Industrielle Gemeinschaftsforschung

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. 19150N/1

Thema

Methode für die Auslegung von Prozesseinstellgrößenmodulationen zur Steigerung der Produktivität und Werkzeugstandzeit beim Drehen

Berichtszeitraum

01.03.2017 - 30.04.2019

Forschungsvereinigung

VDW - Forschungsinstitut e.V

Forschungsstelle

Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Leibniz Universität Hannover

Institut für Fertigungstechnik
und Werkzeugmaschinen
Leibniz Universität Hannover
An der Universität 2
30823 Garbsen
Prof. Dr.-Ing. B. Denkena

Garbsen, 25.7.19

Ort, Datum

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der Forschungseinrichtung(en)

Forschungsnetzwerk Mittelstand

Gefördert durch:

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

Kurzfassung

Ziel des Vorhabens war die Erstellung einer Methode zur belastungsoptimalen Auslegung der Prozesseinstellgrößenmodulation am Beispiel der Außenlängsdrehbearbeitung. In AP1 wurde zunächst der Verschleißverlauf unter konstanten Prozessstellgrößen aufgenommen. Gleichzeitig wurden die thermomechanischen Belastungen des Werkzeugs experimentell bestimmt. Die so generierten Daten werden als Referenz genutzt. Darauf aufbauend wurde eine FE-Simulation aufgebaut und diese anhand der Referenz-Daten parametriert und validiert. Im zweiten Arbeitspaket wurden Prozesse mit modulierten Prozessstellgrößen durchgeführt und der Verschleiß in Abhängigkeit der Modulationsparameter Amplitude und Modulationsintervall bestimmt. Auf diese Weise konnten Parameter der Modulation bestimmt werden, die eine Steigerung der Standzeit bzw. Produktivität der Außenlängsdrehbearbeitung ermöglichen. Dabei wurden Standzeitsteigerungen von bis zu 44 % erreicht. Dieser Effekt kann auf eine Reduzierung der thermischen Belastung zurückgeführt werden. Das dritte Arbeitspaket hat gezeigt, dass durch eine Modulation der Einstell- bzw. Neigungswinkelmodulation eine weitere Standzeitsteigerung erreicht werden kann. Dieser Effekt lässt sich auf eine Änderung der Spanungsquerschnittsform bzw. -größe zurückführen und ist daher unabhängig vom Effekt der Einstellgrößenmodulation. Im vierten Arbeitspaket wurde eine Methode entwickelt, mit der die Prozessstellgrößenmodulation ausgelegt werden kann. Es konnten zwei Berechnungsansätze entwickelt werden, ein simulativer und ein experimenteller Ansatz. Anhand dieser Berechnungen kann der erreichbare Standzeitvorteil qualitativ korrekt vorausberechnet werden. Der Effekt der Modulation wird jedoch unterschätzt. Dies kann auf einen sich verstärkenden Effekt zwischen der Änderung der Werkzeugbelastung durch die Modulation und dem sich dadurch ändernden weiteren Verschleißverlauf zurückgeführt werden. Im fünften Arbeitspaket wurde die Übertragbarkeit auf das Stirn-Umfangsfräsen untersucht. Hierbei konnte gezeigt werden, dass eine direkte Übertragung der Methode nicht möglich ist. Beim Fräsprozess unterliegen die Werkzeuge einem anderen Belastungsprofil und andere Verschleißmechanismen werden standzeitbestimmend. Diese lassen sich mit der für das Drehen entwickelten Modulation nicht beeinflussen. In weiteren Untersuchungen konnte jedoch gezeigt werden, dass diese Mechanismen durch andere Formen der Modulation beeinflusst werden können und Standzeitvorteile von 25 % durch Modulation erzielt werden können.

Ergebnis der Arbeit: Das Ziel des Vorhabens wurde erreicht

Im Rahmen dieses Projektes wurden keine Schutzrechte erworben oder beantragt.

Danksagung:

Das IGF-Vorhaben 19150N/1 (Prozessbezogene Auslegung der Schneidkantenverrundung für die Fräsbearbeitung von Stahlwerkstoffen) des VDW - Forschungsinstitut e.V wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Förderung des Forschungsprojektes. Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Inhaltsverzeichnis

1 Stand der Forschung und Technik 1

1.1 Problemstellung 4

1.2 Forschungsziel 5

2 Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten zu den erzielten Forschungsergebnissen 5

2.1 AP1: Referenzprozesse und Erstellung FE-Modell 5

2.1.1 Durchgeführte Arbeiten 6

2.1.2 Erzielte Ergebnisse 6

2.2 AP2: Ermittlung geeigneter Modulationsparameter 10

2.2.1 Durchgeführte Arbeiten 10

2.2.2 Erzielte Ergebnisse 11

2.3 AP3: Neigungswinkel- und Einstellwinkelmodulation 15

2.3.1 Durchgeführte Arbeiten 15

2.3.2 Erzielte Ergebnisse 15

2.4 AP4: Methode zur belastungsoptimalen Auslegung einer Stellgrößenmodulation 18

2.4.1 Durchgeführte Arbeiten 18

2.4.2 Erzielte Ergebnisse 18

2.5 AP5: Modulation beim Fräsprozess 27

2.5.1 Durchgeführte Arbeiten 27

2.5.2 Erzielte Ergebnisse 28

3 Zusammenfassung der Ergebnisse 30

4 Verwendung der Zuwendung 31

5 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit 31

6 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU und innovativer Beitrag und industrielle Anwendungsmöglichkeiten 31

6.1 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU 31

6.2 Innovativer Beitrag und industrielle Anwendungsmöglichkeiten 32

7 Fortschreibung des Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft und Einschätzung der Realisierbarkeit dieses Transferkonzepts 32

7.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen 32

7.2 Geplante Transfermaßnahmen 33

8 Literaturverzeichnis 34

Bildverzeichnis

Abbildung 1: Werkzeugverschleiß bei der Außenlängsdrehbearbeitung von C60 nach ISO3685 1

Abbildung 2: Verschleißentwicklung in Abhängigkeit der Abfolgesequenz des Vorschubs..... 2

Abbildung 3: Zu erwartender Werkzeugverschleiß bei der Prozesseinstellgrößenmodulation..... 5

Abbildung 4: Werkzeugverschleiß beim Referenzprozess 7

Abbildung 5: Aufbau der Simulation nach [BEB17]..... 8

Abbildung 6: Validierung der Simulation anhand der spezifischen Schnittkraft 9

Abbildung 7: Vergleich der gemessenen mit den simulierten Spanflächentemperaturen 9

Abbildung 8: Beschreibung der durchgeführten Modulation 11

Abbildung 9: Werkzeugverschleiß bei Schnittgeschwindigkeitsmodulation 12

Abbildung 10: Modulation des Vorschubs mit einer Periodendauer von 15 min..... 13

Abbildung 11: Verschleiß bei kombinierter Modulation..... 13

Abbildung 12: Entwicklung des Freiflächenverschleißes modulierter Prozesse im Vergleich zu konstanten Prozessen mit verschiedenen mittleren Prozessstellgrößen 14

Abbildung 13: Werkzeugverschleiß bei Variation des Neigungswinkels..... 16

Abbildung 14: Werkzeugverschleiß bei Variation des Einstellwinkels 17

Abbildung 15: Potential einer Neigungs- und Einstellwinkelmodulation..... 18

Abbildung 16: Ansätze zur Entwicklung einer Auslegungsmethode 19

Abbildung 17: Verschleißrate in Abhängigkeit der Freiflächentemperatur 20

Abbildung 18: Auswertung der Prozessgrößen und Parametrierung des Verschleißmodells 21

Abbildung 19: Verschleißrate stationärer und modulierter Prozesse 21

Abbildung 20: Vergleich des berechneten und experimentell bestimmten Verschleißes modulierter Prozesse 22

Abbildung 21: Methode für die Auslegung von Prozessstellgrößenmodulation beim Außenlängsdrehen 23

Abbildung 22: Verifizierung der Methode für die Zerspanung von 42CrMo4 23

Abbildung 23: Standzeitgeraden und Grenzgeschwindigkeit der untersuchten Werkstoffe 24
Abbildung 24: Modulation in Abhängigkeit der Grenzgeschwindigkeit bei der Bearbeitung von 100Cr6 25
Abbildung 25: Zusammenhang zwischen Grenzgeschwindigkeit und Werkstoffhärte 25
Abbildung 26: Vergleich der experimentellen und berechneten Standzeiten für die Bearbeitung von X40CrMoV5-1 26
Abbildung 27: Vergleich des Verschleißes stationärer und modulierter Drehprozesse bei der Bearbeitung von X40CrMoV5-1 27
Abbildung 28: Standzeitsteigerung beim Fräsen durch Modulation des Zahnvorschubs 28
Abbildung 29: Prozesskräfte während des Zahneingriffs bei konstanten und modulierten Prozessstellgrößen 29

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Durchgeführte Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft 32

Tabelle 2: Geplante Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft 33

Abkürzungsverzeichnis

Formelzeichen	Beschreibung	Einheit
A	Amplitude der Modulation	%
a_e	Arbeitseingriff	mm
Al_2O_3	Aluminiumoxid	-
a_p	Schnitttiefe	mm
A_u	Usui-Koeffizient	
B_u	Usui-Koeffizient	
CVD	Chemical Vapour Deposition	-
dW/dt	Verschleißrate	µm/s
D_{WZ}	Werkzeugdurchmesser	mm
f	Vorschub	mm
f_z	Zahnvorschub	mm
I	Intervalllänge der Modulation	mm
K	Kolkverhältnis	-
KB	Kolkbreite	µm
KM	Kolkmittenabstand	KM
KT	Kolktiefe	µm
PEG	Prozesseinstellgrößen	-
PVD	Physical Vapour Deposition	-
R_{th}	Theoretische Rautiefe	µm
T	Temperatur	°C
t_c	Schnittzeit	min
TiAlN	Titanaluminiumnitrid	-
TiCN	Titancarbonitrid	-

VB	Verschleißmarkenbreite	µm
v_c	Schnittgeschwindigkeit	m/min
$v_{c,Grenz}$	Grenzschnittgeschwindigkeit	m/min
v_f	Vorschubgeschwindigkeit	mm/min
WC	Wolframcarbid	
α	Freiwinkel	°
γ	Spanwinkel	°
κ	Einstellwinkel	°
λ	Neigungswinkel	°
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit	mm/s
σ_n	Kontaktspannung	N/mm²

1 Stand der Forschung und Technik

Verschleiß von Zerspanwerkzeugen bei der Drehbearbeitung

Die Verschleißformen bei der Drehbearbeitung sind in ISO 3685 definiert (siehe Abbildung 1, links). Diese dienen als Basis für die Bewertung und Quantifizierung des Werkzeugverschleißes. Des Weiteren zeigt Abbildung 1 den typischen Werkzeugverschleiß bei der Außenlängsdrehbearbeitung von C60 mittels unbeschichteter Hartmetall-Wendeschneidplatten in Abhängigkeit von der Schnittzeit.

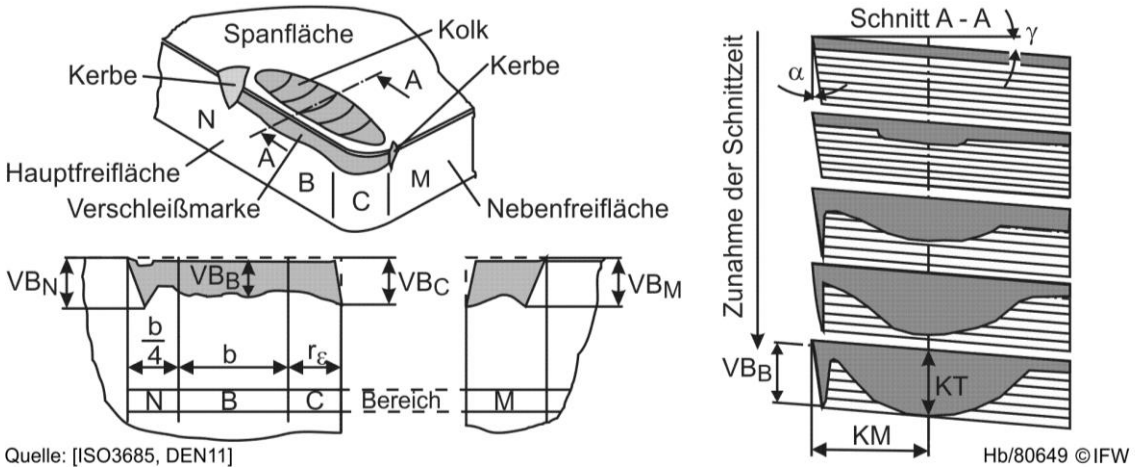


Abbildung 1: Werkzeugverschleiß bei der Außenlängsdrehbearbeitung von C60 nach ISO3685

In der Literatur wird der Einfluss konstanter Prozesseinstellgrößen auf den Werkzeugverschleiß bereits detailliert beschrieben [LEE71, LEN76, TLU78, BRO83]. Es wurde mehrfach gezeigt, dass die Prozesseinstellgrößen die Verschleißform an der Werkzeugschneide aufgrund sich ändernder Kontaktbedingungen beeinflussen. Da es in der industriellen Praxis vorkommt, dass die Prozesseinstellgrößen bei Einsatz desselben Werkzeugs geändert werden, untersuchten Jemielniak et al. [JEM85], inwieweit die Reihenfolge einer Prozessparametervariation einen Einfluss auf den Werkzeugverschleiß hat. Bei der Drehbearbeitung von C45 mit unbeschichteten Wendeschneidplatten stellten sie fest, dass die Verschleißentwick-

lung unter sich ändernden Prozessparametern von der Abfolgesequenz der Parameter abhängt. Der weitere Verschleißverlauf ist maßgeblich von dem bereits vorhandenen Verschleiß an der Werkzeugschneide abhängig (siehe Abbildung 2).

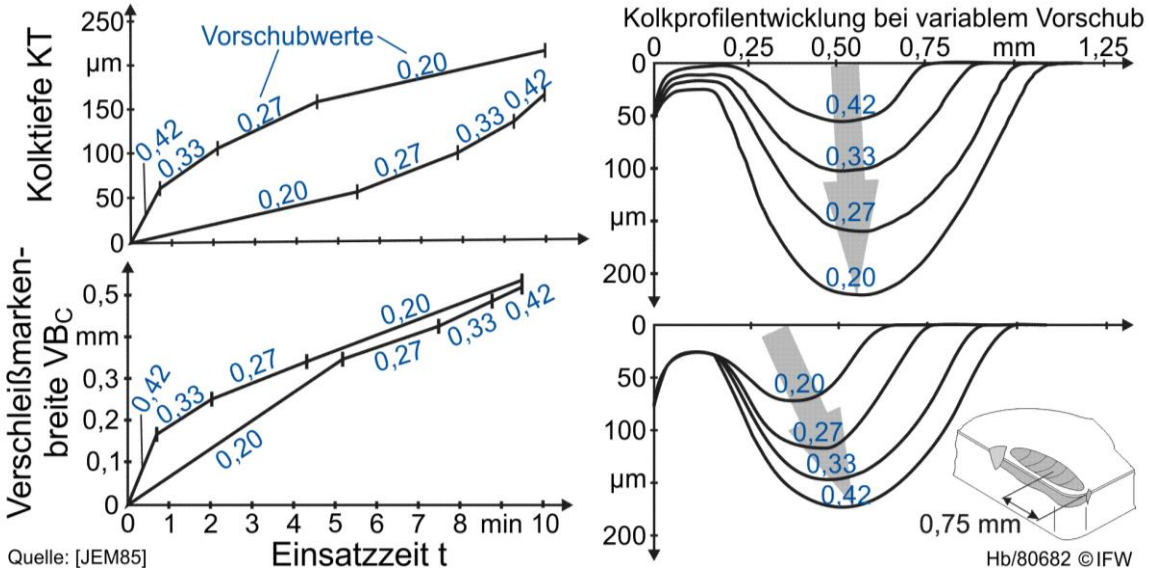


Abbildung 2: Verschleißentwicklung in Abhängigkeit der Abfolgesequenz des Vorschubs

Drehzahl- und Vorschubmodulation

Die Variation der Drehzahl während des Prozesses (**Drehzahlmodulation)** ist eine bekannte Methode zur Vermeidung von Ratterschwingungen. Bereits 1974 identifizierten Inamura et al. die Amplitude sowie die Frequenz der Drehzahlmodulation als Haupteinflussparameter auf die Prozessstabilität [INA74]. Diese Thematik wurde weiterhin insbesondere im Rahmen prognostizierender Modelle zur Vermeidung von instabilen Prozessen erforscht [ZAT08, SEG09, WU10, XIE12, OTT13, TOT13]. Der Werkzeugverschleiß bei der Drehzahl- bzw. Schnittgeschwindigkeitsmodulation wurde bisher kaum erforscht. Zudem zeigen Ergebnisse von Albertelli et. al., dass sich die Werkzeugstandzeit durch die Drehzahlmodulation insgesamt verringern kann. Bei der Drehbearbeitung von 39NiCrMo3 mit einer Härte von 255 HB wurde mit Drehzahlmodulation höherer Freiflächenverschleiß bei geringerem Kolkverschleiß beobachtet [ALB12]. Hieraus geht hervor, dass sich der Werkzeugverschleiß mit der Drehzahlmodulation ändert und somit die Werkzeugverschleißform steuerbar ist.

Die **Vorschubmodulation** wurde bereits beim Fräsen erfolgreich eingesetzt. Fortin et al. [FOR91] stellten fest, dass die Werkzeugstandzeit durch die aus der Vorschubmodulation resultierende Variation der Kontaktlänge des Spans auf der Werkzeugspanfläche erhöht werden kann. Auf Basis dieser Erkenntnisse untersuchten Balazinski et. al. den Einfluss der Vorschubmodulation auf den Werkzeugverschleiß beim Planfräsen. Bei der Zerspanung von X5CrNiCuNb16-4 zeigten sie, dass der Werkzeugverschleiß (Kolktiefe) im Vergleich zum Referenzprozess ohne Modulation bei gleichem Zeitspanvolumen um 30 % reduziert wird [BAL94]. Anschließend führten Balazinski et al. Untersuchungen bei der Planfräsbearbeitung von Inconel 600 mit Vorschubmodulation durch. Die Ergebnisse zeigten, dass die beiden einflussreichsten Parameter zur Reduktion des Werkzeugverschleißes die Amplitude sowie die Dauer einer einzelnen Vorschubstufe sind. Eine zehnprozentige sinusförmige Vorschubmodulation um den optimalen Vorschub, mit 5-Sekunden-Intervallen bei konstantem Vorschub, erhöhte die Werkzeugstandzeit um mindestens 30 % [BAL95].

Zu berücksichtigen ist, dass die Oberflächengestalt durch eine Vorschubmodulation beeinflusst wird. Für eine näherungsweise Prognose der Rauheit kann die theoretische Rauheit nach Bauer [BAU34] berechnet werden. Diese berücksichtigt den Einfluss des Vorschubs f sowie des Eckenradius des Werkzeugs r_ε und beziffert die theoretisch erreichbare Untergrenze der Rauheit, die aus kinematischer Sicht nicht unterschritten werden kann. Moll [MOL39], Issajew [ISS52] und Brammertz [BRA61] erweiterten dieses Modell. Brammertz [BRA61] weist bei geringen Vorschüben einen Anstieg der Rautiefen nach. Dies wird durch die Abhängigkeit der Rauheit von der Mindestspanungsdicke h_{min} erklärt.

Zudem beeinflusst die Variation der Prozesseinstellgrößen die Ausbildung von Eigenspannungen in der Randzone des Werkstücks. Beim Außenlängsdrehen von gehärtetem 100Cr6 (60-62 HRC) beispielsweise werden die Eigenspannungen in der Oberfläche mit steigendem Vorschub von f = 0,02 mm bis f = 0,13 mm in Richtung Zug (von 150 MPa bis 400 MPa) verändert. Des Weiteren wird aufgrund steigender Prozesskräfte das Druckeigenspannungsmaximum in größere Bauteiltiefen verschoben. Der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf den Eigenspannungstiefenverlauf ist hingegen tendenziell gering [BOR01, BRE11]. Da der Eigenspannungszustand in der Randzone im Wesentlichen bei der Endbearbeitung relevant ist, steht die Eigenspannungsausbildung durch Prozessstellgrößenmodulation nicht im Fokus des Vorhabens.

Standzeiterhöhung durch Variation des Freiwinkels und des Einstellwinkels

Das thermomechanische Belastungskollektiv der Schneide kann ebenfalls durch Veränderung der geometrischen Eingriffsgrößen Freiwinkel und Einstellwinkel verändert werden. Hintze et al. führten Untersuchungen mit einer **Variation des Freiwinkels** zur Steigerung der Werkzeugstandzeit durch. Bei der Drehbearbeitung von WC-25Co-Hartmetall wurde nach Erreichen des Standzeitkriteriums (bspw. VB = 150 µm) der Freiwinkel vergrößert. Hierdurch wird die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück verkleinert, die sich durch den zunehmenden Werkzeugverschleiß vergrößert hat. Die Reibung und die Zerspankraft werden durch die Neupositionierung der Schneide gesenkt. Anschließend konnte das Werkzeug weiter eingesetzt und so eine höhere Standzeit erzielt werden [HIN05, HIN07, MÖL09].

Durch Verwendung einer zusätzlichen Achse (B-Achse) innerhalb einer Drehmaschine konnten Degen et al. bei der Zerspanung von X3CrNiMo13-4 mit runden Wendeschneidplatten zeigen, dass eine **Variation des Einstellwinkels** zu einer Erhöhung der Werkzeugstandzeit führt. Untersuchungen hinsichtlich des Werkzeugverschleißes wiesen eine geringere Ausprägung der Verschleißformen auf. Dies wird auf eine Verteilung des Verschleißes über die Schneidkante zurückgeführt. Hierbei ist die zusätzlich eingesetzte Schneidenlänge proportional zur Standzeiterhöhung [DEG14].

Fazit: Der Stand der Forschung zeigt das hohe Potential der Prozesseinstellgrößenmodulation auf. Insbesondere die Vorschubmodulation kann zu einer signifikanten Erhöhung der Werkzeugstandzeit um 30 % führen. Jedoch wurden im Rahmen von Verschleißuntersuchungen mit Drehzahlmodulation auch geringere Werkzeugstandzeiten ermittelt [ALB12]. Eine Kombination aus Schnittgeschwindigkeits- und Vorschubmodulation wurde bisher nicht untersucht. Zudem ist unklar, inwieweit die Produktivität bei gleicher Werkzeugstandzeit erhöht werden kann. Somit ist eine effiziente Vorgehensweise bei der Auslegung eines Prozesses mit Einstellgrößenmodulation aktuell nicht verfügbar.

1.1 Problemstellung

Bei der spanenden Bearbeitung von Metallen treten hohe thermomechanische Beanspruchungen des Schneidkeils auf, die zu Werkzeugverschleiß führen. Dabei bilden sich charakteristische Verschleißformen aus. Diese Verschleißformen hängen von den Stoffen des Wirkpaares Werkzeug-Bauteil, der Werkzeuggeometrie und von den Bedingungen, unter denen der Zerspanprozess abläuft, ab. In der Literatur wird zwischen den Verschleißformen Freiflächenverschleiß, Kolkverschleiß, Kerbverschleiß und Ausbruch unterschieden.

Die Beanspruchung des Schneidkeils bei der Drehbearbeitung im kontinuierlichen Schnitt ist nahezu konstant. Hierdurch breitet sich der Verschleiß im Bereich der höchsten Belastung am Schneidkeil kontinuierlich aus. Durch Kolkverschleiß bildet sich die sogenannte Kolklippe, die mit zunehmendem Verschleiß mechanisch geschwächt wird. Dies kann zu einem Schneidkantenbruch führen, der ein Totalversagen des Werkzeugs bedeutet und das Werkstück maßgeblich beschädigen kann. Demgegenüber kann Freiflächenverschleiß zu einer Reduktion der Oberflächengüte sowie einer Schädigung der Randzone führen.

Ansatz dieses Forschungsprojekts ist es, die maximal wirkende thermische und mechanische Belastung an der Werkzeugschneide so zu verteilen, dass Freiflächen- und Kolkverschleiß gleichmäßig entlang der Schneide auftreten. Hierdurch soll der Freiflächenverschleiß reduziert und Schneidkantenbrüche durch Kolklippenbildung verringert werden, um somit höhere Werkzeugstandzeiten zu erreichen. Dies wird über eine zyklische Variation der Stellgrößen „Schnittgeschwindigkeit“ und „Vorschub“ während des Zerspanprozesses erreicht. Hierzu wird lediglich der NC-Code an der Maschine verändert. Zur Umsetzung dieser Technologie in Unternehmen sind daher keine Investitionen für Aggregate, Aktuatoren oder Werkzeuge erforderlich. In Voruntersuchungen konnte durch Einsatz dieser sogenannten Prozesseinstellgrößenmodulation bereits eine Erhöhung der Werkzeugstandzeit um 34 % nachgewiesen werden.

Lässt sich der Werkzeugverschleiß durch die Prozesseinstellgrößenmodulation verringern, können alternativ die Prozesseinstellgrößen erhöht werden. Arbeitshypothese ist, dass so im Vergleich zum Referenzprozess ein im Mittel höheres Zeitspanvolumen im Prozess ermöglicht wird. Insbesondere die Erhöhung der Prozesseinstellgrößen bietet dabei großes Potential zur Reduktion der Fertigungskosten, da bereits eine Steigerung der Produktivität um 20 % zu einer Reduktion der Herstellkosten von bis zu 15 % führen kann [CHR14]. Je nach Zielsetzung bei einer Fertigungsaufgabe können so die Werkzeugkosten minimiert, die Produktivität maximiert oder ein Kompromiss aus beidem ermöglicht werden.

Obwohl die Drehzahlmodulation seit 1974 und die Vorschubmodulation vereinzelt seit 1993 wissenschaftlich untersucht werden, sind die Prozesse in der Industrie wenig verbreitet (siehe Stand der Forschung). Maßgeblicher Grund hierfür ist der mangelnde Kenntnisstand bei der Auslegung einer Stellgrößenmodulation. Des Weiteren sind der erhöhte Programmieraufwand an den Maschinen, variierende Oberflächengestalten am Bauteil, sowie je nach Prozess höhere Anforderungen an die Maschinensteifigkeit und die Achsregelung zu nennen. Zu beachten ist zudem, dass eine Prozesseinstellgrößenmodulation zu einer thermischen oder mechanischen Überlast des Werkzeugs führen kann, welche die Werkzeugstandzeit reduzieren kann. Aus den genannten Gründen ist eine eigenständige Auslegung der Prozesseinstellgrößenmodulation für kleine und mittelständische Unternehmen kostenintensiv und risikoreich. Maschinen- und Personalkapazitäten müssten für Untersuchungen bereitgestellt werden, um die notwendigen Erkenntnisse für eine gezielte und effiziente Aus-

legung der Stellgrößenmodulation inklusive Einschätzung der entstehenden Werkstückoberflächengestalt zu generieren. Zudem können Bauteile und Maschinen durch Überlast am Werkzeug beschädigt werden und Folgekosten verursachen. Im Rahmen von grundlagenorientierten Untersuchungen sollen in diesem Vorhaben die Potentiale der Prozesseinstellgrößenmodulation für einen breiten industriellen Anwendungsbereich nutzbar gemacht werden.

1.2 Forschungsziel

Auf Basis des Stands der Technik sowie der Voruntersuchungen wird die **Arbeitshypothese** aufgestellt, dass eine gezielte Verteilung der maximalen thermischen und mechanischen Belastung an der Werkzeugschneide zu einer Homogenisierung des Belastungskollektivs führt, so dass eine höhere Produktivität und höhere Werkzeugstandzeiten ermöglicht werden. *Abbildung 3: Zu erwartender Werkzeugverschleiß bei der Prozesseinstellgrößenmodulation* zeigt beispielhaft den Verschleiß an Span- und Freifläche einer Wendeschneidplatte mit und ohne Prozesseinstellgrößenmodulation.

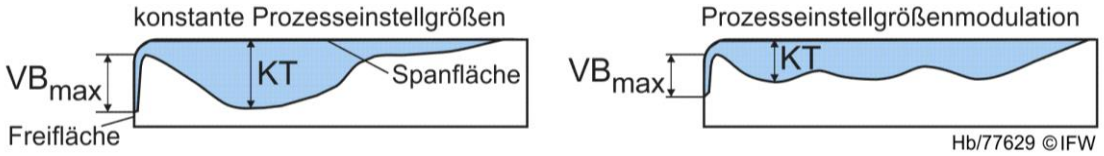


Abbildung 3: Zu erwartender Werkzeugverschleiß bei der Prozesseinstellgrößenmodulation

Ziel des Forschungsvorhabens ist die Erstellung einer Methode zur belastungsoptimalen Auslegung der Prozesseinstellgrößenmodulation am Beispiel der Außenlängsdrehbearbeitung. Hieraus ergeben sich die folgenden Teilziele:

- Empirische und numerische Ermittlung des lokalen thermomechanischen Belastungsprofils ohne Modulation
- Identifikation signifikanter Parameter für den Werkzeugverschleiß bei Schnittgeschwindigkeits- und Vorschubmodulation
- Potentialanalyse von Einstellwinkel- und Neigungswinkelmodulation
- Erstellung und Validierung einer Methode zur belastungsoptimalen Auslegung einer Prozesseinstellgrößenmodulation
- Stichprobenartige Prüfung der Übertragbarkeit der erstellten Methode auf einen Fräsprozess.

2 Gegenüberstellung der durchgeführten Arbeiten zu den erzielten Forschungsergebnissen

2.1 AP1: Referenzprozesse und Erstellung FE-Modell

Ziel des ersten Arbeitspakets ist es, Basiskennwerte aus Referenzprozessen ohne Modulation zu ermitteln. Weiterhin wird ein Finite-Elemente-Modell für den Prozess aufgebaut und validiert, um dieses im Verlauf des Vorhabens für die Prognose thermischer und mechanischer Lasten zu nutzen.

2.1.1 Durchgeführte Arbeiten

Als Referenzprozess wurde das Außenlängsdrehen von legiertem Vergütungsstahl 42CrMo4 (Werkstoffnummer: 1.7225) ohne Kühlschmierstoff betrachtet. Als Schneidwerkzeuge wurden beschichtete Wendeschneidplatten des Typs CNMG120408 eingesetzt. Alle experimentellen Untersuchungen wurden auf einer Dreh-Fräs-Maschine vom Typ NTX 1000 der Fa. DMG Mori durchgeführt. Das mechanische Belastungsprofil wurde mit einem in der Spindel integrierten Kraftmesssystem bestimmt [DEN17].ermittelt. Ausgehend von für das Werkzeug empfohlenen Werten wurden die Schnittgeschwindigkeit und der Vorschub in jeweils fünf Stufen variiert. Zusätzlich wurde die Temperatur im Werkzeug an neun Stellen mit einem Zwei – Farbenpyrometer gemessen. Von diesen Messstellen erfolgt eine Extrapolation der Temperatur in Richtung der Frei- und der Spanfläche. Hierdurch konnten 2D-Temperaturfelder aufgezeigt und mit nachfolgenden numerischen Berechnungen verglichen werden. Zur Aufnahme der Referenzprozesse wurden Zerspanversuche bei verschiedenen Schnittgeschwindigkeiten und Vorschubwerten durchgeführt. Die Schnittgeschwindigkeit wurde zwischen 150 und 350 m/min variiert, der Vorschub zwischen 0,08 und 0,2 mm. In diesem Prozessstellgrößenfenster wurde ein zentral zusammengesetzter Versuchsplan erstellt und der Verschleiß der Werkzeuge für jede der 13 Parameterkombination ermittelt. Parallel zu den experimentellen Untersuchungen wurde ein zweidimensionales Finite-Elemente-Modell mit der Software „Deform“ erstellt und durch Abgleich mit den experimentellen Untersuchungen validiert. Die Software sowie das Materialmodell für 42CrMo4 sind am IFW verfügbar. Das FE-Modell wurde maßgeblich dafür eingesetzt, die lokalen mechanischen und thermischen Belastungen am Schneidkeil zu berechnen. Insbesondere die Positionsänderung der maximalen Temperatur beziehungsweise maximalen mechanischen Belastung an Span- und Freifläche in Abhängigkeit der Prozessstellgrößen Schnittgeschwindigkeit und Vorschub wurden ermittelt.

2.1.2 Erzielte Ergebnisse

Zunächst wird der ermittelte Verschleiß der Referenzuntersuchungen betrachtet. In Abbildung 4 ist die Entwicklung der beiden identifizierten Verschleißformen, Kolkverschleiß und Freiflächenverschleiß, in Abhängigkeit der Prozesseinstellgrößen Schnittgeschwindigkeit v_c und Vorschub f über der Prozesszeit dargestellt.

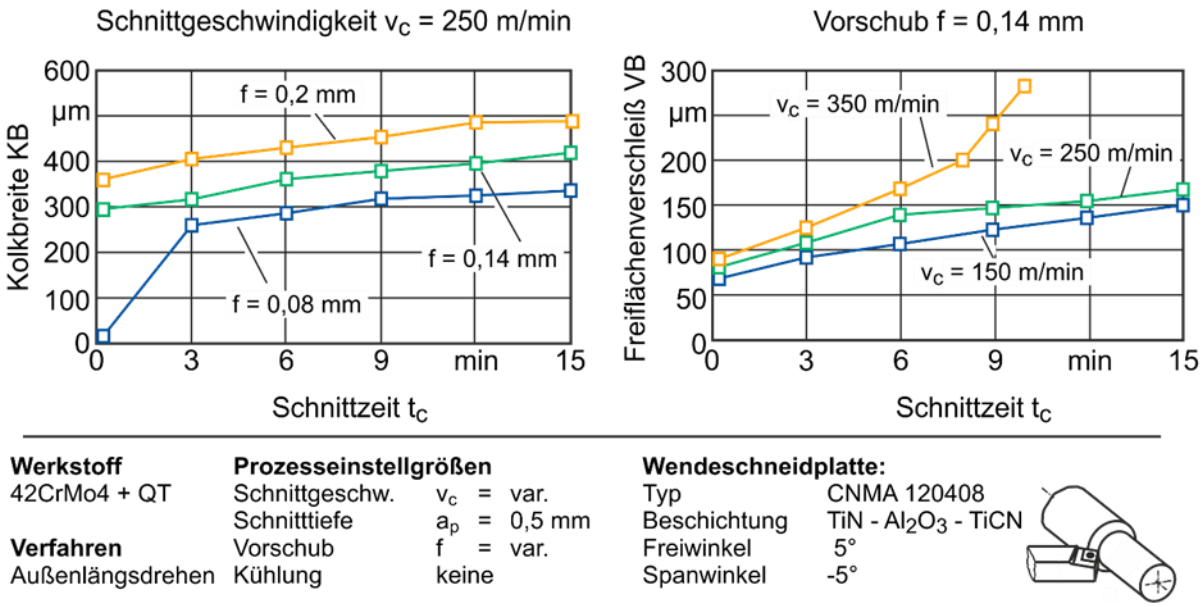


Abbildung 4: Werkzeugverschleiß beim Referenzprozess

Die Ergebnisse zeigen, dass die Kolkbreite maßgeblich vom eingesetzten Vorschub und der Freiflächenverschleiß von der Schnittgeschwindigkeit abhängen. Die Ausbildung des Kolkverschleißes hängt somit von der eingestellten Kombination aus Vorschub und Schnittgeschwindigkeit ab. Herauszustellen ist, dass ab Schnittgeschwindigkeiten von 300 m/min der Freiflächenverschleiß stark zunimmt und die Werkzeuge die angestrebte Standzeit von 15 min nicht mehr erreichen. Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass bei dem betrachteten Prozess der Freiflächenverschleiß standzeitbestimmend ist.

Parallel zu den experimentellen Verschleißuntersuchungen wurde eine Zerspansimulation mit der Software Deform umgesetzt. Für das verwendetet Material (42CrMo4 + QT) steht hierzu ein Materialmodell zur Verfügung. Die Kontaktbedingungen zwischen Werkzeug und Werkstück, wie zum Beispiel Reibung und Wärmeübergang, wurden nach [BEB17] gewählt. Um die Temperaturen im Werkzeug mit der Simulation berechnen zu können, wurde ein zweistufiger Simulationsansatz nach [BEB17] verfolgt (Abbildung 5).

Im ersten Schritt wurde eine Zerspansimulation durchgeführt und die an der Schneidkante des Werkzeugs vorherrschende Temperatur ausgewertet. Diese Temperatur wurde anschließend als Randbedingung für eine Wärmeübertragungssimulation genutzt. Vorteil dieses Vorgehens ist die kurze Rechenzeit der Wärmeübertragungssimulation. Nachdem die Temperaturverteilung im Werkzeug berechnet wurde, wurde die Simulation anhand der berechneten Prozesskräfte und Temperaturen validiert.

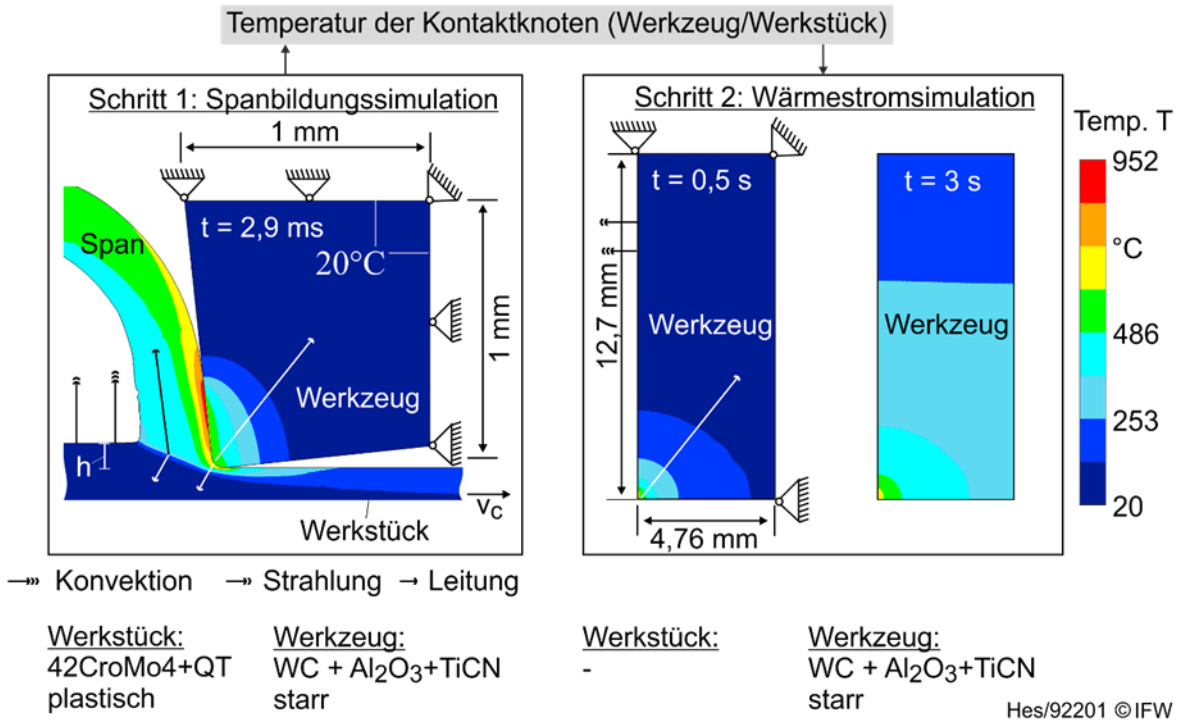


Abbildung 5: Aufbau der Simulation nach [BEB17]

Hierzu wurden parallel zu den Verschleißuntersuchungen die Prozesskräfte aufgezeichnet. Mit diesen Daten wurde die spezifische Schnittkraft berechnet und für die spätere Auslegung als Maß für die mechanische Belastung der Werkzeugschneide herangezogen. Weiterhin wurden diese Ergebnisse genutzt, um die FE-Simulation zu parametrieren. In den durchgeführten Untersuchungen ist die spezifische Schnittkraft ausschließlich eine Funktion der Spanungsdicke und steigt von 2.300 auf 2.900 N/mm² bei einer Erhöhung des Vorschubs von f = 0,08 auf 0,2 mm. Der Vergleich der gemessenen spezifischen Schnittkräfte, mit den simulierten spezifischen Schnittkräften ist in Abbildung 6 dargestellt. Dieser Vergleich zeigt, dass die Zusammenhänge zwischen Prozessstellgrößen und Kräften durch die Simulation qualitativ korrekt abgebildet werden und lediglich geringe Abweichungen zwischen Experiment und Berechnung auftreten. Die Berechnung der spezifischen Prozesskräfte erfolgte mit einer maximalen Abweichung von 12 % zum Experiment.

Neben der mechanischen Belastung der Werkzeuge wurde auch die thermische Belastung anhand von Temperaturmessungen bestimmt. Die gemessenen Temperaturen wurden mit der Software Matlab ausgewertet und die Temperatur in Richtung der Spanfläche extrapoliert. Die berechneten Temperaturfelder und der Vergleich der experimentell bestimmten mit den simulierten Spanflächentemperaturen ist in Abbildung 7 dargestellt.

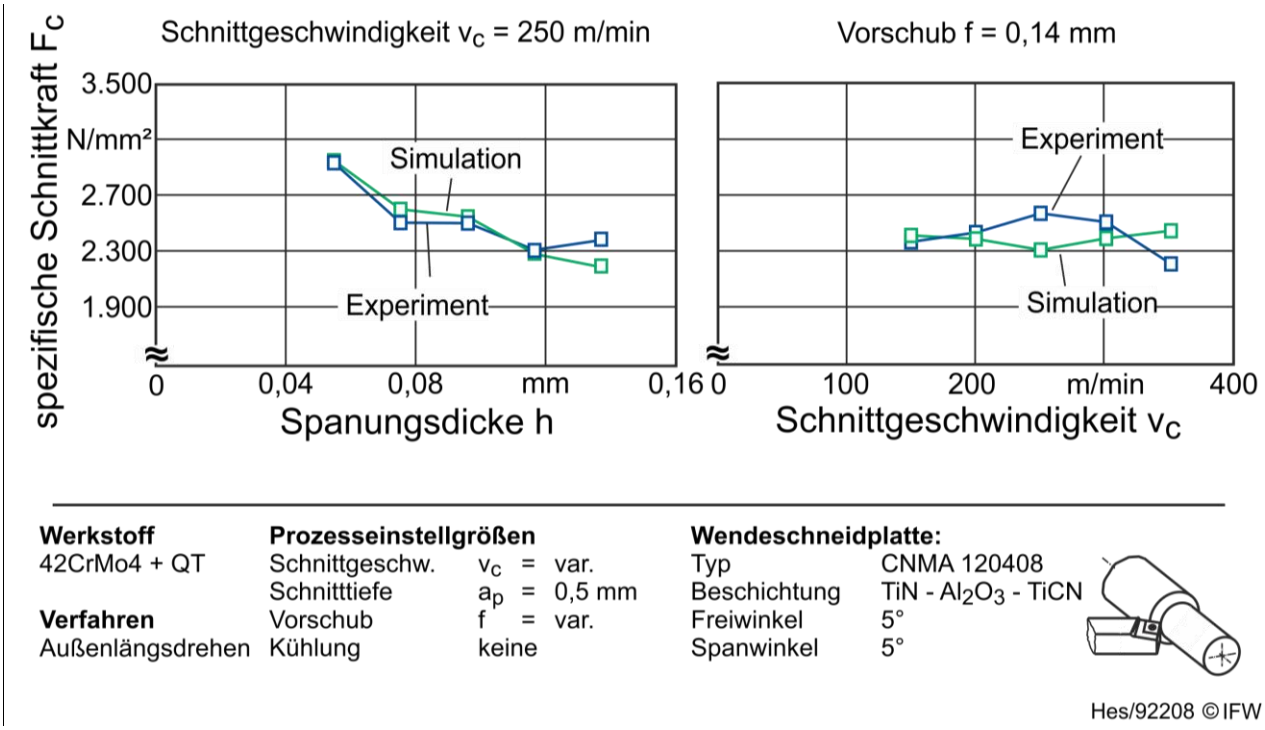


Abbildung 6: Validierung der Simulation anhand der spezifischen Schnittkraft

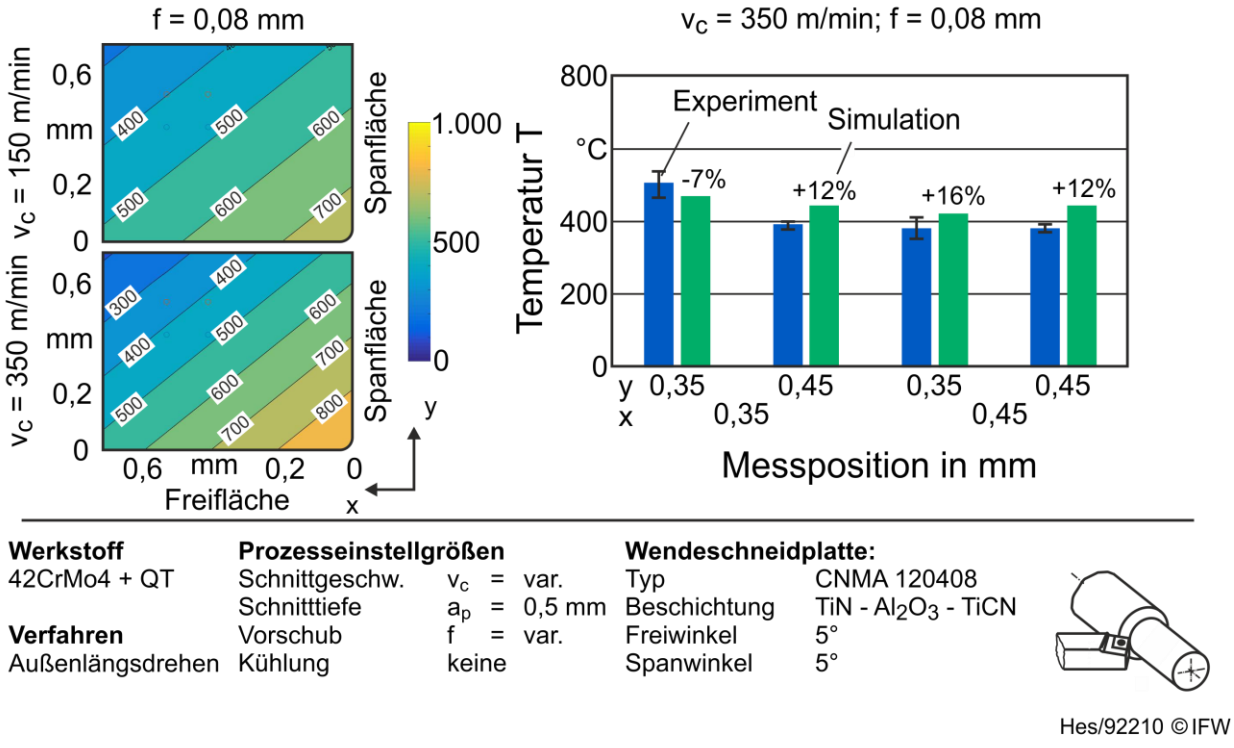


Abbildung 7: Vergleich der gemessenen mit den simulierten Spanflächentemperaturen

Die Temperatur an der Spanfläche wird zur Bewertung der thermischen Belastung herangezogen und hängt von der Schnittgeschwindigkeit ab. Im untersuchten Schnittgeschwindigkeitsbereich steigt die Temperatur an der Spanfläche von 950°C bei v_c = 150 m/min auf

1.200°C bei v_c = 350 m/min. Die Temperaturen an den betrachteten Messpositionen innerhalb des Schneidkeils konnten mit einem Fehler von maximal 16 % berechnet werden.

Das Ergebnis dieses Arbeitspaketes ist somit eine Datenbasis zum Verschleiß der Werkzeuge bei konstanten Prozessstellgrößen. Weiterhin sind die thermomechanischen Belastungen des Werkzeuges unter diesen Bedingungen bekannt. Auf Basis der experimentellen Ergebnisse wurde eine Zerspansimulation aufgebaut, mit der im weiteren Projektverlauf identifizierte Effekte überprüft werden können. Diese Simulation wurde anhand von experimentellen Kraft- und Temperaturmesswerten validiert.

2.2 AP2: Ermittlung geeigneter Modulationsparameter

Ziel des zweiten Arbeitspakets ist es, belastungsoptimierte Modulationsparameter zu ermitteln.

2.2.1 Durchgeführte Arbeiten

Auf Basis bisheriger Erkenntnisse zum Verschleißverhalten der Wendeschneidplatten wurden Schnittgeschwindigkeits- (AP 2.1) sowie Vorschubmodulationen (AP 2.2) durchgeführt. Hierbei wurden Wellenlänge, Amplitude und Steigung der Modulationsparameter variiert. Im Antrag wurde geplant, zusätzlich die Intervalle, in denen neue Werte für Vorschub und Schnittgeschwindigkeit berechnet werden, zu variieren. Die Berechnung sollte mit Matlab erfolgen und dann in den NC-Code der Maschine übertragen werden. Während der Bearbeitung des Arbeitspaketes erfolgte jedoch die Umsetzung der Modulation mittels sogenannter Synchronaktionen direkt in der Werkzeugmaschinensteuerung. Synchronaktionen sind in Sinumerik-Steuerungen (Siemens) hinterlegt und ermöglichen es zum Beispiel die Prozessstellgrößen im Interpolationstakt der Maschine neu zu berechnen. Dadurch kann die Änderung von Vorschub und Drehzahl immer mit der geringsten möglichen Diskretisierung erfolgen und diese Größe bei der Auslegung vernachlässigt werden. Nach der Modulation der einzelnen Größen wurden beide Prozessstellgrößen gleichzeitig moduliert. Durch eine gleichzeitige Modulation der Schnittgeschwindigkeit und des Vorschubs (AP 2.3) kann die Produktivitätsschwankung, die sich ansonsten aus der Prozessstellgrößenmodulation ergibt, verringert werden. Auf Basis der Ergebnisse bei der Modulation einzelner Prozessstellgrößen wurden kombinierte Modulationen der Größen Vorschub und Schnittgeschwindigkeit umgesetzt. Auch bei der kombinierten Modulation wurde die Intervalllänge (10 s und 15 min) sowie die Amplitude der Modulation variiert. Darüber hinaus wurde jeweils einmal gleich- (beide Größen steigend bzw. fallend) und einmal gegengerichtet (eine Größe steigend, eine fallend) moduliert. Ziel ist es, das thermomechanische Belastungskollektiv so auszulegen, dass sich der Verschleiß möglichst gleichmäßig auf der Schneide verteilt, und gleichzeitig die Produktivität maximal ist.

2.2.2 Erzielte Ergebnisse

Im ersten Schritt wurde eine Methode zur Beschreibung der Modulation formuliert. Diese Methode dient einerseits der Beschreibung der erzielten Ergebnisse und wird andererseits auch für die spätere Entwicklung einer Auslegungsmethode benötigt. Abbildung 8 stellt diese Beschreibungsmethode dar.

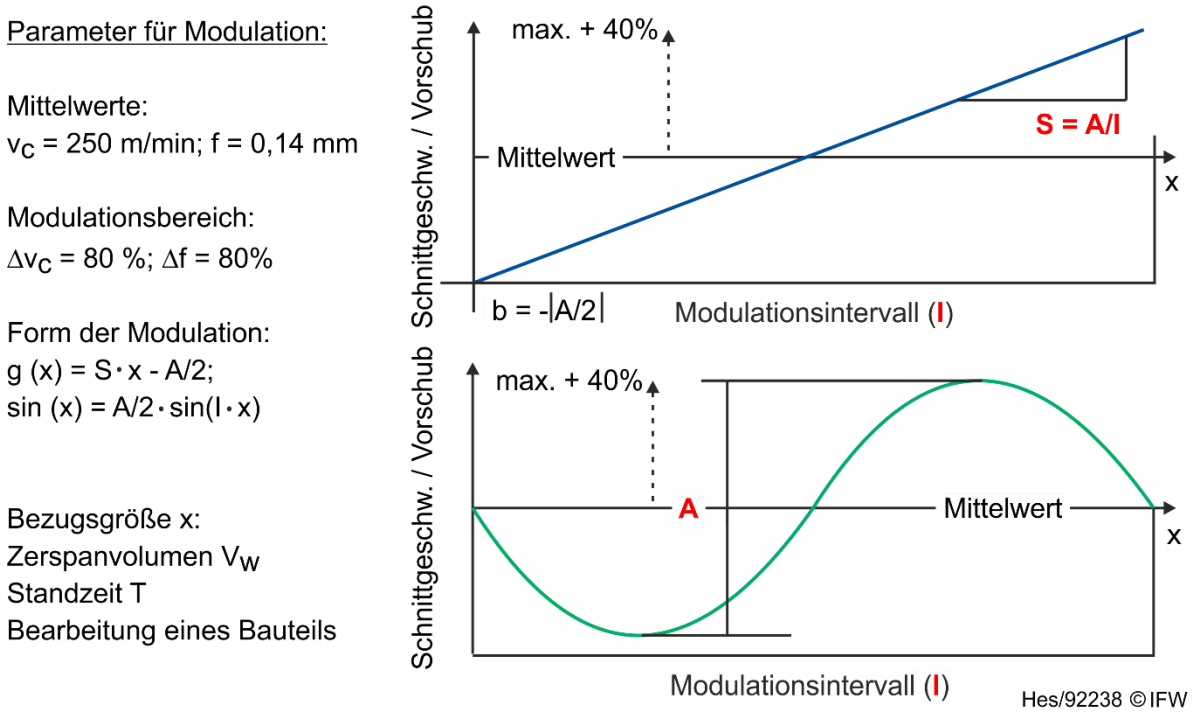


Abbildung 8: Beschreibung der durchgeführten Modulation

Ausgehend von einem mittleren Prozess werden die Prozessstellgrößen moduliert. Der dazu verwendbare Modulationsbereich ergibt sich aus den technologischen Grenzen. Diese sind zum Beispiel die maximale thermische und mechanische Belastung des Werkzeugs oder Anforderungen an die spätere Bauteilqualität. Im Anschluss daran muss die Form der Modulation festgelegt werden. Die Modulation lässt sich durch die Amplitude (A) und ein Modulationsintervall (I) beschreiben. Das Modulationsintervall wiederum bezieht sich auf eine Bezugsgröße (x). Diese kann beispielsweise die Standzeit T, ein definiertes Zerspanvolumen V_w oder die Zeit zur Bearbeitung eines Bauteils sein.

Anhand dieses Beschreibungsmodells wurden im folgenden Schritt zunächst Schnittgeschwindigkeits- und Vorschubsmodulationen ausgelegt. Als Mittelwert wurde v_c = 250 m/min und f = 0,14 mm gewählt. Der Modulationsbereich beträgt für beide Größen +/- 40 % um den Mittelwert. Variiert wurde die Amplitude (20 bzw. 40 % um den Mittelwert) und die Intervalllänge (10 s, 40 s, 15 min). Bei langen Modulationsintervallen kann ein Standzeitvorteil erzielt werden. Das Ergebnis dieser Untersuchung ist in Abbildung 9 dargestellt. Durch eine abnehmende Schnittgeschwindigkeit gegen Standzeitende, wenn die Werkzeugtemperatur durch Verschleiß ohnehin erhöht ist, kann der Freiflächenverschleißfortschritt deutlich reduziert werden. Signifikanter Kolkverschleiß wurde aufgrund der gewählten CVD-Beschichtung des Werkzeugs nicht festgestellt. Eine steigende Schnittgeschwindigkeit hingegen erhöht den Verschleiß. Um den Einfluss der Form der Modulation

zu untersuchen, wurde das Experiment mit sinusförmigen und linearen Variationen der betrachteten Prozessstellgrößen durchgeführt. Bei sinusförmiger Modulation ist die Schnittgeschwindigkeit zum Standzeitende höher als bei der linearen Modulation. Dadurch wird der Effekt dieser Form der Modulation reduziert. Allerdings gilt für beide Modulationsformen, dass eine zu Anfang der Einsatzzeit gesteigerte Schnittgeschwindigkeit, die mit steigender Einsatzzeit reduziert wird, zu Verschleißvorteilen gegenüber kontinuierlichen Prozessstellgrößen führt.

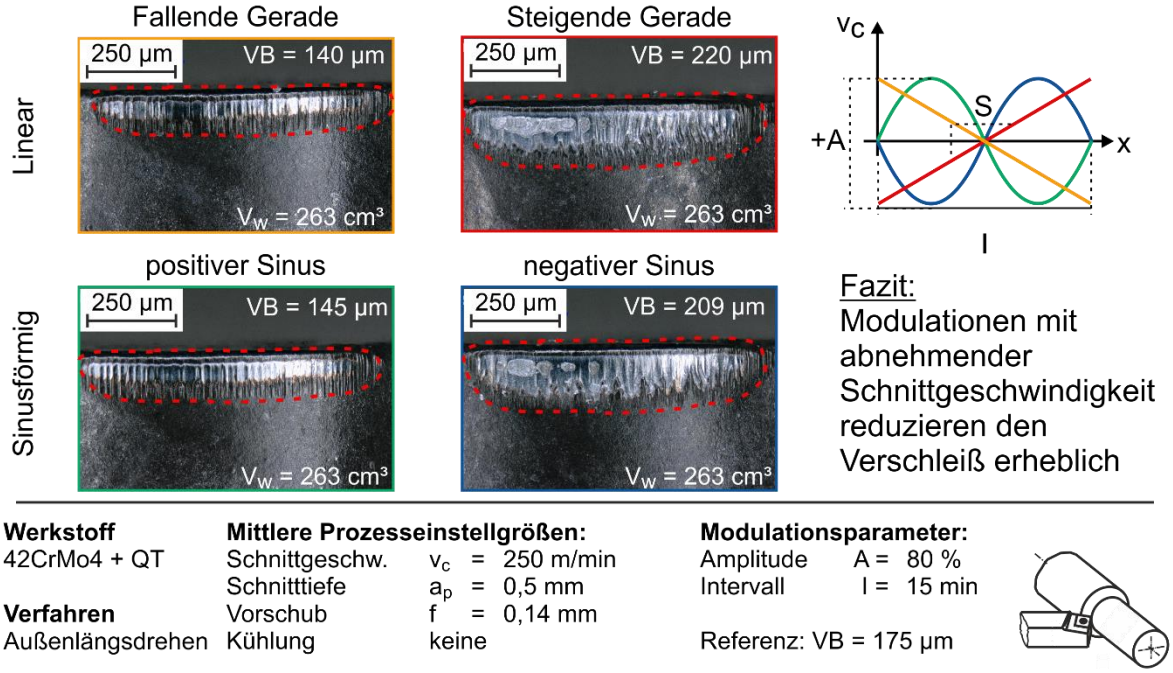


Abbildung 9: Werkzeugverschleiß bei Schnittgeschwindigkeitsmodulation

In gleicher Weise wie bei der Schnittgeschwindigkeitsmodulation wurden Vorschubmodulationen durchgeführt. Im Ergebnis kann mit einer Modulation des Vorschubs eine Beeinflussung der Kolkausbildung erreicht werden. Durch Anteile geringerer Vorschübe wird die Kolkbreite reduziert. Die Kolktiefe nimmt in der Regel ab. Eine Ausnahme stellt die Modulation mit einer Intervalllänge von 15 min dar, bei der der Vorschub abnimmt (Abbildung 10).

Durch lange Kontaktzeiten bei niedrigem Vorschub bildet sich unter diesen Bedingungen eine Kolkmulde nahe der Schneidkante aus. Zusammenfassend kann zur Vorschubmodulation festgehalten werden, dass die Ausbildung des Kolkverschleißes durch diese beeinflusst werden kann. Kolkverschleiß ist bei dem untersuchten Prozess jedoch nicht Standzeit bestimmend, daher stellt sich kein Effekt auf die Standzeit ein.

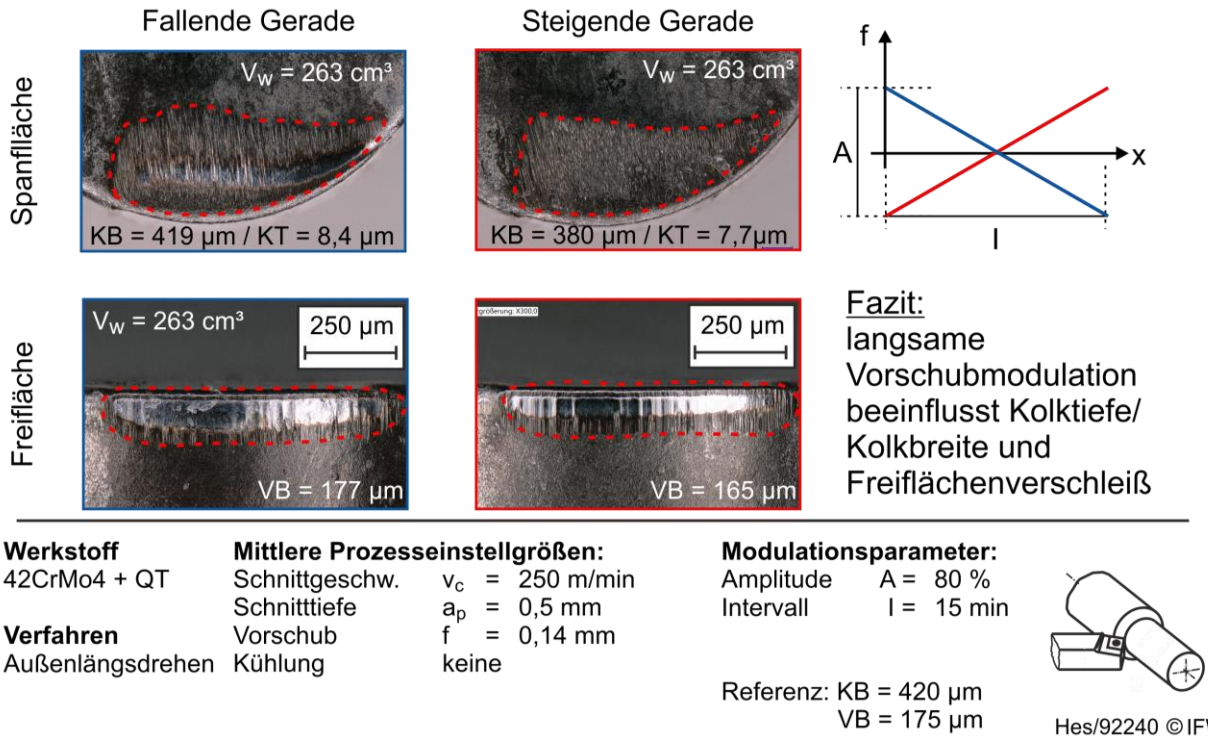


Abbildung 10: Modulation des Vorschubs mit einer Periodendauer von 15 min

Die bei der Einzelmodulation beobachteten Effekte lassen sich auch bei der kombinierten Modulation bestätigen. Starken Einfluss hat dabei, ob die Prozessstellgrößen in die gleiche oder entgegengesetzte Richtung moduliert werden. Abbildung 11 zeigt diesen Effekt für eine lineare Modulation mit einer Intervalllänge von 15 min.

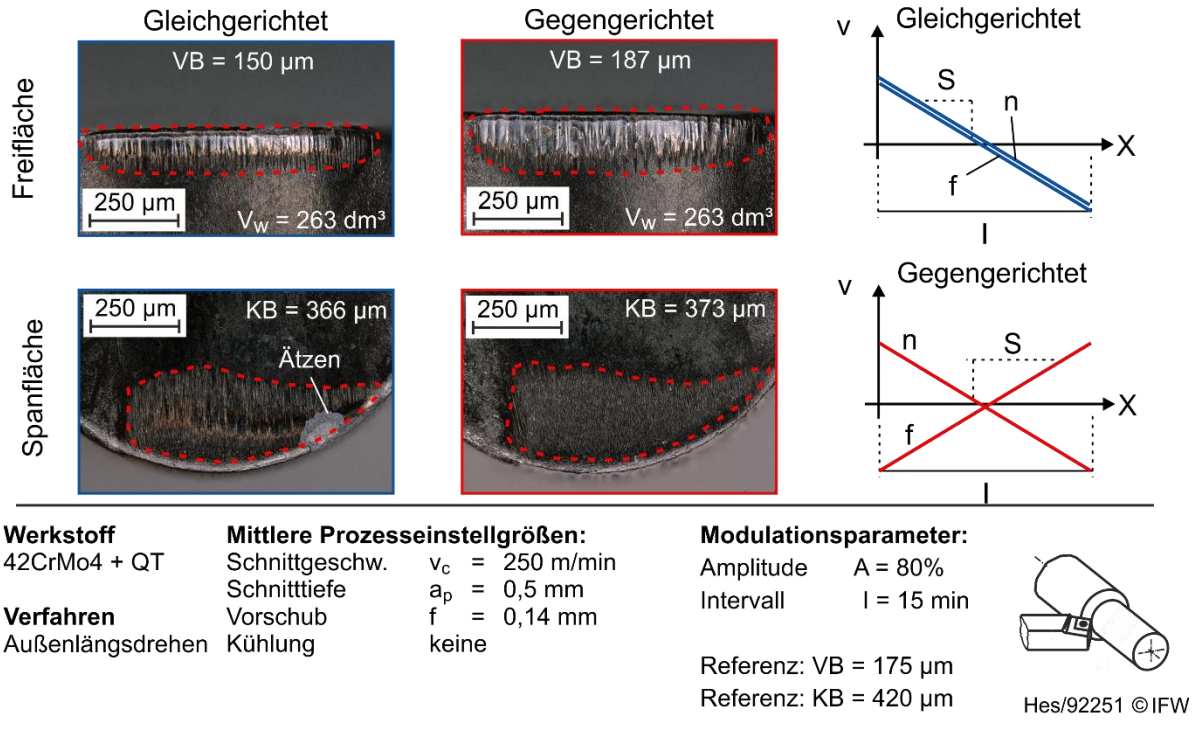


Abbildung 11: Verschleiß bei kombinierter Modulation

Bei der gegengerichteten Modulation ist der Freiflächenverschleiß gegenüber der gleichgerichteten Variation der Prozessstellgrößen erhöht. Außerdem ist die Kolktiefe geringer. Durch den geringen Vorschub ist die Produktivität zu Beginn geringer, als bei der gleichgerichteten Modulation. Dadurch steigt die Zeit, in der mit erhöhter Schnittgeschwindigkeit zerspant wird, und der Freiflächenverschleiß nimmt zu. Zum Ende der Einsatzzeit wird hingegen mit hohem Vorschub und niedriger Schnittgeschwindigkeit zerspant. Diese Kombination führt nur zu einer geringen Auskolkung der Spanfläche. Standzeitbestimmend ist jedoch der Freiflächenverschleiß. Daher kann für die gleichgerichtete Modulation von einer Standzeitsteigerung ausgegangen werden, da die Zeitspanne hoher Schnittgeschwindigkeit reduziert wird. Diese wiederum hat maßgeblichen Einfluss auf den Freiflächenverschleiß.

Für kurze Intervalllängen der Modulation, kleiner oder gleich der Vorschubbahnlänge (l_f = 150mm), können weitere Zusammenhänge beobachtet werden. Bei schneller Modulation (I = 10 s bzw. 40 s) stellt sich bei niedrigen mittleren Prozessstellgrößen der Verschleiß des Mittelwerts ein. Die Modulation hat für diese Fälle keinen Effekt auf die Standzeit der Werkzeuge. Diese Versuche liefern jedoch auch die Erkenntnis, dass das Werkzeug hohe Schnittgeschwindigkeiten auch gegen Standzeitende erträgt, die im kontinuierlichen Prozess zum vorzeitigen Werkzeugversagen nach T = 10 min führen. Werden die mittleren Prozessstellgrößen erhöht, können jedoch deutliche Standzeitvorteile erzielt werden. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 12 dargestellt. Erst bei einer Überschreitung einer bestimmten Schnittgeschwindigkeit, hier 250 m/min, kann ein Verschleißvorteil erzielt werden. Dieser steigt weiter an, je höher die mittlere Schnittgeschwindigkeit gewählt wird. Die Untersuchungen zeigen auch, dass dieser Effekt stärker ausfällt, wenn gleichzeitig der Vorschub verändert wird.

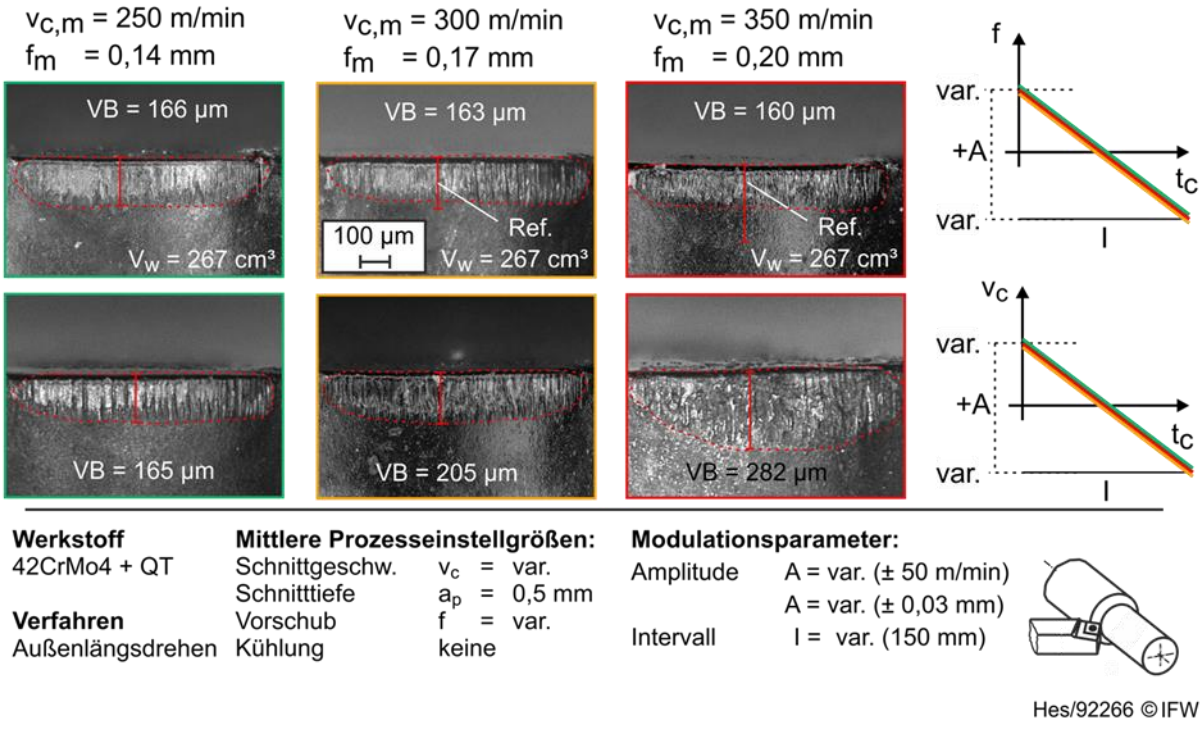


Abbildung 12: Entwicklung des Freiflächenverschleißes modulierter Prozesse im Vergleich zu konstanten Prozessen mit verschiedenen mittleren Prozessstellgrößen

Es ist zu erkennen, dass der Verschleiß bei einer mittleren Schnittgeschwindigkeit von v_c = 350 m/min am Standzeitende um bis zu 57 % gegenüber konstanten Prozessstellgrößen reduziert werden kann. Das Ziel dieses Arbeitspakets wurde somit erreicht.

In weiteren Arbeiten werden die gewonnenen Ergebnisse in AP2 mit Hilfe der aufgestellten FE-Simulation hinsichtlich der auf das Werkzeug einwirkenden Belastung überprüft. Zerspanuntersuchungen und FE-Simulation werden in AP4 für die Entwicklung einer Auslegungsmethode genutzt. In AP3 wird zunächst die bisher untersuchte Prozessstellgrößenmodulation um die Modulation von Neigungs- und Einstellwinkel erweitert.

2.3 AP3: Neigungswinkel- und Einstellwinkelmodulation

Ziel des Arbeitspaketes ist es durch eine Variation von Neigungs- und Einstellwinkel eine Reduzierung des Werkzeugverschleißes zu erreichen.

2.3.1 Durchgeführte Arbeiten

Der Neigungswinkel wurde über eine Bewegung der Y-Achse des Drehfräszentrums moduliert. Eine Variation des Einstellwinkels konnte durch die B-Achse der verwendeten Werkzeugmaschine erreicht werden. Zunächst wurde die Werkzeugbelastung für die erreichbaren Extremwerte der Winkelmodulation mit der in (AP1) aufgebauten Zerspansimulation berechnet. Die Extremwerte werden durch die Geometrie des Werkzeugs, die Kinematik der Werkzeugmaschine und die Abmessungen des Arbeitsraums bestimmt. Eine Anpassung des Neigungswinkels hat eine Änderung von Frei- und Spanwinkel zur Folge. Diese können direkt in der 2-D Simulation aus AP 1 berücksichtigt werden. Durch den Einstellwinkel wird das Verhältnis von Spanungsdicke zu Spanungsbreite verändert. Je kleiner der Einstellwinkel wird, desto größer wird die Spanungsbreite bei abnehmender Spanungsdicke. Der Spanungsquerschnitt bleibt jedoch gleich groß. Die Änderung der Spanungsdicke kann ebenso in der Simulation berücksichtigt werden. Anschließend wurden Zerspanuntersuchungen mit veränderten, aber konstanten Werkzeugwinkeln durchgeführt und der Verschleiß mit den simulierten Belastungen abgeglichen. Abschließend wurden Zerspanuntersuchungen durchgeführt, bei denen sowohl die Prozessstellgrößen, als auch die Werkzeugwinkel kontinuierlich verändert wurden und so das Potential der Werkzeugwinkelmodulation für eine weitere Steigerung der Werkzeugstandzeit aufgezeigt.

2.3.2 Erzielte Ergebnisse

Zunächst werden die Veränderungen der thermomechanischen Belastung und des Werkzeugverschleiß (Abbildung 13) in Abhängigkeit des Neigungswinkels diskutiert.

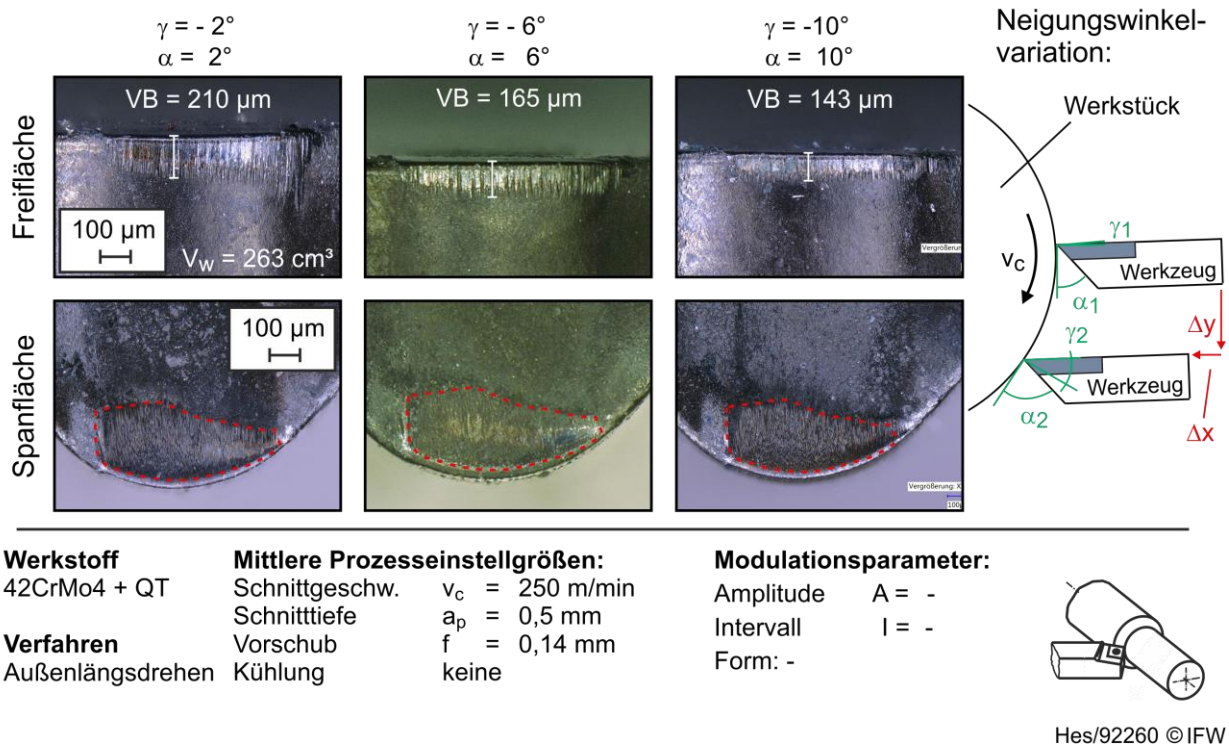


Abbildung 13: Werkzeugverschleiß bei Variation des Neigungswinkels

Für den kleinsten untersuchten Neigungswinkel von $\lambda = 2°$ beträgt auch der Freiwinkel lediglich $\alpha = 2°$. Dadurch resultiert eine große Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück an der Freifläche des Werkzeugs. Dies führt zu einem Anstieg der thermomechanischen Belastung des Werkzeugs und der Freiflächenverschleiß nimmt gegenüber der Referenz (Neigungswinkel $\lambda = 6°$) zu. Wird der Neigungswinkel vergrößert, wird die Belastung der Freifläche reduziert und der Freiflächenverschleiß nimmt ab. Gleichzeitig steigt der Betrag des negativen Spanwinkels proportional an. Die Schnittkraft steigt zwischen $\lambda = 2°$ und $\lambda = 10°$ um 300 N, das entspricht 100 %, an. Dadurch steigen die mechanische Belastung des Schneidkeils und damit das Risiko von Werkzeugbrüchen. Die Variation des Neigungswinkels zeigt somit Potential die dominierende Verschleißform Freiflächenverschleiß zu reduzieren. Die mechanische Belastung des Schneidkeils begrenzt die verwendbaren Neigungswinkel jedoch nach oben. Das Maximum hängt dabei vom verwendeten Werkzeug und den Bedingungen des Zerspanprozesses ab.

Im Folgenden soll in gleicher Weise die Wirkung einer Einstellwinkelmodulation auf die Belastung des Werkzeugs und den resultierenden Werkzeugverschleiß diskutiert werden. Vergleicht man den Verschleiß der Werkzeuge für einen Einstellwinkel $\kappa = 92°$ und $\kappa = 98°$ zeigt sich, dass kleine Einstellwinkelveränderungen keinen Einfluss auf den Betrag des Freiflächenverschleiß haben (Abbildung 14).

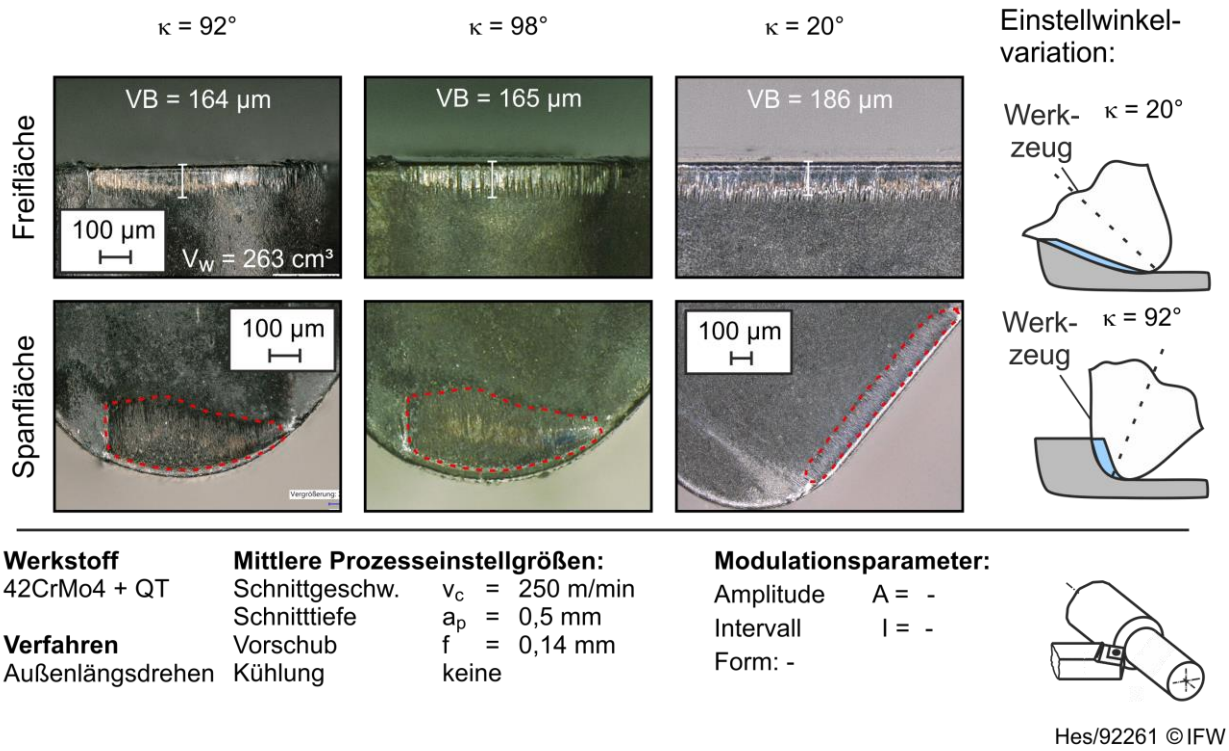


Abbildung 14: Werkzeugverschleiß bei Variation des Einstellwinkels

Die daraus resultierende Änderung der Spanungsquerschnittsform ist gering und auch die thermomechanische Belastung des Werkzeugs ändert sich nicht. Es kommen jedoch durch die Änderungen des Einstellwinkels andere Bereiche des Werkzeugs in den Eingriff. Diese Verteilung des Verschleißes auf einen weiteren Bereich birgt das Potential die Standzeit des Werkzeugs zu erhöhen. Wird der Einstellwinkel in weiten Bereichen verändert, verändert sich auch das Verschleißverhalten. Bei einem Einstellwinkel $\kappa = 20°$ wird die Spanungsdicke deutlich reduziert und die Spanungsbreite nimmt zu (Abbildung 14, rechts). Aufgrund der reduzierten Spanungsdicke ist ferner eine Reduktion des Kolkverschleißes zu verzeichnen.

Im letzten Schritt wurden in diesem Arbeitspaket die Modulationen von Prozessstellgrößen und Werkzeugwinkeln umgesetzt. Das Ergebnis dieser Untersuchungen ist zusammenfassend in Abbildung 15 dargestellt. Die Modulation der Prozessstellgrößen wurde in allen dargestellten Untersuchungen gleich durchgeführt. Zu Beginn jeder Werkzeugbahn wurde eine Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 350$ m/min eingestellt, die zum Ende der Bahn auf 250 m/min abfällt. Der Vorschub f wurde gleichgerichtet zur Schnittgeschwindigkeit von f = 0,2 mm auf f = 0,14 mm reduziert. In schwarz dargestellt ist die Referenz mit einem Verschleiß von VB = 205 µm. Durch eine reine Prozessstellgrößenmodulation kann der Verschleiß um 28% reduziert werden (roter Balken). Werden zusätzlich die Werkzeugwinkel kontinuierlich verändert, kann der maximale Freiflächenverschleiß um weitere 17% reduziert werden.

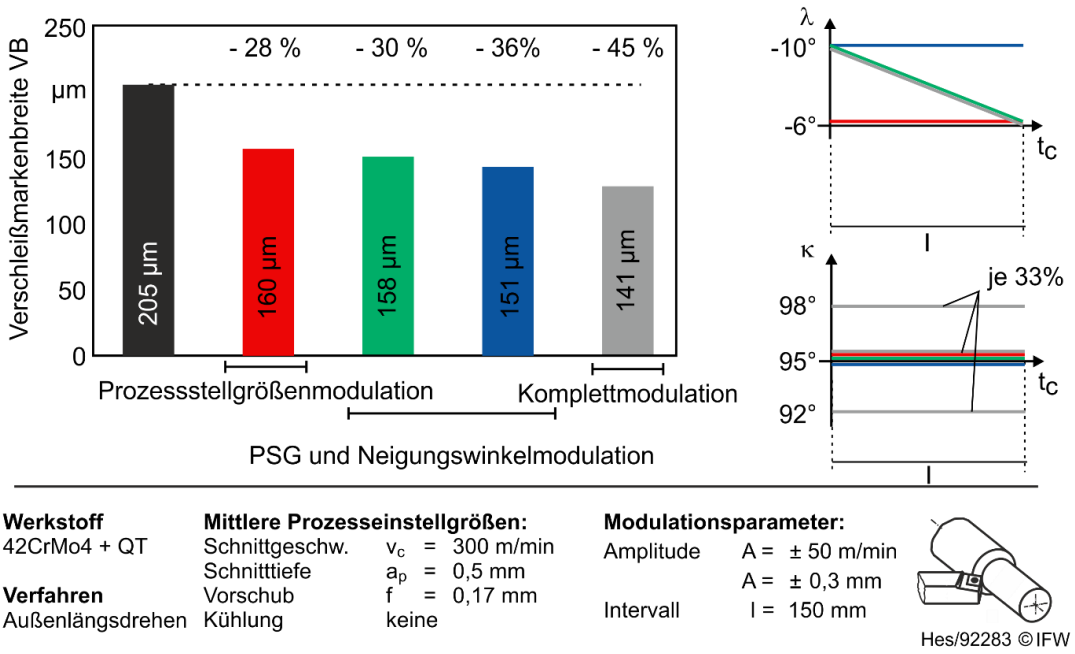


Abbildung 15: Potential einer Neigungs- und Einstellwinkelmodulation

Fazit dieses Arbeitspaketes ist, dass sowohl die Neigungs- als auch die Einstellwinkelmodulation Potential haben den Verschleiß der Werkzeuge zu reduzieren. Das Ziel des Arbeitspakets erreicht wurde. Die dargestellte Modulation dieser Winkel setzt die Verfügbarkeit einer Maschine mit Y-Achse und B-Achse voraus. In Summe lässt sich so eine Reduktion des Werkzeugverschleißes um bis zu 45 % erzielen.

2.4 AP4: Methode zur belastungsoptimalen Auslegung einer Stellgrößenmodulation

Ziel des vierten Arbeitspakets ist es, eine methodische Vorgehensweise zur Auslegung einer Stellgrößenmodulation zu erstellen und zu validieren.

2.4.1 Durchgeführte Arbeiten

In diesem Arbeitspaket wird eine Methode entwickelt, mit der die Modulation der Prozessstellgrößen in Abhängigkeit der Prozesseingangsgrößen so ausgelegt werden kann, dass eine Standzeitsteigerung der Werkzeuge erreicht wird. Hierzu wurden im ersten Schritt alle Eingangsgrößen hinsichtlich ihres Einflusses auf den Effekt der Modulation untersucht. Dies sind zum einen die Prozesseinstellgrößen, die Parameter der Modulation, Amplitude, Mittelwert und Frequenz sowie die berechneten Werkzeugbelastungen. Nachdem ein Zusammenhang zwischen einer oder mehrerer Eingangsgrößen und dem Effekt der Modulation hergestellt und eine Methode für die Auslegung der Prozessstellgrößenmodulation bei der Zerspanung von 42CrMo4 aufgebaut wurde, wurde diese Methode auf die Zerspanung von drei weiteren Stahlwerkstoffen angewandt und validiert. Dazu wurde die Zerspanung von 100Cr6 (gehärtet auf 55 HRC), C45 (normalisiert) und X40CrMoV5-1 (gehärtet auf 47 HRC) untersucht.

2.4.2 Erzielte Ergebnisse

Auf Basis der bisher durchgeführten Untersuchungen sind zwei Ansätze zur Entwicklung einer Auslegungsmethode denkbar. Beide sind in Abbildung 16 dargestellt.

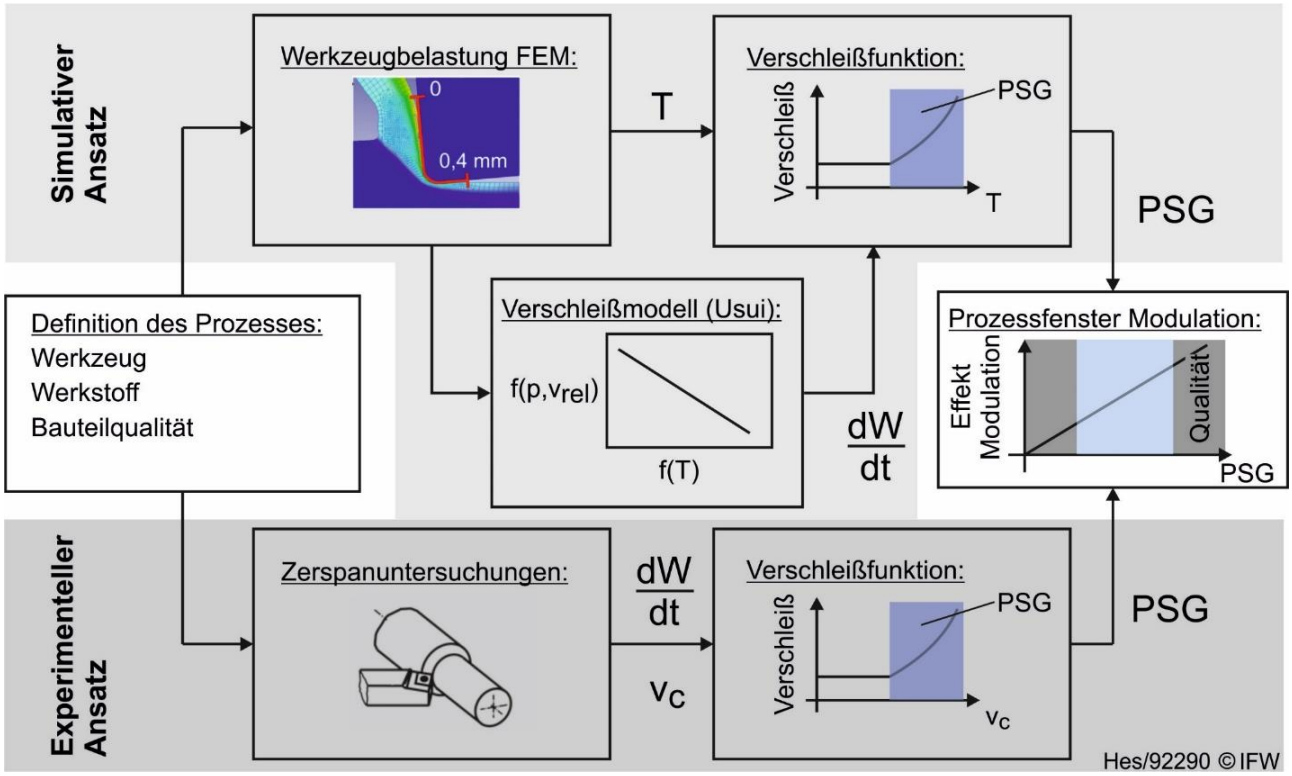


Abbildung 16: Ansätze zur Entwicklung einer Auslegungsmethode

Der erste „simulative Ansatz“ basiert auf der Verwendung von simulierten Belastungsdaten und der Verwendung eines parametrierten Verschleißmodells. Vorteil dieses Ansatzes ist es, dass keine kostenintensiven experimentellen Untersuchungen durchgeführt werden müssen, sobald ein parametriertes Verschleißmodell zur Verfügung steht. Der zweite „experimentelle Ansatz“ nutzt ausschließlich experimentelle Verschleißdaten, um Prozessstellgrößenmodulationen auszulegen. Der Vorteil dieses Ansatzes ist es, dass dieser auch von Anwendern verwendet werden kann, die nicht über die benötigte Simulationssoftware verfügen. Mit Hilfe beider Ansätze wird eine Verschleißfunktion aufgebaut, anhand derer Prozessstellgrößenbereiche identifiziert werden können, in denen Modulationen mit Standzeitvorteilen ausgelegt werden können. Im Folgenden werden beide Ansätze vorgestellt und die damit erreichbaren Ergebnisse dargestellt.

Mit Bezug auf den simulativen Ansatz wurde eine Verschleißfunktion erstellt, die die Verschleißrate des Freiflächenverschleißes mit den berechneten Temperaturen an der Freifläche verknüpft (Abbildung 17). Aus diesem geht hervor, dass die experimentell bestimmte Verschleißrate ab einer bestimmten Temperatur progressiv ansteigt. Vor dieser Temperatur steigt die Verschleißrate mit der Temperatur linear mit geringer Steigung an.

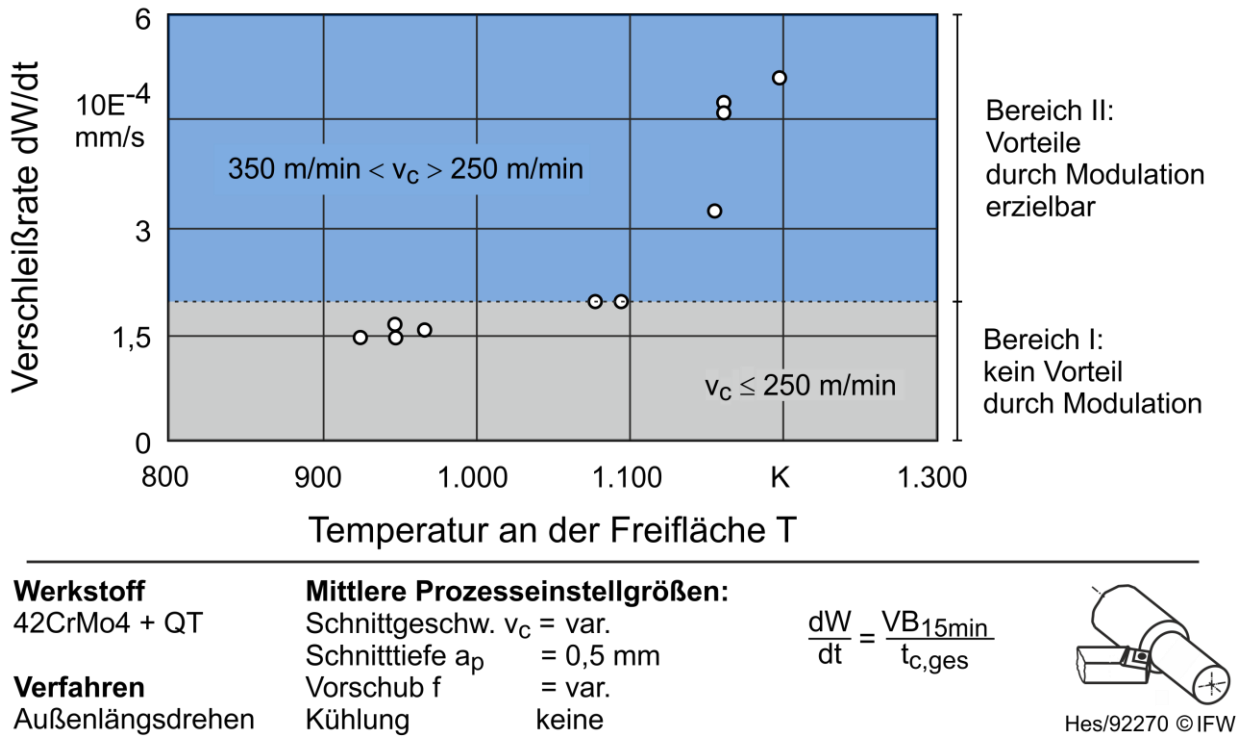


Abbildung 17: Verschleißrate in Abhängigkeit der Freiflächentemperatur

Diese Grenztemperatur lässt sich der Schnittgeschwindigkeit zuordnen, ab der die Modulation einen Effekt auf die Standzeit der Werkzeuge hat ($v_{c,grenz}$). Die Begründung für diesen Effekt erfolgt auf Basis der Betrachtungen des Verschleißmodells.

Zur Berechnung der Verschleißrate anhand der thermomechanischen Belastung existieren verschiedene Verschleißmodelle. In diesem Projekt wurde das Verschleißmodell nach Usui verwendet [USU84]. Für dessen Anwendung werden neben der Temperatur, die Kontaktspannung und die Relativgeschwindigkeit benötigt. Diese Größen wurden für verschiedene Schnittgeschwindigkeiten und Vorschübe auf Basis von FE-Simulation berechnet und an der Freifläche des Werkzeugs ausgewertet (Abbildung 18). Anhand dieser Größen wurde das Verschleißmodell parametriert.

Zur Berechnung des zu erwartenden Verschleißes von Prozessen mit modulierten Prozessstellgrößen werden diese Prozesse durch mehrere Betriebspunkte diskretisiert. Hierzu wurde der Punkt maximaler, mittlerer und minimaler Prozessstellgrößen gewählt. Die mittlere Werkzeugbelastung dieser Betriebspunkte wird berechnet und die errechneten Werte in das Verschleißmodell eingesetzt. Trägt man die so berechneten Verschleißraten in Abbildung 17 ein, erhält man die Darstellung in Abbildung 19.

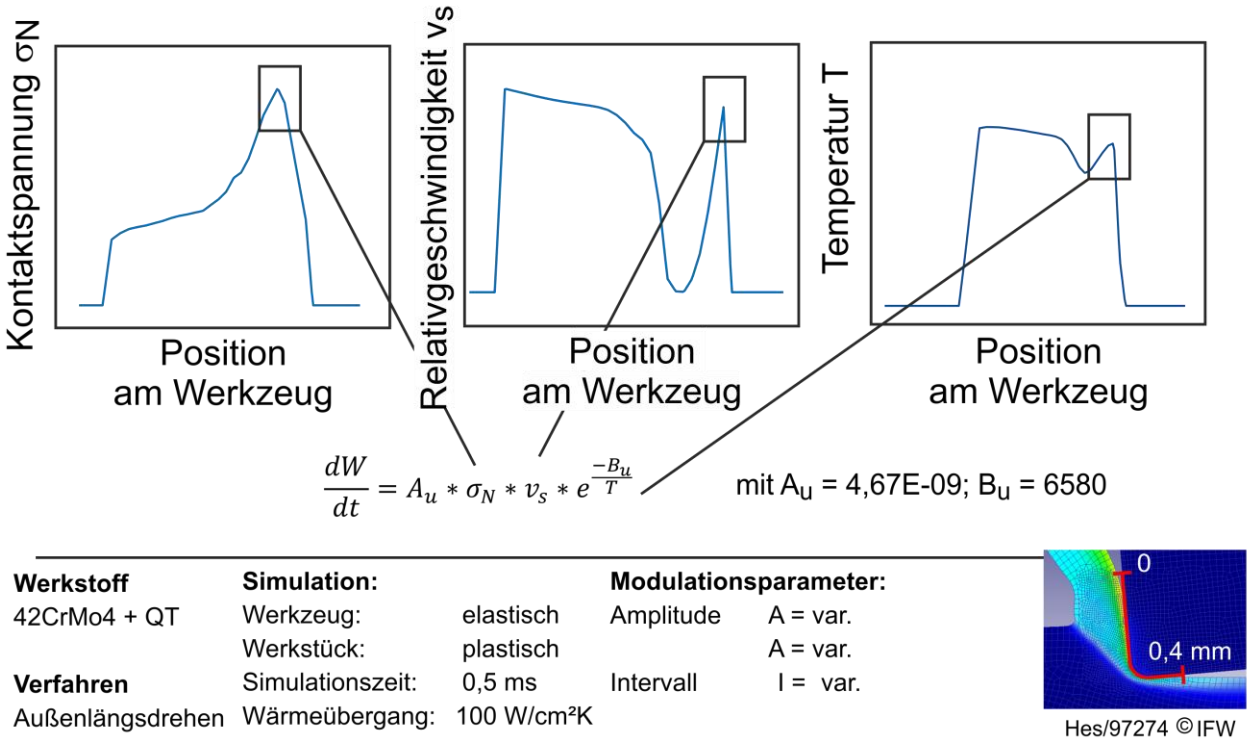


Abbildung 18: Auswertung der Prozessgrößen und Parametrierung des Verschleißmodells

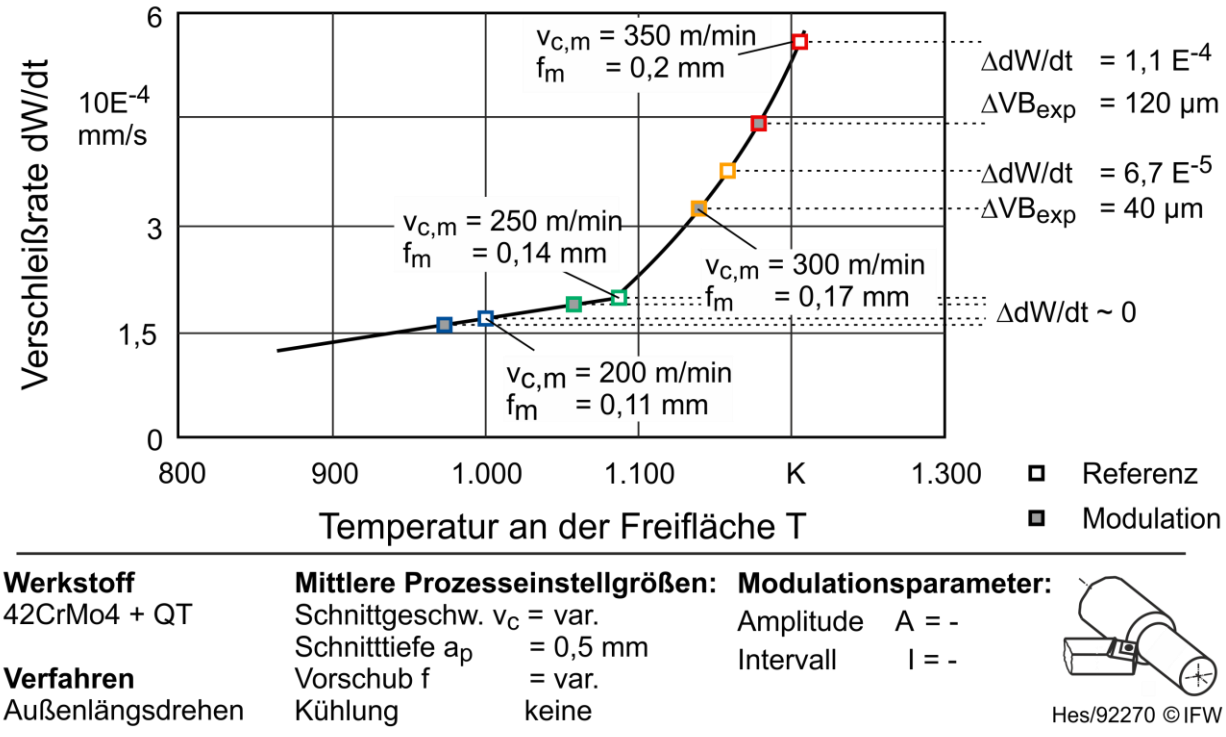


Abbildung 19: Verschleißrate stationärer und modulierter Prozesse

Anhand dieser Darstellung ist zu erkennen, dass bei allen untersuchten modulierten Prozessen die thermische Werkzeugbelastung abfällt. Diese Temperaturänderung führt aber erst oberhalb einer Schnittgeschwindigkeit von v_c = 250 m/min = $v_{c,grenz}$ zu einer Senkung der Verschleißrate. Diese Verschleißsenkung steigt mit der Schnittgeschwindigkeit an. In Abbildung 20 ist der Verschleiß der Werkzeuge zum Standzeitende dargestellt. Die Referenz (Ref.) ist jeweils der Prozess mit stationären Prozessstellgrößen. Der mittlere Balken repräsentiert das Ergebnis des Experiments mit modulierten Prozessstellgrößen (Mod. Exp.). Daneben ist der berechnete Verschleiß für den modulierten Prozess dargestellt. Diese Darstellung zeigt, dass der Verschleißunterschied zwischen moduliertem und stationärem Prozess qualitativ korrekt vorhergesagt wird. Kann ein Verschleißvorteil durch Modulation erreicht werden, wird dies auch durch das Modell vorhergesagt. Kann im Experiment kein Vorteil erzielt werden, wird auch kein Vorteil durch das Modell prognostiziert.

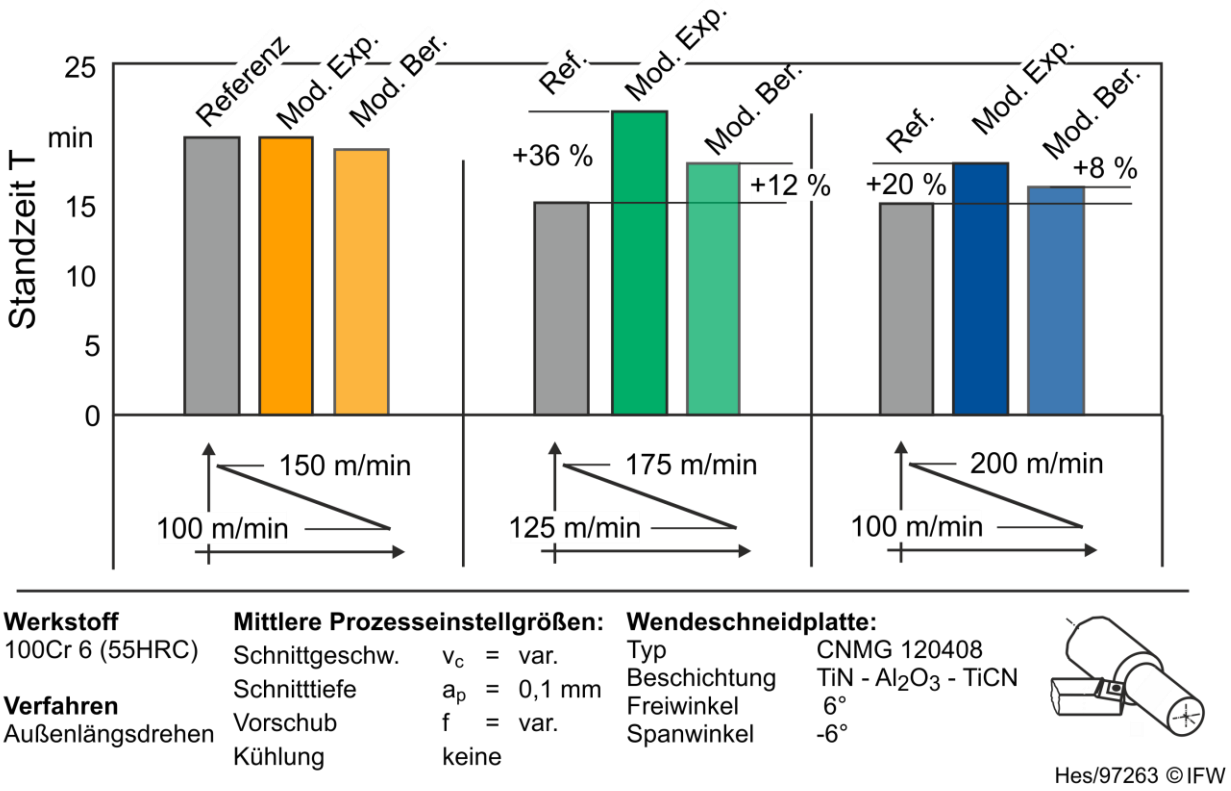


Abbildung 20: Vergleich des berechneten und experimentell bestimmten Verschleißes modulierter Prozesse

Die entwickelte experimentelle Methode basiert auf dem Zusammenhang zwischen Standzeit und Schnittgeschwindigkeit. Wie in Abbildung 21 dargestellt, lässt sich dieser abschnittsweise in zwei Schnittgeschwindigkeitsbereiche mit unterschiedlicher Steigung der Standzeitgerade nach Taylor aufteilen. Der Bereich mit betragsmäßig größerer Steigung ist der Bereich der Schnittgeschwindigkeit, der für die Modulation mit Standzeitsteigerung nutzbar ist. Für die Auslegung wird die Modulation über drei Betriebspunkte definiert, der Punkt maximaler, mittlerer und minimaler Schnittgeschwindigkeit. Die Standzeit des modulierten Prozesses errechnet sich anschließend über eine Mittelung der Standzeit der Betriebspunkte. Die Standzeiten werden dabei anhand der Zeitspanvolumina der Betriebspunkte gewichtet. Dadurch werden unterschiedliche Schnittzeiten je Betriebspunkt berücksichtigt.

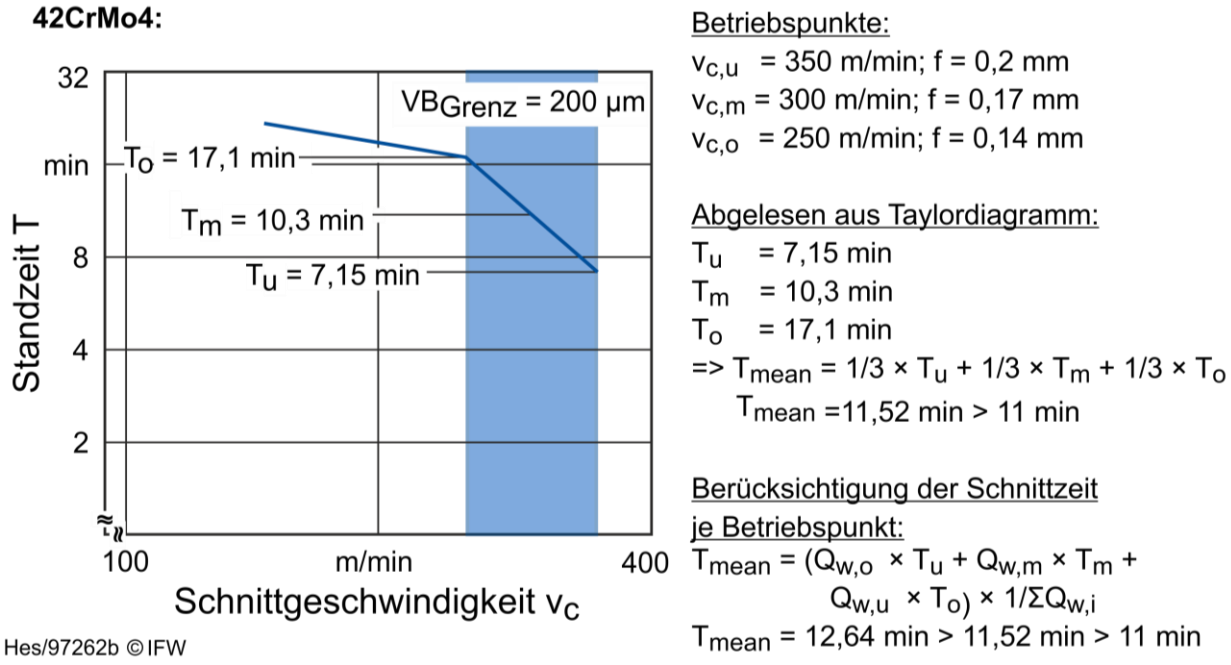


Abbildung 21: Methode für die Auslegung von Prozessstellgrößenmodulation beim Außenlängsdrehen

Abbildung 22 zeigt das Ergebnis dieser Auslegung für drei Beispielprozesse. Dargestellt ist je Prozess die Standzeit der Referenz sowie die berechnete und experimentell ermittelte Standzeit des modulierten Prozesses.

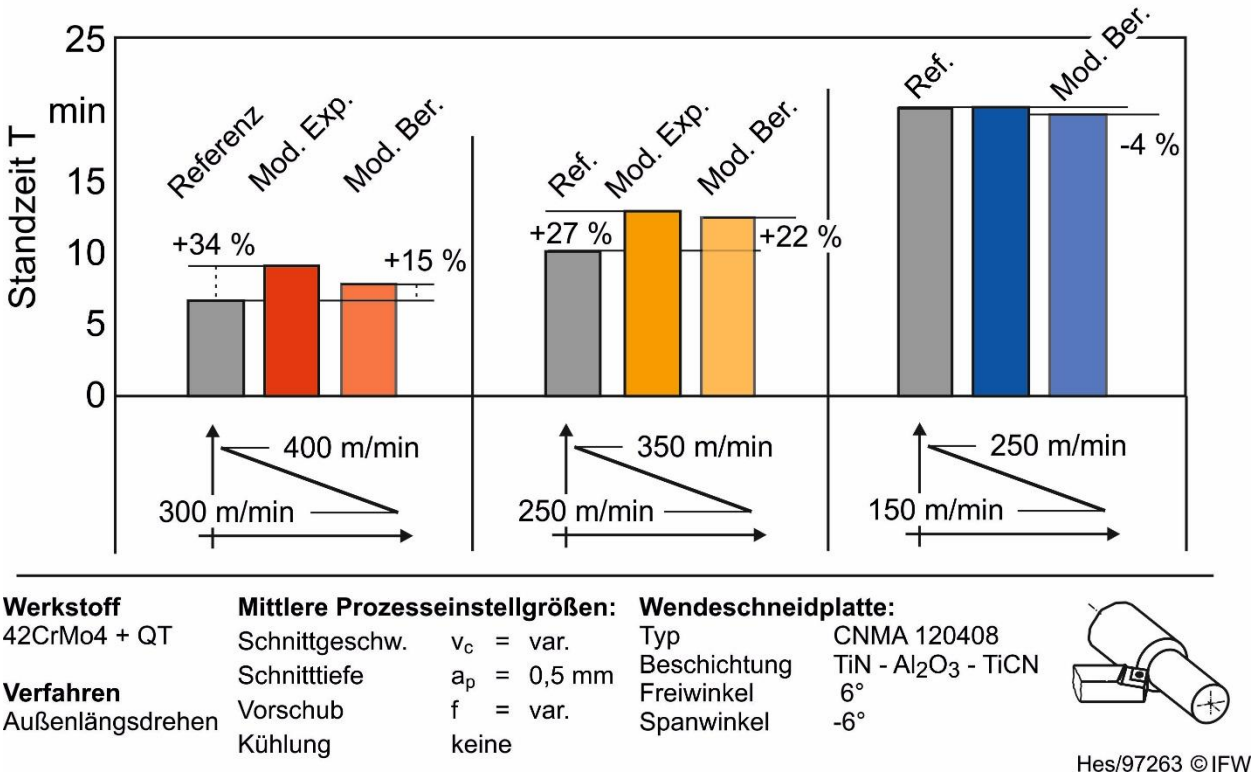


Abbildung 22: Verifizierung der Methode für die Zerspanung von 42CrMo4

Wird um v_c = 350 m/min bzw. 300 m/min moduliert, berechnet sich mit der entwickelten Auslegungsmethode eine Standzeitsteigerung von 15 % bzw. 22 % gegenüber dem konstanten Referenzprozess. Diese Vorhersage lässt sich in beiden Fällen durch das Experiment bestätigen, wobei in beiden Fällen der Standzeitvorteil durch die Modulation unterschätzt wird. Ursache hierfür ist die Wechselwirkung des Verschleißfortschrittes mit dem bereits existierenden Verschleiß. Das Modell geht von einem konstanten Verschleißfortschritt aus. Dieser ändert sich jedoch in Abhängigkeit des Verschleißzustandes. Durch die Modulation wird der Verschleiß gesenkt und damit auch der Verschleißfortschritt. Aus diesem Grund wird der Effekt der Modulation unterschätzt. Für den dritten Prozess mit einer mittleren Schnittgeschwindigkeit von v_c = 200 m/min resultiert für die Modulation kein Standzeitvorteil. Der Effekt der Einstellgrößenmodulation kann also für den gesamten Schnittgeschwindigkeitsbereich korrekt beschrieben werden. Im nächsten Schritt wurde die Methode auf drei weitere Werkstoffe angewandt. Anhand von Prozessen mit konstanter Schnittgeschwindigkeit wird zunächst der Zusammenhang zwischen Standzeit und Schnittgeschwindigkeit hergestellt. Qualitativ resultiert für alle Werkstoffe der gleiche Zusammenhang. Die Steigung der Geraden und die Grenzschnittgeschwindigkeit ($v_{c,grenz}$), ab der die Standzeit schneller abnimmt, sind dabei werkstoffabhängige Größen (Abbildung 23).

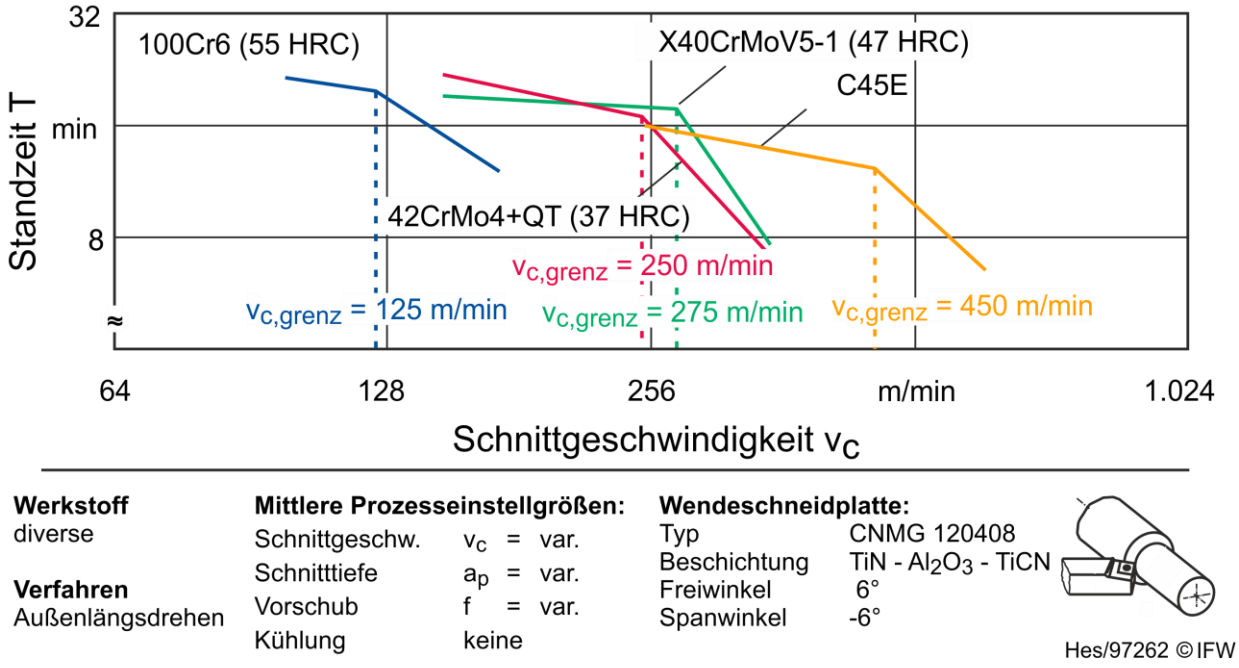


Abbildung 23: Standzeitgeraden und Grenzgeschwindigkeit der untersuchten Werkstoffe

In Abbildung 24 ist die Bewertung dieser Auslegungsmethode für die Bearbeitung von 100Cr6 in Abhängigkeit der Grenzgeschwindigkeit dargestellt. Analog zur Bearbeitung von 42CrMo4, kann mit dieser Methode der Standzeitvorteil durch Modulation qualitativ korrekt vorausberechnet werden. Standzeitvorteile können dabei nur erzielt werden, wenn hauptsächlich oberhalb der Grenzgeschwindigkeit moduliert wird. Die Auslegungsmethode funktioniert in gleicher Weise auch für den Stahl C45.

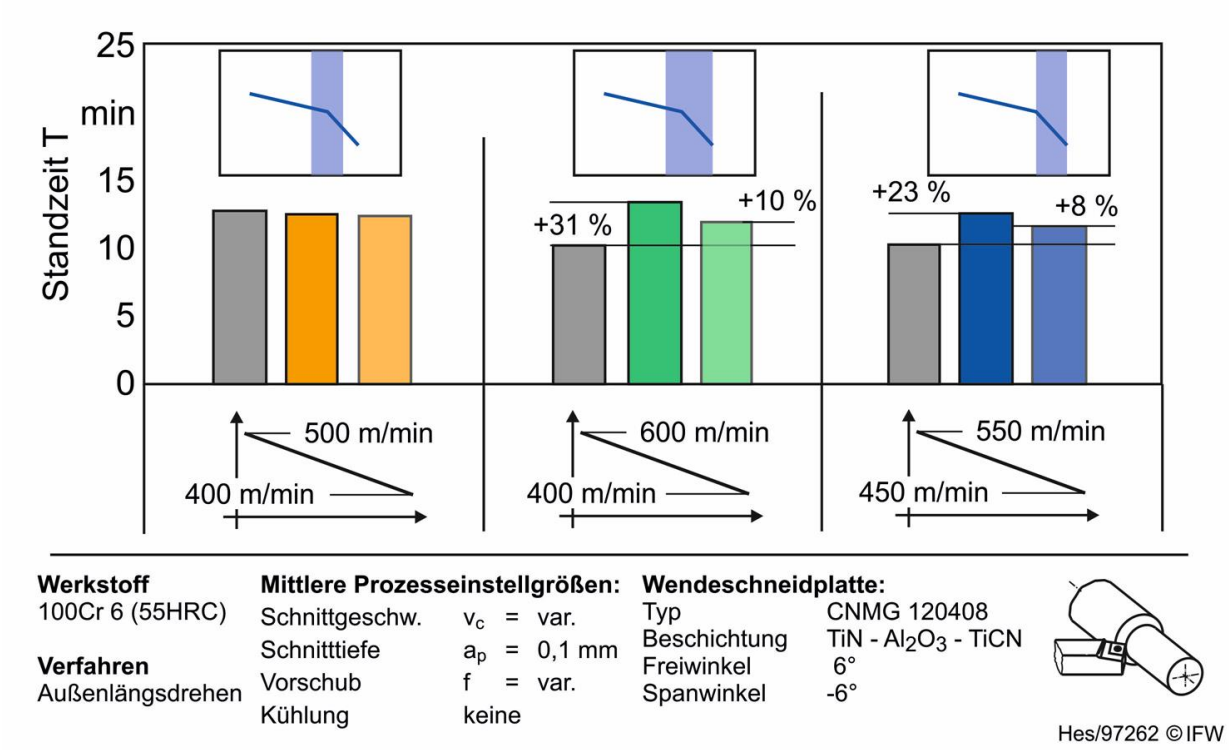


Abbildung 24: Modulation in Abhängigkeit der Grenzgeschwindigkeit bei der Bearbeitung von 100Cr6

Dabei kann ein funktionaler Zusammenhang zwischen Grenzgeschwindigkeit und Werkstoffeigenschaften abgeleitet werden. Die experimentell bestimmte Grenzgeschwindigkeit kann mit der Werkstoffhärte korreliert werden (Abbildung 25).

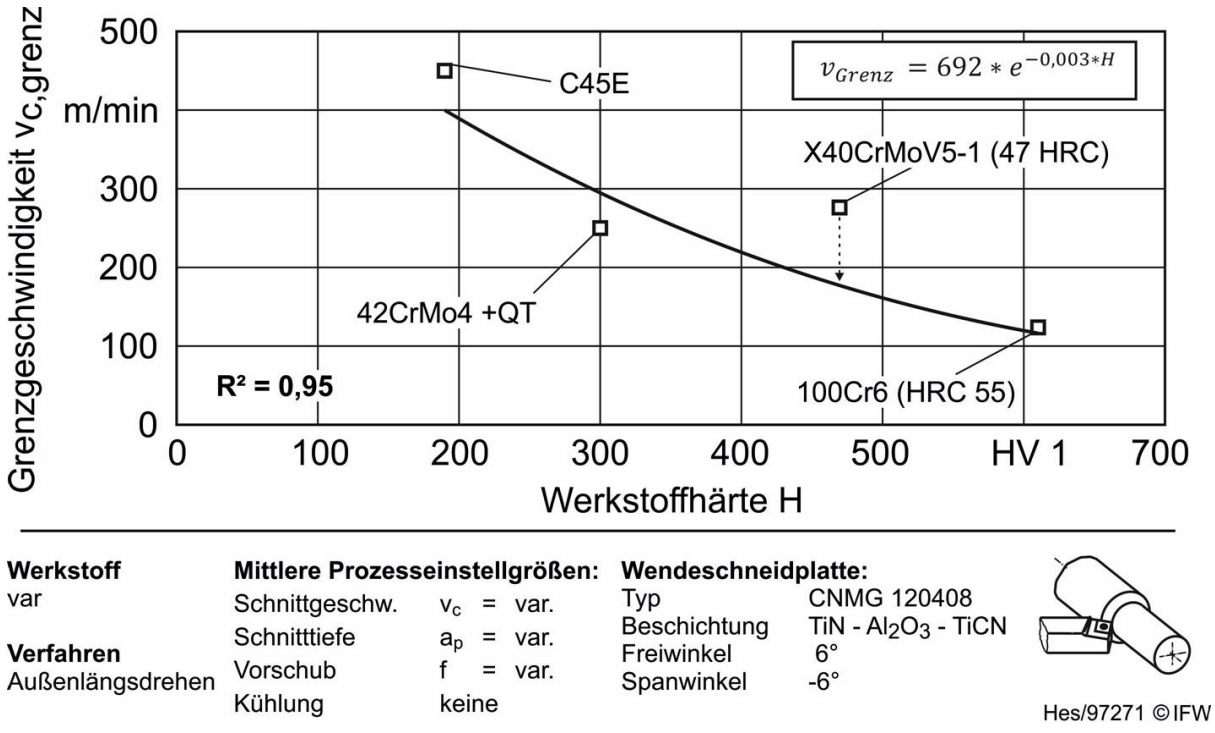
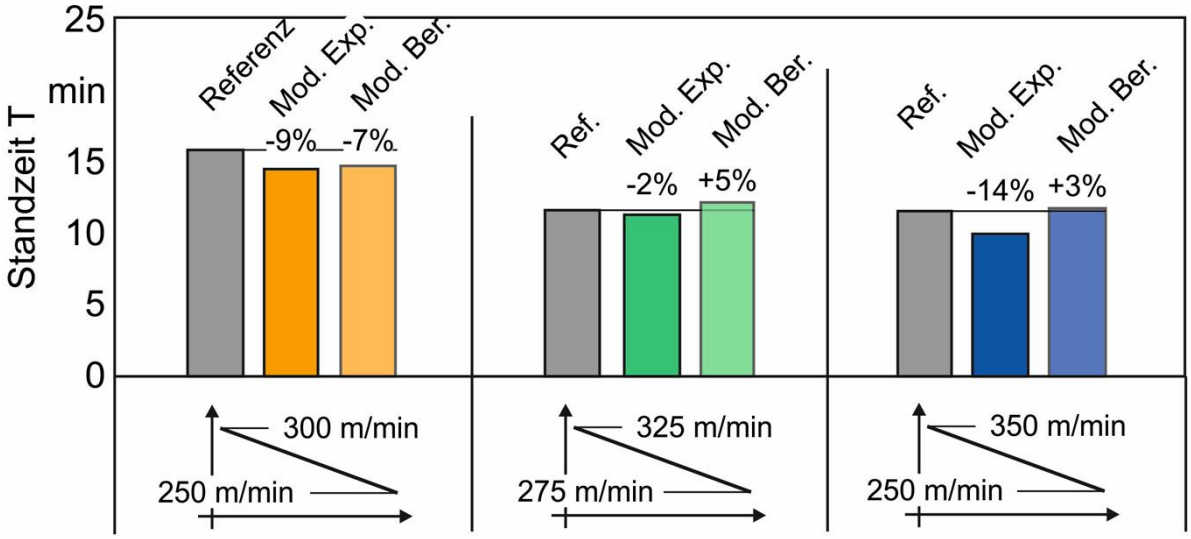


Abbildung 25: Zusammenhang zwischen Grenzgeschwindigkeit und Werkstoffhärte

Die Grenzgeschwindigkeit kann mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 = 0,95$ in Abhängigkeit der Werkstoffhärte prognostiziert werden. Dieser Zusammenhang muss durch weitere Untersuchungen bestätigt werden. Wie schon in den Abbildung 26 und 27 zu erkennen ist, können diese Zusammenhänge jedoch nicht auf den hochlegierten Stahl übertragen werden. Zum einen liegt die ermittelte Grenzgeschwindigkeit wesentlich höher als nach dem Modell zu erwarten wäre. Zum anderen kann durch die Modulation kein Verschleißvorteil erreicht werden. Dieses Verhalten wird nur teilweise richtig vorausberechnet (Abbildung 26).



Werkstoff
X40CrMoV5-1
(47HRC)

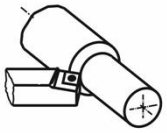
Verfahren
Außenlängsdrehen

Mittlere Prozesseinstellgrößen:

Schnittgeschw.	v_c =	var.
Schnitttiefe	a_p =	0,1 mm
Vorschub	f =	var.
Kühlung		keine

Wendeschneidplatte:

Typ	CNMG 120408
Beschichtung	TiN - Al_2O_3 - TiCN
Freiwinkel	6°
Spanwinkel	-6°



Hes/97263 © IFW

Abbildung 26: Vergleich der experimentellen und berechneten Standzeiten für die Bearbeitung von X40CrMoV5-1

Das abweichende Verschleißverhalten des Werkstoff X40CrMoV5-1 ist in Abbildung 27 dargestellt. Der Unterschied zu den weiteren betrachteten Werkstoffen liegt in den thermischen Eigenschaften dieses Stahls. Dieser ist durch eine höhere Wärmekapazität und eine niedrigere Wärmeleitfähigkeit gekennzeichnet. Daraus resultieren andere Verschleißmechanismen, wie beispielsweise Mikroausbrüche, die durch die Modulation nicht positiv beeinflusst werden. Die Anwendung der Prozessstellgrößenmodulation bei der Bearbeitung hochlegierter Stähle muss daher weiter untersucht werden.

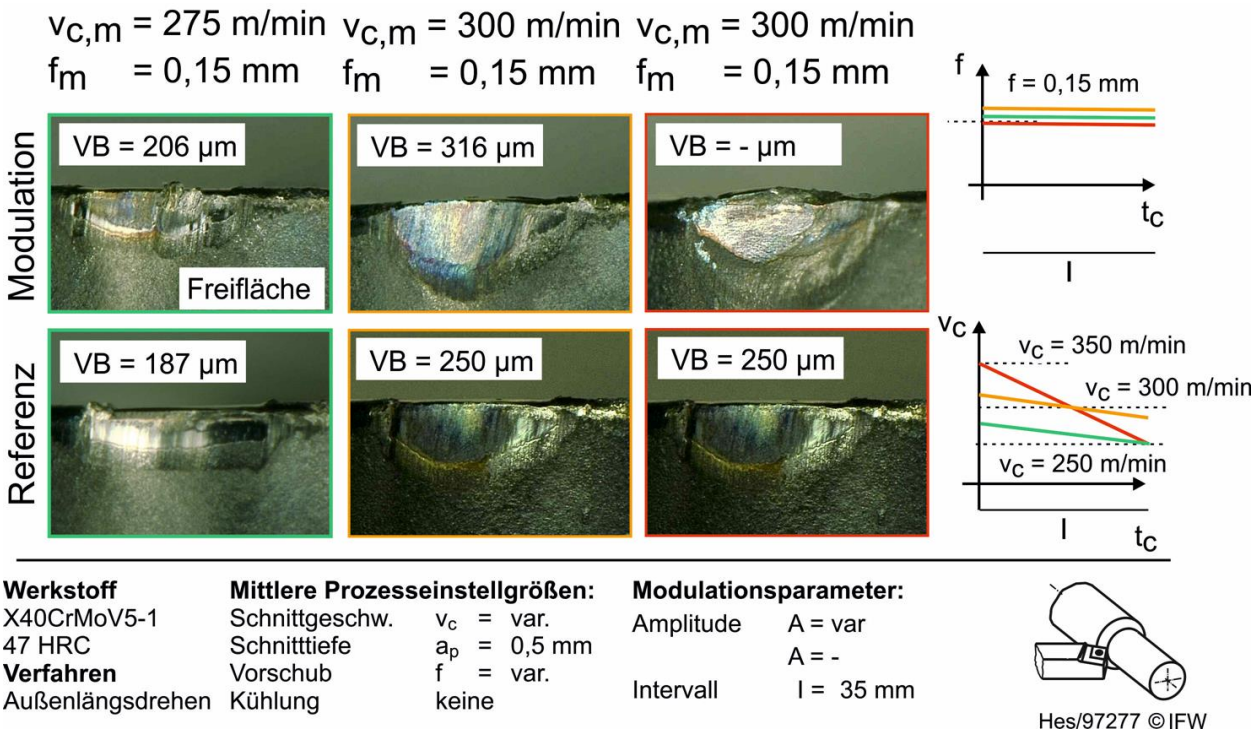


Abbildung 27: Vergleich des Verschleißes stationärer und modulierter Drehprozesse bei der Bearbeitung von X40CrMoV5-1

Das Ergebnis dieses Arbeitspakets ist die Verfügbarkeit einer Auslegungsmethode, mit der Prozessstellgrößenmodulationen bei der Drehbearbeitung niedrig legierter Stähle unterschiedlichen Vergütungszustands ausgelegt werden können. Diese Methode basiert auf der Aufstellung einer Verschleißfunktion. Es konnten zwei Ansätze entwickelt werden, einer basiert auf simulativ und einer auf experimentell bestimmten Daten. Mit beiden Ansätzen kann das Auftreten eines Standzeitvorteils von modulierten Prozessen korrekt prognostiziert werden. Dabei wird der Verschleißvorteil grundsätzlich unterschätzt. Ursache hierfür ist, dass die Änderung des Verschleißes sich wiederum auf die Belastung des Werkzeugs auswirkt. Aufgrund der Wechselbeziehung zwischen der thermomechanischen Belastung und dem resultierenden Verschleiß, erfolgt hierdurch eine Änderung der Verschleißrate. Diese Wechselwirkung wird in dem entwickelten Modell nicht berücksichtigt. Die Entwicklung eines solchen Modells sollte Gegenstand weiterer Untersuchungen sein. Weiterhin konnte das Modell bisher nur für niedriglegierte Stähle angewendet werden. Die Übertragung auf weitere Werkstoffe, insbesondere hochlegierte Stähle, muss noch überprüft werden.

2.5 AP5: Modulation beim Fräsprozess

Ziel des fünften Arbeitspaketes ist eine stichprobenartige Prüfung der Übertragbarkeit der erstellten Methode auf einen Fräsprozess

2.5.1 Durchgeführte Arbeiten

Nachdem die Gültigkeit der Auslegungsmethode für verschiedene Werkstoffe nachgewiesen wurde, wurde in diesem Arbeitspaket überprüft, wie sich die Methode und die zugrundeliegenden Mechanismen auf andere Fertigungsprozesse übertragen lassen. Hierzu wurde das Fräsen von 42CrMo4 untersucht. Im ersten Schritt wurde der Verschleiß der

Werkzeuge unter konstanten Prozessstellgrößen untersucht. Dabei wurden Schnittgeschwindigkeit und Vorschub in drei Stufen variiert. Anschließend wurden Modulationen von Schnittgeschwindigkeit und Vorschub umgesetzt und der resultierende Verschleiß mit der Referenz verglichen. Zur Bewertung der Ergebnisse wurden die simulierten Belastungen aus der FE-Simulation und die Ergebnisse von experimentellen Kraftmessungen herangezogen.

2.5.2 Erzielte Ergebnisse

Die Referenzuntersuchungen beim Fräsen haben gezeigt, dass bei diesem Prozess der kontinuierliche Verschleiß der Freifläche nicht die dominierende Verschleißform ist. Hingegen traten nach einer bestimmten Standzeit Ausbrüche der Schneidkante auf, die das Standzeitende bestimmen. Die Verschleißuntersuchungen haben gezeigt, dass diese Verschleißform nicht mit den bisher genutzten Modulationen beeinflusst werden kann. Jedoch konnte die Bildung von Ausbrüchen durch Modulation mit Frequenzen nahe der Zahneingriffsfrequenz auf einen späteren Zeitpunkt verschoben werden (Abbildung 28).

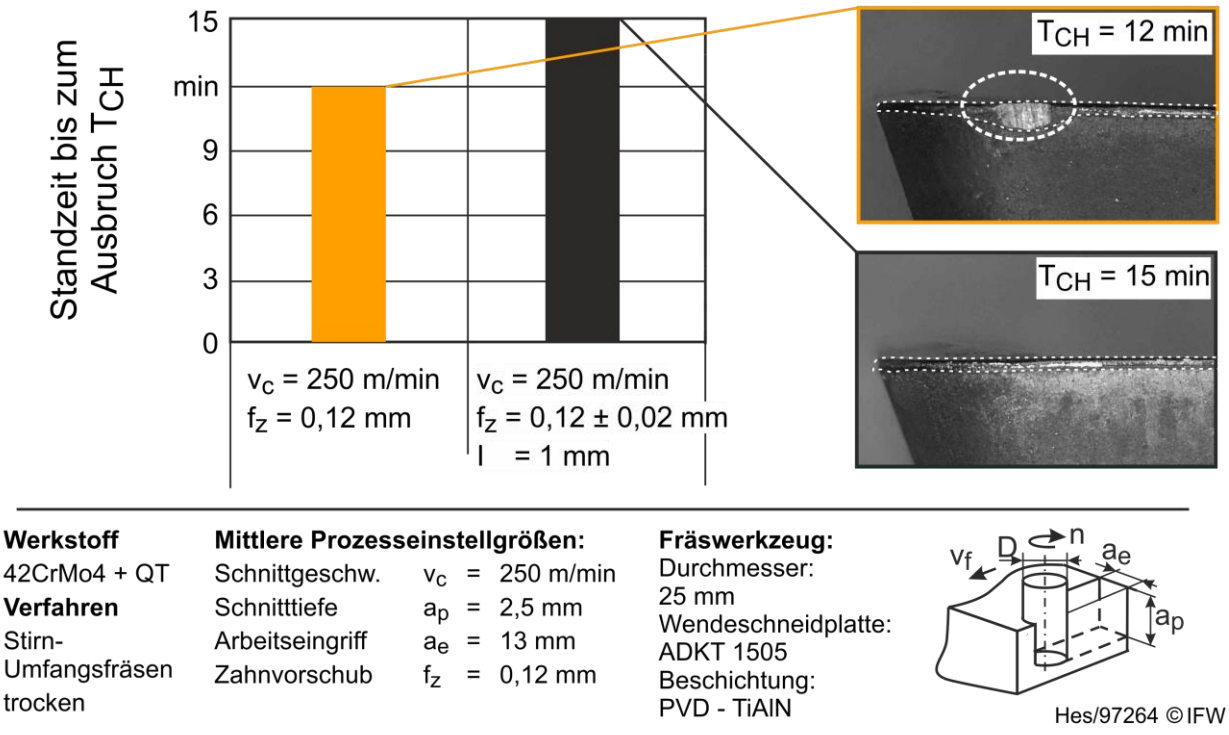


Abbildung 28: Standzeitsteigerung beim Fräsen durch Modulation des Zahnvorschubs

Beim Fräsen sind die Werkzeugbelastung während des Zahneingriffs und die Häufigkeit dieser Eingriffe ursächlich für die Bildung von Ausbrüchen und somit standzeitbestimmend. Ausbrüche können, wenn sie nicht initial auftreten, auf eine Ermüdung des Schneidstoffs in Folge der wiederholten Werkzeugeingriffe zurückgeführt werden.

Anhand der Kraftmessungen konnte gezeigt werden, dass durch die angewandte Sinus-Modulation die maximalen Prozesskräfte während des Zahneingriffs im Mittel reduziert werden können (Abbildung 29).

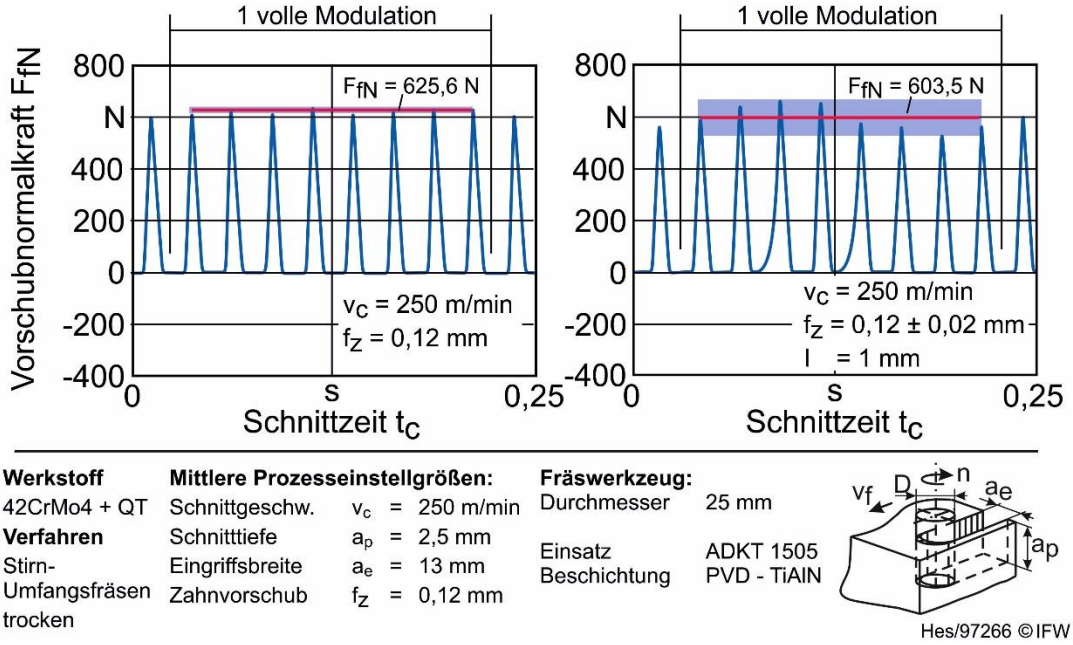


Abbildung 29: Prozesskräfte während des Zahneingriffs bei konstanten und modulierten Prozessstellgrößen

Dies kann durch eine Vorschubmodulation erreicht werden, welche den zeitlichen Verlauf und die Höhe der Prozesskräfte beeinflusst. Daher kann durch geeignete Wahl des Prozessstellgrößenbereichs eine Reduzierung der Prozesskraft erreicht werden.

Die für das Drehen entwickelte Methode zur Auslegung der Modulation lässt sich nicht auf das Fräsen übertragen. Die Werkzeugbelastungen beim Fräsen unterscheiden sich, aufgrund des unterbrochenen Schnittes, stark von denen beim Drehen. Die Reduzierung der maximalen Kraft während des Zahneingriffs stellt jedoch eine Möglichkeit dar, die Standzeit von Fräswerkzeugen durch kontinuierliche Modulation der Prozessstellgrößen zu erhöhen. Für eine Auslegung dieser Form der Modulation bedarf es jedoch weiterer Untersuchungen. So ermöglichen die erzielten Erkenntnisse nur in Grenzen Aussagen über geeignete Modulationsparameter (Amplitude, Mittelwert, Frequenz). Es ist nicht bekannt, wie das Verhältnis zwischen Zahneingriffsfrequenz und Modulationsfrequenz ausgelegt werden muss. Weiterhin muss untersucht werden, welche Prozesskräfte bis zur Bildung von Ausbrüchen erträglich sind.

3 Zusammenfassung der Ergebnisse

Im beschriebenen Vorhaben wurde eine Auslegungsmethode für die Prozessstellgrößenmodulation beim Außenlängsdrehen entwickelt. Hierzu wurden der Verschleiß und die thermomechanischen Belastungen bei stationären Prozessen als Referenz aufgenommen. Anschließend wurden Prozesse mit modulierten Prozessstellgrößen durchgeführt und hinsichtlich einer Änderung des Verschleißverhaltens gegenüber der Referenz bewertet. Hierbei konnten zwei verschiedene Formen der Modulation identifiziert werden. Eine Form ist die langsame Modulation, die auch bei niedrigen Prozessstellgrößen eine Steigerung der Standzeit ermöglicht. Dabei werden die Prozessstellgrößen entlang der gesamten Standzeit des Werkzeugs langsam verringert. Hierdurch wird das bereits verschlissene Werkzeug gegen Ende der Standzeit entlastet und die Standzeit der Werkzeuge um bis zu 25 % gesteigert. Diese Form der Modulation hat jedoch den Nachteil, dass die Produktivität der Prozesse verändert wird. Für Anwender folgt daraus die Schwierigkeit mit schwankenden Taktzeiten umgehen zu müssen. Die zweite Form der Modulation sieht eine lineare Änderung der Prozessstellgrößen entlang einer Vorschubbahn, beziehungsweise pro zu bearbeitendem Bauteil vor. Eine derartige Modulation ermöglicht demnach gleichbleibende Taktzeiten. Diese Form der Modulation ermöglicht jedoch nur Standzeitsteigerungen, wenn eine bestimmte mittlere Schnittgeschwindigkeit überschritten wird. Der Effekt dieser Modulation kann auf eine Reduzierung der im Mittel auf das Werkzeug einwirkenden Temperatur zurückgeführt werden. Im weiteren Projektverlauf konnte eine Methode entwickelt werden, mit der die Grenzschnittgeschwindigkeit ermittelt werden kann. Letztere beschreibt jene Schnittgeschwindigkeit, ab der die Modulation eine deutliche Verschleißreduzierung bewirkt. Mithilfe der vorgestellten Methode kann ferner der Standzeitvorteil von Prozessstellgrößenmodulation qualitativ korrekt vorausberechnet werden. Die Grenzschnittgeschwindigkeit hängt dabei vom zu zerspanenden Werkstoff und dem verwendeten Schneidstoff ab. Zur Anwendung der Methode werden lediglich neun Verschleißuntersuchungen benötigt, um die zur Auslegung benötigten Daten zu ermitteln. Die Anwendung der Methode ermöglicht es somit Anwendern, die Prozessstellgrößenmodulation für Ihre Prozesse umzusetzen. Im Folgenden konnte gezeigt werden, dass diese Methode auf eine Reihe niedriglegierter Stähle angewendet werden kann. Hierdurch können Standzeitsteigerungen von bis zu 44 % erreicht werden. Bei der Bearbeitung hochlegierter Stähle konnte durch die genutzten Modulationen kein Standzeitvorteil erzielt werden. Dies lässt sich durch das Auftreten diskontinuierlicher Verschleißeffekte, wie beispielswiese Mikroausbrüche begründen. Neben der Prozessstellgrößenmodulation wurde auch die Umsetzung einer Werkzeugwinkelmodulation untersucht. Diese ermöglicht eine Standzeitsteigerung um weitere 17 %. Durch die Werkzeugwinkelmodulation wird eine Änderung der Kontaktfläche erreicht. Dadurch wird der Verschleiß auf eine größere Fläche des Werkzeugs verteilt und die Standzeit gesteigert. Dieser Effekt ist damit unabhängig von der untersuchten Prozessstellgrößenmodulation. Zum Abschluss des Projektes wurde die Übertragbarkeit der Methode auf andere Prozesse untersucht. Hierzu wurde ein Stirnumfangsfräsprozess analysiert. Eine direkte Übertragbarkeit ist nicht möglich, da sich der Standzeit bestimmende Verschleißmechanismus beim Fräsen von dem beim Drehen unterscheidet. Der Effekt der Modulation hängt nicht nur von den Prozessstellgrößen ab, sondern auch vom standzeitbestimmenden Verschleißmechanismus. Dieser wiederum wird durch den verwendeten Schneidstoff, den zu bearbeitenden Werkstoff und vor allem durch den Zerspanprozess bestimmt. Beim Fräsprozess führen Ausbrüche der Schneidkante zum Versagen des Werkzeugs. Diese Ausbrüche können durch Modulation des Zahnvorschubs nahe der Zahneingriffsfrequenz beeinflusst werden. Die beim Drehen

angewandte relativ langsame Modulation der Schnittgeschwindigkeit hat keinen Einfluss auf die Standzeit beim Fräsen. Durch Modulation des Zahnvorschubs konnte eine Erhöhung der Werkzeugstandzeit bis zum Auftreten von Mikroausbrüchen um 25 % erreicht werden. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Prozessstellgrößenmodulation ein hohes Potential und weites Anwendungsspektrum hat, um die Produktivität und Standzeit von Zerspanwerkzeugen zu steigern.

4 Verwendung der Zuwendung

- wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

Wiss.-techn. Personal A.1: 23 MM

- Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

keine

- Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

keine

5 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Standzeit und Produktivität von Zerspanwerkzeugen kann durch eine Prozessstellgrößenmodulation um bis zu 44 % gesteigert werden. Um dies erreichen zu können, muss das thermomechanische Belastungsprofil bekannt sein und die Modulationsparameter mit signifikantem Einfluss auf den Werkzeugverschleiß identifiziert werden. Durch die Verfügbarkeit einer Methodik zur belastungsoptimalen Auslegung von Prozessstellgrößenmodulationen und die dadurch mögliche Produktivitätssteigerung, wird die Angemessenheit des Vorhabens gewährleistet. Alle durchgeführten Arbeiten im Vorhaben sind für die Erreichung des Ziels notwendig und angemessen.

6 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU und innovativer Beitrag und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

6.1 Wissenschaftlich-technischer und wirtschaftlicher Nutzen der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU

Mit den beschriebenen Forschungsergebnissen konnte gezeigt werden, dass die Standzeit von Drehprozessen um bis zu 44 % ansteigen kann. Die gewonnenen Erkenntnisse bieten direkte Potentiale für Werkzeughersteller, Maschinenhersteller und Endanwender. Insbesondere Fertigungsbetriebe und Zulieferer im verarbeitenden Gewerbe (Endanwender, Anteil an KMU über 90 %) profitieren hierbei von einer Reduzierung der Werkzeug- und Produktionskosten. Weiterhin profitieren Hersteller von Werkzeugmaschinen, die einen hohen Anteil an KMU aufweisen, von der Möglichkeit Maschinen mit produktiveren Prozessen anbieten zu können. Für die Auslegung ist nur ein geringer experimenteller Aufwand notwendig. Die Umsetzung in der Werkzeugmaschine ist mit bereits in den meisten Werkzeugmaschinen enthaltener Software möglich und lässt sich einfach durchführen. Dadurch werden keine Investitionen nötig, wodurch insbesondere für KMU Wettbewerbsvorteile durch angepasste Produktionsprozesse resultieren.

6.2 Innovativer Beitrag und industrielle Anwendungsmöglichkeiten

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde eine Vorgehensweise erarbeitet, die eine effiziente Auslegung eines Prozesses mit Einstellgrößenmodulation ermöglicht. Dabei wurde erstmals ein innovativer Ansatz auf Basis von FE-Simulationen entwickelt. Durch die Verfügbarkeit einer Methodik zur belastungsoptimalen Auslegung von Prozessstellgrößenmodulationen werden industrielle Anwender in die Lage versetzt, Prozesse mit reduziertem Kosten- Zeit- und Ressourcenaufwand auszulegen und Produktivitätssteigerung zu erzielen. Die Methode kann in industriellen Betrieben direkt umgesetzt werden, um geeignete Parameter für die Modulation zu ermitteln und an üblichen CNC-Maschinen einzusetzen. Hierfür sind keine zusätzlichen Investitionen für Aggregate, Aktuatoren oder Werkzeuge notwendig. Lediglich die NC-Code-Programmierung und das Technologieverständnis müssen zur Verfügung gestellt werden.

7 Fortschreibung des Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft und Einschätzung der Realisierbarkeit dieses Transferkonzepts

Um die Anwendbarkeit der Ergebnisse des Forschungsprojektes sicherzustellen, fand und findet in allen Phasen des Forschungsprojekts ein intensiver Austausch mit Industrieunternehmen statt. Der Ergebnistransfer an weitere Industrieunternehmen wird durch Veröffentlichungen und die Vorstellung der Ergebnisse auf Fachmessen und Kolloquien sichergestellt. Außerdem wurden und werden digitale Veröffentlichungen mit den Inhalten des Forschungsprojekts verfasst. Eine genaue Auflistung aller durchgeführten und geplanten Maßnahmen ist in Tabelle 1 dargestellt.

7.1 Durchgeführte Transfermaßnahmen

Tabelle 1: Durchgeführte Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Geplante spezifische Maßnahmen	**Ziel**	**Art des Transfers**	**Datum / Zeitraum**
Information der Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses	a) Unmittelbarer und kontinuierlicher Ergebnistransfer in die Wirtschaft b) Klärung von Fragen und weiterem Vorgehen c) 1. PA als „Kick-Off“ zur Festlegung der ersten Schritte und Abstimmung	Sitzungen des PA	Oktober 2017 (realisiert) Februar 2018 (realisiert) August 2018 (realisiert) Februar 2019 (realisiert)
Ansprache potentiell interessierter Unternehmen außerhalb des PA	Einbindung interessierter Unternehmen und ggf. Arbeitskreis des VDW; dadurch direkter Transfer in Industrie	a) Präsentation der Ergebnisse auf den Sitzungen des VDW Arbeitskreises 6 b) Individuelle Ansprache von Unternehmen mit spezifischem	a) Oktober 2017 (realisiert) März 2018 (realisiert)

		Knowhow zum gegenseitigen Kenntnistransfer	September 2018 (realisiert) März 2019 (realisiert) b) fortlaufend (realisiert)
Wissenschaftliche Publikationen/Dissertationen, in Fachzeitschriften oder sonst. gedruckten Veröffentlichungen	a) Vermitteln von wiss. Kenntnissen und Heranführen an eigenständiges wiss. Arbeiten b) Verbreitung der Ergebnisse an interessierte Unternehmen und Fachleute national und international	a) Projekt- und Abschlussarbeiten	a) Zwei Studienarbeiten (SA) und drei Bachelorarbeiten (BA) wurden durchgeführt: R. Schlüpmann (SA) M. Stille (SA) J. Stein (BA) V. Blom (BA) M. Jakowlew (BA) b) VDW Branchenreport

7.2 Geplante Transfermaßnahmen

Tabelle 2: Geplante Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Übernahme der Ergebnisse in die Lehre	Anleitung der Studierenden zur Anwendung der Ergebnisse in der Praxis	Aufnahme in die IFW-Vorlesung „Spanen II“	September 2019 (geplant)
Übertragung der Ergebnisse in die Praxis	Unterstützung von Anwendern aus dem PA	Bereitstellung der Auslegungsmethode	Ab August 2019, fortlaufend (geplant)
Weitergabe von ausführlichen Forschungsberichten	Verbreitung der Ergebnisse an interessierte Unternehmen und Fachleute national und international	Herausgabe auf individuelle Anfrage	Ab August 2019, fortlaufend (geplant)
Wissenschaftliche Publikationen/Dissertationen, in Fachzeitschriften oder sonst. gedruckten Veröffentlichungen	Verbreitung der Ergebnisse an interessierte Unternehmen und Fachleute national und international		CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology (in Begutachtung) Produktion Online (eingereicht)

8 Literaturverzeichnis

[ALB12] P. Albertelli, V. Mussi, C. Ravasio, M. Monno: An experimental investigation of the effects of spindle speed variation on tool wear in turning. Procedia CIRP, Vol. 4, S. 29-34, 2012.

[BAL94] M. Balazinski, E. Ennajimi: Influence of feed variation on tool wear when milling stainless steel 17-4Ph. Transactions of the ASME, Vol. 116, S. 516-520, 1994.

[BAL95] M. Balazinski, V. Songmene: Improvement of tool life through variable feed milling of Inconel 600. Annals of the CIRP, Vol. 44/1, S. 55-58, 1995.

[BAU34] M. H. Bauer: Messen der Oberflächengüte. Maschinenbau – Der Betrieb, Vol. 13-3/4, S. 81-83, 1934.

[BEB17] S. Beblein, B. Breidenstein, B. Denkena, C. Pusch, H. Hoche, M. Oechsner, Thermomechanical coating load in dependence of fundamental coating properties, 16th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations, Procedia CIRP 58, S. 25 – 30, 2017.

[BOR01] C. Borbe: Bauteilverhalten hartgedrehter Funktionsflächen. Dr.-Ing. Diss., Universität Hannover, 2001.

[BRA61] P. H. Brammertz: Die Entstehung der Oberflächenrauheit beim Feindrehen. Industrieanzeiger Vol. 2, S. 25-32, 1961.

[BRE11] B. Breidenstein: Oberflächen und Randzonen hoch belasteter Bauteile. Habilitationsschrift, Leibniz Universität Hannover, 2011.

[BRO83] C. A. Brown: A practical method for estimating machining forces from tool-chip contact areas. Annals of the CIRP, Vol. 32/1, S. 91-95, 1983.

[CHR14] K. Christoffel: Das Wesentliche ist manchmal unsichtbar – moderne Schneidstoff- und Geometrieentwicklungen. Tagungsunterlagen 11. Schmalkaldener Werkzeugtagung, Schmalkalden, 2014.

[DEG14] F. Degen, F. Klocke, T. Bergs: Presentation of a novel “Simultaneous Three Axis Turning” process for time and cost efficient machining of rotational symmetric turbomachinery Components. Procedia CIRP, Vol. 24, S. 32-37, 2014.

[DEN11] B. Denkena, H. K. Tönshoff: Spanen - Grundlagen. ISBN 978-3-642-19771-0, 2011.

[DEN12a] B. Denkena, J. Koehler, M. Rehe: Influence of the Honed Cutting Edge on Tool Wear and Surface Integrity in Slot Milling of 42CrMo4 Steel. Procedia CIRP, Vol. 1, S.190-195, 2012.

[DEN17] B. Denkena, D. Dahlmann, H. Boujnah, H.: Tool deflection control by a sensory spindle slide for milling machine tools, 10th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '16, Procedia CIRP 62, S. 329 – 334, 2017.

[FOR91] C. Fortin, M. Balazinski, K. Mondalski, J. Slomski: Study of the Influence of Feed Variation on Tool Wear. Precision Engineering, Vol. 13-3, S. 236, 1991.

[HIN05] W. Hintze, C. Möller: Drehtechnologie für Hartmetallwalzen. Der Kalibreur, Vol. 66, S. 9-19, 2005.

[HIN07] W. Hintze, C. Möller, F. Eglins: Verfahren und Vorrichtung zur spanenden Bearbeitung von Werkstücken. PCT-Anmeldung WO2007/031337 A1, 2007.

[INA74] T. Inamura, T. Sata: Stability Analysis of cutting under varying spindle speed. Annals of the CIRP, Vol. 23, S. 119-120, 1974.

[ISO 3685] Lebensdauerprüfung von Drehmeißeln, 1993.

[ISS52] A. I. Issajew: Mikrogeometrie der Oberfläche beim Drehen. Übersetzung aus dem Russischen, Verlag Technik Berlin, 1952.

[JEM85] K. Jemielniak, M. Szafarczyk, J. Zawistowski: Difficulties in toll life predicting when turning with variable parameters. Annals of the CIRP, Vol. 34/1, S. 113-116, 1985.

[LEE71] Y. S. Lee: Theoretical model of crater wear. Trans. ASME, J. Eng. Ind., Vol. 93, S. 1051-1056, 1971.

[LEN76] E. Lentz, Z. Katz, A. Ber: Investigation of the flank wear of cemented carbide tools. Trans. ASME, J. Eng. Ind., Vol. 98/1, S. 246-250, 1976.

[MÖL09] C. Möller: Untersuchungen zum Drehen von gesinterten WC-Co-Hartmetallwalzringen. Dr.-Ing. Diss., Technische Universität Hamburg-Harburg, 2009.

[MOL39] H. Moll: Die Herstellung hochwertiger Drehflächen. Dr.-Ing. Diss. Technische Hochschule Aachen, VDI Verlag Band 14, Berichte über betriebswissenschaftliches Arbeiten, Berlin, 1939.

[OTT13] A. Otto, G. Radons: Application of spindle speed variation for chatter suppression in turning. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 6, S. 102-109, 2013.

[SEG09] S. Seguy, T. Insperger, L. Arnaud, G. Dessein, G. Peigné: On the stability of high-speed milling with spindle speed variation. Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 48, S. 883-895, 2010.

[TOT13] G. Totis, P. Albertelli, M. Sortino, M. Monno: Efficient evaluation of process stability in milling with Spindle Speed Variation by using the Chebyshev Collocation Method. Journal of Sound and Vibration, Vol. 333, S. 646-668, 2013.

[USU84] E. Usui, T. Shirakashi; T. Kitagawa: Analytical prediction of cutting tool wear. Wear, Vol 100, S. 129-151, 1984

[WU10] D. Wu, K. Chen: Chatter suppression in fast tool servo-assisted turning by spindle speed variation, International Journal of Machine Tools and Manufacture. Vol. 50, S. 1038-1047, 2010.

[XIE12] Q. Xie, Q. Zhang, W. Wang, G. Jin, J. Han: Stability analysis for variable spindle speed milling with helix angle using an improved semi-discretization method. Science China Technological Sciences, Vol.56/3, S. 648-655, 2013.

[ZAT08] M. Zatarain, I. Bediaga, J. Munoa, R. Lizarralde: Stability of milling processes with continuous spindle speed variation: Analysis in the frequency and time domains, and experimental correlation. CIRP Annals - Manufacturing Technology Vol. 57, S. 379-384, 2008.