebnistreue wurde in Vorbereitung auf die Durchführung der 3D-Wälzschälsimulationsstudien ein vereinfachtes 2,5D-Modell des orthogonalen Schnitts aufgebaut, bei dem das identische Materialmodell, gleiche Elementgrößen und vergleichbare Schnittgeschwindigkeiten verwendet wurden. Damit wurden identische Verhältnisse wie bei den vorgesehenen 3D-Simulationen geschaffen, gleichzeitig jedoch die Gesamtzahl an Elementen reduziert, um einen Vergleich der Massenskalierungsfaktoren vornehmen zu können. Ziel dieser Untersuchungen war es, einen geeigneten Massenskalierungsfaktor zu bestimmen und nachzuweisen, dass sich das Verhalten des Modells nicht signifikant verändert. Es wurde dafür die erreichbare Rechenzeiterparnis bestimmt und die Abweichung der im Rahmen der Arbeit relevanten Simulationsergebnisse Kraftverlauf, Temperaturverlauf und Spangestalt gegenüber dem Skalierungsfaktor 1 verglichen. In die Betrachtung einbezogen

wurden die Skalierungsfaktoren 100, 250, 500, 750, 1.000, 2.500, 5.000, 7.500, 10.000, 15.000, 20.000, 30.000, 50.000, 75.000 und 100.000, um bei hohen Skalierungsfaktoren die Effekte auf die Ergebnisse darzustellen.

Bei der Verwendung von Massenskalierung und der künstlichen Vergrößerung der Dichte um den Faktor  $M$  wird die Rechenzeit um den Faktor  $M^{1/2}$  reduziert. Einen Vergleich der für die vollständige Berechnung (Total Time 0,005 s) erforderlichen CPU-Zeit in Abbildung 6.8 zeigt, dass - bei isolierter Betrachtung der Rechenzeitverkürzung - Skalierungsfaktoren im Bereich von 5.000 bis 30.000 anzustreben sind. Insbesondere bis zu einem Skalierungsfaktor von 15.000 wird eine signifikante Reduzierung der CPU-Zeit ermöglicht. Beim Verzicht auf eine Massenskalierung konnte innerhalb der in dieser Versuchsreihe vorgesehenen Rechendauer die Rechnung nicht vollständig abgeschlossen werden. Die Gesamtrechenzeit für den Skalierungsfaktor von ca. 60 Tagen ist auf Basis der vollständig berechneten Frames interpoliert.

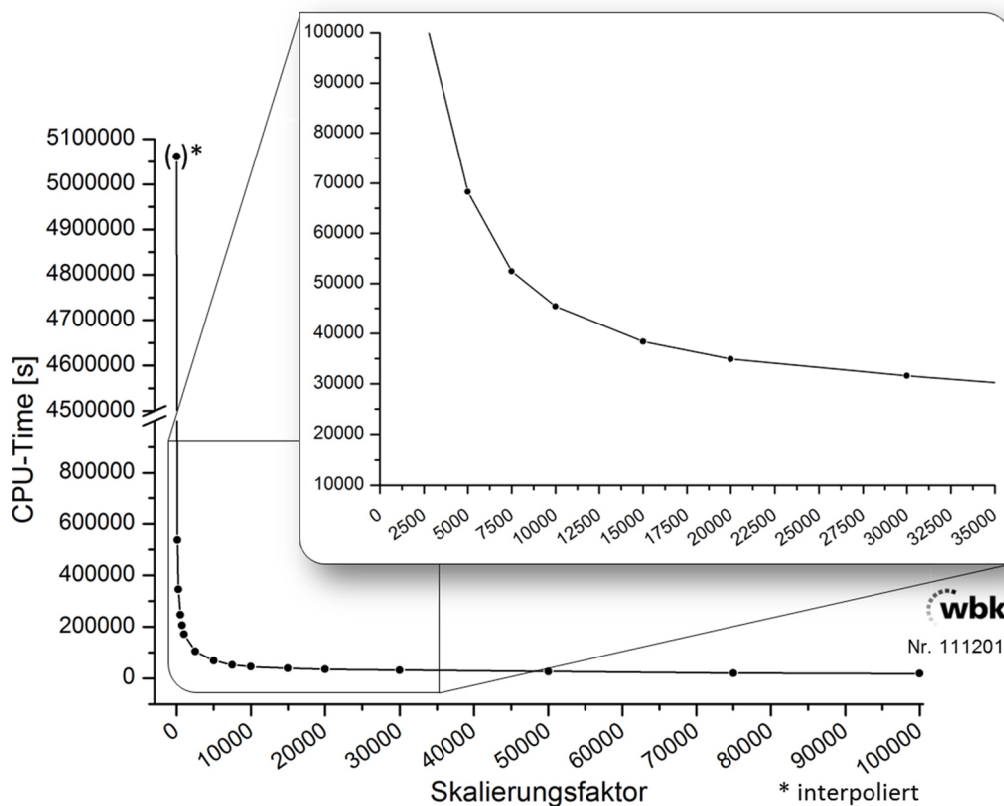


Abbildung 6.8: Vergleich der Rechenzeit (CPU-Time) für die vollständige Berechnung (Total Time 0,005 s)



### 6.3.1 Kraftverlauf

In Abbildung 6.9 wird der Verlauf der Schnittkräfte (RF1) über den Schneideneingriff anhand von 20 Ausgaben (Frames) dargestellt. Dabei wird insbesondere bei betragsmäßig hohen Skalierungsfaktoren die Verfälschung des Simulationsergebnisses deutlich. Die oben beschriebenen unerwünschten dynamischen Effekte führen zu Schwankungen der Reaktionskräfte, dieses Verhalten ist ab einem Skalierungsfaktor von ca. 20.000 deutlich zu erkennen. Bei einem Skalierungsfaktor von 15.000 zeigen sich diese Schwankungen weniger ausgeprägt, hier tritt allerdings eine betragsmäßig hohe Abweichung der Reaktionskräfte von bis zu 50 % auf. Zudem ist wie bei den höheren Skalierungsfaktoren ein deutliches Nachschwingen nach dem Austritt der Schneide zum Zeitpunkt ca. 0,0035 s zu erkennen. Bei Skalierungsfaktoren bis zu 10.000 zeigt sich eine deutliche Übereinstimmung der Verläufe der Reaktionskräfte über den Schneideneingriff und ein übereinstimmendes Verhalten nach Austritt der Schneide aus dem Werkstückmaterial. Für die Anwendung der Massenskalierung bei der Wälzschälsimulation sind aufgrund der kurzen Eingriffsstrecke und Späne insbesondere der Schneideneingriff und der Beginn der Schnittbewegung relevant. Beim Vergleich der Simulationsergebnisse zeigt sich in den ersten 6 von 20 Frames (Abbildung 6.9) bei Skalierungsfaktoren von bis zu 10.000 eine sehr gute Übereinstimmung mit einem identischen charakteristischen Verlauf. Dabei treten eine maximale Abweichung von ca. 20 % und eine durchschnittliche Abweichung von 9,5 % auf, die simulierten Kräfte steigen dabei mit zunehmendem Skalierungsfaktor.

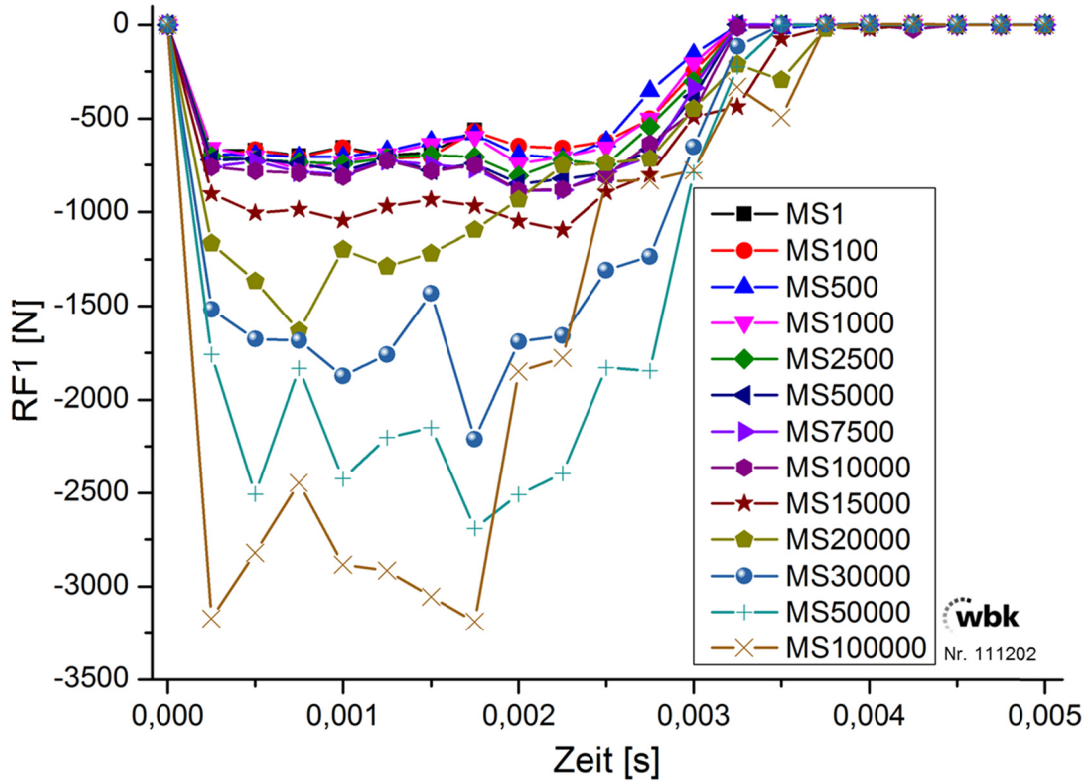


Abbildung 6.9: Vergleich der Kraftverläufe bei verschiedenen Massenskalierrungsfaktoren

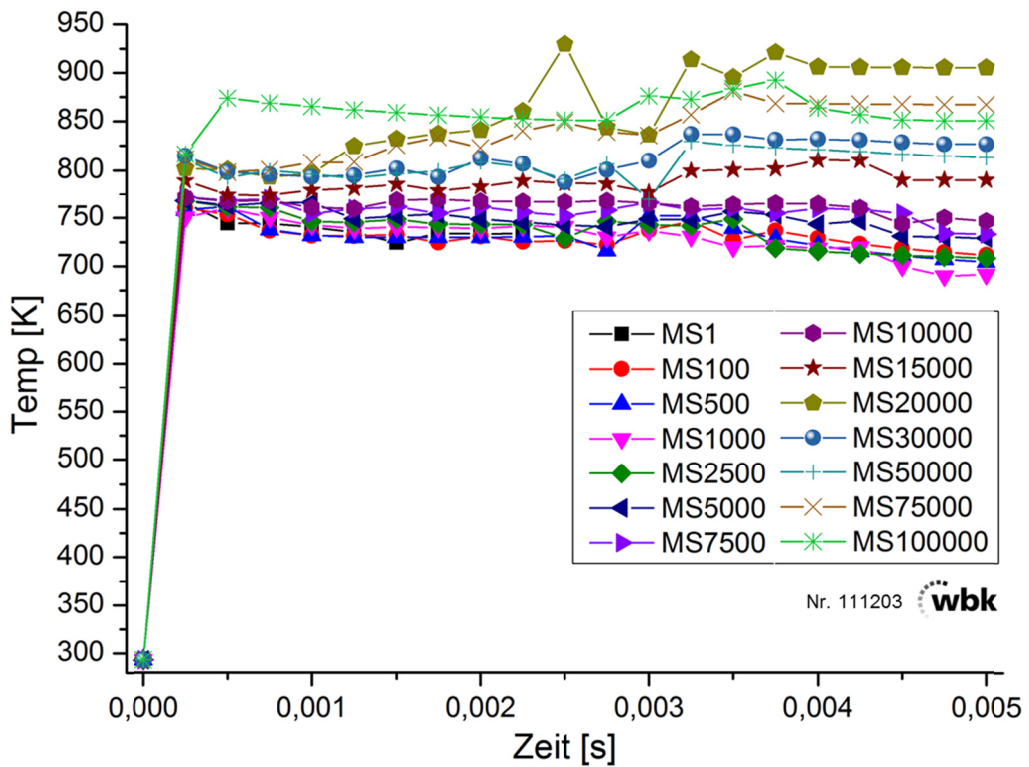


Abbildung 6.10: Vergleich des Maximaltemperaturverlaufs

### 6.3.2 Temperaturverlauf

Die oben beschriebenen unerwünschten Einflüsse eines zu hohen Massenskalerungsfaktors auf die Zerspankraft lässt eine Beeinflussung der im Werkstück simulativ bestimmten Maximaltemperaturen vermuten. In Abbildung 6.10 wird der Verlauf der Maximaltemperaturen im gesamten Werkstück zu den einzelnen Ausgabezeitpunkten mit verschiedenen Skalierungsfaktoren dargestellt. Dabei wird bei einem Skalierungsfaktor von 20.000 bereits bei der ersten Ausgabe unmittelbar nach dem Schneideneintritt eine Abweichung der Maximaltemperatur von 35,3 K gemessen. Im weiteren Verlauf der Spanentstehung steigt die Abweichung auf bis zu 126 K an. Bei höheren Skalierungsfaktoren ist zudem ein unerwarteter Temperaturanstieg nach dem Austritt der Schneide zu verzeichnen. Bei Skalierungsfaktoren unterhalb 15.000 wird dieses Verhalten nicht beobachtet. Bei Verwendung eines Skalierungsfaktors von 10.000 wurde über die gesamte Eingriffsstrecke eine maximale Abweichung von 33,3 K festgestellt. Innerhalb der ersten 5 Ausgaben beträgt die maximale Abweichung 14,1 K.

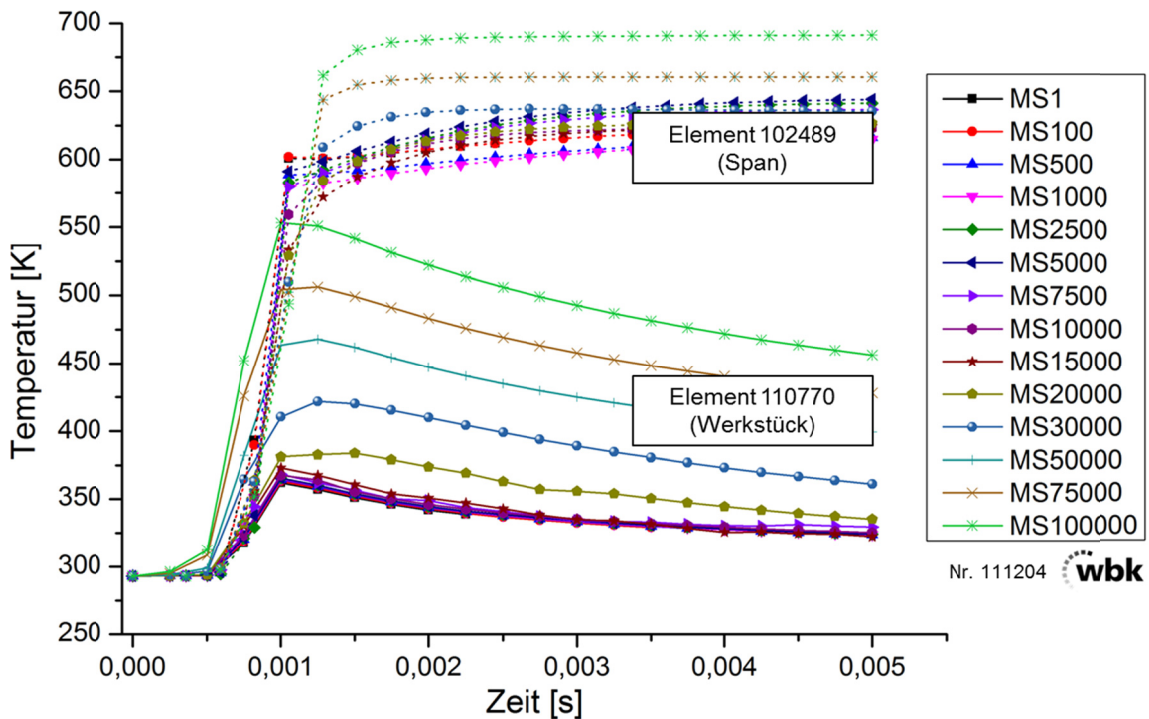
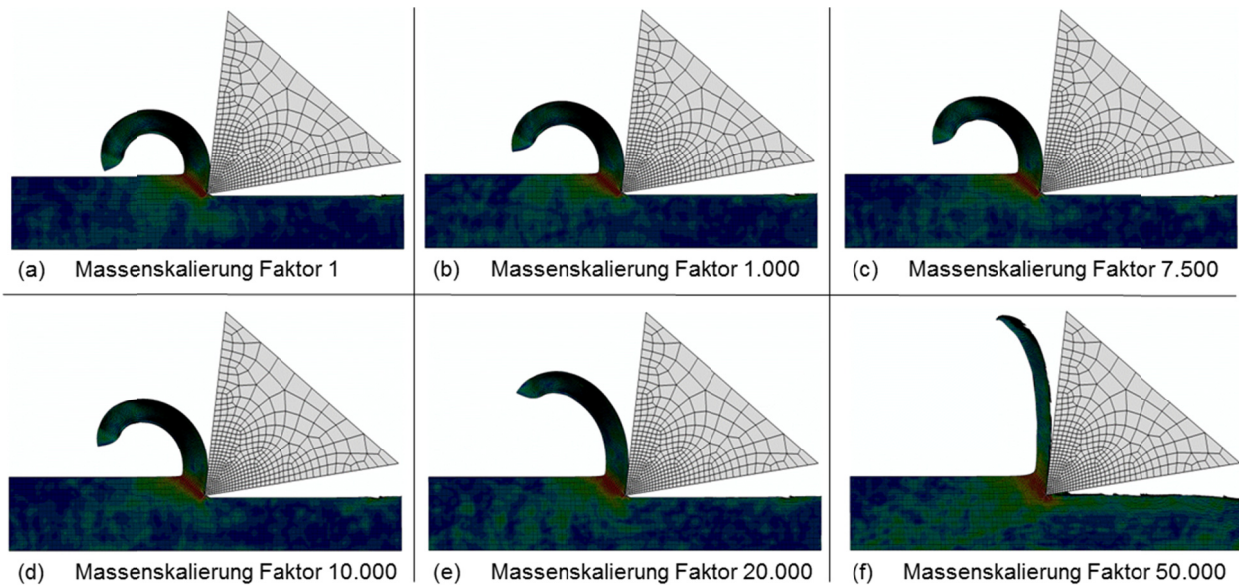


Abbildung 6.11: Vergleich des Temperaturverlaufs

Bei sehr hohen Massenskalierungsfaktoren kommt es zu großen Abweichungen der ausgegebenen Maximaltemperaturen bei Betrachtung des gesamten Modells. Die Maximaltemperaturen werden dabei teilweise in Elementen erreicht, die durch die unerwünschten Trägheitseffekte beeinflusst wurden und ein abweichendes Verhalten bei der Spanbildung zeigen (s.a. Vergleich der Spanform im weiteren Verlauf). In Abbildung 6.11 wird der Temperaturverlauf an zwei fest gewählten Elementen dargestellt. Das Element 102489 ist bei allen Variationen im Spanbereich und bleibt im Verlauf der Spanbildung erhalten. Das Element 110770 ist im Werkstück und befindet sich ca. 3 Elementreihen unterhalb der neu entstandenen Oberfläche. Bei Auswertung der Temperaturverläufe zeigt sich, dass in den gewählten Bereichen die Abweichungen der simulierten Temperaturen über die Variation des Massenskalierungsfaktors unkritischer ausfallen. Bei Element 110770 wird bis zu einem Faktor von 20.000 keine signifikante Abweichung festgestellt, bei Element 102489 tritt ab einem Faktor von 30.000 eine deutliche Abweichung auf.

### 6.3.3 Spanform

Abbildung 6.12 zeigt die simulierte Spanform im 2,5D-Orthogonalschnitt zum Vergleich als Ergebnis aus den Simulationsläufen mit einem Massenskalierungsfaktor von 1 (a, Massenskalierung aus), 1.000 (b), 7.500 (c), 10.000 (d), 20.000 (e) und 50.000 (f). Mit steigendem Skalierungsfaktor nehmen die Spandicke und die Krümmung des Spanes ab. Bei sehr hohen Skalierungsfaktoren kommt es zu einer deutlichen Abweichung der Spanform, eine Krümmung des Spanes ist bei einem Skalierungsfaktor von 20.000 nur sehr gering ausgeprägt.



*Abbildung 6.12: Vergleich der Spanform*

Des Weiteren kommt es in Abbildung 6.12 (e) und (f) zu unerwünschten Effekten hinter der Schneide im Bereich der neu entstandenen Oberfläche. Diese Effekte treten bei einem Skalierungsfaktor von 10.000 (d) nicht auf. Dennoch kommt es hier bei der simulierten Spanlänge zu Abweichungen, die bei der 3D-Wälzschälsimulation als weniger kritisch angesehen werden können, da hier deutlich kürzere Späne zu erwarten sind. Die Untersuchung der simulierten Spanform, die in Abbildung 6.12 (a) bis (f) nachvollzogen werden kann, zeigt wie bei den vorangegangenen Betrachtungen der Temperatur und der Kräfte, dass ein Massenskalierungsfaktor von 7.500 bis 10.000 für die 3D-Wälzschälsimulationsstudien als geeignet angesehen werden kann. Die in Abbildung 6.12 mit angegebenen v. Mises-Spannungen bleiben über die Variation des Skalierungsfaktors nahezu konstant.

#### **6.3.4 Fazit**

Entsprechend der Auswertung der Rechenzeitverkürzung sollte für die Erreichung von vertretbaren Rechenzeiten und damit für die generelle Machbarkeit der Wälzschälsimulationsstudien in einer ausreichenden Netzfeinheit ein möglichst hoher Skalierungsfaktor von bis zu 15.000 gewählt werden. Als Ergebnis der Simulationsstudien des Orthogonalschnitts wurden als geeignete Skalie-

rungsfaktoren 7.500 bis 10.000 identifiziert. Dabei kann bereits eine signifikante und für die Durchführung der Simulationsstudien erforderliche Reduzierung der Rechenzeit bei ausreichender Ergebnisgüte erreicht werden. Die Verfälschung des Modellverhaltens und der Spanform bleiben dabei in einem tolerierbaren Bereich.

## 6.4 Übertragbarkeit der Simulationsmodelle

In diesem Unterkapitel wird auf die universelle Anwendbarkeit der entwickelten Simulationsmodelle auf andere Werkzeuggeometrien bzw. Werkzeug-Werkstück-Kombinationen eingegangen. Die gewonnenen Erkenntnisse zu den kinematischen Verfahrenseigenschaften und die Erkenntnisse zu den grundlegenden Spanbildungsmechanismen, die helfen, den Wälzschälprozess hinsichtlich der Prozessstabilität zu verbessern, sind prinzipiell auf andere Bauteile übertragbar. Bereits in vorangegangenen Arbeiten [HÜH-02; BEC-06] wurden bei experimentellen Untersuchungen des Wälzschälprozesses mit Vollwerkzeugen oder Analogiewerkzeugen Erkenntnisse aus dem Außenschälprozess auf die Bearbeitung von Innenverzahnungen übertragen, da die grundsätzlichen kinematischen Verhältnisse und Spanbildungsmechanismen bei der Bearbeitung von Innen- und Außenverzahnungen identisch sind.

Beim Aufbau der Modelle im Rahmen dieser Arbeit wurde insbesondere sichergestellt, dass die entwickelten Methoden zur Abbildung des Erzeugungstriebes sowie der Bewegungskinematik der Schneide universell einsetzbar sind und nicht auf die im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Bauteile begrenzt bleiben. Hierzu wird ein einfacher Import verschiedener Bauteilgeometrien aus konventionellen CAD-Systemen (z.B. im Step-Dateiformat) ermöglicht. Bei Verwendung der verbreiteten 3D-CAD-Systeme Creo Elements/Pro (PTC ProENGINEER) oder Dassault Systèmes CATIA sind Interface-Tools verfügbar, die eine automatisierte Datenkonvertierung durchführen. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein sogenanntes Skelettmodell entwickelt, das den einfachen „Einbau“ der importierten Werkzeuge und Werkstücke gewährleistet.

Dabei können Werkzeuge mit konischer oder zylindrischer Grundform untersucht werden. Das Skelettmodell ist für den Aufbau eines Modells zur Bearbeitung von beliebigen Innen- oder Außenverzahnungen einsetzbar. Eine Einstellung der Winkel und Abstände im Erzeugungsgetriebe zur Variation von kinematischen Prozesskenngößen, wie Achskreuzwinkel, Spanflächenversatz oder Schnittstrategie, kann damit einfach und angelehnt an die Einrichtung der Werkzeugmaschine im Realprozess erfolgen. Für die Umrechnung der verschiedenen Größen des Realprozesses in das Simulationsmodell wurde ein MS Excel-Formular programmiert, das die Eingabeparameter ausgibt. Dabei sind die aus der Literatur bekannten Berechnungsformeln zugrunde gelegt. Für abweichende Werkzeug-Werkstück-Kombinationen sind gegebenenfalls geringfügige Anpassungen vorzunehmen. Die modellierten Bewegungsabläufe in Form der entwickelten Ersatzbewegungsbahn sind universell verwendbar und können anhand der Eingabeparameter an unterschiedliche Geometrien angepasst werden.

## **6.5 Anwendung der Simulationsmodelle zur Analyse des Wälzschälprozesses**

Aus Voruntersuchungen ist bekannt, dass es beim Wälzschälen zu einer eingeschränkten Prozesssicherheit kommen kann [BEC-06]. Dies zeigt sich insbesondere dadurch, dass statistisch verteilt Späne nicht vollständig abgeschält oder Späne nicht aus dem Bereich der Prozesszone abgeführt werden. Die Erarbeitung eines umfassenden Prozessverständnisses über die kinematischen Verhältnisse im Prozess, die bezogen auf das Werkstück durch das Werkzeug beschriebene Bewegungsbahn und insbesondere die wirkenden Spanbildungsmechanismen wird es gestatten, das Wälzschälverfahren zu verstehen und hinsichtlich der Prozesssicherheit zu optimieren.

Bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationsstudien wurden somit zwei grundsätzliche Zielstellungen verfolgt und die Simulationsmodelle entsprechend optimiert. Mit Hilfe von Kinematikmodellen mit einer angepas-

ten Material-Subroutine werden die Schneidenbewegungen bezogen auf das Werkstück visualisiert und in Abhängigkeit der Prozessauslegung und -parameter beurteilbar gemacht. Dabei können außerdem mögliche Ablaufbehinderungen der Späne untersucht werden. Daneben werden Spanbildungsmodelle in der Prozesssimulation genutzt, um die Spanbildungsmechanismen zu untersuchen und daraus gezielt auf Basis des grundlegenden Prozessverständnisses Maßnahmen beim Auftreten von Prozessstörungen ableiten zu können.

In den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen des Wälzschälverfahrens wurden insbesondere auch die Ergebnisse aus der Kombination von Kinematik- und Spanbildungssimulationsstudien genutzt.

### **6.5.1 Kinematiksimulation**

Zum Aufbau der Modelle zur Durchführung der Kinematiksimulationsstudien wurden die Schneiden- und Werkstückbewegung grundlegend analysiert und in eine Ersatzbewegung überführt, bei der sämtliche Bewegungskomponenten des Realprozesses der Werkzeugschneide zugeordnet wurden. Diese Vorgehensweise erlaubt eine systematische Untersuchung der tatsächlichen Schneidenbewegungsbahn bezogen auf das Werkstück sowie der Bewegungsabläufe der beiden Körper zueinander. Dabei wird die Beurteilung von Einflüssen von Parametern der Werkzeug- und Prozessauslegung beispielsweise einer Profilverschiebung auf den Prozess ermöglicht. Weiterhin können Einflüsse der Werkzeugmaschine und der Maschineneinstellung auf den Prozessablauf beurteilt werden, indem Simulationsstudien unter Variation beispielsweise des Achskreuzwinkels durchgeführt werden. Über den Verlauf des Schneideneingriffs können relevante Winkel und Abstände bestimmt werden, um Ablaufbehinderungen der Späne darzustellen und beurteilen zu können.

Für die Durchführung der Kinematiksimulationsstudien wurde ein modifiziertes Werkstoffmodell für das Verhalten des Werkstückmaterials verwendet. Der bei einem Kontakt zwischen Werkstück und Werkzeug auftretende Spannungsan-



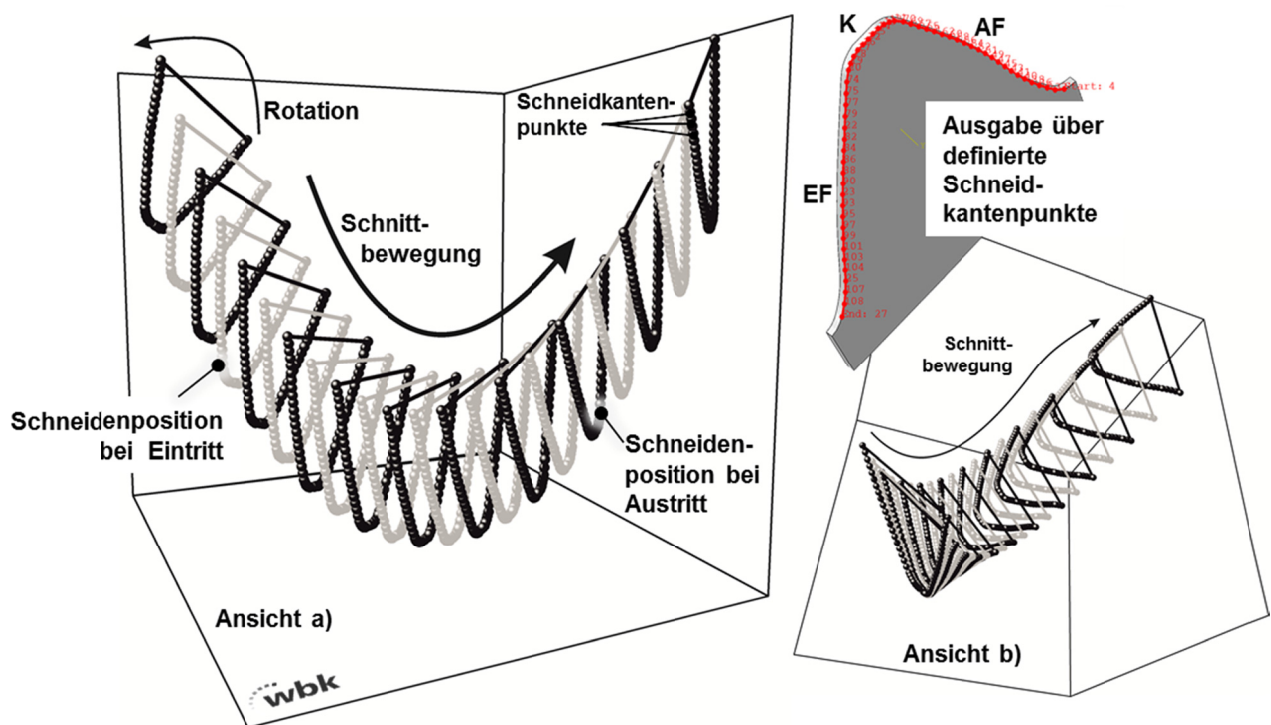
stieg im Werkstück wird dabei zur Initiierung der Elementlöschung verwendet. Durch das Entfernen von Elementen bei Überschneidungen von Werkzeug und Werkstück ist es möglich, die Verzahnungsgeometrie, die durch die Kinematik des Prozesses festgelegt ist, realitätsnah auf das Werkstück zu übertragen und die oben beschriebenen Untersuchungen durchzuführen.

### 6.5.1.1 Schneidenbewegung

Die Modellierung der Ersatzbewegung im Simulationsmodell erlaubt eine Untersuchung des Verlaufes der Schneidenbewegungsbahn bezogen auf das Werkstück- sowie das Werkzeugkoordinatensystem und damit die Relativbewegungen im Moment des Eingriffs einzelner Schneidzahnsegmente (EF, AF oder Kopf). Dabei werden bei der kinematischen Betrachtung zu den ausgegebenen Zeitpunkten Informationen über Position, Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit als Größen zur geometrischen Beschreibung der Schneidenbewegung zugänglich. Diese können im Folgenden korreliert mit der Kenntnis der herrschenden Platz- und Winkelverhältnisse, wie weiter unten ausgeführt, bei den Untersuchungen der Spanbildungsmechanismen mit in Betracht gezogen werden.

Abbildung 6.13 zeigt die geometrische Auswertung der Raumkoordinaten von hier 51 definierten Knoten des FEM-Netzes entlang der Schneidkante (vgl. Abbildung 6.13 Piktogramm rechts oben), die als Schneidkantenpunkte bezeichnet werden. Ansicht a) gibt dabei die seitliche Betrachtungsperspektive wieder, markiert sind hier die Position der Schneide zum Zeitpunkt des ersten Kontakts mit dem Werkstück an der einlaufenden Flanke sowie die Position beim Austritt aus dem Werkstück. Dabei veranschaulicht wird die Schnittbewegungsbahn der Schneide mit der überlagerten Rotation. Ansicht b) stellt den Schneideneingriff bei radialer Blickrichtung in die zu schneidende Lücke dar und veranschaulicht dabei die s-förmige Bewegungsbahn, die die Schneide bezogen auf das Werkstück beschreibt. Die Bewegung entlang der zu schneidenden Lücke resultiert dabei aus der Relativbewegung der beiden Rotationsachsen, der Axialvorschub wirkt sich dabei nur gering aus. Die Schneide

taucht in beiden Darstellungen von links in das Werkstückmaterial ein, die einlaufende Flanke beginnt den Schnitvorgang. Bei Erreichen der maximalen Schnitttiefe hat die Schneide die Hälfte der in diesem Ausschnitt beschriebenen Rotationsbewegung durchgeführt. Die Rotationsbewegung ist ab diesem Zeitpunkt in Richtung der auslaufenden Flanke orientiert, gleichzeitig bewegt sich die Schneide aus der Lücke in einer Abhebebewegung heraus. Die dargestellte Bewegungsbahn mit ihrem gekrümmten s-förmigen Verlauf zeigt in der dreidimensionalen Ansicht in Verbindung mit dem die Schnittbewegung repräsentierenden Geschwindigkeitsvektor, wie die Beträge des effektiven Spanwinkels über den Eingriff variieren und insbesondere im Bereich des Kopfes und der auslaufenden Flanke stark negative Werte annehmen. Die Auswertung des Verlaufs der Beträge des effektiven Spanwinkels erfolgt gesondert.



*Abbildung 6.13: Auswertung der Koordinaten der Schneidkantenpunkte über die Eingriffsstrecke*

Die ausgewertete Bewegungsbahn der Schneide kann zudem als Validierung der entwickelten Ersatzbewegungsbahn herangezogen werden. Die Beobachtungen lassen sich anhand vergleichbarer Darstellungen der Schneidenbewegung nach [HÜH-02] bestätigen. Als zusätzliche geometrische Informationen

können bei den FEM-Simulationsstudien von ABAQUS zu jedem Schneidkantenpunkt die Geschwindigkeitsvektoren und Verschiebungen hochaufgelöst ausgegeben werden sowie die Bestimmung der effektiven Frei- und Spanwinkel durchgeführt werden. Die FEM-Spanbildungssimulation liefert dazu ebenso hochaufgelöst die herrschenden Zustände an der Schneide, wie die Kontaktspannung, Zerspankräfte oder Temperaturen, wie in den nachfolgenden Kapiteln weiter ausgeführt wird.

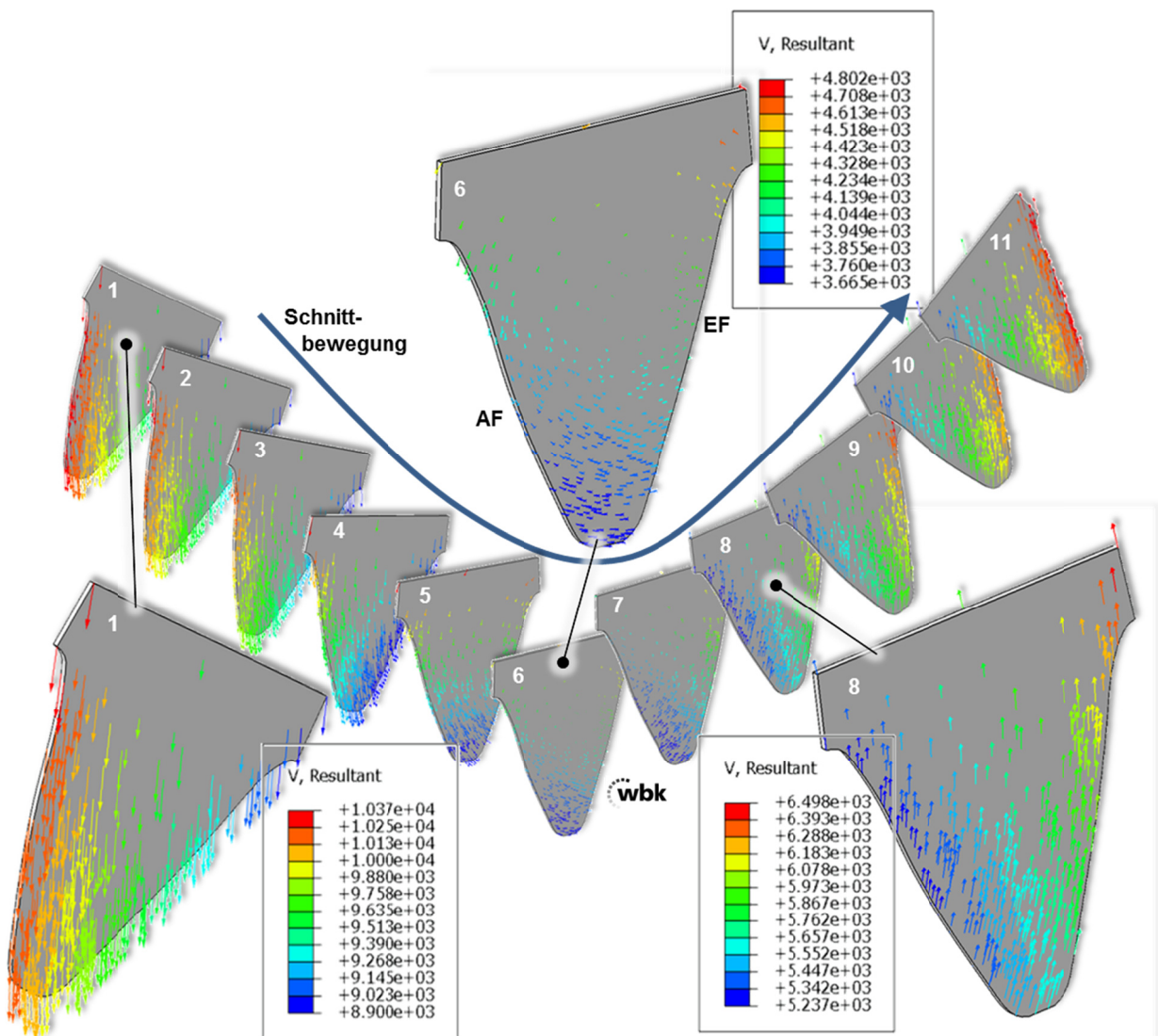


Abbildung 6.14: Schneidenbewegung über den Eingriff mit Darstellung der Geschwindigkeitsvektoren

Die Betrachtung der Schneidenbewegungsbahn aus der Darstellung des Ergebnismoduls von ABAQUS (vgl. Abbildung 6.14) erlaubt ebenfalls die Beur-

teilung der s-förmigen Raumkurve mit der translatorischen Bewegung überlagert von der Rotationskomponente. Zusätzlich wird in der Abbildung neben der geometrischen Auswertung die Geschwindigkeitsverteilung dargestellt. Abbildung 6.14 zeigt hierzu die Bewegungsbahn entlang des Schneideneingriffs anhand von 11 Einzelschritten. Der erste Kontakt und Eintritt der Schneide in das Werkstückmaterial erfolgt hier zwischen Schritt 2 und 3; der Austritt der Schneide erfolgt zwischen Schritt 9 und 10. Zum Zeitpunkt von Schritt 6 ist die volle Tiefe des Schnitts erreicht. Die Überlagerung der Spanfläche als Ausschnitt eines Schneidenzahnes mit den tatsächlichen Geschwindigkeitsvektoren zu den jeweiligen Schneidenpositionen erlaubt die Beurteilung der einzelnen Schnitzzustände im Eingriff.

Als charakteristisch bei der Bewegung der Schneide durch die Werkstücklücke zeigt sich die ausgeprägte Rotationsbewegung, der Rotationsmittelpunkt verlagert sich dabei von Schritt 1 auf der Seite der einlaufenden Flanke (in der Darstellung rechts außerhalb des abgebildeten) über den Schneidenzahn hinweg auf die Seite der auslaufenden Flanke. Die in Schritt 1 erkennbare gleichgerichtete Orientierung der Richtungsvektoren zeigt dabei an, dass das Rotationszentrum deutlich außermittig liegt und die translatorische Bewegungskomponente überwiegt. Zum Zeitpunkt der tiefsten Zustellung (Schritt 6) zeigt sich der überwiegende Anteil der Rotationsbewegungskomponente. Bei der herausvergrößerten Darstellung von Schritt 8 zeigt sich ebenso anhand der Orientierung der Richtungsvektoren der ausgeprägte Rotationsanteil der Bewegung. Es zeigt sich demnach, dass nahezu über den gesamten Verlauf des Eingriffs des Schneidenzahnes in das Werkstück (Schritte 3-9) die Rotationskomponente einen merklichen Einfluss auf die Schneidenbewegung hat. Aus dem Verlauf der Bewegung lässt sich die ausgeprägte Belastung des Kopfes der Schneide ableiten. Hierbei ist insbesondere auch der Einfluss des Profilver-schiebungsfaktors auf die Schneidenbelastung zu untersuchen. Diese Betrachtung mit der Berücksichtigung der tatsächlich auftretenden Kontaktspannungen am Werkzeug erfolgt in Kapitel 6.5.2.4.

### 6.5.1.2 Bestimmung der Prozesswinkel und geometrischer Größen

Die Untersuchung des Wälzschälprozesses mit Hilfe der Kinematiksimulation umfasst die Betrachtung der Platz- und Winkelverhältnisse während des Schneideneingriffs. Die Durchführung einer Simulationsstudie bietet dabei diverse offensichtliche Vorteile, wie beispielsweise die Möglichkeit, jeden beliebigen Zeitpunkt des Prozessdurchlaufes isoliert betrachten oder die Perspektive auf die relevanten Bereiche frei wählen zu können, um eine qualitative Auswertung der kinematischen Verhältnisse vorzunehmen. So können beispielsweise Störkonturen, die durch eine geänderte Werkzeugauslegung vermeidbar wären, identifiziert werden. Im Folgenden sollen weitere Anwendungen der Kinematiksimulation im Rahmen dieser Arbeit aufgezeigt werden. Die entwickelten Kinematikmodelle erlauben die Bestimmung frei wählbarer Winkel, Abstände und Relativpositionen von Werkzeug und Werkstück zu beliebigen Zeitpunkten des Schneideneingriffs in das Werkstück. Wie in Kapitel 6.5.1 ausgeführt sieht die Kinematiksimulation dabei vor, bereits den ersten Kontakt zwischen Werkstück und Werkzeug als Initiierung der Elementlöschung zu verwenden. Durch das Entfernen der Elemente bei Überschneidung ist es möglich, die auf das Werkzeug übertragene Verzahnungsgeometrie während des Schneideneingriffs ohne das Werkstückmaterial des späteren Spanes zu erhalten und die Analysen vorzunehmen. Die Vorgehensweise ist sehr einfach und flexibel gestaltet und wird im Folgenden kurz anhand der Bestimmung des Öffnungswinkels des keilförmigen Spaltes vor der Werkzeugschneide gezeigt. Als weitere Winkel können geometrische Frei- und Spanwinkel sowie die aus der Schneidenbewegung resultierende effektive Winkelbeträge ausgelesen werden. Zur Bestimmung sonstiger Maße und Abstände wird analog zur folgenden Vorgehensweise verfahren.

Für eine möglichst flexible Wahl der zu untersuchenden Winkel und relativen Schneidenpositionen wurde eine einfache halbautomatisierte Auswertemethode entwickelt. Dabei werden die auszuwertenden Knoten bzw. Elemente in den Ergebnisdateien manuell ausgewählt, die zugehörigen Elementkoordina-

ten werden dann exportiert und können automatisch mit einem programmierten Excel-Tool ausgewertet werden. Abbildung 6.15 zeigt schematisch die Vorgehensweise beispielhaft zur Bestimmung eines eingeschlossenen Winkels zwischen Werkzeugspanfläche und Werkstückoberfläche.

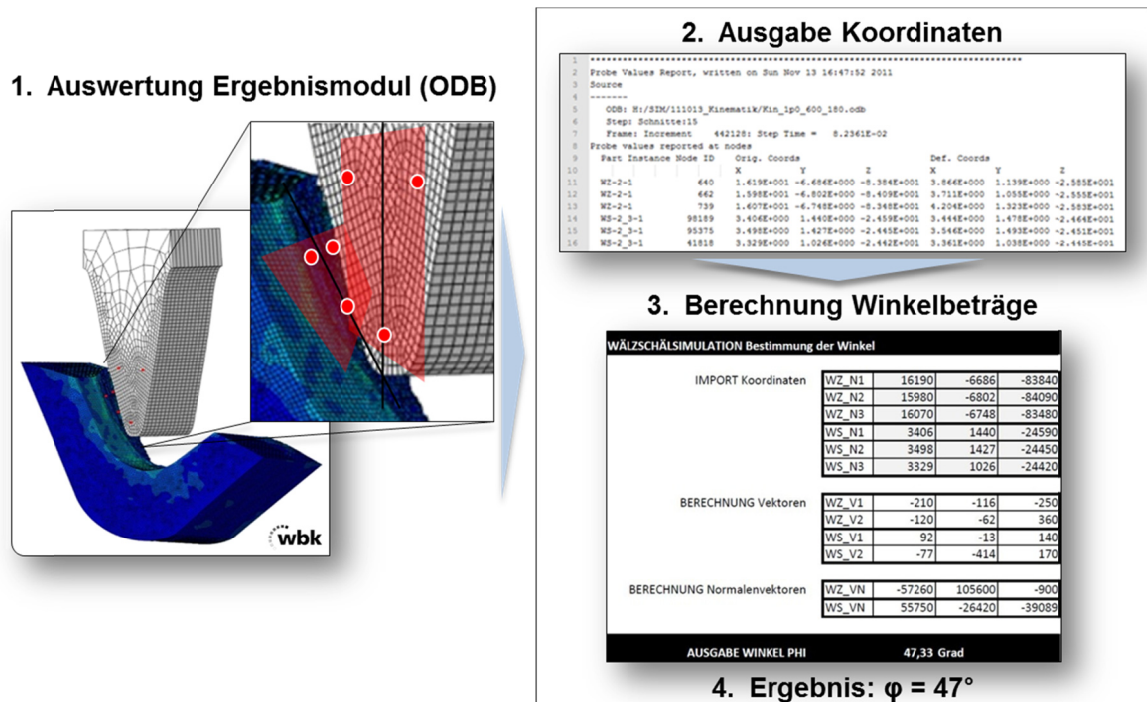


Abbildung 6.15: Vorgehensweise zur Bestimmung beliebiger Prozesswinkel

Es wurden für das Werkzeug und Werkstück jeweils 3 Knoten gewählt (rote Markierung, Abbildung 6.15 Schritt 1: Auswertung Ergebnismodul) und die Koordinaten in einer Protokolldatei vollständig ausgegeben (Schritt 2: Ausgabe Koordinaten). Die Beträge der jeweils durch die 3 Knoten repräsentierten Ebenen (zur Visualisierung in der Abbildung rot transparent eingefügt) oder Vektoren eingeschlossenen Winkel werden mittels des Kreuzproduktes automatisch bestimmt. Hierzu wird die Ausgabedatei in das oben erwähnte Excel-Tool importiert, der Winkelbetrag berechnet und ausgegeben (Schritt 3: Berechnung Winkelbeträge). Bei der Auswahl der Elemente besteht die volle Kontrolle durch die Möglichkeit der eindeutigen Visualisierung im 3D-Modell. Wird die Berechnung über die einzelnen Ausgabeframes der Simulation vorgenommen, ergibt sich der Winkelverlauf über einen vollständigen Werkzeug-eingriff.

Zur weiteren Veranschaulichung wird im Folgenden die Auswertung des Spanwinkelverlaufes über einen vollständigen Schneideneingriff vorgenommen. Dabei werden die effektiven Spanwinkel ausgewertet, die sich aus der resultierenden Bewegung der Schneidkante im Prozess ergeben und zwischen Spanfläche und Richtungsvektor der Schneidenbewegung gemessen werden können. Als Auswertepunkte wurden 23 einzelne Knoten entlang der Schneidkante gewählt. Der einlaufenden und der auslaufenden Flanke sind jeweils 9 Knoten zuzuordnen, die restlichen 5 gewählten Knoten liegen im Bereich des Kopfes des Schneidzahnes. Die Vorgehensweise ist dabei prinzipiell identisch zu der oben beschriebenen Bestimmung der Winkelbeträge. Dabei werden unter Verwendung des Kreuz- und Skalarproduktes mit Hilfe des programmierten Excel-Tools die von den ermittelten Vektoren eingeschlossenen Winkelbeträge berechnet. Die Spanfläche wird anhand der Schneidkantenpunkte sowie zweier fest definierter Knoten auf der Spanfläche gebildet. Im Unterschied zur obigen Auswertung ergibt sich der zweite Vektor direkt aus der Verschiebung des jeweiligen Schneidkantenpunktes von einem Frame zum nächsten. Ausgewertet wurden im Beispiel 22 Frames, die einen vollständigen Schneideneingriff beschreiben.

Abbildung 6.16 und Abbildung 6.17 zeigen die so ermittelten effektiven Spanwinkel für einen vollständigen Schneideneingriff, die für sämtliche 23 gewählten Schneidkantenpunkte über 22 Auswerteframes dargestellt sind. Hierbei ist zu beachten, dass die Schneidkantenpunkte entsprechend der Drehrichtung des Werkzeuges von der einlaufenden Flanke über den Kopf zur auslaufenden Flanke absteigend nummeriert werden. Die in den folgenden Abbildungen gezeigten Auswerteframes sind gleichzusetzen mit der Eingriffsdauer der Schneide. Zur Veranschaulichung wurde in Abbildung 6.16 die volldimensionale Darstellung gewählt, der Verlauf der ermittelten Spanwinkel in Abhängigkeit der Eingriffsdauer (Auswerteframe) sowie über die einzelnen Schneidkantenpunkte kann auch anhand der Darstellung in Abbildung 6.17 vorgenommen werden.

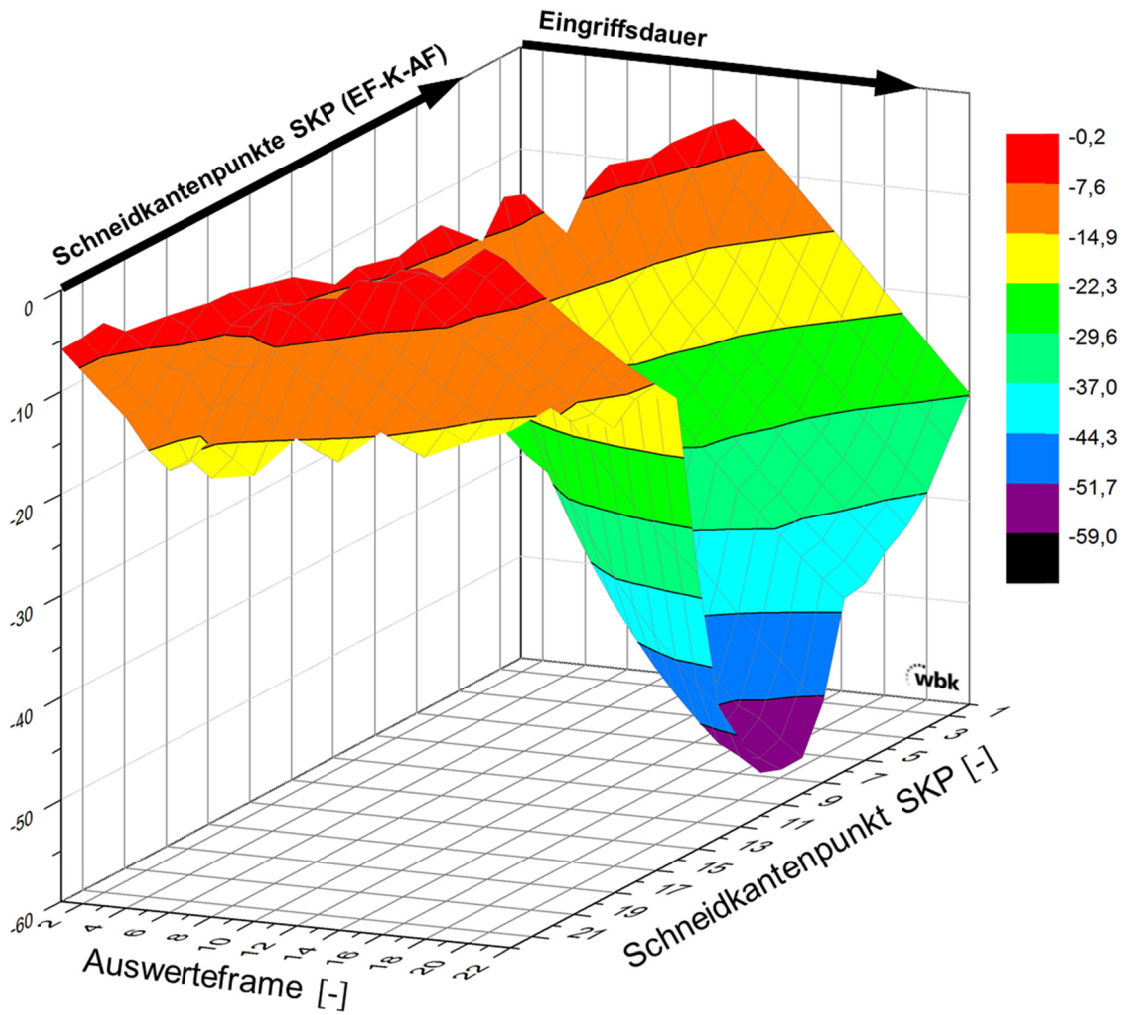


Abbildung 6.16: Auswertung Verlauf effektiver Spanwinkel

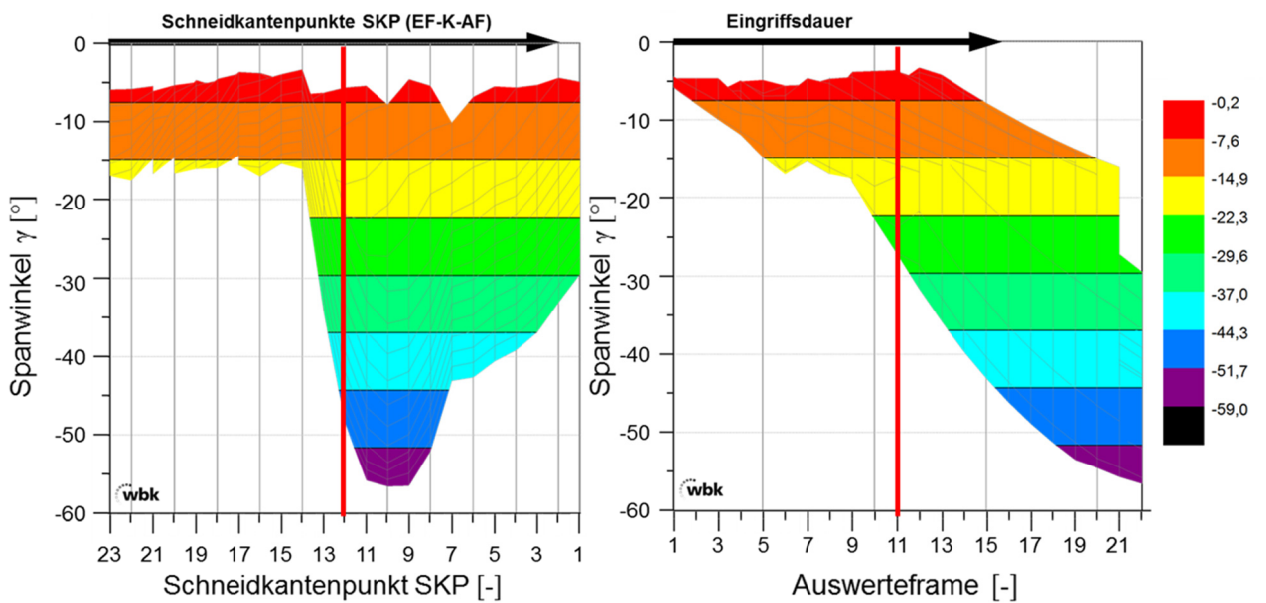


Abbildung 6.17: Auswertung Verlauf effektiver Spanwinkel (li: über SKP; re: über Frames)



Die Verläufe der Winkelbeträge aufgetragen über die Schneidkantenpunkte und die Auswerteframes (Abbildung 6.17 li. und re.) zeigen die charakteristischen Prozesseigenschaften des Wälzschälverfahrens. Durch die gewählte Darstellung wird die gesamte Bandbreite der Winkelbeträge jeweils für die Schneidkantenpunkte bzw. die Ausgabeframes gezeigt. In Abbildung 6.17 li. ist rot markiert der Elementknoten, der an der Spitze des Schneidenkopfes ausgewählt wurde (SKP 12). Die rote Markierung in Abbildung 6.17 re. kennzeichnet den Wendepunkt der eintauchenden Schneide zur Hälfte der Eingriffsdauer.

Wie bereits aus der Literatur bekannt [HÜH-02], sind die maximal negativen Spanwinkel im Bereich des Kopfes zu finden (hier bis zu  $-56^\circ$ ). Dabei zeigen sich in Abbildung 6.17 li. entlang der Schneidkantenpunkte (SKP) im Bereich der einlaufenden Flanke (SKP 23 bis SKP 15) zunächst relativ konstante effektive Spanwinkel zwischen  $-5^\circ$  und  $-17^\circ$ . Mit dem vollständigen Eintauchen des Kopfes (SKP 14 bis SKP 10) in die zu schneidende Lücke sinkt der effektive Spanwinkel dann deutlich ab. Wie bereits oben beschrieben (vgl. Kapitel 6.5.1.1) überwiegt bis zu diesem Zeitpunkt eine rein translatorische Bewegung. Im Stadium des Eingriffs des Schneidenkopfbereiches erfährt die Schneide zusätzlich eine Rotationskomponente, die resultierende Schnittrichtung führt damit zu niedrigeren effektiven Spanwinkeln. Entlang der auslaufenden Flanke (SKP 9 bis SKP 1) steigt der minimale Spanwinkel dann gleichmäßig an, ohne dabei positive Werte anzunehmen.

Der Verlauf der Spanwinkel aufgetragen über die Eingriffsdauer in Abbildung 6.17 re. zeigt sich, dass zum Ende des Schneideneingriffs ebenso die maximal negativen effektiven Spanwinkel auftreten. Zusammen mit Abbildung 6.16 zeigt sich dabei, dass bis zum Austritt der jeweiligen Schneidkantenpunkte aus dem Werkstück die effektiven Spanwinkel weiter abfallen und mit dem Austritt die jeweils maximal negativen Spanwinkel erreicht wurden.

Eine vollautomatische Ausgabe der Elementkoordinaten aus der FEM-Software ist wie oben ausgeführt bisher nicht vorgesehen. Die entsprechende Erweite-

rung der Auswertemethode mit zuvor festgelegten Elementen und Bereichen kann jedoch auf Basis der entwickelten Modelle einfach erfolgen. Es wurde darauf verzichtet, da für die Berechnung der Prozesswinkel prinzipiell die Auslegungssoftware von [HÜH-02] eingesetzt werden kann. Hier ist die automatische Ausgabe der Frei- und Spanwinkel über den Schneideneingriff mit einer geeigneten Darstellung über die Schneidkantenpunkte sowie die Schnittbewegung bereits implementiert. Gegenüber dieser Lösung hat die Kinematiksimulation darüber hinaus Nachteile hinsichtlich der Rechenzeit. Die Vorteile liegen in der anschaulichen Darstellung im 3D Modell sowie in der damit möglichen direkten Korrelation mit der Analyse der Spanbildungsmechanismen.

### **6.5.2 Spanbildungssimulation**

Für die Durchführung der Simulationsstudien zur Untersuchung der Spanbildungsmechanismen wurde das gemäß der obigen Beschreibung aufgebaute Modell mit feiner Vernetzung und unter Verwendung des Materialmodells mit realem Materialverhalten verwendet. Es wurden somit die gleichen Grundprozessmodelle wie bei der Durchführung der Kinematiksimulationsstudien eingesetzt, bei denen sämtliche Bewegungskomponenten dem Werkzeug zugeordnet sind. Die primäre Zielstellung war es dabei, die grundsätzlichen Mechanismen bei der Bildung des Dreiflankenspans zu beschreiben und zu durchdringen. Für die zielgerichtete Auslegung der Werkzeuge bei der Prozessauslegung sowie zur gesicherten Charakterisierung der Anforderungen an Schneidstoff und Beschichtung werden die Belastungszustände an der Werkzeugschneide untersucht. Im Rahmen der Kinematiksimulation wurden unter anderem die Platzverhältnisse und Ablaufbehinderungen im Bereich der Zerspanstelle sowie die Schneidenbewegungen im Eingriff visualisiert und bestimmt. Die mit Hilfe der Spanbildungssimulation beobachteten Mechanismen bei der Spanbildung und die Bewegung der abgetrennten Späne nach dem Austritt der Schneide können so unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse beurteilt werden.

### 6.5.2.1 Spanform

Zur Verifikation der Simulationsmodelle und zur Untersuchung der Spanbildungsmechanismen beim Wälzschälen dient insbesondere die für das Verfahren charakteristische Form der sich bildenden Dreiflankenspäne. Aus den Ergebnissen der Spanbildungssimulation lassen sich hierzu die abgetrennten Späne extrahieren und hinsichtlich ihrer Gestalt untersuchen. Zum Vergleich mit der Realgestalt kann hierzu Abbildung 5.18 herangezogen werden.

Abbildung 6.18 zeigt zwei Ansichten der Unterseite eines simulierten Spanes, die zur Veranschaulichung der dreidimensionalen Gestalt leicht zueinander gekippt abgebildet sind. Zusätzlich wird zum Vergleich der Realspan dargestellt. Die Kontur und Gestalt zeigt eine weitgehende Übereinstimmung mit den Spänen aus den Experimenten. Bei dem hier dargestellten Span sind die 3 Segmente auch nach dem Abtrennen zusammenhängend erhalten geblieben. Es sind die einlaufende Flanke (EF), der Spankopf sowie die auslaufende Flanke (AF) eindeutig zuzuordnen. Ebenso zeigt sich eine große Übereinstimmung bei der Zuordnung der Ober- und Unterseite. Die linke Darstellung lässt an der auslaufenden Flanke die Oberseite erkennen, die ebenso wie im Realprozess die ehemalige Oberfläche des Halbzeuges unbearbeitet bleibt und mit der Verkrümmung, die in der rechten Darstellung sichtbar wird, die ehemalige Oberfläche des FEM-Modells darstellt. Die Oberfläche der Unterseite stellt sich am simulierten Span zerklüftet dar; im Realprozess ist diese neu entstandene Oberfläche als glänzende Fläche erkennbar (vgl. Kapitel 4.5.3). Durch die Elementlöschungsvorgänge im Bereich der Trennfläche kann dies in der Simulation nicht vollständig abgebildet werden.

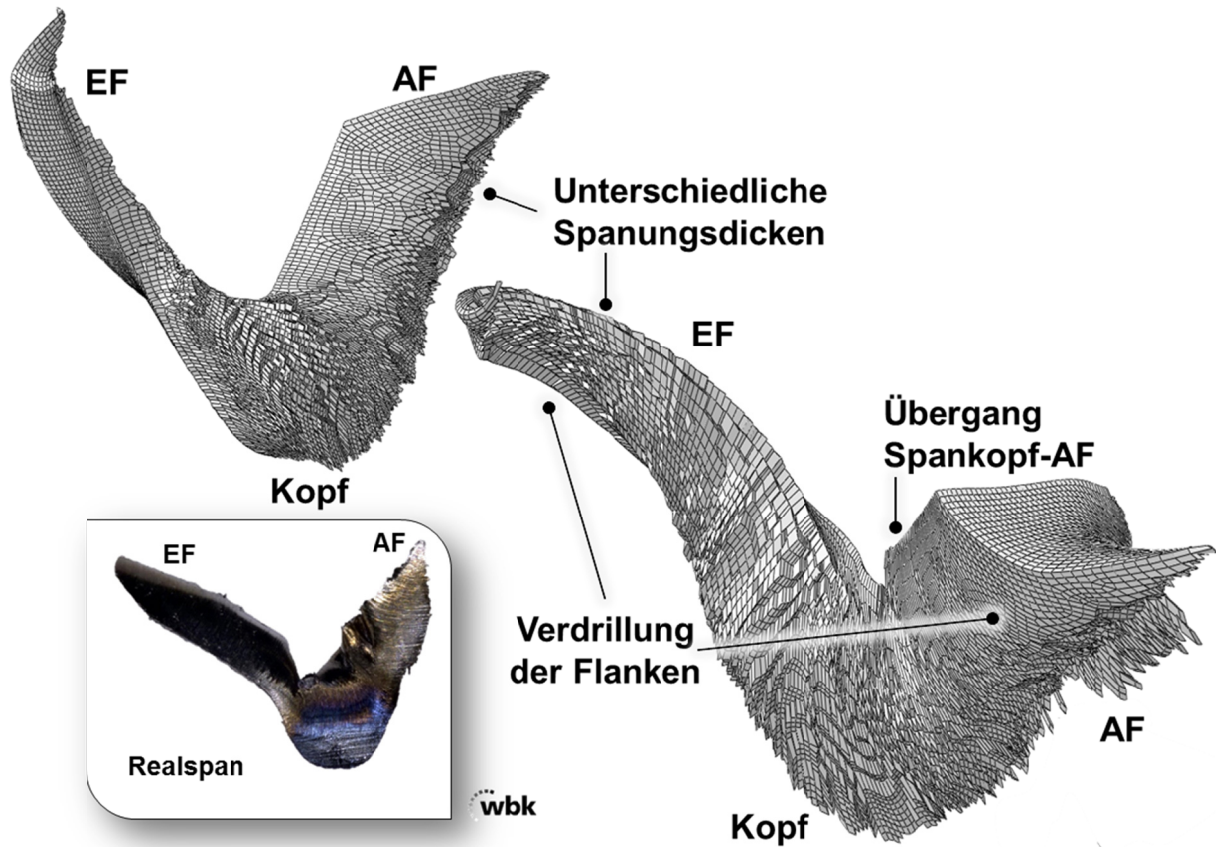


Abbildung 6.18: Simulierte Spanform (Unterseite) ( $s_{ax} = 0,2 \text{ mm/WSU}$ )

Erkennbar werden am simulierten Span die unterschiedlichen Spannungsdicken an der einlaufenden und der auslaufenden Flanke sowie am Spankopf. In der linken Darstellung zeigt sich die an der einlaufenden Flanke zunehmende Spannungsdicke. Ebenso stellt sich die Verdrillung der Flanken analog zum Realspan dar. An den Flanken zeigt sich das verformte FEM-Netz geringer deformiert als im Bereich des Spankopfes. Durch die dort herrschenden Spannungszustände und Richtungen zeigt sich eindeutig eine stärkere Verzerrung einzelner Elemente, die zudem unterschiedliche Orientierungen aufweisen. Weniger deutlich lässt sich am simulierten Spankopf die Spanstauchung darstellen, wenngleich die beschriebenen Verzerrungen hier einen Anhaltspunkt für die herrschenden Mechanismen geben können. Im Bereich des verformten Kopf des Spanes zeigt sich die Grenze des verwendeten Ansatzes der Elementlöschung nach den im Materialmodell definierten Kriterien.

Der in Abbildung 6.18 gezeigte Span wurde in Simulationsläufen unter Verwendung eines hohen Axialvorschubwertes von  $s_{ax} = 0,2 \text{ mm/WSU}$  erzeugt. Wie schon bei den Realversuchen beobachtet, ergeben sich bei großen Axialvorschüben stabilere Späne, die Häufigkeit des Auftretens einzelner Flanken und Spänen mit fehlender Flanke ist insgesamt geringer. Dennoch ist insbesondere in der rechten Darstellung von Abbildung 6.18 ein abrupter Übergang zwischen Spankopf und der verdrillten auslaufenden Flanke erkennbar.

Die oben ausgeführten charakteristischen Merkmale der Dreiflankenspäne bei zusätzlich deutlicher ausgeprägten Übergängen zwischen Flanken und Kopf ergeben sich bei simulierten Spänen mit geringerem Axialvorschub (vgl. Abbildung 6.19). In den Simulationsläufen ist dieses Verhalten noch deutlicher bei weiter abnehmendem Axialvorschub zu beobachten, bis hin zum Ablösen einer Flanke im Verlauf des Eingriffs.

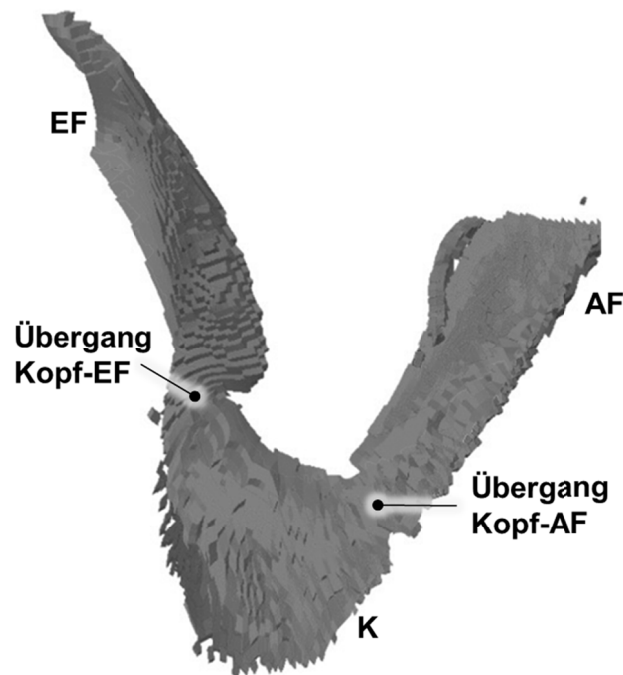


Abbildung 6.19: Simulierte Spanform ( $s_{ax} = 0,1 \text{ mm/WSU}$ )

Neben den oben beispielhaft gezeigten vollständigen Dreiflankenspänen (Abbildung 6.18), bei dem die Übergänge zwischen Kopf und den beiden Flanken als eher unkritisch anzusehen sind, sind je nach Prozessparametern in

den Simulationsrechnungen analog zu den Realversuchen auch Späne mit fehlenden Flanken entstanden. Das Abbrechen einzelner Flanken erfolgte in den Simulationsläufen - ebenso analog zu den Realversuchen - ausschließlich am Übergang vom Spankopf zu den Flanken, der bereits oben als kritischer Bereich identifiziert werden konnte. Das Auftreten von unvollständigen Spänen wurde in Simulationsstudien unter Variation der Prozessparameter beobachtet, die Beschreibung erfolgt Kapitel 7.2.

### **6.5.2.2 Spanbildungsmechanismen**

Insbesondere von Nutzen bei der Auswertung der Simulationsstudien ist, dass die Spanform zu frei wählbaren Abschnitten und Zeitpunkten während der Spanbildung beurteilt werden kann. Im vorangegangenen Kapitel wurde die Form des fertigen Spanes nach dem vollständigen Eingriffs eines Schneidezahnes betrachtet; bei der Untersuchung und Beschreibung der Spanbildungsmechanismen wird die Analyse des Spanes zu beliebigen Zeitpunkten während des Eingriffs vorgenommen.

Bisherige Theorien der Spanbildung beim Wälzschälen gehen davon aus, dass mit Beginn des Schnittvorgangs zwei voneinander getrennte Flankenspäne an den beiden Schneidflanken entstehen, diese sich im Verlauf des Schnittwegs separat und am Schneidkopf schließlich zusammen wachsen [BEC-06].

Anhand der systematischen Charakterisierung der Späne (vgl. Kapitel 5.4) konnte diese Theorie jedoch nicht bestätigt werden. Die analysierten Späne zeigten auch bei einer rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung keine Anzeichen für ein Zusammenwachsen in Form eines Verschweißens oder Verpressens der Flankenspäne im Spankopfbereich. Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte und eingesetzte Spanbildungssimulationsmodell bietet darüber hinaus weitgehende Analysemöglichkeiten der Spanbildungsmechanismen beim Wälzschälen, die mit konventionellen Methoden nicht möglich sind. Es zeigte sich dabei, dass die Bildung des Dreiflankenspanns von der einlaufenden Flanke über den Kopf bis hin zur auslaufenden Flanke in einem durchgängi-

gen Vorgang vom Eintauchen der Schneide bis zum Austreten aus dem Werkstückmaterial abläuft. Der für das Wälzschälverfahren charakteristische Dreiflankenspan bildet sich demnach kontinuierlich und ohne Zusammenlaufen einzelner Spansegmente, wie dies beispielsweise vom Wälzfräsen bekannt ist [HER-08].

Abbildung 6.20 zeigt jeweils einen typischen Zustand der einzelnen Abschnitte bei der Bildung des Dreiflankenspans mit der Entstehung des Spanes im Bereich der einlaufenden Flanke (A), des Kopfes (B) und der auslaufenden Flanke (C). Die Blickrichtung der jeweiligen Schnitte (Darstellung A, B und C) ist entsprechend der mittigen Darstellung des Realspans orientiert zu verstehen. Die Darstellungen A und C zeigen eine radiale Blickrichtung in die Lücke beziehungsweise aus der Lücke heraus. In Darstellung B erfolgt die Blickrichtung tangential zur Werkstückoberfläche.

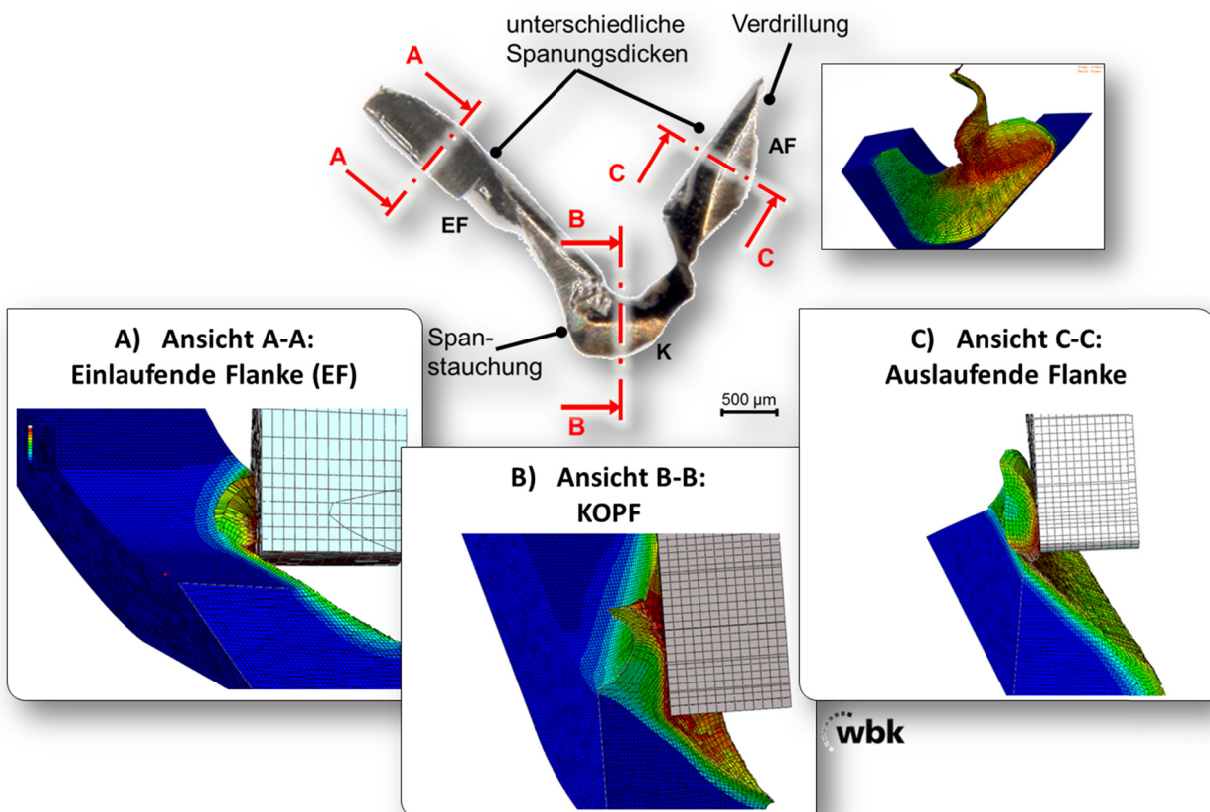
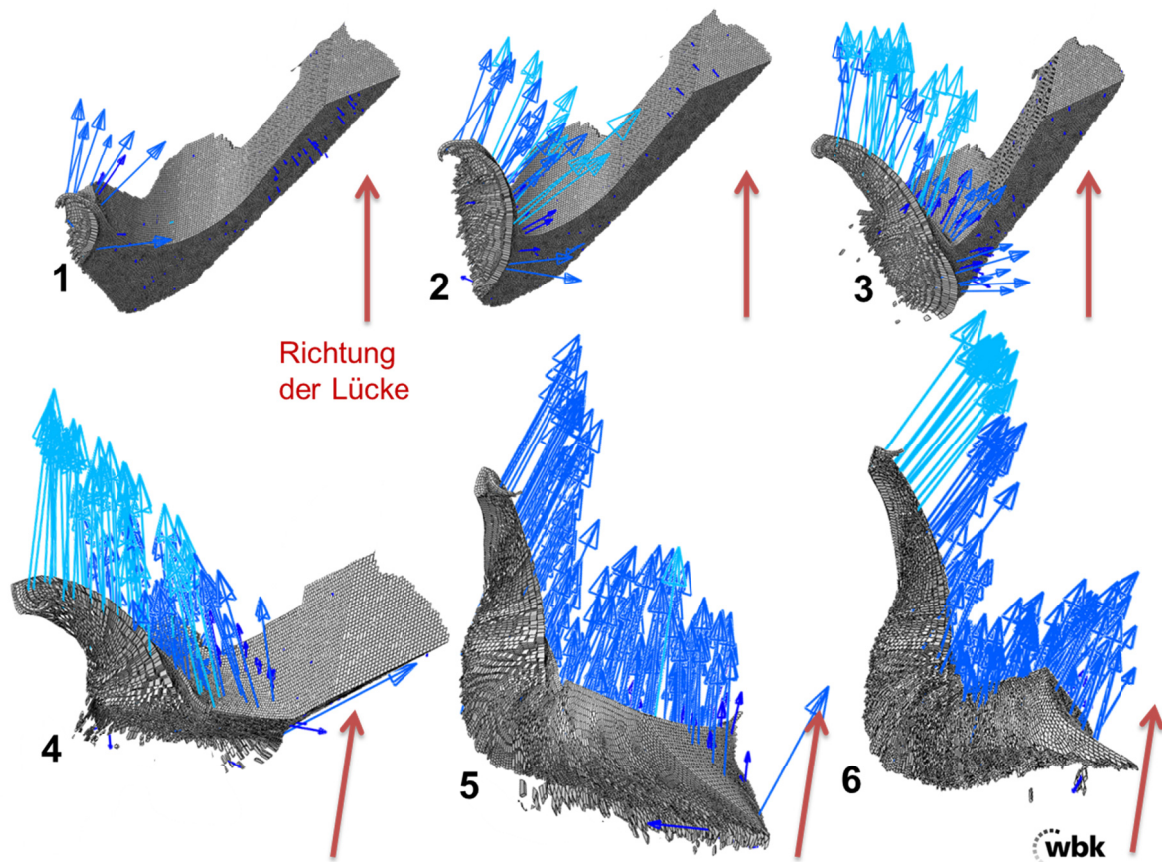


Abbildung 6.20: Abschnitte der Bildung des Dreiflankenspans beim Wälzschälen (Simulationsergebnis und Vergleich Realspan)

Zu Beginn der Spanentstehung (A) wird deutlich, dass die einlaufende Flanke des Spans in Ablaufrichtung eine Verdrillung erfährt, die Spanbildungsmechanismen sind vergleichbar mit einem aufrollenden Span im Orthogonalschnitt. Im weiteren Verlauf, im Bereich der Bildung des späteren Spankopfes (B), wird deutlich mehr Material vor der Schneide aufgestaut, ein Aufrollen des Spanes ist hier aufgrund von Quetschvorgängen erschwert. Mit der Austrittsbewegung der Schneide nach dem Übergang vom Kopf in die auslaufende Flanke zeigt sich in (C) erneut eine dem Orthogonalschnitt äquivalente Spanbildung.

In diesem Zusammenhang muss auch erwähnt werden, dass in dieser Arbeit der Begriff Mehrflankenspan nicht nach der teilweise vorgenommenen freien Definition ein Span ist, der gebildet wird, wenn mehrere, zusammenhängende Schneiden gleichzeitig schneiden [KLO-07]. Der Begriff soll hier vielmehr einen Span bezeichnen, der aus mehreren Segmenten besteht. Die Bezeichnungen EF und AF sowie Kopf werden hier entsprechend der Bezeichnung der Schneidenabschnitte vorgenommen, die an der Bildung dieser Spansegmente beteiligt sind. Dadurch kommt es im Laufe der Spanbildung beim Wälzschälen nicht zu einer Kollision von Flankenspänen, die beispielsweise beim Wälzfräsen als problematisch hinsichtlich des Aufrollverhaltens anzusehen ist. Vielmehr ist ein kritischer Bereich beim Wälzschälen beim Übergang von der einlaufenden Flanke zum Kopf sowie beim Übergang vom Kopf in die auslaufende Flanke zu sehen. Hier kommt es zu unstetigen Übergängen, die im Folgenden detaillierter zu analysieren sind. Des Weiteren muss die unterschiedliche Spanndicke an den beiden Flanken in die Beurteilung der Spanbildung mit einbezogen werden.





*Abbildung 6.21: Vektorielle Darstellung der Verschiebungsgeschwindigkeiten im Span während der Zerspanung*

Abbildung 6.21 zeigt den Spanbildungsvorgang anhand von 6 Zeitabschnitten. Die Darstellung des Werkstücks ist auf das tatsächliche Spanvolumen reduziert, der Werkzeugzahn ist ausgeblendet. Zur Veranschaulichung der Relativbewegung der Spansegmente sind in der Abbildung die jeweiligen Verschiebungsgeschwindigkeitsvektoren überlagert. Die Darstellung zeigt resultierende Verschiebungsgeschwindigkeiten von ca. 50 m/min (dunkelblau) bis zu ca. 280 m/min (hellblau). Bei der Beurteilung der resultierenden Geschwindigkeiten zeigt sich im vorliegenden Beispiel insgesamt über die einzelnen Schritte eine überwiegend homogene Verteilung entlang der Spansegmente.

Die einlaufende Flanke zeigt das Einrollen des Spanes, wie bereits oben ausgeführt, äquivalent zum orthogonalen Schnitt. Die Vektordarstellung zeigt dies anhand der Geschwindigkeitsverteilung über den Span (Abbildung 6.21 in

Darstellung 3 in Richtung der Werkstücklücke). Der obere Teil, der zuerst Kontakt mit der Schneide hatte, bewegt sich schneller in Zahnlückenrichtung, der untere Teil ist partiell noch nicht vom Werkstück abgetrennt. Über den Eintauchvorgang des Schneidezahnes in das Werkstückmaterial (Schritt 1-4) wird die Verdrillung der einlaufenden Flanke weiter deutlich. In den Darstellungen 3 bis 5 wird zunehmend der Spankopf mit gebildet. In Darstellung 4 wird dabei deutlich, dass sich zunächst die einlaufende Flanke noch deutlich schneller in Richtung der Lücke bewegt, in Darstellung 5 zeigt sich dann wieder eine homogene Geschwindigkeitsverteilung. Bei einer Betrachtung der Geschwindigkeitsvektoren im Analysemodul von ABAQUS wird ebenso eine ungeordnete Richtungsverteilung der einzelnen Spansegmente deutlich, die in einer 2D-Darstellung nicht eindeutig wiederzugeben ist. Des Weiteren ist in Darstellung 5 der Übergang von der einlaufenden Flanke zum Kopf sichtbar in Form eines Knickes und anhand der disharmonischen Orientierung der verzerrten Elemente. Zusätzlich, wie bereits bei der vorherigen Analyse festgestellt, ergeben sich im Bereich der Kopfes veränderte Spanbildungsmechanismen. Der erkennbare Kompressionsbereich des Realspans zeigt hier ein Abscheren und Abgleiten des Spans. Da sich die Richtung der Belastung während des Prozesses ändert, kann jedoch nicht von einer einzelnen Scherebene ausgegangen werden, es sind mehrere unterschiedlich orientierte Scherebenen und Verformungszonen in Betracht zu ziehen. Die Abbildung dieses Verhaltens stellt eine besondere Herausforderung für die FEM dar und kann nur in Ansätzen erreicht werden. Das grundsätzliche Verhalten und die Kompression sind dennoch gut erkennbar. Im weiteren Verlauf wird ebenso der kritische Bereich des Überganges vom Kopf in die auslaufende Flanke sichtbar (Darstellung 5) und das bereits oben beschriebene, dem orthogonalen Schnitt äquivalente Abrollen des Spanes abschließend bei der Bildung der auslaufenden Flanke. Die unterschiedliche Spannungsdicke an beiden Flanken zeigt sich in Darstellung 6.

Beim oben gezeigten Beispiel wurde mit  $s_{ax} = 0,2$  mm/WSU ein großer Axialvorschub gewählt, der Span ist dementsprechend dick. Wie sich bereits in den experimentellen Untersuchungen gezeigt hat, war hier ein eher stabiler Span zu erwarten. Die Merkmale, insbesondere die als kritische Bereiche identifizierten Übergänge zwischen Kopf und Flanken, lassen sich bei Variation der Prozessparameter im Folgenden deutlicher darstellen (vgl. auch Abbildung 6.19). Die oben beschriebenen grundlegenden Mechanismen bei der Bildung des Dreiflankenspans sind auch hier gültig.

Abbildung 6.22 zeigt in der rechten Darstellung einen Span nach vollständigem Schneideneingriff bei  $s_{ax} = 0,1$  mm/WSU. Die zusätzlich dargestellten Ansichten geben den Verlauf der Spanentstehung um den Zeitpunkt des Übergangs von der einlaufenden Flanke zum Kopf wieder. Dabei ist bei Ansicht 2 gegenüber den anderen Ansichten die Blickrichtung geändert, in Ansicht 1 und 2 wird von schräg oben auf die Spanentstehung geblickt, die Schneide bewegt sich hier nach oben. In Ansicht 1 wird bereits im Ansatz der Kopfbereich gespannt, hier sind insbesondere im unteren Teil die diffus orientierten Geschwindigkeitsvektoren zu beachten, die hier noch stark voneinander weg orientiert sind. In Ansicht 2 und 3 sind diese Richtungen zunehmend entgegen gerichtet und weisen auf einen Kompressionsvorgang hin. In Ansicht 3 ist bereits zunehmend auch die auslaufende Flanke von der Schneide erfasst, diese Ansicht stellt bereits den kritischen Übergang von einlaufender Flanke (EF) zum Kopf (K) dar, bei dem es zu einem überhängenden Spansegment und Einrissen gekommen ist. Diese sind in der Darstellung des fertigen Spans gekennzeichnet. Bei den hier vorliegenden geringeren Vorschubwerten sind die bereits oben herausgearbeiteten Spanbildungsmechanismen gültig, zusätzlich sind die Übergänge zwischen Kopf und Flankensegmenten kritischer ausgeprägt mit Einrissen, Überhängen und Querschnittsverjüngung des Materials.

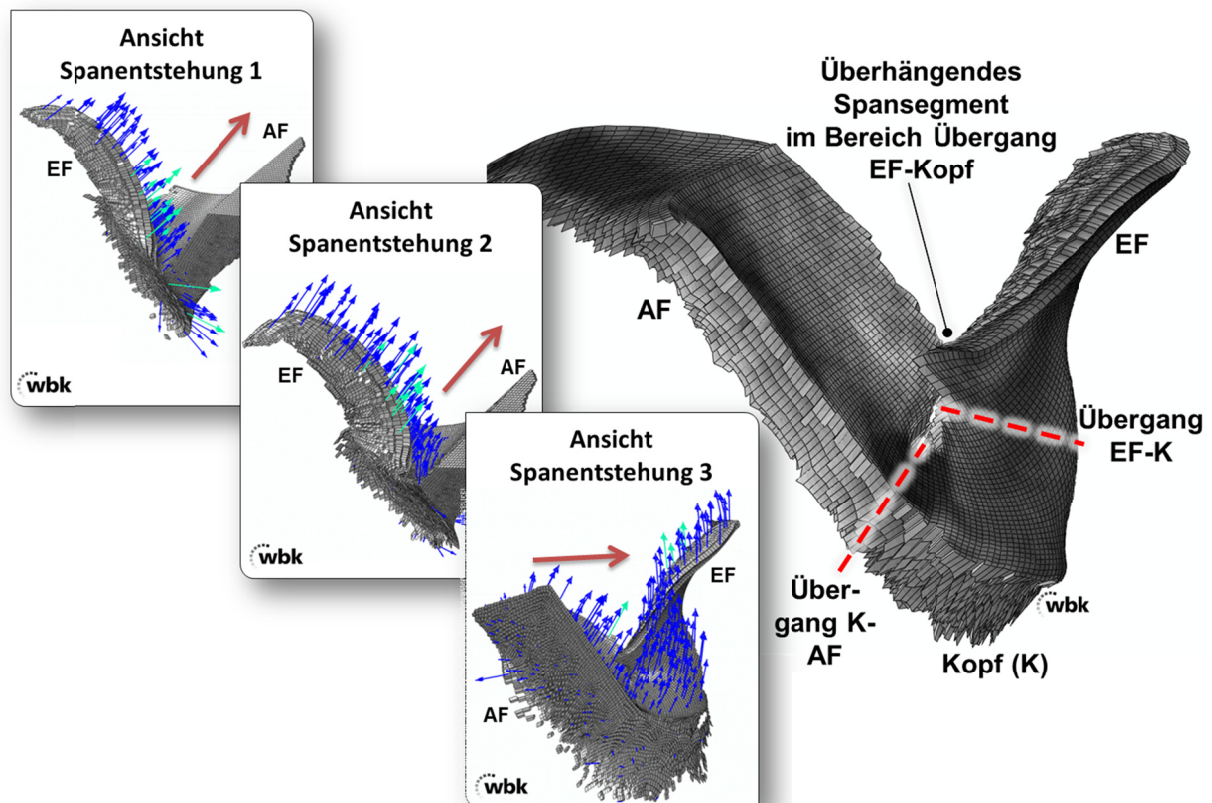


Abbildung 6.22: Entstehung kritischer Übergang EF-K am Span und fertiger Span;  $s_{ax} = 0,1 \text{ mm/WSU}$  (Simulationsergebnis)

### 6.5.2.3 Bewegungsverhalten der abgelösten Späne

Neben der Untersuchung der Vorgänge während der Spanbildung bieten die entwickelten Simulationsmodelle aufgrund der gewählten Ersatzbewegung, bei der das Werkstück nicht bewegt wird und sämtliche Bewegungskomponenten der Schneide zugeordnet sind, auch Einblicke in das Verhalten des Spans nach einem erfolgten Schneideneingriff und der vollständigen Abtrennung des Spans vom Werkstückmaterial. Dabei wird das Spanflugverhalten nicht von der Rotationsbewegung des Werkstücks oder Trägheitseinflüssen verändert. In der Simulation werden die rein aus der Spanbildung resultierenden Bewegungsimpulse und das daraus resultierende Spanflugverhalten ersichtlich.

In vorangegangenen Kapiteln wurden die Möglichkeiten bei der kinematischen Simulation beschrieben, die Winkel- und Platzverhältnisse im Prozess auszuwerten sowie evtl. Störkonturen beurteilbar zu machen. Als weitere Beur-



geben wird. Diese resultiert daraus, dass bereits Teile des Spanes vom Werkstück abgetrennt wurden (einlaufende Flanke, Kopf), sich wegbewegen, dabei jedoch noch mit dem Restspan verbunden bleiben.

Über die Variation der Drehzahl und damit der Schnittgeschwindigkeit ist in der Simulation keine Veränderung des Spanflugverhaltens festzustellen. Bei Erhöhung des Axialvorschubes zeigt sich eine geringfügig veränderte Bewegungsbahn, der Richtungsvektor neigt sich hier etwas stärker in Richtung positiver y-Achse (vgl. Abbildung 6.23 Mitte unten).

Die beschriebenen Untersuchungen können nur sinnvoll genutzt werden, wenn auch das Verhalten im Realprozess mit berücksichtigt wird. Hierzu erfolgt in Kapitel 7.3 die Auswertung der Realversuche und die Validierung der Simulationsergebnisse. Aus den Auswertungen der Simulationen lässt sich ableiten, dass der rein durch aus der Schneidenbewegung und dem Spanablauf resultierende Bewegungsimpuls des Spanes keine ungünstigen Spanbewegungen zur Folge hat, die eine signifikante Ursache für Spanklemmer bedeuten.

#### **6.5.2.4 Belastung der Werkzeugschneide**

Zur Analyse der Schneidenbelastung dienen die Kontaktdrücke (CPRESS) zwischen Werkzeug und Werkstück- bzw. Spanmaterial aus den Spanbildungssimulationenläufen. Die Belastung über den Verlauf des Eingriffs kann dann als weiteres Bewertungskriterium bei der Parametervariation verwendet werden. Die Auswahl und Optimierung von Werkzeugs substrat und -beschichtung wird unterstützt durch die Charakterisierung der Druckverhältnisse und Belastungsspitzen auf der Spanfläche. So können die Anforderungen des Verfahrens beispielsweise an die Hartstoffschicht abgeleitet werden.

##### **6.5.2.4.1 Verlauf der Belastung der SKP über die Eingriffsdauer**

Aus Abbildung 6.24 geht beispielhaft eine Beschreibung der Belastung der Werkzeugschneidkante über die Eingriffsdauer hervor. Für diese Darstellung wurden 37 Knoten entlang der Schneidkante gewählt und die Kontaktdrücke

(CPRESS) ausgelesen. Die Darstellung zeigt entsprechend der markierten Bereiche die SKP Nr. 1-15 der auslaufenden Flanke, die SKP Nr. 16-22 des Kopfes und die SKP Nr. 23-37 der einlaufenden Flanke, gelesen von rechts nach links. Im oberen Abschnitt der Abbildung 6.24 wird in einer Matrix schematisch der Druckverlauf an den einzelnen Schneidkantenpunkten über die Eingriffsdauer nach unten aufgetragen dargestellt. Bei den gewählten Parametern dauert der Eingriff 3 ms und erfolgt zwischen  $t_0 = 0,0022$  s und  $t_E = 0,0025$  s. Die grau hinterlegten Felder der Matrix zeigen an, dass ein Kontakt vorliegt und ein Wert ausgegeben wird (Zellwert  $>0$ ). Die gelb hinterlegten Felder geben an, dass eine Druckbelastung ausgegeben wird, die unter den 10 % höchsten der gesamten Ausgabewerte liegt. Rot hinterlegt sind die höchsten 1 % aller Werte. Die Matrixdarstellung im oberen Teil der Abbildung 6.24 dient somit als schematische Verlaufsdarstellung, ohne die einzelnen Beträge herauszustellen. Im unteren Teil von Abbildung 6.24 werden der Matrix zuzuordnen die Maximalwerte der einzelnen Schneidkantenpunkte aufgetragen. Die Mittelwerte über die gesamte Eingriffsdauer (MW Gesamtzeit) und damit auch über Zeiträume ohne Kontakt (CPRESS = 0) sowie die Mittelwerte der Kontaktspannungen über 0 mit zugehöriger Standardabweichung (MW Kontaktzeit) werden ebenso dargestellt.

Die hervorgehobenen Markierungen A, B und C dienen der Erklärung der Darstellungsform:

- Markierung A: Einlaufende Flanke, SKP Nr. 35, Node 97,  
 $t_A = 0,00222$  s: erster Kontakt WZ-WS, CPRESS(N97) = 539 MPa
- Markierung B: Kopf, SKP Nr. 22, Node 73,  
 $t_B = 0,00233$  s: Maximalwert, CPRESS(N73) = 2219 MPa
- Markierung C: Auslaufende Flanke, SKP Nr. 5, Node 8,  
 $t_C = 0,00241$  s; CPRESS(N8) = 178 MPa
- Markierung D: Auslaufende Flanke, SKP Nr. 3, Node 47,  
 $t_C = 0,00249$  s: CPRESS(N47) = 963 MPa

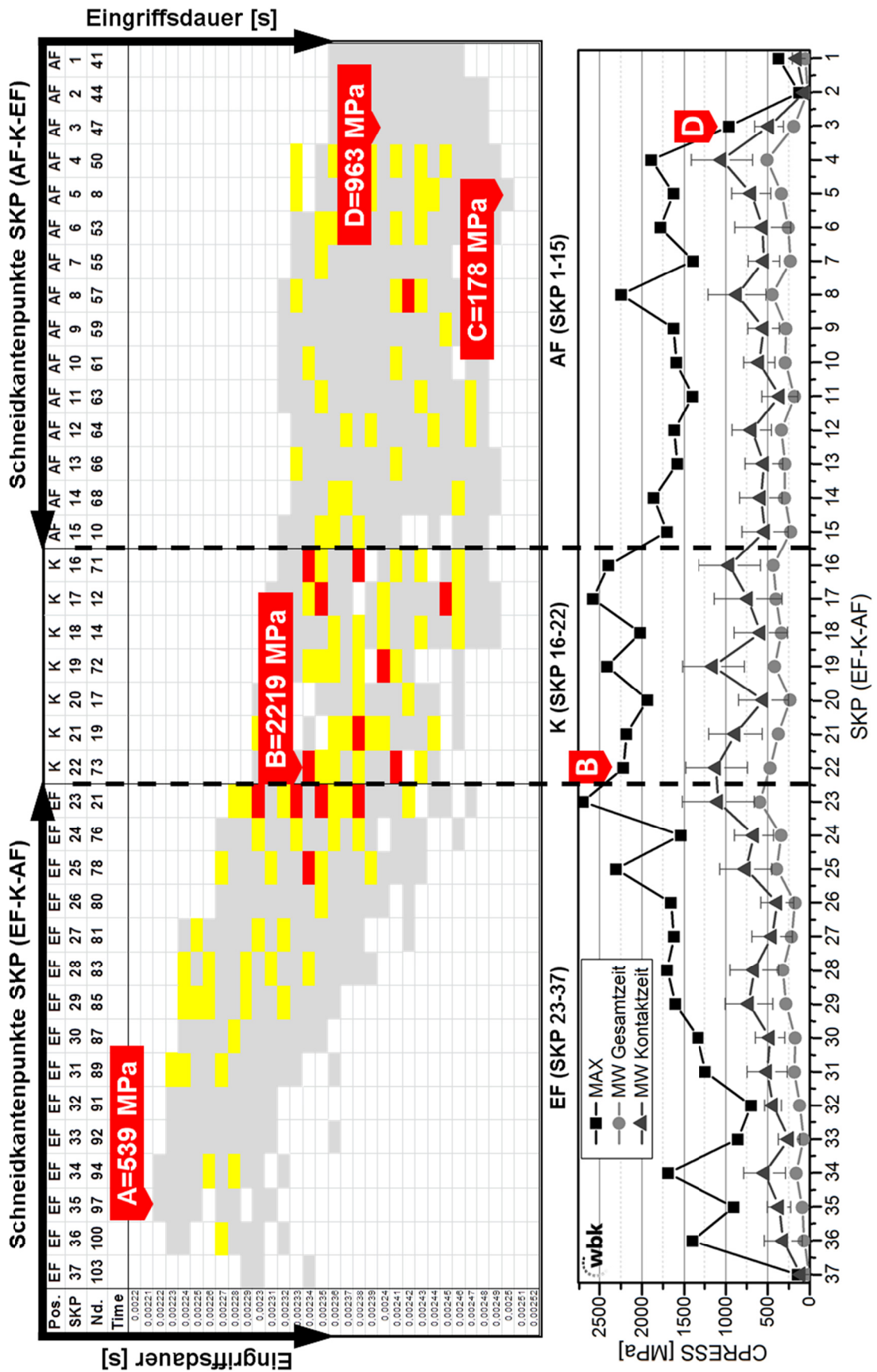


Abbildung 6.24: Simulierte Kontaktspannung (CPRESS) entlang der Schneidkante des Werkzeuges



Aus dem Verlauf der Anzeige von Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstückmaterial in der Matrix anhand der in der oberen Darstellung grau hervorgehobenen Felder, lässt sich der bei der Analyse der Spanbildungsmechanismen beschriebene Ablauf der Spanentstehung belegen. In Kapitel 6.5.2.2 ging daraus hervor, dass die Bildung des charakteristischen Dreiflankenspanes beim Wälzschälen kontinuierlich erfolgt. Zunächst wird die einlaufende Flanke (EF) gebildet, der Übergang zum Kopf beginnt zeitlich versetzt und vom Kopf (K) erfolgt schließlich der Übergang zur auslaufenden Flanke (AF). Die Spanteile bleiben zusammenhängend, die jeweils zugehörigen Schneidenabschnitte bilden die Spansegmente nacheinander kontinuierlich und sind dabei teilweise gleichzeitig im Eingriff. Insbesondere die Bildung des Spankopfes und der auslaufenden Flanke erfolgen hier teilweise gleichzeitig. Dies zeigt sich ebenso im Verlauf in der Matrixdarstellung von links oben (SKP der EF grau hinterlegt, Beginn des Eingriffs) nach rechts unten (SKP der AF grau hinterlegt, Ende des Eingriffs). Zum Zeitpunkt der Markierung A sind nur SKP der einlaufenden Flanke im Eingriff, zum Zeitpunkt der Markierung D und später wird kein Kontakt der einlaufenden Flanke mehr angezeigt. Zum Zeitpunkt der Markierung B ist nahezu die gesamte Schneidkante am Eingriff beteiligt, während bei Markierung D nur noch vereinzelt Kontakt im Bereich der einlaufenden Flanke angezeigt wird.

Aus der Verteilung der Maximalwerte (rote Felder) über alle Ausgaben in der Matrixdarstellung lässt sich die erhöhte Belastung des Kopfbereichs der Schneide ablesen. Acht Maximalwerte sind im Bereich des Kopfes, fünf Maximalspannungen auf der einlaufenden Flanke bereits am Übergang zum Kopf. Eine weitere Markierung findet sich auf der auslaufenden Flanke. Der Verlauf der Maximalwerte der Schneidkantenpunkte über die gesamte Eingriffsdauer im unteren Teil von Abbildung 6.24 gibt dies ebenfalls wieder. Die höchsten Werte von bis zu 2600 MPa liegen vermehrt im Bereich des Kopfes (SKP17, SKP19) oder im Bereich des Übergangs zwischen Kopf und einlaufender Flanke (SKP23) vor. Ein weiteres Maximum findet sich im Beispiel von Abbildung

6.24 im mittleren Bereich der auslaufenden Flanke. Insgesamt liegt das Niveau der Maximalwerte im mittleren Bereich moderat höher. Bei Betrachtung der gemittelten Werte ist die erhöhte Belastung des Schneidenkopfes gegenüber den Flanken nicht eindeutig zu erkennen. Sowohl bei Berücksichtigung nur der Beträge über 0, also im Kontakt, als auch insbesondere bei Auswertung des Verlaufs der Mittelwerte über die gesamte Eingriffsdauer von 3 ms kann die erwartete Belastungsverteilung nicht vollständig dargestellt werden. In der Matrixdarstellung zeigt sich des Weiteren anhand der vereinzelt weiß hinterlegten Felder insbesondere im mittleren Bereich, dass die ausgewählten Elemente zeitweise für ein oder mehrere Ausgaben keinen Kontakt mit dem Werkstückmaterial ausgeben. Das liegt darin begründet, dass nicht allein die unmittelbare Schneidkante an der Zerspanung beteiligt ist, sondern sonstige Bereiche der Spanfläche den Span bilden. Dieses Verhalten tritt insbesondere im Bereich des Spankopfes auf und führt somit auch dazu, dass bei der Gesamtmittelwertbildung häufiger Nulldurchgänge vorliegen. Die Mittelwerte über die Gesamtzeit in der unteren Darstellung von Abbildung 6.24 zeigen sich somit über alle Schneidkantenpunkte nahezu gleichverteilt.

Anhand Abbildung 6.25 lässt sich der Verlauf der Kontaktdrücke (CPRESS) bei Kontakt von Werkzeug und Werkstückmaterial über die Eingriffsdauer nachvollziehen. Die Darstellung zeigt den Verlauf in 3 Schritten. Schritt 1 zeigt die Bildung der einlaufenden Flanke. Hier wird entsprechend des Verlaufes in Abbildung 6.24 deutlich, dass zunächst hauptsächlich die einlaufende Flanke der Werkzeugschneide den Span bildet und die Belastung somit auf diesen Schneidenbereich beschränkt bleibt. In Schritt 2 zeigt sich eine erhöhte Belastung im Bereich des Übergangs der Flanken zum Kopf hin. Bei der Bildung der auslaufenden Flanke sind gemäß Abbildung 6.24 und der Beschreibung der Spanbildungsmechanismen in Kapitel 6.5.2.2 neben der auslaufenden Flanke noch Bereiche des Kopfes der Schneide im Eingriff. Des Weiteren wird aus Abbildung 6.25 deutlich, dass mit der Beschränkung der Auswertung auf die SKP nicht die Schneidenbelastung vollständig berücksichtigt wird.

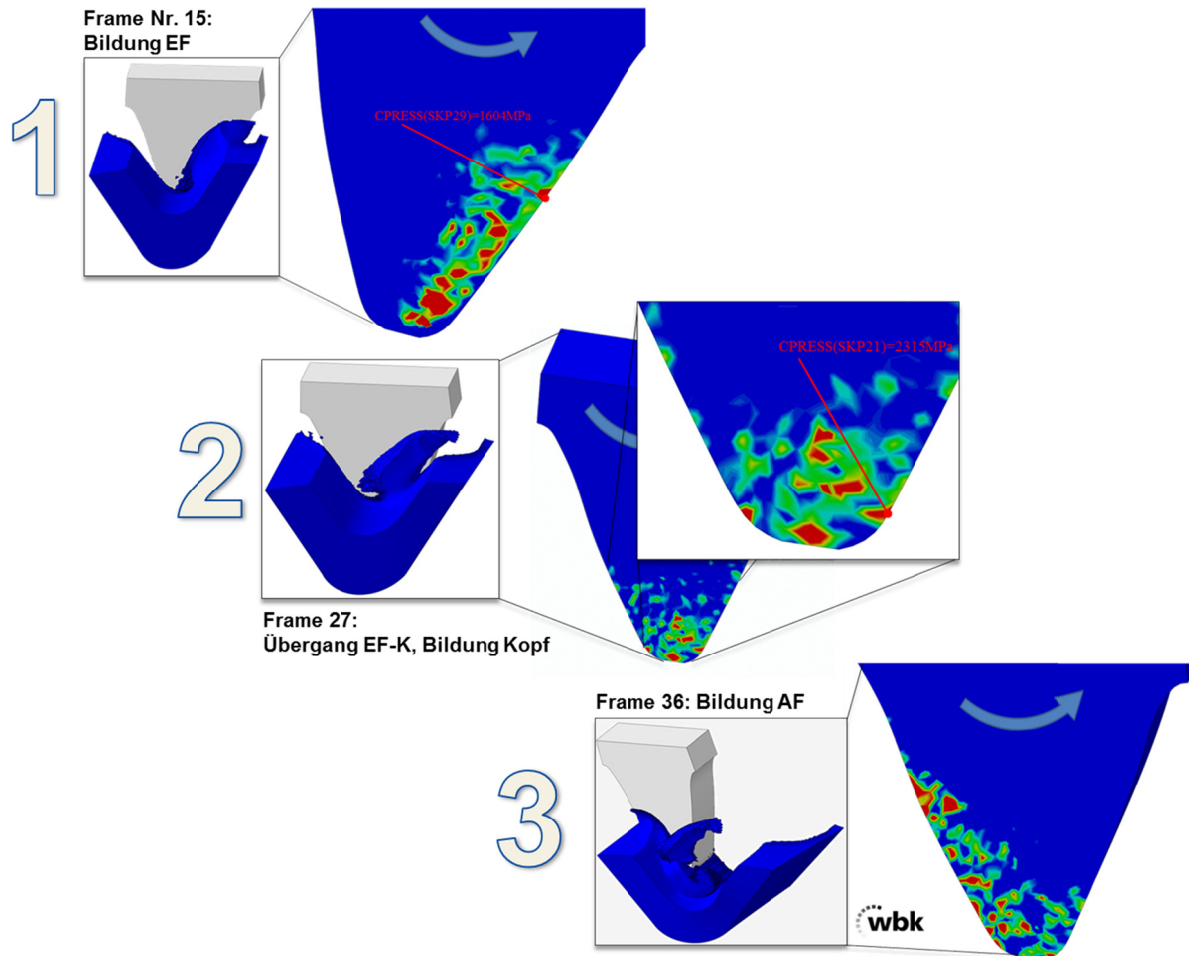
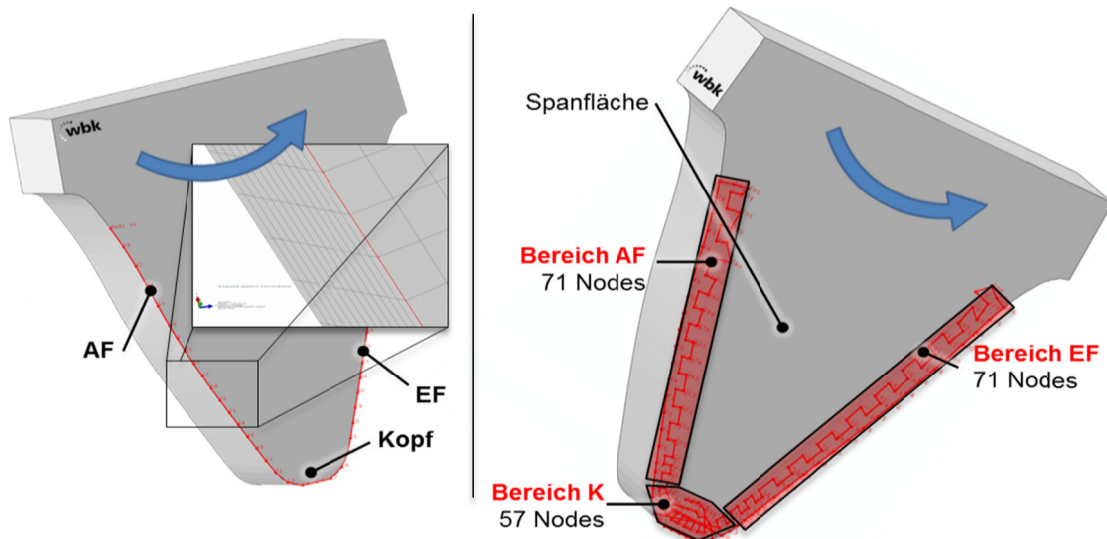


Abbildung 6.25: Auswertung CPRESS: Darstellung Bildung EF, K, AF

### 6.5.2.4.2 Parametervariation

Die oben beschriebene Auswertemethode mit der Eingrenzung auf Elemente der Schneidkante ermöglicht somit die anschauliche Darstellung der Verteilung und des Verlaufes über die Gesamteingriffsdauer und eine Beurteilung der Schneidkantenbelastung anhand der erhöhten Maximalwerte im Bereich des Kopfes. Für einen Vergleich der Belastung beispielsweise bei veränderten Randbedingungen ist diese Methode jedoch nicht uneingeschränkt geeignet. Die beschriebene Auswertung hat gezeigt, dass einzelne Elemente nur unvollständig die tatsächliche Belastung der gesamten Werkzeugschneide repräsentieren können. Hierfür wird eine großflächige Auswahl erforderlich, die sich aufgrund der sehr großen Elementzahl für die Verlaufsdarstellung als wenig praktikabel darstellte.

Aus Abbildung 6.26 geht neben der Zuordnung der Schneidkantenpunkte (li.) die Einteilung der Spanfläche in 3 Bereiche (re.) zur Auswertung der mittleren Belastung durch Kontakt über eine Parametervariation hervor. Die Bereiche AF (auslaufende Flanke) und EF (einlaufende Flanke) beinhalten jeweils 71 Auswerteknoten, der Bereich K (Kopf) zieht 57 Knoten in die Betrachtung mit ein. Die Bereiche wurden ausreichend groß gewählt, um den gesamten jeweiligen Abschnitt der Schneide in die Betrachtung mit einzubeziehen. Bei der Variation der Prozessparameter wurden zur Vergleichbarkeit durchgängig die den 3 Bereichen zugeordneten Knotensets beibehalten. Zur Auswertung wurden die Kontaktdrücke über die gesamte Eingriffsdauer ausgegeben und die Beträge ( $CPRESS > 0$ ) der einzelnen Bereiche gemittelt.



**Abbildung 6.26:** Auswertung CPRESS entlang der Schneidkante (li.) und in festgelegten Bereichen der Spanfläche (re.)

Die Verläufe der Kontaktdrücke (CPRESS) über die Variation der Prozessparameter Axialvorschub und Schnittgeschwindigkeit zeigen Abbildung 6.27 und Abbildung 6.28. Dabei werden jeweils die gemittelten Werte (oberes Diagramm) sowie die Maximalbeträge (unteres Diagramm) des Kontaktdrucks für die Bereich EF, K und AF dargestellt. Bei Erhöhung der Drehzahl und damit der resultierenden Schnittgeschwindigkeit zeigen sich bei den mittleren Kontaktdrücken in allen 3 Bereichen erkennbare Anstiege. In Abbildung 6.27 oben

ergibt sich beim dargestellten Vorschub von  $s_{ax} = 0,075$  mm/WSU am Kopf ein Anstieg um ca. 12 % bei Verdreifachung der Drehzahl von 400 WZU/min auf 1200 WZU/min. Für die Flanken werden bei gleicher Variation ca. 23 % (AF) bzw. ca. 31 % registriert.

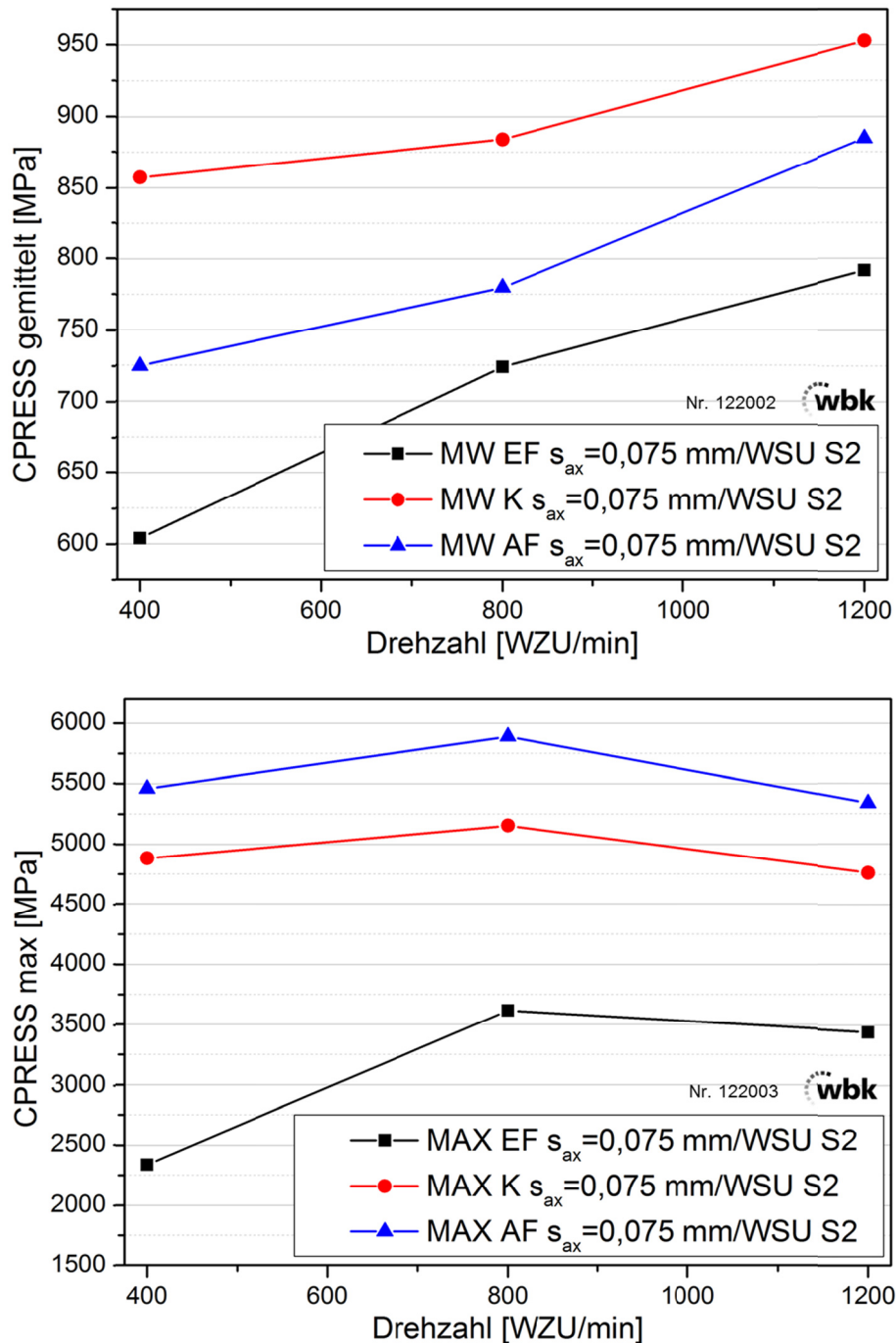


Abbildung 6.27: Verlauf CPRESS über Variation der Drehzahl: Mittelwerte (oben), Maximalwerte (unten)

Über die Variation des Axialvorschubes konnte in den Simulationen bei einer Drehzahl von 800 WZU/min (Abbildung 6.28 oben) keine Beeinflussung der resultierenden mittleren Kontaktdrücke festgestellt werden. In allen drei Bereichen wurde über die durchgeführte Parametervariation maximal eine Differenz von  $\Delta\text{CPRESS} = 17 \text{ MPa}$  oder 2 % registriert.

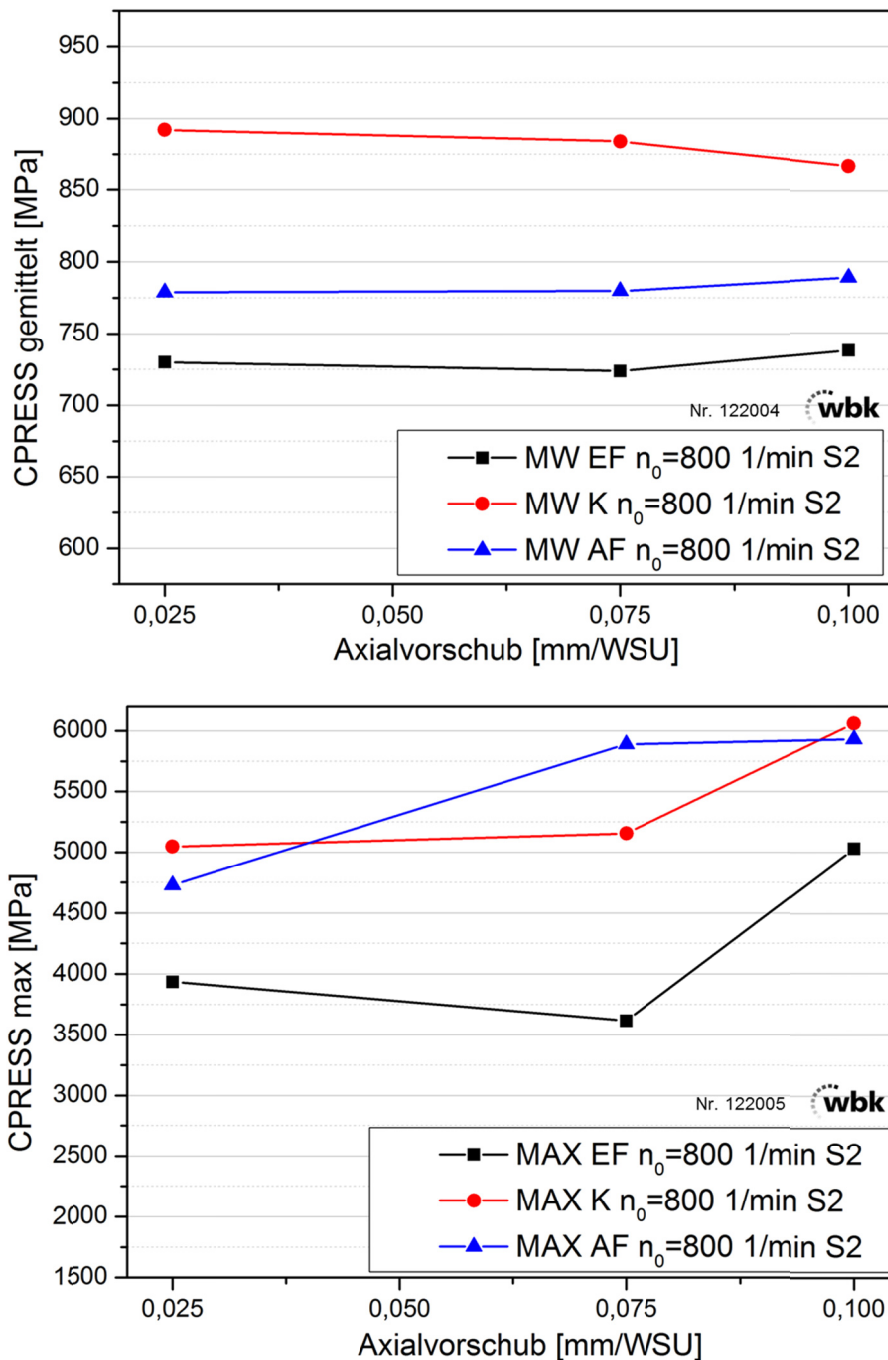


Abbildung 6.28: Verlauf CPRESS über Variation des Axialvorschubs: Mittelwerte (oben), Maximalwerte (unten)

Die Analyse der in den jeweiligen Bereichen ausgegebenen Maximalbeträge lässt bei Variation der Drehzahl (Abbildung 6.27 unten) keine eindeutigen Verläufe erkennen. Bei der Variation des Axialvorschubes (Abbildung 6.28 unten) bei  $n_0 = 800$  1/min resultiert die Erhöhung von  $s_{ax} = 0,025$  mm/WSU auf  $s_{ax} = 0,1$  mm/WSU ein Anstieg um 20 % (Kopf) bis zu 27 % (EF). Die Auswertung der Einzelbeträge hat jedoch gezeigt, dass prinzipiell bei den in der Simulation ausgegebenen Spitzenbelastungen eine große Streuung auftritt. Die Verteilung über die Schneidkantenpunkte und über die Eingriffszeit zeigt kein erkennbares Muster. Ein Maximalwert wird dabei nicht durch eine eindeutig ansteigende Tendenz von Ausgabezeitpunkt zu Ausgabezeitpunkt erkennbar, sondern tritt sporadisch auf und deutet auch auf numerische Fehler hin.

Die Verläufe der gemittelten Werte für CPRESS über die Variation der Drehzahl und des Axialvorschubes (Abbildung 6.27 und Abbildung 6.28) stellt dabei die tatsächliche Belastung der Schneidkante anschaulich dar. So ist der Einfluss der Erhöhung des Axialvorschubes mit dem einhergehenden Anstieg des zu zerspanenden Volumens gegenüber der Drehzahlerhöhung als geringer einzustufen. Die erhöhte Schnittgeschwindigkeit führt zu ansteigenden Kontaktdrücken.

Generell hat sich bei der Auswertung der Maximalbeträge gezeigt, dass die kleinsten Maxima im Bereich der EF auftreten. Die Maxima der Bereiche AF und K liegen auf einem vergleichbaren Niveau, bei  $s_{ax} = 0,075$  mm/WSU werden im Bereich AF größere Spitzenbelastungen registriert. Die Auswertung der gemittelten Werte ergab ebenso für den Bereich EF die kleinsten Werte, hierbei wurden jedoch durchweg im Kopfbereich die höchsten Belastungen festgestellt.

## 6.6 Diskussion und Fazit

Das vorangegangene Kapitel beschreibt die Modellierung des Verfahrens sowie die mit den Simulationsmodellen durchgeführten Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit zur Erreichung eines umfassenden Prozessverständnis-

ses zum Wälzschälverfahren durchgeführt wurden. Die Anwendung der Simulationsstudien in diesem Kapitel bezieht sich insbesondere auf die Untersuchung der Schneidenbewegung, der Spanbildungsmechanismen und der Kinematik sowie der Schneidenbelastung. Die Anwendung der Simulationsstudien zur Validierung der Bauteil- und Spantemperatur und der Zerspänkräfte wird in Kapitel 7 näher beschrieben.

Auf Basis der theoretischen Verfahrensgrundlagen und der in Kapitel 5 dargestellten experimentellen Befunde wurden geeignete Modellierungsansätze zur Abbildung des Verfahrens und dabei insbesondere der komplexen Verfahrenskinematik untersucht. Bei der Modellierung des Erzeugungstriebes, der Prozesskinematik und der Bewegungsabläufe des Wälzschälverfahrens musste eine geeignete Abbildung über den vollständigen Schneideneingriff realisiert werden. Nur die dreidimensionale realitätsnahe Betrachtung des Prozesses ist geeignet, die verfahrensspezifische Kinematik und die charakteristischen Spanbildungsmechanismen abzubilden und deren Untersuchung zu erlauben. Eine abstrahierte Analogiebewegung oder eine reduzierte zweidimensionale Betrachtung stellte sich als nicht ausreichend dar.

Die Modellierung erfolgte dabei in mehreren Schritten. Zunächst mit der Erstellung der Geometriemodelle von Werkzeug und Werkstück nach Festlegung eines geeigneten Abstrahierungsgrades. Für die Abbildung des Erzeugungstriebes wurde ein Skelettmodell in ABAQUS entwickelt, in dem sämtliche verfahrensspezifischen kinematische Grundeinstellungen und Freiheitsgrade der Bewegungskinematik vorgesehen wurden. Die Abbildung der Geometrie und des Erzeugungstriebes wurde mit der Idealisierung und Diskretisierung der Geometrie sowie der Randbedingungen vervollständigt. In der praktischen Umsetzung der Simulationsstudien mussten insbesondere im Rahmen der Diskretisierung Maßnahmen zur Anpassung und Optimierung der Vernetzung der Geometriemodelle durchgeführt werden, um auf die sehr hohen Anforderungen an die Rechenleistung und Rechendauer bei der Durchführung von 3D-FEM-Simulationsstudien zu reagieren.



Die Komplexität der Verfahrenskinematik und der Spanbildungsvorgänge beim Wälzschälen mit der eingesetzten dreidimensionalen Modellierung macht den Einsatz der Massenskalierung im Rahmen dieser Arbeit unbedingt erforderlich. Nur mit der damit erreichbaren Rechenzeitverkürzung ist es möglich, Simulationsstudien eines vollständigen Eingriffs unter Beibehaltung der kinematischen Verhältnisse des Realprozesses durchzuführen und dabei die Rechenzeit auf ein vertretbares Maß zu senken. Für die Sicherstellung der Ergebnistreue wurde ein vereinfachtes 2D-Modell des orthogonalen Schnitts aufgebaut und die Kriterien Kraftverlauf, Temperaturverlauf und Spangestalt geprüft. Als Ergebnis der Simulationsstudien des Orthogonalschnitts wurden als geeignete Skalierungsfaktoren 7.500 bis 10.000 identifiziert. Dabei kann eine signifikante und für die Durchführung der Simulationsstudien erforderliche Reduzierung der Rechenzeit bei ausreichender Ergebnisgüte erreicht werden. Die Verfälschung des Modellverhaltens und der Spanform bleiben dabei in einem tolerierbaren Bereich.

Die Abbildung der Bewegungskinematik stellt einen zentralen Punkt des vorangegangenen Kapitels und der vorgestellten Arbeit dar. Wie bereits oben ausgeführt war dabei eine wichtige Voraussetzung die Realisierung einer Ersatzbewegung, die die für das Wälzschälverfahren charakteristische Schneidenbewegung realitätsnah abbildet. Hierzu wurde die Schneiden- und Werkstückbewegungen analysiert und in eine Ersatzbewegung überführt, bei der sämtliche Bewegungskomponenten des Realprozesses der Schneide zugeordnet und in ABAQUS anhand von periodischen Rotations- und Verschiebungsdefinitionen realisiert wurden.

Für die Durchführung der Kinematiksimulationsstudien wurde ein modifiziertes Werkstoffmodell für das Verhalten des Werkstückmaterials verwendet. Der bei einem Kontakt zwischen Werkstück und Werkzeug auftretende Spannungsanstieg im Werkstück wird dabei zur Initiierung der Elementlöschung verwendet. Durch das Entfernen von Elementen bei Überschneidungen von Werkzeug und Werkstück ist es möglich, die Verzahnungsgeometrie, die durch die Ki-

nematik des Prozesses festgelegt ist, realitätsnah auf das Werkstück zu übertragen und die vorgesehenen Untersuchungen durchzuführen. Über den Verlauf des Schneideneingriffs können relevante Winkel und Abstände bestimmt werden, um Ablaufbehinderungen der Späne darzustellen und beurteilbar zu machen. Hierzu wurde die Vorgehensweise zur Bestimmung beliebiger Winkelbeträge sowie zur Bestimmung des effektiven Spanwinkels vorgestellt. Für die Durchführung der Simulationsstudien zur Untersuchung der Mechanismen bei der Bildung des verfahrensspezifischen Dreiflankenspanns wurde das gemäß der obigen Beschreibung aufgebaute Modell mit feiner Vernetzung und unter Verwendung des Materialmodells mit realem Materialverhalten verwendet.

Die Modellierung der Ersatzbewegung im Simulationsmodell erlaubt eine systematische Untersuchung des Verlaufes der Schneidenbewegungsbahn bezogen auf das Werkstück- sowie auf das Werkzeugkoordinatensystem und damit die Relativbewegungsabläufe im Moment des Eingriffs einzelner Schneidzahnsegmente (EF, AF, Kopf). Es konnten dabei zu den ausgegebenen Zeitpunkten Informationen über Position, Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit als Größen zur geometrischen Beschreibung herangezogen werden. An den in den Spanbildungssimulationen gebildeten Spänen konnten die charakteristischen Merkmale der Realspäne festgestellt werden. Insbesondere prägnante Bereiche am Span wie die Übergänge zwischen Spanflanken und Kopf zeigten eine realitätsnahe Ausbildung und bei Variation der Versuchsparameter ein dem Realprozess entsprechendes Verhalten. Anhand der durchgeführten simulativen Analyse der Spanbildungsmechanismen konnten im Detail die einzelnen Abschnitte der Entstehung des Dreiflankenspannes dargestellt werden. Die vektorielle schrittweise Darstellung der Verschiebungsgeschwindigkeiten im Span während der Zerspanung ist dabei ein elementares Hilfsmittel zum grundlegenden Verständnis des Wälzschälprozesses.

Als weiteres Ergebnis zur Prozessbeurteilung und zur technologischen Optimierung des Verfahrens dient die Abbildung des Spanflugverhaltens mit der isolierten Betrachtung des Bewegungsimpulses des abgetrennten Spanes aus

der Spanbildung. Die Korrelation mit den experimentellen Befunden unter Wirkung der Trägheitskräfte und die Betrachtung der Werkzeug- und Werkstückposition zur Ableitung von Empfehlungen für die Gestaltung von Einrichtungen zur Spänewegbeförderung erfolgt im Rahmen der Validierung.

Die Belastung (CPRESS) der Werkzeugschneide durch Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück bzw. Spanmaterial aus den Spanbildungssimulationsläufen kann als weiteres Bewertungskriterium bei der Parametervariation verwendet werden. Des Weiteren wird damit die Auswahl und Optimierung von Werkzeugsubstrat und -beschichtung unterstützt. Die Beschreibung aus der kinematischen Untersuchung der Schneidenbewegung und der Spanbildungsmechanismen konnte anhand der Darstellung des Verlaufs der Druckbelastung entlang der Schneidkante über die Eingriffsdauer bestätigt und erweitert werden. Bei der Parametervariation konnte die Einflussbeurteilung der Schnittgeschwindigkeit und des Axialvorschubes auf den Belastung der Spanfläche vorgenommen werden.

## **7 Vergleichende Bewertung von Experiment und Simulation**

Im folgenden Kapitel wird die Validierung der Simulationsergebnisse vorgenommen. Hierzu soll das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte FE-Modell zur Simulation des Wälzschälverfahrens hinsichtlich der Verfahrenskinetik in Form der charakteristischen Schneidenbewegung, der Spanform, der Temperaturen im Bauteil sowie der Temperaturen an der Spanunterseite und schließlich der Zerspankräfte bewertet werden.

### **7.1 Schneidenbewegung und Spanbildung**

Die verfügbaren Technologien zur experimentellen Untersuchung der Spanbildung im Realprozess durch entsprechende Visualisierung beispielsweise mit Hochgeschwindigkeitsvideotechnik sind aufgrund der schlechten Zugänglichkeit und der hohen Schnittfrequenz zur Untersuchung des Wälzschälverfahrens nicht uneingeschränkt geeignet. Zudem erlaubt die Wälzschälkinematik bei Beibehaltung der verfahrenscharakteristischen Bewegungen und Anordnung von Werkzeug und Werkstück nur sehr schwierig Einblick in den Spanbildungsprozess. Eine Validierung der Mechanismen der Spanbildung ist daher nicht möglich, hier ist insbesondere auch der Mehrwert des Simulationsansatzes für einen Erkenntnisgewinn zur Erreichung des grundlegenden Prozessverständnisses zu sehen. Anhand des Vergleichs der Späne aus Simulation und Experiment kann jedoch sichergestellt werden, ob die Simulation eine ausreichende Ergebnisgüte liefert und für die Prozessuntersuchung geeignet ist. Bei Variation der Prozessparameter zeigte sich eine realitätsgetreue Ausbildung der charakteristischen Merkmale am Span (Übergang Flanke-Kopf und Abbrechen der Flanken bei bestimmten Parametervariationen) (vgl. Kapitel 7.2).

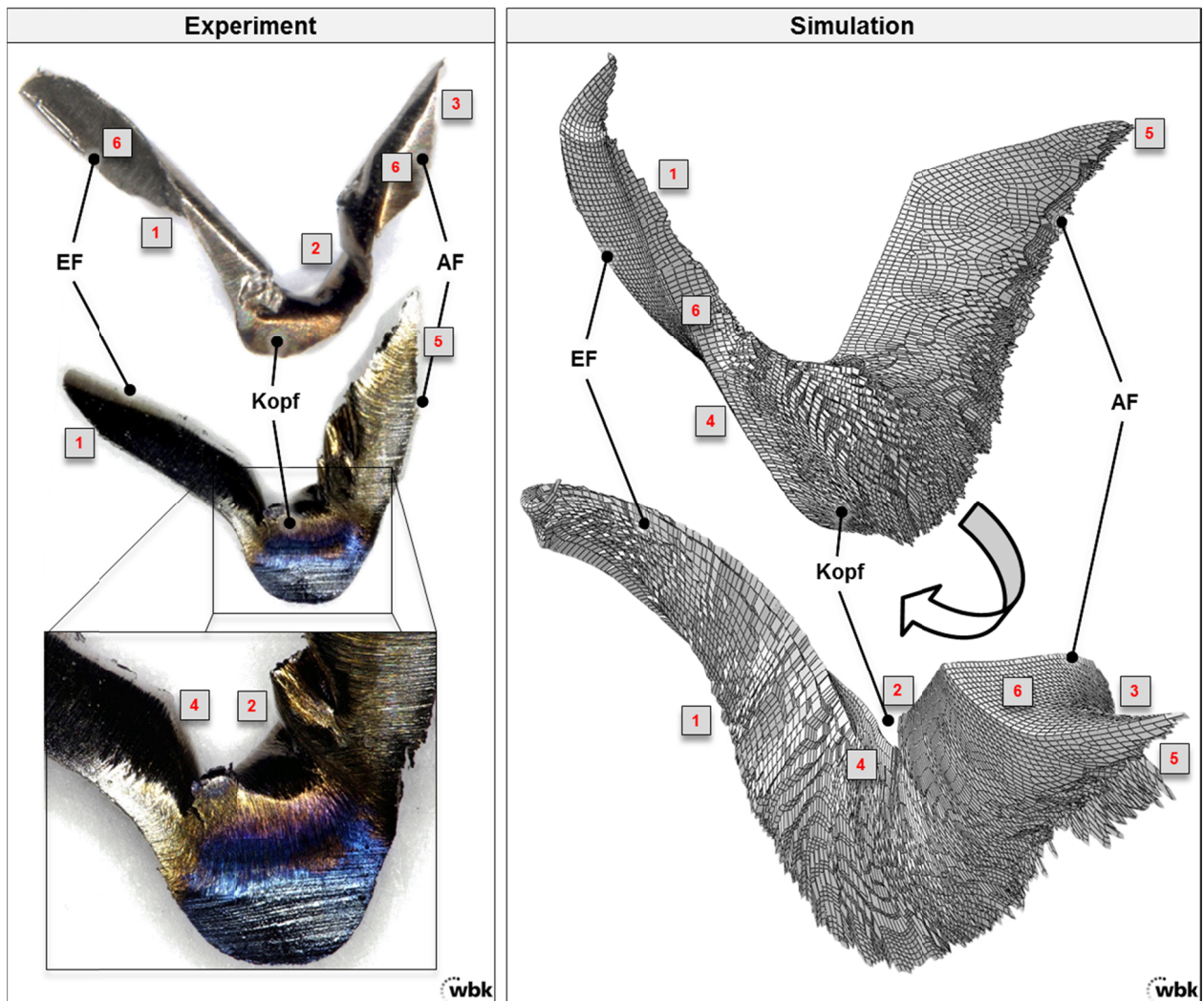
## 7.2 Spanform

In Kapitel 6.5.2.1 und Kapitel 6.5.2.2 erfolgte eine ausführliche Beschreibung und Untersuchung der in den Simulationsläufen sich ergebenden Spanform. Ein Vergleich der Späne aus der Simulation mit den Realspänen kann daher im Rahmen der Validierung verkürzt dargestellt werden und erfolgt exemplarisch anhand von Abbildung 7.1 und Abbildung 7.2. Die Ausprägung der kritischen Abschnitte des Spanes verändert sich unter Variation der Prozessparameter. In Abbildung 7.3 erfolgt hierzu der Abgleich der Simulationsergebnisse mit Realversuchen.

Abbildung 7.1 zeigt in der linken Spalte zwei Realspäne, die mit unterschiedlichem Axialvorschub und unterschiedlicher Schnittgeschwindigkeit (oben links:  $s_{ax} = 0,1$  mm/WSU,  $n_0 = 1000$  1/min; unten links:  $s_{ax} = 0,15$  mm/WSU,  $n_0 = 600$  1/min) entstanden sind. Als Schnittstrategie wurde T60/40 gewählt. In der rechten Spalte ist zum Vergleich ein Span aus der Simulation dargestellt. Zur besseren Veranschaulichung ist die untere Darstellung des simulierten Spans leicht gedreht. Bei allen Darstellungen wird die Spanunterseite gezeigt, somit ist die linke Flanke jeweils die einlaufende Flanke (EF), die jeweilige rechte Flanke ist die auslaufende Flanke (AF). In Abbildung 7.1 zusätzlich markiert sind verschiedene Merkmale, die als charakteristische Merkmale eines Wälzschälspanes zu Validierungszwecken in Vergleich gebracht werden sollen. Beim Vergleich der Grundgestalt der Späne zeigt sich in Experiment und Simulation ein dreiteiliger Span, bestehend aus einlaufender Flanke (EF), Kopf und auslaufender Flanke (AF).

Die einlaufende Flanke ist verdrillt (Merkmal 1), der Grad der Verdrillung ist abhängig von der Schnittgeschwindigkeit (vgl. Kapitel 5.4.8 mit Abbildung 5.25). Die Merkmale 2 und 4 heben den Übergang zwischen Flanken und Kopf hervor. Es zeigt sich in Experiment und Simulation ein Übergangsbereich mit einer Veränderung der Spanungsdicke und je nach Parameter unterschiedlich ausgeprägter Verdrehung. Merkmal 3 vergleicht das spitz zulaufende Ende der auslaufenden Flanke mit einer Verdrillung, die am simulierten Span in der un-

teren Darstellung erkennbar wird (Merkmal 5). Des Weiteren zeigt sich eine gute Übereinstimmung in den unterschiedlichen Spandicken von einlaufender bzw. auslaufender Flanke, die aufgrund der unterschiedlichen Spannungsdicken auftritt (vgl. Beschreibung Kapitel 5.4).



**Abbildung 7.1: Verifikation der Spanform: Vergleich zwischen Experiment und Simulation**

In Abbildung 7.2 wird beispielhaft die Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation hinsichtlich des kritischen Übergangs zwischen Kopf und auslaufender Flanke dargestellt. Bei den gewählten Versuchsparametern  $s_{ax} = 0,025$  mm/WSU und  $n_0 = 600$  1/min zeigte sich im Experiment eine erhöhte Häufigkeit an Spänen mit fehlenden Flanken (vgl. Kapitel 5.4.5). Abbildung 7.2 stellt hier einen Abschnitt bestehend aus EF und Kopf dar, ein ent-

sprechender Abschnitt bestehend aus AF wurde dem Span hier zugeordnet. In der Simulation konnte der Vorgang des Abtrennens der auslaufenden Flanke in der Spanbildung nachgewiesen werden. Es kam in der Simulation zu einer starken Verjüngung im Übergang zwischen Flanke und Kopf, während der Spanbildung wurde daraufhin der bereits abgetrennte Spanabschnitt (EF und Kopf) aufgrund der Trägheitskräfte vom sich zu diesem Zeitpunkt noch in der Entstehung befindlichen AF abgetrennt. In Abbildung 7.2 zusätzlich hervorgehoben sind die sonstigen Vergleichsmerkmale am Span, die bereits weiter oben aufgeführt wurden.

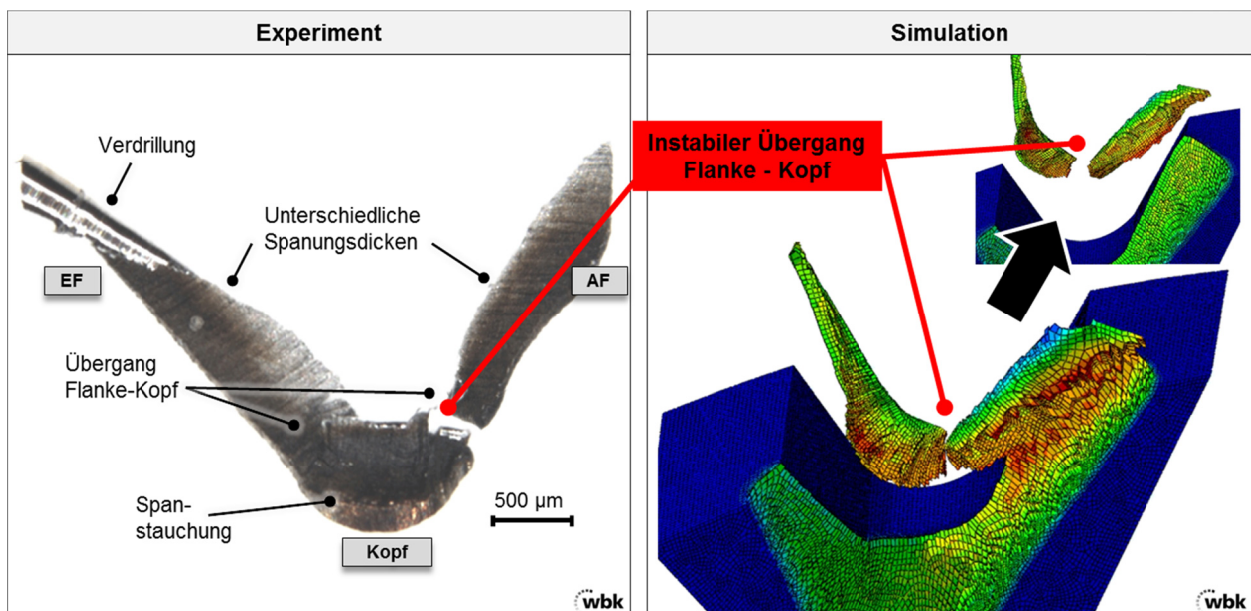


Abbildung 7.2: Abgebrochene Flanke: Vergleich Experiment und Simulation

Im Experiment zeigte sich mit abnehmendem Axialvorschub eine vermehrte Häufigkeit an fehlenden Flanken. Hierzu sind zum Vergleich in Abbildung 7.3 zwei Parameterkombinationen dargestellt, die eine gute Übereinstimmung der Spanmerkmale aufweisen. Besonders hervorzuheben ist hier der kritische Bereich im Übergang zwischen Kopf und auslaufender Flanke (AF). Bei der oberen Darstellung wurde in der Simulation das Abbrechen der Flanke nachgewiesen, im Experiment zeigte sich bei dieser Parameterkombination an der überwiegenden Zahl der untersuchten Späne eine fehlende Flanke (vgl. Abbildung 5.22). In der unteren Darstellung von Abbildung 7.3 wurde ein höherer

Axialvorschub gewählt und damit ein stabiler Übergang in Simulation und Realspan erreicht. Abweichend zum Experiment zeigte sich in der Simulation bei größeren Schnittgeschwindigkeiten tendenziell eher ein Abbrechen der auslaufenden Flanke auch bei hohen Axialvorschüben. Im Experiment konnte bei größeren Axialvorschüben mit der Zunahme der Schnittgeschwindigkeit kein vermehrtes Auftreten von fehlenden Flanken beobachtet werden.

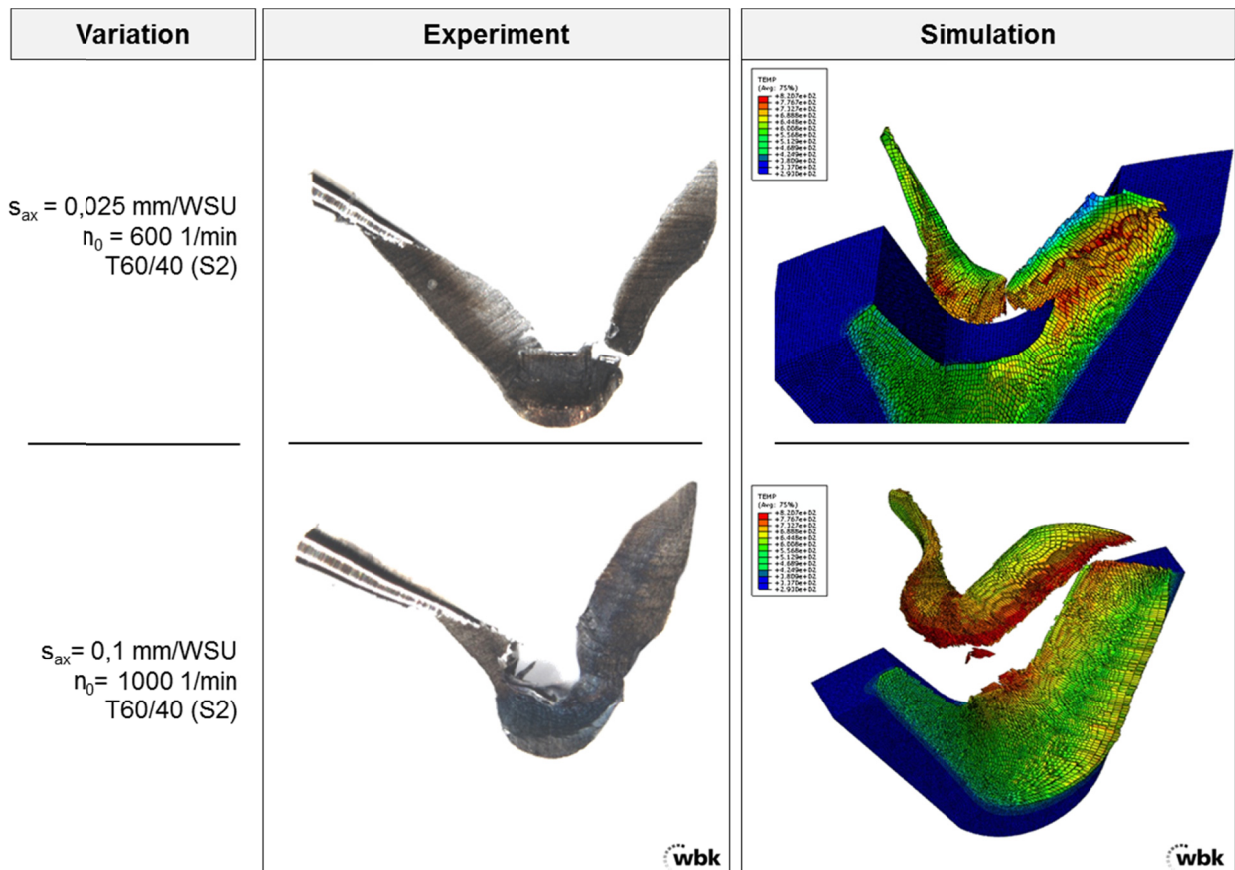


Abbildung 7.3: Vergleich der Späne in Experiment und Simulation: Fehlende Flanken

### 7.3 Bewegungsverhalten der abgelösten Späne

In den Spanbildungssimulationen wird das Spanflugverhalten nicht von der Rotationsbewegung des Werkstücks oder Trägheitseinflüssen verändert. In der Simulation werden die rein aus der Spanbildung resultierenden Bewegungsimpulse und das daraus resultierende Spanflugverhalten ersichtlich. In Abbildung 6.23 werden diese Erkenntnisse zusammenfassend dargestellt. Im Rahmen der Validierung erfolgt der Abgleich mit dem Realprozess.



Bei den experimentellen Untersuchungen zur Verfahrenskinetik, der Spanbildung und der Schneidenbewegung zur Unterstützung des Modellaufbaus wurden Highspeed-Videoanalysen des Realprozesses durchgeführt. Für die Aufnahmen stand eine Highspeedkamera des Herstellers Mikrotron vom Typ MotionBLITZ Cube2 6CP zur Verfügung. Zur Beleuchtung wurde das Kaltlicht-Beleuchtungssystem Dedolight Dedocool 2 verwendet. Es wurden Aufnahmen unter Verwendung von Vollwerkzeugen und Analogiewerkzeugen ohne den Einsatz von Spüleinrichtungen angefertigt und eine Variation der Drehzahl ( $n_0 = 200-800$  1/min) und des Axialvorschubes ( $s_{ax} = 0,01-0,15$  mm/WSU) bei der Verwendung einer Zweischnittstrategie (T60/40) durchgeführt. Im Rahmen der durchgeführten Analysen wurde in Übersichtsaufnahmen auch das Späneflugverhalten der abgelösten Späne betrachtet. Durch diese Untersuchungen wird es ermöglicht, das Flugverhalten der Späne im Realprozess mit rotierendem Werkzeug und Werkstück unter der Variation der Prozessparameter beurteilen zu können.

Abbildung 7.4 zeigt die Ergebnisse der Realversuche. Wie in der Darstellung der Simulationsergebnisse werden gemäß gezeigtem Koordinatensystems die Bewegungsrichtungen anhand von Vektoren dargestellt. Erwartungsgemäß kann von den Realversuchen nur eine grobe Hauptbewegungsrichtung dargestellt werden. Wie bei den oben beschriebenen Ergebnissen aus der Simulation bewegen sich die Späne entsprechend der Axialvorschubbewegung in Richtung positiver z-Achse. Durch die Trägheitseinflüsse beim Wegschleudern der Späne vom Werkstück zeigt die Hauptbewegung jedoch entsprechend der Drehrichtung in Richtung negativer y-Achse (Abbildung 7.4 unten). Der abgetrennte Span bewegt sich tangential vom Werkstück weg. Dies stellt eine deutliche Abweichung zu den beschriebenen Simulationsergebnissen dar. Bei Variation der Drehzahl ändert sich die z-Komponente der Flugrichtung deutlich in Richtung positiver x-Achse, der Anteil in negativer y-Richtung verändert sich nicht. Die Erhöhung des Axialvorschubes wirkt sich wie die Drehzahlerhöhung aus (Abbildung 7.4 Mitte).

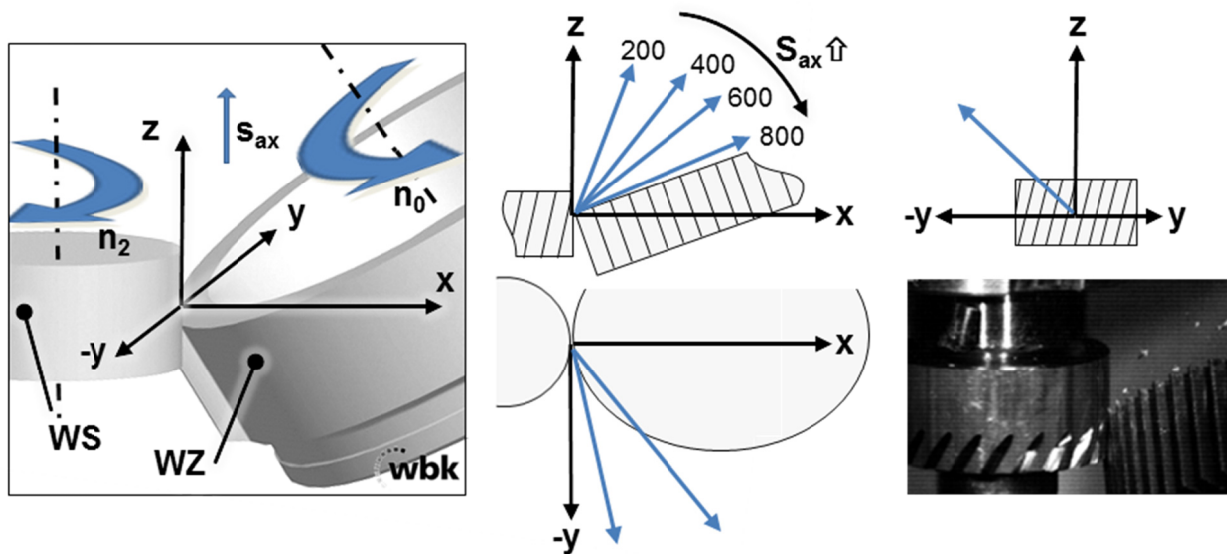


Abbildung 7.4: Realversuche: Untersuchung des Späneflugverhaltens mit Hilfe von Highspeedaufnahmen

Im Realprozess wurde somit eine zum Simulationsergebnis abweichende Bewegung der abgetrennten Späne beobachtet (vgl. Abbildung 6.23 und Abbildung 7.4). Sie zeigt aufgrund der Massenträgheitseinflüsse in entgegengesetzter Richtung zu der aus der Spanbildung resultierenden Flugbahn, nur der Anteil der z-Komponente ist zunächst und nur bei niedrigen Drehzahlen gleichgerichtet. Zudem folgen die Späne weniger deutlich gerichtet einer einzelnen Orientierung. Während der Spanbildung wirkt sich somit die Massenträgheit erwartungsgemäß derart aus, dass die Flugrichtung des Spanes umgelenkt wird. Da dies aus der Verfahrenskinetik resultiert, können jedoch keine Veränderungen vorgenommen werden. Es ist davon auszugehen, dass während des Spanbildungsvorganges die Einflüsse der Rotationsbewegung eine sehr untergeordnete Rolle spielen und damit die Ersatzbewegung der Simulationsmodelle zulässig ist. Die während der Spanbildung entstehenden Spänsegmente sind sehr klein und leicht, so dass hier die Bewegung des Spans rein aus der Schneidenbewegung resultiert, der Bewegungsimpuls, der bei der Auswertung des Highspeed-Aufnahmen beobachtet wurde, wirkt erst nach vollständigem Ablösen des Spanes.

Durch die Korrelation der Ergebnisse der experimentellen Beobachtungen und der Simulationsstudien können gezielt Strategien zur Spülung abgeleitet werden, die nicht rein auf der im Realprozess resultierenden Bewegung der abgetrennten Späne basiert. Die Einrichtungen zur Spänewegbeförderung dürfen dabei nicht die Spannbildung durch Wirkung entgegen des Axialvorschubes zusätzlich behindern. Eine geeignete Anordnung würde vorsehen, den Spanflug nach erfolgter Abtrennung vom Werkstückmaterial in negativer  $y$ - und dabei deutlich positiver  $z$ -Richtung zu unterstützen.

## 7.4 Temperatur im Werkstück

Zur Validierung der beim Wälzschälen während des Prozesses auftretenden Temperaturen im Bauteilinnern mussten sowohl bei den Realversuchen als auch bei den Simulationsstudien Sonderlösungen gefunden werden, um eine vollständige Vergleichbarkeit sicherstellen zu können. Die Temperaturmessungen im Prozess wurden mit schnell ansprechenden NiCr-Ni-Thermoelementen durchgeführt, die an 3 Messpositionen (T1, T2 und T3) innerhalb des Bauteils positioniert wurden. Die Temperaturmessungen können so Aufschluss über die eingebrachte Wärmemenge geben, die über eine reine Messung im oberflächennahen Bereich nicht möglich wären (vgl. Kapitel 4.5.2 und 5.2).

Bei der Erstellung der Simulationsmodelle zur Verifikation der Bauteiltemperaturen wurde hierfür ein ausreichend groß gewählter Bauteilausschnitt erforderlich, bei dem die Positionen der Messstellen entsprechend der Radien am Realbauteil abgebildet werden können. Die Messposition T1 (vgl. Kapitel 4.5.2) ist unmittelbar im Werkstückzahnkopf zwischen zwei Lücken. Bei der Verwendung eines Einzahn-Analogiewerkzeuges wäre somit die Wirkung der simultanen Bearbeitung zweier nebeneinanderliegender Lücken nicht berücksichtigt. Für die Versuche wurde somit auf das Dreizahn-Analogiewerkzeug zurückgegriffen, das zur Sicherstellung der vollständigen Vergleichbarkeit der Ergebnisse auch für die Simulation modelliert wurde. Die in Kapitel 6.2 vorgestellten entsprechenden Simulationsmodelle (Abbildung 6.3 li.) bilden das Dreizahn-

Analogiewerkzeug und einen Werkstückausschnitt mit ausreichender Länge für die Betrachtung der erforderlichen Anzahl an Schneideneingriffen ab. Die vorgesehene Länge des Bauteilausschnitts erlaubt dabei eine Bearbeitung je nach gewähltem Axialvorschub von mindestens 10 Sekunden und damit mindestens 750 Werkzeugeingriffen.

Bei der Verwendung einer Mehrschnittstrategie ist davon auszugehen, dass in einer Parametervariation jeweils im zweiten Schnitt erhöhte Ausgangstemperaturen vorliegen. Im Prozess erfolgt die Rückfahrbewegung des Werkzeugs nach Ende der ersten Zustellung im Eilgang, somit ist die Abkühlzeit des Bauteils zwischen den Schnitten für sämtliche Parameterkombinationen identisch. Die Ausgangstemperatur der kurzen Abkühlphase nach dem ersten vollständigen Schnitt unterscheidet sich jedoch. Eine in der Simulation für jede Parameterkombination entsprechend den Ergebnissen aus den Experimenten eingestellte Starttemperatur ist für die Validierung der im Prozess eingebrachten Wärme ins Bauteil prinzipiell möglich, jedoch wenig praktikabel. Aus diesem Grund wurde für den Vergleich der resultierenden Bauteiltemperaturen im Folgenden eine Einschnittstrategie (T100/0) gewählt. Die Bauteilaustragstemperatur wurde im Experiment und in der Simulation auf konstant 20°C (293 K) eingestellt.

Die dabei an Messposition T1 und T2 anliegenden Temperaturen bei den Versuchen mit der Drehzahl  $n_0 = 800$  1/min und Axialvorschüben von  $s_{ax} = 0,025$  mm/WSU bis 0,1 mm/WSU (Simulation) bzw. 0,125 mm/WSU (Experiment) werden in Abbildung 7.5 dargestellt. Dabei ist festzuhalten, dass sich die Temperaturen aus den Versuchen und den Simulationsläufen in einem vergleichbaren Bereich befinden. Es werden gute Übereinstimmungen mit einer Abweichung von minimal 2,1°C ( $s_{ax} = 0,075$  mm/WSU an T1) bis hin zu Abweichungen von maximal 19,3°C ( $s_{ax} = 0,025$  mm/WSU an T1) festgestellt. Der Temperaturverlauf stellt sich jedoch grundsätzlich gegenläufig über die Variation des Axialvorschubs dar. In Kapitel 5.2 wurde bereits ausgeführt, dass in den Realexperimenten bei Erhöhung des Axialvorschubes an allen

Messpositionen im Bauteil insbesondere bei niedrigen Drehzahlen leicht sinkende Maximaltemperaturen gemessen wurden. In Abbildung 7.5 zeigt sich bei  $n_0 = 800$  1/min zwischen  $s_{ax} = 0,025$  mm/WSU und  $s_{ax} = 0,1$  mm/WSU in den Experimenten an Messposition T1 eine Differenz von  $\Delta T = -10^\circ\text{C}$ . Bei Drehzahlen von 1000 WZU/min und mehr wurde kein Einfluss einer Axialvorschubvariation nachgewiesen (vgl. Kapitel 5.2.2). In der Simulation wurden im Gegensatz hierzu bei einer Drehzahl von  $n_0 = 800$  1/min ansteigende Maximaltemperaturen im Bauteil bei einer Erhöhung des Axialvorschubes um  $\Delta T = +16^\circ\text{C}$  (T1) bzw.  $\Delta T = +11^\circ\text{C}$  (T2) festgestellt.

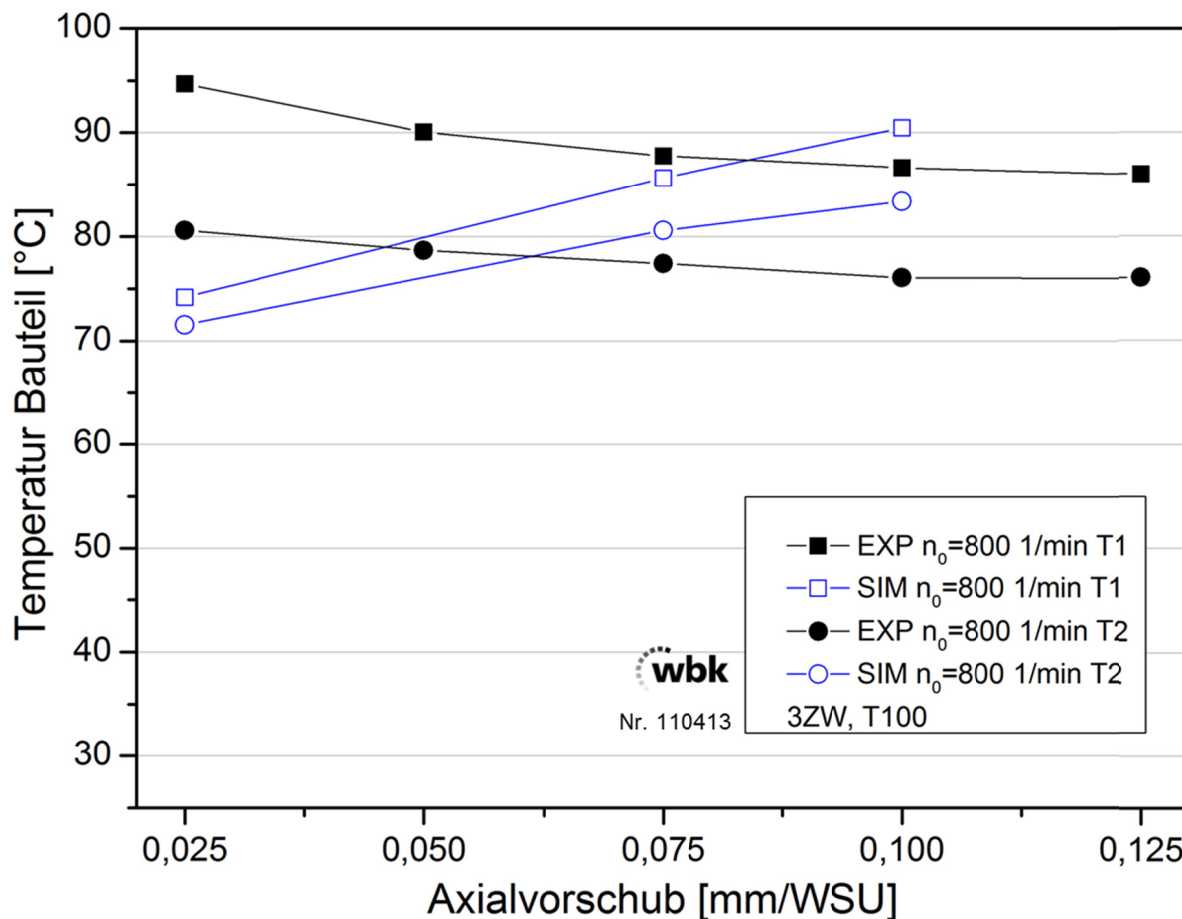


Abbildung 7.5: Validierung Temperaturen im Bauteil: Verlauf über Variation des Axialvorschubs, Experiment und Simulation

Mit zunehmenden Axialvorschubwerten kommt es zu größeren Spanvolumina und damit – dies hat sich auch bei der Charakterisierung der Späne in Kapitel 5.4 gezeigt – vermehrt zu Quetschungs- bzw. Stauchungsvorgängen im Be-

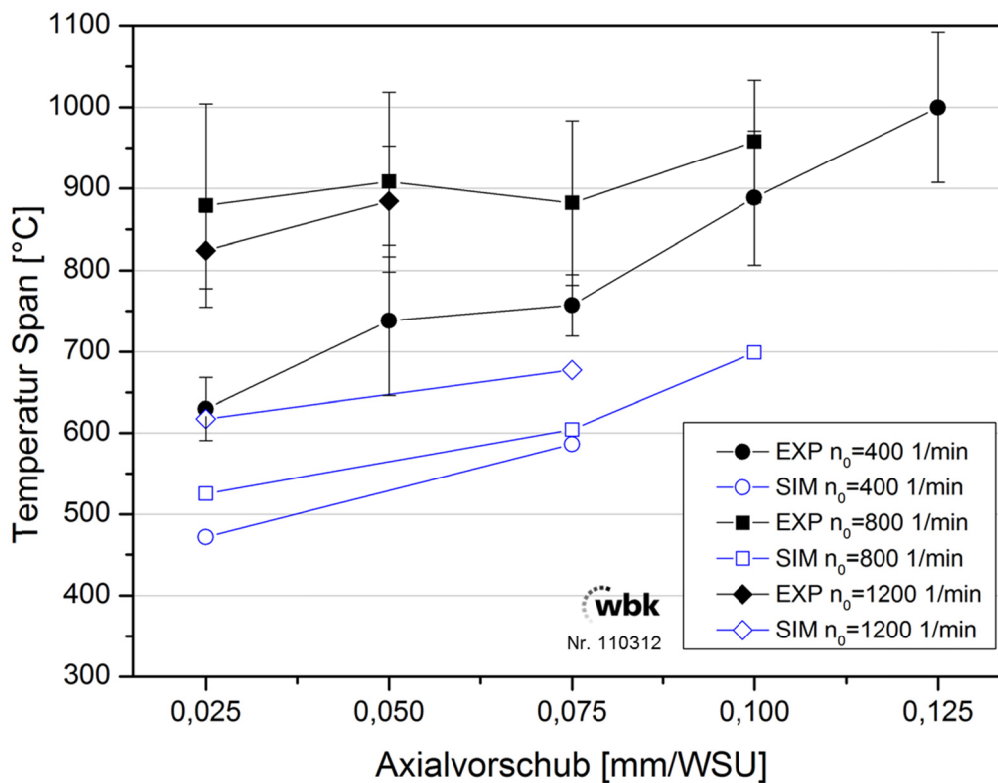
reich des Spankopfes. Diese Spanstauchungsmechanismen lassen sich mit dem im Rahmen dieser Arbeit gewählten Ansatz der Elementlöschung und den realisierbaren Elementabmessungen nicht vollständig realitätsgetreu abbilden. Die in der Simulation ansteigenden Temperaturen im Bauteil könnten auf diesen Umstand zurückgeführt werden, ohne dass ein sicherer Nachweis hierfür erbracht werden kann. Es ist davon auszugehen, dass eine Elementlöschung im Bereich der Materialtrennung im Bereich der Spanentstehung verhindert, dass die entstehende Wärme in den Span übergehen kann und sich damit das Verhalten des Realprozesses mit fallenden Maximaltemperaturen bei steigenden Axialvorschubwerten einstellen kann. Zudem deckt sich das Ergebnis mit den Voruntersuchungen und Ausführungen in Kapitel 6.3 zur Verwendung der Massenskalierung bei den Simulationsstudien im Rahmen dieser Arbeit. Im Rahmen der Voruntersuchungen zeigte sich bei der Verwendung von Massenskalierungsfaktoren von 10.000 eine Erhöhung der Temperaturen im Bauteil. Es kann also eine durch die Verwendung der Massenskalierung erhöhte Wärmeleitung aus der Scherzone ins Werkstück vermutet werden.

## **7.5 Temperatur der Späne**

Zur Bereitstellung einer weiteren Bewertungskenngröße zur Validierung der Simulationsmodelle wurde die Erfassung der auftretenden Temperaturen der Späne unter realen Bedingungen vorgenommen. Die ausführliche Beschreibung und Auswertung der experimentellen Arbeiten unter Verwendung eines Zwei-Farben-Pyrometers und des hierzu entwickelten Versuchsaufbaus erfolgte bereits in Kapitel 5.3.

Die Gestaltung des Versuchsaufbaus sieht vor, dass die Temperatur an der Spanunterseite unmittelbar nach der Bildung des charakteristischen Mehrflankenspanes gemessen wird. Die Messung erfolgt dabei kontinuierlich über den gesamten Eingriff der Werkzeugschneide und damit über die Bildung der einlaufenden Flanke über den Kopf bis zur auslaufenden Flanke. Aufgrund der

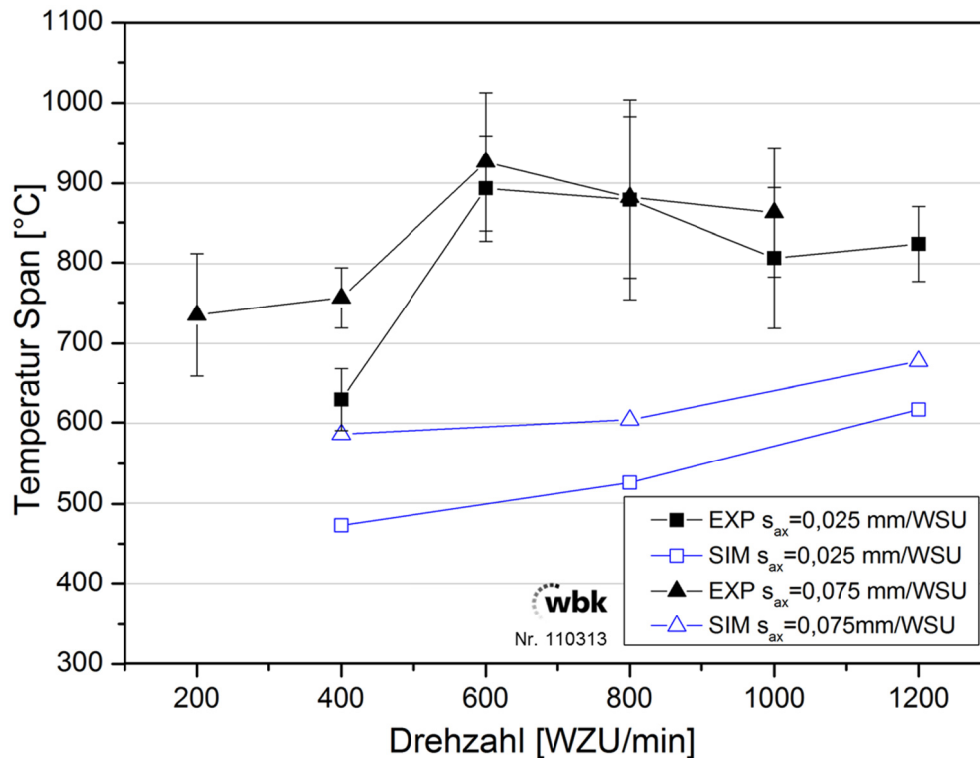
geometrischen Verhältnisse der Späne, des Messdurchlaufes und der Auswertung der Temperaturverläufe wurde festgestellt, dass die zuverlässigsten Messwerte und die Maximaltemperatur zum Zeitpunkt der tiefsten Zustellung des Werkzeuges anliegen. Die Spancharakterisierung hat gezeigt, dass der Span im Kopfbereich bei allen Parameterkombinationen den größten Querschnitt aufweist und somit die Pyrometermessung gesichert auf dem Spanmaterial erfolgen kann. Für die Zuordnung der Auswertepositionen und Auswertzeitpunkte in den Simulationsmodellen gilt es somit zu beachten, dass die Referenzmessung die Temperatur am Spankopf unmittelbar nach dem Schneideneingriff und der Bildung des Spankopfes angibt.



*Abbildung 7.6: Validierung Temperatur des Spans Verlauf über Variation des Axialvorschubs; Experiment und Simulation*

Abbildung 7.6 und Abbildung 7.7 zeigen die Verläufe der in den Realversuchen gemessenen (schwarz) und aus den Simulationsergebnissen ausgewerteten (blau) Spantemperaturen unter Variation des Axialvorschubes bzw. der Drehzahl. Beim Abgleich der Simulationsergebnisse mit dem Experiment bleibt zunächst festzustellen, dass in den Realversuchen und den Simulationsläufen

grundsätzlich ein ähnliches Verhalten bei Variation der Prozessparameter vorliegt. Sowohl bei Erhöhung des Axialvorschubes als auch bei Steigerung der Schnittgeschwindigkeit mit der Erhöhung der Spindeldrehzahlen steigen die gemessenen bzw. simulierten Temperaturen in den Spänen an.



**Abbildung 7.7: Validierung Temperatur des Spans Verlauf über Variation der Drehzahl; Experiment und Simulation**

Mit einer Erhöhung des Axialvorschubes um je 0,025 mm/WSU ergibt sich über die dargestellten Drehzahlen in den Experimenten ein um  $\Delta T = 25$  bis  $92^\circ\text{C}$  erhöhter Messwert (Abbildung 7.6). Bei den Simulationsergebnissen ergeben sich bei linearer Interpolation der Zwischenpunkte und damit ebenso mit einer Erhöhung des Axialvorschubes um 0,025 mm/WSU um  $\Delta T = 30$  bis  $58^\circ\text{C}$  erhöhte Temperaturen. Bei konstanten Axialvorschüben ( $s_{ax} = 0,025$  mm/WSU) ergibt sich bei Betrachtung der Temperaturentwicklung der Späne (Abbildung 7.7) mit einer Erhöhung der Drehzahl von 400 WZU/min auf 1200 WZU/min ein Anstieg um  $\Delta T = +194^\circ\text{C}$  bei den Realversuchen und  $\Delta T = +145^\circ\text{C}$  bei den Simulationen und damit eine gute Übereinstimmung. Bei den Ergebnissen für  $s_{ax} = 0,075$  mm/WSU ergibt sich mit



der Variation der Drehzahl von 400 WZU/min auf 1000 WZU/min ein Anstieg um  $\Delta T = +98^\circ\text{C}$  bei den Realversuchen und  $\Delta T = +63^\circ\text{C}$  in der Simulation.

Beim Vergleich der einzelnen Ergebniswerte je Parameterkombination stellen sich bei der Simulation durchweg niedrigere Temperaturen als die jeweilige Referenz aus den Realversuchen ein. Die Abweichungen liegen bei Variation des Axialvorschubes (Abbildung 7.6) durchschnittlich über alle Vergleichspunkte bei  $\Delta T = -226^\circ\text{C}$  mit einer minimalen Abweichung von  $\Delta T = -157^\circ\text{C}$  ( $n_0 = 400$  1/min,  $s_{ax} = 0,075$  mm/WSU) und einer maximalen Abweichung von  $\Delta T = -323^\circ\text{C}$  ( $n_0 = 800$  1/min,  $s_{ax} = 0,025$  mm/WSU). Unter Variation der Drehzahl (Abbildung 7.7) zeigt sich bei den gezeigten Axialvorschüben von  $s_{ax} = 0,025$  mm/WSU und  $s_{ax} = 0,075$  mm/WSU eine mittlere Abweichung der Spantemperaturen von  $\Delta T = -223^\circ\text{C}$ .

Bei der Beurteilung der Validierungsergebnisse ist zu berücksichtigen, dass sich bei den Experimenten bereits eine schwierige Messwerterfassung darstellte. Die angegebenen Werte der Realtemperaturen in Abbildung 7.6 und Abbildung 7.7 entsprechen dabei den Mittelwerten aus 6 bis zu 10 Einzelmessungen, die jeweilige Streuung der Versuchsergebnisse in Form von Y-Fehlerbalken sind gemäß Kapitel 5.3.2 der Darstellung zu entnehmen. Zudem stellen die Ergebnisse der Drehzahlen 600 WZU/min und 800 WZU/min, bei denen in der Validierung die maximalen Abweichungen festgestellt wurden, auch bei den Realversuchen eine Besonderheit bei den Temperaturverläufen unter Variation der Drehzahl dar.

Die durchweg niedrigeren Temperaturwerte in der Simulation im Vergleich mit den Realversuchen sind, wie bereits bei der Validierung der Bauteiltemperaturen, überwiegend auf den im Rahmen dieser Arbeit gewählten Ansatz der Elementlöschung zurückzuführen. Die Elemente im Bereich der Trennfläche zwischen Werkstückmaterial und Spanmaterial weisen die höchsten Temperaturen auf, können aufgrund der Elementlöschung jedoch nicht bewertet werden. Die höchsten Temperaturen und Spannungen werden bei diesem Ansatz der Elementlöschung nicht vollständig erhalten. Weiterhin muss berücksichtigt

werden, dass die Modelle zur Spanbildungssimulation, die für die Auswertung zur Validierung der Spantemperaturen herangezogen wurden, lediglich zwei Schneideneingriffe darstellen können. In den Realversuchen werden die Messungen im ersten Drittel der gesamten Verzahnungsbreite aufgenommen. Dennoch wird durch die vorangegangenen Schnitte das Werkstückmaterial entsprechend aufgeheizt. Diese erhöhte Temperatur wird in der Simulation nicht berücksichtigt.

## **7.6 Zerspankräfte**

Eine wesentliche Prozesskenngröße zur Überprüfung der Zuverlässigkeit der Simulationsmodelle wurde durch die Messung der Zerspankraftkomponenten verfügbar gemacht. Die Zerspankraftmessungen ermöglichen, Rückschlüsse auf die Änderung der prozessparameterabhängigen Spanbildungsmechanismen zu ziehen (vgl. Kapitel 5.1). Die Zerspankraftmessungen im Prozess erfolgen über die am Institut für Produktionstechnik (wbk) entwickelte Kraftmessplattform, die mitrotierend hinter dem Werkstückspanndorn in der Hauptspindel der Versuchsmaschine implementiert ist. Dadurch wird eine direkte und wirkstellennahe Messung mit piezo-elektrischen Elementen ermöglicht. Zu Validierungszwecken wurden gemäß der Ausführungen in Kapitel 5.1 Realversuche unter Verwendung eines Ein-Zahn-Analogiewerkzeuges durchgeführt.

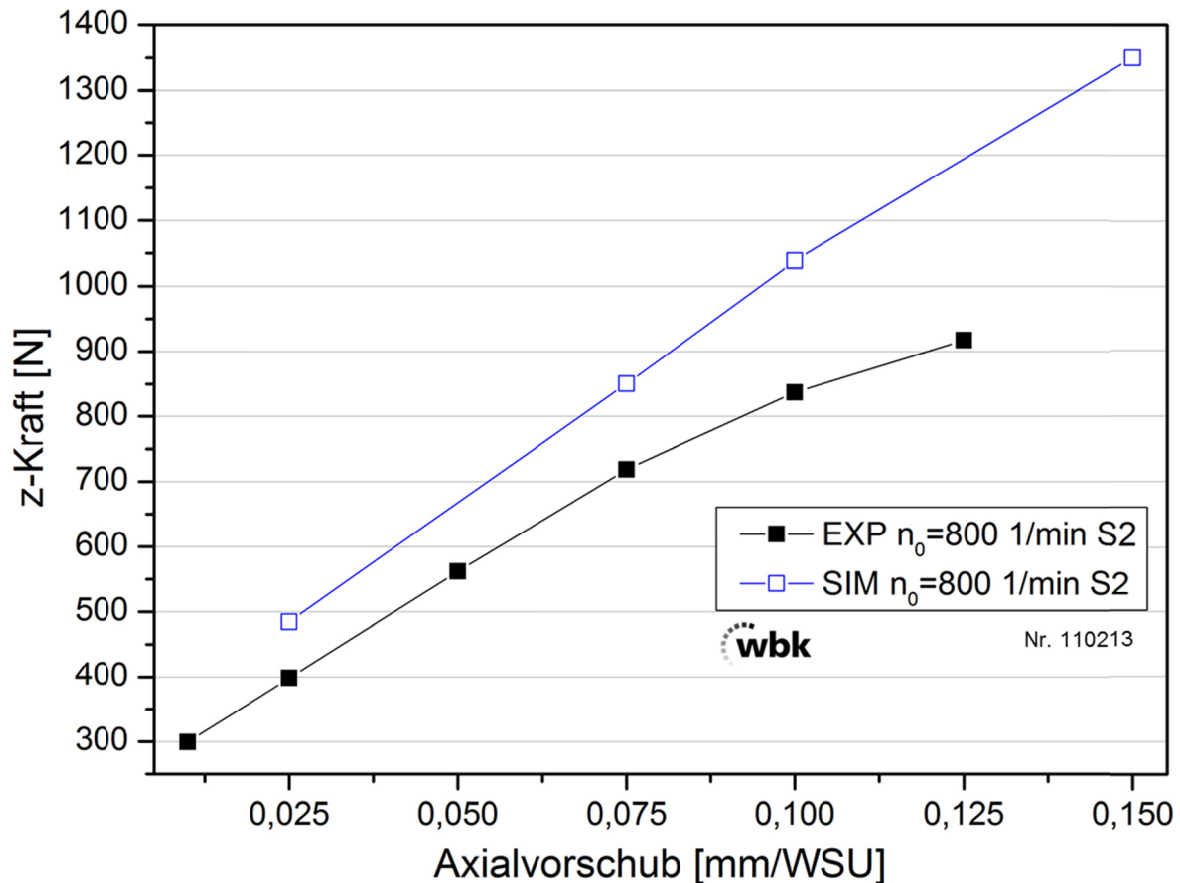


Abbildung 7.8: Validierung Kraft z-Komponente Verlauf über Variation des Axialvorschubs; Experiment und Simulation (1ZW, T60/40)

Bereits bei der Beurteilung der Realversuche hat sich gezeigt, dass insbesondere die Axialkraftkomponente in Richtung der Werkstückachse aussagekräftige Ergebnisse liefert. Diese werden im Folgenden herangezogen, um das Verhalten der Simulationsmodelle bezüglich der Variation der Prozessparameter Axialvorschub und Drehzahl vorzunehmen. Hierzu wurden die Simulationsläufe bezogen auf das Werkstückkoordinatensystem ausgewertet und die Reaktionskräfte (RF3) in Richtung der Werkstückachse protokolliert. Die Darstellungen in Abbildung 7.8 und Abbildung 7.9 zeigen hierzu den Vergleich zwischen Simulation und Experiment für den zweiten Schnitt einer Schnittstrategie T60/40 für die Variation des Axialvorschubes bzw. der Schnittgeschwindigkeit (Drehzahl).

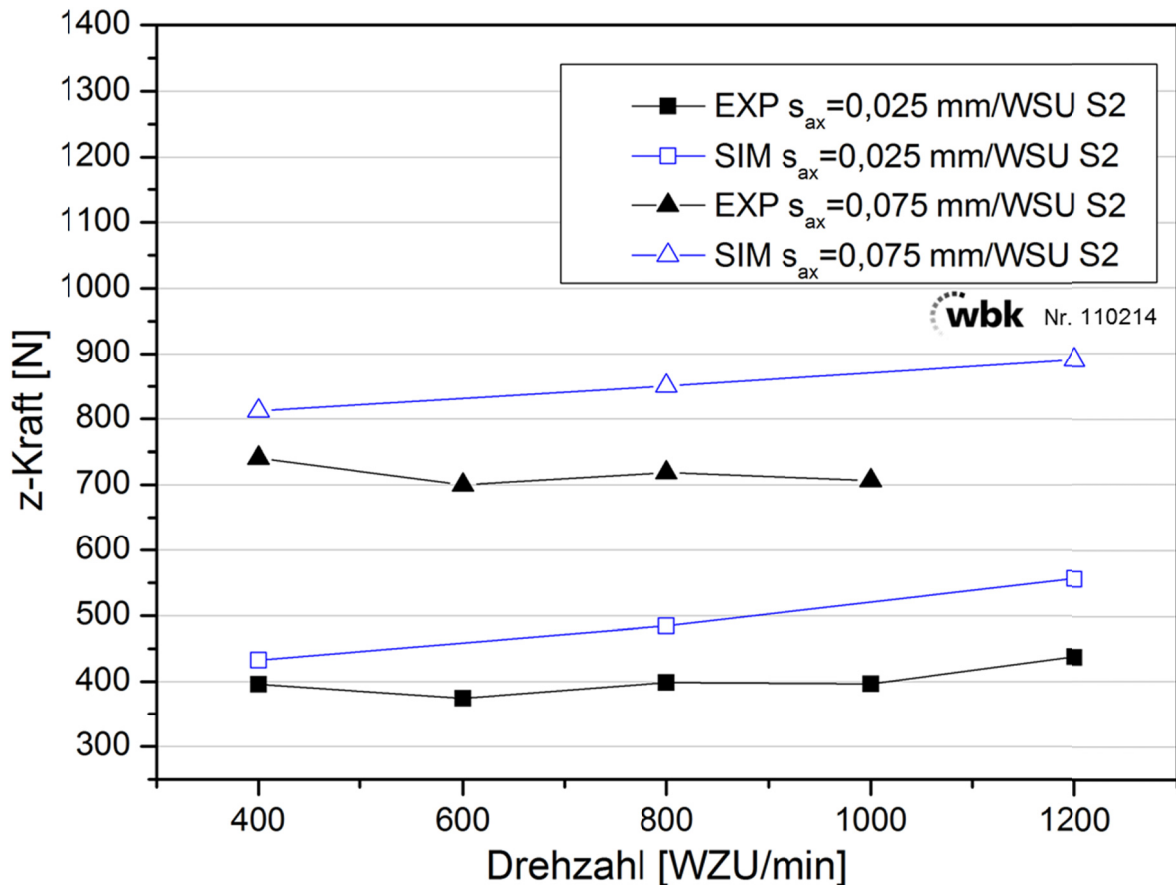


Abbildung 7.9: Validierung Kraft z-Komponente Verlauf über Variation der Drehzahl; Experiment und Simulation (1ZW, T60/40)

Bei konstanter Drehzahl resultieren aus der Erhöhung des Axialvorschubes eine vergrößerte Eingriffslänge bei jedem Schneideneingriff und ein dadurch vergrößertes Spanvolumen. Abbildung 7.8 zeigt den Verlauf der resultierenden Kraft in z-Richtung für die Drehzahl 800 WZU/min. Wie bereits bei der Auswertung der Axialvorschubvariationsreihen in Abbildung 5.4 für das Vollwerkzeug sowie den Vergleich verschiedener Schnittstrategien in Abbildung 5.6 festgestellt, zeigt sich zwischen der Erhöhung des Axialvorschubwertes und der resultierenden z-Kraft ein nahezu linearer Zusammenhang mit einem geringfügig schwächer werdenden Anstieg bei großen Axialvorschubwerten. Bei Auswertung der Simulationsläufe zeigt sich ein ähnlich ausgeprägtes Verhalten. Im untersuchten Vorschubbereich und für die Drehzahl  $n_0 = 800$  1/min ergibt sich für einen um jeweils 0,025 mm/WSU erhöhten Axialvorschub bei den Realversuchen mit einem mittleren Anstieg um 23,8% oder  $\Delta F_z = +173$  N

und bei den Simulationsläufen mit einem mittleren Anstieg um 21,6% oder  $\Delta F_z = +160$  N eine gute Übereinstimmung. Für diesen Vergleich wurden die Zwischenpunkte für die Axialvorschübe  $s_{ax} = 0,05$  mm/WSU und  $s_{ax} = 0,125$  mm/WSU unter der Annahme eines linearen Verlaufes interpoliert (vgl. Abbildung 7.8). Der Verlauf der simulierten Kräfte zeigt das oben beschriebene Verhalten im Realversuch mit leicht abfallender Steigung bei hohen Axialvorschüben nicht in dieser ausgeprägten Form. Beim Abgleich der Beträge der z-Komponente der Zerspankraft zeigt sich ebenso eine gute Zuverlässigkeit der Simulationsmodelle. Über die 5 Vergleichsparameterkombinationen (vgl. Abbildung 7.8) ergibt sich eine Abweichung der Beträge um 15 bis 24% oder durchschnittlich 160 N.

Wie in Kapitel 5.1.2 ausgeführt, wurde bei einer Drehzahlvariation kein eindeutiges Verhaltensmuster festgestellt. Insgesamt zeigten sich nur geringfügige Veränderungen der gemessenen Kräfte über die Variation der Schnittgeschwindigkeit bei den untersuchten Axialvorschüben. Abweichend hierzu wurde nur bei  $s_{ax} = 0,125$  mm/WSU bei der Erhöhung der Drehzahl im Experiment ein Abfallen der Zerspankräfte beobachtet.

Die Validierung der Ergebnisse für die Variation der Schnittgeschwindigkeit zeigt Abbildung 7.9. Zum Vergleich von Experiment und Simulation sind hier die Zerspankraftverläufe in Richtung der Werkstückachse jeweils für die konstanten Axialvorschubwerte  $s_{ax} = 0,025$  mm/WSU sowie  $s_{ax} = 0,075$  mm/WSU aufgetragen. Wie bereits in Abbildung 7.8 wurden die gesondert markierten Parameterkombinationen in der Simulation unter der vereinfachten Annahme eines linearen Verlaufes interpoliert. Sowohl im Experiment als auch in der Simulation wurde bei höheren Axialvorschüben über das gesamte Drehzahl-spektrum eine höhere Kraft gemessen bzw. aus der Simulation abgeleitet. In der Simulation wurden aufgrund des verwendeten Massenskalierungsfaktors erwartungsgemäß leicht höhere Kraftbeträge gegenüber den Referenzwerten aus den Realversuchen festgestellt. Die Abweichung liegt bei  $s_{ax} = 0,025$  mm/WSU zwischen 8% und 31% bzw. zwischen  $\Delta F_z = +36$  N und

$\Delta F_z = +124$  N. Bei einem Axialvorschub von  $s_{ax} = 0,075$  mm/WSU werden zwischen 10% und 23% bzw.  $\Delta F_z = +71$  N und  $\Delta F_z = +164$  N verzeichnet.

## 7.7 Diskussion und Fazit

Im Rahmen der Überprüfung der Ergebnisgüte der Simulationsmodelle im vorangegangenen Kapitel wurde der qualitative und quantitative Vergleich verschiedener Bewertungsgrößen vorgenommen. Dabei wurden die Temperaturen im Bauteilinnern und der Späne sowie die Prozesskräfte betrachtet und hinsichtlich der Abweichung sowie des Verhaltens bei Variation der Prozessparameter Drehzahl und Axialvorschub beurteilt. Des Weiteren wurde die Schneidenbewegung im Eingriff verifiziert und die in der Simulation gebildeten Späne mit Realspänen in Vergleich gebracht.

Bei der Erstellung des Simulationsmodells wurde eine Ersatzbewegung für die Schneide gefunden. Dabei wurde ein stehendes Werkstück definiert und die vollständigen Bewegungskomponenten durch die Schneide beschrieben. Die für den Spanbildungsprozess und den Prozessablauf relevanten Abschnitte der Schneidenbewegungsbahn wurden mit den theoretischen Beschreibungen abgeglichen und damit verifiziert.

Die Zielsetzung dieser Arbeit beinhaltete insbesondere die grundlegende Untersuchung der Spanbildungsmechanismen und die dabei gebildeten Späne. Die beim Wälzschälverfahren auftretenden charakteristischen Mehrflankenspäne werden kontinuierlich gebildet und bestehen aus zwei Spanflanken und einem Spankopf. Der qualitative Vergleich der simulierten Späne mit den Spänen aus den Realversuchen zeigte eine gute Übereinstimmung. Die Spanflanken und die kritischen Übergangsbereiche am Span zwischen einlaufender Flanke und Kopf sowie zwischen Kopf und auslaufender Flanke werden realitätsnah abgebildet. Die Quetschungs- und Spanstauchungsvorgänge konnten nicht vollständig abgebildet werden. Es kommt im Bereich des Spankopfes zu einer Segmentbildung, die offensichtlich mit dem gewählten Ansatz der Elementlöschung als Trennkriterium in der Spanbildung nur eingeschränkt abge-

bildet werden kann. Am simulierten Span zeigte sich im Bereich des Kopfes ein gegenüber den Flanken vergrößerter Querschnitt wie beim Realspan. Des Weiteren wird in den Simulationen die Grundform des Kopfes mit einer guten Übereinstimmung mit dem Realspan abgebildet. Anhand der resultierenden Gestalt der Späne kann sichergestellt werden, dass die Simulation eine hohe Ergebnisgüte liefert und für die Prozessuntersuchung geeignet ist. Bei Variation der Prozessparameter zeigte sich eine realitätsgetreue Ausbildung der charakteristischen Merkmale am Span (Übergang Flanke-Kopf und Abbrechen der Flanken bei bestimmten Parametervariationen).

Beim Vergleich der Temperaturen an den zwei Messpositionen im Werkstück zeigte sich eine gegenläufige Tendenz bei Variation des Axialvorschubes zwischen Simulation und Experiment (vgl. Kapitel 7.3). Grundsätzlich wurde bei dieser Bewertungskenngröße eine gute betragsmäßige Übereinstimmung der Temperaturen festgestellt. Bei den zu vergleichenden Parameterkombinationen zeigten sich Abweichungen von minimal  $2,1^{\circ}\text{C}$  bis zu maximalen Abweichungen der Temperaturwerte um  $19,3^{\circ}\text{C}$ .

Beim Abgleich der Spantemperaturen zeigte sich zwischen Experiment und Simulation ein übereinstimmendes Verhaltensmuster (vgl. Kapitel 7.5). Die Erhöhung der Drehzahl oder des Axialvorschubes resultierte sowohl bei den Realversuchen als auch bei den Simulationsläufen in ansteigenden Temperaturen im Span. Durchweg wurden geringere Temperaturen an den jeweiligen Spänen aus der Simulation festgestellt, die mittlere Abweichung über alle Varianten lag dabei bei ca.  $\Delta T = 225^{\circ}\text{C}$ .

Bei Betrachtung der Zerspankräfte zeigte sich ebenso eine gute Übereinstimmung des Verhaltens bei Erhöhung des Axialvorschubes bzw. bei Erhöhung der Drehzahl (vgl. Kapitel 7.6). Bei ansteigendem Axialvorschub mit konstanter Drehzahl zeigte sich eine gute Übereinstimmung des Kraftanstieges bei der Validierung. Die betragsmäßige Abweichung der Kraftkomponente in Werkstückachsrichtung lag dabei bei durchschnittlich 160 N und zeigte damit eine gute Übereinstimmung von Experiment und Simulation.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation nachgewiesen werden konnte. Das charakteristische Prozessverhalten wird im Simulationsmodell realitätsnah abgebildet. Das Simulationsmodell bietet damit gute Möglichkeiten zur grundlegenden Untersuchung des Wälzschälverfahrens.



## 8 Zusammenfassung und Ausblick

### 8.1 Zusammenfassung

Das Wälzschälverfahren stellt eine leistungsfähige Alternative zu den etablierten Verfahren zur Herstellung von Verzahnungen dar und bietet zusätzlich noch großes Potential in Bezug auf die Flexibilität hinsichtlich der Bearbeitung von periodischen Strukturen sowie der Verfahrensintegration.

Auf nationalen und internationalen Konferenzen, Werkzeugmaschinen- und Maschinenbaumessen, ebenso in Forschungs- und Entwicklungsabteilungen von Werkzeugmaschinenherstellern und auch auf Anwenderseite, ist das Wälzschälverfahren derzeit ein häufiges Thema. In Anbetracht der Tatsache, dass das Wälzschälverfahren bereits vor über 100 Jahren erdacht und das Prinzip patentiert wurde, entwickelte es sich jüngst innerhalb sehr kurzer Zeit zu einem vielbeachteten und stark nachgefragten Verzahnverfahren.

Das Institut für Produktionstechnik (wbk) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) hat das Thema vor knapp 15 Jahren aufgegriffen und intensiv verfolgt, nachdem es zuvor aufgrund der sehr hohen Anforderungen an die Maschinen-, Steuerungs- und Werkzeugtechnologie sowie die anspruchsvolle Werkzeug- und Prozessauslegung in der Hartbearbeitung und nur in Nischenbereichen Verwendung fand und dabei keine nachhaltige Etablierung am Markt erreicht werden konnte. Die ersten Arbeiten am KIT beschäftigten sich mit der rechnerunterstützten Werkzeug- und Prozessauslegung. In einem nächsten Schritt wurde dann in experimentellen Untersuchungen die hohe Leistungsfähigkeit im Vergleich zu den etablierten Verfahren aufgezeigt. Dabei wurden auch Defizite beim Prozessverständnis sowie Prozessinstabilitäten wie das Auftreten von Spanklemmern herausgearbeitet. Die Aktivitäten verschiedener Werkzeugmaschinenhersteller zur Entwicklung von Serienmaschinen zum Wälzschälen nahmen Fahrt auf und wurden von Forschungsseite begleitet. Die Rahmenbedingungen sind nun geschaffen, um das Verfahren verbreit-

tet und universell einzusetzen. Zur nachhaltigen Etablierung am Markt und zur Beherrschung der verfahrensspezifischen Prozessinstabilitäten ist das vollständige Prozessverständnis zu den kinematischen Verhältnissen und insbesondere den Spanbildungsmechanismen gefordert. Die Möglichkeiten der modernen Computer- und Simulationstechnologie erlauben diese grundlegenden wissenschaftlichen Untersuchungen mit Hilfe von Finite-Element Methoden. Damit werden Einblicke in den Prozess ermöglicht, die mit herkömmlichen experimentellen und theoretischen Untersuchungen des Verfahrens überhaupt nicht oder nur stark eingeschränkt möglich sind.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, das Wälzschälverfahren hinsichtlich der kinematischen Verhältnisse im Prozess und der Mechanismen der Bildung des verfahrensspezifischen Dreiflankenspans grundlegend wissenschaftlich zu durchdringen. Damit sollte bisher fehlendes grundlegendes Prozesswissen zum Wälzschälverfahren aufgebaut und so die Basis für die Prozessbeherrschung zur Verfügung gestellt werden. Aus den Erkenntnissen wurden Kriterien hinsichtlich der Werkzeug- und Prozessauslegung sowie der Prozessparameter ableitbar gemacht, welche die Optimierung der Prozesssicherheit beim Wälzschälen ermöglichen, indem beispielsweise die Entstehung von kritischen Spanbildungszuständen verstanden und damit die gezielte Vermeidung ermöglicht werden kann.

Zur Erreichung der Zielsetzung wurden hierzu 3D-FEM Simulationsmodelle der Kinematik und der Spanbildung mit der Simulationssoftware ABAQUS/Explicit aufgebaut, um so die Analyse des Verfahrens zu ermöglichen. Als Basis für den Modellaufbau und zur Validierung der Ergebnisse wurden umfangreiche experimentelle Arbeiten zum Wälzschälen in der Weichbearbeitung durchgeführt. Neben den dabei gewonnenen Erkenntnissen zum Verhalten des Prozesses, wie den Kraft-, Bauteil- und Spantemperaturverläufen bei Variation der Prozessparameter Axialvorschub, Schnittstrategie, Drehzahl und Schnittgeschwindigkeit wurden insbesondere durch eine erstmals durchgeführte systematische Untersuchung der für das Wälzschälverfahren charakteristischen

Dreiflankenspäne in den Realversuchen eine breite Wissensbasis zum grundlegenden Verständnis des Prozesses generiert.

Dabei wurden allgemein folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Zerspankraft steigt moderat bei zunehmendem Axialvorschub
- Zerspankraft bleibt konstant bei zunehmender Schnittgeschwindigkeit
- Zerspankraft steigt deutlich bei Verlagerung der Schnittanteile auf den zweiten Schnitt
- Bauteiltemperatur bleibt konstant bei zunehmendem Axialvorschub
- Bauteiltemperatur sinkt moderat bei zunehmender Schnittgeschwindigkeit
- Spantemperatur steigt an bei zunehmendem Axialvorschub und zunehmender Drehzahl

Der Modellierung des Materialverhaltens bei hohen Verformungsgeschwindigkeiten, der Kopplung der mechanischen und der thermischen Vorgänge und der Implementierung eines Trennkriteriums kommt für die Spanbildungssimulation eine entscheidende Bedeutung zu. In umfangreichen materialkundlichen Experimenten wurde das Verhalten des Versuchswerkstoffes 20MnCr5 im normalisierten Zustand bestimmt. Des Weiteren wurde eine Abschätzung des Reibkoeffizienten für die Werkstoffpaarung 20MnCr5/Hartmetall vorgenommen. Die Modellierung des Materialverhaltens erfolgte in Form der User Subroutine VUHARD für Abaqus/Explicit.

Bei der Modellierung des Erzeugungsgetriebes, der Prozesskinematik und der Bewegungsabläufe des Wälzschälverfahrens musste eine geeignete Abbildung über den vollständigen Schneideneingriff realisiert werden. Nur die dreidimensionale realitätsnahe Betrachtung ist geeignet, die verfahrensspezifische Kinematik und die charakteristischen Spanbildungsmechanismen abzubilden und deren Untersuchung zu ermöglichen. Eine abstrahierte Analogiebewegung oder eine reduzierte 2D Betrachtung stellte sich als nicht ausreichend dar.

Hierzu wurde die Schneiden- und Werkstückbewegung analysiert und in eine Ersatzbewegung überführt, bei der sämtliche Bewegungskomponenten des Realprozesses der Schneide zugeordnet und in Abaqus anhand von periodischen Rotations- und Verschiebungsdefinitionen realisiert wurden. Für die Durchführung der Kinematiksimulationsstudien wurde ein modifiziertes Werkstoffmodell für das Verhalten des Werkstückmaterials verwendet. Der bei einem Kontakt zwischen Werkstück und Werkzeug auftretende Spannungsanstieg im Werkstück wird dabei zur Initiierung der Elementlöschung verwendet. Durch das Entfernen von Elementen bei Überschneidungen von Werkzeug und Werkstück ist es möglich, die Verzahnungsgeometrie, die durch die Kinematik des Prozesses festgelegt ist, realitätsnah auf das Werkstück zu übertragen und die vorgesehenen Untersuchungen durchzuführen. Für die Durchführung der Simulationsstudien zur Untersuchung der Spanbildungsmechanismen wurde das gemäß der obigen Beschreibung aufgebaute Modell mit feiner Vernetzung und unter Verwendung des Materialmodells mit realem Materialverhalten verwendet.

Es konnte gezeigt werden, dass die FEM eine leistungsfähige und vielseitige Möglichkeit zur Untersuchung des Wälzschälverfahrens darstellt und als ein mit konventionellen Methoden nicht verfügbares Werkzeug zur Erhöhung des grundlegenden Prozessverständnisses und damit als eine wichtige Möglichkeit zur nachhaltigen Optimierung des Wälzschälverfahrens angesehen werden kann. Die Analyse des Verfahrens mit Hilfe der Simulation ist insbesondere auch daher nützlich, weil sie allgemeingültige Erkenntnisse zum Prozess liefert und für eine Werkzeug- und Prozessauslegung gänzlich neuer Bauteile eingesetzt werden kann. Zukünftige Rechnergenerationen mit steigender Leistungsfähigkeit werden umso mehr die Möglichkeiten einer wirtschaftlich erheblich günstigeren Untersuchung des Prozesses bieten.

Die FEM erlaubt dabei die detaillierte Betrachtung der kinematischen Verhältnisse und der Mechanismen der Spanbildung und macht umfangreiche Informationen zu den Prozesszuständen, wie beispielsweise Spanablaufbehinde-

rungen zugänglich. Anhand der Analyse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationsstudien konnten die Mechanismen der Spanbildung erklärt werden, die anhand der bisher rein theoretischen und experimentellen Untersuchungsmöglichkeiten nur unvollständig und widersprüchlich beschrieben werden konnten. Die Analyse und Modellierung der komplexen Schneidbewegungsbahn beim Eingriff in das Werkstückmaterial und dabei die Einflüsse der Prozessparameter auf die Werkzeugzahnbelastung dienen als wichtige Unterstützung bei der Auslegung des Prozesses. Die Erkenntnisse zu den tatsächlichen Belastungszuständen an der Werkzeugschneide stellen eine wertvolle Unterstützung bei der Auswahl oder Entwicklung geeigneter Schneidstoff-Beschichtungskombinationen für die Wälzschälbearbeitung dar.

Die im Rahmen dieser Arbeit erarbeiteten Befunde gehen weit über die bisherigen Ergebnisse aus Vorgängerarbeiten hinaus. Hierbei wurden erstmals systematische Variationsläufe der Prozessparameter Drehzahl und Axialvorschub durchgeführt und die Einflüsse auf die Bauteiltemperatur, Spantemperatur und Prozesskräfte untersucht. Die experimentelle Untersuchung und systematische Charakterisierung der sich beim Wälzschälen ergebenden Mehrflankenspäne stellen einen weiteren Erkenntnisgewinn zum grundlegenden Prozessverständnis dar.

## **8.2 Ausblick**

Heutige Rechnergenerationen stellen grundsätzlich ausreichende Leistungsreserven zur Verfügung, um die grundlegenden Spanbildungsmechanismen, die beim Wälzschälen herrschen, darzustellen und bei der Untersuchung Rückschlüsse auf die im Realprozess auftretenden Prozessinstabilitäten zu ziehen sowie entsprechende Maßnahmen im Prozess abzuleiten. Zukünftige Rechnergenerationen werden eine weitere Verfeinerung des FEM-Netzes erlauben und damit eine noch zuverlässigere Untersuchung der Prozessverhältnisse unter feiner aufgelöster Variation der Prozess- und Werkzeugparameter ermöglichen, die derzeit nur eingeschränkt möglich ist. Gleichzeitig werden leistungs-

stärkere Rechnergenerationen erlauben, die Simulationsstudien in kürzerer Zeit durchzuführen, als dies im Rahmen dieser Arbeit möglich war. Dadurch werden Simulationsstudien mit einer breiten Parametervariation in einem vertretbaren Aufwand durchgeführt werden können. Die Weiterentwicklung der im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Modelle insbesondere hinsichtlich der Realisierung einer Neuvernetzungsroutine und dabei der Vermeidung des Löschens einer zu großen Anzahl an Elementen unmittelbar an der Schneide bei der Entstehung des für das Wälzschälen charakteristischen Spanes werden die simulative Untersuchung der Entstehung der Segmente der Dreiflankenspäne weiter verbessern. Insbesondere im Bereich des Spankopfes stellen die ausgeprägten Stauchungsvorgänge eine Schwierigkeit für den derzeit verwendeten Simulationsansatz dar.

Als weiteres Anwendungsfeld von FEM-Simulationsstudien auf Basis der erstellten Prozessmodelle kann die Hartfeinbearbeitung mit Wälzschälen angesehen werden. Die dabei auftretenden geringeren Spannungsdicken machen jedoch eine weitere Verringerung der Elementkantenlängen und eine entsprechende Erhöhung der Anzahl an Elementen erforderlich.

Einen weiteren Ansatz stellt die Möglichkeit der simulativen Untersuchung der Prozess-Maschine-Interaktion dar. Hier stellt das entwickelte Simulationsmodell die erforderliche prozessseitige Abbildung dar. Verschiedene Forschungsansätze verfolgen hier diesen Ansatz bereits bei anderen Verfahren und stellen die Notwendigkeit für diese ganzheitliche Betrachtungsweise dar. Die schwingungsanregende Charakteristik des Wälzschälverfahrens bei der Bearbeitung von periodischen Strukturen und deren Wirkung auf die Werkzeugmaschine lassen diesen Ansatz ebenso sinnvoll erscheinen wie die Möglichkeit, das Verfahren in bestehende Maschinenkonzepte zu implementieren. Eine simulative Untersuchung der Machbarkeit und der Eignung verschiedenartiger Maschinenkonzepte kann hier eine wichtige Unterstützung bei der Optimierung der Maschinenstruktur sein.

## Literaturverzeichnis

- [ABE-04] ABENDROTH, Martin: Identifikation elastoplastischer und schädigungsmechanischer Materialparameter aus dem Small Punch Test. Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2004.
- [ALB-60] ALBRECHT, P.: New Developments in the Theory of the Metal-Cutting Process, Part I: The Ploughing-Process in Metal Cutting. ASME Journal of Engineering for Industry, Nr. 81, S. 348-358, 1960.
- [ALT-03] ALTAN, T.; YEN, Y.C.; SCHMIDT, C.; FRANK, P.; WEULE, H.; SCHMIDT, J.: Tool Wear Prediction and Verification in Orthogonal Cutting. In: Proceedings of the 6th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, Hamilton, Canada, 19.-20.5.2003.
- [ARR-06] ARRAZOLA, P. J.; PUJANA, J.; LLANOS, I.; VILLAR, A.; UGARTE, D.; AGUIRRE, A.; GALLEGRO, I.; MAITRE, F.: Finite Element Modeling of Oblique Cutting. In: Proceedings of the 9th CIRP International Workshop on Modeling Machining Operations, Bled, Slovenia, 2006.
- [ARR-09] ARRAZOLA, P. J.; LLANOS, I.; VILLAR, J. A.; URRESTI, I.: Finite Element Modeling of Oblique Machining Using an Arbitrary Lagrangian-Eulerian Formulation. In: Machining Science and Technology, Vol. 13, Nr. 3, 2009.

- [AUR-06] AURICH, J. C.; BIL, H.: 3D Finite Element Modelling of Segmented Chip Formation. *Annals of the CIRP, Manufacturing Technology*, Vol. 55, Nr. 1, 2006.
- [AUT-10] AUTENRIETH, Hermann: Numerische Analyse der Mikrozer-spanung am Beispiel von normalisiertem C45E. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2010.
- [BÄK-02] BÄKER, M.; RÖSLER, J.; SIEMERS, C.: Finite Element Simulation of Segmented Chip Formation of TiAl6V4. In: *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol. 124, 2002.
- [BÄK-04] BÄKER, Martin: Finite Element Simulation of Chip Formation. Habilitationsschrift, Shaker Verlag, Aachen, 2004.
- [BAU-94] BAUSCH, Thomas; SCHRIEFER, Herbert: Moderne Zahnradfertigung – Hartfeinbearbeitung mit zahnradförmigen Werkzeugen. Expert Verlag, Renningen, 1994.
- [BAU-11] BAUSCH, Thomas: Innovative Zahnradfertigung - Verfahren, Maschinen und Werkzeuge zur kostengünstigen Herstellung von Stirnrädern mit hoher Qualität. 4., neu bearb. und aktualisierte Auflage, expert Verlag, Renningen, 2011.
- [BEC-06] BECHLE, Andreas: Beitrag zur prozesssicheren Bearbeitung beim Hochleistungsfertigungsverfahren Wälzschälen. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2006.
- [BIE-01] BIESINGER, F.; SÖHNER, J.; SCHULZE, V.; VÖHRIGNER, O.; WEULE, H.: Aspects of Materials Science and Production Engineering at High-Speed-Cutting Processes and their Finite-



Element Simulation. In: 3rd International German and French Conference on High Speed Machining, 27.-29. Juni 2001, Metz, Frankreich, 2001.

- [BOU-08a] BOUZAKIS, K.-D. et. al.: Manufacturing of cylindrical gears by generating cutting processes: A critical synthesis of analysis methods. *Annals of the CIRP, Manufacturing Technology*, Vol. 57, Issue 2, 2008.
- [BOU-08b] BOUZAKIS, K.-D.; FRIDERIKOS, O.; TSIAFIS, I.: FEM-Supported Simulation of Chip Formation and Flow in Gear Hobbing of Spur and Helical Gears. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Manufacturing Engineering*, Chalkidiki, Greece, 01.-03.10.2008.
- [BYR-03] BYRNE, G.; DORNFELD, D.; DENKENA, B.: Advancing Cutting Technology. *Annals of the CIRP, Manufacturing Technology*, Vol. 52, Issue 2, 2003.
- [CER-99] CERETTI, E.; LUCCHI, M.; ALTAN, T.: FEM simulation of orthogonal cutting: serrated chip formation. In: *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 95, 1999.
- [DAS-11] DASSAULT SYSTEMS SIMULIA: ABAQUS User's Manual, Version 6.11, 2011.
- [DEL-05] DELONNOY, L.; HOCHRAINER, Th.; SCHULZE, V.; LÖHE, D.; GUMBSCH, P.: Similarity considerations on the simulation of turning processes of steels, *Zeitschr. für Metallkunde*; 96/7; S. 761-769, 2005.

- [DEN-05] DENKENA, B.; Becker, J. C.; JIVISHOV, V.: Scaling Effect on Chip Formation, Forces and Surface Layer in Hard Turning. In: Proceedings of the 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, Chemnitz, 10.-11.5.2005.
- [DEN-11] DENKENA, Berend; TÖNSHOFF, Hans Kurt: Spanen: Grundlagen. 3. Auflage, VDI-Reihe, Springer-Verlag, Heidelberg, 2011.
- [DIN 3960] DIN 3690: Begriffe und Bestimmungsgrößen für Stirnräder (Zylinderräder) und Stirnradpaare (Zylinderradpaare) mit Evolventenverzahnungen, Deutsche Norm, März 1987.
- [DOB-03] DOBLER, H.-D.; DOLL, W.; FISCHER, U.; GÜNTER, W., HEINZLER, M.; IGNATOWITZ, E.; VETTER, R.: Fachkunde Metall. 54. Auflage, Verlag Europa-Lehrmittel, Nourney, 2003.
- [DOE-98] DOERFEL, Oliver: Optimierung der Zerspantechnik beim Wälzstoßen – Analyse des Potentials zur Trockenbearbeitung. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1998.
- [DVS-10] DVS Gruppe: DVSpezial 2010 – Informationen der DVS-Gruppe. Firmenschrift, 2010.
- [ESS-10] ESSIG, Christoph Alexander: Vorhersage von Spanbruch bei der Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide mit Hilfe schädigungsmechanischer Ansätze. Dissertation, RWTH Aachen, 2010.
- [FAU-77] FAULSTICH, Ingo: Wälzschälen von Innenverzahnungen. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Band 72, Nr. 3, 1977.

- [FAU-86] FAULSTICH, Ingo: Aktuelle Verfahren zum Bearbeiten der Flanken einsatzgehärteter Zylinderräder. In: dima „die maschine“, Band 111, Nr. 6, 1986.
- [FAU-88] FAULSTICH, Ingo: Hartbearbeitung von Zahnrädern findet wachsendes Interesse. dima – die maschine, 6/88, S. 29-33, 1988.
- [FAU-90] FAULSTICH, Ingo: Verfahren zur Schlichtbearbeitung der Flanken von Zylinderrädern durch Wälzschälen sowie Vorrichtung zur Durchführung eines solchen Verfahrens. Offenlegungsschrift DE3915976, DPMA, 29.11.1990.
- [FEL-08] FELTEN, Klaus: Verzahntechnik - Das aktuelle Grundwissen über Herstellung und Prüfung von Zahnrädern. 2., neubearbeitete Auflage, expert Verlag, Renningen, 2008.
- [FLE-05] FLEISCHER, Jürgen; SCHMIDT, Jürgen et. al.: HopeS. Wälzschälen - Hochleistungsbearbeitung periodischer Strukturen. Abschlussbericht zum BMBF-Verbundprojekt, ISSN 1618-2375, Band 6, 2005.
- [FLE-06] FLEISCHER, Jürgen; BECHLE, Andreas; KÜHLEWEIN, Christoph: High Performance Gearing by Skiving. CIRP 2nd International Conference on High Performance Cutting (HPC), June 12th-13th, 2006, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2006.
- [FOR-06] FORTUNATO, A.; MANTEGA, C.; DONATI, L.; TANI, G.: Milling force prediction by means of analytical model and 2D FEM si-

- mulations. Tagungsband 9th CIRP Int. Workshop on Modelling of Machining Operations, Bled, Slowenien, 2006.
- [FRI-08] FRITZ, Alfred Herbert; SCHULZE, Günter (Hrsg.): Fertigungstechnik. 8., neu bearbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [GLE-92] GLEASON-PFAUTER GmbH: CNC-Wälzschälmaschine für die Feinbearbeitung gehärteter Verzahnungen. Firmenprospekt, Ludwigsburg, 1992.
- [GLE-05] GLEASON-PFAUTER GmbH: Kenndaten PF 200 CNC. Firmeninformation, Ludwigsburg, 2005.
- [HEI-09] HEISEL, U.; KRIVORUCHO, D.; ZAHOLA, W. A.; STORCHAK, M.; STEHLE, T.: Die FEM-Modellierung als moderner Ansatz zur Untersuchung von Zerspanprozessen. In: ZWF – Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Jahrgang 104, Nr. 7-8, 2009.
- [HER-08] HERZHOFF, Stefan: Mehrflankenspäne - Untersuchungen zur Spanbildung. Beitrag in Seminar „Innovationen rund ums Kegelarad - Innovations in Bevel Gear Technology“, Aachen, 12.-13.3.2008.
- [HÜH-02] HÜHSAM, Andreas: Modellbildung und experimentelle Untersuchung des Wälzschälprozesses. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2002.
- [HÖV-08] HÖVEL, Simone: Finite Elemente Simulation von Zerspanvorgängen mit geometrisch bestimmter Schneide. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2008.

- [JAN-80] JANSEN, Wilfried: Leistungssteigerung und Verbesserung der Fertigungsgenauigkeit beim Wälzschälen von Innenverzahnungen. Dissertation, RWTH Aachen, 1980.
- [JOH-85] JOHNSON, G. R.; COOK, W. H.: Fracture characteristics of three subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures. In: Engineering Fracture Mechanics, 21 (1), S. 31-48, 1985.
- [KAR-08] KARPUSCHEWSKI, Bernhard; KNOCHE, Hans-Joachim; HIPKE, Martin: Gear finishing by abrasive processes. In: Annals of the CIRP, Manufacturing Technology, Vol. 57, Nr. 2, 2008.
- [KAR-12] KARPUSCHEWSKI, Bernhard; KNOCHE, Hans-Joachim; HIPKE, Martin; BEUTNER, Martin: High performance gear hobbing with powder-metallurgical high-speed-steel. In: Procedia CIRP, Vol. 1, 5th CIRP Conference on High Performance Cutting, 2012.
- [KIE-57] KIENZLE, Otto; VICTOR, Hans: Spezifische Schnittkräfte bei der Metallbearbeitung. In: Werkstofftechnik und Maschinenbau, Band 47, Nr. 5, S. 224–225, 1957.
- [KLE-10] KLEIN, Bernd: FEM – Grundlagen und Anwendungen der Finite-Elemente-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau. 8. Auflage, Verlag Vieweg-Teubner, Wiesbaden, 2010.
- [KLI-11] KLINGELNBERG: Prozesssicheres und wirtschaftliches Wälzschälen durch neues Werkzeug- und Maschinenkonzept. Pressemitteilung der Firma Klingelberg, Zürich, 25.8.2011.

- [KLO-06] KLOCKE, Fritz; SCHRÖDER, Tobias; KLEIN, Alexander: Dicke Späne für krumme Zähne. In: WB Werkstatt und Betrieb, Nr. 3, 2006.
- [KLO-07] KLOCKE, Fritz; SCHRÖDER, Tobias; HERZHOFF, Stefan: "Problemfall" Mehrflankenspan. In: VDI-Z, Special Werkzeuge, Nr. 5, 2007.
- [KLO-08] KLOCKE, Fritz; KÖNIG, Wilfried: Fertigungsverfahren – Drehen, Fräsen, Bohren. 8. Auflage, Springer, Berlin, Heidelberg, New-York, 2008.
- [KLO-11] KLOCKE, Fritz; GORGELS, Christof; HERZHOFF, Stefan: Tool Load during Multi-Flank Chip Formation. In: Advanced Materials Research, Vol. 223, 2011.
- [KOE-78] KÖNIG, W.; JANSEN, W.: Wälzschälen von Innenverzahnungen. In: Industrie-Anzeiger, Nr. 88 (100), 27.10.1978.
- [KOT-03] KOTSCHENREUTHER, J.; DELONNOY, L.; HOCHRAINER, T.; SCHMIDT, J.; FLEISCHER, J.; SCHULZE, V.; LÖHE, D.; GUMBSCH, P.: Modelling, simulation and experimental tests for process scaling of cutting processes with geometrically defined edge; In: F. Vollertsen, F. Hollmann (Hrsg.): "Process Scaling", Ergebnisse des SPP 1138 der DFG, Strahltechnik 24, BIAS-Verlag, Bremen, S. 121-136, 2003
- [KOJ-77] KOJIMA, Masakazu: The Geometrical Analysis on Gear Skiving of Internal Gears. Design Engineering Technical Conference, ASME American Society of Mechanical Engineers, Chicago, Illinois, USA, Sept. 26-30, 1977.

- [LEL-05] LEL, Viacheslav: FIRE-2 – Faseroptisches Zwei-Farben Pyrometer. Schrift des Lehrstuhls für Wärme- und Stoffübertragung der RWTH Aachen, Prof. R. Kneer, November, 2005.
- [LEO-04] LEOPOLD, J.; NEUGEBAUER, R.: A Finite Element Study of the Effect of Friction on Chip- and Burr-Formation in Orthogonal Metal Cutting. In: Proceedings of the 7th CIRP Workshop on Modeling of Machining Operations, Cluny, Carrefour d'Europe, Paris, 4.-5.5.2004.
- [LOO-71] LOOMAN, Johannes: Wälzschälen von innenverzahnten Stirnrädern - Berechnung und Auslegung der Schälräder sowie praktische Schälergebnisse. VDI-Z, Band 113, Nr. 2, Düsseldorf, 1971.
- [LOO-82] LOOMAN, Johannes: Die geometrischen Verhältnisse beim Schälen. VDI-Berichte Nr. 434, VDI Friedrichshafen, S.117–120, 1982.
- [MAR-71] MAROS, D.: Beitrag zur Kinematik der Erzeugung von Zahnflanken nach dem Wälzschälverfahren. In: Industrie-Anzeiger, Nr. 90 (93), 26.10.1971.
- [MAR-73] MAROS, D.: Berechnung der Schneidkante des Werkzeuges zur Herstellung innenverzahnter Stirnräder nach dem Wälzschälverfahren. In: Industrie-Anzeiger, Nr. 62 (95), 27.7.1973.
- [MAR-77] MAROS, D.; PÁLFFY, C.: Profilberechnungen für Zahnräder. In: Industrie-Anzeiger, Nr. 28 (99), 6.4.1977.
- [MCC-00] MCCLAIN, B.; THEAN, W.; MALDONADO, G. I.; FANG, X. D.: Finite Element Analysis of Chip Formation in Grooved Tool Metal

- Cutting. In: *Machining Science and Technology*, Jahrg. 4, Nr. 2, 2000.
- [MÜL-00] MÜLLER, Bernhard; RENZ Ulrich: Temperaturmessung mit einem Zwei-Farben-Pyrometer. In: *Spanen metallischer Werkstoffe mit hohen Schnittgeschwindigkeiten*; Tönshoff, H.K., Hollmann, F. (Hrsg.), Verlag der Universität Hannover, S. 217-224, Hannover, 2000.
- [MÜL-04] MÜLLER, Bernhard: Thermische Analyse des Zerspanens metallischer Werkstoffe bei hohen Schnittgeschwindigkeiten. Dissertation, RWTH-Aachen, 2004.
- [NIS-76] NISHIJIMA, Komio; KOJIMA, Masakazu: Skiving Cutter Device for Use in Cutting Internal Spur Gear. Pat.-Nr. 1308126, US-Patent, 13.1.1976.
- [NIS-78] NISHIJIMA, Komio; KOJIMA, Masakazu: Skiving Cutter for Use in Cutting Internl Spur Gear. Pat.-Nr. 4066001, US-Patent, 3.1.1978.
- [NN-85] N.N.: Hartschälen, ein interessantes Verfahren. In: *dima „die maschine“*, Band 110, Nr. 10, 1985.
- [NN-08] N.N.: American Wera Proficator Introduces Scudding Process. In: *GearTechnology*, Issue January/February 2008, Nr. 1, 2008.
- [NN-10] N.N.: Antriebs- und Fluidtechnik mit rasanter Erholung. Marktbericht Maschinenbau des VMDA, Frankfurt, Pressemitteilung vom 29.10.2010.



- [OPH-98] OPHEY, Lothar u.a.: Trockenbearbeitung – Bearbeitung metallischer Werkstoffe ohne Kühlschmierstoffe. 1. Auflage, expert Verlag, Renningen, 1998.
- [PAU-08] PAUKSCH, E.; HOLSTEN, S.; LINSS, M.; TIKAL, F.: Zerspantechnik. 12. Auflage, Verlag Vieweg-Teubner, Wiesbaden, 2008.
- [PIE-07] PIENDL, S.; AURICH, J. C.; STEINICKE, M.: 3D Finite-Element Simulation of Chip Formation in Turning. In: Proceedings of the 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, Chemnitz, 10.-11.5.2005.
- [PIT-10] PITTER, Wilhelm von: Verfahren zum Schneiden von Zahnrädern mittels eines zahnradartigen, an den Stirnflächen der Zähne mit Schneidkanten versehenen Schneidwerkzeugs. Patentschrift Nr. 243514, Kaiserliches Patentamt, Berlin, 1.3.1910.
- [PRÄ-11] PRÄWEMA Antriebstechnik GmbH: Wälzschälen – Skiving. Firmenschrift, 2011.
- [PRO-07] PROFILATOR GmbH & Co. KG: Wälzschälen – Prozesskette Schiebemuffenfertigung. Firmenschrift, erschienen zur EMO, Hannover, 2007.
- [PRO-09] PROCK, Erich: SCUDDING® - maximale Geschwindigkeit und Qualität beim Verzahnen. In: Band: 2. Symposium – Praxis der Zahnräderfertigung, Technische Akademie Esslingen (TAE), Herausgeber Prof. Dr.-Ing. K. Felten, ISBN 3-924813-77-9, 2009.

- [PRO-11] PROFILATOR GmbH & Co. KG: Scudding QmS – Maximale Qualität und Geschwindigkeit beim Verzahnungsfräsen. Firmenschrift, 2011.
- [ROH-80] ROHMERT, Jürgen: Verfahren und Maschinen zur spanenden Herstellung von Verzahnungen. In: VDI-Z, Band 122, Nr. 12, Düsseldorf, 1980.
- [ROH-92] ROHMERT, Jürgen: Verzahnen – Fachgebiete in Jahresübersichten. In: VDI-Z, Band 134, Nr. 11, Düsseldorf, 1992.
- [SAT-07] SATO, Masahiko; UEDA, Takashi; TANAKA, Hisataka: An experimental technique for the measurement of temperature on CBN tool face in end milling. In: International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 47, S. 2071-2076, 2007.
- [SCC-11] STEINBUCH CENTRE FOR COMPUTING (SCC): Technische Dokumentation zu Hochleistungsrechnern hc3 und IC1. Homepage des SCC am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2011.
- [SCH-98] SCHULZ, H.; KALHÖFER, E.: Zerspanungsparameter mit neuronalen Netzen bestimmen. In: wt Werkstattstechnik, Band 88, Nr. 3, 1998.
- [SCH-01] SCHMIDT, Jürgen; HÜHSAM, Andreas: Wälzschälen – Ein Verzahnverfahren findet neue Anwendungsgebiete. In: wt Werkstattstechnik, Band 91, Nr. 8, 2001.
- [SCH-03] SCHMIDT, Jürgen; TRÖNDLE, Hans-Peter; FELTEN, Klaus; BECHLE, Andreas: Anforderungen an die Neuentwicklung einer Wälz-

- schälmaschine – mechatronische Analyse des Maschinenkonzeptes. In: wt Werkstattstechnik online, Band 93, Nr. 7/8, 2003.
- [SCH-04] SCHMIDT, Jürgen; BECHLE, Andreas: Das Wälzschälen wird wiederentdeckt. In: WB Werkstatt und Betrieb, Nr. 6, 2004.
- [SCH-06] SCHERMANN, Thorsten; MARSOLEK, Jens; FLEISCHER, Jürgen; SCHMIDT, Carsten: Simulation von Zerspanungsprozessen unter Berücksichtigung des dynamischen Maschinenverhaltens. ABAQUS Benutzerkonferenz, 18./19.9.2006, Erfurt.
- [SCH-07] SCHNITZLER, Lothar: Deutscher Maschinenbau. Zahnrad der Welt. In: Wirtschaftswoche, Nr. 51, 17.12.2007.
- [SCH-09] SCHULZE, Volker; KÜHLEWEIN, Christoph: Wälzschälen - Überblick über die Entwicklungsgeschichte und Grundlagen des Verfahrens sowie Einblick in aktuelle Forschungsaktivitäten. GETPRO Kongress zur Getriebeproduktion, 11.-12.03.2009, Congress Centrum Würzburg, Deutschland, erschienen in: Tagungsband GETPRO – Kongress zur Getriebeproduktion, S. 39-50, 2009.
- [SCH-09b] SCHULZE, Volker; KÜHLEWEIN, Christoph; RILLI, Raphael: Neue Ansätze zur Weichbearbeitung von Innenverzahnungen – Wälzschälen und Räumen. In: Band: 2. Symposium – Praxis der Zahnradfertigung, Technische Akademie Esslingen (TAE), Herausgeber Prof. Dr.-Ing. K. Felten, ISBN 3-924813-77-9, 2009.
- [SCH-10] SCHULZE, Volker; KÜHLEWEIN, Christoph: Process Development of the Skiving Technology. International Conference on Gears,

- 4.-6.10.2010, Garching (near Munich), Germany, Conference Proceedings, pp. 1417-1419, 2010.
- [SCH-11a] SCHULZE, Volker; KÜHLEWEIN, Christoph; AUTENRIETH, Hermann: 3D-FEM Modeling of Gear Skiving to Investigate Kinematics and Chip Formation Mechanisms. 13th CIRP Conference on Modeling of Machining Operations (CIRP CMMO), 12.-13.05.2011, Sintra, Portugal, Verlag Trans Tech Publications, Herausgeber/Veranstalter: J.C. Outeiro, Conference Proceedings, S.46-55, 2011.
- [SCH-11b] SCHULZE, Volker; KÜHLEWEIN, Christoph; AUTENRIETH, Hermann: 3D-FEM Modeling of Gear Skiving to Investigate Kinematics and Chip Formation Mechanisms. In: Advanced Materials Research, Vol. 223, pp. 46-55, 2011.
- [SEM-96] SEMMLER, U.; LEOPOLD, J.: Spanformen mittels FEM berechenbar. In: *dima – Die Maschine*, Jahrg. 50, Nr. 9, 1996.
- [SIN-07] SINDBAP: Simulation industrieller Bearbeitungsprozesse. Abschlussbericht des Verbundforschungsprojekts, 2007.
- [SÖH-03] SÖHNER, Jörg: Beitrag zur Simulation zerspanungstechnologischer Vorgänge mit Hilfe der Finite-Element-Methode. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2003.
- [SUL-74] SULZER, Gerd: Wälzschälen – Werkzeugauslegung und Spanungsgeometrie. In: *VDI-Z, Konstruktion und Fertigung*, Band 116, Nr. 8, Düsseldorf, 1974.

- [SPA-02] SPATH, Dieter; SCHMIDT, Jürgen; HÜHSAM, Andreas; BECHLE, Andreas: Skiving for High-Performance Production. In: Production Engineering, Vol. IX/2, 2002.
- [TAY-19] TAYLOR, Charles Havelock: Metal-Cutter. Pat.-Nr. 3931754, US-Patent, 1.7.1919.
- [UED-06] UEDA, Takashi; HOSOKAWA, Akira; YAMADA, Keiji: Effect of Oil Mist on Tool Temperature in Cutting. In: Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 128, February, S.130-135, 2006.
- [UHL-07] UHLMANN, Eckart; MATTES, Alexander; GRAF VON DER SCHULenburg, Matthias; KUHNERT, Jörg: Zerspansimulation mit der Finite-Pointset-Methode. Deutliche Vorteile hinsichtlich Berechnungsgenauigkeit. In: ZWF, Jahrgang 102, Nr. 12, 2007.
- [VAN-98] VAN LUTTERVELT, C. A.; CHILDS, T. H. C.; JAWAHIR, I. S.; KLOCKE, F.; VENUVINOD, P. K.: Present Situation and Future Trends in Modeling of Machining Operations. Progress Report of the CIRP Working Group „Modeling of Machining Operations“, Annals of the CIRP, Vol. 47, Nr. 2, 1998.
- [VDM-10] VDMA: Deutsche Antriebs- und Fluidtechnik wieder auf dem Weg zur Spitze. Pressemitteilung, diverse Veröffentlichungen, Frankfurt am Main, 21.10.2010.
- [VIC-56] VICTOR, Hans: Beitrag zur Kenntnis der Schnittkräfte beim Drehen, Hobeln und Bohren. Dissertation, Universität Hannover, 1956.

- [WAR-74] WARNECKE, Günter: Spanbildung bei metallischen Werkstoffen. Technischer Verlag Resch, Gräfeling, 1974.
- [XIE-04] XIE, Lijing: Estimation Of Two-dimension Tool Wear Based on Finite Element Method. Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 2004.
- [ZAB-10] ZABEL, Andreas: Prozesssimulation in der Zerspanung - Modellierung von Dreh- und Fräsprozessen. Habilitationsschrift, Schriftenreihe des ISF, Technische Universität Dortmund, erschienen im: Vulkan Verlag, Essen, 2010.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Verfahrensvergleich Wälzschälen mit etablierten Verfahren der Weichbearbeitung	4
Abbildung 2.1: Einordnung des Wälzschälens innerhalb der Verfahrensmatrix für die Zahnradherstellung [FEL-08]	8
Abbildung 2.2: Chronologische Entwicklung des Wälzschälverfahrens [erweitert nach HÜH-02]	9
Abbildung 2.3: Auszug Originalpatentschrift Wilhelm von Pittler [PIT-10]	10
Abbildung 2.4: Prinzipielle Vorgehensweise bei der Simulation des Wälzschälprozesses; erweitert nach [HÜH-02]	17
Abbildung 2.5: Methodische Vorgehensweise zur Verbesserung der Prozesssicherheit beim Wälzschälen [BEC-06]	20
Abbildung 2.6: Grundformen von Wälzschälwerkzeugen (li.+ Mitte li.: zylindrisch; Mitte re.: konisch, re.: gebaut [KLI-11)	25
Abbildung 2.7: Bezeichnungen am Werkzeugzahn	25
Abbildung 2.8: Erzeugung eines effektiven Freiwinkels [nach FLE-05]	27
Abbildung 2.9: Schemadarstellung Verfahrenskinematik	30
Abbildung 2.10: Komponenten der Schnittgeschwindigkeit	33
Abbildung 2.11: Schnittkraftvektoren an einem Schneidkantenelement der Schneide [FLE-05]	34
Abbildung 2.12: Schnittkraftverlauf an einem Schneidkantenelement [SCH-02]	35
Abbildung 2.13: Gesamtschnittkraftverlauf [HÜH-02]	35
Abbildung 2.14: Ein- und Überlaufwege beim Wälzschälen	37
Abbildung 2.15: Verlauf der effektiven Prozesswinkel beim Werkzeugeingriff	38
Abbildung 2.16: Aufteilung der Einzelschnitte bei einer 2-Schnitt-Strategie „Schnittstrategie T60/40“	40
Abbildung 2.17: Spanbildungsmodell und Aufnahme einer Spanwurzel [KLO-08 nach WAR-74; DOB-03]	42
Abbildung 3.1: Darstellung der Vorgehensweise bei dieser Arbeit	53

Abbildung 4.1: Versuchsmaschine INDEX V300Sonder mit integrierter Wälzschäleinheit	56
Abbildung 4.2: Versuchswerkzeug: Vollwerkzeug	59
Abbildung 4.3: Versuchswerkzeug: Analogiewerkzeugträger mit zugehörigem Ein- und Drei-Zahn-Segment	60
Abbildung 4.4: Rohling und bearbeitetes Versuchswerkstück	61
Abbildung 4.5: INDEX V300 wbk-Kraftmessplattform	64
Abbildung 4.6: Temperaturmessung an 3 Messpositionen im Bauteilinnern mittels Thermoelementen	65
Abbildung 4.7: Schematischer Versuchsaufbau zur Temperaturmessung im Bereich der Zerspanstelle (Pyrometeraufbau nach [MÜL-04])	67
Abbildung 4.8: Drehübertragereinheit	69
Abbildung 4.9: Vorgehensweise bei einer Simulationsstudie mit FEM	72
Abbildung 4.10: Temperatur- und Dehnratenabhängigkeit der $R_{p\ 0,2}$ Streckgrenze von normalem 20MnCr5 [IAM-WK]	81
Abbildung 4.11: Temperatur- und Dehnratenabhängigkeit der $R_{p\ 0,2}$ Streckgrenze von normalem 20MnCr5 [IAM-WK]	82
Abbildung 4.12: Abhängigkeit der wahren normierten Versagensdehnung von der Temperatur und Beschreibung durch das Modell (blau) [IAM-WK]	83
Abbildung 5.1: Kraftverlauf der z-Komponente (Axialkraft)	87
Abbildung 5.2: Kraftverlauf des Betrages der x-y-Komponenten (Radialkraft)	88
Abbildung 5.3: Verlauf der Zerspankraft F (Gesamtkraft)	89
Abbildung 5.4: Verlauf der z-Kraft mit zunehmendem Axialvorschub (Vollwerkzeug, T60/40)	90
Abbildung 5.5: Verlauf der z-Kraft mit zunehmender Drehzahl (Vollwerkzeug, T60/40)	91
Abbildung 5.6: Vergleich der Schnittstrategie bei zunehmendem Axialvorschub (Vollwerkzeug)	92
Abbildung 5.7: Verlauf der z-Kraft mit zunehmendem Axialvorschub, Vergleich VWZ und 3ZW, 800 WZU/min	93
Abbildung 5.8: Temperaturmessung im Bauteil: Schnittstrategie T30/70	97



Abbildung 5.9: Verlauf Temperatur im Bauteil über die Variation des Axialvorschubes [ $n_0 = 600$ 1/min]	99
Abbildung 5.10: Verlauf Temperatur im Bauteil über die Variation des Axialvorschubes [ $n_0 = 1000$ 1/min]	100
Abbildung 5.11: Verlauf Temperatur im Bauteil über die Variation der Drehzahl (Messstelle T1, Schnitt 1)	101
Abbildung 5.12: Ausgabe der Pyrometermessung: Temperaturverlauf (oben) und Spannung U1, U2 (Mitte und unten)	104
Abbildung 5.13: Bereichsausschnitt der Pyrometermessung: Temperaturverlauf (oben) und Spannung U2 (unten)	105
Abbildung 5.14: Extrahierte Messstelle mit FFT-geglättetem Verlauf	106
Abbildung 5.15: Spantemperatur in Abhängigkeit des Axialvorschubs	107
Abbildung 5.16: Spantemperatur in Abhängigkeit der Drehzahl	108
Abbildung 5.17: Definition der Spangestalt an der Entstehungskinematik	111
Abbildung 5.18: Spanansichten, -teile und Merkmale am Wälzschälspan	112
Abbildung 5.19: Einteilung der Spanklemmer nach Art der Entstehung	114
Abbildung 5.20: Feste und lösbare Spanklemmer [BEC-06]	115
Abbildung 5.21: Aufbauschneiden (am Werkzeug, Unter- bzw. Oberseite)	116
Abbildung 5.22: Ergebnisse Beurteilung der Häufigkeit fehlender Flanken am Span	119
Abbildung 5.23: Verfärbung der Späne	120
Abbildung 5.24: Ergebnisse Beurteilung der Ausprägung des Wulstes	121
Abbildung 5.25: Ergebnisse Beurteilung der Verdrillung	122
Abbildung 5.26: Mittleres Spangewicht über Axialvorschub T60/40	124
Abbildung 5.27: Mittleres Spangewicht über Drehzahl T60/40	125
Abbildung 5.28: Ermittelte Größen am Span, Darstellung über Axialvorschub	126
Abbildung 6.1: Skelettmodell in ABAQUS	134
Abbildung 6.2: Geometrietreue bei gleichbleibender Elementzahl (ca. 60.000 Elemente)	136
Abbildung 6.3: Simulationsmodelle mit Dreizahnsegment und Einzelwerkzeugzahn	137

Abbildung 6.4: Einzelne Komponenten der Schneidenbewegung	142
Abbildung 6.5: Ausschnitt der Epizykloide im relevanten Bereich	143
Abbildung 6.6: Periodische Ersatzbewegung des Werkzeugs in ABAQUS	144
Abbildung 6.7: Bewegungsvorschriften zur Ersatzbewegung der Schneide	145
Abbildung 6.8: Vergleich der Rechenzeit (CPU-Time) für die vollständige Berechnung (Total Time 0,005 s)	148
Abbildung 6.9: Vergleich der Kraftverläufe bei verschiedenen Massenskalierungsfaktoren	150
Abbildung 6.10: Vergleich des Maximaltemperaturverlaufs	150
Abbildung 6.11: Vergleich des Temperaturverlaufs	151
Abbildung 6.12: Vergleich der Spanform	153
Abbildung 6.13: Auswertung der Koordinaten der Schneidkantenpunkte über die Eingriffsstrecke	158
Abbildung 6.14: Schneidenbewegung über den Eingriff mit Darstellung der Geschwindigkeitsvektoren	159
Abbildung 6.15: Vorgehensweise zur Bestimmung beliebiger Prozesswinkel	162
Abbildung 6.16: Auswertung Verlauf effektiver Spanwinkel	164
Abbildung 6.17: Auswertung Verlauf effektiver Spanwinkel (li: über SKP; re: über Frames)	164
Abbildung 6.18: Simulierte Spanform (Unterseite) ( $s_{ax} = 0,2$ mm/WSU)	168
Abbildung 6.19: Simulierte Spanform ( $s_{ax} = 0,1$ mm/WSU)	169
Abbildung 6.20: Abschnitte der Bildung des Dreiflankenspanns beim Wälzschälen (Simulationsergebnis und Vergleich Realspan)	171
Abbildung 6.21: Vektorielle Darstellung der Verschiebungsgeschwindigkeiten im Span während der Zerspanung	173
Abbildung 6.22: Entstehung kritischer Übergang EF-K am Span und fertiger Span; $s_{ax} = 0,1$ mm/WSU (Simulationsergebnis)	176
Abbildung 6.23: Simulationsstudien: Untersuchung des Späneflugverhaltens	177
Abbildung 6.24: Simulierte Kontaktspannung (CPRESS) entlang der Schneidkante des Werkzeuges	180
Abbildung 6.25: Auswertung CPRESS: Darstellung Bildung EF, K, AF	183

---

Abbildung 6.26: Auswertung CPRESS entlang der Schneidkante (li.) und in festgelegten Bereichen der Spanfläche (re.)	184
Abbildung 6.27: Verlauf CPRESS über Variation der Drehzahl: Mittelwerte (oben), Maximalwerte (unten)	185
Abbildung 6.28: Verlauf CPRESS über Variation des Axialvorschubs: Mittelwerte (oben), Maximalwerte (unten)	186
Abbildung 7.1: Verifikation der Spanform: Vergleich zwischen Experiment und Simulation	194
Abbildung 7.2: Abgebrochene Flanke: Vergleich Experiment und Simulation	195
Abbildung 7.3: Vergleich der Späne in Experiment und Simulation: Fehlende Flanken	196
Abbildung 7.4: Realversuche: Untersuchung des Späneflugverhaltens mit Hilfe von Highspeedaufnahmen	198
Abbildung 7.5: Validierung Temperaturen im Bauteil: Verlauf über Variation des Axialvorschubs, Experiment und Simulation	201
Abbildung 7.6: Validierung Temperatur des Spans Verlauf über Variation des Axialvorschubs; Experiment und Simulation	203
Abbildung 7.7: Validierung Temperatur des Spans Verlauf über Variation der Drehzahl; Experiment und Simulation	204
Abbildung 7.8: Validierung Kraft z-Komponente Verlauf über Variation des Axialvorschubs; Experiment und Simulation (1ZW, T60/40)	207
Abbildung 7.9: Validierung Kraft z-Komponente Verlauf über Variation der Drehzahl; Experiment und Simulation (1ZW, T60/40)	208

# Anhang

Aufstellung relevanter Patent- und Offenlegungsschriften zum Wälzschälen  
(Stand 2012):

von PITTLER, Wilhelm	Verfahren zum Schneiden von Zahnrädern mittels eines zahnradartigen, an den Stirnflächen der Zähne mit Schneidkanten versehenen Schneidwerkzeuges.  Pat.-Nr. 243514	D-Patent 1.3.1910	Verfahrensprinzip
TAYLOR, Charles Havelock	Metal-Cutter  Pat.-Nr. 1308126r	US-Patent 1.7.1919	Maschine zur Wälzschälbearbeitung
NISHIJIMA, Komio; KOJIMA, Masakazu	Skiving Cutter Device for Use in Cutting Internal Spur Gear  Pat.-Nr. 3931754	US-Patent 13.1.1976	Satz-Schälrad
NISHIJIMA, Komio; KOJIMA, Masakazu	Skiving Cutter For Use in Cutting Internal Spur Gear  Pat.-Nr. 4066001	US-Patent 3.1.1978	Werkzeug
Hermann PFAUTER GmbH	Maschine zum Wälzschälen zylindrischer Verzahnungen  Gebrauchsmuster-Nr. 8607328	D-Gebrauchsmuster 3.7.1986	Maschine
Hermann PFAUTER GmbH	Verfahren zur Bearbeitung der Flanken von Zahnrädern durch Wälzschälen sowie Vorrichtung zur Durchführung eines sol-	D-Offenlegungsschrift 26.3.1987	Verfahren; weich, hart; Korrekturen

	chen Verfahrens		
FAULSTICH, Ingo	Method For Machining the Flanks of Gears by Skiving and Apparatus for Implementing such Method Pat.-Nr. 4865497	US-Patent 12.9.1989	Verfahren, Maschine
FAULSTICH, Ingo	Method for Finishing Gears via Skiving Pat.-Nr. 5174699	US-Patent 29.12.1992	Hartschälen, Maschine, Verfahren
Hermann PFAUTER GmbH	Verfahren zur Schlichtbearbeitung der Flanken von gerad- und schrägverzahnten, innen- oder außenverzahnten Zylinderrädern durch Wälzschälen sowie Wälzmaschine zur Durchführung eines solchen Verfahrens Pat.-Nr. DE3915976	D-Patent 31.1.2002 Anmeldung 1989	Verfahren, Maschine
PRÄWEMA Werkzeugmaschinenfabrik GmbH	Verfahren zum Erzeugen von nach innentieferwerdenden Hinterlegungen Pat.-Nr. DE4122460	D-Patent 23.4.1992	Verfahren
DOERFEL, Oliver	Erzeugung periodischer Strukturen auf rotations-symmetrischen Bauteilen Pat.-Nr. EP1097772	EU-Patent 9.6.2001	Verfahren
SCHRÖDER, Tobias	Verfahren und Vorrichtung zum Wälzschälen und Schaben ohne Werkstück-	D-Offenlegungsschrift 7.10.2004	Verfahren

	wechsel in einer Maschine		
PROFILATOR GmbH & Co. KG	Werkzeugmaschine Pat.-Nr. DE10205049530	D-Patent 21.6.2007	Maschine
PROCK, Erich	Method for Producing Sliding Sleeves Pat.-Nr. WO2007/045610	Welt-Patent 26.4.2007	Verfahren
PROFILATOR GmbH & Co. KG	Verfahren und Vorrichtung zum Verzahnen von Werk- stücken durch Wälzschälen und zugehöriger Schneid- vorrichtung	D-Offenlegungsschrift 2.10.2008	Verfahren, Ma- schine
PROFILATOR GmbH & Co. KG	Wälzschälvorrichtung und -verfahren	D-Offenlegungsschrift 6.5.2010	Verfahren, Ma- schine
HEINEMANN, Wolfgang	Hob Peeling Device and Method Pat.-Nr. WO2010/060733	Welt-Patent 3.6.2010	Verfahren, Mas- chine
PROCK, Erich	Device and Method for Cutting Teeth in Work- pieces and Associated Tool Set Pat.-Nr. WO2010/079113	Welt-Patent 15.7.2010	Verfahren, Ma- schine
PROFILATOR GmbH & Co. KG	Vorrichtung und Verfahren zum Wälzschälen von in- nenverzahnten Zahnrädern sowie zugehöriges Schäl- rad	D-Offenlegungsschrift 16.12.2010	Verfahren, Ma- schine

**Tabelle 8.1: Übersicht über relevante Patente, Geschmacksmuster und Offenlegungsschriften (Stand 2012)**