

Technische Universität München

Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen

**Einfluss der Schneidparameter beim Scher- und Keilschneiden  
von Magnesiumblechwerkstoffen**

Christine Maria Kopp

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der  
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)  
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hartmut Hoffmann (i.R.)
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Marion Merklein,  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Die Dissertation wurde am 21.06.2010 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 11.07.2011 angenommen.



## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen (utg) der Technischen Universität München

Herr Prof. Dr.-Ing. H. Hoffmann (i.R.), ehemaliger Ordinarius des Lehrstuhls, gilt mein besonderer Dank für die Förderung meiner Arbeit.

Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Zäh, Mitglied der Leitung des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb) der Technischen Universität München und Frau Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. M. Merklein, Ordinaria des Lehrstuhls für Fertigungstechnologie der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, möchte ich für die Übernahme des Korreferates und der aufmerksamen Durchsicht der Arbeit sehr herzlich danken.

Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Lindemann danke ich für die Übernahme des Vorsitzes.

Mein herzlicher Dank ergeht vor allem an meine Kollegen und Vorgesetzte, welche mich in dem Vorhaben diese Arbeit zu vollenden, unendlich unterstützt haben.

Für das immer offene Ohr und die motivierenden Worte während der Fertigstellung dieser Arbeit, danke ich Michaela Brummer, Sabine Wittmann, Markus Ostermeier und Raphael Petry sowie meiner Schwester Felicitas Kopp.

Meiner Mutter danke ich, dass sie immer an mich geglaubt hat und mich in allen Belangen meines Lebens unterstützt hat. Durch die mir gewährte Freiheit konnte ich meinen Weg gehen.

Für den Humor und die Geduld, welche mein Mann Thomas aufbringen musste, danke ich von ganzem Herzen.

„Wer am Ende ist, kann von vorn anfangen, denn das Ende ist der Anfang von der anderen Seite.“

*Karl Valentin*

## Resümee

Die Herstellung von Karosseriebauteilen aus Magnesiumlegierungen, wie beispielsweise AZ31, ist aufgrund der steigenden Nachfrage nach leichteren und somit ressourcenschonenden Fahrzeugen stärker in den Fokus gerückt. In den letzten zehn Jahren hat sich Magnesium als Konstruktionswerkstoff behauptet und gehört mit einer jährlichen Zuwachsrate von 15-20 % zu den am stärksten wachsenden Werkstoffgruppen [JUCH08].

Vor diesem Hintergrund werden an den steigenden Einsatz von Leichtmetallen als Konstruktionswerkstoff erhebliche Anforderungen gestellt, und eine Vielzahl technischer Herausforderungen müssen überwunden werden. Ein grundsätzliches fertigungstechnisches Problem stellt das Scherschneiden von Magnesiumblechen dar, weswegen neue Schneidkonzepte erarbeitet und Prozessparameter definiert werden müssen.

In dem Forschungsvorhaben werden neben dem konventionellen Scherschneiden alternativ die Keilschneidverfahren zum Zerteilen von Magnesiumblech untersucht. Da die Umformeigenschaften von Magnesiumlegierungen, bedingt durch die hexagonal dichteste Gitterstruktur, gänzlich anders sind als bei den bekannten duktilen Werkstoffen Stahl und Aluminium, stehen diese Eigenschaften im Mittelpunkt der Untersuchungen. Aufgrund der eingeschränkten Umformbarkeit von Magnesiumblechwerkstoffen bei Raumtemperatur und einer verbesserten Schnittflächenqualität bei Temperaturen ab 120 °C wurde ein werkzeugunabhängiges Heizkonzept entwickelt und in die unterschiedlichen Schneidverfahren integriert.

In einer umfangreichen Versuchsmatrix werden systematisch die optimalen Schneidparameter experimentell und simulativ ermittelt. Weitere Untersuchungen zum Korrosionsverhalten sowie die Qualifizierung der Schnittflächentopographie führen zu einem optimierten Prozessfenster zum Schneiden von Magnesiumblechwerkstoffen.

## **Executive Summary**

The production of carriage components made of magnesium alloys, e.g. AZ31, is getting more and more attention, due to the fact that the demand for lighter and therefore resource saving cars is rising. In the last 10 years magnesium proved itself as an engineering material, with a yearly increment of 15 %-20 % to the most growing substance groups [JUCH08].

With this background not only the application of light alloys as construction materials has increased but also the production requirements are getting remarkable and a multiplicity of technical challenges have to be mastered. The blanking process of magnesium sheets is a fundamental fabrication and technological problem which made new concepts and conditions of cutting necessary.

This research project regards conventional shear cutting, as well as the wedge-action cutting for use with magnesium alloys. Since forming properties of magnesium alloys are entirely different due to this hexagonal compact structure, and compared to known ductile materials steel and aluminium, these properties are in the focus. As a result of the limited ductility of magnesium sheet at ambient temperature, a tool independent heat concept has been developed and integrated into the different cutting processes.

The optimal cutting parameters were determined experimentally and by means of finite element analysis in an extensive experimental array. In further research both the corrosion behaviour and the cut surface topography have been verified. With this method, optimal process conditions can be acquired of magnesium sheets.

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>Verzeichnis der Kurzzeichen und Abkürzungen.....</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Kenntnisse.....</b>	<b>2</b>
2.1 Grundlagen und Literaturüberblick.....	2
2.2 Scherschneidverfahren.....	6
2.2.1 Einteilung der Schnittflächenqualität beim Scherschneiden.....	7
2.2.2 Beschreibung der Schneidkraft.....	8
2.3 Keilschneidverfahren.....	10
2.3.1 Beißschneiden.....	12
2.3.2 Einteilung der Schnittflächenqualität beim Keilschneiden.....	12
2.3.3 Beschreibung der Schneidkraft beim Keilschneiden.....	13
2.4 Magnesium und Magnesiumlegierungen.....	14
2.5 Methoden und Verfahren der FE-Simulation.....	16
2.5.1 Schneidsimulation.....	16
2.5.2 Bruchkriterium.....	17
2.6 Korrosionsverhalten von Magnesiumblechwerkstoffen.....	17
2.6.1 Grundlagen.....	17
2.6.2 Korrosionsschutz.....	18
2.6.3 Korrosionsprüfung.....	18
<b>3 Zielsetzung und Aufgabenstellung .....</b>	<b>20</b>
<b>4 Versuchsplan .....</b>	<b>24</b>
<b>5 Versuchs- und Messeinrichtungen .....</b>	<b>26</b>
5.1 Versuchseinrichtungen.....	26
5.1.1 Presse.....	26
5.1.2 Versuchswerkzeug.....	26
5.1.3 Temperierung des Schneidprozesses.....	28
5.1.4 Schnittflächenprofil.....	32
5.1.5 Schneidkraft- und Wegmessung.....	32

---

5.1.6	Zug-Druck-Prüfung bei Raumtemperatur .....	34
5.1.7	Zug-Druck-Prüfung bei unterschiedlichen Temperaturen.....	34
5.1.8	Glimmentladungsspektroskopie .....	35
5.1.9	Härteprüfung .....	36
5.1.10	Korrosionsprüfung.....	36
<b>6</b>	<b>Versuchswerkstoffe.....</b>	<b>38</b>
6.1	Magnesiumlegierungen der AZ-Gruppe.....	38
6.1.1	Gefügestruktur .....	38
6.1.2	Chemische Zusammensetzung.....	38
6.2	Mechanische Kennwertermittlung.....	39
6.2.1	Zugversuch bei Raumtemperatur.....	39
6.2.2	Zugversuch bei unterschiedlichen Temperaturen .....	40
6.2.3	Härtemessungen.....	44
6.3	Oberflächenrauheit .....	44
6.4	Ermittlung des Wärmeübergangverhaltens.....	45
<b>7</b>	<b>Versuchsdurchführung .....</b>	<b>46</b>
7.1	Zusammenfassung der Schneidverfahren und der Schneidparameter.....	46
7.2	Temperierung des Schneidprozesses .....	47
7.3	Scherschneiden.....	50
7.3.1	Variation des Schneidspaltes .....	50
7.3.2	Variation der Schnittlinienführung .....	51
7.3.3	Variation der Werkzeugkantengeometrie .....	51
7.4	Keilschneiden .....	52
7.4.1	Variation der Keilwinkel.....	52
7.4.2	Variation der Schnittlinienführung .....	54
7.5	FE-Simulation .....	54
7.6	Ermittlung des Schnittflächenprofils.....	55
7.7	Korrosionsuntersuchung.....	58
<b>8</b>	<b>Versuchsergebnisse.....</b>	<b>60</b>
8.1	Scherschneiden.....	60
8.1.1	Einfluss der Schneidgeschwindigkeit .....	60



---

8.1.2	Einfluss der Werkzeugkantengeometrie.....	61
8.1.3	Einfluss des Schneidspaltes.....	62
8.1.4	Einfluss der Prozesstemperatur .....	67
8.2	Scherschneiden mit negativem Schneidspalt .....	70
8.2.1	Zwillingsbildung.....	71
8.2.2	Einfluss des negativen Schneidspaltes.....	71
8.2.3	Einfluss der Prozesstemperatur .....	73
8.3	Keilschneidverfahren .....	76
8.3.1	Messerschneiden .....	77
8.3.1.1	Einfluss der Schneidgeschwindigkeit .....	77
8.3.1.2	Variation des Keilwinkels.....	78
8.3.1.3	Einfluss der Prozesstemperatur .....	83
8.3.2	Beißschneiden .....	86
8.3.2.1	Einfluss der Schneidgeschwindigkeit .....	87
8.3.2.2	Variation des Keilwinkels.....	87
8.3.2.3	Einfluss der Prozesstemperatur .....	91
8.4	Vergleich der untersuchten Schneidverfahren.....	94
8.5	FE-Simulation .....	96
8.6	Korrosionsuntersuchung.....	100
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>104</b>
<b>10</b>	<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>108</b>
<b>11</b>	<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>125</b>
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>126</b>
<b>13</b>	<b>Appendix .....</b>	<b>132</b>
13.1	Scherschneiden .....	132
13.1.1	Scherschneiden mit Schneidspalt $u$ von 2,5 % bis 20 % (offen) ....	132
13.1.2	Scherschneiden mit Schneidspalt $u$ von 2,5 % bis 20 % (geschlossen).....	136
13.1.3	Scherschneiden bei Raumtemperatur bis 250 °C ( $u = 5$ %; offen).....	140
13.1.4	Scherschneiden mit negativen Schneidspalt.....	145

---

13.2	Messerschneiden.....	149
13.2.1	Messerschneiden mit unterschiedlichen Keilwinkeln (offen) .....	149
13.2.2	Messerschneiden mit unterschiedlichen Keilwinkeln (geschlossen).....	155
13.2.3	Messerschneiden bei Raumtemperatur bis 250 °C .....	159
13.3	Beißschneiden.....	164
13.3.1	Beißschneiden mit unterschiedlichen Keilwinkeln (offen).....	164
13.3.2	Beißschneiden mit unterschiedlichen Keilwinkeln (geschlossen).....	170
13.3.3	Beißschneiden bei Raumtemperatur bis 250 °C .....	174

## Verzeichnis der Kurzzeichen und Abkürzungen

### Kurzzeichen

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$\alpha$	°	Keilwinkel symmetrisch
$\alpha_{(o/u)'}'$	°	Keilwinkelabdruck (= $\frac{1}{2} \alpha$ ) Ober-/Untermesser
$\alpha'$	°	Keilwinkelabdruck (= $\frac{1}{2} \alpha$ )
$\beta$	°	Keilwinkel asymmetrisch
$\gamma$	°	Bruchflächenwinkel
$\varepsilon$	-	Effektive Dehnung
$\sigma$	N/mm <sup>2</sup>	Effektive Spannung
$\varepsilon_R$	-	Dehnung bei Rissinitiation
$\mu$	-	Reibzahl
$\rho$	g/cm <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma_m$	N/mm <sup>2</sup>	Mittelspannung
A	mm <sup>2</sup>	Maßabweichung
$A_{gt}$	%	Gesamtdehnung bei Höchstkraft
$A_{80}$	%	Bruchdehnung
$k_s$	N/mm <sup>2</sup>	Schneidwiderstand
c	-	Bezogener Schneidwiderstand
C	N/mm <sup>2</sup>	Grenzwert für Rissinitiation (fracture value)
$\alpha_G$	-	Gewichtungsfaktor
E	N/mm <sup>2</sup>	Elastizitätsmodul
F	N	Schneidkraft
$F_N$	N	Niederhalterkraft
$F_S$	N/mm <sup>2</sup>	Schneidkraftbedarf normiert auf die Schnittlänge und die Blechdicke des zu trennenden Werkstoffes
H	%	Relative Fasenhöhe
$b_E$	mm	Kanteneinzugsbreite

---

b <sub>G</sub>	mm	Schnittgratbreite
h <sub>B</sub>	mm	Bruchflächenhöhe
h <sub>E</sub>	mm	Kanteneinzugshöhe
h <sub>G</sub>	mm	Schnittgrathöhe
h <sub>S</sub>	mm	Glattschnitthöhe
l <sub>S</sub>	mm	Länge des Schneidwerkzeugs
k <sub>f</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Fließspannung
φ	-	Umformgrad
n	-	Verfestigungsexponent
r	-	Senkrechte Anisotropie
R <sub>m</sub>	N/mm <sup>2</sup>	Zugfestigkeit
R <sub>p0,2</sub>	N/mm <sup>2</sup>	0,2 %-Dehngrenze
R <sub>a</sub>	μm	Mittlere Rauheit
s	mm	Blechdicke
T	°C	Temperatur
u	%	Relativer Schneidspalt
v	mm/s	Schneidgeschwindigkeit
x	mm	Weg

### **Abkürzungen**

VW	Volkswagen AG
AZ-Familie	Aluminium-Zink-Familie
z. B.	zum Beispiel
DIN	Deutsche Industrie Norm
VDI	Verein deutscher Ingenieure
bzw	beziehungsweise
FE	Finite Elemente
KTL	Kathodische Tauchlackierung
CCD	Charge-Coupled-Device

HV	Härte Vickers
WR	Walzrichtung
vgl	vergleiche



## 1 Einleitung

Magnesium gewinnt als der leichteste metallische Konstruktionswerkstoff zunehmend an Bedeutung. Magnesiumlegierungen bieten einen weiten Anwendungsbereich in der Transport- und Flugzeugindustrie [CAO06]. Neben weiteren Industriezweigen, wie der Elektroindustrie, ist vor allem im Automobilbau der Einsatz derartiger Legierungen immer häufiger anzutreffen. Im Werben um die Gunst der Käuferschaft setzen Automobilhersteller neben der Minimierung des Kraftstoffverbrauchs auf eine steigende Produktdiversifizierung. Schon jetzt werden im Serieneinsatz aufgrund der großen Gestaltungsfreiheit und hohen Bauteilfestigkeit Strukturteile wie z.B. Tür-, Schiebedach- und Heckklappeninnenelemente oder auch Tanktrennwände als Magnesiumdruckgussteil dargestellt. Wesentliches Ziel dabei ist die hierdurch deutlich reduzierte Fahrzeuggesamtmasse. Die Verwendung von Magnesiumblechwerkstoffen blieb bislang meist der Luftfahrtindustrie vorbehalten, da hier hauptsächlich großflächige Bauteile wie Kanzelrahmen, Luftansaugstutzen und Landeklappen, ohne oder mit nur geringer Umformung verbaut werden und zudem Leichtbau mehr kosten darf [CAO06]. Mit zunehmenden Wissen über die Magnesiumblechumformung und der Weiterentwicklung der Legierungen hat der Einzug von Magnesium als Blechwerkstoff in andere Industriezweige begonnen. Magnesiumbleche ermöglichen Gewichtseinsparungen von 50 % bis 60 % im Vergleich zu Stahl bzw. 15 % bis 20 % gegenüber Aluminium. Im Jahr 2002 stellte VW das 1-Liter-Versuchsfahrzeug vor, welches eine Rahmenstruktur aus Magnesiumprofilen und -druckgussknoten besitzt [KAIN00], [KAMM00], [ENGL04], [HECH07].

Bleche und Strangpressprofile aus Magnesiumlegierungen rücken zunehmend in den Mittelpunkt des Interesses. Verglichen mit Gussteilen aus Magnesium weisen diese Produkte aus Knetlegierungen bessere mechanische Eigenschaften auf und eröffnen die Möglichkeit, dünnwandige oder lange Strukturen darzustellen [DIER07]. Die zumeist verwendete Legierungsgruppe basiert auf der AZ-Familie. Hieraus ergibt sich Potenzial zur Optimierung der gesamten Prozesskette [KLEI02],[HESS05], [ILSC05].

In den Jahren 2005 und 2006 steigerte sich die weltweite Primärmagnesiumproduktion von 360.000 t auf 760.000 t. Ein Grund dafür war die positive Preisentwicklung der jüngsten Zeit [PIRC02]. In Abbildung 1.1 ist die prozentuale Verteilung auf die einzelnen magnesiumverarbeitenden Branchen dargestellt [WWW06].

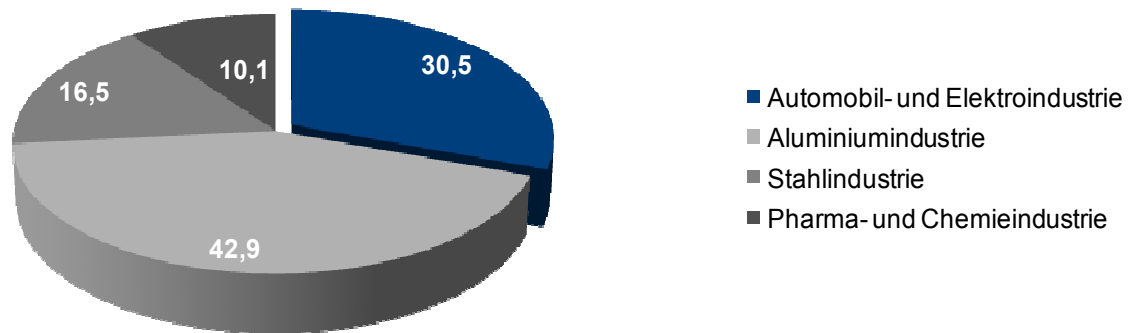


Abbildung 1.1: *Prozentualer Verbrauch der erzeugten Tonnage Magnesium im Jahre 2006 nach unterschiedlichen Branchen [WWW06]*

Durch sich verknappende Ressourcen ist es das Ziel der industrialisierten Gesellschaft, die Primärenergieträger zu schonen und eine umweltverträgliche Verwendung zu ermöglichen. Unter diesem Aspekt stieg in den letzten Jahren der Einsatz von Magnesium-, Titan- und vor allem von Aluminiumwerkstoffen in der Fahrzeug- sowie der Luft- und Raumfahrtindustrie. Da Magnesium im Vergleich zu Titan, Aluminium oder herkömmlichen Stahlwerkstoffen aufgrund seiner geringeren Dichte und hohen spezifischen Festigkeit ein höheres Leichtbaupotenzial besitzt, ließe sich durch konsequenten Einsatz dieses Werkstoffes z. B. im Automobilbau eine weitere deutliche Gewichteinsparung erreichen. Etwa 1,5 % der Erdkruste bestehen aus Magnesium und die Herstellung von Primärmagnesium benötigt circa so viel Energie wie die Herstellung von Primäraluminium. Für die Erzeugungsenergie von Sekundärmagnesium hingegen ist nur etwa 5 % der Primärenergie notwendig, somit ist Magnesium umweltschonender recyclebar als vergleichsweise Aluminium, das circa 10 % der Primärenergie benötigt. Magnesium ist zu fast 100 % recyclebar, zudem muss es im Gegensatz zu Aluminiumlegierungen nicht sortenrein gesammelt und aufbereitet werden. [DROE99], [GEHR03], [WOHN06].

Vor diesem Hintergrund werden an den steigenden Einsatz von Leichtmetallen erhebliche Anforderungen gestellt, für deren Erfüllung eine Vielzahl von technischen Herausforderungen überwunden werden müssen [KAIN00].



Problematisch bei der Verwendung dieses Werkstoffs ist unter anderem die erhöhte Korrosionsanfälligkeit. Das korrosive Verhalten resultiert aus dem niedrigen Elektrodenpotenzial von Magnesium in der elektrochemischen Spannungsreihe. Daher ist beim Einsatz von Magnesiumbauteilen im Automobilbau eine vollständig geschlossene Beschichtung in Form einer Lackierung oder sonstigen Schutzschicht notwendig. Schon bei kleinsten Fehlstellen, wie sie beispielsweise durch Steinschlag entstehen, kann in der Beschichtung der Korrosionsvorgang initiiert werden. Die Unterwanderung der Schutzschicht und Ausbreitung der Korrosion ist die Folge. Dies macht die Forderung nach einer guten Oberflächenqualität der nachträglich in die Bauteile eingebrachten Beschnittkonturen, Lochungen oder Funktionsflächen deutlich, da diese Stellen häufig Beschichtungsdefizite aufweisen. Dies gilt sowohl für den Druckguss als auch für den sich immer weiter verbreitenden Einsatz von Magnesiumknetlegierungen [KAES90], [WEN98], [KAMM00]. Vor diesem Hintergrund und steigendem Bedarf an neuen Leichtbauwerkstoffen, die in bestehende Produktionsprozesse integriert werden sollen, wird im Rahmen dieser Arbeit das Schneiden von Magnesiumblechwerkstoffen untersucht.

Neben dem konventionellen Scherschneiden werden die Keilschneidverfahren hinsichtlich der Eignung für das Schneiden von Magnesiumblechwerkstoffen untersucht. Da die Umformeigenschaften von Magnesiumlegierungen gänzlich anders sind als die der bekannten Werkstoffe Stahl und Aluminium, stehen diese im Mittelpunkt des Interesses. Zerteilen bzw. Schneiden ist ein Trennprozess, bei dem die Materialtrennung über das Abgleiten oder Abscheren von Versetzungen im Metallgitter erfolgt und der Sprödbruch durch die Erschöpfung des Formänderungsvermögens eingeleitet wird. Ursächlich für die schlechte Umformbarkeit ist die Gitterstruktur der Magnesiumlegierungen bei Raumtemperatur. Im hexagonalen Kristallgitter von Magnesium kann bei niedrigen Temperaturen nur die Basisfläche (0001) als Gleitebene wirken, so dass die Kaltumformbarkeit im polykristallinen Zustand erheblich eingeschränkt wird. Die plastische Verformung ist mit der Bildung von Zwillingslamellen verbunden, die bei Raumtemperatur der einzige aktive Mechanismus der Umformung ist. Erst bei circa 225 °C stehen weitere Mechanismen zur Umformung zur Verfügung. Aufgrund dieser Besonderheiten wird in dieser Arbeit

ein werkzeugunabhängiges Konzept zum beheizten Schneiden von Magnesiumblechwerkstoffen vorgestellt [BECK97], [KAMM00].



## 2 Stand der Kenntnisse

### 2.1 Grundlagen und Literaturüberblick

In DIN 8588 ist das Zerteilen von Werkstoffen genormt und das Trennen von Werkstoffen wird neben den anderen Verfahren als eines von sechs Fertigungsverfahren genannt. Das Trennen wird wiederum in sechs Untergruppen unterteilt. Eine davon ist das Zerteilen, welches sich wiederum in sechs Verfahren gliedert. Das Scherschneiden ist unter diesen Untergruppen das bedeutendste und wird in der Industrie am häufigsten eingesetzt. Das Messer- und Beißschneiden ist wegen nicht zu berücksichtigender Niederhalterkräfte für die Industrie ebenfalls relevant. Die in DIN 8588 genormten Unterteilungen für das Trennen werden in Abbildung 2.1 ersichtlich [DIN8588].

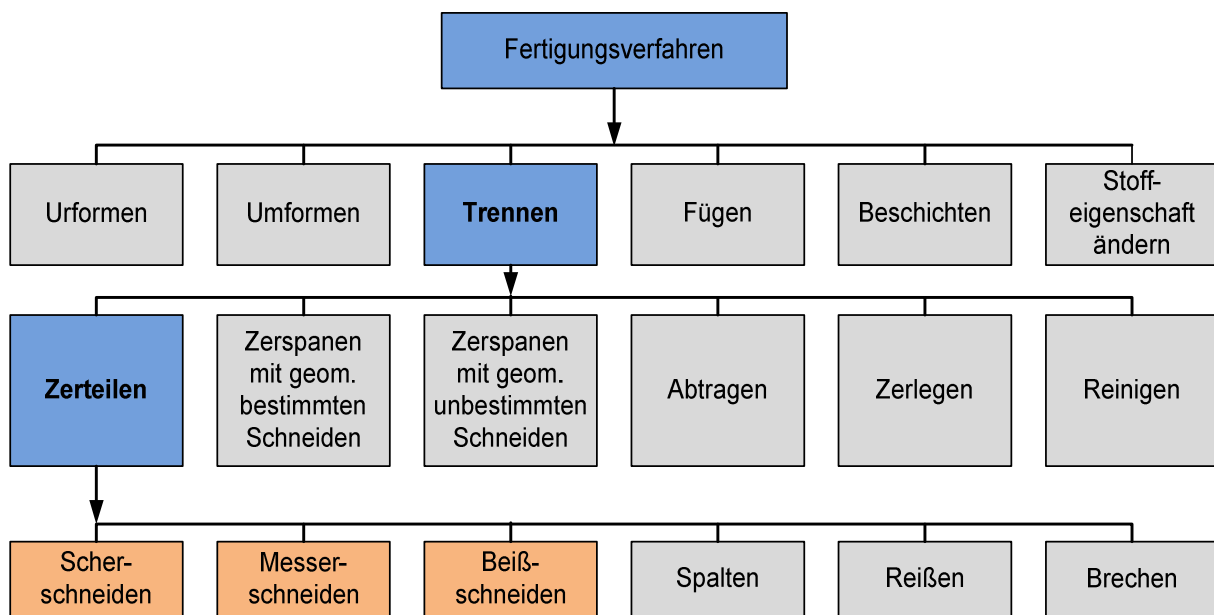


Abbildung 2.1: Einteilung des Fertigungsverfahrens Zerteilen nach DIN 8588

Unter Trennen ist eine Änderung der Form durch lokales Aufheben des Zusammenhaltes zu verstehen. Zerteilen ist das mechanische Trennen von Werkstoffen, ohne dass dabei ein Span entsteht. Allgemein wird beim Zerteilen bzw. Schneiden die Art der Schnittlinie unterschieden. Dabei kann es sich entweder um einen offenen oder geschlossenen Schnitt handeln. Die Schneiden des Werkzeugs bilden beim offenen Schnitt eine offene und beim geschlossenen Schnitt eine geschlossene Linie, wie in Abbildung 2.2 gezeigt wird. Bei einem offenen Schnitt wird meist ein Abfall oder Teilstück von einem Werkstück abgeschnitten, weswegen dieser Vorgang oft als

Abschneiden bezeichnet wird. Ein geschlossener Schnitt wird in Lochen und Ausschneiden unterteilt. Beim Lochen wird ein Abfallstück, der so genannte Butzen, aus einem Werkstück geschnitten, beim Ausschneiden dagegen das Werkstück aus einem Stanzgitter geschnitten, wie es in Abbildung 2.2 skizziert ist. Eine detaillierte Ausführung der für diese Arbeit relevanten Schneidverfahren und deren Charakteristiken werden in Abschnitt 2.2 und Abschnitt 2.3 weiter ausgeführt [DIN8588], [BOLU01].

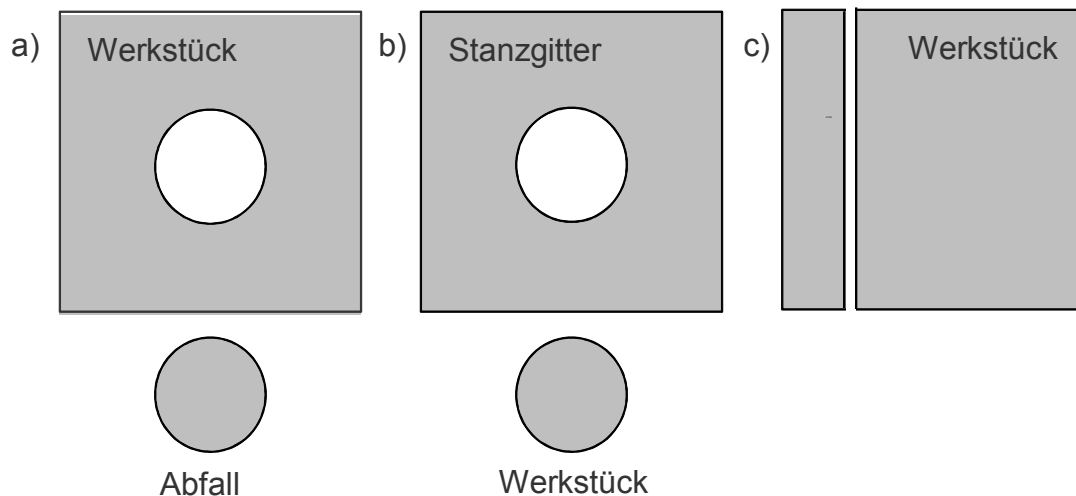


Abbildung 2.2: a) Lochen, geschlossener Schnitt; b) Ausschneiden, geschlossener Schnitt; c) Abschneiden, offener Schnitt

Der zu schneidende Blechwerkstoff als einer der Hauptfunktionsträger des Gesamtsystems Materialtrennung durch Schneiden ist bei der Betrachtung des Schneidprozesses von zentraler Bedeutung. Blechwerkstoffe werden hauptsächlich durch ihre Legierungszusammensetzung und die im Zugversuch ermittelten mechanischen Kennwerte charakterisiert. Bei den Werkstoffeigenschaften von zu schneidenden Materialien in Stahl- und Elektroblechqualitäten zeigt sich, dass hohe Siliziumgehalte bei Stahlblech die Werkstofffestigkeit und -härte erhöhen. Jedoch ist diese hohe Festigkeit mit einer geringeren erreichbaren Bruchdehnung des Materials verbunden. Des Weiteren bildet Silizium harte und spröde Silikate und Karbide, die verschleißend auf die Schneidelemente wirken und so die Schneidhaltigkeit negativ beeinflussen. Generell wird eine hohe Härte und Festigkeit des Blechwerkstoffs als verschleißfördernd angesehen [POEL97].

Die in dieser Arbeit untersuchte Magnesiumlegierung weist aufgrund der hexagonalen Gitterstruktur ein mit herkömmlichen Stahlwerkstoffen nicht vergleichbares Verhalten auf. Der besondere Deformationsmechanismus wird von [EBEL08] beschrieben. Hierbei treten sogenannte bei der Deformation Stapelfehler auf. Diese kann man sich als Verschiebung in einem Raster aus auf- und nebeneinander gestapelten Kristallwürfeln vorstellen. Schiebt man von oben einen zusätzlichen Würfelstapel in das Gitter hinein, werden die benachbarten Kristallwürfel zur Seite gedrängt. An einem solchen Stapelfehler kann eine Kristallstruktur umklappen. Da dieser Umklappmechanismus an einer Spiegelebene abläuft, entstehen regelmäßig gespiegelte Kristallbereiche. Diese Vorgänge werden als Zwillingsbildung bezeichnet. Die Zwillingsbildung und die damit verbundenen Besonderheiten wurden bereits bei den TWIP-Stählen (Twinning Induced Plasticity) genutzt.. Hierbei wird ein Teil des Umformvermögens durch die Zwillingsdeformation bereit gestellt. [FROM04].

Für die Untersuchungen, insbesondere aber auch für die FE-Simulation muss das besondere Werkstoffverhalten erfasst werden. Das Gebiet der Kennwertermittlung unterlag in den letzten Jahren einer starken Entwicklung. Optische Messverfahren erlauben eine detaillierte Charakterisierung der mechanischen Kennwerte. Aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Magnesiumlegierung AZ31, die bei [CART08] beschrieben wird, müssen die Kennwerte bei unterschiedlichen Temperaturen ermittelt werden.

Konventionell eingesetzte Werkstoffe wie Stahl- und Aluminiumlegierungen wurden in zahlreichen Forschungsvorhaben quantitativ und qualitativ untersucht. Die Ergebnisse von [HOOG099], [TOUS01], [BOLU01], [PETR07] definieren ein optimiertes Prozessfenster für das Scherschneiden von unterschiedlichen Werkstoffen. In vorangegangenen Arbeiten wurde das Scherschneiden als das am häufigsten eingesetzte Schneidverfahren grundlegend untersucht. Insbesondere im Fahrzeugbau ist dieses Verfahren aufgrund seiner hohen Wirtschaftlichkeit von großer Bedeutung. Deswegen wurde in der Arbeit von [POEL97] insbesondere das Scherschneiden an Karosseriebauteilen untersucht. In Arbeiten von [NEUG08] wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt, um das Scherschneiden, insbesondere an Mehrfachblechverbindungen, hinsichtlich der Schnittflächenqualität zu verbessern.

In [DOEG03] wurde dargestellt, dass sich Oberflächenbeschichtungen positiv auf die Schneidbarkeit auswirken. Hinsichtlich des Einflusses von Schmierstoffen beim Schneiden herrschen hingegen widersprüchliche Auffassungen. Aus der Vielzahl der auf den Blechwerkstoff bezogenen Einflussgrößen kann festgehalten werden, dass zum Erzielen eines optimalen Schneidergebnisses entweder eine Anpassung des Blechmaterials an die geforderte Schneidaufgabe oder eine entsprechende Optimierung des Werkzeugs erfolgen muss.

Das Keilschneiden, zu dem das Messer- und Beißschneiden gehören, ist ein noch nicht untersuchtes Verfahren für Feinbleche. Es ist jedoch für die Entfernung des Angusses von Druckgussbauteilen aus Aluminium oder Magnesium ein etabliertes Verfahren. Die Arbeit von [RICK07] beschreibt die Optimierung dieser Verfahren für Gussanschnitte. Des Weiteren sind im Rahmen dieser Untersuchung unterschiedliche Keilwinkel der Schneidaktivelemente untersucht und geeignete Prozessparameter definiert worden.

## 2.2 Scherschneidverfahren

Das Scherschneiden bezeichnet das Zerteilen eines Werkstücks durch zwei Schneiden, die sich während des Schneidvorgangs gerade aneinander vorbeibewegen. Der Werkzeugaufbau für den geschlossenen Schnitt ist in Abbildung 2.3 skizziert. Beim geschlossenen Schnitt wird die feststehende Schneide als Schneidplatte oder Schneidmatrize und die sich bewegende Schneide als Schneidstempel bezeichnet.

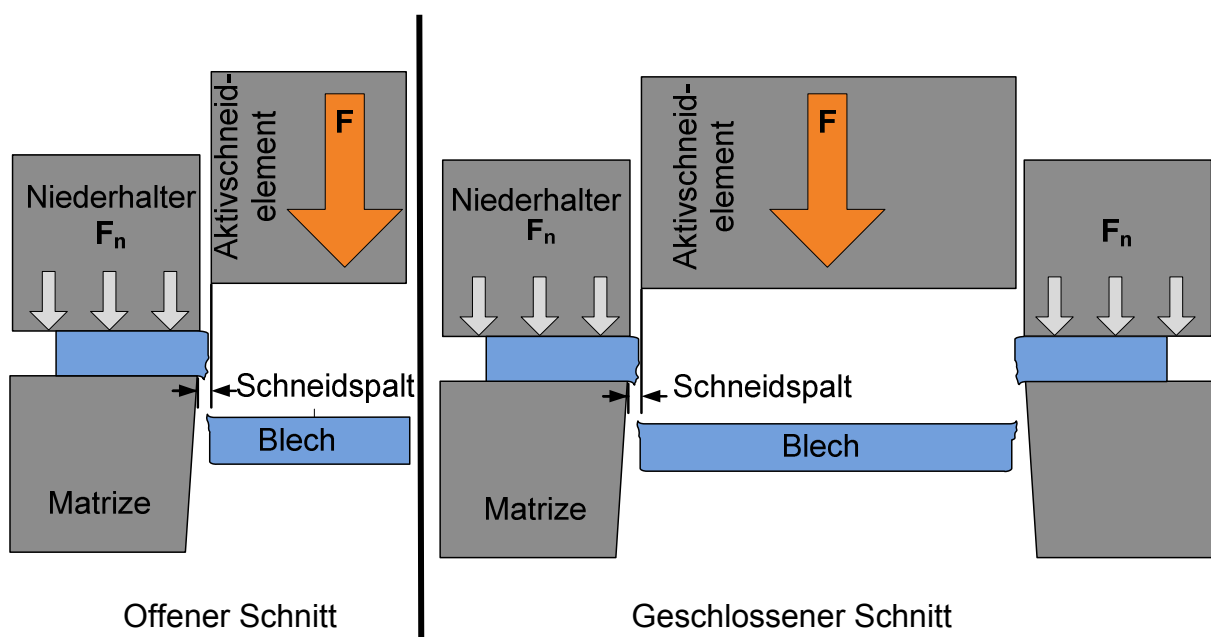


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung des Scherschneidens mit (links) offener und (rechts) geschlossener Schnittlinienführung

Das Aktivschneidelement und die Matrize können unterschiedliche Geometrieverhältnisse aufweisen. Dadurch entsteht ein Biegemoment, welches zum Abheben des Werkstücks führen kann. Diese ungewollte Verformung wird durch einen Niederhalter vermieden [HOOG99], [BOLU01], [STER03], [WWW04], [KLOC06].

Durch die Werkzeugbewegung entstehen Druckkräfte, die im Werkstoff zu Spannungen in der Schneidzone führen. Sobald das elastische Formänderungsvermögen überschritten ist, tritt eine plastische Formänderung auf und das Material wird getrennt. Durch weiteres Eindringen des Stempels entstehen Risse, die letztlich zum Versagen des Werkstoffs führen. Beim Normalschneiden ist der Verlauf der Risse



von der Größe des Schneidspalts abhängig. In der Regel ist ein Schneidspalt von 5 % bis 10 % der Blechdicke ideal, damit sich die stempel- und matritzenseitigen Risse vereinigen. Die einzelnen Stufen eines Prozessablaufes sind in Abbildung 2.4 exemplarisch für den Ablauf eines (offenen) Schnittes skizziert [TIMM56].

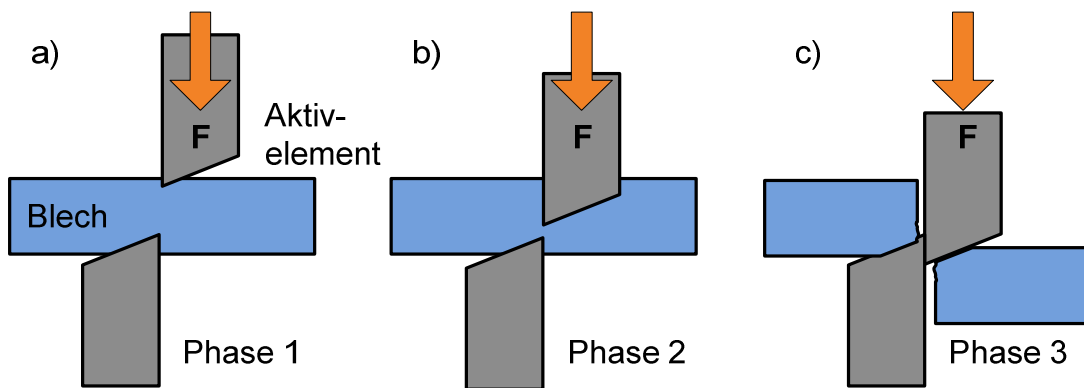


Abbildung 2.4: Exemplarische Darstellung der drei Phasen während des Scherschneidvorgangs

Das Scherschneiden ist eines der am häufigsten eingesetzten Verfahren beim Trennen von Blechwerkstoffen. Für jedes aus Blech herzustellende Produkt wird entweder das Rohteil aus Blech durch Schneiden hergestellt oder es erfolgt ein Beschneiden des Fertigteils nach der Umformung [BEHR04].

### 2.2.1 Einteilung der Schnittflächenqualität beim Scherschneiden

Aufgrund verschiedener Prozessbedingungen während des Schneidvorgangs entsteht bei metallischen Werkstoffen eine charakteristische Form der Schnittfläche. Diese ist durch Schnittflächenkenngrößen gemäß Abbildung 2.5 in der VDI Richtlinie 2906 festgelegt. Wichtige Einflussparameter auf die Qualität des Schneidergebnisses sind der Schneidspalt, die Schneidkantengeometrie, der Blechwerkstoff, die Blechdicke, die Temperatur, die Werkstückgeometrie und die Schneidgeschwindigkeit.

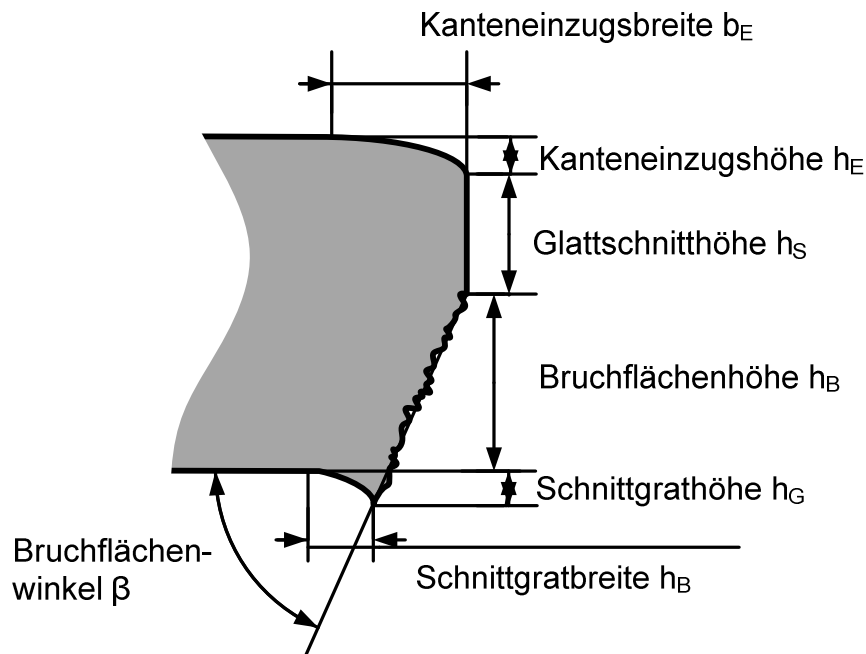


Abbildung 2.5: Schnittfläche nach VDI 2906 mit Schnittflächenkenngrößen

Welche Bedeutung den einzelnen Schnittkenngrößen bei der Bewertung der Schneidkantenqualität zukommt, wird durch den beabsichtigten Einsatz des Werkstücks bestimmt. Falls die Schnittkante als Funktionsfläche genutzt werden soll, muss auf einen möglichst hohen Glattschnittanteil  $h_S$  geachtet werden. Ist dies nicht der Fall, so gewinnen die restlichen Schnittkenngrößen an Bedeutung. Dabei spielen z. B. bei Karosserieteilen für die Fahrzeugindustrie die Prozesssicherheit und der Nachbearbeitungsaufwand eine Rolle [HOOG99], [MAIE05], [KLOC02], [VDI2906].

Im Allgemeinen ist eine hohe Schnittflächenqualität durch eine geringe Kanteneinziehungshöhe  $h_E$ , Kanteneinzugsbreite  $b_E$ , Bruchflächenhöhe  $h_B$ , Schnittgrathöhe  $h_G$ , Schnittgratbreite  $b_G$  und eine große Glattschnitthöhe  $h_S$  gekennzeichnet. Der optimale Bruchflächenwinkel  $\gamma$  beträgt  $90^\circ$  [HOOG99], [KLOC06].

### 2.2.2 Beschreibung der Schneidkraft

Die zum Zerteilen eines Blechwerkstoffes notwendige maximale Schneidkraft  $F$  [N] für Stempel mit plangeschliffener unterer Stempelfläche errechnet sich nach Gleichung 2.1:

$$F = A_S \cdot k_S \quad (2.1)$$

mit  $A_S = l_S \cdot s$

$s$  = Blechdicke [mm]

$F$  = maximale Schneidkraft [N]

$A_S$  = Schnittfläche [mm<sup>2</sup>]

$k_S$  = Schneidwiderstand [N/mm<sup>2</sup>]

$l_S$  = Länge der Schnittlinie [mm]

Der Schneidwiderstand  $k_S$  ist eine werkstoffabhängige Größe. Die Zugfestigkeit ist die maßgebliche Größe zur Bestimmung des Schneidwiderstandes  $k_S$ , der nach Gleichung 2.2 bestimmt wird:

$$k_S = c \cdot R_m \quad (2.2)$$

$R_m$  = Zugfestigkeit des geschnittenen Werkstoffs [N/mm<sup>2</sup>]

$c$  = bezogener Schneidwiderstand [-]

Der bezogene Schneidwiderstand  $c$  ist aus praktischen Versuchen an Stahlwerkstoffen ermittelt worden und wird mit 0,8 für ein duktiles, gut umformbares Gefüge angegeben. In der Literatur findet sich für einen spröden Werkstoff mit ferritisch-perlitischem Gefüge oder Aluminiumlegierungen ein Wert von 0,6 für den bezogenen Schneidwiderstand  $c$ . Dieser Wert ist auch auf die spröde Magnesiumlegierung AZ31 übertragbar [TIMM56], [LANG90], [SCHU96].

### 2.3 Keilschneidverfahren

Als Keilschneiden beschreibt die Norm das Zerteilen des Werkstücks durch eine oder zwei keilförmige Schneiden. Die Schneiden bewegen sich im Gegensatz zum Scherschneiden definiert aufeinander zu. Es lässt sich in das Messerschneiden und Beißschneiden unterteilen. Abbildung 2.6 zeigt eine schematische Darstellung der Keilschneidverfahren [DIN8588].

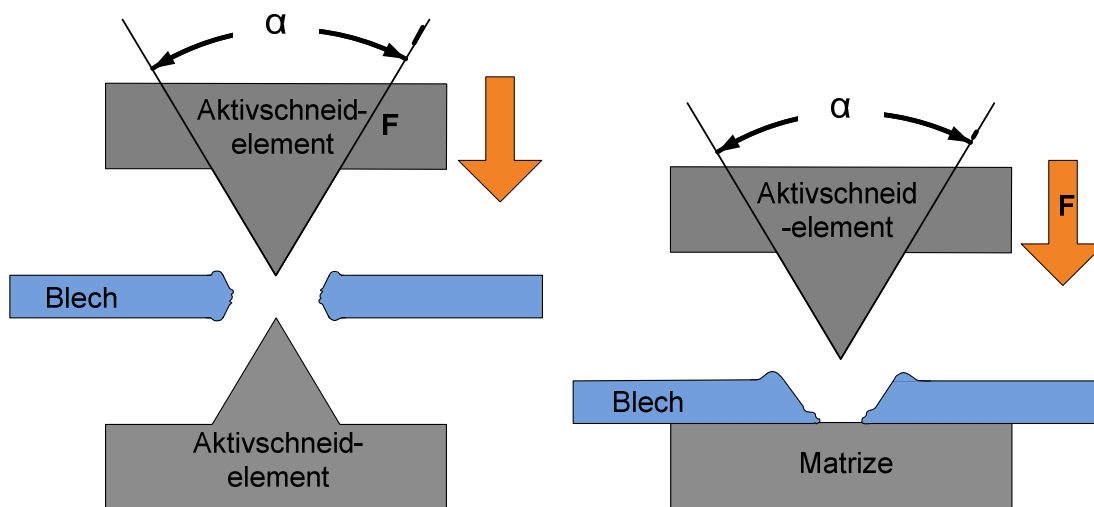


Abbildung 2.6: Schematische Darstellung der Keilschneidverfahren: Beißschneiden (links) und Messerschneiden (rechts)

Hierbei dringt der Keil zunächst elastisch und dann plastisch in das Werkstück ein, was sich durch eine Einkerbung im Werkstück zeigt. Durch die Einkerbung und Verdrängung des Werkstoffes entsteht seitlich des Keils am Blech eine Materialanhäufung. Übersteigen die inneren Spannungen einen Grenzwert, so treten, wie beim Scherschneiden, Risse auf, die dann zur Trennung des Werkstoffes führen. Die Form des Keils ist variabel, es werden asymmetrische und symmetrische Keilformen unterschieden. In Abbildung 2.7 ist exemplarisch die Werkzeuggeometrie mit symmetrischem (links) und asymmetrischem Keil (rechts) dargestellt.

Da beim Keilschneiden neben der aufgewendeten vertikalen Schneidkraft für den Schneidprozess auch für die seitliche Materialverdrängung Kraft benötigt wird, können mit steigendem Keilwinkel höhere Schneidkräfte notwendig sein. Außerdem kann es beim geschlossenen Schnitt durch die seitliche Materialverdrängung zur

Materialstauchung und damit zum Verkleben des Werkstücks mit dem Werkzeug kommen [HOOG99], [WWW04], [KLOC06].

Wie auch beim Scherschneidverfahren kann beim Keilschneiden zwischen dem Schnitt mit geschlossener und dem mit offener Schnittlinie unterschieden werden.

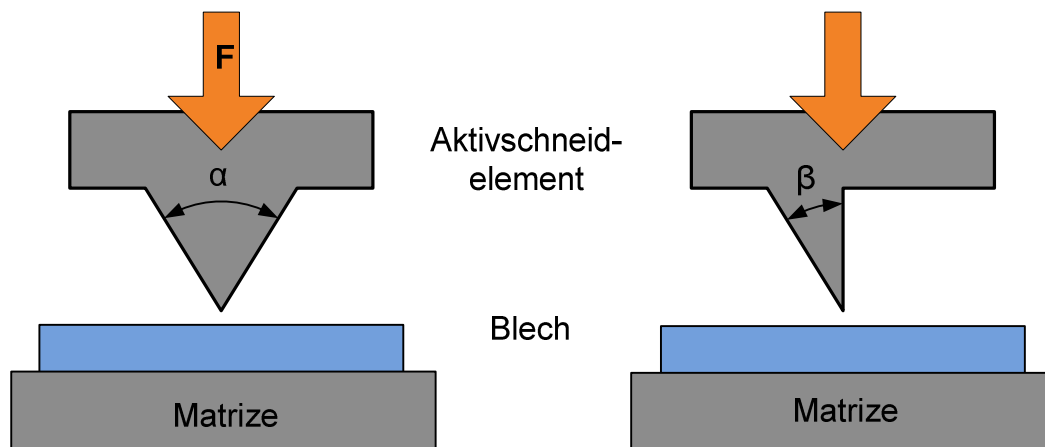


Abbildung 2.7: Links: symmetrische Keilform, Keilwinkel  $\alpha$ ;  
Rechts: asymmetrische Keilform, Keilwinkel  $\beta$

Beim Messerschneiden existiert lediglich ein Keil. Der Werkstoff liegt dabei auf einer harten Unterlage und wird durch den Druck des Keils getrennt. Ein exemplarischer Prozessablauf ist in Abbildung 2.8 dargestellt [DIN8588], [WWW004], [KLOC06].

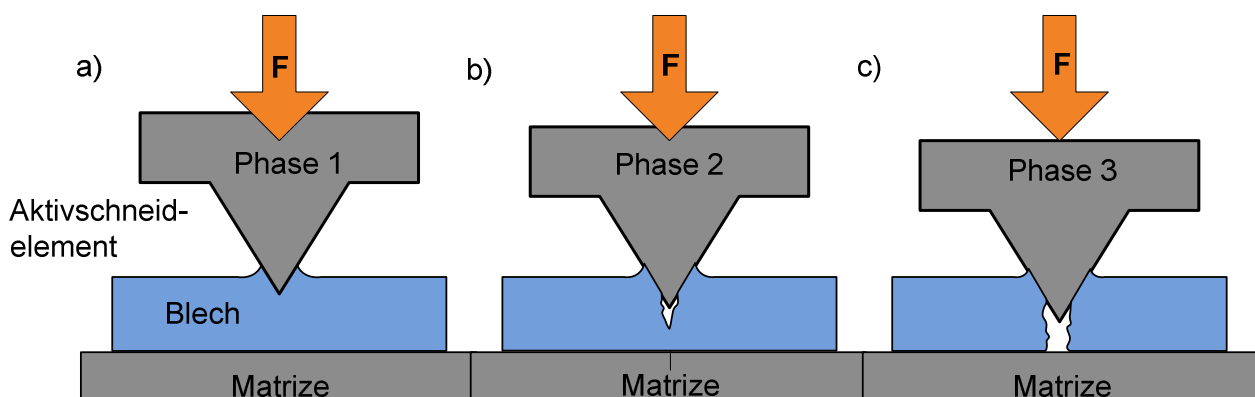


Abbildung 2.8: Die drei Phasen des Messerschneidens: a) Eindringen; b) Rissinitiierung; c) getrenntes Werkstück

### 2.3.1 Beißschneiden

Beim Beißschneiden, befindet sich wie in Abbildung 2.9 dargestellt, das Werkstück zwischen zwei keilförmigen Schneiden, die relativ zueinander bewegt werden und dadurch den Werkstoff trennen. Beim Beißschneiden im offenen Schnitt werden gegenüber Scher- und Messerschneiden die niedrigsten Schneidkräfte benötigt.

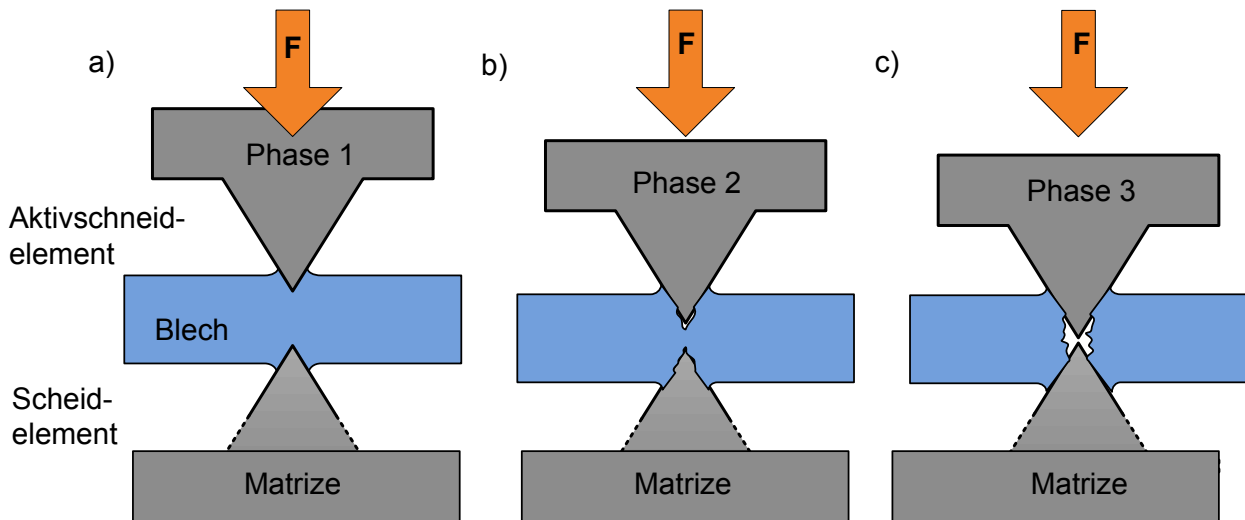


Abbildung 2.9: Die drei Phasen des Beißschneidens a) Eindringen; b) Rissinitierung; c) getrenntes Werkstück

Im Vergleich zum Messerschneiden sinkt wegen der halbierten Schnittfläche pro Werkzeugteil die benötigte maximale Schneidkraft um nahezu die Hälfte [DIN8588], [LANG90], [KLOC06].

### 2.3.2 Einteilung der Schnittflächenqualität beim Keilschneiden

Die Materialtrennung bei den Keilschneidverfahren erfolgt unter anderen Spannungsverhältnissen als beim Scherschneiden und führt somit zu einer abweichenden charakteristischen Schnittfläche. In Abbildung 2.10 und in Abbildung 2.11 ist die Schnittfläche für die Keilschneidverfahren in Anlehnung an die Richtlinie für Schnittflächen nach VDI 2906 dargestellt.

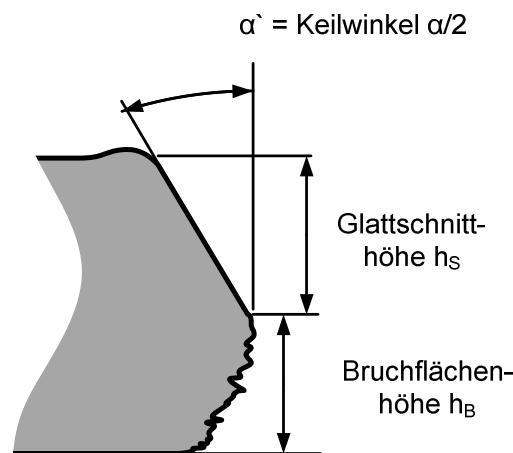


Abbildung 2.10: Messerschneiden nach VDI 2906 mit Schnittflächenkenngrößen

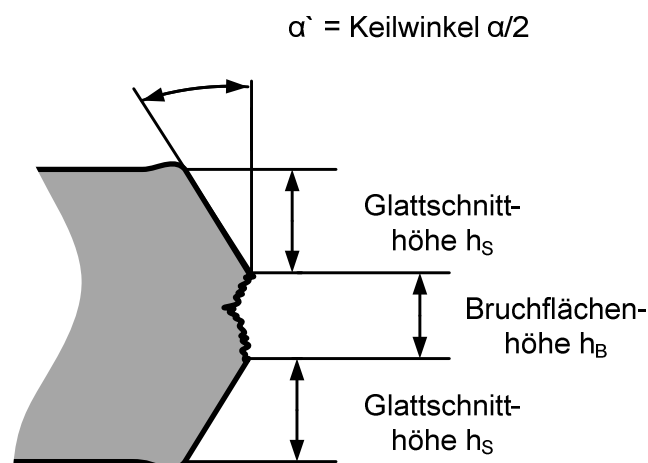


Abbildung 2.11: Beißschneiden nach VDI 2906 mit Schnittflächenkenngrößen

### 2.3.3 Beschreibung der Schneidkraft beim Keilschneiden

Das Keilschneiden ist ein werkzeuggebundenes Verfahren, bei dem die Werkstofftrennung in der Anfangsphase durch Druckspannungen, in der Endphase durch Zugspannungen herbeigeführt wird. Das Schneidwerkzeug hat eine Keilform, der Winkel ist somit entscheidend für die auftretenden Kräfte. Die Kräfteverhältnisse lassen sich nach dem in Abbildung 2.12 dargestellten Kräfteparallelogramm beschreiben. Demnach dringt ein Keil mit einem großen Winkel schwerer in das Werkstück ein als ein Keil mit kleinem Winkel, denn er muss mehr Werkstoff verdrängen. Des Weiteren wird der Werkstoff an den Keilwangen bei großen

Keilwinkeln mehr gestaut und somit mehr Material verdrängen.[SPUR85], [KLOC06], [WWW08].

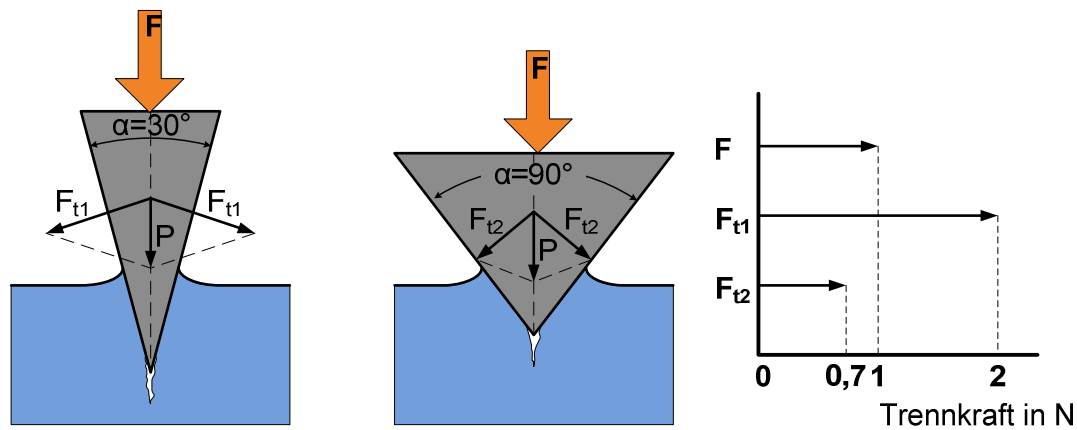


Abbildung 2.12: Trennkraft  $F$  bei unterschiedlichem Keilwinkel  $\alpha$  [KLOC06]

## 2.4 Magnesium und Magnesiumlegierungen

Da mit dieser Arbeit die Knetlegierung AZ31 hinsichtlich ihres Verhaltens beim Schneiden untersucht werden soll, wird in diesem Abschnitt der Konstruktionswerkstoff Magnesium mit seinen Legierungen zunächst näher betrachtet. Knetlegierungen sind nur eine kleine Gruppe innerhalb der technisch verwendeten Magnesiumlegierungen, wobei AZ31 zu den am meisten verarbeiteten Vertretern dieser Gruppe zu zählen ist [MWEM98].

Magnesium besitzt von allen metallischen Werkstoffen die geringste Dichte ( $1,74 \text{ g/cm}^3$ ). Es ist nach Aluminium und Eisen das dritthäufigste Metall.. Trotz dieser Vorzüge ist Magnesium als allgemeiner Konstruktionswerkstoff wenig verbreitet. Gründe hierfür liegen bei dem durch die energieaufwändige Herstellung, den hohen Preis, den notwendigen Vorsichtsmaßnahmen bei der Verarbeitung (hohe Affinität zu Sauerstoff), der Korrosionsanfälligkeit und der schlechten mechanischen Bearbeitbarkeit. Dennoch ist in letzter Zeit verstärktes Interesse vorhanden, Magnesium als Leichtbauwerkstoff zu nutzen, um somit beispielsweise im Fahrzeugbau die Masse zu reduzieren. Da die Zugfestigkeit von reinem Magnesium gering ist (gegossen ca.  $110 \text{ MPa}$ , stranggepresst etwa  $200 \text{ MPa}$ ), kommen als Konstruktionswerkstoffe ausschließlich Legierungen in Betracht. Die wichtigsten Legierungselemente sind Aluminium, Zink, Mangan sowie für Sonderanwendungen in der Luft- und Raumfahrt



Zirconium. Die in dieser Arbeit untersuchte Legierung mit der Bezeichnung AZ31 enthält die Legierungselemente Aluminium und Zink, die mit 3 % beziehungsweise 1 % zulegiert sind [KAMM00].

Wegen der hexagonal dichtest gepackten Kristallstruktur ist Magnesium schlecht kaltverformbar. Umformtechnisch zu bearbeitende Magnesiumbleche müssen daher meist erwärmt werden. Bei der plastischen Verformung von Reinmagnesium findet dies nur über das Gleiten von Versetzungen auf den dichtest gepackten Basisebenen (0001) und in zwei linear unabhängigen Richtungen  $\langle 11\bar{2}0 \rangle$  statt. Neben dem kristallographischen Gleiten besteht die Möglichkeit, durch Zwillingsbildung eine plastische Verformung in Magnesiumlegierungen hervorzurufen. Diese Zwillingsbildung wird durch eine Scherbeanspruchung hervorgerufen. Die Zwillingsgrenzen stellen zusätzliche Gleitebenen zur Verfügung und haben somit einen Anteil der plastischen Formänderung des Kristallgitters dar [BECK97], [DOEG00], [KAMM00].

Erst oberhalb einer Temperatur von 225 °C stehen zusätzliche Gleitebenen (pyramidale Ebene) zur Verfügung, aufgrund derer sich die Umformbarkeit wesentlich verbessert. Die Aktivierung zusätzlicher Gleitsysteme erfolgt durch thermische Schwingung der Atome im Bereich 200 °C bis 225 °C. Es ergeben sich dann sechs Gleitebenen (Pyramidenebenen) mit je einer Gleitrichtung, was zu sechs aktiven Gleitsystemen (siehe Abbildung 2.13) führt [SIEB01].

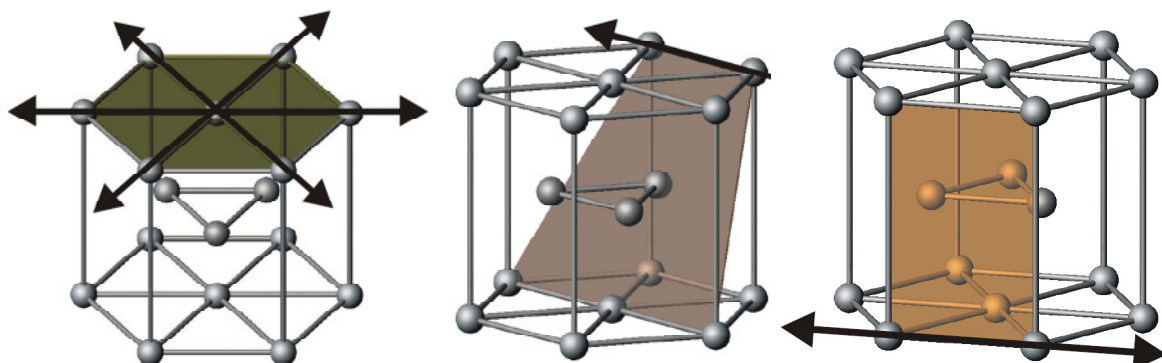


Abbildung 2.13: Aktive Gleitsysteme (1 Gleitebene (Basisgleitebene) und 3 Gleitrichtungen = 3 Gleitsysteme) bei Raumtemperatur im hexagonal dichtest gepackten Gitter bei Magnesium

## **2.5 Methoden und Verfahren der FE-Simulation**

### **2.5.1 Schneidsimulation**

Die Simulation wird mit zunehmender Tendenz zur Auslegung und Verifizierung für unterschiedliche Fertigungsprozesse eingesetzt. Um eine vollständige Abbildung der Prozesskette zu erhalten, wird das Schneiden bzw. der Trennprozess von Blechwerkstoffen ebenso simulativ abgebildet. Eine wie in Abschnitt 6.2 beschriebene Werkstoffcharakterisierung bildet die Grundlage einer genauen Abbildung mittels FE-Simulation. Die für Magnesiumlegierungen spezifischen Kennwerte, wie beispielsweise die in Abschnitt 6.2.2 dargestellt Warmzugversuche, sind unerlässlich, um das Materialverhalten hinreichend genau darzustellen.

Bei der Schneidsimulation müssen elastische und plastische Umformungen sowie der Bruch mit anschließender Materialtrennung berücksichtigt werden. Die Simulation des Bruchs ist schwierig und normalerweise nicht mit einer konventionellen Simulation abbildbar, da nicht der eigentliche Bruch von Interesse ist [TAUP96]. Es ist lediglich wichtig, ob und wo Materialversagen auftritt [FANG02]. Beim Scherschneidprozess hängt das Ergebnis des Verfahrens auch entscheidend vom Bruchverlauf ab. Folglich muss der Bruch von der Entstehung bis hin zur letztendlichen Materialtrennung komplett abgebildet werden. Ein weiteres Problem der Simulation des Scherschneidprozesses, ähnlich wie beim Fließpressen, sind die hohen Umformgrade. Durch sie wird das FE-Netz stark verformt und kann unbrauchbar werden. Um dieses Problem zu umgehen, ist eine regelmäßige Neuvernetzung des Modells unumgänglich [HATA03], was durch den Einsatz der Software Deform 2D in den dieser Arbeit zugrunde liegenden Simulationen berücksichtigt werden konnte. Die Keilschneidverfahren können mit Deform 2D mit der oben beschriebenen Vorgehensweise ebenso simuliert werden. Die Ergebnisse der Simulation bilden für diese Schneidverfahren die Istkontur der Schnittflächen virtuell sehr gut ab und ermöglichen Einblicke in die vorherrschenden Spannungszustände.

Deform 2D ist ein kommerzielles Programm, das speziell für den Bereich der Umformtechnik entwickelt wurde. Die Software kann das ein FE-Netz während der Simulation je nach Einstellung jederzeit erneuern und ist somit in der Lage, auch

extreme plastische Umformungen zu simulieren, ohne dass das Netz zerstört wird. Des Weiteren sind in Deform 2D bereits alle nötigen Tools implementiert, um einen Bruch zu simulieren. Es kann auf eine große Anzahl von Bruchkriterien zugegriffen werden. Es können auch weitere Kriterien implementiert werden, falls die vorhandenen Kriterien als unzureichend bewertet werden [MAIE04].

### 2.5.2 Bruchkriterium

Da die Magnesiumknetlegierung AZ31 aufgrund ihrer hexagonal dichtest gepackten Kristallstruktur durch ein sehr sprödes Bruchverhalten gekennzeichnet ist, muss dies in der Auswahl des Bruchkriteriums berücksichtigt werden. In den für diese Arbeit durchgeführten Simulationen wird das Bruchkriterium nach Cockroft & Latham (Gleichung 2.3) verwendet. Die Auswahl erfolgte aufgrund empirischer Beobachtungen zwischen Istkontur aus den Schneidversuchen und der simulierten Kontur. Da unterschiedliche Schneidverfahren untersucht wurden, musste das Bruchkriterium für das Scherschneiden, aber auch für die Keilschneidverfahren ein realistisches Abbild der Istkontur aus den Schneidversuchen ergeben.

$$\int_0^{\epsilon_R} e^{\frac{\alpha_G \cdot \sigma_m}{\sigma}} d\epsilon = C \quad (2.3)$$

mit

$\epsilon_R$  = Dehnung bei Rissinitiation

$\alpha_G$  = Gewichtungsfaktor

$\sigma_m$  = Mittelspannung

$\sigma$  = effektive Spannung

$\epsilon$  = effektive Dehnung

$C$  = Grenzwert für Rissinitiation (fracture value)

## 2.6 Korrosionsverhalten von Magnesiumblechwerkstoffen

### 2.6.1 Grundlagen

Der Einsatz von Magnesiumblechwerkstoffen wird neben ungenügender Duktilität und Kriechbeständigkeit durch eine hohe Korrosionsanfälligkeit begrenzt. Diese Eigenschaft ist aber für einige Anwendungen von großem Nutzen, wie beispielsweise

bei Opferanoden oder Magnesium-Silber-Seewasserbatterien sowie für zukünftige Anwendungen in der Implantologie. In DIN 50900 Teil 1 wird Korrosion wie folgt definiert: Reaktion eines metallischen Werkstoffes mit seiner Umgebung, die eine messbare Veränderung des Werkstoffes bewirkt und zu einer Beeinträchtigung der Funktion des metallischen Bauteils führen kann. Magnesiumapplikationen gliedern sich daher in zwei Anwendungsfelder: In natriumchloridfreie Umgebungen (zum Beispiel Mobiltelefone oder Laptopgehäuse) und in natriumchloridhaltige Umgebungen, wie sie in der Automobilindustrie vorzufinden sind [WEND98], [KAES90], [KAMM00].

### **2.6.2 Korrosionsschutz**

Das Aufbringen von organischen Schichten auf Magnesiumlegierungen erfolgt in erster Linie zur Verbesserung der optischen Qualität und zum Schutz vor Korrosion. Es gibt unterschiedliche Ansätze und Verfahren zur Beschichtung von Magnesiumwerkstoffen, die von dem jeweiligen Bauteil und dessen Einsatz abhängen. Für Magnesiumblechwerkstoffe ist eines der weitverbreitetsten Verfahren die kathodische Tauchlackierung, die ihrerseits in der Automobilindustrie und weiteren blechverarbeitenden Industriezweigen ein breites Anwendungsspektrum gefunden hat. Kathodische (auch kataphoretische) Tauchlackierungen (KTL) als Primerschicht können einfach und sehr gleichmäßig auch auf ein Substrat mit komplexer Geometrie aufgebracht werden [STRO97], [GOLD03].

### **2.6.3 Korrosionsprüfung**

Bei der Korrosionsprüfung sollen im Labor möglichst reale Einsatzbedingungen abgebildet werden, um die Einflüsse und Auswirkungen von korrosiven Medien zu untersuchen. Hierzu wird das zu prüfende Bauteil einer Salzsprühnebelprüfung unterzogen. Dies ist insbesondere für Bauteile geeignet, die sich im Einsatz in einer salzhaltigen Umgebung befinden. In DIN 50021 ist der genaue Prüfablauf dokumentiert und somit vergleichbar [KAMM00]. Hier werden Kurzzeitprüfmethoden beschrieben, die in der Regel 24 Stunden dauern. In der Regel werden aber mehrere Zyklen durchlaufen, um eindeutige Ergebnisse zu erhalten.

Die Prüfung der Beständigkeit einer auf das Bauteil aufgetragenen Lackschicht gegenüber korrosiven Medien wird durch die Untersuchung der Kantenunterwanderung bzw. einer eventuellen Blasenbildung in der Lackschicht gemessen und anhand dieser Werte verifiziert.

### 3 Zielsetzung und Aufgabenstellung

In Zeiten des Klimawandels und steigender Energie- und Rohstoffpreise wird der Ruf nach zukunftsweisenden und zugleich umweltschonenden Technologien und Werkstoffen immer lauter. Aufgrund dieser Entwicklung müssen sich die Ingenieurwissenschaften ständig neuen Herausforderungen stellen. Zudem sind sie steigenden Kundenerwartungen in ökonomischer sowie ökologischer Sicht ausgesetzt und müssen Werkstoffe in ihrer Funktionalität bei gleichzeitig geringerem Fertigungsaufwand verbessern oder neu definieren. Um diesen Anforderungen gerecht werden zu können, ist eine intensive Grundlagenforschung in den Bereichen Herstellung und Verarbeitung von Werkstoffen unverzichtbar.

Dem Ziel des Leichtbaus kann im Wesentlichen auf zwei Wegen näher gekommen werden, nämlich durch konstruktive, gewichtsreduzierende Maßnahmen am Bauteil oder durch den Einsatz von leichteren Werkstoffen bei gleich bleibenden mechanischen Eigenschaften [GEHR03].

In der vorliegenden Arbeit werden alternativ zum Scherschneiden der mögliche Einsatz der Verfahren Messer- und Beißschneiden, den sogenannten Keilschneidverfahren zum Zerteilen von Magnesium untersucht, deren Vorteile gegenüber dem konventionellen Scherschneiden beispielsweise der Entfall des Niederhalters im Werkzeug oder der momentenfreie Trennvorgang sind. Insbesondere im Hinblick auf die besonderen Werkstoffeigenschaften der Magnesiumknetlegierung AZ31 stellen die Keilschneidverfahren eine neue Variante dar, da der Trennvorgang durch Druckspannungen induziert wird. Dies lässt auf Grund der speziellen Charakteristik des Materials qualitativ gute Schnittflächen erwarten [KLOC06].

Das sehr wirtschaftliche Verfahren Scherschneiden muss zum derzeitigen Stand der Technik beim Einbringen von Beschnittkonturen in Magnesiumblechwerkstoffe durch intensive spanende bzw. manuelle Nacharbeit ergänzt werden, wenn nicht ohnehin nur spanende Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen. Nach Angaben von [BORC01] muss nach dem Schneidprozess die ungleichmäßige Bruchzone nachgeschnitten werden. Das Nachschneiden führt zu starker Spanbildung und zur

Verschmierung der Schnittfläche. Schnittflächen, die Verschmierungen aufweisen, werden als qualitativ minderwertig eingestuft. Die Beseitigung von Flächenausbrüchen, Werkstoffverschmierungen und scharfen Graten gewährleistet erst im Nachhinein eine gute Benetzung und Haftung der Schutzschicht zur Vermeidung der in Abschnitt 2.6 beschriebenen Korrosionsproblematik.

Erkenntnisse über die Nutzung des Gitterumwandlungseffekts jenseits von 225 °C beim Schneiden von Magnesium, wie es beim Umformen genutzt wird, werden ebenso berücksichtigt und anhand dieser unterschiedlichen Verfahren ermittelt. Aus dieser Zielsetzung resultiert für die Durchführung der Untersuchungen folgende Aufgabenstellung:

### **Methodenplan und Werkzeugentwicklung**

- Durch Vorversuche wird eine Werkzeugauswahl und Werkzeugkonzipierung durchgeführt.
- Begleitend zu den Schneidversuchen wird das eingesetzte Schneidwerkzeug mit einem Kraft-Weg Messsystem instrumentiert, um Schneidkraftverläufe zu erhalten, die einen Abgleich mit den Ergebnissen der Simulation ermöglichen.

### **Versuchsdurchführung**

- Durchführung von Schneidversuchen mit der Magnesiumlegierung AZ31. Es werden die drei Schneidverfahren Scherschneiden, Messerschneiden und Beißschneiden untersucht. Bei den Versuchen zum Scherschneiden werden Schneidspalte und Werkzeugkantengeometrie der Schneidaktivelemente variiert. Bei den Keilschneidverfahren werden unterschiedliche Keilwinkel untersucht sowie die Symmetrieverhältnisse der Schneidaktivelemente variiert.
- Die Schnittlinienführung erfolgt bei allen Schneidverfahren sowohl im geschlossenen als auch offenen Schnitt.
- Bedingt durch das temperaturabhängige Verhalten von Magnesium werden alle Schneidversuche bei Temperaturen zwischen Raumtemperatur und 250 °C durchgeführt. Es werden fünf Temperaturen ausgewählt: Raumtemperatur (RT), 100 °C, 150 °C, 200 °C und 250 °C. Hierfür ist es notwendig, ein geeignetes

Heizkonzept zum Schneiden von Magnesiumblechwerkstoffen zu entwickeln und zu konzipieren.

- Aufgrund des sehr spröden Werkstoffverhaltens der Magnesiumlegierung AZ31 bei Raumtemperatur (RT) werden Scherschneidversuche mit negativem Schneidspalt durchgeführt.

### **Verifizierung mittels FE-Schneidsimulation**

- Es werden alle zur Simulation relevanten Werkstoffkennwerte ermittelt. Die experimentellen Untersuchungen werden mit den Simulationen abgeglichen. Anhand dieser Erkenntnisse wird ein geeignetes Bruchkriterium, das für spröde Werkstoffe kompatibel ist, ausgewählt.

### **Versuchsauswertung**

- Mittels taktiler Oberflächenvermessung werden neue Richtlinien für die Bewertung der Schnittfläche für die Keilschneidverfahren (Messer- und Beißschneiden) erstellt.
- Ausgewählte, verschiedenartig geschnittene Magnesiumbleche werden tauchkathodisch beschichtet und einer Korrosionsprüfung nach DIN 50021 SS in sechs Zyklen zu je 24 Stunden in der Salzsprühnebelkammer unterzogen und hinsichtlich ihres Korrosionsfortschritts bewertet.

### **Empfehlungen für den Serieneinsatz**

- Erarbeitung eines optimalen Prozessfensters zum Schneiden von Magnesiumblechwerkstoffen in Abhängigkeit des Schneidverfahrens und der Schneidtemperatur.





## 4 Versuchsplan

Ergebnis dieser Arbeit sollen anwenderorientierte Richtlinien für den Einsatz des Beiß-, Messer- und Scherschneidens von dünnwandigen Magnesiumknetlegierungen sein, denen z. B. Aussagen über die optimalen Temperaturverhältnisse beim Schneiden oder Gestaltung der Werkzeugaktivelemente (Keilform, Keilwinkel etc.) mit Blick auf die verwendete Legierung zu entnehmen sind.

Die angestrebten Forschungsergebnisse bilden die verfahrenstechnischen Grundlagen zum Einsatz der untersuchten Schneidverfahren bei Magnesiumknetlegierungen. Der als Ziel formulierte Entfall von aufwändigen Sichtprüfungen im Produktionsprozess gekoppelt mit spanender Nacharbeit zeigt die wirtschaftliche Bedeutung. Der positive Einfluss der optimierten Schneidparameter auf den Korrosionsschutz ist dadurch gewährleistet und bietet eine Erleichterung bei der Weiterverarbeitung von komplexen Magnesiumbauteilen.

In Abbildung 4.1. ist der ausführliche Versuchsplan dargestellt, an dem sich die Vorgehensweise orientiert. Im Mittelpunkt stehen hierbei die Schneidversuche mit ihren unterschiedlichen Parametern, insbesondere Schneidversuche bei erhöhten Temperaturen.

Anhand von Vorversuchen konnte eine Auswahl an Werkzeugaktivelementen getroffen werden. Beim Scherschneiden wird ein vollkantiger Schneidstempel und ein Stempel mit einer Fase eingesetzt. Bei den Keilschneidverfahren kommen sowohl symmetrische als auch asymmetrische Schneidstempel mit unterschiedlichen Keilwinkeln zum Einsatz.

Anschließend werden die Schnittteile hinsichtlich der Schnittflächenoberfläche untersucht und verifiziert. Abschließend werden die unterschiedlich hergestellten Schnittteile tauchkathodisch lackiert und auf ihre Korrosionsbeständigkeit untersucht.

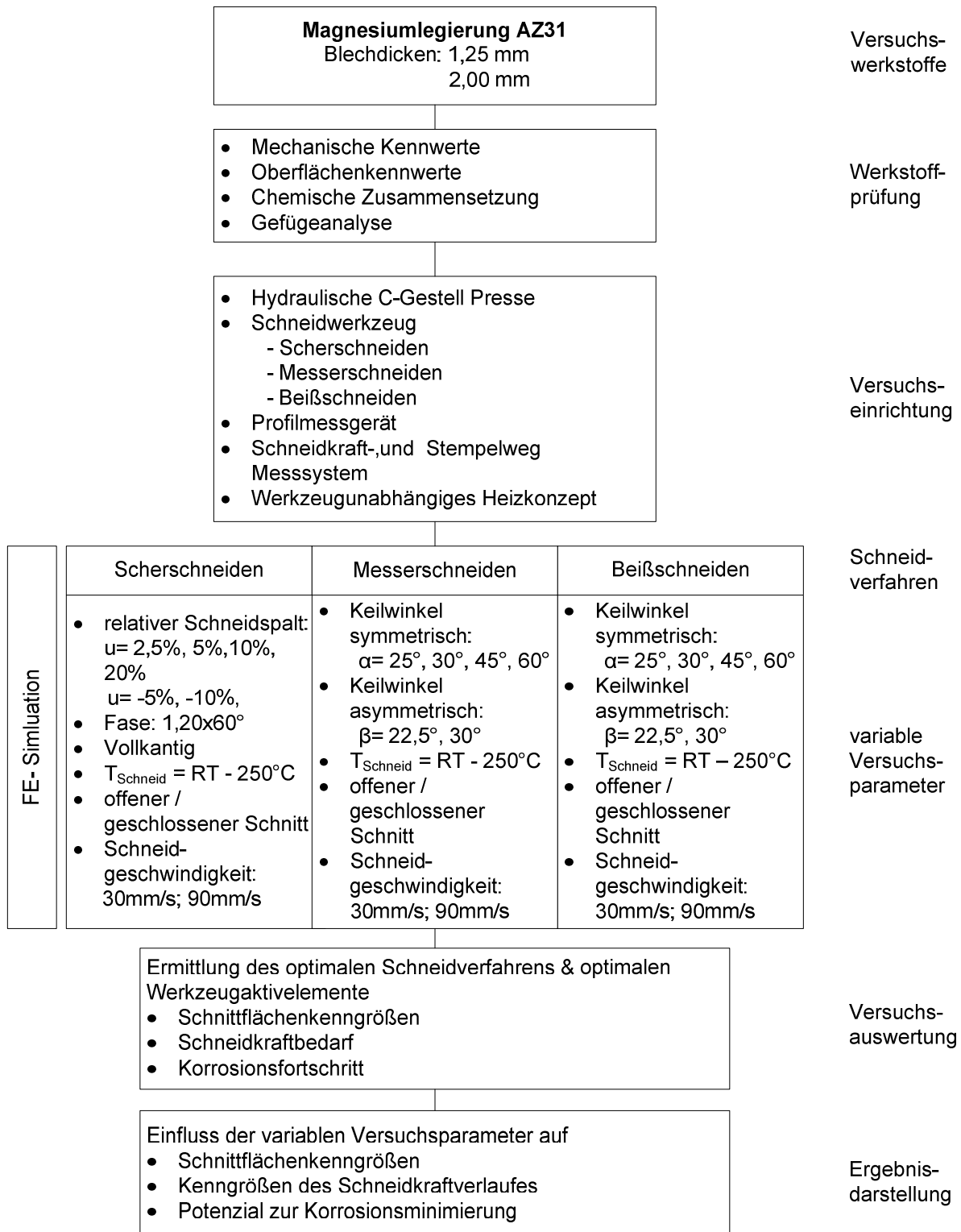


Abbildung 4.1: *Dieser Arbeit zugrunde gelegte systematische Vorgehensweis beim Schneiden von Magnesiumknetlegierungen mittels Scher-, Messer- und Beißschneiden*

## 5 Versuchs- und Messeinrichtungen

### 5.1 Versuchseinrichtungen

#### 5.1.1 Presse

Für die Durchführung der Schneidversuche wurde eine hydraulische C-Gestell Presse Typ HEZ 63 der Firma. Dunkes, GmbH Kirchheim/Teck, eingesetzt. Die Presse verfügt über eine maximale Presskraft von 630 kN, die Stößelgeschwindigkeit kann zwischen 30 mm/s und 100 mm/s variiert werden.

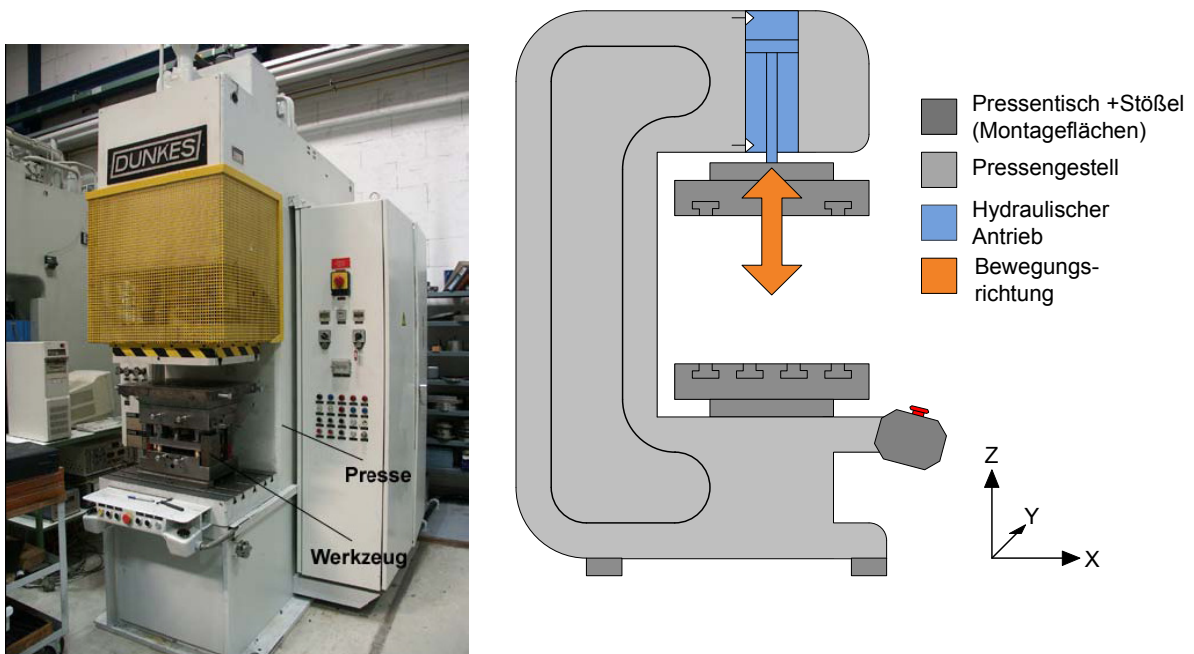
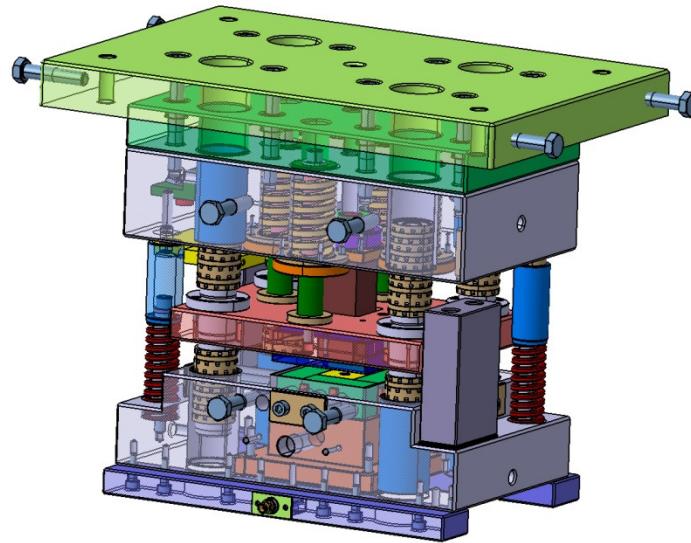


Abbildung 5.1: Versuchspresse

#### 5.1.2 Versuchswerkzeug

Die Schneidversuche wurden mit einem am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München entwickelten und konstruierten Schneidwerkzeug (Abbildung 5.2) durchgeführt [HOOG99].



*Abbildung 5.2: Schneidwerkzeug mit modular einsetzbarem Stempel und stufenlos einstellbarem Schneidspalt beim Scherschneiden*

Das Werkzeug zeichnet sich durch folgende Merkmale aus:

- Schnell auswechselbare Aktivelemente (Schneidstempel und Matrizeinsätze)
- Stufenlos, präziser und wiederholgenau einstellbarer Schneidspalt ( $\pm 0,1$  mm)
- Schneidmöglichkeit im offenen und geschlossenen Schnitt
- Hohe Werkzeugsteifigkeit und Führungsgenauigkeit zur Gewährleistung reproduzierbarer Prozessbedingungen und eines gleichmäßigen Schneidspalts entlang der Schnittlinie
- Prozesssicher gegen Störeinflüsse durch die eingesetzte Presse (z. B. Stößelkipfung, Schwingungen)

Der Schneidstempel ist im Werkzeugoberteil mit axialem und radialem Spiel verschraubt und wird in einer Stempelaufnahmeplatte, die auch als Niederhalter dient, spielfrei geführt. Hierdurch wird eine Doppelführung vermieden und ein schwingungsfreier Schneidvorgang gewährleistet. An der Mittelplatte (Niederhalterplatte) sind die Säulenführungen und der Niederhalter befestigt. Das Werkzeugunterteil nimmt die Matrizenblöcke auf, die über Schrauben und Endmaße zur Einstellung

des Schneidspalts verstellt werden können. Im Unterwerkzeug kann auch ein auf einer Gasdruckfeder gelagerter Gegenhalter zum Auswerfen der Schneidbutzen befestigt werden.

Um Störeffekte aus der hydraulischen Versuchspresse auf ein Minimum zu reduzieren, wird das Werkzeug nach dem Plungerprinzip entkoppelt bewegt. Bei diesem Werkzeugprinzip bringt der Stößel der Presse nur die zum Schneiden des Blechs erforderliche Kraft auf. Die Stempelrückzugskraft wird durch Schraubendruckfedern im Werkzeug realisiert, die das Werkzeugober- und -unterteil nach dem Schneidvorgang wieder in Ausgangsposition bringen. Die Führungssäulen ermöglichen zusammen mit Zylinderrollenkäfigen und Führungsbuchsen eine exakte Führung zwischen Werkzeugober- und -unterteil sowie der dazwischen liegenden Niederhalterplatte. Diese Bauweise erlaubt auch eine unkomplizierte Montage neuer Stempel und die Einstellung des Schneidspalts durch einfaches Auseinanderziehen und Zusammenbauen des Werkzeugs [HOOG99]. Mit dem Werkzeug können offene Schnitte mit einer maximalen Schnittlänge von 46 mm und geschlossene Schnitte mit einer quadratischen Schnittfläche von 46 mm x 46 mm durchgeführt werden.

### **5.1.3 Temperierung des Schneidprozesses**

Aufgrund der geometrischen Verhältnisse der Werkzeugaktivelemente bei den Keilschneidverfahren ergibt sich der Bedarf nach einem werkzeugunabhängigen Heizkonzept. Die geometrischen Randbedingungen der Schneidwerkzeuge sind jedoch nicht der einzige zu berücksichtigende Faktor. Während des Schneidvorgangs ist die Kontaktzeit zwischen Blech und Schneidaktivelement zu gering, als dass zu schneidende Blech die erforderliche Temperatur an der Schnittfläche erreichen kann. Aus diesem Grund wurden für alle Schneidverfahren individuelle Heizkonzepte entwickelt und implementiert.

In Abbildung 5.3 ist ein beheizter Gegenstempel für das Scherschneiden dargestellt. In diesem beheizbaren Block befinden sich vier Bohrungen, in die die Heizpatronen eingesetzt werden.

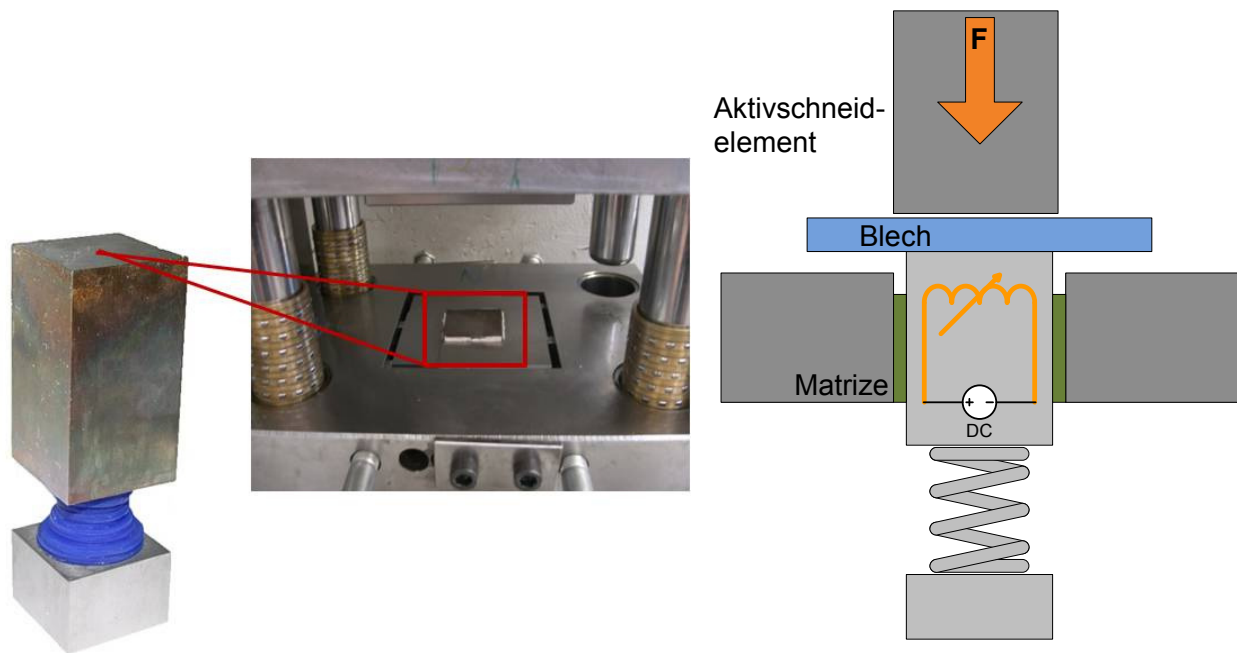


Abbildung 5.3: *Beheizter Gegenstempel für das Scherschneiden zur Temperierung des Werkstückes vor dem Schneidvorgang*

Für die Keilschneidverfahren, also dem Messer- und Beißschneiden, erfolgt die Temperierung des Magnesiumblechs über beheizte Blechauflageblöcke, wie sie in Abbildung 5.4 zu sehen sind. Diese Vorgehensweise ist notwendig, da beim Schneiden die Kontaktzeit des Werkzeugs mit dem zu trennenden Werkstück sehr gering ist. Ein beheiztes Schneidaktivelement wäre hier nicht ausreichend, um eine höhere Temperatur im Bereich der Schnittfuge während des Schneidvorgangs zu gewährleisten. Dies wurde im Vorfeld mit Wärmeübergangssimulationen (Abbildung 5.5) verifiziert. Bei den Keilschneidverfahren sind die Blechauflageblöcke zusätzlich mit einer Kupferpaste versehen worden, um einen verlustärmeren und somit schnelleren Wärmeübergang zu erzielen.

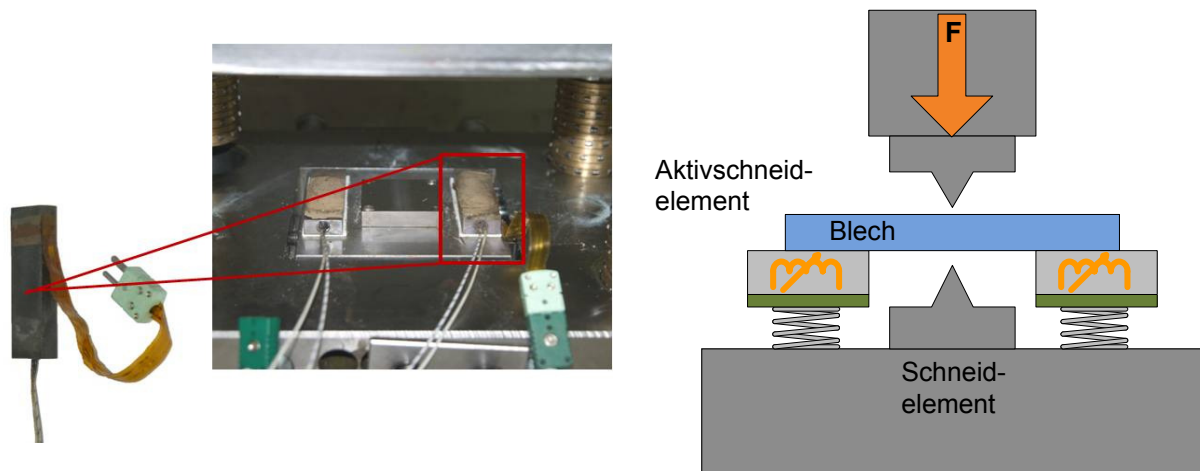


Abbildung 5.4: *Blechauflageblöcke zur Temperierung des Werkstücks beim Keilschneiden*

In Abbildung 5.5 sind die Wärmeübergänge für das jeweilige Verfahren und im Vergleich dazu auch das Wärmeübergangsverhalten bei einem temperierten Schneidaktivelement am Beispiel des Messerschneidens dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass eine homogene Wärmeverteilung nur über den Gegenstempel für das Scherschneiden beziehungsweise die beheizten Blechauflageblöcke bei den Keilschneidverfahren zu erreichen ist. Im Falle der Keilschneidverfahren konnte aufgrund des Wärmeabflusses durch das Aktivschneidelement die erforderliche Temperatur nicht erreicht werden.

Die Simulationen der jeweiligen Wärmeübergänge wurden mittels des Simulationsprogramms Magmasoft der Firma Magma GmbH realisiert. Hierbei wurde der Wärmeübergangskoeffizient von AZ31 zugrunde gelegt, welcher der Literatur entnommen wurde und mit  $13 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  für die Berechnungen angenommen wurde [KAMM00].

In Abbildung 5.5 ist die entsprechende Wärmeverteilung in Abhängigkeit von der notwendigen Zeit zur Erwärmung des Blechwerkstoffs von  $225 \text{ °C}$  dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass eine Vollaufgabe des Stempels (Abb. 5.5, Bild a)) zu einer raschen homogenen Erwärmung führt. Wenn hingegen mit nur beheiztem Keilwerkzeug (Abb. 5.5, Bild c)) eine unzureichende Temperierung erfolgt, die des



Weiteren zeitlich nicht realisierbar ist. Deswegen wurden wie in Abbildung 5.5 in Bild b) ersichtlich, temperierte Blechauflageblöcke konstruiert.

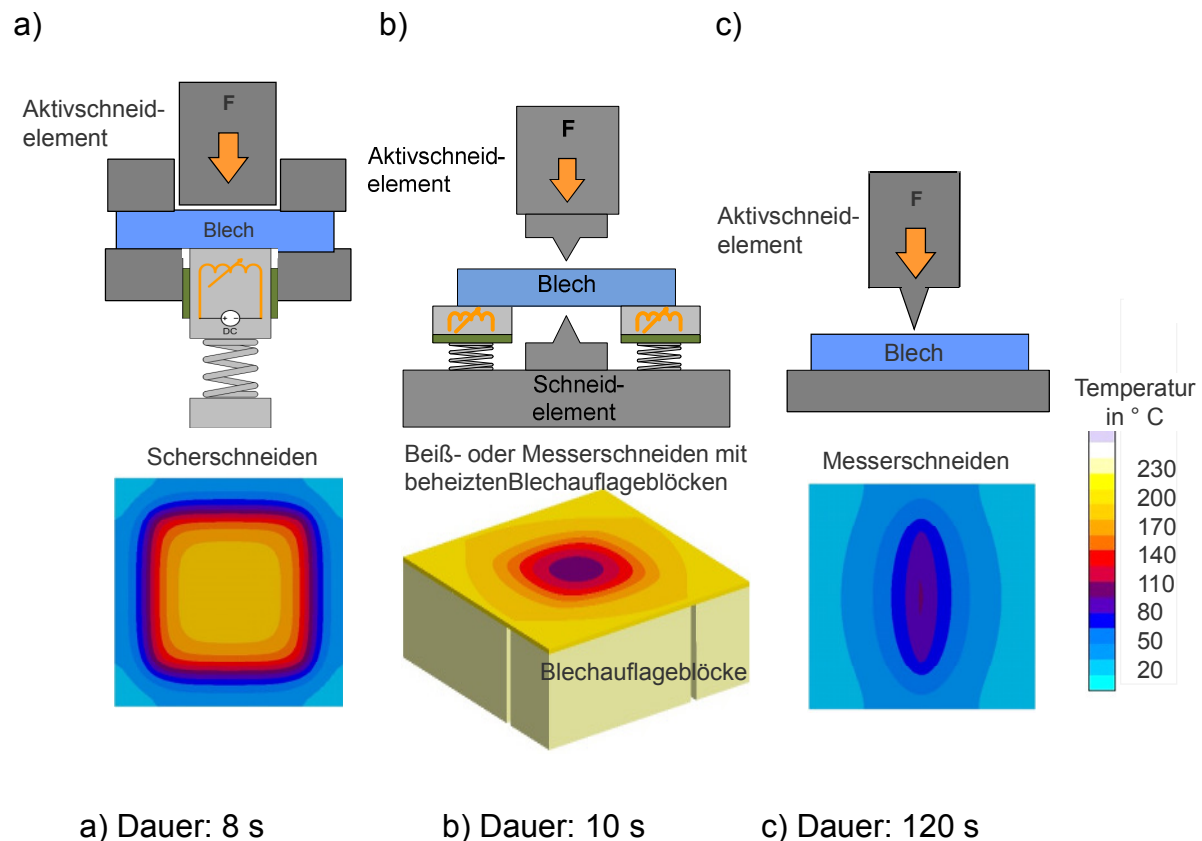


Abbildung 5.5: Aufheizdauer bis zum Erreichen von 225 °C: a) Temperierung bei Vollaufgabe des Stempels beim Scherschneiden; b) beheizte Blechaufgabeblöcke; c) beheiztes Schneidaktivelement

Für die Temperierung über die Blechaufgabeblöcke beim Keilschneiden bzw. dem beheizten Gegenstempel beim Scherschneiden wurden handelsübliche Heizpatronen mit integriertem Thermoelement des Typs K verwendet. Die Leistung beträgt 315 Watt bei einer angelegten Spannung von 230 V. Die Maße betragen 60 mm Länge bei einem Durchmesser von 6,5 mm. Diese Leistungsmerkmale sind ausreichend, um die Bleche der Magnesiumlegierung AZ31 mit den Blechdicken 2,00 mm und 1,25 mm auf die jeweils erforderliche Temperatur aufzuheizen. Mittels eines Heizregelgerätes der Firma Eurotherm GmbH ist es möglich, die Bleche mit einer von circa 5 °C zu beheizen. Dies wurde systematisch verifiziert, indem ein Thermoelement nahe der Schnittfläche angebracht wurde. Messeinrichtungen

### 5.1.4 Schnittflächenprofil

Für die Untersuchung der Schnittflächen wurde ein Profil- und Rauigkeitsmessplatz der Firma Mahr Oberflächentechnik GmbH, Göttingen, verwendet. Mittels dieser Prüfeinrichtung ist es möglich, die Oberflächenkontur entlang der Schnittfläche nach dem Prinzip des Tastschnittverfahrens zu ermitteln. In Abschnitt 7.6 wird die detaillierte Vorgehensweise zur Ermittlung der Schnittflächenprofile dargestellt.

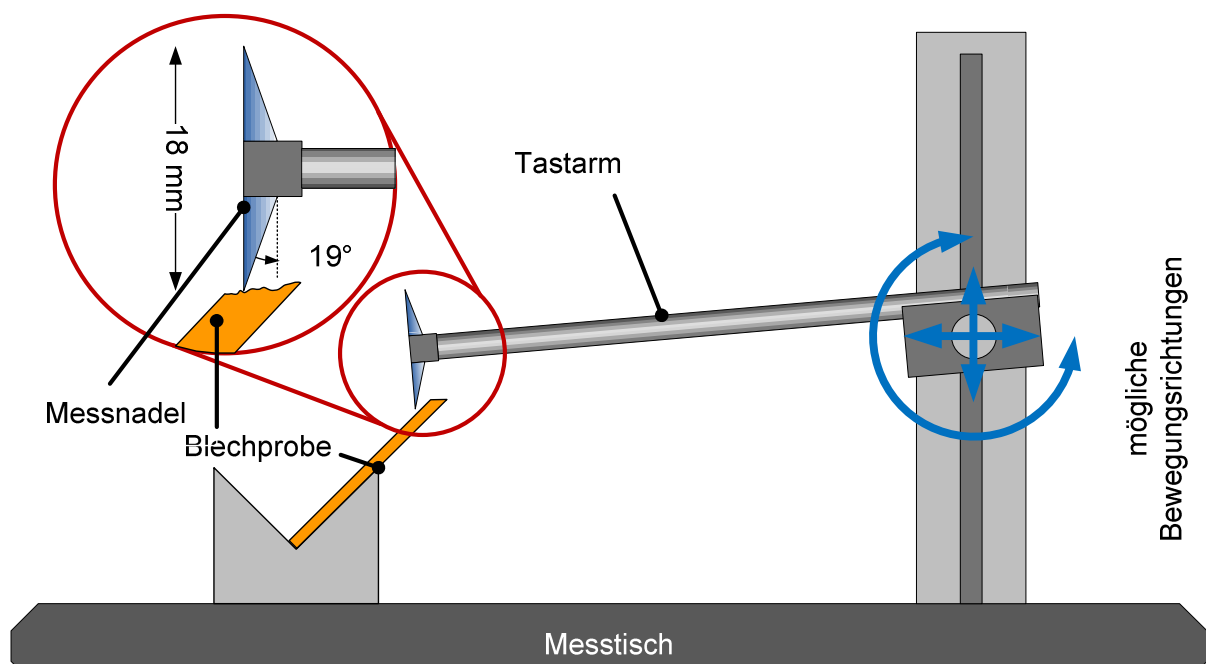


Abbildung 5.6: Schematische Darstellung der taktilen Vermessung der Schnittflächen

### 5.1.5 Schneidkraft- und Wegmessung

Um quantitative sowie qualitative Aussagen hinsichtlich der Parameter Schneidkraft und Schneidgeschwindigkeit bezogen auf den Schneidweg treffen zu können, wurde das Versuchswerkzeug (Abbildung 5.7) mit einem Aufnahmesystem zur Kraft-Weg-Messung ausgestattet. Es ist damit möglich, die Schneidkraft  $F_s$  normiert auf die Schnittlinienlänge und die Blechdicke im Vergleich zu allen drei Schneidverfahren mit den unterschiedlichen Stempelgeometrien darzustellen und bezogen auf die Schnittfläche zu analysieren.

Aufgrund der speziellen Messumgebung musste ein geeignetes Messsystem gefunden werden. Das Pressenwerkzeug besteht komplett aus Metall, so dass ausschließlich Sensoren geeignet sind, welche gegen metallische Werkstoffe messen können. Starke Beanspruchung tritt beim häufigen Ein- und Ausbau des Schneidwerkzeugs aus der Presse auf, welche zum Schneidflächenwechsel bei unterschiedlichen Schnittarten oder zur Schneidspalteinstellung notwendig werden. Hierbei kann es durchaus zu Beschädigungen der Messeinrichtung kommen, falls diese empfindlich gegen mechanische Beanspruchung ist.

Nicht zuletzt jedoch sollte die Messhardware idealerweise mit den bereits verfügbaren Messeinrichtungen, insbesondere der zur Auswertung zu verwendenden Spider-8-Messkarte kompatibel sein. Nach Vergleich der möglichen Messtechniksysteme und ihrer spezifischen Vor- und Nachteile fiel die Wahl auf das Prinzip des berührungslosen Wirbelstromsensors. Dieser bietet die geforderte Messgenauigkeit und Eignung für die Bedingungen der Messumgebung in der Presse. Zum Betrieb des Wirbelstromsensors, welcher grundsätzlich nur aus einer in einem Kunststoffgehäuse vergossenen Spule besteht, ist eine geeignete Hardware zur Ansteuerung notwendig. Zum verwendeten Sensor von  $\mu$ -Epsilon dient hierzu die Messbox multi NCDT SERIES 300. Diese Messbox bietet die Möglichkeit, über zwei Potentiometer den Offset sowie die Linearität des Messsignals einzustellen.

Durch Kalibrierung zu Beginn der Versuche wird die Linearität der Messung abgesichert, da der Sensor für verschiedene Materialien, gegen welche die Messung erfolgt, eine unterschiedliche Kennlinie besitzt. Auch unerwünschte metallische Gegenstände im Messbereich des Sensors, etwa die Linearführungen des Werkzeugs sowie die Rückwand der Presse beeinflussen das gesamte Messsystem. Als Ausgangssignal liefert die Messbox ein wegproportionales Spannungssignal im Bereich von 0-10 V, welches sich gut zur Erfassung mittels der Spider-8-Messkarte über deren Analogeingänge eignet.

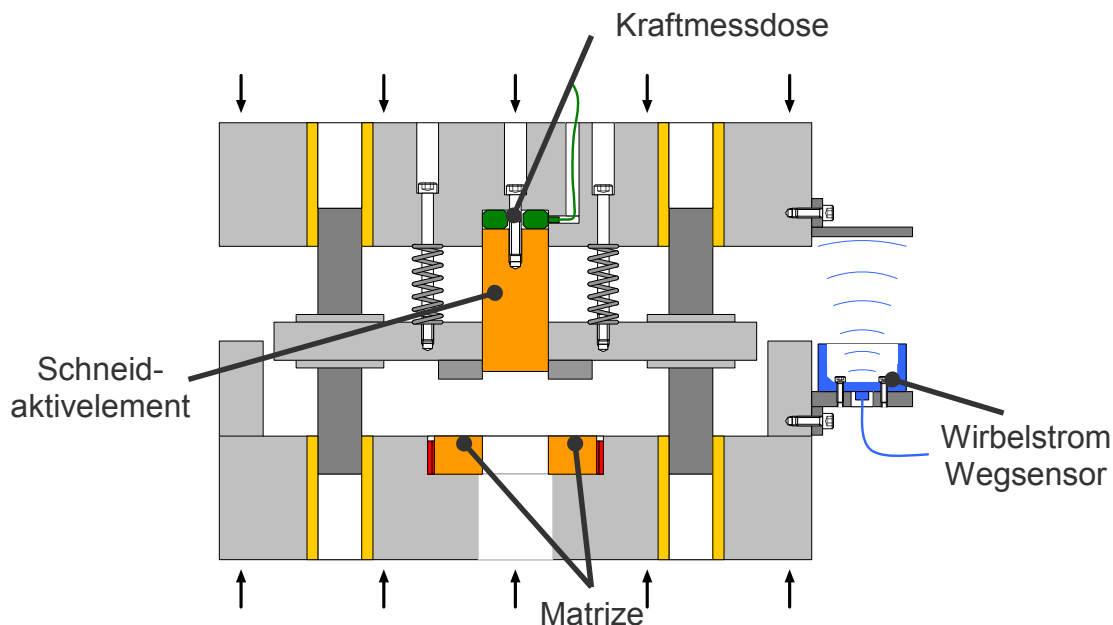


Abbildung 5.7: Kraft-Weg-Aufnahmesystem im Versuchswerkzeug

### 5.1.6 Zug-Druck-Prüfung bei Raumtemperatur

Zur Ermittlung der mechanischen Werkstoffkennwerte wurden Zugversuche nach DIN EN 10002 auf einer Universal Zug-Druck-Prüfmaschine vom Typ 1484/DUPS M der Firma Zwick GmbH, Ulm, durchgeführt.

### 5.1.7 Zug-Druck-Prüfung bei unterschiedlichen Temperaturen

Aufgrund des sich ändernden Werkstoffverhaltens bei erhöhten Temperaturen mussten zur vollständigen Materialcharakterisierung Warmzugversuche durchgeführt werden.

Zur Durchführung der Warmzugversuche steht eine servo-hydraulische Prüfmaschine der Firma Gleeble GmbH, Typ1500 zur Verfügung, welche am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie (LFT) der Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg genutzt werden konnte. Zusätzlich wurde ein optisches Messsystem, wie in Abbildung 5.8 schematisch dargestellt, integriert. Damit ist es möglich, im einachsigen Zugversuch lokale Einschnürungen optisch zu erfassen und darzustellen. Die Aufnahme von Fließkurven auch bei höheren Umformgraden wird dadurch möglich. Der Zugversuch wurde gemäß den Richtlinien nach DIN EN 10002/5 durchgeführt. Die Probengeometrie erfüllt die Anforderungen aus EN 482-2. Die

Formänderung wurde mit einer 20 Hz-CCD Kamera des optischen Messsystems Aramis der Firma GOM GmbH erfasst und die Temperaturmessung erfolgte durch den Einsatz von Ni/Cr-Ni-Thermoelemente, die an der Probe mittels Punktschweißung angebracht wurden.

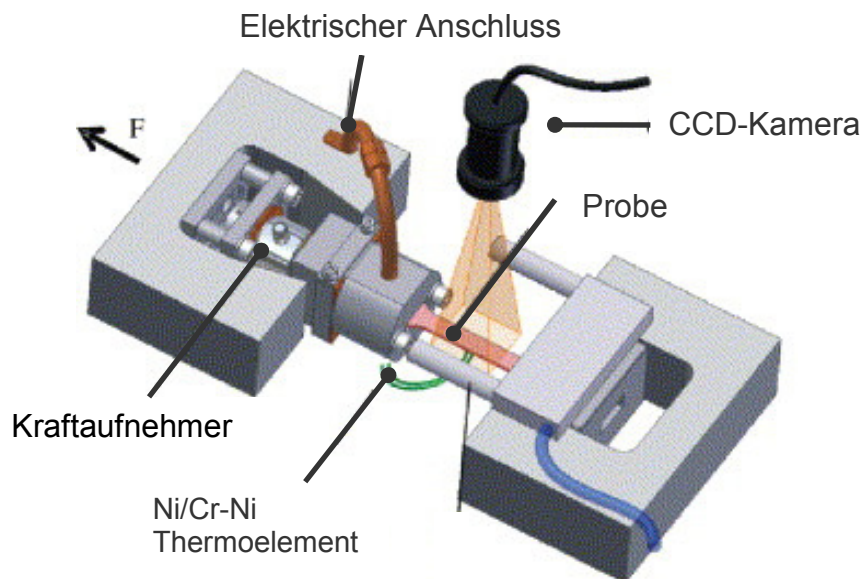


Abbildung 5.8: *Schematische Darstellung der Versuchseinrichtung am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie der FAU Erlangen-Nürnberg, zur Ermittlung von mechanischen Kennwerten durch Warmzugversuche [MERK06]*

### 5.1.8 Glimmentladungsspektroskopie

Für Magnesiumlegierungen ist die etablierte Messung der chemischen Zusammensetzung mittels Funkenemissionsspektroskopie nicht geeignet. Aufgrund dessen wurde in dieser Arbeit das Verfahren der Glimmentladungsspektroskopie angewendet.

Die Glimmentladungsspektroskopie (engl. Glow Discharge Optical Emission Spectroscopy) bezeichnet ein spektroskopisches Verfahren zur quantitativen Analyse von der Zusammensetzung metalischer Legierungen und anderen, auch nichtmetallischen, Feststoffen. Die Grundlage der Glimmentladung ist eine Gasentladungslampe, in der ein Strom von Niederdruck-Argonionen auf die Probe trifft und Atome von

der Probenoberfläche herausschlägt. Die abgesputterten Teilchen werden im Plasma durch Kollision mit anderen Partikeln angeregt und strahlen Lichtquanten aus, die von einem konventionellen optischen Emissionsspektrometer detektiert und ausgewertet werden. Die Untersuchungen für diese Arbeit zur Ermittlung der chemischen Zusammensetzung wurden bei Neue Materialien Fürth GmbH, Fürth, durchgeführt.

### **5.1.9 Härteprüfung**

Im Jahr 1925 wurde von Smith und Sandland eine nach der britischen Flugzeugbau-firma Vickers benannte Härteprüfung entwickelt, die zur Prüfung harter und gleichmäßig aufgebaute Werkstoffe dient, aber auch zur Härteprüfung an dünnwandigen oder oberflächengehärteten Werkstücken und Randzonen eingesetzt wird. Sie ist in der Norm nach DIN EN ISO 6507 festgelegt. Aus der mittels eines Messmikroskops festgestellten Länge der Diagonalen eines bleibenden Eindrucks wird die Eindruckoberfläche errechnet. Das Verhältnis von Prüfkraft zur Eindruckoberfläche ergibt mit dem Faktor 0,1891 mm<sup>2</sup>/N multipliziert die Vickershärte (HV).

### **5.1.10 Korrosionsprüfung**

Zur Überprüfung des korrosionsmindernden Effekts der untersuchten Trennverfahren wurden Korrosionsuntersuchungen an der Schnittkante in einer Salzsprühnebelkammer SKBW 400 A-TR der Fa. Gebr. Liebisch GmbH & Co., Bielefeld, durchgeführt. Das in Abbildung 5.9 dargestellte Truhengerät ist für die Durchführung von Salzsprühnebelprüfungen nach z. B. DIN 50021 und ASTM-B117, Kondenswasserprüfungen z. B. nach DIN50017, Warmluftprüfungen bis 60 °C sowie zur Erzeugung bestimmter relativer Luftfeuchtebedingungen geeignet. Diese Verfahren können einzeln durchgeführt oder beliebig kombiniert werden. Verschiedene Wechseltests, z. B. VDA621-415 oder ASTM-G8, die auch die DIN 50014 Normalclimate miteinbeziehen, sind einprogrammiert. Darüber hinaus können anwenderspezifische Wechseltests beliebig kombiniert werden. Die zu untersuchenden Proben dieser Arbeit wurden in 5 %-iger Natriumchloridlösung untersucht. Dies ist, wie in Abschnitt 2.5.3 beschrieben, das nach DIN 50021 einzusetzende Korrosionsmedium

für Anwendungen im Automobilbereich. Die Korrosionsuntersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurden bei der Firma GWP Gesellschaft für Werkstoffprüfung mbH, Zorneding, durchgeführt.



*Abbildung 5.9*      *Salzsprühnebelkammer zur Korrosionsprüfung nach DIN 50021*

## 6 Versuchswerkstoffe

### 6.1 Magnesiumlegierungen der AZ-Gruppe

#### 6.1.1 Gefügestruktur

Aufgrund der eingeschränkten Kaltumformbarkeit der hexagonal dichtest gepackten Gitterstruktur und der Neigung zur Zwillingsbildung hat sich der Werkstoff Magnesium nur im geringen Umfang als Blechwerkstoff etablieren können. Die bedeutendste Rolle spielt hier die Gruppe der Mg-Al-Zn-Legierungen, zu der AZ31 oder AZ61 gehören.

Für die Schneidversuche werden unterschiedliche Blechdicken von 1,25 mm und 2,00 mm der Magnesiumlegierung AZ31 (Legierungsbestandteile: 3 % Aluminium und 1 % Zink) eingesetzt.

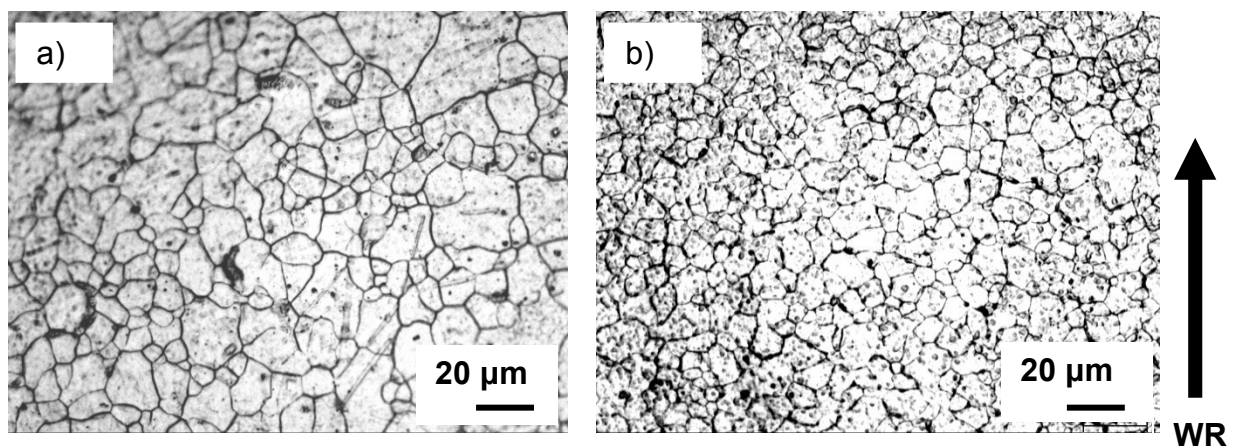


Abbildung 6.1: Gefügestruktur: a) AZ31 Blechdicke 1,25 mm; b) AZ31 Blechdicke 2,00 mm (Längsschliff)

Zur Herstellung von Kaltband, welches für automobiler Anwendung eingesetzt wird (Blechdicke  $\leq 3,00$  mm), wird dieses zunächst warmgewalzt und anschließend auf die entgültige Blechdicke in einem letzten Dressierstich reduziert.

#### 6.1.2 Chemische Zusammensetzung

Die exakte chemische Zusammensetzung der untersuchten Magnesiumlegierung AZ31 wurde mittels Glimmentladungsspektroskopie ermittelt. In Tabelle 6.1 ist die genaue Legierungszusammensetzung der beiden untersuchten Versuchswerkstoffe dargestellt. Hauptlegierungselemente der AZ-Legierungen sind Aluminium und Zink.



Zur Erhöhung der Korrosionsbeständigkeit dieser aluminiumhaltigen Magnesiumlegierung wird üblicherweise zwischen 0,2 % und 0,4 % Mangan zulegiert [BARN92]. Die in Tabelle 6.1 ermittelten Werte der chemischen Zusammensetzung liegen innerhalb der nach DIN 1729-1 zulässigen Toleranzen. Für den Legierungszusatz Zink sind 0,5 bis 1,5 und für Aluminium 2,2 bis 3,5 Gewichts-% zulässig.

Element	Mg	Al	Zn	Mn	Fe
<b>AZ31 1,25 mm</b>	95,44 %	3,16 %	0,82 %	0,41 %	< 0,01 %
<b>AZ31 2,00 mm</b>	96,66 %	2,25 %	0,61 %	0,33 %	< 0,01 %

*Tabelle 6.1: Chemische Zusammensetzung der Magnesiumlegierung AZ31 (Werte sind in Gewichts-% angegeben)*

## 6.2 Mechanische Kennwertermittlung

### 6.2.1 Zugversuch bei Raumtemperatur

Zur Ermittlung der Werkstoffkennwerte wurden Zugversuche an den Versuchswerkstoffen nach DIN EN 10002 durchgeführt. Dazu wurden jeweils drei Flachzugproben unter 0°, 45° und 90° zur Walzrichtung mit einer Anfangsmesslänge von 80 mm und einer Probenbreite von 20 mm aus den Probenblechen entnommen. Die Proben wurden in einer Universal Zug-Druck-Prüfmaschine der Fa. Zwick, GmbH & Co., Ulm, bis zum Werkstoffbruch gezogen und aus den daraus resultierenden Ergebnisse der Mittelwert gebildet. In Abbildung 6.2 sind die im Zugversuch ermittelte Zugfestigkeit  $R_m$  der eingesetzten Magnesiumblechwerkstoffe wiedergegeben.

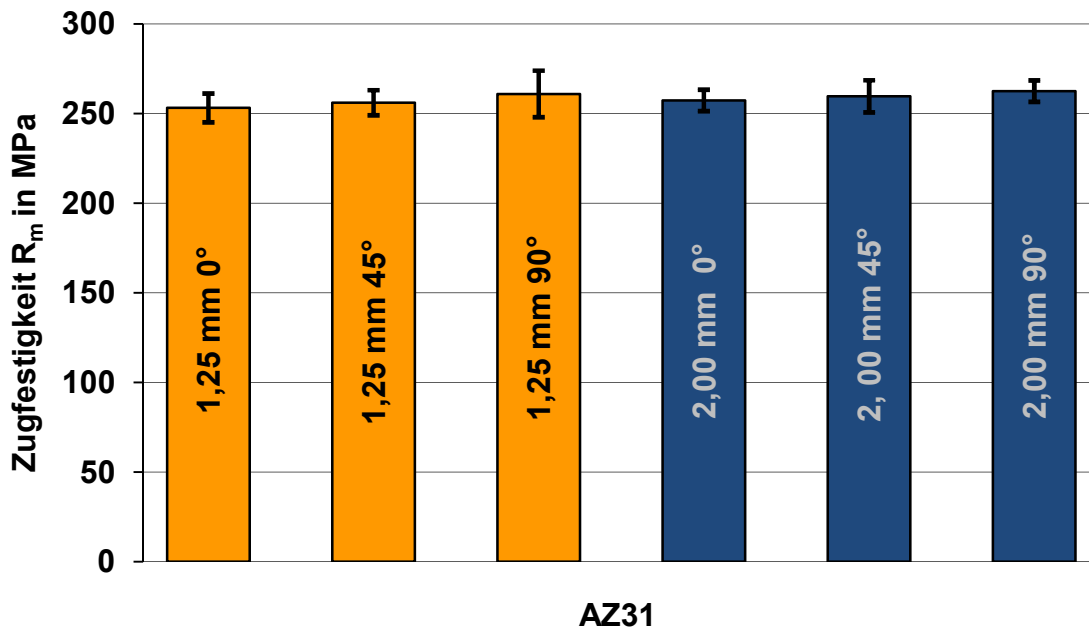


Abbildung 6.2: Zugfestigkeit  $R_m$  in Abhängigkeit der Walzrichtung von AZ31 für die Blechdicken 1,25 mm und 2,00 mm

Die Festigkeiten ( $R_m$ ) der beiden Blechwerkstoffe in Abhängigkeit der Walzrichtung unterscheiden sich nur geringfügig.

### 6.2.2 Zugversuch bei unterschiedlichen Temperaturen

Aufgrund des stark temperaturabhängigen Materialverhaltens ist es notwendig, zur weiteren Charakterisierung die Magnesiumlegierungen bei erhöhten Temperaturen zu untersuchen, da bei Raumtemperatur aufgrund der hexagonalen Gitterstruktur nur ein Gleitsystem aktiv ist. Es wurden deshalb Warmzugversuche bei Raumtemperatur ( $T = 22\text{ °C}$ ),  $150\text{ °C}$ ,  $200\text{ °C}$  sowie  $250\text{ °C}$  an einer Warmzugprüfeinrichtung durchgeführt, wie in Abschnitt 5.2.4 Abbildung 5.8 dargestellt.

Um gezielt Aussagen über das Umformverhalten beziehungsweise über die Vorgänge während des Schneidprozesses eines Werkstoffes machen zu können, ist es unbedingt erforderlich, die entsprechenden Fließkurven zu ermitteln. Hierbei wird die zur plastischen Formänderung benötigte Fließspannung  $k_f$  in Abhängigkeit des Umformgrades  $\varphi$ , der Umformgeschwindigkeit  $d\varphi/dt$  und der Temperatur  $T$  ermittelt. In Abbildung 6.3 und 6.4 sind die Fließkurven für Temperaturen zwischen  $22\text{ °C}$  und

250 °C für jeweils zwei unterschiedliche Dehnraten ( $d\phi/dt = 0,1 \text{ s}^{-1}$  und  $d\phi/dt = 0,01 \text{ s}^{-1}$ ) dargestellt.

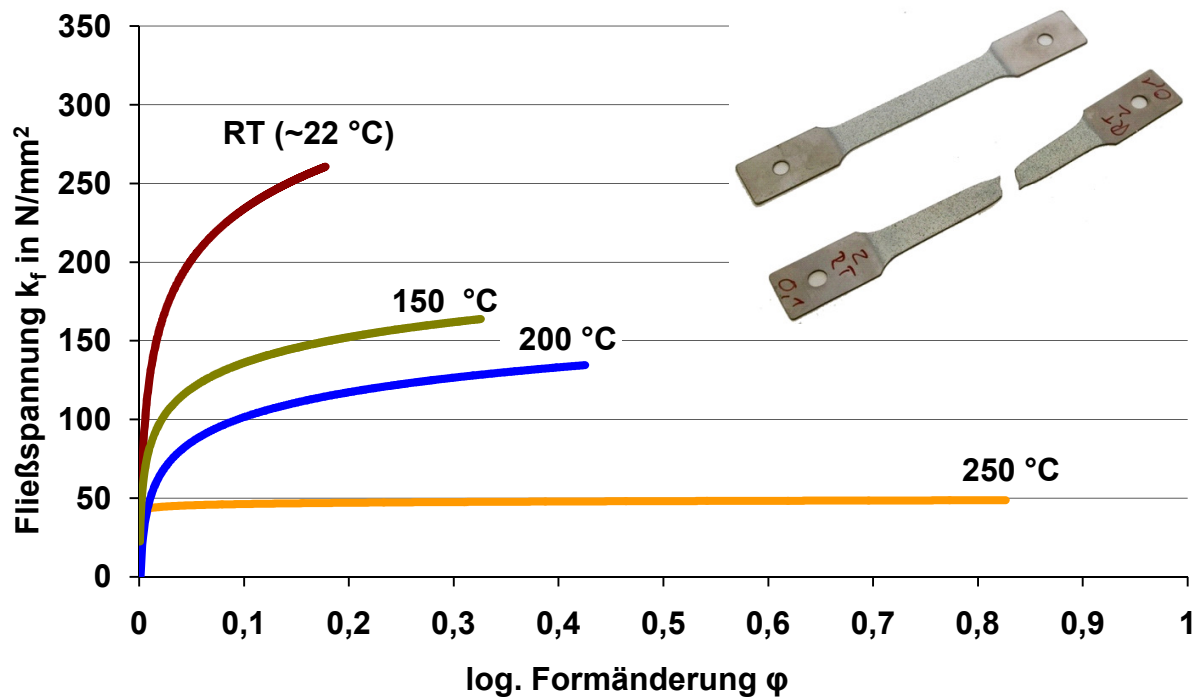


Abbildung 6.3: Temperaturabhängige Fließkurven für AZ31 der Blechdicke 2,00 mm bei einer Dehnrates  $d\phi/dt = 0,1 \text{ s}^{-1}$ .

Es ist zu beobachten, dass bei Temperaturen ab 200 °C die Fließkurven sehr flach verlaufen und eine sehr niedrige Fließspannung  $k_f$  aufweisen. Jedoch ist bereits bei 150 °C eine Erniedrigung der Fließspannung  $k_f$  zu erkennen. Bei höheren Temperaturen ist der Verfestigungsexponent  $n$ , der sich aus der Steigung einer doppelt logarithmischen Auftragung aus der Fließkurve ergibt, für Magnesiumlegierungen der AZ-Gruppe deutlich geringer als bei Raumtemperatur. Daraus kann abgeleitet werden, dass oberhalb von 150 °C im Werkstoff thermisch aktivierte Entfestigungsvorgänge stattfinden und zusätzliche Gleitsysteme aktiviert werden. In Abbildung 6.6 ist die Einschnürzone kurz vor dem Riss der Probe dargestellt. Es ist ein deutlicher Unterschied des Werkstoffverhaltens in der Einschnürzone bei Raumtemperatur und 250 °C zu beobachten. Diese Darstellung der Einschnürzone

in Abbildung 6.5 ist aus dem Aramis Messsystem generiert und zeigt eine digitalisierte Aufbereitung der optisch ermittelten Werte.

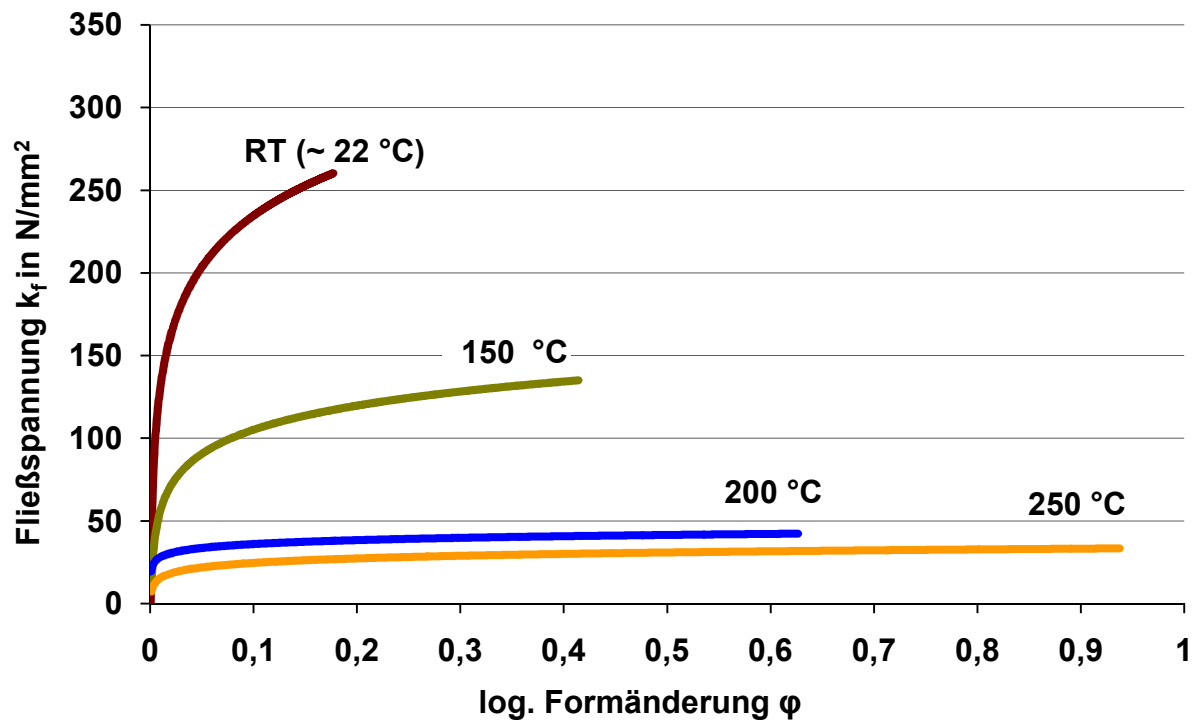


Abbildung 6.4: Temperaturabhängige Fließkurven für AZ31 der Blechdicke 2,00 mm bei einer Dehnrage  $d\phi/dt = 0,01 s^{-1}$ .

Um den Einfluss der Umformgeschwindigkeit zu ermitteln, wurden die Fließkurven für zwei unterschiedliche Dehnraten ermittelt ( $d\phi/dt = 0,1 s^{-1}$  und  $d\phi/dt = 0,01 s^{-1}$ ). Bei Raumtemperatur ist der Einfluss auf die Fließkurve sehr gering. Anders verhält es sich für Temperaturen ab 150 °C hinsichtlich der unterschiedlichen Dehnraten. Bei einer Dehnrage von  $d\phi/dt = 0,1 s^{-1}$  ist der Abfall der Fließspannung nicht so hoch wie bei einer Dehnrage von  $d\phi/dt = 0,01 s^{-1}$ . Dies begründet sich durch die im Werkstoff ablaufenden, thermisch aktivierten Entfestigungsvorgänge, welchen bei einer Dehnrage von  $d\phi/dt = 0,01 s^{-1}$  mehr Zeit zur Verfügung steht.

Analog zu Abbildung 6.3. ist die vergleichbare Erniedrigung der Fließspannung  $k_f$  auch in Abbildung 6.4 zu erkennen.

Die gewonnenen Materialkennwerte erlauben Rückschlüsse auf die während der Umformung stattfindenden Ver- und Entfestigungsvorgänge im Werkstoff, da die

Steigung der Fließkurven positiv ist. Das bedeutet, dass wegen der Umformung makroskopisch eine Verfestigung und mikroskopisch die Entstehung von Versetzungen erfolgt. Dieser dynamische Prozess, der während der Umformung zwischen Ver- und Entfestigung im Werkstoff abläuft, führt zu Beginn zu einer Verfestigung, da sich Versetzungen aufstauen. Im weiteren Verlauf der Umformung führt die eingebrachte Umformenergie, die mit steigender Umformgeschwindigkeit zunimmt, zu einer Erwärmung der Probe. Dadurch werden die Entfestigungsvorgänge eingeleitet und zusätzliche Gleitebenen aktiviert und wirken den parallel stattfindenden Verfestigungsvorgängen entgegen. Bei höheren Temperaturen wird dieser werkstoffspezifische Mechanismus begünstigt und es kommt zu einer signifikant niedrigeren Fließspannung.

In Abbildung 6.5 ist das Einschnürverhalten (a, RT und b,  $T = 250\text{ °C}$ ) für die Magnesiumlegierung AZ31 dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass kurz vor Rissbeginn der Zugprobe bei Raumtemperatur keinerlei Einschnürung zu beobachten ist und ein sehr sprödes Bruchverhalten charakteristisch sein wird. Bei  $250\text{ °C}$  hingegen ist eine deutliche Einschnürung zu sehen, was sich signifikant auf das Bruchbild auswirken wird.

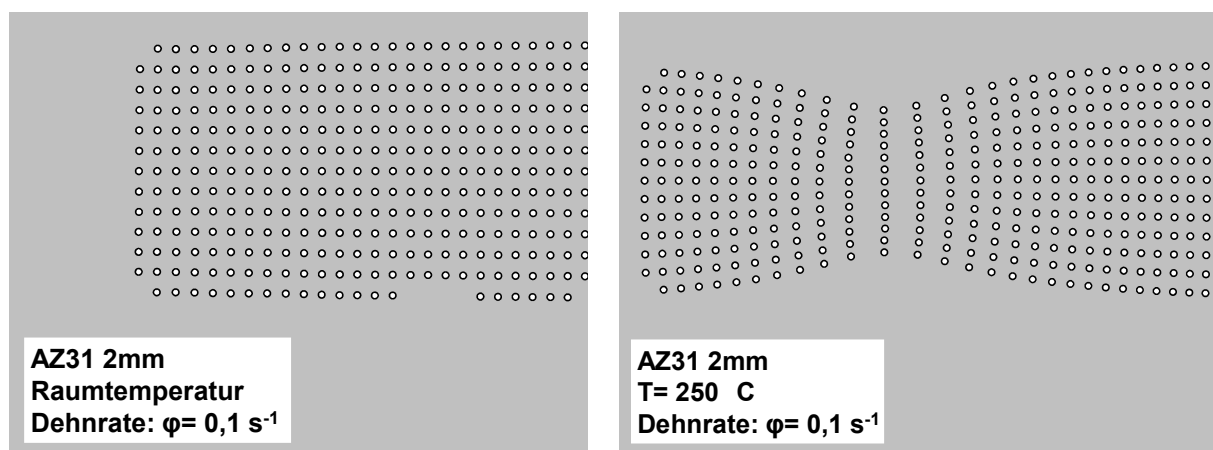


Abbildung 6.5: *Einschnürungsverhalten bei a) Raumtemperatur und b)  $250\text{ °C}$  mit konstanter Dehnrage  $d\varphi/dt = 0,1\text{ s}^{-1}$ .*

Die im Warmzugversuch ermittelten Fließkurven erhöhen die Genauigkeit der Interpretation der Simulationsergebnisse, da aufgrund der Temperaturabhängigkeit das Umformverhalten maßgeblich beeinflusst wird.

### 6.2.3 Härtemessungen

In Abschnitt 5.2.6 ist die Härteprüfung nach Vickers beschrieben. Die untenstehenden Werte in Abbildung 6.6 wurden dementsprechend ermittelt.

Bei vielen Blechwerkstoffen kommt es durch die beim Walzen eingebrachte Vorverformung zu einer erhöhten Werkstoffhärte in den Randschichten. Dies ist auch bei den hier eingesetzten Blechen (vgl. Abbildung 6.6) zu beobachten, das dünnere Blech mit 1,25 mm hat eine etwas höhere Härte aufgrund einer höheren Verfestigung als das Blech mit 2,00 mm. Es wurde für das in Abbildung 6.7 dargestellte Diagramm der Mittelwert aus  $N = 3$  gebildet ( $N$  entspricht der Anzahl der Wiederholungen).

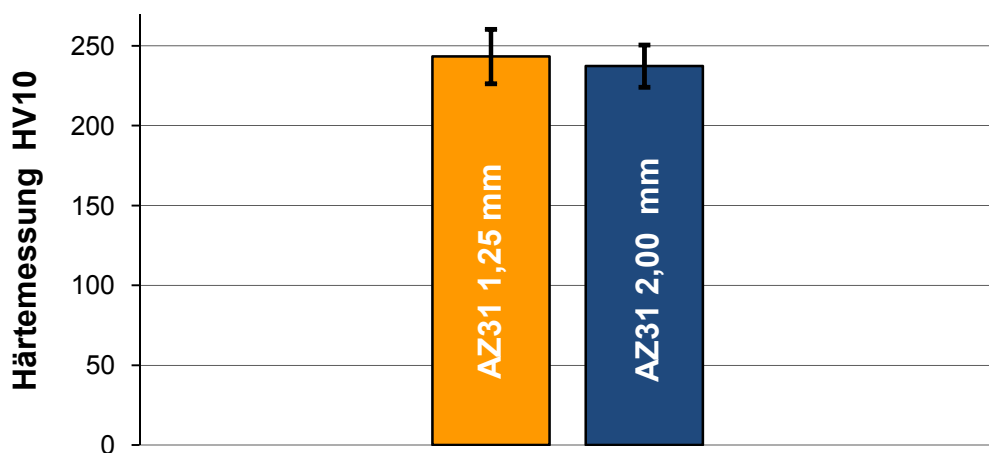


Abbildung 6.6: Härte in Vickers mit einer Prüfkraft von 100 N der Magnesiumlegierung AZ31 für die Blechdicken von 1,25 mm und 2,00 mm

### 6.3 Oberflächenrauheit

Zur Untersuchung der Oberflächenrauheit wird ein Rauheitsmessgerät der Firma Mahr GmbH, Typ Perthometer S8P verwendet. Damit ist es möglich, die unterschiedlichen Oberflächenkennwerte aufzunehmen. In Abbildung 6.7 ist für die eingesetzten Bleche der Magnesiumlegierung AZ31 der Mittenrauhwert  $R_a$  in Abhängigkeit der Walzrichtung dargestellt. Es wurden jeweils drei Messspuren ermittelt.

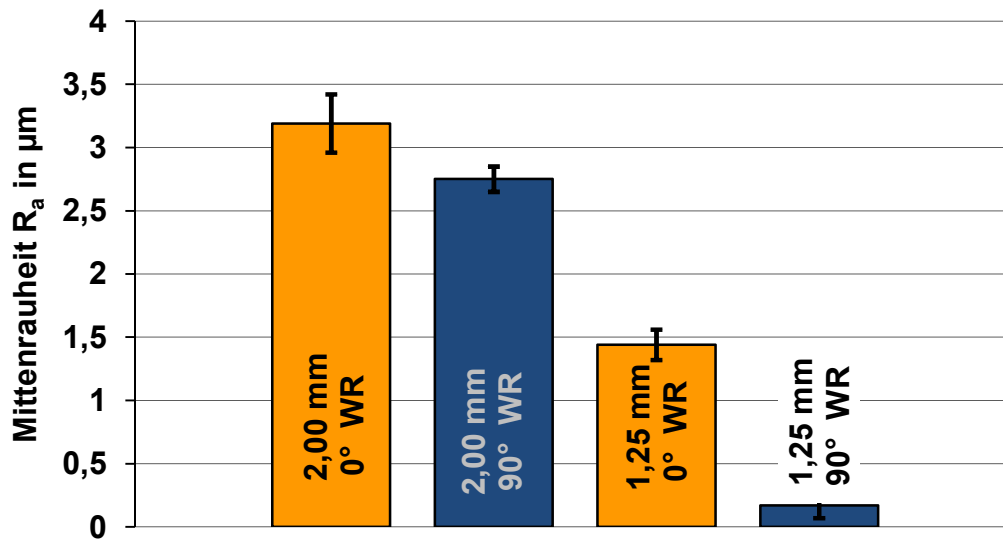


Abbildung 6.7: Rauheit in Abhängigkeit der Walzrichtung der Magnesiumlegierung AZ31 für eine Blechdicke von 1,25 mm und 2,00 mm

Wie in Abbildung 6.7 dargestellt ist, gibt es eine starke Abweichung der Mittenrauheit  $R_a$  der beiden untersuchten Werkstoffe. Die Oberfläche erscheint sehr unterschiedlich von der Beschaffenheit, was in einer unterschiedlicher Oberflächenbehandlung begründet werden kann.

#### 6.4 Ermittlung des Wärmeübergangverhaltens

Die Magnesiumlegierung AZ31 zeichnet sich durch eine hohe Wärmeleitfähigkeit aus. Sie liegt in einem Bereich von 138 W/Km bis 156 W/Km, und ist jedoch kleiner als die von reinem Aluminium mit 235 W/Km. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt durch die Legierungsbildung ab, insbesondere durch Zusätze von Aluminium, Mangan und Silicium [KIRK81].

Für die Auslegung des werkzeugunabhängigen Heizkonzeptes, das in dieser Arbeit eingesetzt wird, ist es wichtig, die Wärmeausbreitung im Blechwerkstoff zu kennen. Insbesondere eine homogene Temperaturverteilung ist hier wichtig, damit an der Schneidkante reproduzierbar einstellbare Temperaturverhältnisse vorzufinden sind. Mit Hilfe einer Software zur Gießsimulation (Magmasoft, Firma Magma GmbH) konnte dies realitätsnah abgebildet werden. Die Konstruktion und Vorgehensweise zur Beheizung der Schneidwerkzeuge für die unterschiedlichen Verfahren ist in Abschnitt 5.1.3 ausführlich erläutert.

## 7 Versuchsdurchführung

### 7.1 Zusammenfassung der Schneidverfahren und der Schneidparameter

Neben der Schneidtemperatur wurden bei den Schneidversuchen folgende Schneidparameter variiert, wie sie in Tabelle 7.1 aufgelistet sind:

<b>Schneidgeschwindigkeit</b>	30 mm/s	90 mm/s
<b>Werkzeuggeometrie</b>	(Scherschneiden) vollkantig, Fase 1,20 mm x 60°	(Messer- und Beißschneiden) symmetrisch, asymmetrisch
<b>Schneidtemperatur</b>	RT ( $\approx 22^\circ\text{C}$ )	100 °C/ 150 °C/ 200 °C/ 250 °C
<b>Schneidspalt <math>\alpha</math></b>	(Scherschneiden): 2,5 %, 5 %, 10 %, 20 %	(Scherschneiden):negative Schneidspalte: -5%; -10%
<b>Keilwinkel</b>	(Messer- und Beißschneiden): symmetrisch $\alpha$ : 25°, 30°, 45°, 60°	(Messer- und Beißschneiden): asymmetrisch $\beta$ : 22,5°, 30°
<b>Schnittlinie</b>	offener Schnitt	geschlossener Schnitt
<b>Blechdicke</b>	1,25 mm	2,00 mm

*Tabelle 7.1: Übersicht der Parametervariationen für das Scher- und Keilschneiden*

Durch Variation der Schneidparameter kann der Einfluss einzelner, aber auch die Kombination mehrerer Kenngrößen auf die Qualität der Schnittkantenoberfläche ermittelt werden.

Die in Kapitel 8 dargestellten Diagramme zeigen die Schneidkraft  $F_S$  normiert auf die Blechdicke und die Schnittlinienführung. Dies ermöglicht eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Als Einheit ergibt sich für den Schneidkraftbedarf  $F_S$  eine zur Materialtrennung notwendige Spannung, welche in  $\text{N/mm}^2$  angegeben wird.

Zur besseren Übersichtlichkeit wurde eine Nomenklatur erstellt, die nach den drei Schneidverfahren gegliedert ist und alle Versuchsparameter erfasst. In der untenstehenden Abbildung 7.1 ist die Systematik dargestellt.



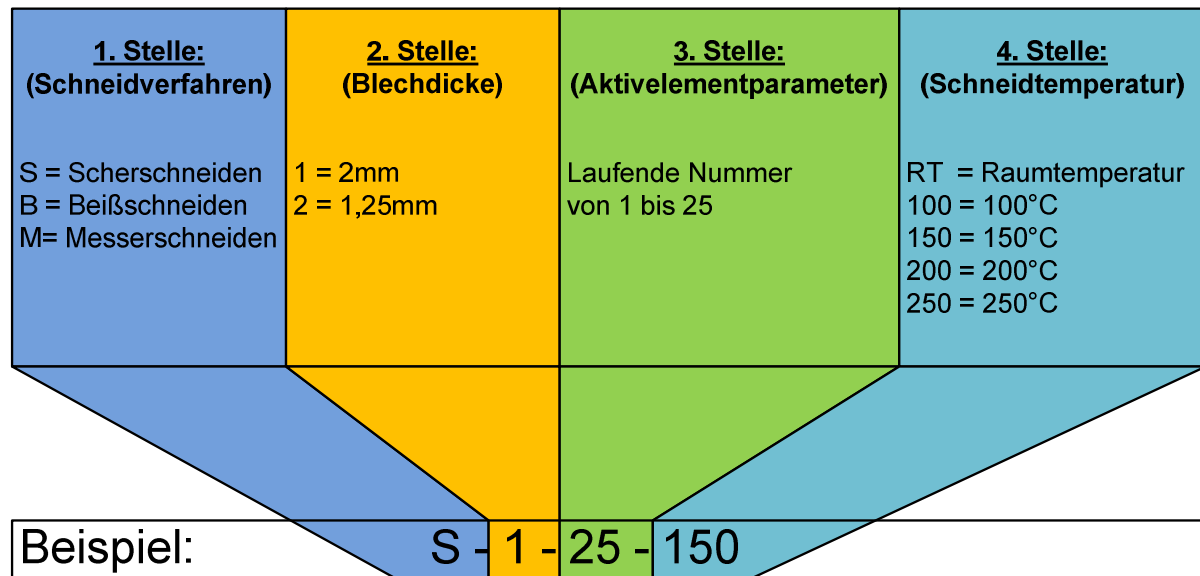


Abbildung 7.1: Nomenklatur zur Zuordnung der geschnitten Blechproben für nachfolgende Untersuchungen

Eine detaillierte Vermessung der Schnittflächen, wie in Abschnitt 5.2.1 und 7.6 dargestellt, ergibt den Anteil der glattschnittenen Fläche und der Bruchfläche, deren Anteile in Abhängigkeit des Schneidverfahrens und der entsprechenden Schneidparameter stehen. Die Glattschnittfläche entsteht während des Eindringens des Werkzeugs in das Material. Dabei trennt das Schneidwerkzeug jede einzelne Gitterebene, ohne dass sich ein fortlaufender Riss ausbildet. Die Bruchfläche entsteht bei eben diesem fortlaufenden Riss, der von einem Versagen des Materials bedingt durch den Schneidvorgang herrührt. In Anlehnung an das Bewertungsschema aus VDI 2906 (vgl. Abbildungen 2.3 bis 2.5) werden die Glattschnitt- und die Bruchfläche prozentual zur Blechdicke als Glattschnittflächenanteil  $h_S$  und Bruchflächenanteil  $h_B$  angegeben.

## 7.2 Temperierung des Schneidprozesses

Auf Grundlage der simulativen Betrachtung von Wärmeübergang und den resultierenden Wechselwirkungen bezüglich der Art und Weise der Temperierung (siehe Kap. 5.1.3) wurde der Versuchsaufbau beziehungsweise das Versuchswerkzeug entsprechend modifiziert. Hierbei ist es notwendig, den Wärmeübergang zwischen Magnesiumblechwerkstoff und Schneidaktivelement zu ermitteln. Mit Hilfe

der FE-Software Magma kann dies realitätsnah dargestellt werden. In Abbildung 4.5 in Abschnitt 4.1.3 ist das Wärmeübergangsverhalten für das Scherschneiden im vollkantigen geschlossenen Schnitt und für das Keilschneiden am Beispiel des Messerschneidens dargestellt. Alternativ ist ein Konzept einer werkzeugunabhängigen Temperierung untersucht worden.

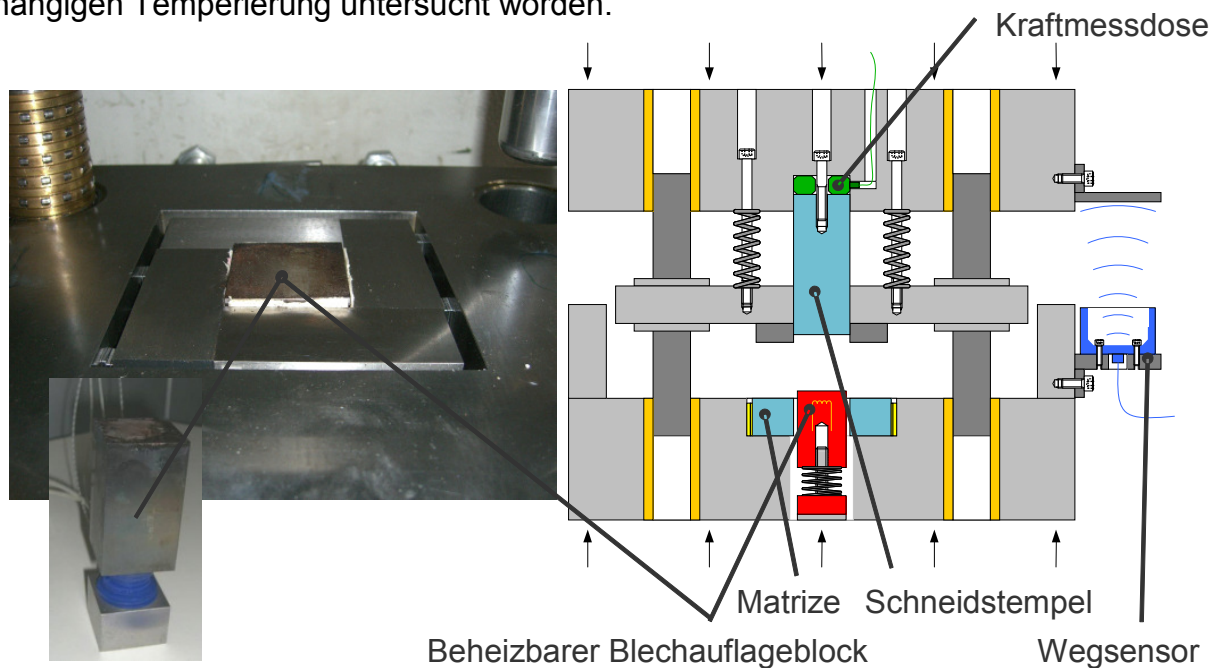


Abbildung 7.2: Konzept zum werkzeugunabhängigen temperierten Scherschneiden

Für das Scherschneiden wurde hierfür ein beheizbarer Gegenstempel (Abbildung 7.2) in der Matrize implementiert. Der Blechwerkstoff wird auf die Matrize gelegt und wie in Abschnitt 4.1.3 beschrieben, in zehn Sekunden auf die entsprechende Prozesstemperatur erwärmt.

Für die Keilschneidverfahren kommen beheizte Blechauflageblöcke zum Einsatz, wie sie schematisch in Abbildung 7.3 und Abbildung 7.4 dargestellt sind. In allen Fällen wurden Hochleistungs-Heizpatronen mit Thermofühlerspitze vom Typ HS/TFS der Firma Stegmeier GmbH (Fridingen) in die aus vergütetem Werkzeugstahl 1.2379 gefertigten Blechauflageblöcke integriert. Für alle drei Schneidverfahren wurden die Heizpatronen über Thermolemente mit einem Steuergerät der Firma Eurotherm GmbH angesteuert.

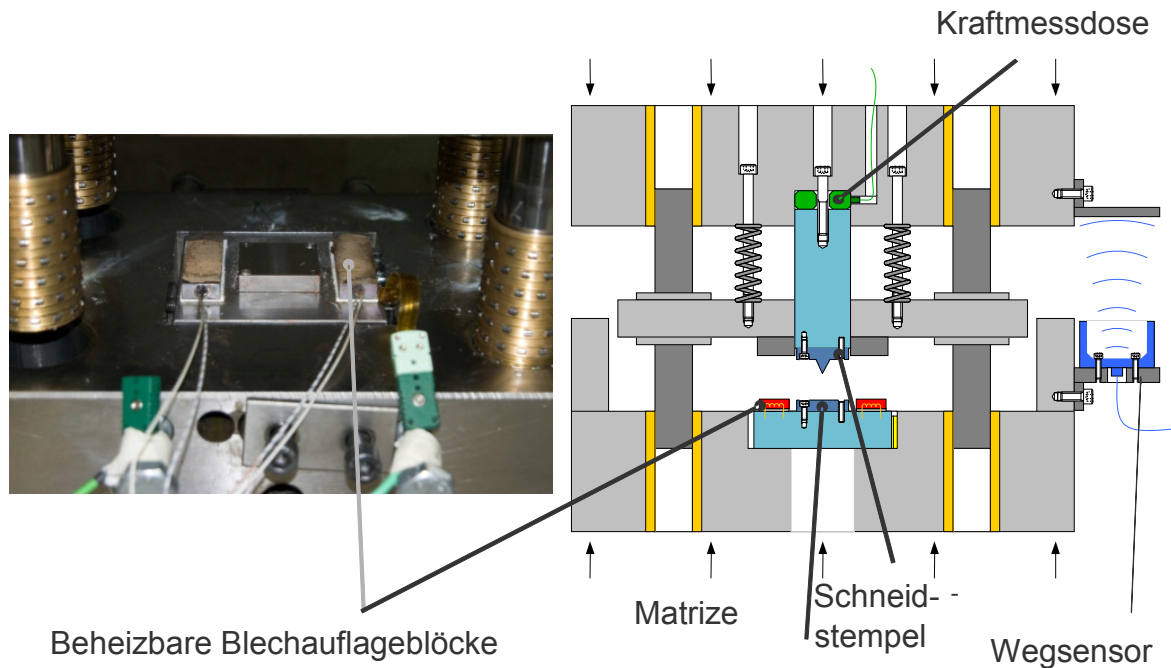


Abbildung 7.3: Konzept zum werkzeugunabhängigen temperierten Messerschneiden

Um die Differenz der Temperatur zwischen der am Temperaturregelgerät gewählten Zieltemperatur und tatsächlicher Temperatur am Blech ermitteln zu können, wurde direkt an der Schneidkante am Blech ein Thermoelement des Typs K aufgebracht. Durch Temperaturmessung und Regelung wird gewährleistet, dass die gewünschte Temperatur an der Schneidkante des Blechs zuverlässig eingestellt wird. Die Abweichung zwischen Temperaturregelgerät und tatsächlicher Temperatur am Blech beträgt maximal 5 °C. Die Versuche sind bei Raumtemperatur, 100 °C, 150 °C, 200 °C und 250 °C durchgeführt worden.

Für das Beißschneiden wurde verfahrensbedingt die Höhe der Blöcke variiert, um eine ebene Blechauflage gewährleisten zu können. Dies ist in Abbildung 7.4 dargestellt.

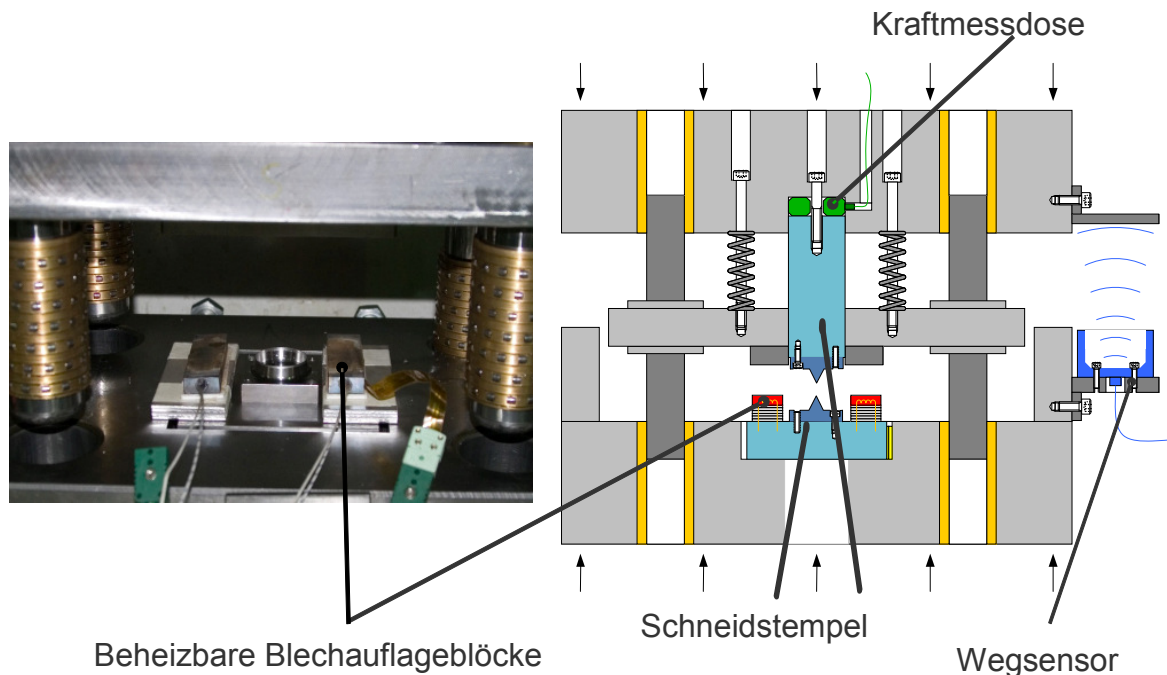


Abbildung 7.4: Konzept zum werkzeugunabhängigen temperierten Beißschneiden

## 7.3 Scherschneiden

### 7.3.1 Variation des Schneidspaltes

Wie in Abschnitt 4.1.2 beschrieben, lässt sich am vorhandenen Versuchswerkzeug der Schneidspalt stufenlos einstellen. In der vorliegenden Arbeit wurden die positiven Schneidspalte 2,5 %, 5 %, 10 % und 20 % der Blechdicke und negative Schneidspalte von -5 % und -10 % bezogen auf die Blechdicke, betrachtet. Im letzteren Fall wird der Trennvorgang hauptsächlich mittels Druckspannungen induziert. Begründet durch das charakteristische Werkstoffverhalten der Magnesiumlegierung AZ31 begünstigt dies die Bildung von Zwillingslamellen, welche neben der Versetzungsbewegung einen Anteil von bis zu 20 % an der Formänderung haben [KAMM00]. Die Genauigkeit des Werkzeugs bzw. des eingestellten Schneidspaltes wurde in Anschnittversuchen untersucht und ist mit einer Abweichung von maximal 20  $\mu\text{m}$  ausreichend genau.

### 7.3.2 Variation der Schnittlinienführung

Die Schnittlinienführung wird mit einer offenen und einer geschlossenen Kontur durchgeführt. In Abbildung 7.5 sind die Geometrien für die unterschiedlichen Schnittlinienführungen beim Scherschneiden schematisch dargestellt. Die Probengröße beträgt im offenen Schnitt 70 mm x 40 mm, für den geschlossenen Schnitt weisen die Proben eine Größe von 100 mm x 100 mm auf.

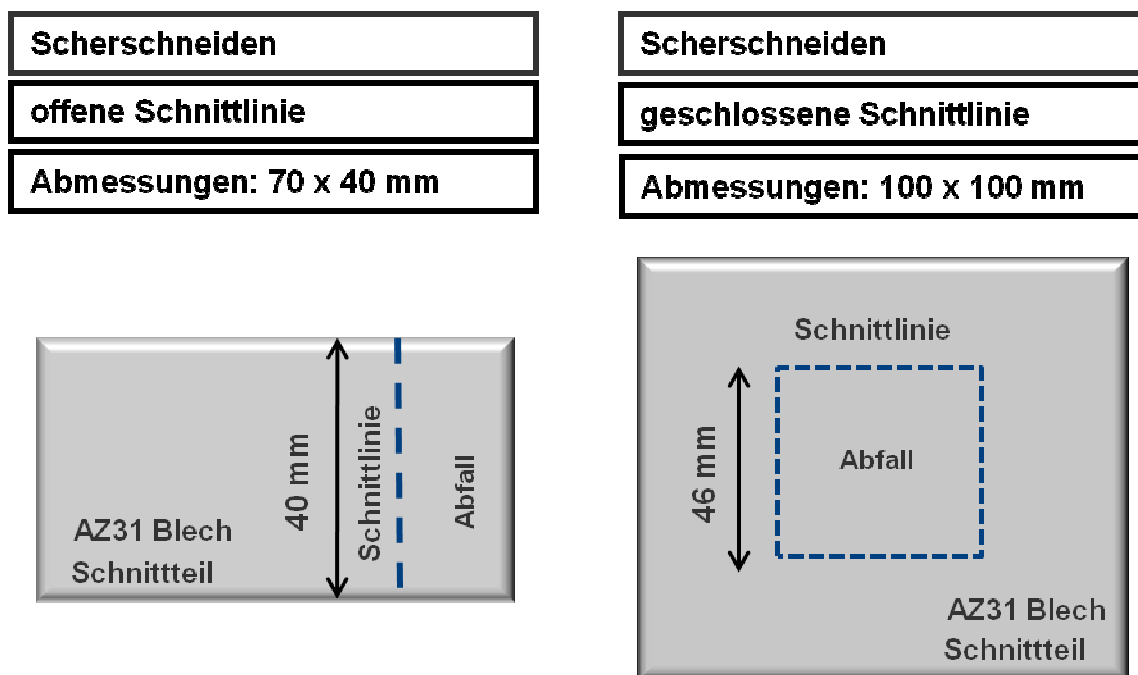


Abbildung 7.5: Schnittlinienführung beim Scherschneiden

Zur Berechnung der normierten Schneidkraft  $F_S$  (Abschnitt 8.1) wird für das Scherschneiden mit offener Schnittlinienführung eine Länge von 0 mm und für eine geschlossene Schnittlinienführung eine Länge von 184 mm ( $4 \times 46$  mm) verwendet.

### 7.3.3 Variation der Werkzeugkantengeometrie

In Vorversuchen wurde neben einem vollkantigen Schneidstempel ein an der Werkzeugkante gefaster Schneidstempel untersucht. In Abbildung 7.6 ist der eingesetzte Stempel mit einer Fase von 1,20 mm x 60° zu sehen. Die weiteren Versuche wurden mit einem vollkantigen Stempel durchgeführt, da die Ergebnisse aus den Vorversuchen mit Fase sehr schlechte Schnittflächen lieferten. Diese hatten

nahezu keinen Glattschnittanteil  $h_s$  und stellten sich sehr zerklüftet dar. In Abschnitt 8.1.2, Abbildung 8.2 sind Bilder der Schnittflächen mit Fase im Vergleich zu Schnittflächen mit vollkantigen Schneidstempel dargestellt.

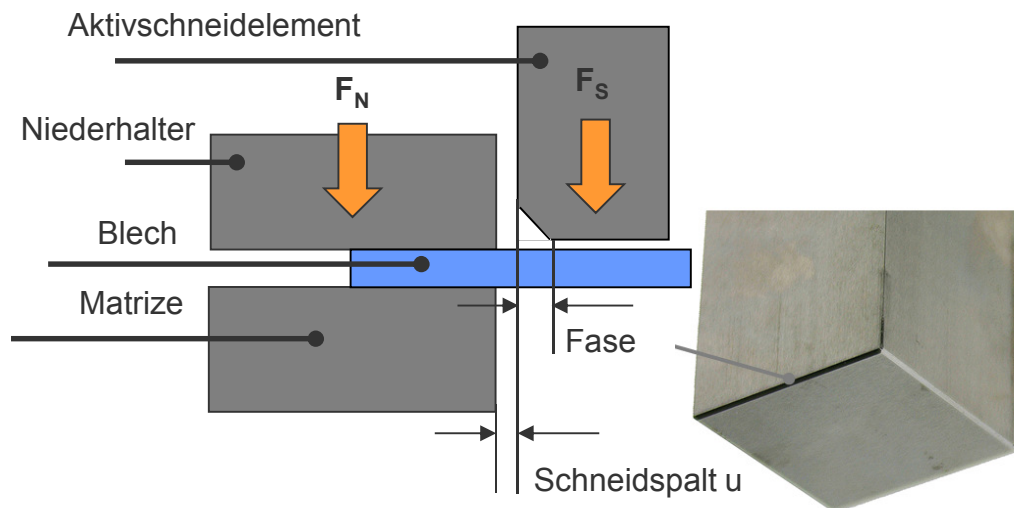


Abbildung 7.6: Links: Schematische Darstellung Scherschneiden mit den zu variierenden Werkzeugparametern; Rechts: Eingesetztes Werkzeugaktivelement zum Scherschneiden mit einer Fase von  $1,20 \text{ mm} \times 60^\circ$

## 7.4 Keilschneiden

### 7.4.1 Variation der Keilwinkel

Für die beiden untersuchten Keilschneidverfahren, zu denen das Messer- bzw. das Beißschneiden zählt, sind unterschiedliche Keilwinkel (vgl. Abschnitt 2.3) untersucht worden. In Abbildung 7.7 sind die symmetrischen Keilwinkel von  $25^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  und  $60^\circ$  für den offenen Schnitt dargestellt.

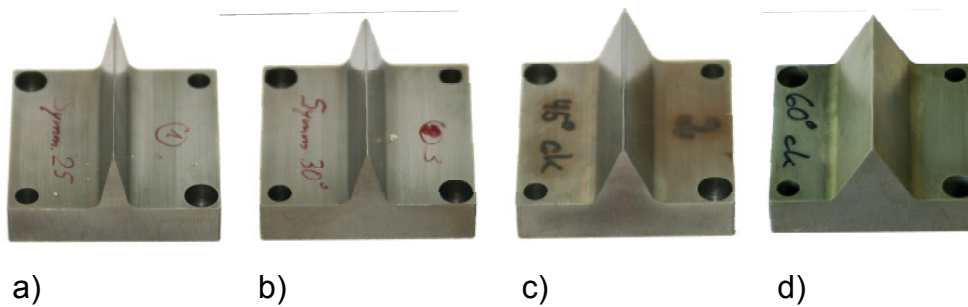


Abbildung 7.7: Symmetrische Keilwinkel für den offenen Schnitt: a)  $\alpha = 25^\circ$ ; b)  $\alpha = 30^\circ$ ; c)  $\alpha = 45^\circ$ ; d)  $\alpha = 60^\circ$

Analog wurden die gleichen Keilwinkel für den geschlossenen Schnitt verwendet, wie in Abbildung 7.8. zu sehen ist.

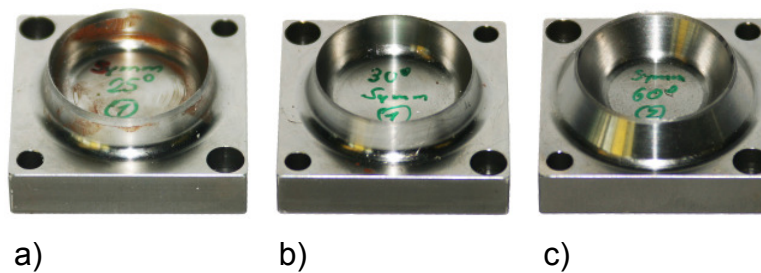


Abbildung 7.8: Symmetrische Keilwinkel für den geschlossenen Schnitt: a)  $\alpha = 25^\circ$ ; b)  $\alpha = 30^\circ$ ; c)  $\alpha = 60^\circ$

Zusätzlich wurden Schneidversuche mit asymmetrischen Keilwinkeln durchgeführt wie die Abbildung 7.9 zeigt.

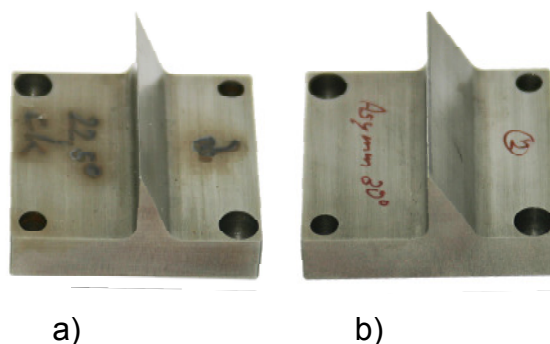


Abbildung 7.9: Asymmetrische Keilwinkel für den offenen Schnitt: a)  $\alpha = 22,5^\circ$ ; b)  $\alpha = 30^\circ$

### 7.4.2 Variation der Schnittlinienführung

Analog zum Scherscheiden werden auch beim Keilschneiden eine offene und eine geschlossene Schnittlinienführung untersucht. In Abbildung 7.10 ist diese schematisch dargestellt. Die Probengröße ist für offenen und geschlossenen Schnitt identisch, mit 70 mm x 40 mm.

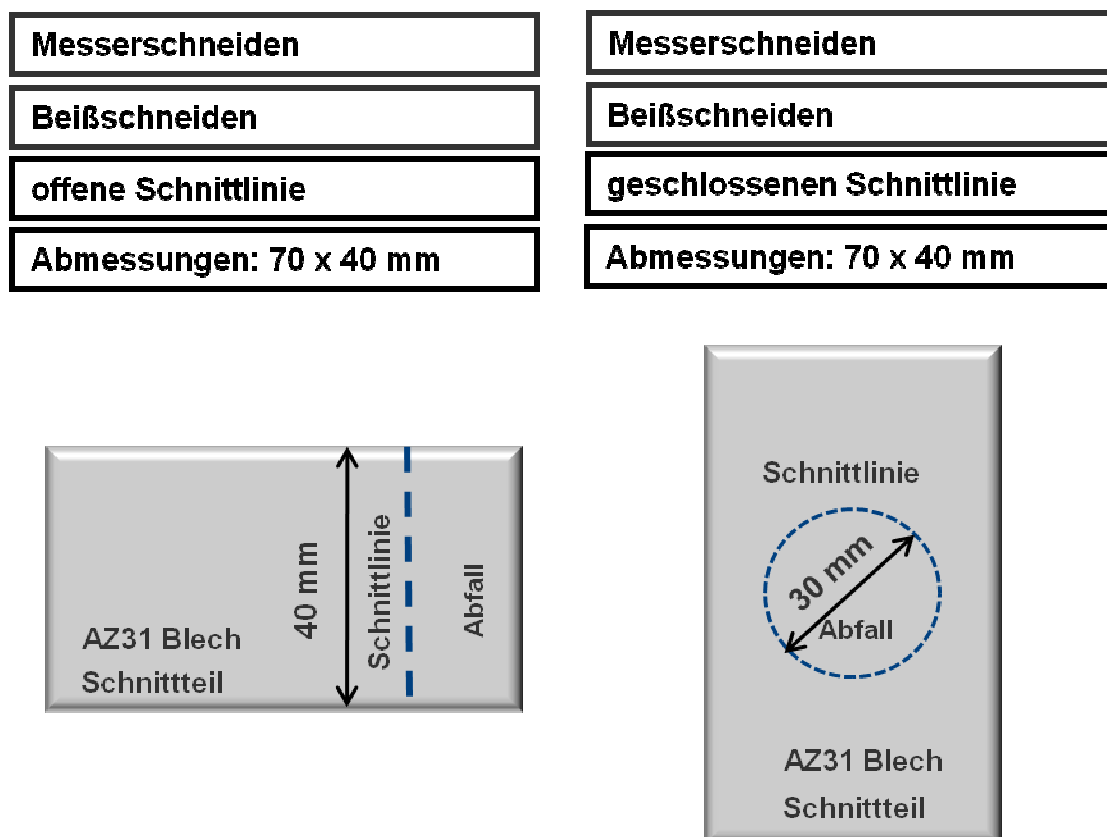


Abbildung 7.10: Schnittlinienführung beim Keilschneiden

Zur Berechnung der normierten Schneidkraft  $F_S$  (Abschnitt 8.2 und 8.3) wird für das Keilschneiden mit offener Schnittlinienführung eine Länge von 40 mm und für eine geschlossene Schnittlinienführung eine Länge von etwa 94 mm (Durchmesser 30 mm) verwendet.

### 7.5 FE-Simulation

Für die Schneidsimulation ist das Programm Deform 2D der Firma SFTC Cooperation in Columbus, Ohio einsetzbar. Einerseits ist ein elasto-plastisches Materialmodell mit speziellem FE-Code für starke Deformationen hinterlegt, die zur Modellierung der



Scherzone benötigt wird. Andererseits ist eine automatische Neuvernetzung implementiert, die eine übermäßige Verzerrung des Netzes bei plastischer Verformung verhindert. Darüber hinaus bestehen in Deform diverse Bruchkriterien zur Simulation der Materialtrennung. Für die Untersuchungen zum Schneiden an dem Magnesiumblechwerkstoff AZ31 wurde aufgrund des spröden Werkstoffverhaltens das Bruchkriterium nach Cockroft & Latham verwendet, wie in Abschnitt 2.5.2 Gleichung 2.3. dargestellt ist.

In Abbildung 7.11 ist exemplarisch die notwendige Vernetzung für die unterschiedlichen Schneidverfahren abgebildet. Da sich, abhängig vom eingesetzten Schneidverfahren, die Dehnungsverteilung im Blech unterschiedlich einstellt, ist es erforderlich, für jedes Schneidverfahren eine optimierte Vernetzung in der Simulation zu implementieren. Im Bereich der größten Dehnungen, die an der Kontaktfläche des Schneidstempels bzw. des Schneidmessers beim Eindringen in das Blech auftreten, wird das feinste Netz für die höchste Genauigkeit generiert. Aufgrund dieser Tatsache sind in Abbildung 7.11 die unterschiedlichen Netze für das jeweilige Schneidverfahren dargestellt.

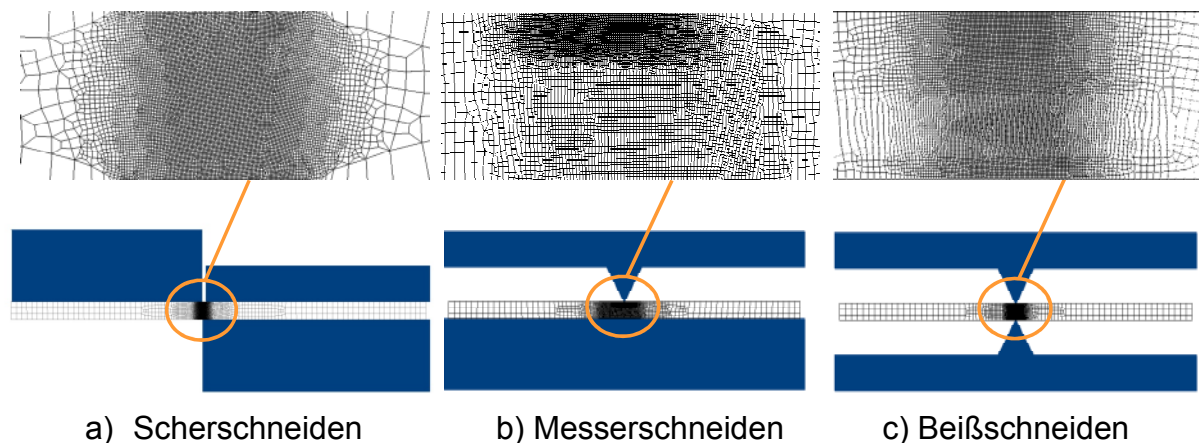


Abbildung 7.11 Vernetzung für die unterschiedlichen Schneidsimulationen  
a) Scherschneiden; b) Messerschneiden; c) Beißschneiden

## 7.6 Ermittlung des Schnittflächenprofils

Das in Abschnitt 5.3 beschriebene Verfahren zur Analyse der Oberflächentopographie von Schnittflächen wurde wie nachfolgend beschrieben eingesetzt. Um die

gesamte Schneidkante durch die Messnadel abtasten zu können, hat sich ein Anstellwinkel des geschnittenen Bleches von  $45^\circ$  während der Messung als geeignet erwiesen, da dadurch eine geschlossene Messlinie erzeugt werden kann. Zuerst wird eine Oberflächenkennlinie durch ein „Tip-Down“ der Nadelspitze und einer anschließenden Messung erzeugt. Dabei setzt die Nadelspitze auf der zu vermessenden Oberfläche auf, wird danach wie in Abschnitt 5.3.1, Abbildung 5.6 abgebildet über die Oberfläche bewegt und erzeugt dadurch eine Kennlinie, die per MarSurf XC 20 Software im Rechner generiert wird. Nach der ersten Messung wird eine zweite Messung durch „Tip-Up“ durchgeführt (vgl. Abbildung 7.12), die beiden Kennlinien werden anschließend übereinander gelegt. Dadurch entsteht eine geschlossene Messlinie über die Schnittkante und die gesamte Schnittkante ist, wie in Abbildung 7.12 gezeigt, erstmals zu erkennen. Durch Nachbearbeitung der Schnittprofile mittels eines Bildverarbeitungsprogrammes werden die Abbildungen generiert, die in Abschnitt 8.1 weiter dargestellt und erläutert werden. Um die Vergleichbarkeit der Messergebnisse gewährleisten zu können, muss der relative Ursprung aller Koordinatensysteme der Messungen identisch sein und der Messablauf in MarSurf XC 20 programmiert werden. Dazu ist die Definition der Fahrstrecken und der Verfahrensgeschwindigkeiten des Tastarmes zwingend festzulegen. Diese Programmierung wurde auf alle Messungen angewandt.

Das Abtasten der Oberfläche erfolgte durch die beidseitig 9 mm lange und auf  $25\ \mu\text{m}$  gespitzte Nadel, die am vorderen Ende eines Tastarmes befestigt ist. Die horizontale und vertikale Bewegung der Nadelspitze erzeugt ein Messsignal, das ein  $25\ \mu\text{m}$ -genaues Abbild der abgetasteten Oberfläche visualisiert. Der Versuchsaufbau wird aus der Skizze in Abbildung 5.6 ersichtlich. Für die Messung des Schnittflächenprofils wurde die Software MarSurf XC 20 (Version 2.03-38 SP4), die Messeinrichtung Perthometer PCV und die Messnadel PCV 350 Mx  $\pm 9\ \text{mm}$  3037 (vgl. Abschnitt 5.2.1 Abbildung 5.6) der Fa. Mahr GmbH verwendet.

Eine allgemeine Klassifizierung dieser Schnittflächen, die mit den Verfahren Scher-, Messer- und Beißschneiden geschnitten wurden, ist in Abschnitt 2.1.1 ausführlich dargestellt. Diese Einteilung orientiert sich mit den für diese Arbeit relevanten Kenngrößen, welche nachfolgend aufgelistet sind, an VDI Richtlinie 2906:

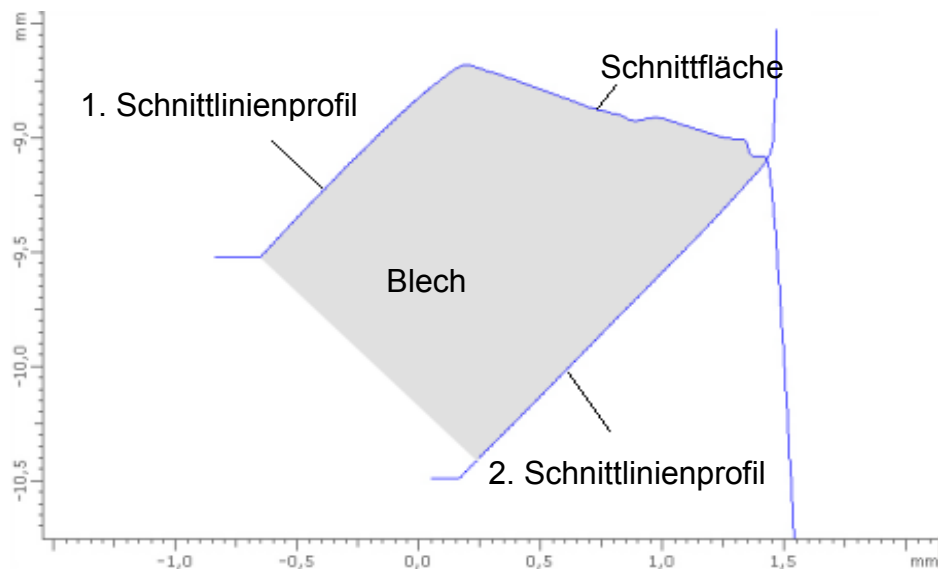


Abbildung 7.12: Schnittlinienprofil am Beispiel eines Magnesiumbleches der Blechdicke 1,25 mm

$b_E$ :	Kanteneinzugsbreite
$h_E$ :	Kanteneinziehungshöhe
$h_S$ :	(Glatt-)Schnittflächenhöhe
$h_B$ :	Bruchflächenhöhe
$\alpha_{(o/u)}$ :	Keilwinkelabdruck (= $\frac{1}{2} \alpha$ ) Ober-/Untermesser

Die jeweiligen Höhen- bzw. Breitenangaben werden prozentual zur Blechdicke  $s$  bestimmt, um eine Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Blechdicken zu erzielen. In Abschnitt 8 sind die Profile, die so generiert wurden, dargestellt.

## 7.7 Korrosionsuntersuchung

Die in den Versuchen geschnittenen Magnesiumblechteile wurden tauchkathodisch beschichtet. Die Schichtdicke beträgt 20  $\mu\text{m}$ , was dem Standard in der Automobilindustrie entspricht. In Abbildung 7.13 ist eine Beschichtungsanlage für die tauchkathodische Lackierung schematisch dargestellt. Die KTL-Beschichtung erfolgte für die bereits geschnittenen Probebleche bei der Einrichtung: Heilpädagogisches Centrum Augustinum, Werkstätte Lerchenau in München.

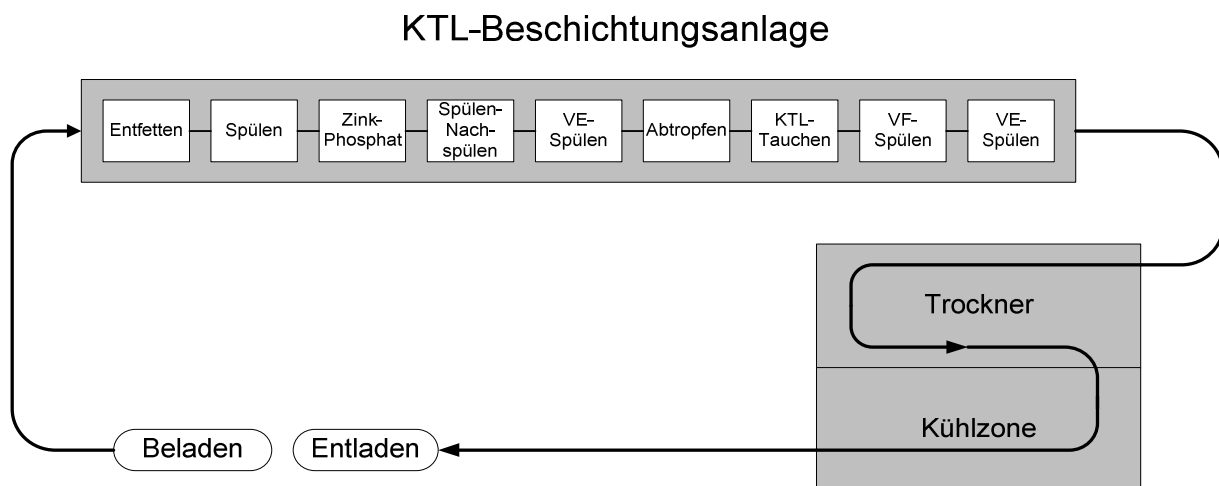


Abbildung 7.13: Schema einer tauchkathodischen KTL-Beschichtungsanlage

Die so beschichteten Magnesiumbleche wurden nachfolgend einer Korrosionsprüfung nach DIN 50021 unterzogen. Hierzu werden, wie bereits in Abschnitt 2.6 und Abschnitt 4.2.3 beschrieben, die Proben in einer Salzsprühnebelkammer unter Einfluss einer 5 %-iger NaCl-Lösung hinsichtlich ihres Korrosionsverhaltens untersucht.

In einem Zyklus, der 24 Stunden dauert, wurden Salzsprühnebeltests nach DIN 50 021 durchgeführt, um den Korrosionsfortschritt durch Kantenunterwanderung an den Proben zu ermitteln. Die Blechproben wurden derart in die Probenhalter eingesteckt, dass die Schnittkante senkrecht stand. So konnte die Testlösung ungehindert ablaufen (Abbildung 7.14).

Nach dem Durchlauf in der Salzsprühnebelkammer wurden die Proben gewaschen und getrocknet. Anschließend erfolgte gemäß DIN EN 13523-8 die Bestimmung der Unterwanderung der Lackschicht. Dazu löst man den durch Korrosion geschädigten Teil der Lackbeschichtung mit einer stumpfen Klinge. Nachfolgend wurden die Schnittproben von beiden Seiten auf Millimeterpapier liegend fotografiert und mittels manueller Messung die Unterwanderung im rechten Winkel von der Schnittkante aus bis zur nicht abgelösten Beschichtung bestimmt. Dabei wird alle 3 mm entlang der Schnittkante ein Messpunkt definiert und aus diesen Messwerten bilden sich Durchschnittswerte für die Unterwanderung der Lackschicht der einzelnen Proben.

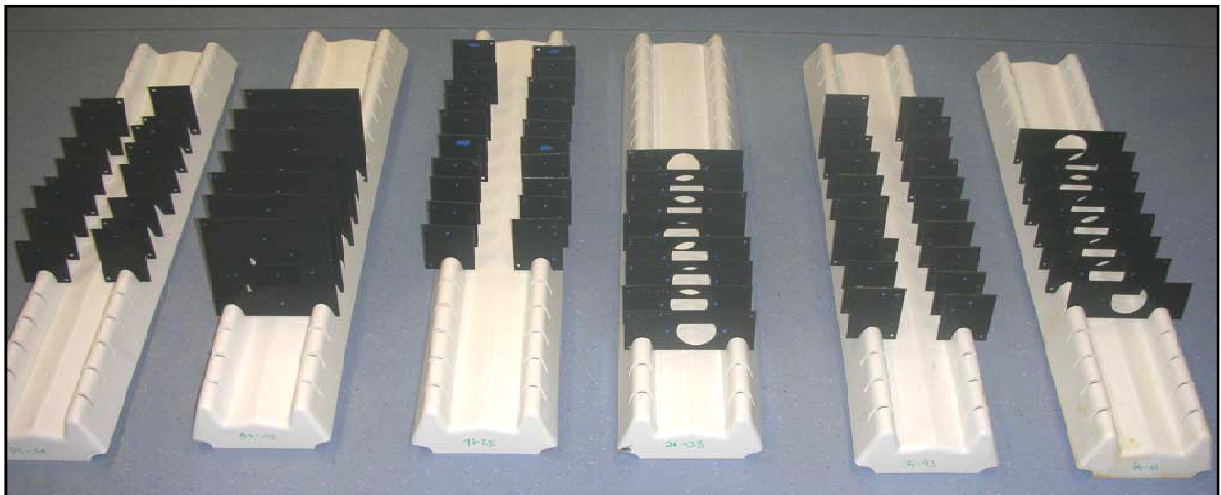


Abbildung 7.14: Korrosionsproben vor dem Salzsprühnebeltest nach DIN 50021

## 8 Versuchsergebnisse

### 8.1 Scherschneiden

#### 8.1.1 Einfluss der Schneidgeschwindigkeit

Beim Scherschneiden tritt zusätzlich zur Glattschnitt- ( $h_S$ ) und Bruchfläche ( $h_B$ ) ein Kanteneinzug ( $h_E$ ) auf, der prozentual zur Blechdicke angegeben wird. Ein Vergleich der entstandenen Schnittflächen bei unterschiedlichen Schneidgeschwindigkeiten am Beispiel der Schnittflächen in Abbildung 8.1 zeigt keinen gravierenden Einfluss dieses Parameters auf das Schneidergebnis. Das Blech wurde mit vollkantigen Stempel und einem Schneidspalt  $u = 5\%$  und  $u = 20\%$  bei offener und geschlossener Schnittlinienführung bei Raumtemperatur getrennt. Bei geschlossener und offener Schnittlinie sind die Glattschnitt- und die Bruchflächenanteile hinsichtlich des Einflusses der Schneidgeschwindigkeit vergleichbar.

		Schneidstempel vollkantig								
Schneidspalt $u$		5 %				20 %				
Schnittlinie		offen		geschlossen		offen		geschlossen		
Schneidgeschwindigkeit		30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s	
Scherschneiden	AZ31 1,25 mm	RT								
	AZ31 2,0 mm	RT								

Abbildung 8.1: Schnittflächenprofile bei unterschiedlichen Schneidgeschwindigkeiten: 30 mm/s und 90 mm/s mit Schneidspalt  $u = 5\%$  und  $u = 20\%$ , offene und geschlossene Schnittlinie bei Raumtemperatur (RT)

Daher kann angenommen werden, dass der Parameter der Schneidgeschwindigkeit im untersuchten Umfang keinen wesentlichen Einfluss auf das Schneidergebnis hat. Die Qualität der Schnittflächen wird nicht maßgeblich dadurch beeinflusst. Aufgrund der eingesetzten Versuchspresse (Abschnitt 5.1.1, Abbildung 5.1) konnten nur die Geschwindigkeiten im Bereich von 30 mm/s und 90 mm/s untersucht werden, da die Stößelgeschwindigkeit bei 100 mm/s das Maximum der einstellbaren Geschwindigkeiten erreicht hat.

### 8.1.2 Einfluss der Werkzeugkantengeometrie

In Vorversuchen wurde ein Stempel mit einer Fase von 1,20 mm x 60° untersucht. Die Schnittflächenqualität ist als sehr schlecht zu bewerten und der Einsatz eines gefasten Stempels nicht zu empfehlen. Wie in Abbildung 8.2 dargestellt, verschlechtern die durch die Fase bedingten, zusätzlich eingebrachten Zugspannungen die Schnittflächenqualität.

			Schneidstempel mit Fase 1,20 mm x 60°							
			2,5 %				5 %			
Schneidespalt u			offen		geschlossen		offen		geschlossen	
Schnittlinie			30 mm/s		90 mm/s		30 mm/s		90 mm/s	
Schneidgeschwindigkeit			30 mm/s		90 mm/s		30 mm/s		90 mm/s	
Scherschneiden	AZ31 1,25 mm	RT								
	AZ31 2,0 mm	RT								

Abbildung 8.2: Scherschneiden mit  $u = 2,5 \%$  und  $u = 5 \%$  bei Raumtemperatur, Schneidstempel mit Fase 1,20 mm x 60 mit offener und geschlossener Schnittlinie

			Schneidstempel vollkantig							
			2,5 %				5 %			
Schneidespalt u			offen		geschlossen		offen		geschlossen	
Schnittlinie			30 mm/s		90 mm/s		30 mm/s		90 mm/s	
Schneidgeschwindigkeit			30 mm/s		90 mm/s		30 mm/s		90 mm/s	
Scherschneiden	AZ31 1,25 mm	RT								
	AZ31 2,0 mm	RT								

Abbildung 8.3: Scherschneiden mit  $u = 2,5 \%$  und  $u = 5 \%$  bei Raumtemperatur, Schneidstempel vollkantig mit offener und geschlossener Schnittlinie

Im Vergleich zu einem vollkantigen Stempel (Abbildung 8.3 und 8.4) ist bei einem Stempel mit Fase für kleine Schneidspalte mit  $u = 2,5 \%$  und  $u = 5 \%$  kein zufriedenstellendes Ergebnis der Schnittflächenqualität zu erreichen. Aufgrund der schlechten Ergebnisse beim Scherschneiden mit Fase wurden die weiteren Untersuchungen mit einem vollkantigen Schneidstempel durchgeführt.

		Schneidstempel vollkantig								
Schneidespalt u		10 %				20 %				
Schnittlinie		offen		geschlossen		offen		geschlossen		
Schneidgeschwindigkeit		30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s	
Scherschneiden	AZ31 1,25 mm	RT								
	AZ31 2,0 mm	RT								

Abbildung 8.4: Scherschneiden mit  $u = 10\%$  und  $u = 20\%$  bei Raumtemperatur, Schneidstempel vollkantig mit offener und geschlossener Schnittlinie

### 8.1.3 Einfluss des Schneidspaltes

Ein Vergleich der untersuchten Schneidspalte am Beispiel der Schnittflächen bei vollkantigen Schneidstempel in den Abbildungen 8.3 und 8.4 zeigt, dass ein sehr großer Schneidspalt nicht von Vorteil ist. Aus Abbildung 8.5 wird ersichtlich, dass auf Grund des geringsten Kanteneinzugs und der geringsten Bruchfläche  $h_B$  die Schneidspalte mit  $u$  von 2,5 % -5 % zu bevorzugen sind. Da bei einem Schneidspalt kleiner 5% die Genauigkeit der Werkzeugeinstellungen der limitierende Faktor sind, wird in der weiteren Diskussion der Ergebnisse beim Scherschneiden der Schneidspalt  $u = 5\%$  betrachtet. Im Rahmen des Versuchsplans wurden unterschiedliche Schnittlinienführungen untersucht. In Abschnitt 7.1 sind diese genau beschrieben und schematisch dargestellt. In Abbildung 8.5 sind für die untersuchten Schneidspalte exemplarische Schnittflächenprofile für eine offene und geschlossene Schnittlinienführung dargestellt.

		Schneidstempel vollkantig								
Schneidespalt u		2,5%		5%		10%		20%		
Schnittlinie		offen	ge- schlossen	offen	ge- schlossen	offen	ge- schlossen	offen	ge- schlossen	
Schneidgeschwindigkeit		30mm/s	30mm/s	30mm/s	30mm/s	30mm/s	30mm/s	30mm/s	30mm/s	
Scherschneiden	AZ31 1,25 mm	RT								
	AZ31 2,0 mm	RT								

Abbildung 8.5: Schnittflächenprofile beim Scherschneiden von AZ31 mit einem Schneidspalt  $u = 2,5\%$  bis  $u = 20\%$  für die Blechdicken 2,00 mm und 1,25 mm im offenen und geschlossenen Schnitt mit 30 mm/s Schneidgeschwindigkeit bei Raumtemperatur (RT)



Mit zunehmenden Schneidspalt  $u$  erhöht sich die Einzugshöhe  $h_E$  und die makroskopische Rauheit der Bruchfläche  $h_B$ , was auf die zunehmenden maximalen Spannungen durch das höhere Biegemoment an der Schneidkante zurückzuführen ist. Ein Schneidspalt von 20 % führt zu einem sehr großen Kanteneinzug und während des Schneidens wird das Material durch ein massives Abscheren getrennt. Dieses Abscheren verursacht die einem Grat ähnelnde Materialanhäufung an der Unterseite, wie sie in Abbildung 8.5 beim geschlossenen Schnitt zu erkennen ist. Dieser Sekundärglattschnittanteil wird als „Verschmieren“ bezeichnet. Bei der hier entstandenen getrennten Fläche kann daher nicht mehr von einer Schnitt- bzw. Bruchfläche  $h_B$  gesprochen werden. Mit steigendem Schneidspalt  $u$  entstehen, insbesondere bei einer offenen Schnittlinienführung, wesentlich höhere Scher- und Zugspannungen, die bei Raumtemperatur zu einem extrem spröden Bruchverhalten führen und somit nicht geeignet sind für das Trennen von Magnesiumknetlegierungen. Ein sehr großer Schneidspalt von 20 % ist aus diesem Grund für Magnesiumblechwerkstoffe zu meiden [BOLU02].

Um eine quantitative Aussage zur Schnittflächenqualität machen zu können, ist in Abbildung 8.6 und 8.7 der prozentuale Glattschnittanteil  $h_S$ , die Bruchfläche  $h_B$  und der Kanteneinzug  $h_E$  dargestellt. Aufgetragen ist der Mittelwert aus drei geschnittenen Proben. Je kleiner der Schneidspalt  $u$  ist, desto weniger Zugspannungen treten auf. Im Falle der Magnesiumlegierung AZ31, die bei Raumtemperatur aufgrund der Gitterstruktur sehr spröde bricht, ist daher ein möglichst kleiner Schneidspalt  $u$  zu wählen. In den nachfolgenden Auswertungen (Abbildung 8.6 und 8.7) ist jeweils eine offene und eine geschlossene Schnittlinienführung dargestellt. Die Schnittflächen sind für eine geschlossene Schnittlinienführung qualitativ besser zu bewerten, aufgrund des höheren Glattschnittanteiles für die Schneidspalte  $u = 2,5\%$  sowie  $u = 5\%$  und  $u = 10\%$ . Dies ist damit zu begründen, dass, wie auch nachfolgend in Abschnitt 8.5, Abbildung 8.50 zu sehen ist, die Spannungsverteilung während des Schneidprozesses im geschlossenen Schnitt homogen verteilt ist. Es treten somit keine lokalen Spannungsspitzen auf, die einen vorzeitigen lokalen Bruch erzeugen [HOOG99], [BOLU02].

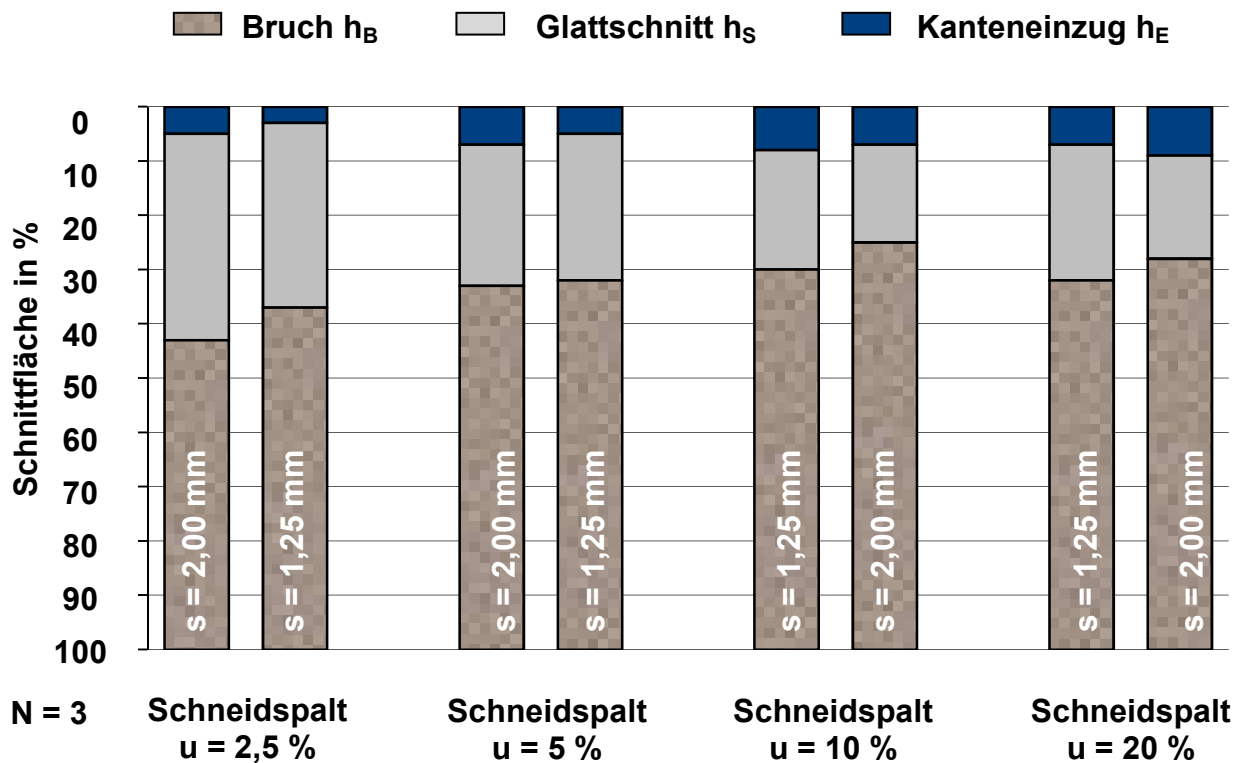


Abbildung 8.6: Schnittflächenqualität für Schneidspalte  $u = 2,5\%$  bis  $20\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur

Im nachfolgenden Abschnitt 8.2 ist dieser Effekt für negative Schneidspalte reproduzierbar dargestellt. Somit kann davon ausgegangen werden, dass eine geschlossene Schnittlinie in jedem Fall ein besseres Ergebnis bezüglich der Schnittflächenqualität liefert. Dies ist prozessbedingt und lässt sich nicht durch die Schneidparameter beeinflussen. In Abbildung 8.7 wird diese Erkenntnis quantitativ bestätigt. Die Tendenz eines höheren Glattschnittanteiles  $h_s$  ist unabhängig von der Temperatur gegeben.

In untenstehender Abbildung 8.7 sind die Ergebnisse für die Schneidspalte  $u = 2,5\%$  bis  $20\%$  bei Raumtemperatur und geschlossen Schnitt dargestellt.

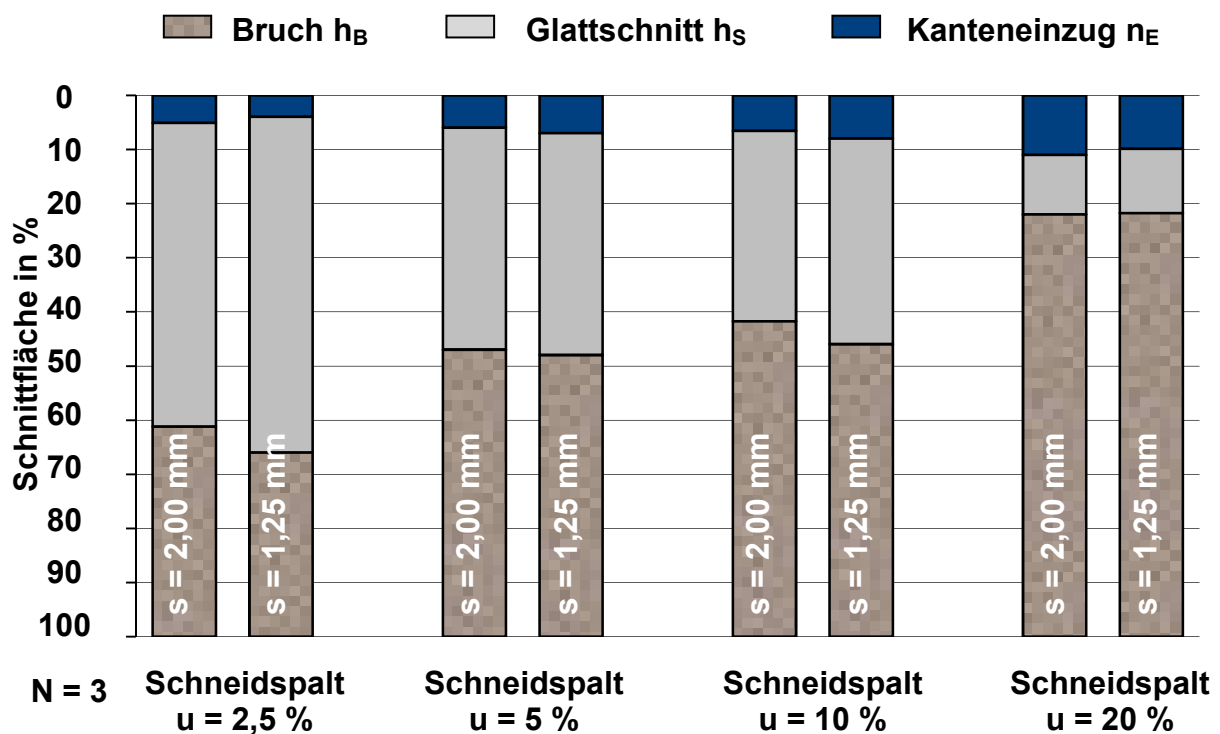


Abbildung 8.7: Schnittflächenqualität für Schneidspalte  $u = 2,5\%$  bis  $20\%$  beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur

In Abbildung 8.9 und 8.11 sind für die untersuchten Blechdicken der Magnesiumknetlegierung AZ31 und die auf die Schnittlinienlänge und Blechdicke normierten Schneidkraftbedarfe  $F_S$  mit steigendem Schneidspalt  $u$  aufgetragen (Abschnitt 7.3.2). In der Darstellung ist der Schneidkraftbedarf  $F_S$  für den offenen Schnitt (Abbildung 8.9) und den geschlossenen Schnitt (Abb. 8.11) dargestellt. Für eine offene und geschlossene Schnittlinienführung ist der Schneidkraftbedarf tendenziell vergleichbar. Der Einfluss auf den Schneidspalt  $u$  ist nicht signifikant, jedoch sinkt die bezogene Schneidkraft mit zunehmendem Schneidspalt  $u$  [TIMM56], [HOOG99].

Der Schneidkraftbedarf zeigt jedoch einen Unterschied in den verschiedenen Blechdicken. Es ist in Abbildung 8.9 und 8.11 deutlich zu sehen, dass das Material der Blechdicke  $s = 1,25$  mm einen höheren normierten Schneidkraftbedarf  $F_S$  aufweist. Beim Vergleich des bezogenen Schneidwiderstand  $c$  beider Werkstoffe (Abb. 8.8 und Abb. 8.10) wird diese Tendenz bestätigt.

	u= 2,5 %	u= 5 %	u= 10 %	u= 20 %
<b>AZ31 1,25 mm</b>	0,72	0,67	0,63	0,64
<b>AZ31 2,00 mm</b>	0,61	0,59	0,59	0,57

Abbildung 8.8: Bezogener Schneidwiderstand  $c$  für unterschiedliche Schneidspalte  $u = 2,5\%$  bis  $20\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT)

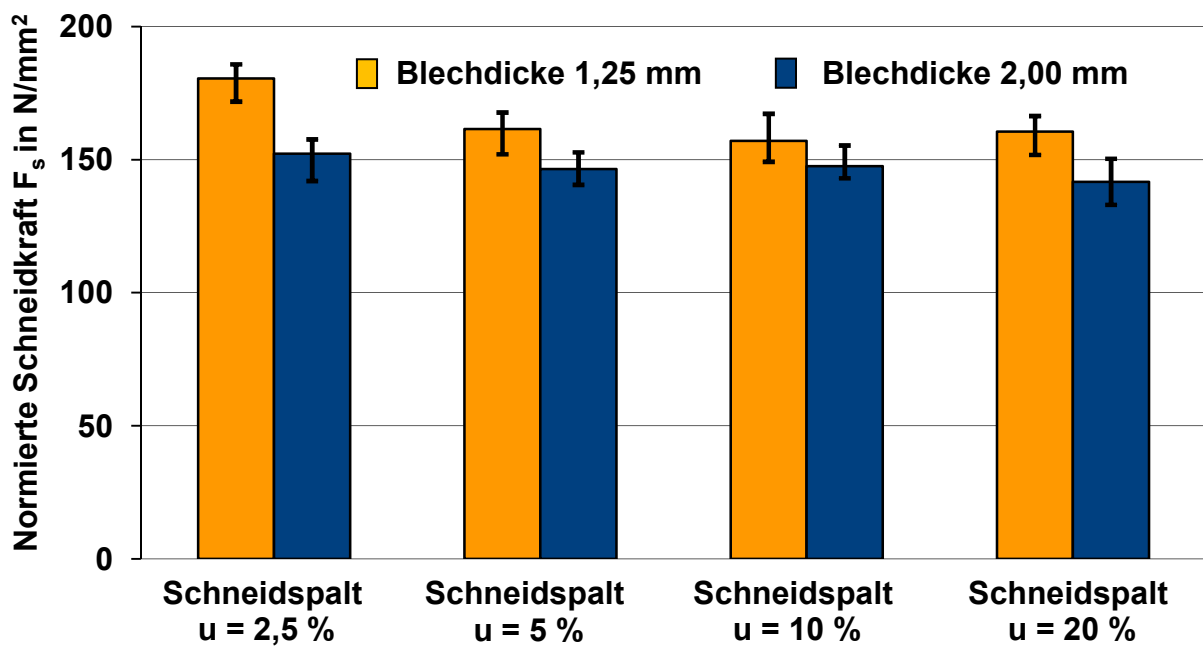


Abbildung 8.9: Normierte Schneidkraft  $F_s$  für unterschiedliche Schneidspalte  $u = 2,5\%$  bis  $20\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT)

	u= 2,5 %	u= 5 %	u= 10 %	u= 20 %
<b>AZ31 1,25 mm</b>	0,65	0,63	0,63	0,61
<b>AZ31 2,00 mm</b>	0,60	0,60	0,56	0,57

Abbildung 8.10: Bezogener Schneidwiderstand  $c$  für unterschiedliche Schneidspalte  $u = 2,5\%$  bis  $20\%$  beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT)

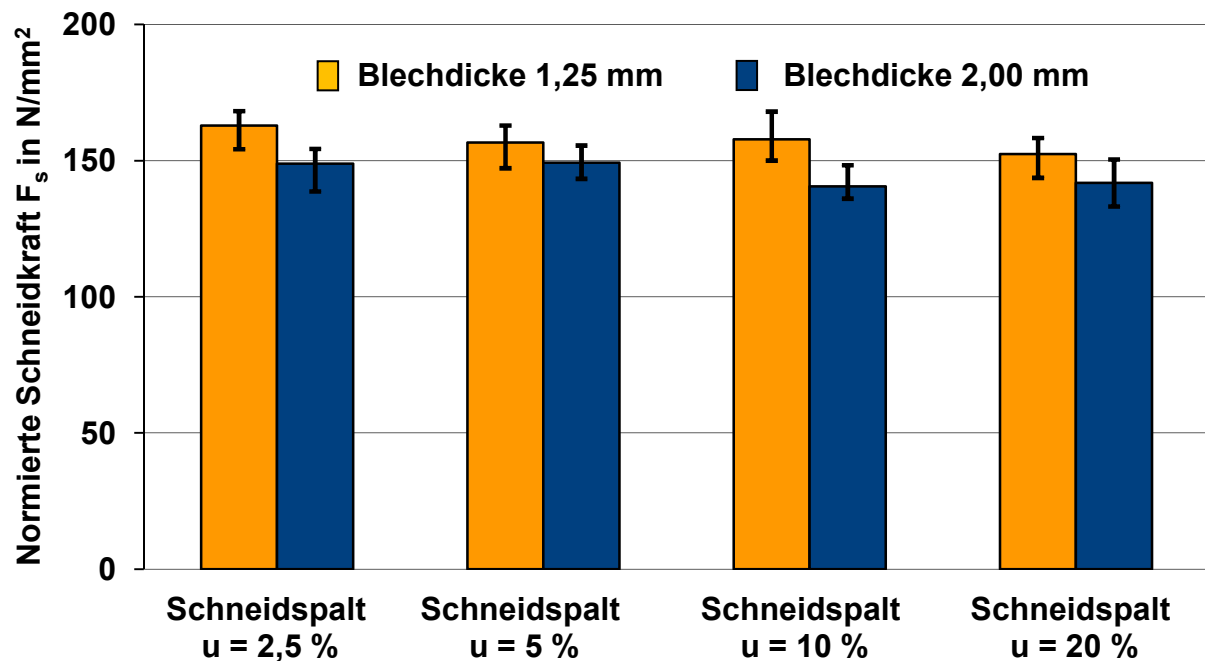


Abbildung 8.11: Normierte Schneidkraft  $F_S$  für unterschiedliche Schneidspalte  $u = 2,5 \%$  bis  $20 \%$  beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT)

#### 8.1.4 Einfluss der Prozesstemperatur

Einen noch stärkeren Einfluss auf die Schnittflächenqualität als der auf die Blechdicke bezogene Schneidspalt  $u$  nimmt die Temperatur während des Schneidevorgangs. In den Abbildungen 8.14 und 8.15 ist deutlich zu erkennen, dass mit zunehmender Temperatur die Glattschnitthöhe  $h_S$  zu- und die Bruchhöhe  $h_B$  abnehmen. Der Kanteneinzug bleibt dabei nahezu identisch. Dieses Verhalten ist mit den in Kapitel 5 beschriebenen Eigenschaften der Magnesiumknetlegierung AZ31 zu begründen. Bei Raumtemperatur ist das Verhalten der Magnesiumwerkstoffe sehr spröde, was zu einem geringen Glattschnittanteil  $h_S$  und einem hohen Bruchflächenanteil  $h_B$  führt.

Ab einer Temperatur von circa  $225 \text{ }^\circ\text{C}$  stehen bei der Magnesiumknetlegierung AZ31 zusätzliche Gleitebenen zur Verfügung (vgl. Abschnitt 2.4). Ein duktileres Werkstoffverhalten ist jedoch bereits ab circa  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  festzustellen, was zur signifikanten Verbesserung der Schnittflächenqualität führt [SIEB01], [HOOG99], [DROE99], [HÄUS06].

In der untenstehenden Abbildung 8.13 ist der werkstoffentfestigende Effekt mit zunehmender Temperatur anhand des Schneidkraftbedarfes  $F_S$  zu erkennen. Mit zunehmender Temperatur sinkt die Schneidkraft  $F_S$ , da sich die Fließeigenschaften der Magnesiumlegierung AZ31 mit steigender Temperatur verbessern. Der bezogene Schneidwiderstand  $c$  verringert sich mit zunehmender Temperatur (Abbildung 8.12). Eine hohe Temperatur während des Schneidvorganges ist daher von Vorteil zur Verbesserung der Schnittflächenqualität. Zur Verdeutlichung sind in Abbildung 8.14 die Schnittflächenprofile für unterschiedliche Temperaturen (Raumtemperatur (RT) bis 250 °C) dargestellt.

	RT	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C
<b>AZ31 1,25 mm</b>	0,59	0,56	0,54	0,51	0,48
<b>AZ31 2,00 mm</b>	0,65	0,63	0,59	0,57	0,56

Abbildung 8.12: Bezogener Schneidwiderstand  $c$  für unterschiedliche Temperaturen mit einem Schneidspalt  $u = 5\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden

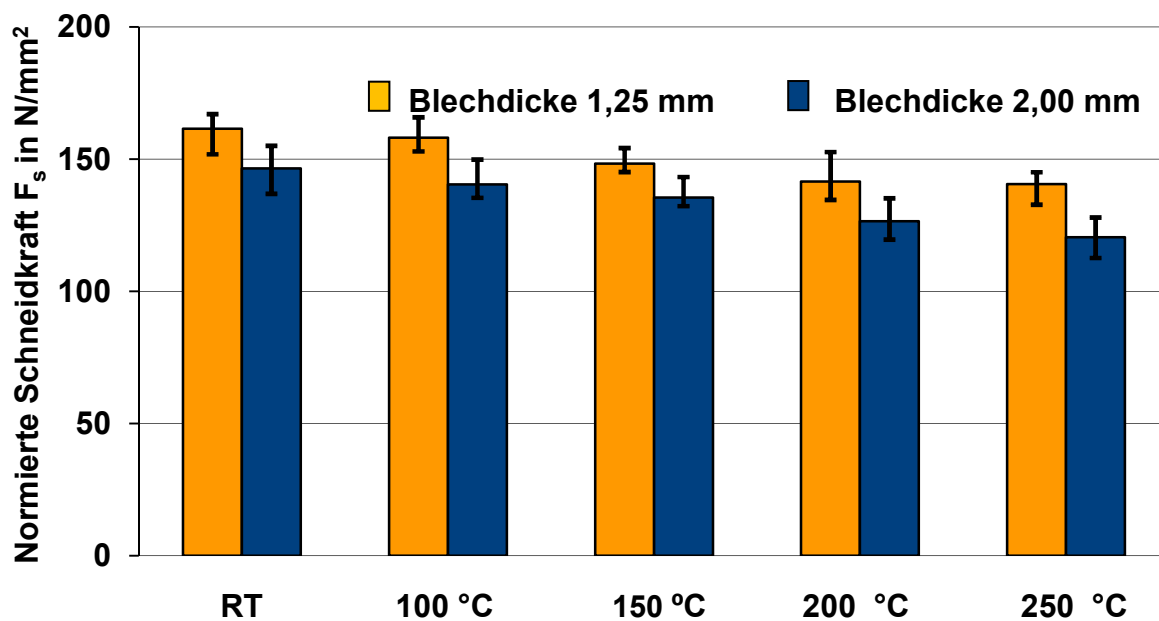


Abbildung 8.13: Normierte Schneidkraft  $F_S$  für unterschiedliche Temperaturen mit einem Schneidspalt  $u = 5\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden

Schneidstempel vollkantig									
Schneidespalt u		2,5 %		5 %		10 %		20 %	
Schnittlinie		offen	ge- schlossen	offen	ge- schlossen	offen	ge- schlossen	offen	ge- schlossen
Schneidgeschwindigkeit		30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s
Scherschneiden	AZ31 1,25 mm	RT							
	AZ31 2,0 mm	RT							
Schneidstempel vollkantig									
Schneidespalt u		2,5 %		5 %		10 %		20 %	
Schnittlinie		offen	ge- schlossen	offen	ge- schlossen	offen	ge- schlossen	offen	ge- schlossen
Schneidgeschwindigkeit		30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s
Scherschneiden	AZ31 1,25 mm	100 °C							
	AZ31 2,0 mm	100 °C							
Schneidstempel vollkantig									
Schneidespalt u		2,5 %		5 %		10 %		20 %	
Schnittlinie		offen	ge- schlossen	offen	ge- schlossen	offen	ge- schlossen	offen	ge- schlossen
Schneidgeschwindigkeit		30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s
Scherschneiden	AZ31 1,25 mm	150 °C							
	AZ31 2,0 mm	150 °C							
Schneidstempel vollkantig									
Schneidespalt u		2,5 %		5 %		10 %		20 %	
Schnittlinie		offen	ge- schlossen	offen	ge- schlossen	offen	ge- schlossen	offen	ge- schlossen
Schneidgeschwindigkeit		30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s
Scherschneiden	AZ31 1,25 mm	200 °C							
	AZ31 2,0 mm	200 °C							
Schneidstempel vollkantig									
Schneidespalt u		2,5%		5 %		10 %		20 %	
Schnittlinie		offen	ge- schlossen	offen	ge- schlossen	offen	ge- schlossen	offen	ge- schlossen
Schneidgeschwindigkeit		30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s
Scherschneiden	AZ31 1,25 mm	250 °C							
	AZ31 2,0 mm	250 °C							

Abbildung 8.14: Schnittflächenprofile beim Scherschneiden von AZ31 bei einer offenen und einer geschlossenen Schnittlinienführung für die Blechdicken 2,00 mm und 1,25 mm für unterschiedlichen Schneidspalte  $u = 2,5 \%$  bis  $u = 20 \%$  bei  $T = RT$  bis  $250 \text{ °C}$

Durch die Kombination der jeweils erhaltenen Ergebnisse lässt sich eine optimale Schnittfläche durch eine geschlossene Schnittlinie mit einem Schneidspalt von  $u = 5\%$  bis  $10\%$  und bei einer Temperatur ab  $100\text{ °C}$  erreichen. Die Schnittflächen sind zufriedenstellend bei Raumtemperatur unter Beachtung des Schneidspaltes  $u$  und der Schnittlinienführung. Wird der Schneidprozess jedoch unter erhöhten Temperaturen ab  $100\text{ °C}$  durchgeführt, verbessert sich das Ergebnis signifikant gegenüber Raumtemperatur.

Im Vergleich zu Abbildung 8.6 ist der Glattschnittanteil  $h_S$  in Abbildung 8.15 bei sonst gleichen Schneidparametern mit circa 25 bis 38 % deutlich besser.

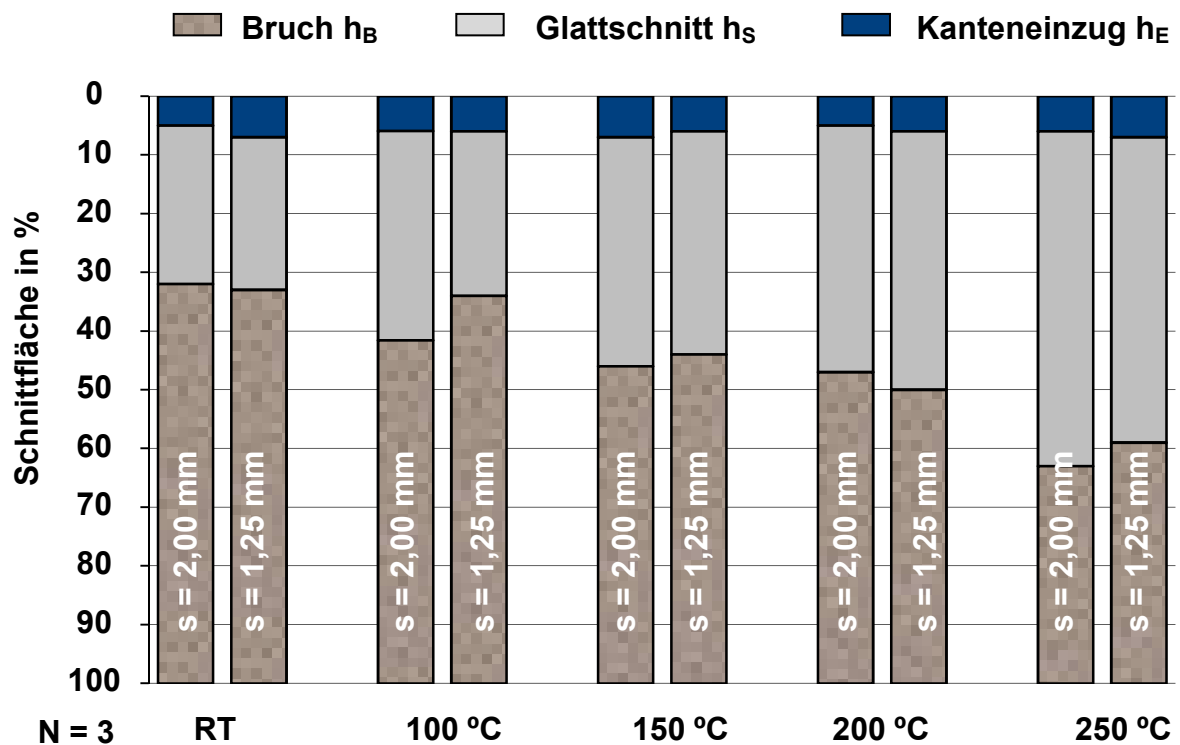


Abbildung 8.15: Schnittflächenqualität bei unterschiedlichen Temperaturen beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit  $u = 5\%$

## 8.2 Scherschneiden mit negativem Schneidspalt

Wie bereits einleitend in Abschnitt 2.1 und 2.4 beschrieben, zeichnen sich Magnesiumwerkstoffe durch ihre besondere Gitterstruktur und die sehr hohe Stapelfehlerenergie bedingt durch die sogenannte Zwillingsbildung aus. Diese



Besonderheit kann von Vorteil sein für das Umformverhalten, aber ebenso für den Trennprozess. Nachfolgend wird beschrieben, wie dieser Effekt in dem Verfahren des Scherschneidens bei gleichzeitiger Steigerung der Schnittflächenqualität eingesetzt werden kann.

### **8.2.1 Zwillingsbildung**

Aufgrund des in Abschnitt 2.4 und 6.1ff beschriebenen Werkstoffverhaltens der Magnesiumknetlegierung AZ31 ist die Zwillingsbildung ein wichtiger Aspekt, der insbesondere beim Schneiden genutzt werden kann. Aufgrund von Scher- und Druckspannungen wird die Zwillingsbildung induziert. Neben dem kristallographischen Gleiten besteht dadurch die Möglichkeit, eine plastische Verformung hervorzurufen. Dadurch ist insbesondere bei Raumtemperatur ein erhöhtes plastisches Umformvermögen zu erwarten. Die Zwillingsbildung erfolgt vorzugsweise bei niedrigen Temperaturen auf den pyramidalen Ebenen. Da das  $c/a$ -Verhältnis (vgl. Abschnitt 2.4, Abb. 2.13) der Atome kleiner als der ideale Wert ist, ist eine Zwillingsbildung bei wirkenden Spannungen parallel zu diesen Ebenen nur unter Druckbeanspruchung möglich, bei Spannungen senkrecht zu diesen Ebenen nur unter Zugbeanspruchungen. Dies ist der Grund, warum texturierte Magnesiumwerkstoffe, wie hier die Legierung AZ31, Unterschiede in der Streckgrenze unter Zug- bzw. Druckbeanspruchungen aufweisen. Die Zwillingsbildung liefert somit neben der Versetzungsbewegung einen Anteil zur plastischen Verformung bei Raumtemperatur [BARN07], [KAMM00], [TOMA91].

### **8.2.2 Einfluss des negativen Schneidspaltes**

Aufgrund der beschriebenen Zwillingsbildung ist bei der Legierung AZ31 ein negativer Schneidspalt zur Steigerung des Glattschnittanteiles  $h_s$  zu bevorzugen. Des Weiteren ist für spröde Metalle die Scherbeanspruchung während des Schneidvorgangs möglichst gering zu halten. Aus diesem Grund empfiehlt es sich, einen negativen Schneidspalt zu wählen. Anhand des in Abbildung 8.16 aufgetragen bezogene Schneidwiderstand  $c$  zeigt ein negativer Schneidspalt  $u = -5 \%$  keinen höheren bezogene Schneidwiderstand  $c$  im Vergleich zu einem Schneidspalt  $u = 5 \%$  (Abbildung 8.8 und 8.16) für einen geschlossenen Schnitt. Der Schneidkraftbedarf ist

vergleichbar zu Scherschneiden mit positivem Schneidspalt ( $u = 5\%$ ) bei wesentlich besseren Schnittflächen (Abb. 8.21 und Abb. 8.22). Beim offenen Schnitt mit einem negativen Schneidspalt  $u = -10\%$  hingegen entstehen sehr hohe Kräfte (Abbildung 8.17), was sich jedoch beim geschlossenen Schnitt mit einem Schneidspalt  $u = -10\%$  nicht zeigt. Dies zeigt sich auch in dem bezogenen Schneidwiderstand  $c$  (Abbildungen 8.8 und 8.16).

	offen $u = -5\%$	offen $u = -10\%$	geschlossen $u = -5\%$	geschlossen $u = -10\%$
<b>AZ31 1,25 mm</b>	1,73	4,27	0,66	0,89
<b>AZ31 2,00 mm</b>	1,39	4,87	0,62	0,79

Abbildung 8.16: Bezogener Schneidwiderstand  $c$  für unterschiedliche Schneidspalte  $u = -5\%$  und  $u = -10\%$  beim offenen und geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden

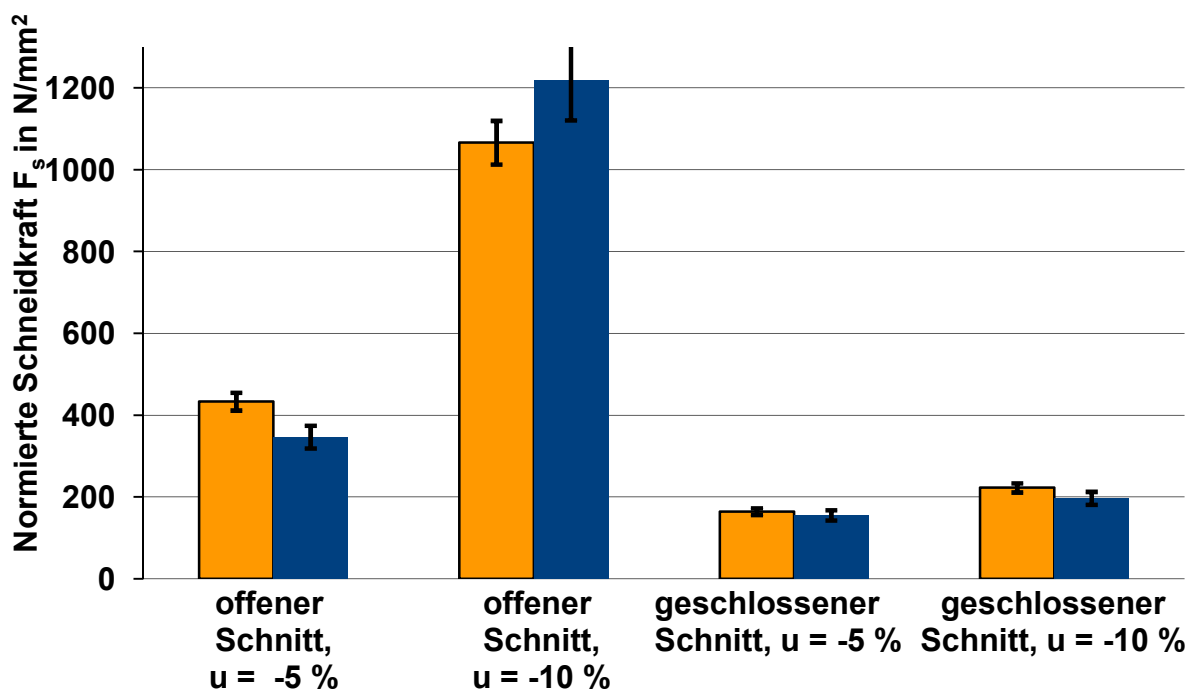


Abbildung 8.17: Normierte Schneidkraft  $F_s$  für unterschiedliche Schneidspalte  $u = -5\%$  und  $u = -10\%$  beim offenen und geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden

Die Schnittflächenqualität (Abbildungen 8.18 und 8.21) ist für alle untersuchten negativen Schneidspalte für eine offene und eine geschlossene Schnittlinie bei

Raumtemperatur mit einem sehr hohen Glattschnittanteil  $h_S$  als äußerst positiv zu bewerten. Nachfolgend in Abbildung 8.18 ist dies prozentual für eine offene und geschlossene Schnittlinienführung für die negativen Schneidspalte  $u = -5\%$  und  $u = -10\%$  dargestellt.

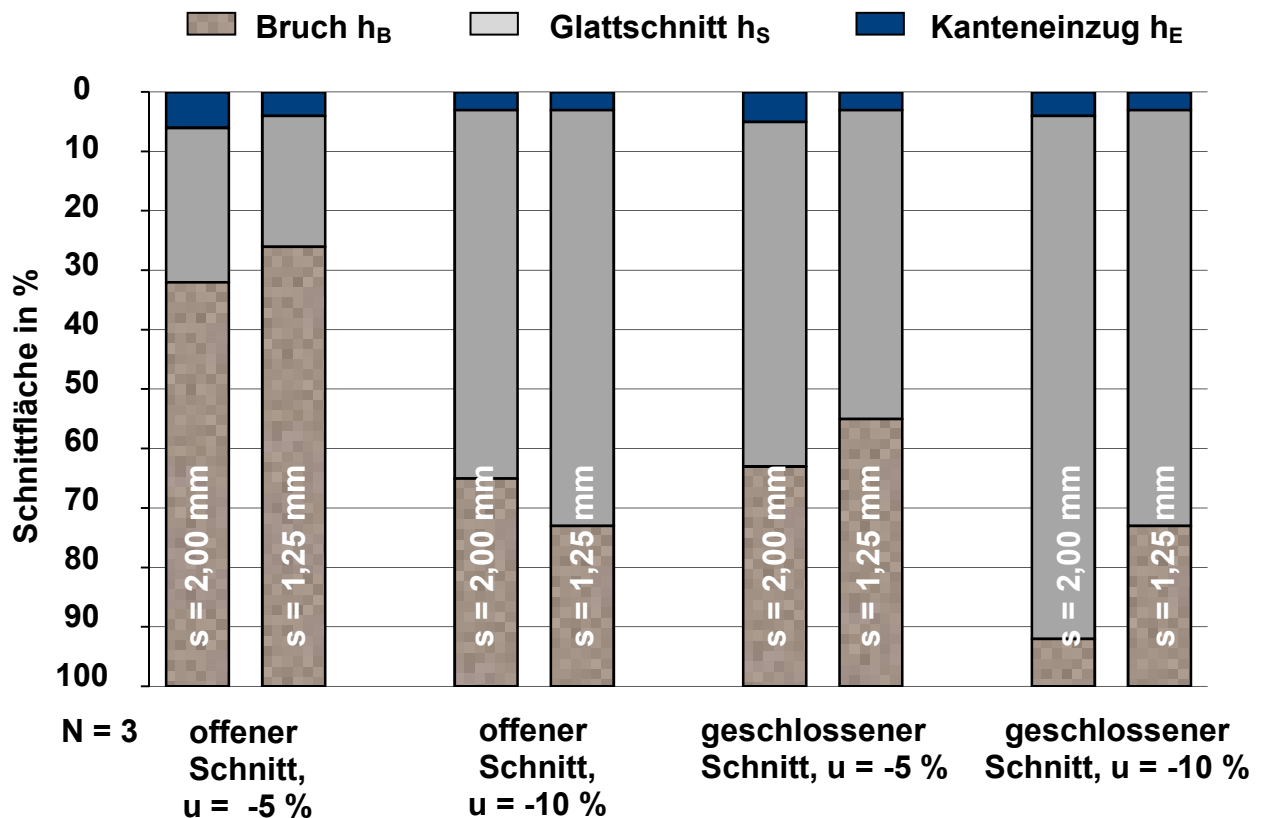


Abbildung 8.18: Schnittflächenqualität für unterschiedliche Schneidspalte  $u = -5\%$  und  $u = -10\%$  beim offenen und geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden

### 8.2.3 Einfluss der Prozesstemperatur

In Abschnitt 8.2.2 wird aus den Abbildung 8.17 und 8.18 deutlich, dass ein negativer Schneidspalt  $u = -5\%$  bei einer geschlossenen Schnittlinienführung zu bevorzugen ist. Zur Untersuchung des Einflusses der Temperatur (Abbildungen 8.21 und 8.22) wird aus diesem Grund eine geschlossene Schnittlinie mit einem Schneidspalt  $u = -5\%$  näher betrachtet. Die in Abbildung 8.19 aufgetragenen bezogenen Schneidwiderstände  $c$  bestätigen die Tendenz zur Reduzierung der Schneidkraft  $F_S$  (Abbildung 8.20) mit zunehmender Temperatur.

	RT	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C
<b>AZ31 1,25 mm</b>	0,66	0,62	0,59	0,57	0,58
<b>AZ31 2,00 mm</b>	0,62	0,59	0,57	0,52	0,51

Abbildung 8.19: Bezogener Schneidwiderstand  $c$  für unterschiedliche Temperaturen mit einem Schneidspalt  $u = -5\%$  beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden

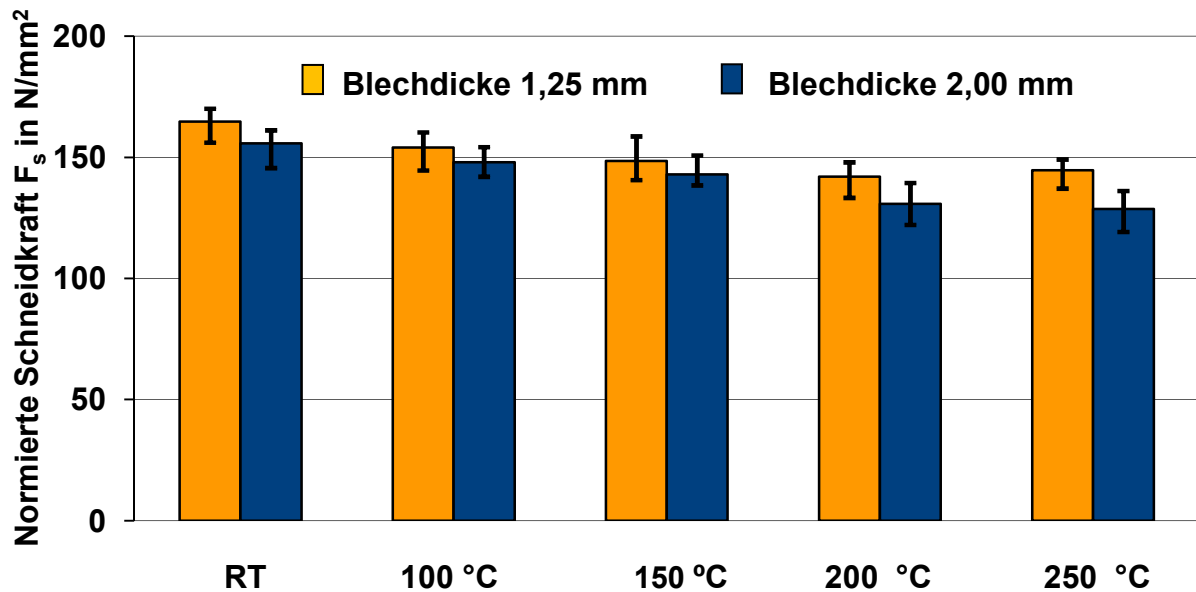


Abbildung 8.20: Normierte Schneidkraft  $F_s$  für unterschiedliche Temperaturen mit einem Schneidspalt  $u = -5\%$  beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden

Aufgrund des in Abbildung 8.21 dargestellten prozentualen Glattschnittanteils  $h_s$  ist ein negativer Schneidspalt zu bevorzugen. Es kann damit bei Raumtemperatur ein Glattschnittanteil  $h_s$  von bis zu 90 % (Abbildung 8.18) bezogen auf die Blechdicke  $s$  erreicht werden. In Abbildung 8.21 ist das Ergebnis für einen Schneidspalt mit  $u = -5\%$  für eine geschlossene Schnittlinienführung aufgetragen. Mit zunehmender Temperatur können die Effekte weiter verbessert werden. Insbesondere mit geschlossener Schnittlinie (Abbildung 8.21) sind extrem hohe Glattschnittflächenanteile erzielbar.

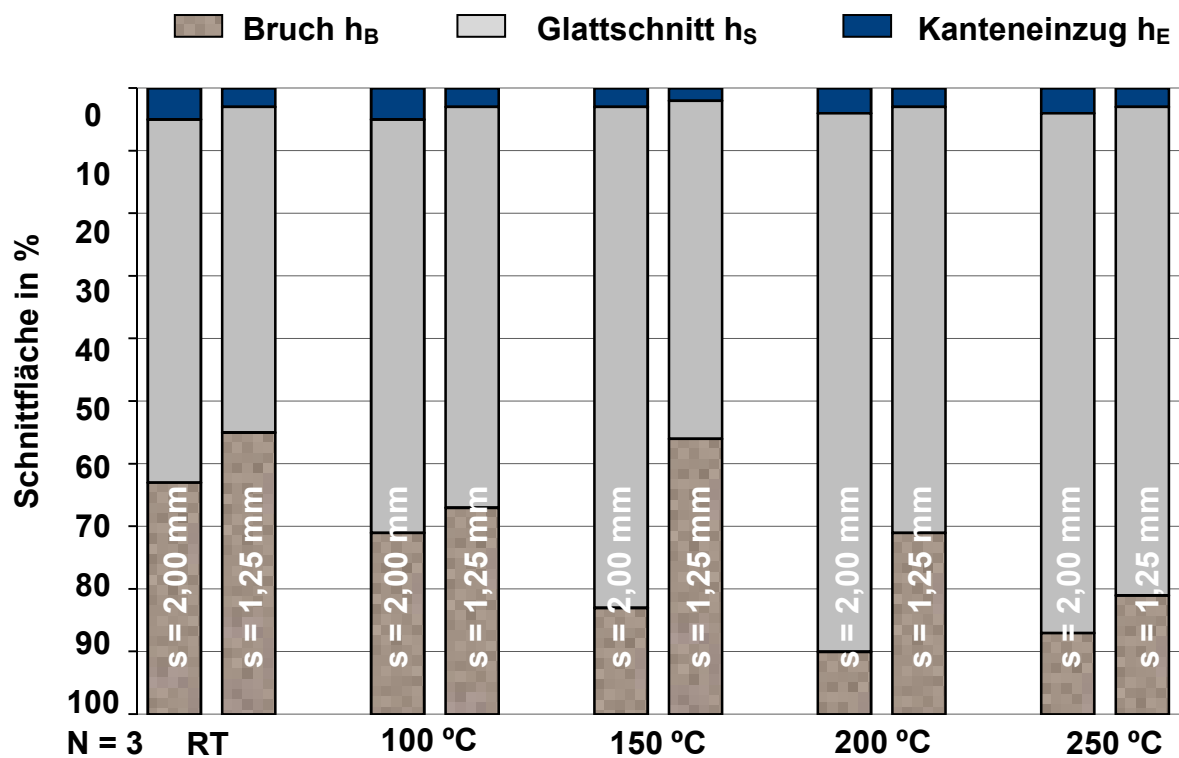


Abbildung 8.21: Schnittflächenqualität für unterschiedliche Temperaturen beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden mit negativem Schneidspalt  $u = -5\%$

Zusammenfassend ist festzustellen, dass insbesondere für ein sprödes Material, wie es die Magnesiumlegierung AZ31 ist, mittels negativen Schneidspaltes auch bei Raumtemperatur sehr gute Schnittflächen erzeugt werden können. In der folgenden Abbildung 8.22 sind die Schnittflächen für beide Schneidspalte ( $u = -5\%$  und  $u = 10\%$ ) für alle untersuchten Temperaturen im offen und geschlossenen Schnitt dargestellt.

		Schneidstempel vollkantig				
		-5 %		-10 %		
		offen	geschlossen	offen	geschlossen	
Schneidspalt u (negativ)						
Schnittlinie	30 mm/s		30 mm/s			
Schneidgeschwindigkeit	30 mm/s		30 mm/s			
Scherschneiden	AZ31 1,25 mm	RT				
	AZ31 2,0 mm	RT				
	AZ31 1,25 mm	100 °C				
	AZ31 2,0 mm	100 °C				
	AZ31 1,25 mm	150 °C				
	AZ31 2,0 mm	150 °C				
	AZ31 1,25 mm	200 °C				
	AZ31 2,0 mm	200 °C				
	AZ31 1,25 mm	250 °C				
	AZ31 2,0 mm	250 °C				

Abbildung 8.22: Schnittflächenprofile für unterschiedliche Temperaturen beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit negativem Schneidspalt  $u = -5\%$  und  $u = -10\%$

### 8.3 Keilschneidverfahren

Die Keilschneidverfahren stellen eine Besonderheit dar, da sie für metallische Werkstoffe lediglich im Bereich der Gusswerkstoffe untersucht wurden [RICK07]. In dem einführenden Abschnitt 2.3 werden diese Schneidverfahren ausführlich dargestellt. Nachfolgend aufgeführt werden diese Verfahren, zu denen das Messer-

und Beißschneiden gehören, für die Magnesiumlegierung AZ31 experimentell untersucht und die Schnittflächen qualitativ analysiert.

### 8.3.1 Messerschneiden

Dieser Abschnitt beschreibt die Ergebnisse eines weiteren untersuchten Schneidverfahrens, welches den Keilschneidverfahren untergeordnet ist, dem sogenannten Messerschneiden. Hier wurden sechs (offener Schnittlinienführung) und vier (geschlossene Schnittlinienführung) verschiedene Werkzeugaktivelemente mit unterschiedlichen Keilwinkeln  $\alpha$  (symmetrisch) und  $\beta$  (asymmetrisch), wie in Abschnitt 2.3 und 7.41 beschrieben, verwendet. Dabei zeigte sich, dass asymmetrische Keilwinkel  $\beta$  durch die asymmetrische Belastung sehr anfällig für Beschädigungen am Werkzeug sind und die Schnittflächen bereits im ersten Vergleich zu den mit symmetrischen Keilwinkeln geschnittenen Blechen qualitativ schlechter ausfallen (Abbildungen 8.29 und 8.30). Daher wird im Folgenden nicht mehr explizit auf asymmetrische Keilwinkel eingegangen.

#### 8.3.1.1 Einfluss der Schneidgeschwindigkeit

Wie beim Scherschneiden (Abschnitt 8.1.1) ist auch für das Messerschneiden der Einfluss der Schneidgeschwindigkeit auf das Schneidergebnis irrelevant. In der folgenden Abbildung 8.23 sind für die symmetrischen Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$  und  $\alpha = 30^\circ$ , für die beiden untersuchten Schneidgeschwindigkeiten 30 mm/s und 90 mm/s für eine offene und geschlossene Schnittlinienführung dargestellt.

Keilwinkel $\alpha$			symmetrisch $25^\circ$				symmetrisch $30^\circ$			
Schnittlinie			offener Schnitt		geschlossener Schnitt		offener Schnitt		geschlossener Schnitt	
Schneidgeschwindigkeit			30mm/s	90mm/s	30mm/s	90mm/s	30mm/s	90mm/s	30mm/s	90mm/s
Messerschneider	AZ31 1,25 mm	RT								
	AZ31 2,0 mm	RT								

Abbildung 8.23: Schnittflächenprofile bei unterschiedlichen Schneidgeschwindigkeiten: 30 mm/s und 90 mm/s mit Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$  und  $\alpha = 30^\circ$  für offene und geschlossene Schnittlinie bei Raumtemperatur (RT) beim Messerschneiden

### 8.3.1.2 Variation des Keilwinkels

Die Variation des Keilwinkels übt einen großen Einfluss auf das qualitative Ergebnis der Schnittfläche. Der Einsatz von asymmetrischen Aktivelementen erwies sich jedoch nicht als sinnvoll, da diese stark zum Bruch der Aktivelemente neigen und somit nur geringe Standzeiten erreichen. Die Qualität der Schnittflächen ist nicht signifikant besser, so dass sich hier kein Vorteil ergäbe. Im geschlossenen Schnitt führt ein asymmetrischer Stempel bereits nach wenigen Schnitten zum Werkzeugbruch, da das zu verdrängende Material eine zu großen Druckbeanspruchung auf das Werkzeug erzeugt. In Abbildung 8.24 ist diese Materialanhäufung anhand der FE-Simulation mit Deform 2D ersichtlich, welche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden (Abschnitte 2.5 und 7.5).

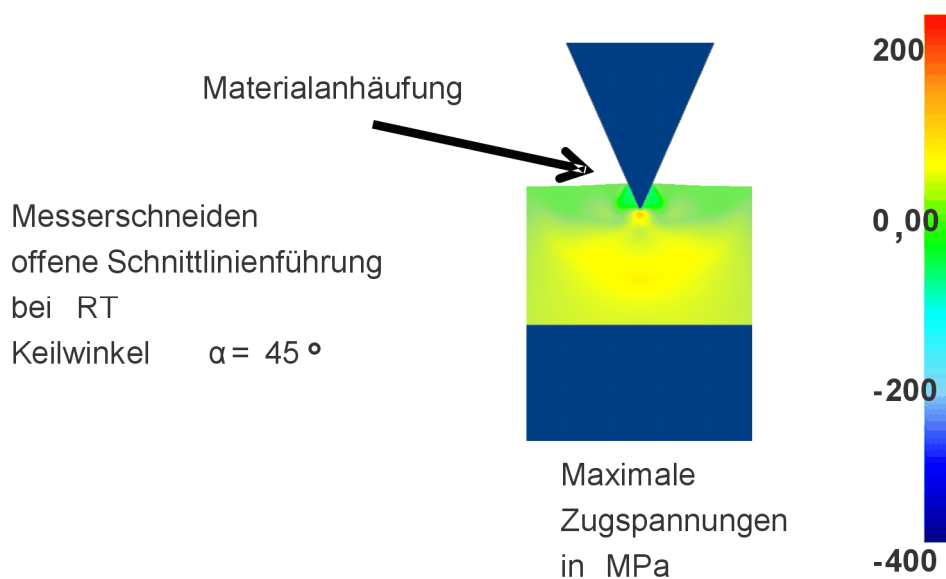


Abbildung 8.24: *Materialanhäufung beim Eindringen des Messers bei einem Keilwinkel  $\alpha = 45^\circ$  im offenen Schnitt bei Raumtemperatur*

Der Schneidkraftbedarf  $F_S$  (Abbildungen 8.26 und 8.28) steigt mit zunehmenden Keilwinkel  $\alpha$  aufgrund des immer größeren zu verdrängenden Materialvolumens an. Das Material häuft sich in der Blechebene an, was auch in der Simulation deutlich zu erkennen und in Abbildung 8.24 am Beispiel des Keilwinkels  $\alpha = 45^\circ$  dargestellt ist.



Auf die Qualität der Schnittfläche hat dies allerdings keinen Einfluss und ist somit vernachlässigbar. In Abbildung 8.25 sind ist zusätzlich der bezogene Schneidwiderstand  $c$  für die unterschiedlich eingesetzten Keilwinkel dargestellt. Analog zu Schneidkraft  $F_s$  steigt auch der bezogene Schneidwiderstand  $c$  mit zunehmenden Keilwinkel an.

	$\alpha = 25^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\beta = 22,5^\circ$	$\beta = 30^\circ$
<b>AZ31 1,25 mm</b>	0,66	0,71	0,71	0,98	0,68	0,69
<b>AZ31 2,00 mm</b>	0,63	0,62	0,62	0,96	0,58	0,61

Abbildung 8.25: Bezogener Schneidwiderstand  $c$  für unterschiedliche Keilwinkel  $\alpha$  (symmetrisch) und  $\beta$  (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Messerschneiden

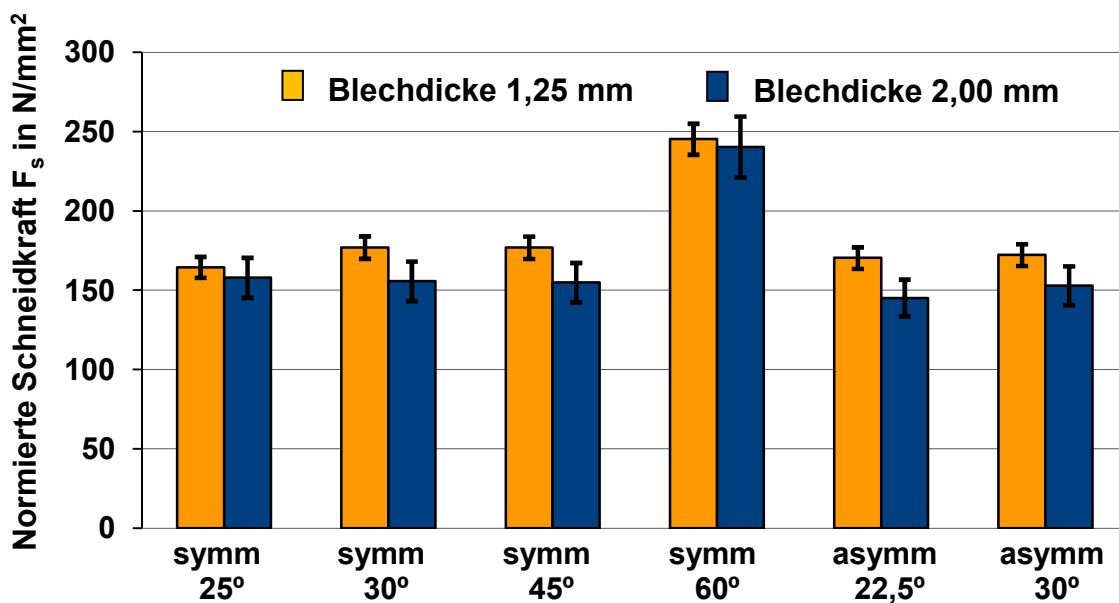


Abbildung 8.26: Normierte Schneidkraft  $F_s$  für unterschiedliche Keilwinkel  $\alpha$  (symmetrisch) und  $\beta$  (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Messerschneiden

	$\alpha = 25^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\beta = 22,5^\circ$
<b>AZ31 1,25 mm</b>	0,58	0,71	1,18	0,87
<b>AZ31 2,00 mm</b>	0,50	0,54	1,15	0,73

Abbildung 8.27: Bezogener Schneidwiderstand  $c$  für unterschiedliche Keilwinkel  $\alpha$  (symmetrisch) und  $\beta$  (asymmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Messerschneiden

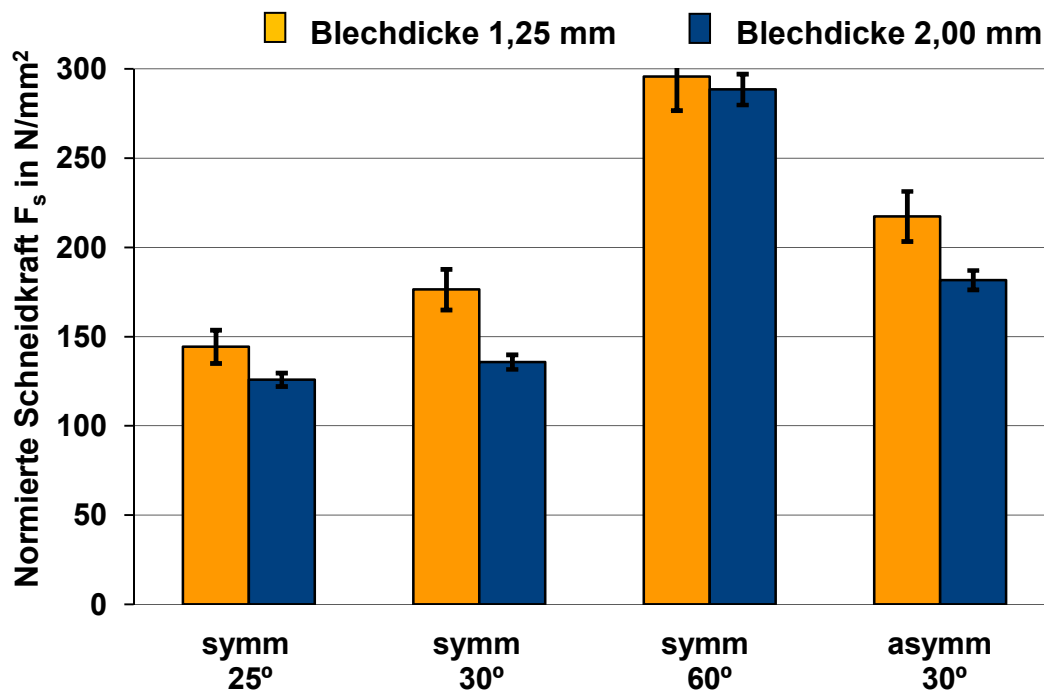


Abbildung 8.28: Normierte Schneidkraft  $F_s$  für unterschiedliche Keilwinkel  $\alpha$  (symmetrisch) und  $\beta$  (asymmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Messerschneiden

In Abbildung 8.29 sind die taktil vermessen Schnittflächen dargestellt, wobei zu erkennen ist, dass die Qualität der Schnittflächen gegenüber dem Scherschneiden deutlich besser ist. Der Keilwinkel des Werkzeugaktivelementes bildet sich an der Schnittfläche wieder ab, dies ist aber nicht von Nachteil, da es eine nachfolgende Lackierung nicht negativ beeinflusst und somit auch die Korrosionsneigung nicht durch den Keilwinkel beeinflusst wird. Die Schnittfläche ist deshalb nicht eben, sondern weist eine Steigung im Winkel  $\alpha'$  ( $= \frac{1}{2} \alpha$ ) auf. Außerdem erweist sich ein Keilwinkel von  $\alpha = 25^\circ$  und  $\alpha = 30^\circ$  als am besten geeignet, um einen möglichst hohen Glattschnitt- ( $h_s$ ) und einen geringen Bruchflächenanteil ( $h_B$ ) zu erzeugen. Für den Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$  ist das Schneidaktivelement robuster. Die quantitative Darstellung der Schnittflächenkenngrößen in Abbildung 8.30 belegt diese Tendenz. Mit zunehmendem Keilwinkel  $\alpha$  sinkt der Glattschnittanteil  $h_s$ . Dies bestätigt sich in den weiteren Untersuchungen der Keilschneidverfahren. Aus den Abbildungen 8.29 und 8.30 geht hervor, dass ein sehr kleiner Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$  den höchsten Glattschnittanteil  $h_s$  bewirkt. Dies ist auf die Minimierung der Scherbeanspruchung

zurückzuführen, da dadurch das spröde Materialversagen minimiert wird und die Materialtrennung unter Druckbeanspruchung stattfindet und somit auch für das Messerschneiden die druckinduzierte Zwillingsbildung genutzt werden kann.

Keilwinkel $\alpha/\beta$			25° symm	30° symm	45° symm	60° symm	22,5° asymm	30° asymm
Schnittlinie			offen	offen	offen	offen	offen	offen
Schneidgeschwindigkeit			30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s
Messerschneiden	AZ31 1,25 mm	RT						
	AZ31 2,0 mm	RT						
Keilwinkel $\alpha/\beta$			25° symm	30° symm	45° symm	60° symm	22,5° asymm	30° asymm
Schnittlinie			geschlossen	geschlossen	geschlossen	geschlossen	geschlossen	geschlossen
Schneidgeschwindigkeit			30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s
Messerschneiden	AZ31 1,25 mm	RT						
	AZ31 2,0 mm	RT						

Abbildung 8.29: Schnittflächenprofile für unterschiedliche Keilwinkel  $\alpha$  (symmetrisch) und  $\beta$  (asymmetrisch) bei offener und geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Messerschneiden

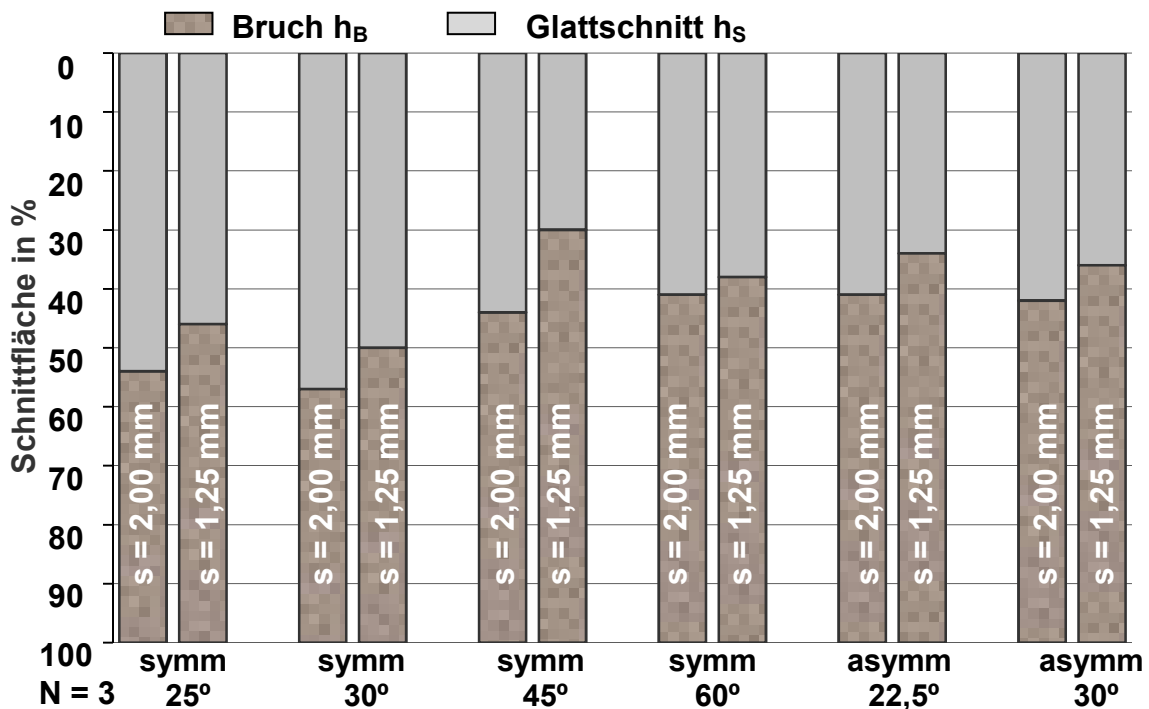


Abbildung 8.30: Schnittflächenqualität für unterschiedliche Keilwinkel  $\alpha$  (symmetrisch) und  $\beta$  (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Messerschneiden

Wie bereits beim Scherschneiden in den Abschnitten 8.1 und 8.2 erläutert, ist auch hier bei einer geschlossenen Schnittlinie aufgrund der prozesstechnischen Parameter gleichfalls die Spannungsverteilung günstiger. Bei der Wahl des Schneidverfahrens ist bei den Keilschneidverfahren, sofern geometrisch möglich, eine geschlossene Schnittlinie zu bevorzugen, da dort der Bruchflächenanteil  $h_B$  gegenüber einer offenen Schnittlinie geringer ist (Abbildung 8.31). Allerdings birgt eine geschlossene Schnittlinie die Gefahr des Verklemmens des Butzens oder des Werkstücks während oder nach dem Prozess, wodurch Beschädigungen am Werkzeug oder dem Werkstück auftreten können.

Bei einem Keilwinkel  $\alpha = 60^\circ$  tritt der höchste Schneidkraftbedarf auf. In Abbildung 8.32 ist für den Keilwinkel  $\alpha = 60^\circ$  das Schneidresultat dargestellt. Der Butzen verklemt sich sehr stark im Werkzeug, da das zu verdrängende Materialvolumen keinen Platz hat, was in Abbildung 8.32 deutlich zu erkennen ist. Was aus einer Materialstauchung resultiert. Diese Stauchung erfordert darüber hinaus einen zusätzlichen Schneidkraftbedarf  $F_S$  (Abbildung 8.26 und 8.28).

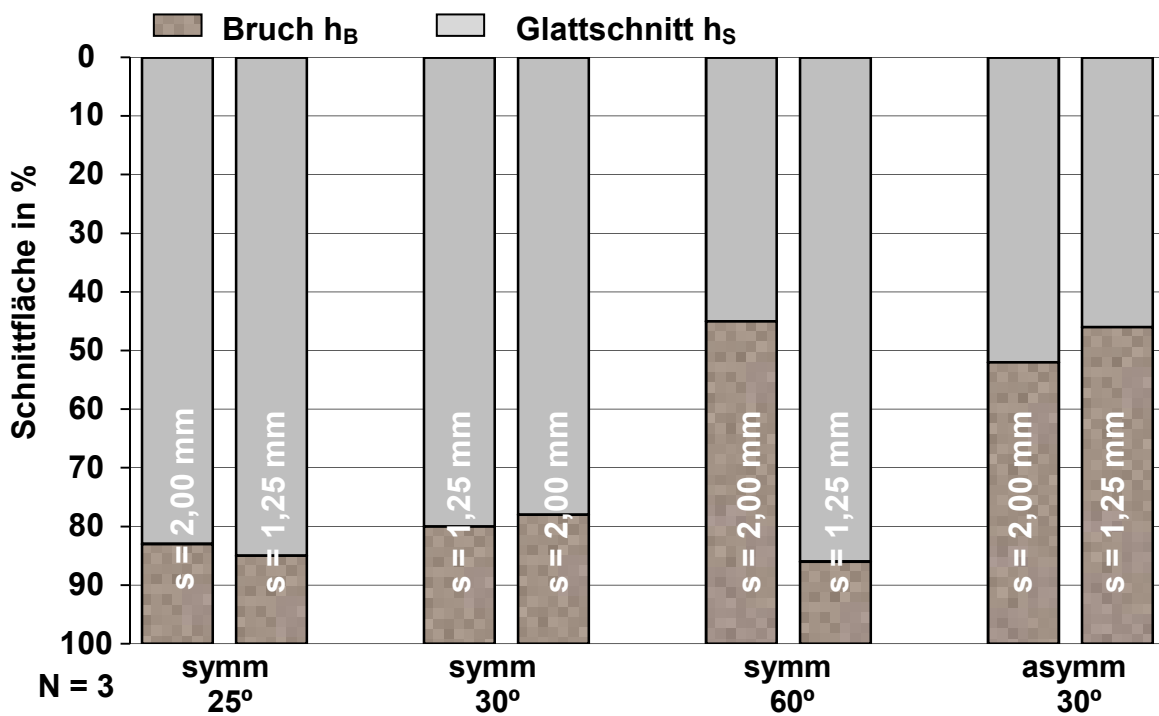


Abbildung 8.31: Schnittflächenqualität für unterschiedliche Keilwinkel  $\alpha$  (symmetrisch) und  $\beta$  (asymmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Messerschneiden

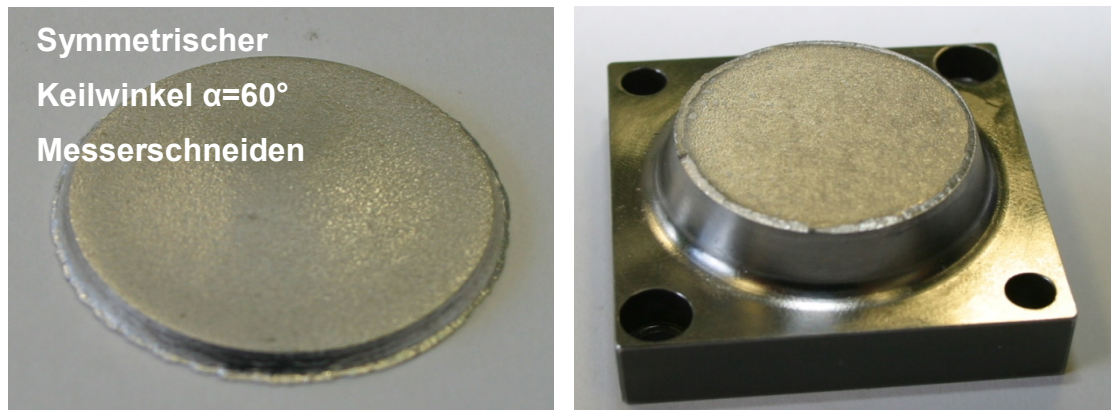


Abbildung 8.32 Verklemmter Butzen beim geschlossenen Messerschneiden von AZ31 mit einem Keilwinkel  $\alpha = 60^\circ$

Zur Generierung der qualitativ hochwertigsten Schnittfläche im Rahmen der untersuchten Parameter empfiehlt sich eine geschlossene Schnittlinie und ein Keilwinkel des Werkzeugs von  $\alpha = 30^\circ$ . Die Schnittgeschwindigkeit und die Dicke des Bleches sind dabei für das Ergebnis nicht relevant.

### 8.3.1.3 Einfluss der Prozesstemperatur

Ein Vergleich der Schnittflächen bei unterschiedlichen Temperaturen der geschnittenen Bleche zeigt ebenfalls eine Tendenz, die der beim Scherschneiden ähnlich ist. Bei Erhöhung der Temperatur nimmt der Glattschnittflächenanteil  $h_S$  zu und der Bruchflächenanteil  $h_B$  ab (siehe Abbildung 8.35). Dies ist ebenfalls mit der Zunahme von zusätzlichen aktiven Gleitebenen ab einer Temperatur von circa  $225^\circ\text{C}$  zu erklären. Der Schneidkraftbedarf nimmt auch hier mit zunehmender Temperatur ab, da bereits ab  $100^\circ\text{C}$  ein duktileres Werkstoffverhalten zu beobachten ist. In Abbildung 8.34 ist die normierte Schneidkraft  $F_S$  für alle untersuchten Temperaturen dargestellt.

	RT	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C
<b>AZ31 1,25 mm</b>	0,66	0,64	0,59	0,60	0,59
<b>AZ31 2,00 mm</b>	0,63	0,61	0,59	0,52	0,52

Abbildung 8.33: Bezogener Schneidwiderstand  $c$  für unterschiedliche Temperaturen bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden

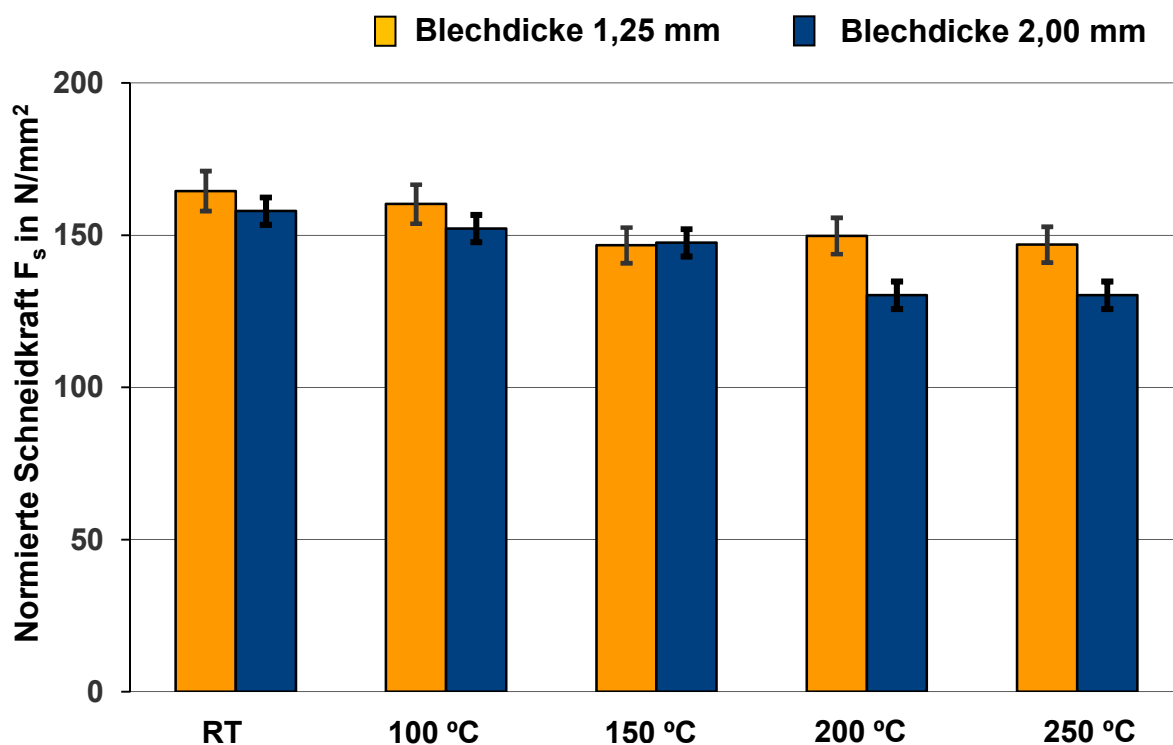


Abbildung 8.34: Normierte Schneidkraft  $F_S$  für unterschiedliche Temperaturen bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden

In Abbildung 8.35 ist die Schnittflächenqualität für unterschiedliche Temperaturen für das Messerschneiden mit den eingesetzten Keilwinkeln aufgetragen. Mit zunehmender Temperatur finden die bereits diskutierten Entfestigungsvorgänge aufgrund zusätzlicher zur Verfügung stehender aktiver Gleitsystem statt. Somit ergibt sich für eine Schneidtemperatur von 200 °C bis 250 °C für das Material der Blechdicke 2,00 mm ein Glattschnittanteil  $h_s$  von circa 1,60 mm (entspricht 80 %). Dies bedeutet gegenüber Raumtemperatur einen um 30 % höheren Glattschnittanteil  $h_s$ .

Keilwinkel $\alpha/\beta$			25° symm	30° symm	45° symm	60° symm	22,5° asymm	30° asymm
Schnittlinie			offen					
Schneidgeschwindigkeit			30 mm/s					
Messerschneiden	AZ31 1,25 mm	RT						
	AZ31 2,0 mm	RT						
Keilwinkel $\alpha/\beta$			25° symm	30° symm	45° symm	60° symm	22,5° asymm	30° asymm
Schnittlinie			offen					
Schneidgeschwindigkeit			30 mm/s					
Messerschneiden	AZ31 1,25 mm	100°C						
	AZ31 2,0 mm	100°C						
Keilwinkel $\alpha/\beta$			25° symm	30° symm	45° symm	60° symm	22,5° asymm	30° asymm
Schnittlinie			offen					
Schneidgeschwindigkeit			30 mm/s					
Messerschneiden	AZ31 1,25 mm	150°C						
	AZ31 2,0 mm	150°C						
Keilwinkel $\alpha/\beta$			25° symm	30° symm	45° symm	60° symm	22,5° asymm	30° asymm
Schnittlinie			offen					
Schneidgeschwindigkeit			30 mm/s					
Messerschneiden	AZ31 1,25 mm	200°C						
	AZ31 2,0 mm	200°C						
Keilwinkel $\alpha/\beta$			25° symm	30° symm	45° symm	60° symm	22,5° asymm	30° asymm
Schnittlinie			offen					
Schneidgeschwindigkeit			30 mm/s					
Messerschneiden	AZ31 1,25 mm	250°C						
	AZ31 2,0 mm	250°C						

Abbildung 8.35: Schnittflächenprofile für unterschiedliche Temperaturen mit den untersuchten Keilwinkeln  $\alpha = 25^\circ$  bis  $60^\circ$  (symmetrisch) und den Keilwinkeln  $\beta = 22,5^\circ$  und  $30^\circ$  bei offener Schnittlinienführung beim Messerschneiden

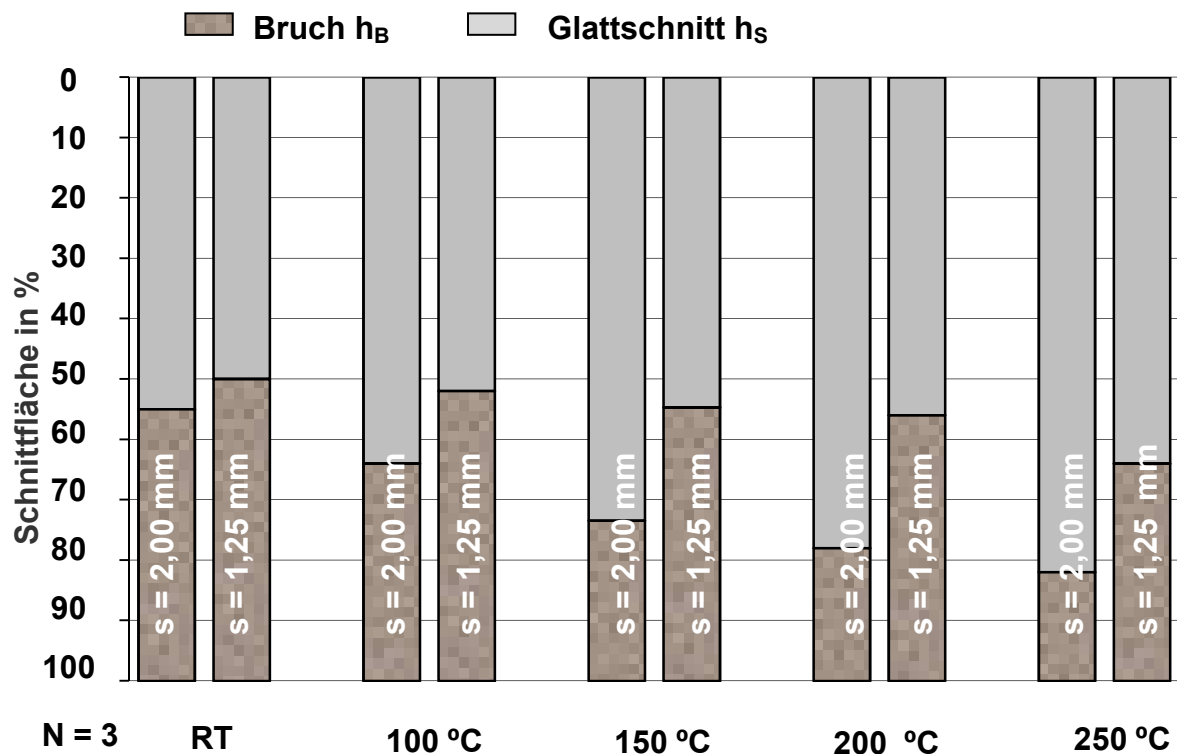


Abbildung 8.36 Schnittflächenqualität für unterschiedliche Temperaturen mit einem Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$  und für eine offene Schnittlinie beim Messerschneiden

### 8.3.2 Beißschneiden

Das Verfahren des Beißschneidens ist, ebenso wie das Messerschneiden, dem Keilschneidverfahren untergeordnet. Im Gegensatz zum Messerschneiden findet die Materialtrennung allerdings von beiden Seiten des Werkstückes statt, wodurch die zu erwartenden Ergebnisse bezüglich der Schnittflächenqualität vergleichbar mit denen des Messerschneidens sein müssten. Die untersuchten asymmetrischen Werkzeuge erweisen sich beim Beißschneiden als noch schadensanfälliger als vergleichsweise beim Messerschneiden, da hier die gleichen Belastungen auftreten, aber durch die Verfahrensart zwei Werkzeugaktivelemente beschädigt werden können. Dieser Ansatz zur Verbesserung der Schnittflächenqualität beim Keilschneiden wurden daher aufgrund dessen nicht weiter verfolgt werden.



### 8.3.2.1 Einfluss der Schneidgeschwindigkeit

Analog zu den bereits beschriebenen Schneidverfahren, dem Scher- und Messerschneiden, ist der Einfluss der Schneidgeschwindigkeit beim Beißschneiden ebenso zu vernachlässigen. In nachfolgender Abbildung 8.37 sind die Schnittflächenprofile für die unterschiedlichen Schneidgeschwindigkeiten im offenen als auch geschlossenen Schnitt für zwei unterschiedliche Keilwinkel dargestellt.

Keilwinkel $\alpha$			symmetrisch 25°				symmetrisch 30°			
Schnittlinie			offener Schnitt		geschlossener Schnitt		offener Schnitt		geschlossener Schnitt	
Schneidgeschwindigkeit			30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s	30 mm/s	90 mm/s
Beißschneiden	AZ31 1,25 mm	RT								
	AZ31 2,0 mm	RT								

Abbildung 8.37: Schnittflächenprofile bei unterschiedlichen Schneidgeschwindigkeiten: 30 mm/s und 90 mm/s mit Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$  und  $\alpha = 30^\circ$  für offene und geschlossene Schnittlinie bei Raumtemperatur (RT) beim Beißschneiden

### 8.3.2.2 Variation des Keilwinkels

Der Einfluss des Keilwinkels wird am Beispiel der Schnittflächen in den Abbildung 8.38 bis 8.44 gezeigt. Der im Gegensatz zum Messerschneiden beidseitige Winkel  $\alpha_{o/u}$  rührt von der Beschaffenheit des Werkzeugs her, da beim Beißschneiden beidseitig Schneiden mit dem Keilwinkel  $\alpha$  angebracht sind, wie in Abschnitt 2, Abbildung 2.9 dargestellt ist.

Für Bleche der Dicke 1,25 mm und 2,00 mm sind wie bei den beiden vorangegangenen Schneidverfahren keine Unterschiede in den Schneidergebnissen zu erkennen. Daher sind diese beiden Schneidparameter hier zu vernachlässigen. Ein Vergleich zwischen offener und geschlossener Schnittlinie zeigt, wie auch beim Messerschneiden, eine qualitativ hochwertigere Schnittfläche für eine geschlossene Schnittlinie. Allerdings ist auch hier die Problematik des Verklemmens zu berücksichtigen (vgl. Abbildung 8.31).

Der bezogene Schneidwiderstand  $c$ , in Abbildung 8.38 für den offenen Schnitt und in Abbildung 8.40 für den geschlossenen Schnitt, korreliert mit der nachfolgend dargestellten normierten Schneidkraft  $F_s$ . Die Schneidkraft  $F_s$  für die unterschiedlichen Keilwinkel ist in Abbildung 8.39 aufgetragen. Mit zunehmendem Keilwinkel steigt der Schneidkraftbedarf aufgrund der steigenden Materialverdrängung. Dies konnte auch beim Messerscheiden beobachtet werden (vgl. Abbildung 8.24).

	$\alpha = 25^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 45^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\beta = 22,5^\circ$	$\beta = 30^\circ$
<b>AZ31 1,25 mm</b>	0,80	0,84	0,88	0,96	0,76	0,53
<b>AZ31 2,00 mm</b>	0,63	0,62	0,84	0,96	0,66	0,68

Abbildung 8.38: Bezogener Schneidwiderstand  $c$  für unterschiedliche Keilwinkel  $\alpha$  (symmetrisch) und  $\beta$  (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Beißschneiden

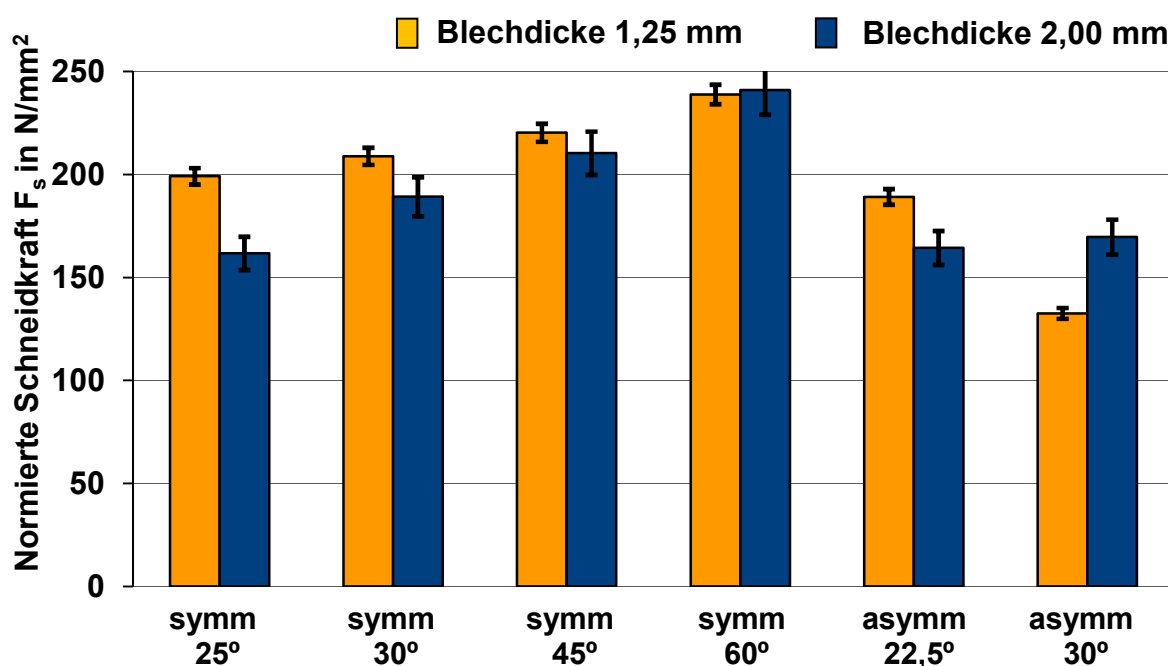


Abbildung 8.39: Normierte Schneidkraft  $F_s$  für unterschiedliche Keilwinkel  $\alpha$  (symmetrisch) und  $\beta$  (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Beißschneiden

	$\alpha = 25^\circ$	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\beta = 30^\circ$
<b>AZ31 1,25 mm</b>	0,96	0,87	0,96	0,87
<b>AZ31 2,00 mm</b>	0,75	0,75	0,99	0,70

Abbildung 8.40: Bezogener Schneidwiderstand  $c$  für unterschiedliche Keilwinkel  $\alpha$  (symmetrisch) und  $\beta$  (asymmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Beißschneiden

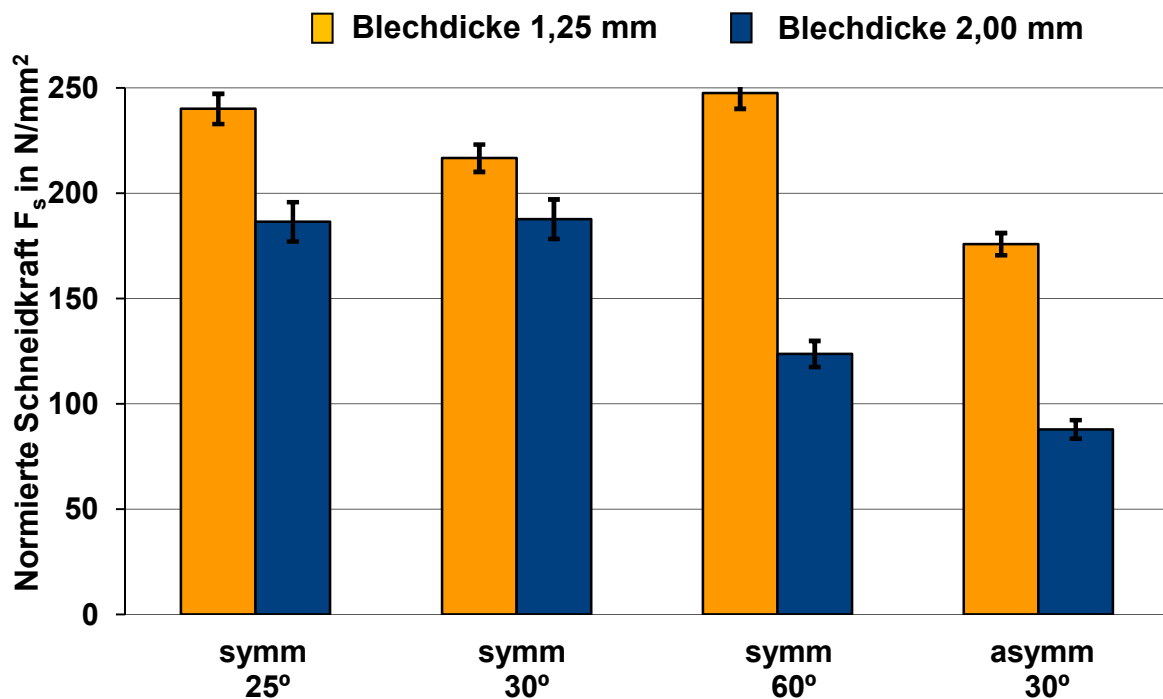


Abbildung 8.41: Normierte Schneidkraft  $F_S$  für unterschiedliche Keilwinkel  $\alpha$  (symmetrisch) und  $\beta$  (asymmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Beißschneiden

In den Abbildung 8.42 und 8.44 zeigt sich, dass ein Keilwinkel von  $\alpha = 30^\circ$  bei geschlossener Schnittlinienführung den höchsten Glattschnittanteil für das Blech der Dicke 2,00 mm liefert. Hingegen im offenen Schnitt (Abbildung 8.43 sind die Schnittflächen tendenziell schlechter als im geschlossenen Schnitt (Abbildung 8.42) Hinsichtlich der Lebensdauer der Schneidaktivelemente, welche sich mit kleineren Keilwinkeln deutlich verschlechtert, ist eine Empfehlung für den Keilwinkel von  $30^\circ$  beziehungsweise für einen Keilwinkel von  $45^\circ$  zu geben.

Keilwinkel $\alpha/\beta$			25° symm	30° symm	45° symm	60° symm	22,5° asymm	30° asymm
Schnittlinie			offen	offen	offen	offen	offen	offen
Schneidgeschwindigkeit			30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s
Beißschneiden	AZ31 1,25 mm	RT						
	AZ31 2,0 mm	RT						
Keilwinkel $\alpha/\beta$			25° symm	30° symm	45° symm	60° symm	22,5° asymm	30° asymm
Schnittlinie			geschlossen	geschlossen	geschlossen	geschlossen	geschlossen	geschlossen
Schneidgeschwindigkeit			30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s
Beißschneiden	AZ31 1,25 mm	RT						
	AZ31 2,0 mm	RT						

Abbildung 8.42: Schnittflächenprofile für unterschiedliche Keilwinkel  $\alpha$  (symmetrisch) und  $\beta$  (asymmetrisch) bei offener und geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Beißschneiden

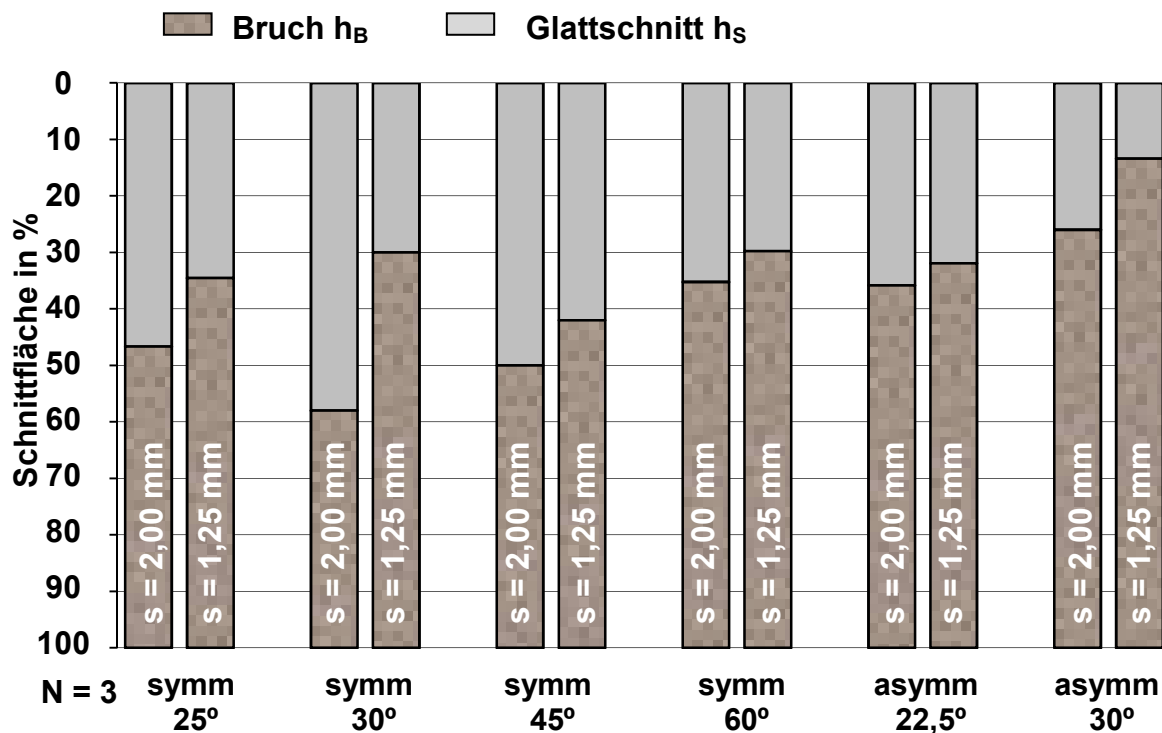


Abbildung 8.43 Schnittflächenqualität für unterschiedliche Keilwinkel  $\alpha$  (symmetrisch) und  $\beta$  (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Beißschneiden

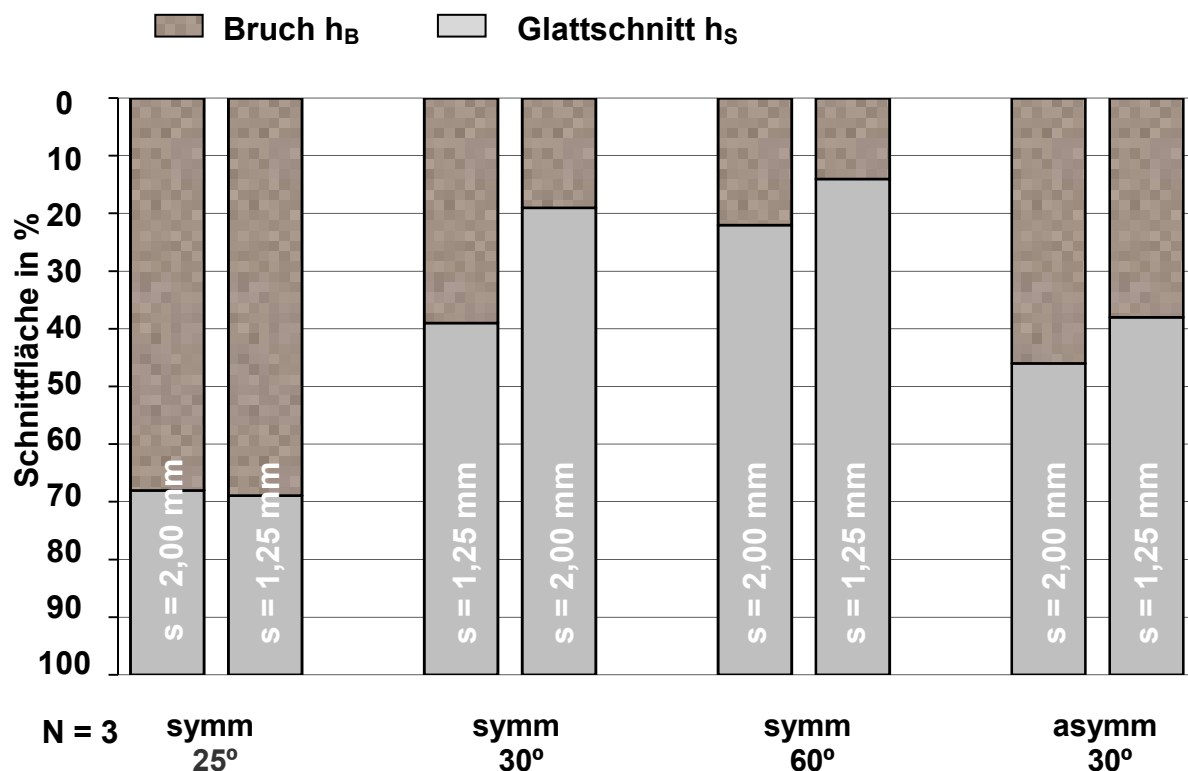


Abbildung 8.44 Schnittflächenqualität für unterschiedliche Keilwinkel  $\alpha$  (symmetrisch) und  $\beta$  (asymmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Beißschneiden

Analog zu den bereits beschriebenen Schneidverfahren ist auch beim Beißschneiden eine geschlossene Schnittlinie bevorzugt einzusetzen, sofern es die Bauteilgeometrie zulässt. In Abschnitt 8.3.2.4 ist die Problematik für eine geschlossene Schnittlinienführung beschrieben.

### 8.3.2.3 Einfluss der Prozesstemperatur

Analog zu den vorangegangenen untersuchten Schneidverfahren verbessert sich mit zunehmender Schneidtemperatur auch hier die Schnittflächenqualität (vgl. Abbildung 8.45). Begründet werden kann dies wiederum mit den Werkstoffeigenschaften von Magnesium. Eine Schneidtemperatur von 250 °C ist daher vorteilhaft, da hier Schnittflächen von vergleichsweise guter Qualität reproduzierbar herzustellen sind.

Keilwinkel $\alpha/\beta$			25° symm	30° symm	45° symm	60° symm	22,5° asymm	30° asymm
Schnittlinie			offen	offen	offen	offen	offen	offen
Schneidgeschwindigkeit			30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s
Beißschneiden	AZ31 1,25 mm	RT						
	AZ31 2,0 mm	RT						
Keilwinkel $\alpha/\beta$			25° symm	30° symm	45° symm	60° symm	22,5° asymm	30° asymm
Schnittlinie			offen	offen	offen	offen	offen	offen
Schneidgeschwindigkeit			30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s
Beißschneiden	AZ31 1,25 mm	100°C						
	AZ31 2,0 mm	100°C						
Keilwinkel $\alpha/\beta$			25° symm	30° symm	45° symm	60° symm	22,5° asymm	30° asymm
Schnittlinie			offen	offen	offen	offen	offen	offen
Schneidgeschwindigkeit			30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s
Beißschneiden	AZ31 1,25 mm	150°C						
	AZ31 2,0 mm	150°C						
Keilwinkel $\alpha/\beta$			25° symm	30° symm	45° symm	60° symm	22,5° asymm	30° asymm
Schnittlinie			offen	offen	offen	offen	offen	offen
Schneidgeschwindigkeit			30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s
Beißschneiden	AZ31 1,25 mm	200°C						
	AZ31 2,0 mm	200°C						
Keilwinkel $\alpha/\beta$			25° symm	30° symm	45° symm	60° symm	22,5° asymm	30° asymm
Schnittlinie			offen	offen	offen	offen	offen	offen
Schneidgeschwindigkeit			30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s	30 mm/s
Beißschneiden	AZ31 1,25 mm	250°C						
	AZ31 2,0 mm	250°C						

Abbildung 8.45: Schnittflächenprofile für unterschiedliche Temperaturen mit den untersuchten Keilwinkeln  $\alpha = 25^\circ$  bis  $60^\circ$  (symmetrisch) und den Keilwinkeln  $\beta = 22,5^\circ$  und  $30^\circ$  bei offener Schnittlinienführung beim Beißschneiden

Der bezogene Schneidkraftbedarf  $F_s$  sinkt mit zunehmender Schneidtemperatur, wie es in Abbildung 8.47 zu erkennen ist. Dies ist vergleichbar mit dem Kraftbedarf bei den vorangegangenen Schneidverfahren, die eine vergleichbare Tendenz zeigen. Analog zur Schneidkraft  $F_s$  verhält sich der bezogene Schneidwiderstand  $c$ , wie in Abbildung 8.46 dargestellt.

	RT	100 °C	150 °C	200 °C	250 °C
<b>AZ31 1,25 mm</b>	0,84	0,77	0,74	0,69	0,66
<b>AZ31 2,00 mm</b>	0,80	0,69	0,62	0,59	0,56

Abbildung 8.46: *Bezogenen Schneidwiderstand  $c$  für unterschiedliche Temperaturen bei einem Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$  und bei offener Schnittlinienführung beim Beißschneiden*

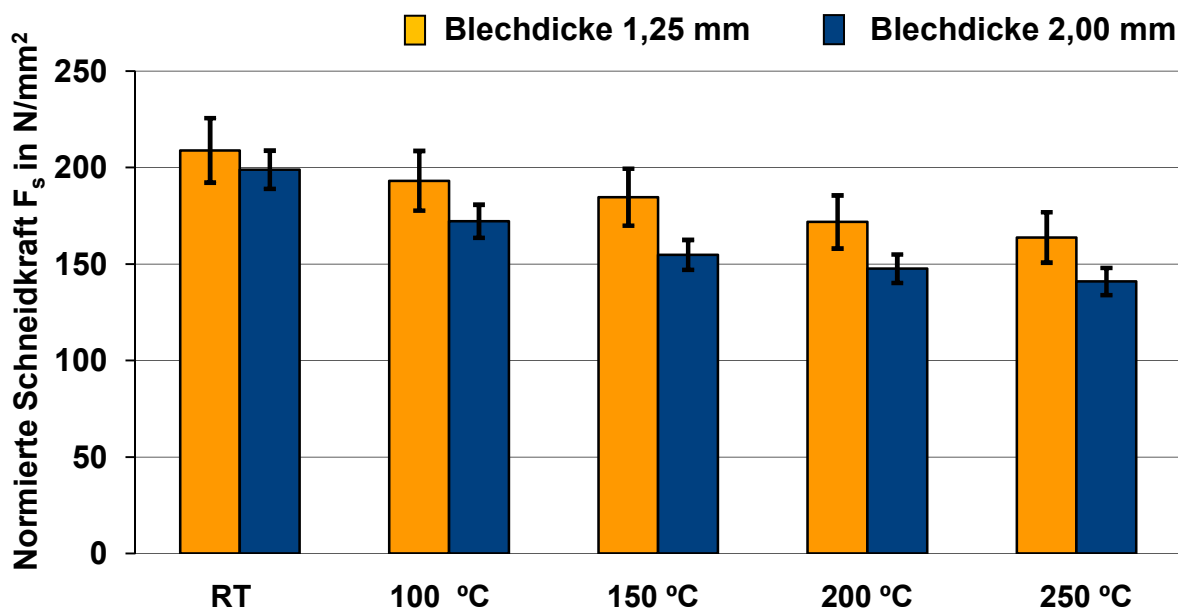


Abbildung 8.47: *Normierte Schneidkraft  $F_s$  für unterschiedliche Temperaturen bei einem Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$  und bei offener Schnittlinienführung beim Beißschneiden*

Das optimale Schneidergebnis liefert erneut eine Kombination der jeweils geeignetsten Parameter. Beim Beißschneiden ist eine geschlossene Schnittlinie, bei einer Schneidtemperatur von 250 °C und einem Keilwinkel von  $\alpha = 30^\circ$  von Vorteil (Abbildung 8.48).

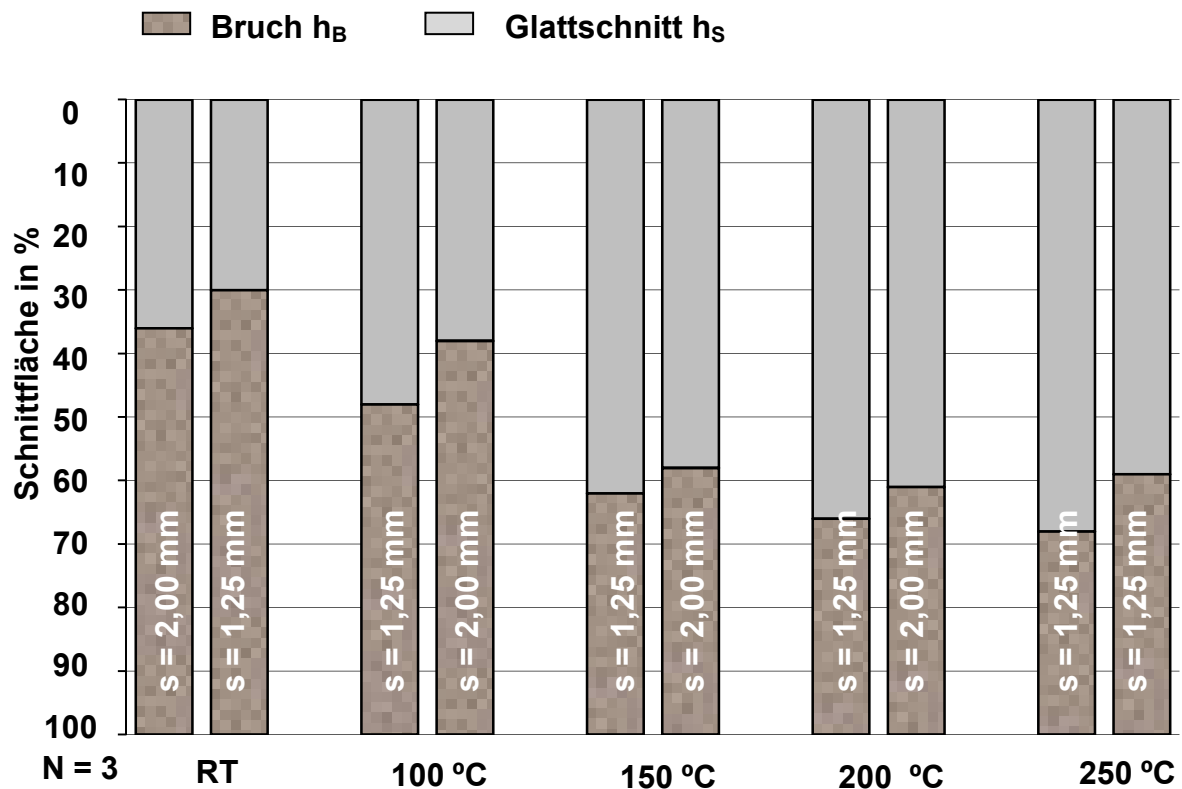


Abbildung 8.48 Schnittflächenqualität für unterschiedliche Temperaturen mit einem Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$  und für eine offene Schnittlinie beim Beißschneiden

#### 8.4 Vergleich der untersuchten Schneidverfahren

Mit dem in Abschnitt 5.2.2 (Abbildung 5.7) dargestellten Versuchsaufbau wurde für jedes der drei Schneidverfahren und der variierten Schneidparameter der Schneidkraftbedarf und die Schnittflächenprofile für die Blechdicken von 1,25 mm und 2,00 mm ermittelt.

Abschnitt 8.1 handelt vom gängigsten Schneidverfahren, dem Scherschneiden. In durchgeführten Untersuchungen stellte sich heraus, dass mit zunehmendem Schneidspalt die Schneidkraft beim Scherschneiden ansteigt. Da es sich bei dem untersuchten Material um eine Magnesiumknetlegierung handelt und somit ein sprödes Materialverhalten gegeben ist, sollte insbesondere beim Scherschneiden ein negativer Schneidspalt eingesetzt werden. Dieses Verfahren ermöglicht auch bei Raumtemperatur sehr gute Schnittflächen, wie in Abschnitt 8.2 erläutert wird.



Beim Messer- und Beißschneiden steigt die Schneidkraft mit steigendem Keilwinkel  $\alpha$ . Aufgrund der geringen Standzeit der asymmetrischen Keilwinkel wurde dieser Ansatz nicht vertieft. Die Schneidkraft  $F_S$  nimmt mit zunehmender Temperatur bei allen untersuchten Verfahren ab. Die Schneidgeschwindigkeit konnte als nicht relevanter Parameter (Abschnitt 8.1.1, 8.3.1.1 und 8.3.2.1) vernachlässigt werden. Des Weiteren ist für das Scherschneiden ein vollkantiger Stempel zu empfehlen. Die Untersuchungen mit einem gefasten Stempel waren nicht zielführend (vgl. Abschnitt 8.1.2).

Den größten Schneidkraftbedarf weisen Messer- und Scherschneiden auf. Die geringste Schneidkraft wird beim Beißschneiden benötigt, da die Schnittfläche gegenüber dem Messerschneiden halbiert wird. Die Schnittlinienführung ist gleichfalls ein wichtiger Parameter, da für alle untersuchten Schneidverfahren festgestellt wurde, dass eine geschlossene Schnittlinie bessere Schnittflächenqualitäten erzeugt.

Die Kosten für die Konstruktion und den Bau eines Werkzeugs zum Scherschneiden sind im Vergleich zum Messer- und Beißschneiden wegen der einfacheren Werkzeugauslegung wesentlich geringer, weshalb das Scherschneiden momentan industriell am häufigsten eingesetzt wird. Da außerdem der Verschleiß und die Anfälligkeit für Beschädigungen am Werkzeug beim Messer- und Beißschneiden deutlich höher liegen, hat Scherschneiden hinsichtlich Kosten und Verschleiß ein Vorteil. Die Qualität der Schnittfläche wird nach den in Abschnitt 8.1 bis 8.3 erhaltenen Ergebnissen mit zwei Hauptkriterien, nämlich dem Bruchflächenanteil  $h_B$  und der Geometrie der geschnittenen Fläche, bestimmt. Dabei ist ein möglichst geringer Bruchflächenanteil  $h_B$  und eine eben geschnittene Fläche erwünscht. Die eben erläuterten Kriterien zur Auswahl eines Schneidverfahrens sind in Tabelle 8.1 quantitativ zusammengefasst.

	Scher- schneiden	Scher- schneiden negativer Schneidspalt	Messer- schneiden	Beiß- schneiden
Schneidkraftbedarf	0	0	0	+
Kosten	+	+	0	-
Verschleiß	+	-	0	-
Schnittfläche bei RT	-	+	0	+
Schnittfläche bei 100 °C	+	+	+	+

Legende:                                   +: positiv   o: ohne Einfluss   -: negativ

Tabelle 8.1:           Vergleich der Schneidverfahren

## 8.5 FE-Simulation

Die Simulation des Schneidprozesses wurde für alle drei Schneidverfahren durchgeführt. Die Ergebnisse liefern wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der tatsächlich auftretenden Spannungen während des Trennvorgangs. Die Keilschneidverfahren stellen hierbei die größte Herausforderung dar, da diese Schneidverfahren im Rahmen von Schneidsimulationen derzeit noch nicht optimiert wurden. Insbesondere bei einem sehr spröden Materialverhalten, wie es die Magnesiumlegierung AZ31 bei Raumtemperatur aufweist, ist dies der Fall.

Abbildung 8.49 zeigt die maximal auftretenden Zugspannungen bei den drei Schneidverfahren. Der Stempelweg beziehungsweise die Eindringtiefe des Stempels in das Material beträgt beim Scher- und Messerschneiden 0,3 mm, beim Beißschneiden jeweils 0,15 mm. Deutlich zu erkennen ist, dass bei den Keilschneidverfahren die Materialtrennung nicht durch Zugspannungen erfolgt, sondern durch Druckspannungen initiiert wird. Diese verfahrensbedingt induzierten Druckspannungen ermöglichen eine bessere Materialtrennung, da bei Magnesiumlegierungen neben der Versetzungsbewegung auch die Zwillingsbildung einen Anteil an der Umformung bzw. Materialtrennung hat [LANG90].

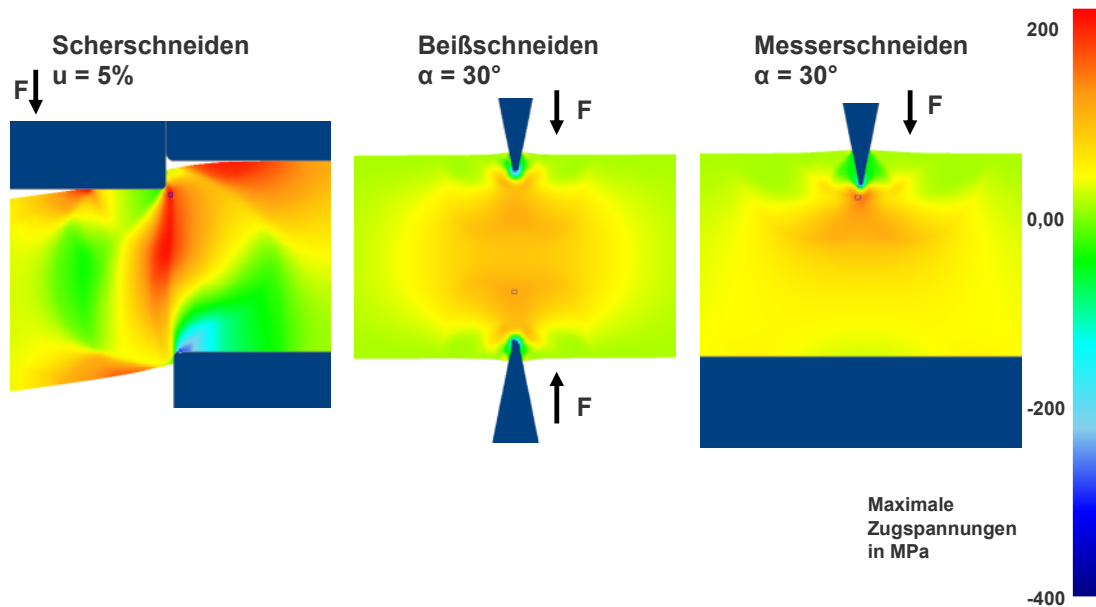


Abbildung 8.49: Maximal auftretende Zugspannungen in MPa bei Raumtemperatur und offener Schnittlinie sowie einer Eindringtiefe von 0,3 mm

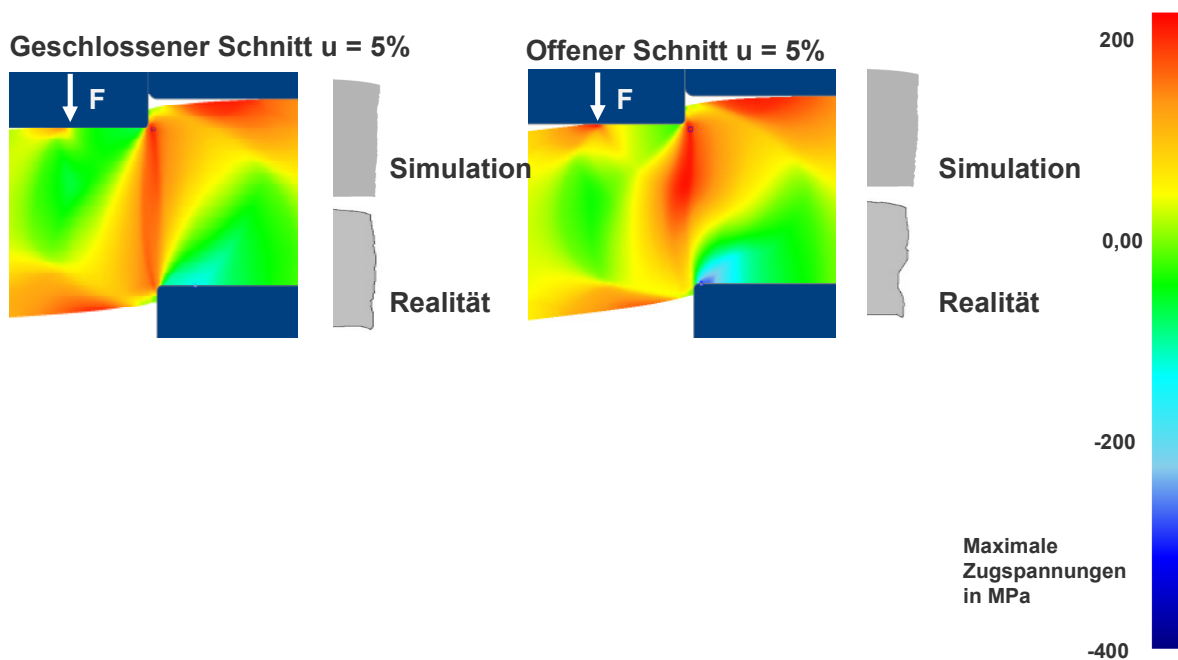
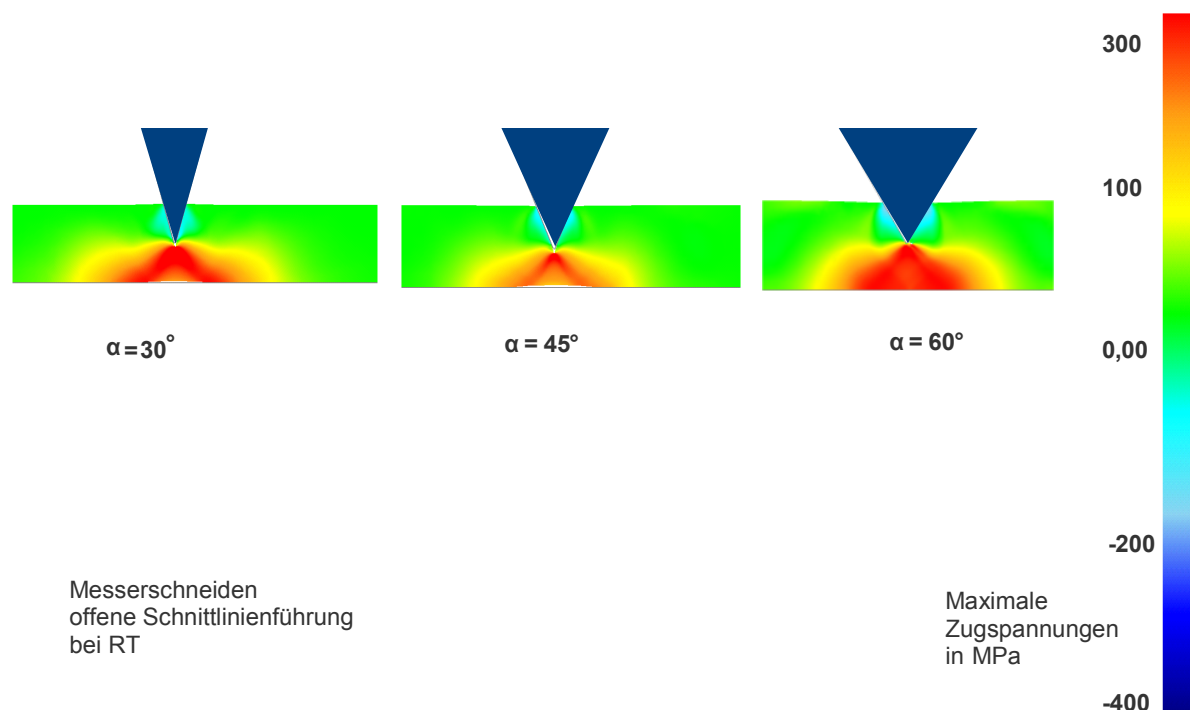


Abbildung 8.50: Maximal auftretende Zugspannungen in MPa für das Scherschneiden bei Raumtemperatur: geschlossener Schnitt (links) und offener Schnitt (rechts)

Wie bereits in Abschnitt 8.2 anhand der taktil vermessenen Schnittflächenprofile beschrieben, zeigt Abbildung 8.50 deutlich, dass die maximal auftretenden Zugspannungen im geschlossenen Schnitt wesentlich homogener über die Schnittfläche verteilt sind als im offenen Schnitt. Dies wirkt sich unmittelbar auf die Schnittflächenqualität aus. Beim offenen Schnitt kommt es zu lokal hohen Spannungsspitzen und dadurch schneller zur Rissinitiierung.

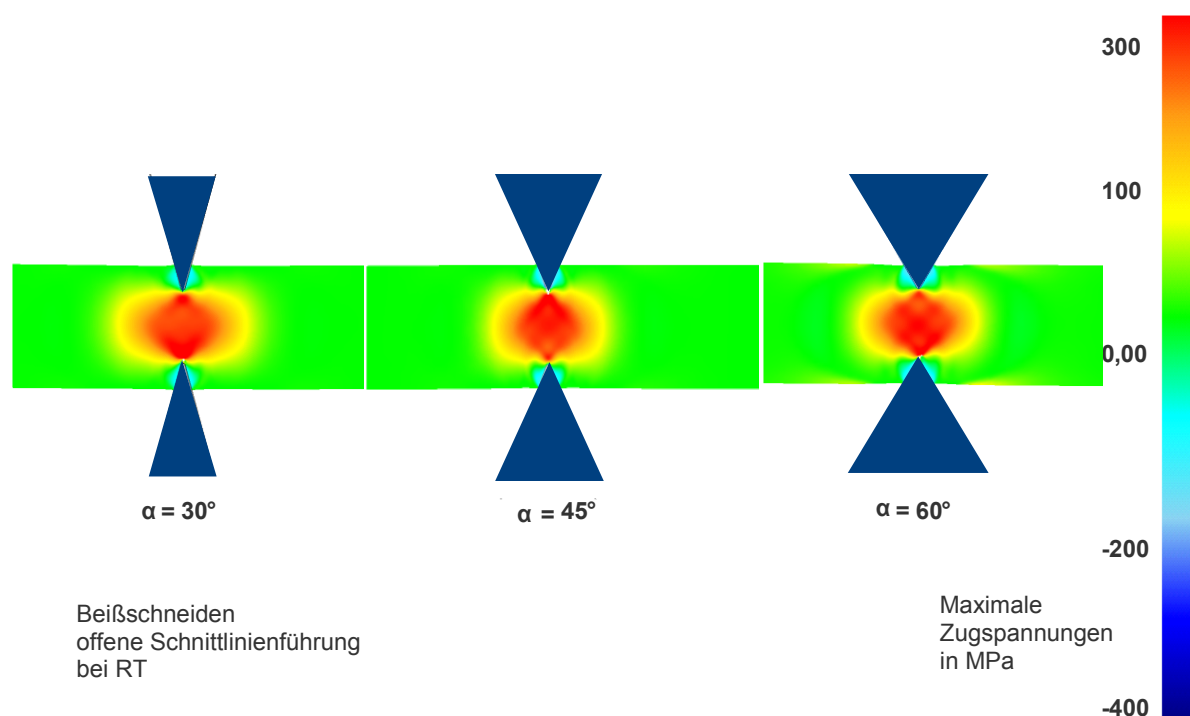
Am Beispiel des Messerschneidens wird der Einfluss des Keilwinkels  $\alpha$  auf die Spannungsverteilung deutlich. So ist zu erkennen, dass mit steigendem Keilwinkel  $\alpha$  die lokalen Spannungsspitzen zunehmen. In Abbildung 8.51 ist dies für die Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$  (links),  $\alpha = 45^\circ$  (Mitte) und  $\alpha = 60^\circ$  (rechts) dargestellt. Mit zunehmendem Keilwinkel wird das zu verdrängende Materialvolumen immer größer.



**Abbildung 8.51:** *Maximal auftretende Zugspannungen in MPa für das Messerschneiden bei Raumtemperatur für unterschiedliche Keilwinkel  $\alpha = 30 - 60^\circ$  sowie einer Eindringtiefe von 1,00 mm*

Dies führt zu einer Aufdickung (vgl. Abbildung 8.24) an der Blechoberfläche, die aber sehr gering und somit vernachlässigbar ist. Für das Beißschneiden konnte die

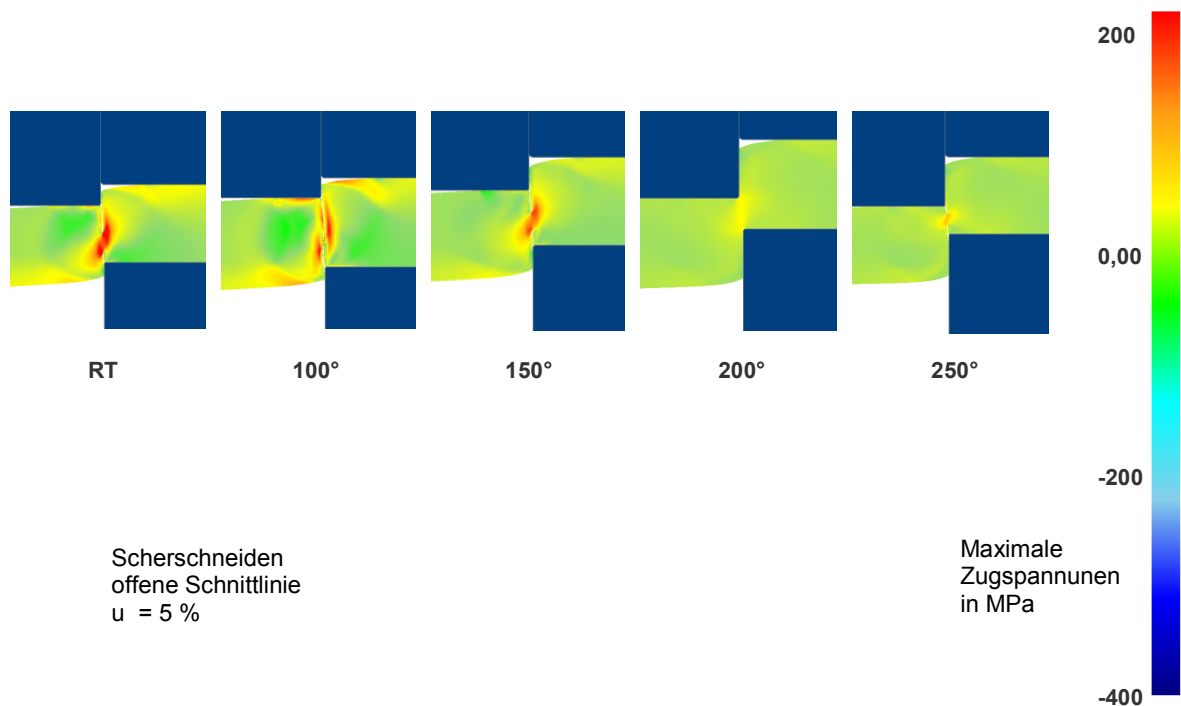
gleiche Tendenz festgestellt werden. Dies zeigt auch der Vergleich mit den taktil vermessenen Schnittflächen aus den experimentell geschnittenen Werkstücken. In Abbildung 8.52 sind für die symmetrischen Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$  (links),  $\alpha = 45^\circ$  (Mitte) und  $\alpha = 60^\circ$  (rechts) die maximal auftretenden Spannungen in MPa kurz vor der kompletten Trennung dargestellt. Es ist festzustellen, dass ein kleiner Keilwinkel eine geringere Bruchflächenhöhe  $h_B$  an der Schnittfläche erzeugt, was bedeutet, dass der Glattschnittanteil  $h_S$  größer ist.



**Abbildung 8.52:** *Maximal auftretende Zugspannungen in MPa für das Beißschneiden bei Raumtemperatur für unterschiedliche Keilwinkel  $\alpha = 30-60^\circ$  sowie einer Eindringtiefe von je 0,50 mm je Schneidaktivelement*

In Abbildung 8.53 ist am Beispiel des Scherschneidens mit einem Schneidspalt  $u = 5\%$  und offener Schnittlinienführung der Einfluss der Temperatur dargestellt. Mit steigender Temperatur werden die maximal auftretenden Zugspannungen (in MPa) deutlich geringer. Abbildung 8.53 zeigt den Schneidprozess kurz vor der kompletten Trennung. Es ist zu erkennen, dass der Bruch bei erhöhten Temperaturen deutlich später eintritt als bei Raumtemperatur, was die Schnittflächenqualität maßgeblich

beeinflusst. Der Glattschnittanteil  $h_S$  ist nahezu doppelt so groß. Diese simulativ ermittelten Daten stimmen sehr gut mit den experimentell gewonnen Ergebnissen der Schnittflächen in Abschnitt 8.2.3 überein.



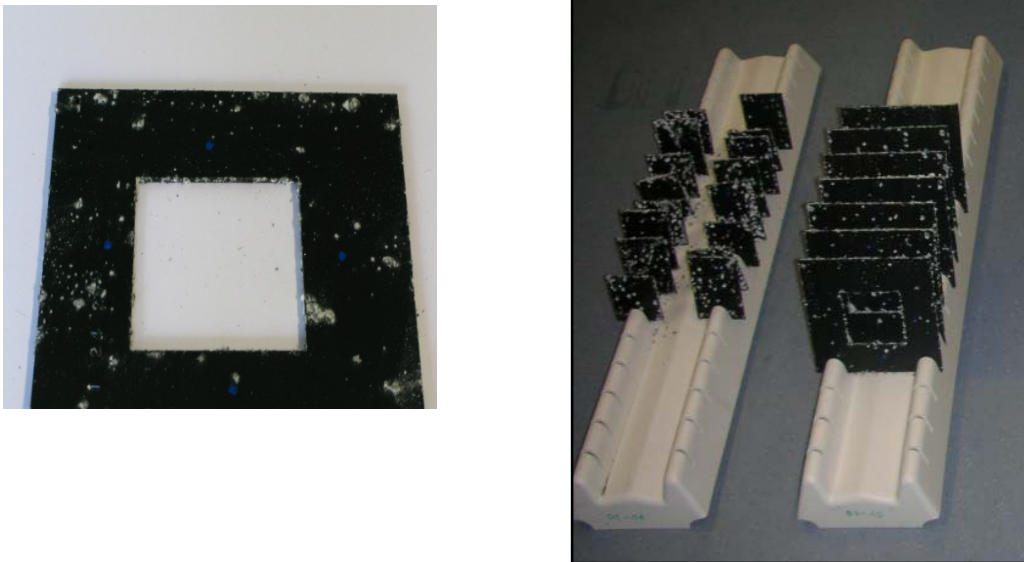
*Abbildung 8.53: Maximal auftretende Zugspannungen in MPa für das Scherschneiden mit einem Schneidspalt  $u = 5\%$  für unterschiedliche Temperaturen*

Mit Hilfe der Simulation (in Deform 2D) ist es nach entsprechender Ermittlung der Materialkennwerte mittels Warmzugversuch und den daraus generierten Fließkurven möglich (vgl. Kapitel 6.2.2), eine realitätsnahe Abbildung des Schneidprozesses für die drei untersuchten Schneidverfahren zu erstellen. Die daraus gewonnen Erkenntnisse helfen bei der Parameterauswahl und die Validierung der experimentell ermittelten Ergebnisse.

## 8.6 Korrosionsuntersuchung

Es wurde untersucht, wie die unterschiedlich ausgeprägten Schneidkanten des Scher-, Beiß- oder Messerschneidens Einfluss auf die Korrosionsbeständigkeit der tauchkathodisch beschichteten Magnesiumbleche nehmen.

Die Salzsprühnebelprüfung wurde nach einem Zyklus (24 h) abgebrochen, da die Bleche bereits zu diesem Zeitpunkt stark korrosiv beansprucht waren, wie in Abbildung 8.54 zu sehen ist.



*Abbildung 8.54: Korrosion der Magnesiumbleche nach Versuchsabbruch (insgesamt 24 h)*

Allgemein ist anhand der Korrosionsuntersuchungen festzustellen, dass hinsichtlich des Korrosionsverhaltens eine geschlossene Schnittlinie bessere Resultate erzeugt. Dies liegt an den qualitativ besseren Schnittflächen gegenüber einer offenen Schnittlinie. Des Weiteren sind die Schnittflächen, die bei erhöhter Temperatur geschnitten wurden, für Blasenbildung im Lack durch Korrosion weniger anfällig. Es ist für alle drei Schneidverfahren festzustellen, dass es zu keinen großflächigen Abplatzungen der Lackschicht bei erhöhten Schneidtemperaturen kam. Das Scherschneiden bei Raumtemperatur erweist sich gegenüber den Keilschneidverfahren als anfälliger für Korrosion.

Eine gemäß DIN EN 13523-8 nachfolgende Auswertung ist in untenstehenden Abbildungen 8.55 bis 8.58 dargestellt.

Die Korrosionstiefe in Millimeter wird gemittelt über vier an der Schneidkante verlaufenden Messpunkten bestimmt. In den nachfolgenden Abbildungen 8.55 bis

8.58 sind für jeweils offene und geschlossene Schnittlinien, die unterschiedlichen untersuchten Temperaturen und die eingesetzten Schneidverfahren dargestellt.

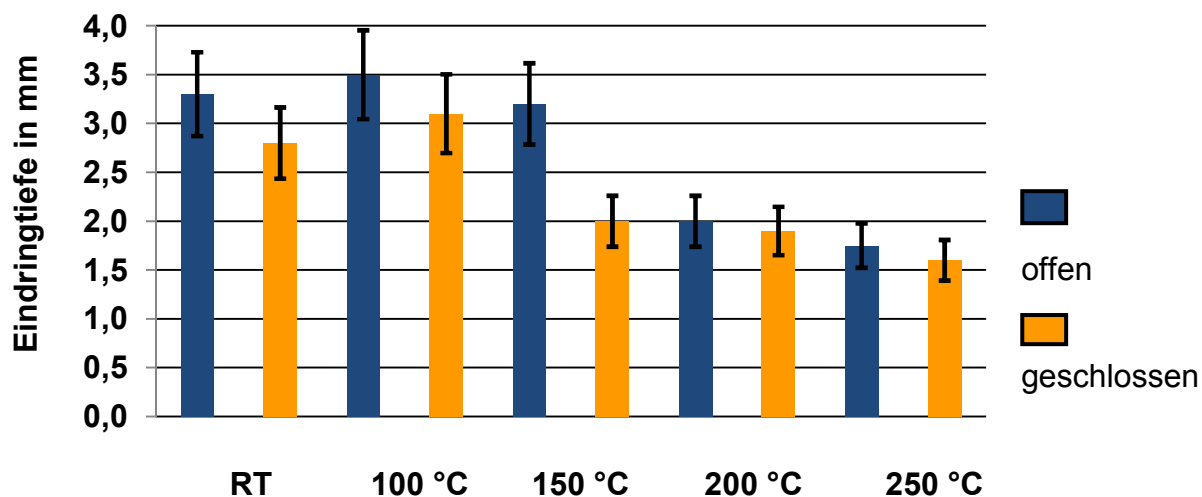


Abbildung 8.55: Durchschnittliche Korrosionstiefe durch Kantenunterwanderung beim Scherschneiden ( $u = 5\%$ )

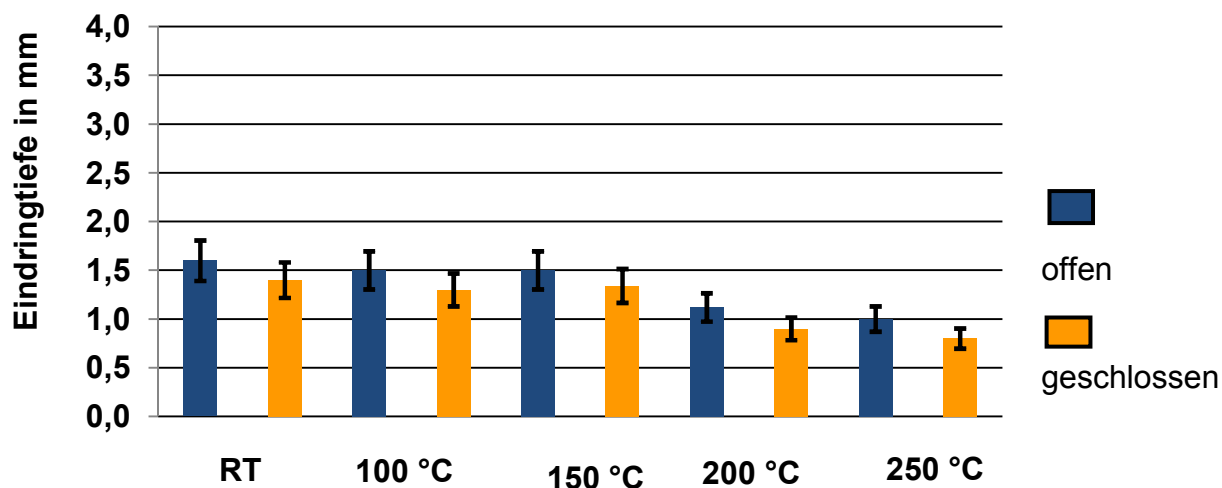


Abbildung 8.56: Durchschnittliche Korrosionstiefe durch Kantenunterwanderung beim Scherschneiden mit negativem Schneidspalt ( $u = -5\%$ )

Die Auswertung der Keilschneidverfahren ist in den Abbildungen 8.57 und 8.58 gezeigt. Hinsichtlich des Korrosionsverhaltens ist der Unterschied zwischen Messer- und Beißschneiden gering. Allerdings ist gegenüber dem Scherschneiden anhand der Korrosionstiefe ein deutlich besseres Korrosionsverhalten zu erkennen. Analog zum



Scherschneiden wirkt sich auch hier eine erhöhte Prozesstemperatur beim Schneiden positiv auf das Korrosionsverhalten der geschnitten Fläche aus.

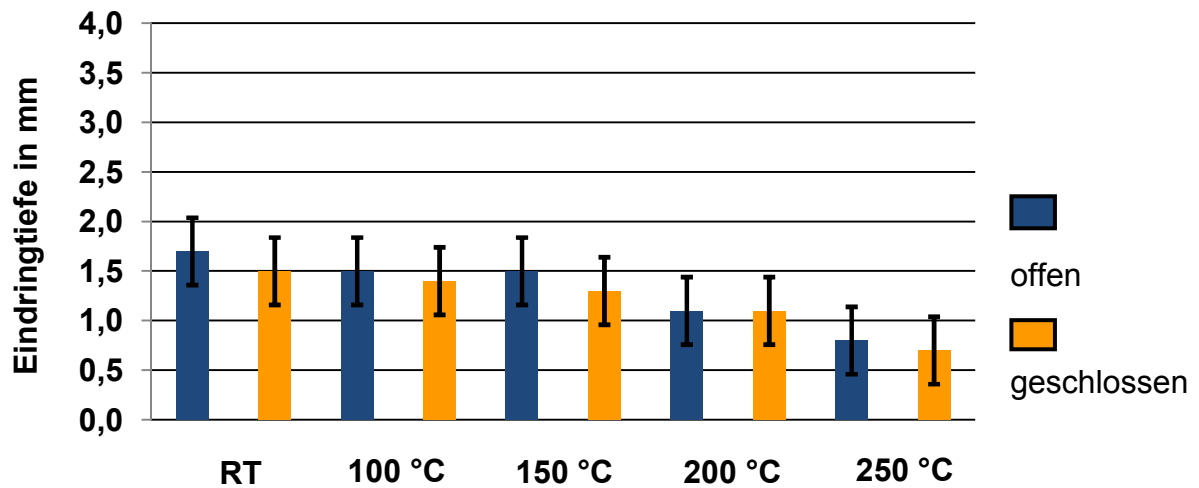


Abbildung 8.57: Durchschnittliche Korrosionstiefe durch Kantenunterwanderung beim Messerschneiden ( $\alpha = 30^\circ$ )

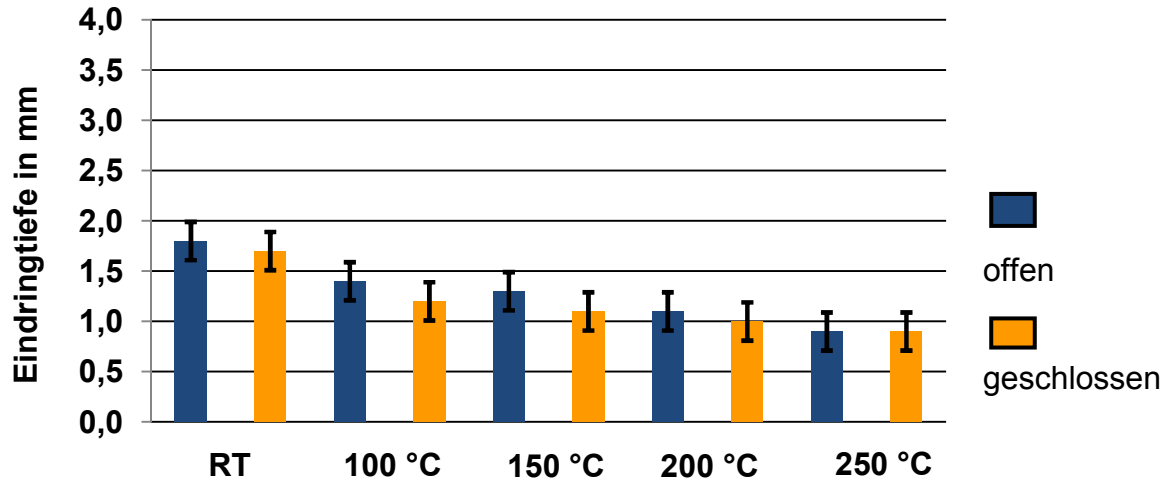


Abbildung 8.58: Durchschnittliche Korrosionstiefe durch Kantenunterwanderung beim Beißschneiden ( $\alpha = 30^\circ$ )

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

Für die im Rahmen dieser Arbeit gestellten Aufgaben lassen sich die Ergebnisse wie folgt zusammenfassen:

Neben dem konventionellen Scherschneiden wurden alternativ die Keilschneidverfahren zum Zerteilen von Magnesiumblechen untersucht. Da, bedingt durch die hexagonal dichteste Gitterstruktur, die Umformeigenschaften von Magnesiumblechwerkstoffen gänzlich anders sind als bei den bekannten duktilen Werkstoffen Stahl und Aluminium, stehen diese Eigenschaften im Mittelpunkt des Interesses. Aufgrund der eingeschränkten Umformbarkeit von Magnesiumblechwerkstoffen bei Raumtemperatur wurde ein werkzeugunabhängiges Heizkonzept entwickelt und in die Schneidverfahren integriert. Des Weiteren wurde ein Kraft-Weg-Messsystem in das Schneidwerkzeug implementiert, um den Schneidkraftbedarf  $F_s$  ermitteln zu können. Dadurch war es möglich, den Schneidkraftbedarf für die unterschiedlichen Schneidverfahren angeben zu können und eine Tendenz abzuleiten.

In einer umfangreichen Versuchsmatrix wurden optimale Schneidparameter experimentell ermittelt und simulativ abgebildet. Mit den unterschiedlichen Prozessparametern konnten die Prozessgrenzen beim Schneiden von Magnesiumblechwerkstoffen dargestellt werden. Zur Charakterisierung der Schnittflächen wurden, nach der Richtlinie VDI 2906 die für das Scherschneiden bereits definierten Kenngrößen auf die Keilschneidverfahren übertragen. Dadurch ist es möglich, einen qualitativen Vergleich zwischen den unterschiedlichen Schneidverfahren aufzuzeigen.

Für einen begrenzt umformbaren Werkstoff, welche die Magnesiumlegierung AZ31 bei Raumtemperatur darstellt, begünstigt eine durch Druckspannungen induzierte Trennung des Materials die Ausbildung eines höheren Glattschnittanteils  $h_s$ . Dies ist insbesondere beim Keilschneiden oder Scherschneiden mit negativem Schneidspalt gegeben. Aufgrund der Druckspannungen wird die Zwillingsbildung erhöht und der Sprödbruch verzögert. Die maximal mögliche Umformung durch Zwillingsbildung,

neben der normalen Versetzungsbewegung, kann bis zu 20 % des gesamten Umformvermögens betragen.

Das bedeutet, dass die Initiierung des Risses später eintritt als bei einer Materialtrennung durch Zug- und Scherspannungen (konventionelles Scherscheiden). Deswegen eignen sich hinsichtlich der Schnittflächenqualität insbesondere die Keilschneidverfahren (Messer- und Beißschneiden), da die Materialtrennung unter Einwirkung von Druckspannungen vonstattengeht. Das Scherschneiden mit negativem Schneidspalt ist hingegen in jedem konventionellen Schneidwerkzeug realisierbar. Insbesondere die Schnittflächenqualität bei Raumtemperatur mit einem Glattschnittanteil  $h_s$  von bis zu 90 % stellt ein mit anderen Werkstoffen vergleichbares Resultat dar. Damit ist eine haftende Lackschicht möglich, um durch den höheren Glattschnittanteil  $h_s$ , einen verbesserter Schnittkantenkorrosionsschutz zu erreichen. In der untenstehenden Tabelle 9.1 sind die zu wählenden Schneidverfahren für Magnesiumlegierungen hinsichtlich Schnittlinienführung und Verarbeitungstemperatur vergleichend aufgelistet.

Für die FE-Simulationen konnte das virtuelle Materialverhalten aufgrund der erweiterten Kennwerte aus dem Warmzugversuch optimiert werden, da für die Schneidsimulation bei erhöhten Temperaturen diese Kennwerte herangezogen wurden. Die vorherrschenden Spannungszustände, die durch die Simulation visualisiert werden konnten, erlauben Rückschlüsse auf die Schnittflächenqualität bei den unterschiedlichen untersuchten Schneidparametern. Sie zeigen des Weiteren den Temperatureinfluss und das charakteristische Bruchbild bei den unterschiedlich eingesetzten Schneidverfahren. Zusammenfassend betrachtet bietet die Simulation von Schneidvorgängen eine Abbildungsmöglichkeit der Schnittflächenqualität, um im Vorfeld Aussagen über das Bruchbild treffen zu können.

Die Korrosionsuntersuchungen zeigten, dass sich, wie es die bessere Schnittkantenqualität erwarten lässt, das temperierte Schneiden positiv auf die Schnittflächenqualität auswirkt. Ebenso ist eine geschlossene Schnittlinienführung aufgrund der qualitativ besseren Schnittfläche hinsichtlich des Korrosionsverhaltens zu

bevorzugen. Besonders gute Ergebnisse konnten hier mit den Keilschneidverfahren erzielt werden.

Die KTL-Beschichtung, die im Automobilsektor lediglich als erste Lackschicht aufgebracht wird, hält dem korrosiven Medium teilweise stand. Die KTL-Lackschicht ist mit 20  $\mu\text{m}$  sehr dünn und sollte bei Magnesiumblechen diesen Wert nicht unterschreiten. Die Keilschneidverfahren konnten hier bessere Ergebnisse erzielen als mit dem Scherschneiden, da großflächige Abplatzungen an der Schnittfläche im Gegensatz zum konventionellen Scherschneiden nicht auftraten.

Aus den Ergebnissen der Korrosionsuntersuchungen ergibt sich ein weiteres Potenzial des Keilschneidens und des Scherschneidens mit negativen Schneidspalt für Magnesiumblechwerkstoffe. Da eine tauchkathodische Lackierung jedoch nur bedingt für Magnesiumblechwerkstoffe geeignet ist und die prozesstechnischen Grenzen erreicht sind, müssen in fortführenden Arbeiten alternative Beschichtungskonzepte entwickelt und hinsichtlich ihrer Korrosionseigenschaften untersucht werden, wie beispielsweise das anodische Tauchlackieren. Um einen realen Einsatz eines Bauteiles aus der Magnesiumknetlegierung hinsichtlich der Korrosion verifizieren zu können, muss ein dynamischer Test im Gesamtfahrzeug erfolgen. Eine zusammenfassende Empfehlung für die in dieser Arbeit variierten Schneidparameter zur Erzeugung optimaler Schnittflächen bei Magnesiumblechwerkstoffen kann der Tabelle 9.1 entnommen werden: Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Schneidverfahren vergleichend gegenübergestellt. Es kann damit ein Prozessfenster definiert werden, aus welchem sich Richtlinien zum Schneiden von Magnesiumknetlegierungen ergeben.

	<b>Scher- schneiden</b>	<b>Scher- schneiden</b> Neg. Schneid- spalt $u$	<b>Messer- schneiden</b>	<b>Beiß- schneiden</b>
<b>Temperatur T</b>	ab 150 °C	RT bis 250°C	ab 150 °C	ab 150 °C
<b>Schnittlinie</b>	geschlossen	offen	offen/ geschlossen	offen
<b>Aktivelement</b>	vollkantig	vollkantig	symmetrisch	symmetrisch
<b>Schneidspalt <math>u</math></b>	5 %	-5 %	---	---
<b>Keilwinkel <math>\alpha</math></b>	---	---	25° 30° 45°	25° 30° 45°

*Tabelle 9.1: Parameterempfehlungen für Schneidprozesse*

## 10 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1:	Prozentualer Verbrauch der erzeugten Tonnage Magnesium im Jahre 2006 nach unterschiedlichen Branchen [WWW06] .....	2
Abbildung 2.1:	Einteilung des Fertigungsverfahren Zerteilen nach DIN 8588 .....	2
Abbildung 2.2:	a) Lochen, geschlossener Schnitt; b) Ausschneiden, geschlossener Schnitt; c) Abschneiden, offener Schnitt .....	3
Abbildung 2.3:	Schematische Darstellung des Scherschneidens mit (links) offener und (rechts) geschlossener Schnittlinienführung .....	6
Abbildung 2.4:	Exemplarische Darstellung der drei Phasen während des Scherschneidvorgangs .....	7
Abbildung 2.5:	Schnittfläche nach VDI 2906 mit Schnittflächenkenngrößen.....	8
Abbildung 2.6:	Schematische Darstellung der Keilschneidverfahren: Beißschneiden (links) und Messerschneiden (rechts).....	10
Abbildung 2.7:	Links: symmetrische Keilform, Keilwinkel $\alpha$ ; Rechts: asymmetrische Keilform, Keilwinkel $\beta$ .....	11
Abbildung 2.8:	Die drei Phasen des Messerschneidens: a) Eindringen; b) Rissinitiierung; c) getrenntes Werkstück .....	11
Abbildung 2.9:	Die drei Phasen des Beißschneidens a) Eindringen; b) Rissinitiierung; c) getrenntes Werkstück .....	12
Abbildung 2.10:	Messerschneiden nach VDI 2906 mit Schnittflächenkenngrößen .....	13
Abbildung 2.11:	Beißschneiden nach VDI 2906 mit Schnittflächenkenngrößen ....	13
Abbildung 2.12:	Trennkräfte F bei unterschiedlichem Keilwinkel $\alpha$ [KLOC06] .....	14
Abbildung 2.13:	Aktive Gleitsysteme (1 Gleitebene (Basisgleitebene) und 3 Gleitrichtungen = 3 Gleitsysteme) bei Raumtemperatur im hexagonal dichtest gepackten Gitter bei Magnesium.....	15
Abbildung 5.1:	Versuchspresse .....	26
Abbildung 5.2:	Schneidwerkzeug mit modular einsetzbarem Stempel und stufenlos einstellbarem Schneidspalt beim Scherschneiden.....	27
Abbildung 5.3:	Beheizter Gegenstempel für das Scherschneiden zur Temperierung des Werkstückes vor dem Schneidvorgang.....	29

---

Abbildung 5.4:	Blechauflageblöcke zur Temperierung des Werkstücks beim Keilschneiden.....	30
Abbildung 5.5:	Aufheizdauer bis zum Erreichen von 225 °C: a) Temperierung bei Vollaufgabe des Stempels beim Scherschneiden; b) beheizte Blechaufgabeblöcke; c) beheiztes Schneidaktivelement.....	31
Abbildung 5.6:	Schematische Darstellung der taktilen Vermessung der Schnittflächen .....	32
Abbildung 5.7:	Kraft-Weg-Aufnahmesystem im Versuchswerkzeug .....	34
Abbildung 5.8:	Schematische Darstellung der Versuchseinrichtung am Lehrstuhl für Fertigungstechnologie der FAU Erlangen-Nürnberg, zur Ermittlung von mechanischen Kennwerten durch Warmzugversuche [MERK06].....	35
Abbildung 5.9	Salzsprühnebelkammer zur Korrosionsprüfung nach DIN 50021 .....	37
Abbildung 6.1:	Gefügestruktur: a) AZ31 Blechdicke 1,25 mm; b) AZ31 Blechdicke 2,00 mm (Längsschliff) .....	38
Abbildung 6.2:	Zugfestigkeit $R_m$ in Abhängigkeit der Walzrichtung von AZ31 für die Blechdicken 1,25 mm und 2,00 mm .....	40
Abbildung 6.3:	Temperaturabhängige Fließkurven für AZ31 der Blechdicke 2,00 mm bei einer Dehnrade $d\phi/dt = 0,1 \text{ s}^{-1}$ . .....	41
Abbildung 6.4:	Temperaturabhängige Fließkurven für AZ31 der Blechdicke 2,00 mm bei einer Dehnrade $d\phi/dt = 0,01 \text{ s}^{-1}$ . .....	42
Abbildung 6.5:	Einschnürungsverhalten bei a) Raumtemperatur und b) 250 °C mit konstanter Dehnrade $d\phi/dt = 0,1 \text{ s}^{-1}$ .....	43
Abbildung 6.6:	Härte in Vickers mit einer Prüfkraft von 100 N der Magnesium- legierung AZ31 für die Blechdicken von 1,25 mm und 2,00 mm .....	44
Abbildung 6.7:	Rauheit in Abhängigkeit der Walzrichtung der Magnesiumlegierung AZ31 für eine Blechdicke von 1,25 mm und 2,00 mm .....	45
Abbildung 7.1:	Nomenklatur zur Zuordnung der geschnitten Blechproben für nachfolgende Untersuchungen .....	47
Abbildung 7.2:	Konzept zum werkzeugunabhängigen temperierten Scherschnei- den .....	48

---

Abbildung 7.3:	Konzept zum werkzeugunabhängigen temperierten Messerschneiden.....	49
Abbildung 7.4:	Konzept zum werkzeugunabhängigen temperierten Beißschneiden .....	50
Abbildung 7.5:	Schnittlinienführung beim Scherschneiden .....	51
Abbildung 7.6:	Links: Schematische Darstellung Scherschneiden mit den zu variierenden Werkzeugparametern; Rechts: Eingesetztes Werkzeugaktivelement zum Scherschneiden mit einer Fase von 1,20 mm x 60° .....	52
Abbildung 7.7:	Symmetrische Keilwinkel für den offenen Schnitt: a) $\alpha = 25^\circ$ ; b) $\alpha = 30^\circ$ ; c) $\alpha = 45^\circ$ ; d) $\alpha = 60^\circ$ .....	53
Abbildung 7.8:	Symmetrische Keilwinkel für den geschlossen Schnitt: a) $\alpha = 25^\circ$ ; b) $\alpha = 30^\circ$ ; c) $\alpha = 60^\circ$ .....	53
Abbildung 7.9:	Asymmetrische Keilwinkel für den offenen Schnitt: a) $\alpha = 22,5^\circ$ ; b) $\alpha = 30^\circ$ .....	53
Abbildung 7.10:	Schnittlinienführung beim Keilschneiden.....	54
Abbildung 7.11	Vernetzung für die unterschiedlichen Schneidsimulationen a) Scherschneiden; b) Messerschneiden; c) Beißschneiden .....	55
Abbildung 7.12:	Schnittlinienprofil am Beispiel eines Magnesiumbleches der .....	57
Abbildung 7.13:	Schema einer tauchkathodischen KTL-Beschichtungsanlage .....	58
Abbildung 7.14:	Korrosionsproben vor dem Salzsprühnebeltest nach DIN 50021 .....	59
Abbildung 8.1:	Schnittflächenprofile bei unterschiedlichen Schneidgeschwindigkeiten: 30 mm/s und 90 mm/s mit Schneidspalt $u = 5\%$ und $u = 20\%$ , offene und geschlossene Schnittlinie bei Raumtemperatur (RT) .....	60
Abbildung 8.2:	Scherschneiden mit $u = 2,5\%$ und $u = 5\%$ bei Raumtemperatur, Schneidstempel mit Fase 1,20 mm x 60 mit offener und geschlossener Schnittlinie.....	61
Abbildung 8.3:	Scherschneiden mit $u = 2,5\%$ und $u = 5\%$ bei Raumtemperatur, Schneidstempel vollkantig mit offener und geschlossener Schnittlinie.....	61



---

Abbildung 8.4:	Scherschneiden mit $u = 10\%$ und $u = 20\%$ bei Raumtemperatur, Schneidstempel vollkantig mit offener und geschlossener Schnittlinie.....	62
Abbildung 8.5:	Schnittflächenprofile beim Scherschneiden von AZ31 mit einem Schneidspalt $u = 2,5\%$ bis $u = 20\%$ für die Blechdicken 2,00 mm und 1,25 mm im offenen und geschlossenen Schnitt mit 30 mm/s Schneidgeschwindigkeit bei Raumtemperatur (RT) .....	62
Abbildung 8.6:	Schnittflächenqualität für Schneidspalte $u = 2,5\%$ bis $20\%$ beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur .....	64
Abbildung 8.7:	Schnittflächenqualität für Schneidspalte $u = 2,5\%$ bis $20\%$ beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur .....	65
Abbildung 8.8:	Bezogener Schneidwiderstand $c$ für unterschiedliche Schneidspalte $u = 2,5\%$ bis $20\%$ beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT).....	66
Abbildung 8.9:	Normierte Schneidkraft $F_S$ für unterschiedliche Schneidspalte $u = 2,5\%$ bis $20\%$ beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT).....	66
Abbildung 8.10:	Bezogener Schneidwiderstand $c$ für unterschiedliche Schneidspalte $u = 2,5\%$ bis $20\%$ beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT).....	66
Abbildung 8.11:	Normierte Schneidkraft $F_S$ für unterschiedliche Schneidspalte $u = 2,5\%$ bis $20\%$ beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT).....	67
Abbildung 8.12:	Bezogener Schneidwiderstand $c$ für unterschiedliche Temperaturen mit einem Schneidspalt $u = 5\%$ beim offenen, vollkantigen Scherschneiden .....	68
Abbildung 8.13:	Normierte Schneidkraft $F_S$ für unterschiedliche Temperaturen mit einem Schneidspalt $u = 5\%$ beim offenen, vollkantigen Scherschneiden .....	68
Abbildung 8.14:	Schnittflächenprofile beim Scherschneiden von AZ31 bei einer offenen und einer geschlossenen Schnittlinienführung für die Blechdicken 2,00 mm und 1,25 mm für unterschiedlichen Schneidspalte $u = 2,5\%$ bis $u = 20\%$ bei $T = RT$ bis $250\text{ °C}$ .....	69

---

Abbildung 8.15:	Schnittflächenqualität bei unterschiedlichen Temperaturen beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit $u = 5\%$ .....	70
Abbildung 8.16:	Bezogener Schneidwiderstand $c$ für unterschiedliche Schneidspalte $u = -5\%$ und $u = -10\%$ beim offenen und geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden.....	72
Abbildung 8.17:	Normierte Schneidkraft $F_S$ für unterschiedliche Schneidspalte $u = -5\%$ und $u = -10\%$ beim offenen und geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden .....	72
Abbildung 8.18:	Schnittflächenqualität für unterschiedliche Schneidspalte $u = -5\%$ und $u = -10\%$ beim offenen und geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden .....	73
Abbildung 8.19:	Bezogener Schneidwiderstand $c$ für unterschiedliche Temperaturen mit einem Schneidspalt $u = -5\%$ beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden.....	74
Abbildung 8.20:	Normierte Schneidkraft $F_S$ für unterschiedliche Temperaturen mit einem Schneidspalt $u = -5\%$ beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden .....	74
Abbildung 8.21:	Schnittflächenqualität für unterschiedliche Temperaturen beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden mit negativem Schneidspalt $u = -5\%$ .....	75
Abbildung 8.22:	Schnittflächenprofile für unterschiedliche Temperaturen beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit negativem Schneidspalt $u = -5\%$ und $u = -10\%$ .....	76
Abbildung 8.23:	Schnittflächenprofile bei unterschiedlichen Schneidgeschwindigkeiten: $30\text{ mm/s}$ und $90\text{ mm/s}$ mit Keilwinkel $\alpha = 25^\circ$ und $\alpha = 30^\circ$ für offene und geschlossene Schnittlinie bei Raumtemperatur (RT) beim Messerschneiden.....	77
Abbildung 8.24:	Materialanhäufung beim Eindringen des Messers bei einem Keilwinkel $\alpha = 45^\circ$ im offenen Schnitt bei Raumtemperatur .....	78
Abbildung 8.25:	Bezogener Schneidwiderstand $c$ für unterschiedliche Keilwinkel $\alpha$ (symmetrisch) und $\beta$ (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Messerschneiden.....	79
Abbildung 8.26:	Normierte Schneidkraft $F_S$ für unterschiedliche Keilwinkel $\alpha$ (symmetrisch) und $\beta$ (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Messerschneiden.....	79

---

Abbildung 8.27:	Bezogener Schneidwiderstand $c$ für unterschiedliche Keilwinkel $\alpha$ (symmetrisch) und $\beta$ (asymmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Messerschneiden .....	79
Abbildung 8.28:	Normierte Schneidkraft $F_S$ für unterschiedliche Keilwinkel $\alpha$ (symmetrisch) und $\beta$ (asymmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Messerschneiden .....	80
Abbildung 8.29:	Schnittflächenprofile für unterschiedliche Keilwinkel $\alpha$ (symmetrisch) und $\beta$ (asymmetrisch) bei offener und geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Messerschneiden .....	81
Abbildung 8.30:	Schnittflächenqualität für unterschiedliche Keilwinkel $\alpha$ (symmetrisch) und $\beta$ (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Messerschneiden .....	81
Abbildung 8.31:	Schnittflächenqualität für unterschiedliche Keilwinkel $\alpha$ (symmetrisch) und $\beta$ (asymmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Messerschneiden .....	82
Abbildung 8.32	Verklebter Butzen beim geschlossenen Messerschneiden von AZ31 mit einem Keilwinkel $\alpha = 60^\circ$ .....	83
Abbildung 8.33:	Bezogener Schneidwiderstand $c$ für unterschiedliche Temperaturen bei einem Keilwinkel $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden .....	83
Abbildung 8.34:	Normierte Schneidkraft $F_S$ für unterschiedliche Temperaturen bei einem Keilwinkel $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden .....	84
Abbildung 8.35:	Schnittflächenprofile für unterschiedliche Temperaturen mit den untersuchten Keilwinkeln $\alpha = 25^\circ$ bis $60^\circ$ (symmetrisch) und den Keilwinkeln $\beta = 22,5^\circ$ und $30^\circ$ bei offener Schnittlinienführung beim Messerschneiden .....	85
Abbildung 8.36	Schnittflächenqualität für unterschiedliche Temperaturen mit einem Keilwinkel $\alpha = 30^\circ$ und für eine offene Schnittlinie beim Messerschneiden .....	86

---

Abbildung 8.37:	Schnittflächenprofile bei unterschiedlichen Schneidgeschwindigkeiten: 30 mm/s und 90 mm/s mit Keilwinkel $\alpha = 25^\circ$ und $\alpha = 30^\circ$ für offene und geschlossene Schnittlinie bei Raumtemperatur (RT) beim Beißschneiden .....	87
Abbildung 8.38:	Bezogener Schneidwiderstand $c$ für unterschiedliche Keilwinkel $\alpha$ (symmetrisch) und $\beta$ (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Beißschneiden .....	88
Abbildung 8.39:	Normierte Schneidkraft $F_S$ für unterschiedliche Keilwinkel $\alpha$ (symmetrisch) und $\beta$ (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Beißschneiden .....	88
Abbildung 8.40:	Bezogener Schneidwiderstand $c$ für unterschiedliche Keilwinkel $\alpha$ (symmetrisch) und $\beta$ (asymmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Beißschneiden.....	89
Abbildung 8.41:	Normierte Schneidkraft $F_S$ für unterschiedliche Keilwinkel $\alpha$ (symmetrisch) und $\beta$ (asymmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Beißschneiden .....	89
Abbildung 8.42:	Schnittflächenprofile für unterschiedliche Keilwinkel $\alpha$ (symmetrisch) und $\beta$ (asymmetrisch) bei offener und geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Beißschneiden.....	90
Abbildung 8.43	Schnittflächenqualität für unterschiedliche Keilwinkeln $\alpha$ (symmetrisch) und $\beta$ (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Beißschneiden .....	90
Abbildung 8.44	Schnittflächenqualität für unterschiedliche Keilwinkel $\alpha$ (symmetrisch) und $\beta$ (asymmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur beim Beißschneiden .....	91
Abbildung 8.45:	Schnittflächenprofile für unterschiedliche Temperaturen mit den untersuchten Keilwinkeln $\alpha = 25^\circ$ bis $60^\circ$ (symmetrisch) und den Keilwinkeln $\beta = 22,5^\circ$ und $30^\circ$ bei offener Schnittlinienführung beim Beißschneiden .....	92

---

Abbildung 8.46:	Bezogener Schneidwiderstand $c$ für unterschiedliche Temperaturen bei einem Keilwinkel $\alpha = 30^\circ$ und bei offener Schnittlinienführung beim Beißschneiden .....	93
Abbildung 8.47:	Normierte Schneidkraft $F_S$ für unterschiedliche Temperaturen bei einem Keilwinkel $\alpha = 30^\circ$ und bei offener Schnittlinienführung beim Beißschneiden .....	93
Abbildung 8.48	Schnittflächenqualität für unterschiedliche Temperaturen mit einem Keilwinkel $\alpha = 30^\circ$ und für eine offene Schnittlinie beim Beißschneiden .....	94
Abbildung 8.49:	Maximal auftretende Zugspannungen in MPa bei Raumtemperatur und offener Schnittlinie sowie einer Eindringtiefe von 0,3 mm .....	97
Abbildung 8.50:	Maximal auftretende Zugspannungen in MPa für das Scherschneiden bei Raumtemperatur: geschlossener Schnitt (links) und offener Schnitt (rechts) .....	97
Abbildung 8.51:	Maximal auftretende Zugspannungen in MPa für das Messer - schneiden bei Raumtemperatur für unterschiedliche Keilwinkel $\alpha = 30 - 60^\circ$ sowie einer Eindringtiefe von 1,00 mm .....	98
Abbildung 8.52:	Maximal auftretende Zugspannungen in MPa für das Beißschneiden bei Raumtemperatur für unterschiedliche Keilwinkel $\alpha = 30-60^\circ$ sowie einer Eindringtiefe von je 0,50 mm je Schneidaktivelement .....	99
Abbildung 8.53:	Maximal auftretende Zugspannungen in MPa für das Scherschneiden mit einem Schneidspalt $u = 5\%$ für unterschiedliche Temperaturen.....	100
Abbildung 8.54:	Korrosion der Magnesiumbleche nach Versuchsabbruch (insgesamt 24 h) .....	101
Abbildung 8.55:	Durchschnittliche Korrosionstiefe durch Kantenunterwanderung beim Scherschneiden ( $u = 5\%$ ) .....	102
Abbildung 8.56:	Durchschnittliche Korrosionstiefe durch Kantenunterwanderung beim Scherschneiden mit negativen Schneidspalt ( $u = -5\%$ ) .....	102
Abbildung 8.57:	Durchschnittliche Korrosionstiefe durch Kantenunterwanderung beim Messerschneiden ( $\alpha = 30^\circ$ ).....	103
Abbildung 8.58:	Durchschnittliche Korrosionstiefe durch Kantenunterwanderung beim Beißschneiden ( $\alpha = 30^\circ$ ).....	103

---

Abbildung 13.1:	Schneidkraft $F_S$ in N für Schneidspalt $u= 2,5$ % beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-13).....	132
Abbildung 13.2:	Schneidkraft $F_S$ in N für Schneidspalt $u= 2,5$ % beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-13).....	132
Abbildung 13.3:	Schneidkraft $F_S$ in N für Schneidspalte $u= 5$ % beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-19).....	133
Abbildung 13.4:	Schneidkraft $F_S$ in N für Schneidspalte $u= 5$ % beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-19).....	133
Abbildung 13.5:	Schneidkraft $F_S$ in N für Schneidspalte $u= 10$ % beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-25).....	134
Abbildung 13.6:	Schneidkraft $F_S$ in N für Schneidspalte $u= 10$ % beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-25).....	134
Abbildung 13.7:	Schneidkraft $F_S$ in N für Schneidspalte $u= 20$ % beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-31).....	135
Abbildung 13.8:	Schneidkraft $F_S$ in N für Schneidspalte $u= 20$ % beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-31).....	135
Abbildung 13.9:	Schneidkraft $F_S$ in N für Schneidspalt $u= 2,5$ % beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-16).....	136
Abbildung 13.10:	Schneidkraft $F_S$ in N für Schneidspalt $u= 2,5$ % beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-16).....	136
Abbildung 13.11:	Schneidkraft $F_S$ in N für Schneidspalte $u= 5$ % beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-22).....	137

---

Abbildung 13.12:	Schneidkraft $F_S$ in N für Schneidspalte $u= 5 \%$ beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-22).....	137
Abbildung 13.13:	Schneidkraft $F_S$ in N für Schneidspalte $u= 10 \%$ beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-28).....	138
Abbildung 13.14:	Schneidkraft $F_S$ in N für Schneidspalte $u= 10 \%$ beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-28).....	138
Abbildung 13.15:	Schneidkraft $F_S$ in N für Schneidspalte $u= 20 \%$ beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-34).....	139
Abbildung 13.16:	Schneidkraft $F_S$ in N für Schneidspalte $u= 20 \%$ beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-34) .....	139
Abbildung 13.17:	Schneidkraftbedarf $F_S$ bei Raumtemperatur mit einem Schneidspalt $u= 2,5 \%$ beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-19-RT).....	140
Abbildung 13.18:	Schneidkraftbedarf $F_S$ bei Raumtemperatur mit einem Schneidspalt $u= 2,5 \%$ beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-19-RT).....	140
Abbildung 13.19:	Schneidkraftbedarf $F_S$ bei 100 °C mit einem Schneidspalt $u= 2,5\%$ beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-19-100).....	141
Abbildung 13.20:	Schneidkraftbedarf $F_S$ bei 100 °C mit einem Schneidspalt $u= 2,5\%$ beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-19-100).....	141
Abbildung 13.21:	Schneidkraftbedarf $F_S$ bei 150 °C mit einem Schneidspalt $u= 2,5\%$ beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-19-150).....	142

---

Abbildung 13.22:	Schneidkraftbedarf $F_S$ bei 150 °C mit einem Schneidspalt $u=2,5\%$ beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-19-150).....	142
Abbildung 13.23:	Schneidkraftbedarf $F_S$ bei 200 °C mit einem Schneidspalt $u=2,5\%$ beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-19-200).....	143
Abbildung 13.24:	Schneidkraftbedarf $F_S$ bei 200 °C mit einem Schneidspalt $u=2,5\%$ beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-19-200).....	143
Abbildung 13.25:	Schneidkraftbedarf $F_S$ bei 250 °C mit einem Schneidspalt $u=2,5\%$ beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-19-250).....	144
Abbildung 13.26:	Schneidkraftbedarf $F_S$ bei 250 °C mit einem Schneidspalt $u=2,5\%$ beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-19-250).....	144
Abbildung 13.27:	Schneidkraftbedarf $F_S$ bei Raumtemperatur mit einem Schneidspalt $u= -5 \%$ beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-37-RT).....	145
Abbildung 13.28:	Schneidkraftbedarf $F_S$ bei Raumtemperatur mit einem Schneidspalt $u= -5 \%$ beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-37-RT).....	145
Abbildung 13.29:	Schneidkraftbedarf $F_S$ bei Raumtemperatur mit einem Schneidspalt $u= -10 \%$ beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-43-RT).....	146
Abbildung 13.30:	Schneidkraftbedarf $F_S$ bei Raumtemperatur mit einem Schneidspalt $u= -10 \%$ beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-43-RT).....	146
Abbildung 13.31:	Schneidkraftbedarf $F_S$ bei Raumtemperatur mit einem Schneidspalt $u= -5 \%$ beim geschlossen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-40-RT).....	147



---

Abbildung 13.32:	Schneidkraftbedarf $F_S$ bei Raumtemperatur mit einem Schneidspalt $u = -5\%$ beim geschlossen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-40-RT).....	147
Abbildung 13.33:	Schneidkraftbedarf $F_S$ bei Raumtemperatur mit einem Schneidspalt $u = -10\%$ beim geschlossen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-46-RT).....	148
Abbildung 13.34:	Schneidkraftbedarf $F_S$ bei Raumtemperatur mit einem Schneidspalt $u = -10\%$ beim geschlossen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-46-RT).....	148
Abbildung 13.35:	Schneidkraft $F_S$ Keilwinkel $\alpha = 25^\circ$ (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (M-2-01) .....	149
Abbildung 13.36:	Schneidkraft $F_S$ für Keilwinkel $\alpha = 25^\circ$ (symmetrisch)) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (M-1-01) .....	149
Abbildung 13.37:	Schneidkraft $F_S$ für Keilwinkel $\alpha = 30^\circ$ (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (M-2-07) .....	150
Abbildung 13.38:	Schneidkraft $F_S$ für Keilwinkel $\alpha = 30^\circ$ (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (M-1-07) .....	150
Abbildung 13.39:	Schneidkraft $F_S$ Keilwinkel $\alpha = 45^\circ$ (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (M-2-13) .....	151
Abbildung 13.40:	Schneidkraft $F_S$ für Keilwinkel $\alpha = 45^\circ$ (symmetrisch)) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (M-1-13) .....	151
Abbildung 13.41:	Schneidkraft $F_S$ Keilwinkel $\alpha = 60^\circ$ (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (M-2-19) .....	152
Abbildung 13.42:	Schneidkraft $F_S$ für Keilwinkel $\alpha = 60^\circ$ (symmetrisch)) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (M-1-19) .....	152

---

Abbildung 13.43:	Schneidkraft $F_S$ für Keilwinkel $\beta = 22,5^\circ$ (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (M-2-25).....	153
Abbildung 13.44:	Schneidkraft $F_S$ für Keilwinkel $\beta = 22,5^\circ$ (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (M-1-25).....	153
Abbildung 13.45:	Schneidkraft $F_S$ für Keilwinkel $\beta = 30^\circ$ (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (M-2-31).....	154
Abbildung 13.46:	Schneidkraft $F_S$ für Keilwinkel $\beta = 30^\circ$ (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (M-1-31).....	154
Abbildung 13.47:	Schneidkraft $F_S$ Keilwinkel $\alpha = 25^\circ$ (symmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (M-2-04).....	155
Abbildung 13.48:	Schneidkraft $F_S$ für Keilwinkel $\alpha = 25^\circ$ (symmetrisch)) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (M-1-04).....	155
Abbildung 13.49:	Schneidkraft $F_S$ für Keilwinkel $\alpha = 30^\circ$ (symmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (M-2-10).....	156
Abbildung 13.50:	Schneidkraft $F_S$ für Keilwinkel $\alpha = 30^\circ$ (symmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (M-1-10).....	156
Abbildung 13.51:	Schneidkraft $F_S$ Keilwinkel $\alpha = 60^\circ$ (symmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (M-2-22).....	157
Abbildung 13.52:	Schneidkraft $F_S$ für Keilwinkel $\alpha = 60^\circ$ (symmetrisch)) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (M-1-22).....	157
Abbildung 13.53:	Schneidkraft $F_S$ für Keilwinkel $\beta = 22,5^\circ$ (asymmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (M-2-28).....	158
Abbildung 13.54:	Schneidkraft $F_S$ für Keilwinkel $\beta = 22,5^\circ$ (asymmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (M-1-28).....	158

- 
- Abbildung 13.55: Schneidkraft  $F_S$  bei Raumtemperatur RT bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden mit einer Blechdicke 1,25 mm (M-2-01-RT) ..... 159
- Abbildung 13.56: Schneidkraft  $F_S$  bei Raumtemperatur RT bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden mit einer Blechdicke 2,00 mm (M-1-01-RT) .. 159
- Abbildung 13.57: Schneidkraft  $F_S$  bei 100 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden mit einer Blechdicke 1,25 mm (M-2-01-100) ..... 160
- Abbildung 13.58: Schneidkraft  $F_S$  bei 100 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden mit einer Blechdicke 2,00 mm (M-1-01-100) ..... 160
- Abbildung 13.59: Schneidkraft  $F_S$  bei 150 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden mit einer Blechdicke 1,25 mm (M-2-01-150) ..... 161
- Abbildung 13.60: Schneidkraft  $F_S$  bei 150 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden mit einer Blechdicke 2,00 mm (M-1-01-150) ..... 161
- Abbildung 13.61: Schneidkraft  $F_S$  bei 200 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden mit einer Blechdicke 1,25 mm (M-2-01-200) ..... 162
- Abbildung 13.62: Schneidkraft  $F_S$  bei 200 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden mit einer Blechdicke 2,00 mm (M-1-01-200) ..... 162
- Abbildung 13.63: Schneidkraft  $F_S$  bei 250 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden mit einer Blechdicke 1,25 mm (M-2-01-250) ..... 163
- Abbildung 13.64: Schneidkraft  $F_S$  bei 250 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden mit einer Blechdicke 2,00 mm (M-1-01-250) ..... 163
- Abbildung 13.65: Schneidkraft  $F_S$  Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (B-2-01) beim Beißschneiden..... 164
- Abbildung 13.66: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (B-1-01) beim Beißschneiden ..... 164

- 
- Abbildung 13.67: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (B-2-07) beim Beißschneiden ..... 165
- Abbildung 13.68: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (B-1-07) beim Beißschneiden ..... 165
- Abbildung 13.69: Schneidkraft  $F_S$  Keilwinkel  $\alpha = 45^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (B-2-13) beim Beißschneiden..... 166
- Abbildung 13.70: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\alpha = 45^\circ$  (symmetrisch)) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (B-1-13) beim Beißschneiden ..... 166
- Abbildung 13.71: Schneidkraft  $F_S$  Keilwinkel  $\alpha = 60^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (B-2-19) beim Beißschneiden..... 167
- Abbildung 13.72: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\alpha = 60^\circ$  (symmetrisch)) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (B-1-19) beim Beißschneiden ..... 167
- Abbildung 13.73: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\beta = 22,5^\circ$  (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (B-2-25) beim Beißschneiden ..... 168
- Abbildung 13.74: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\beta = 22,5^\circ$  (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (B-1-25) beim Beißschneiden ..... 168
- Abbildung 13.75: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\beta = 30^\circ$  (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (B-2-31) beim Beißschneiden ..... 169
- Abbildung 13.76: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\beta = 30^\circ$  (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (B-1-31) beim Beißschneiden ..... 169
- Abbildung 13.77: Schneidkraft  $F_S$  Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$  (symmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (B-2-04) beim Beißschneiden ..... 170
- Abbildung 13.78: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$  (symmetrisch)) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (B-1-04) beim Beißschneiden ..... 170

- 
- Abbildung 13.79: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$  (symmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (B-2-10) beim Beißschneiden ..... 171
- Abbildung 13.80: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$  (symmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (B-1-10) beim Beißschneiden ..... 171
- Abbildung 13.81: Schneidkraft  $F_S$  Keilwinkel  $\alpha = 60^\circ$  (symmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (B-2-22) beim Beißschneiden ..... 172
- Abbildung 13.82: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\alpha = 60^\circ$  (symmetrisch)) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (B-1-22) beim Beißschneiden ..... 172
- Abbildung 13.83: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\beta = 22,5^\circ$  (asymmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (B-2-28) beim Beißschneiden ..... 173
- Abbildung 13.84: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\beta = 22,5^\circ$  (asymmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (B-1-28) beim Beißschneiden ..... 173
- Abbildung 13.85: Schneidkraft  $F_S$  bei Raumtemperatur RT bei einem Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$ , im offenen Schnitt beim Beißschneiden mit einer Blechdicke 1,25 mm (B-2-07-RT) ..... 174
- Abbildung 13.86: Schneidkraft  $F_S$  bei Raumtemperatur RT bei einem Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$ , im offenen Schnitt beim Beißschneiden mit einer Blechdicke 2,00 mm (B-1-07-RT) ..... 174
- Abbildung 13.87: Schneidkraft  $F_S$  bei 100 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$ , im offenen Schnitt beim Beißschneiden mit einer Blechdicke 1,25 mm (B-2-07-100)..... 175
- Abbildung 13.88: Schneidkraft  $F_S$  bei 100 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$ , im offenen Schnitt beim Beißschneiden mit einer Blechdicke 2,00 mm (B-1-07-100)..... 175
- Abbildung 13.89: Schneidkraft  $F_S$  bei 150 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$ , im offenen Schnitt beim Beißschneiden mit einer Blechdicke 1,25 mm (B-2-07-150)..... 176
- Abbildung 13.90: Schneidkraft  $F_S$  bei 150 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$ , im offenen Schnitt beim Beißschneiden mit einer Blechdicke 2,00 mm (B-1-07-150)..... 176

---

Abbildung 13.91: Schneidkraft $F_S$ bei 200 °C bei einem Keilwinkel $\alpha = 30^\circ$ , im offenen Schnitt beim Beißschneiden mit einer Blechdicke 1,25 mm (B-2-07-200).....	177
Abbildung 13.92: Schneidkraft $F_S$ bei 200 °C bei einem Keilwinkel $\alpha = 30^\circ$ , im offenen Schnitt beim Beißschneiden mit einer Blechdicke 2,00 mm (B-1-07-200).....	177
Abbildung 13.93: Schneidkraft $F_S$ bei 250 °C bei einem Keilwinkel $\alpha = 30^\circ$ , im offenen Schnitt beim Beißschneiden mit einer Blechdicke 1,25 mm (B-2-07-250).....	178
Abbildung 13.94: Schneidkraft $F_S$ bei 250 °C bei einem Keilwinkel $\alpha = 30^\circ$ , im offenen Schnitt beim Beißschneiden mit einer Blechdicke 2,00 mm (B-1-07-250).....	178

## 11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 6.1:	Chemische Zusammensetzung der Magnesiumlegierung AZ31 (Werte sind in Gewichts-% angegeben) .....	39
Tabelle 7.1:	Übersicht der Parametervariationen für das Scher- und Keilschneiden.....	46
Tabelle 8.1:	Vergleich der Schneidverfahren.....	96
Tabelle 9.1:	Parameterempfehlungen für Schneidprozesse .....	107

## 12 Literaturverzeichnis

- [BARN92] Barnes, L.T.  
Rolled Magnesium Products  
Proceedings of the 49<sup>th</sup> Annual World Conference,  
International Magnesium Association; Vol. 2; 1992; S. 29-43
- [BARN07] Barnett, M.R.  
Twinning and the ductility of magnesium alloys  
Part I: "Tension" twins;  
Materials Science and Engineering A ; Elsevier ;2007; S. 8-16
- [BECK97] Becker, J.; Fischer, G.; Schemme, K.  
Metall, Nr. 9, S.258; 1998  
Springer Verlag; Berlin; 1997
- [BEHR04] Behrens, B. –A.; Schaeper, E.  
New shearing technique with adjustable blade clearance and online  
blade clearance control;  
MatarPraha 2004 Machine Tools, automation and robotics in  
mechanical engineering; Proceedings of section 2
- [BEGR01] Beitz, W.; Grote, K.-H.  
Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau, 20. Auflage  
Springer-Verlag; Berlin; 2001;
- [BOGO05] Bogon, P.  
Werkzeugtechnik zur Magnesium-Blechumformung - ein Beispiel;  
[www.UTFscience.de](http://www.UTFscience.de); 2005
- [BOLU02] Bolurchi, E.  
Untersuchungen über das Scherschneiden dünnwandiger Magnesium-  
Druckgussteile;  
Dissertation; Hieronymus; Technische Universität München, 2002; S. 4-  
14; S.79-136
- [CAMM86] Cammann, J.  
Untersuchungen zur Verschleißminderung an Scherschneidwerkzeugen  
der Blechbearbeitung durch Einsatz geeigneter Werkstoffe und Be-  
schichtungen; Dissertation; Technische Hochschule Darmstadt, 1986;  
S. 282-383
- [CAOO6] Cao, X., Jahazi, M; Mehta, R.:  
Aerospace Manufacturing Technology Center, Institute for Aerospace  
Research,FSW of aerospace Mg alloy;  
TWI Ltd. (Hrsg.): Proceedings of 6<sup>th</sup> International Friction Stir Welding  
Symposium; Saint-Sauveur (Kanada); 2006
- [CART08] Carter, J.T.; Verma, R.  
Mechanical behavior of AZ31 sheet metals at RT and elevated Tem-  
peratures; Proceedings of the Symposium Held During the TMS  
Magnesium Technology; 2008; S. 69-74



- [DIN6930] N. N.  
DIN 6930: Stanzteile aus Stahl, Teil 2: Allgemeintoleranzen,  
DIN e.V.1989
- [DIN8588] N. N.  
DIN 8588: Fertigungsverfahren Zerteilen - Einordnung, Unterteilung,  
Begriffe; DIN e.V. 2003
- [DIER07] Dieringa, H.; Kainer, K.U.  
Magnesium - der Zukunftswerkstoff für die Automobilindustrie?, Unter-  
teilung, Materialwissenschaften und Werkstofftechnik; Vol.38; No.2  
Wiley- Vhc Verlag Weinheim; 2007
- [DOEG03] Doege, E.; Schaeper, E.: Schwingungsüberlagertes Scherschneiden  
von Feinblechen; Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben DFG  
190/146-1; Universität Hannover; 2003; S. 2-10
- [DOEG00] Doege, E.; Janssen, S.; Elend, L.-E.  
Grundlagen zum Umformverhalten von Magnesium;  
In: Kammer, C.; Magnesium Taschenbuch  
Aluminium- Verlag; Düsseldorf, 2000; S. 357- 359
- [DROE99] Dröder, K.  
Untersuchungen zum Umformen von Feinblechen aus Magnesiumknet-  
legierungen;  
Dissertation, Universität Hannover; 1999; S. 16-28; S. 30-55
- [EBEL08] Ebeling, T.; Hartig, C.; Laser, T.  
Deformation mechanisms of AZ31 magnesium alloy; Proceedings; S.  
41-46; Magnesium Technology; 2008
- [EIBI04] Eibisch, H.; Hartmann, M.; Singer, R.F.  
Druckguss-Praxis; Vol. 6  
Schiele & Schön Verlag; 2004; S.211-220
- [ENSS01] Enß, J.et al.  
In: ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 103; 2001; S. 142-145
- [ENGL04] Engl, B.  
Eine neue Herstellungsmethode und AnwendungsPotenzial für  
Magnesiumblech;  
In: ThyssenKrupp Techform; 12/2004, S.14-21
- [ERDM04] Erdmann, C. M.  
Mechanismen der Flitterentstehung beim Scherschneiden von Presstei-  
len aus Aluminiumblech;  
Dissertation Hieronymus; Technische Universität München; 2004;
- [FANG02] Fang, G.  
Finite element simulation of the effect of clearance on the forming quali-  
ty in the blanking process  
Journals of Materials Processing Technology; Volume 122, Number 2,  
2002; S. 249-254

- 
- [FROM04] Frommeyer, X.; Brück, U.  
Ausgekochter Stahl für Autos von Morgen  
MaxPlanckForschung 3/2004
- [FUGG84] Fugger, B.  
Untersuchung der Verschleißvorgänge beim Scherschneiden von Feinblechen;  
Dissertation; Universität Hannover; 1984
- [GEHR03] Gehrman, R.  
Magnesium – Einfluss der Textur auf das Umformverhalten  
Dissertation  
Technische Hochschule Aachen; 2003; S. 15-121; S. 42-51
- [GOLD03] Goldschmidt, A.; Streitberger, H.-J.:  
BASF Handbook on Basics of Coating Technology  
Vincent Hannover; 2003
- [HATA03] Hatanaka, N.  
Finite element simulation of the shearing mechanism in the blanking of sheet metal; Journal of Materials Processing Technology; 2003; S. 628–634
- [HÄUS06] Häußinger, S.  
Eigenschaftsvergleich von Ziehteilen aus Aluminium- und Magnesiumblech;  
Dissertation; Hieronymus Verlag; Technische Universität München; 2006; S. 3-16; S. 30-38
- [HECH07] Hecht, J.  
Werkstoffcharakterisierung und Prozessauslegung für die wirkmedienbasierte Doppelblech-Umformung von Magnesiumlegierungen  
Dissertation; Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg; Meisenbach Verlag, Bamberg; 2007; S. 7-49
- [HESS05] Hesselbach, J., P.  
Werkstoffe 4;  
Vorlesungsunterlagen, Universität Kassel, 2005
- [HOOG99] Hoogen, M  
Einfluß der Werkzeuggeometrie auf das Scherschneiden und Reißen von Aluminiumfeinblechen,  
Dissertation, Hieronymus Verlag; Technische Universität München; 1999; S. 3-24; S. 71-151
- [ILSC05] Ilschner, B; Singer, F.  
Werkstoffwissenschaften und Fertigungstechnik4. Auflage  
Springer-Verlag Berlin; 2005
- [KAES90] Kaesche, H.  
Die Korrosion der Metalle; 3. Auflage  
Springer Verlag Berlin; 1990

- [KAIN00] Kainer, K. U.  
Magnesium – Eigenschaften, Anwendungen, Potenziale;  
Wiley-Vch Verlag Weinheim; 2000
- [KAMM00] Kammer, C.  
Magnesiumtaschenbuch;  
Aluminum – Verlag Düsseldorf; 2000; S. 90ff; 126ff; 195ff; 242ff; 296ff;  
357ff; 363-365; 415-416
- [KELL97] Kell, E.; König, W.  
Metalltechnik – Der Werkzeugbau,  
Europa Lehrmittel Haan – Gruiten; 1997
- [KIEN59] Kienzle, O.; Timmerbeil, F.; Jordan, J.  
Einige Untersuchungen über das Schneiden von Blechen, West-  
deutscher Verlag Köln und Opladen; 1959
- [KLEI02] Kleiner, S.  
Magnesium und seine Legierungen  
Feinstbearbeitung technischer Oberflächen - 6. Internationales IWF-  
Kolloquium; Egerkingen, Schweiz ; 2002; S. 19-28
- [KLOC06] Klocke, F.  
Fertigungsverfahren 4, Umformen;  
Springer Verlag Berlin; 2006
- [KIRK81] Kirk-Othmer, N.N.  
Encyclopedia of Chemical Technology, Vol. 14, Third Edition  
John Wiley & Sons; 1981
- [LANG90] Lange, K.  
Lehrbuch der Umformtechnik;  
Band 3: Blechbearbeitung;  
Springer Verlag; 1990; S.110 ff
- [MAIE04] Maier-Komor, P.:  
Auswahl von Bruchkriterien für Schneidsimulationen mit Materialtren-  
nung;  
Semesterarbeit; Technische Universität München; 2004
- [MAIE05] Maier-Komor, P.  
Definition der Prozessparameter für das gegenläufige Nachschneidver-  
fahren anhand von Simulationen;  
Diplomarbeit ; Technische Universität München; 2005
- [MERK03] Merkel, M.; Thomas, K.H.  
Taschenbuch der Werkstoffe; 6.Auflage  
Carl Hanser Verlag München; 2003
- [MERK06] Merklein, M.  
Charakterisierung von Blechwerkstoffen für den Leichtbau;  
Habilitation; Springer-Verlag Berlin; Friedrich-Alexander Universität Er-  
langen-Nürnberg; 2006

- [MWEM98] Mwembela, A. et.al. :  
Hot workability of five commercial Magnesium alloys  
In: Magnesium Alloys and their Applications  
Werkstoffinformationsgesellschaft; Frankfurt; 1998; S. 215/222
- [NEUG08] Neugebauer, R.; Kräusel, V.; Weigel, P.  
Scherschneiden von Mehrfachblechen bei minimalen Formabweichungen;  
Intermezzo der Werkstoffe;  
EFB-Kolloquium; 2008; S. 129-144
- [NOST03] Noster, U.  
Zum Verformungsverhalten der Magnesiumbasislegierungen AZ31 und AZ91 bei zyklischen und quasi-statischen Beanspruchungen im Temperaturbereich 20-300 °C;  
Dissertation; Universität Kassel; 2003
- [PETR07] Petry, R.  
Untersuchungen an bandlackierten Feinblechen zur Minimierung der Schnittkantenkorrosion;  
Dissertation; Hieronymus; Technische Universität München; 2007
- [PIRC02] Pircher, H.; Weber; M.; Kawalla, R  
Magnesiumbleche für den Karosseriebau;  
In: Neuere Entwicklungen in der Blechumformung;  
Werkstoff- Informationsgesellschaft; Stuttgart; 2002; S. 251-262
- [POEL97] Pöllmann, A.:  
Prozessparameter beim Scherschneiden von Karosserieblechteilen.  
Dissertation; Technische Universität; Berlin; 1997
- [RICK07] Ricken, H:  
Spanloses Trennen von Magnesiumguss;  
Tagung Leichtbau in Magnesium; Landshut; 2007
- [SIEB01] Siebel, G: Physikalische Eigenschaften des Magnesiumeinkristalls und ihre Bedeutung für den Vielkristall; Magnesium und seine Legierungen;  
Springer Verlag; 2001; S. 18-36
- [SPUR85] Spur, G.; Stöferle, T.  
Handbuch der Fertigungstechnik; Band 2;  
Carl Hanser Verlag; München; 1985; S.1381
- [STER03] Stern, M.  
Trennen durch Zerteilen;  
Oberstufenzentrum OSZ; Berlin; 2003
- [STRO97] Strobl, C.  
Oberflächentechnik im Automobil – Leichtbau  
Galvanotechnik 88; 1997; S. 405/417
- [TAUP96] Taupin, E.:  
Material fracture and burr formation in blanking results of FEM Simulation and comparison with experiments, Journal of Materials Processing Technology; Volume 59; 1996; S. 68-78

- [TIMM56] Timmerbeil, F.  
Untersuchung des Schneidvorganges bei Blech, insbesondere beim geschlossenen Schnitt, Dissertation Technische Hochschule Darmstadt;1956
- [TOMA91] Tomac, N; Toenessen; K  
Formation of Flank Build-up in Cutting Magnesium Alloys;  
Annals of CIRP; Vol 40/1;  
Springer Verlag Berlin;1991
- [VDI2906] N. N.  
VDI-Richtlinie 2906: Schnittflächenqualität beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von Werkstücken aus Metall; VDI-Verlag Düsseldorf; 1994
- [VDI 2906] VDI 2906 Blatt 2  
Schnittflächenqualität beim Schneiden, Beschneiden und Lochen von Werkstücken aus Metall;  
Verein Deutscher Ingenieure
- [WEND98] Wendler-Kalsch, E.; Gräfen H.  
Korrosionsschadenkunde;  
Springer Verlag; Berlin; 1998
- [WOHN06] Wohnig, W., Prof.  
Entwicklung von Fahrzeugkarosserien;  
Vorlesungsunterlagen; Technische Universität München; 2006
- [WWW01] Bayerisches Online-Materialinformationssystem;  
<http://www.werkstoffe.de>
- [WWW02] N.N.  
<http://www.goodfellow.com>
- [WWW03] N.N.  
Forschungszentrum Jülich  
<http://www.fz-juelich.de>
- [WWW04] N.N.  
<http://de.wikipedia.org>
- [WWW06] N.N.  
U.S. Geological Survey/ China Magnesium Assosiation;  
<http://www.intlomag.org/files/yend2006.pdf>
- [WWW08] HS-Merseburg:  
Trennen, Kapitel 3; Fachhochschule Merseburg;  
<http://www.inw.hs-merseburg.de/fileadmin/mitarbeiter/lfa/schwammel/kap3a.pdf>

## 13 Appendix

### 13.1 Scherschneiden

#### 13.1.1 Scherscheiden mit Schneidspalt $u$ von 2,5 % bis 20 % (offen)

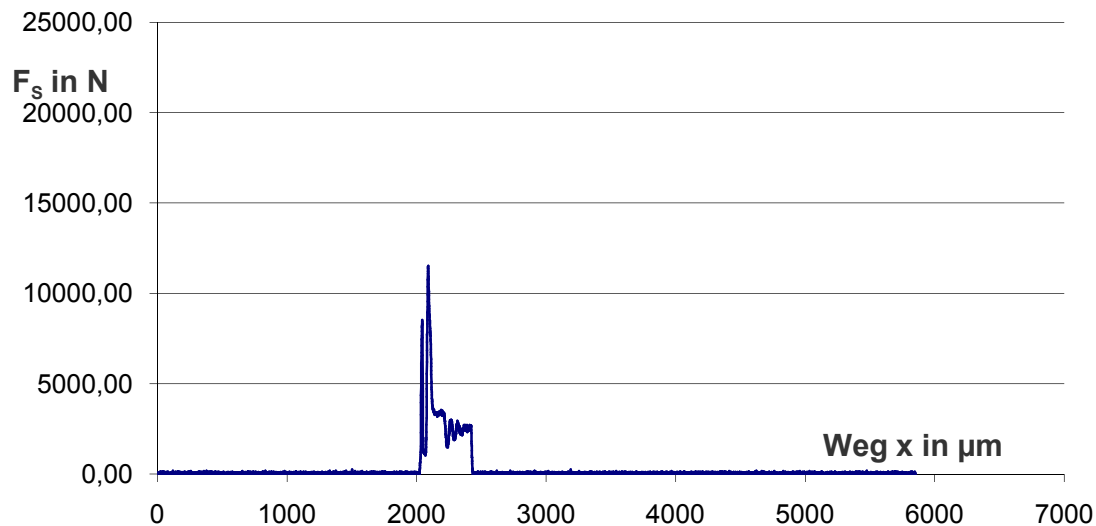


Abbildung 13.1: Schneidkraft  $F_s$  in N für Schneidspalt  $u = 2,5\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-13)

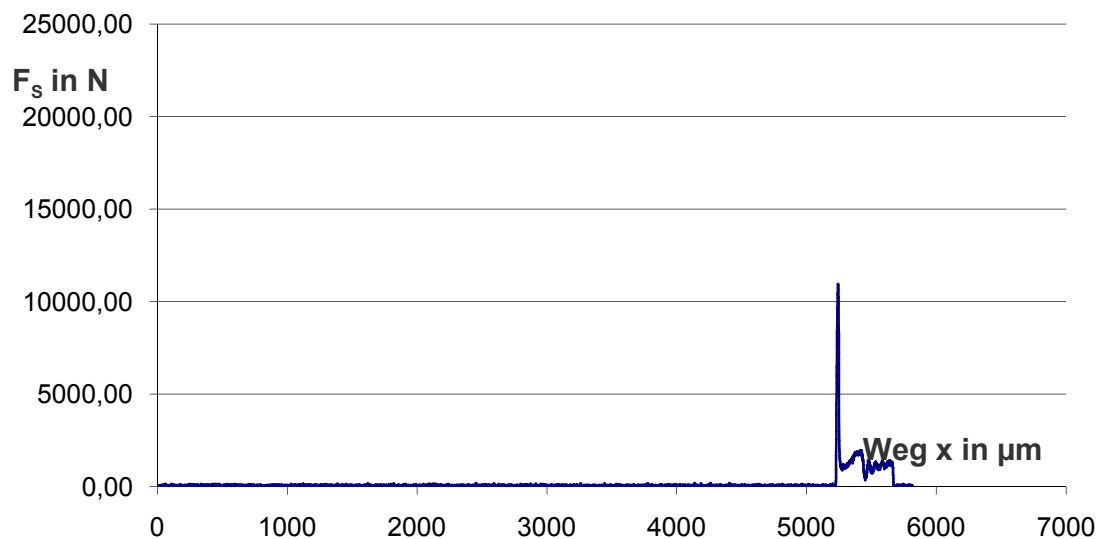


Abbildung 13.2: Schneidkraft  $F_s$  in N für Schneidspalt  $u = 2,5\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-13)

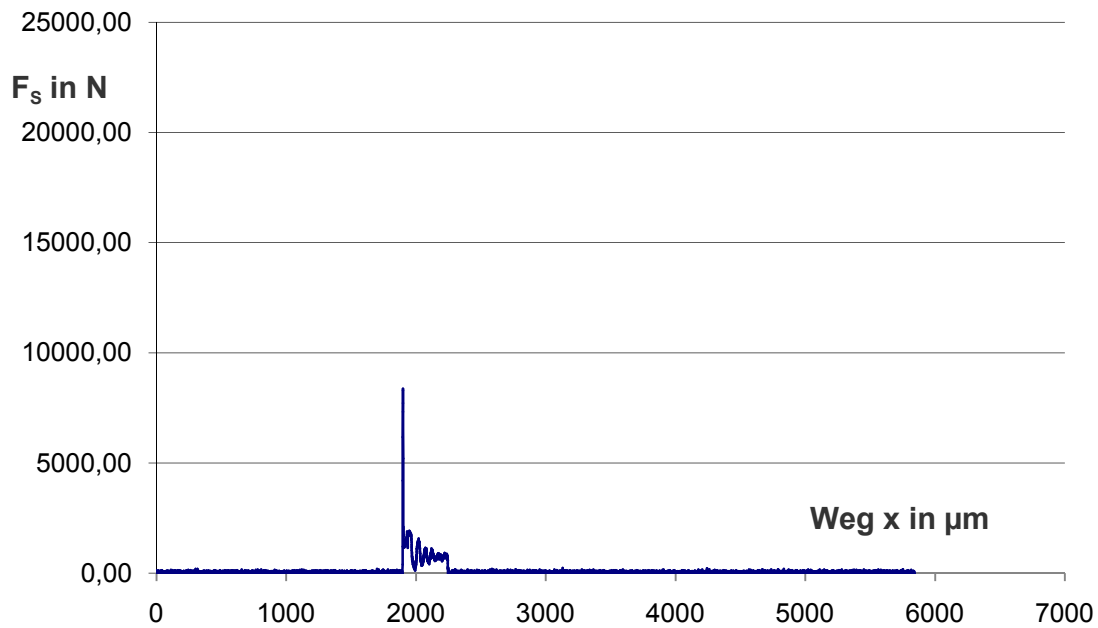


Abbildung 13.3: Schneidkraft  $F_s$  in N für Schneidspalte  $u=5\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-19)

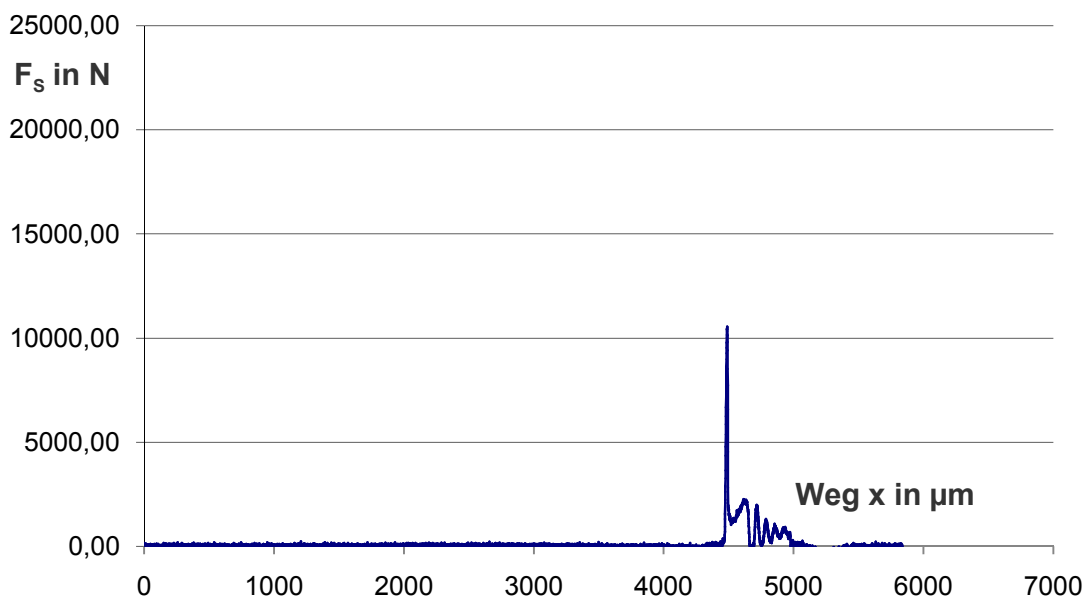


Abbildung 13.4: Schneidkraft  $F_s$  in N für Schneidspalte  $u=5\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-19)

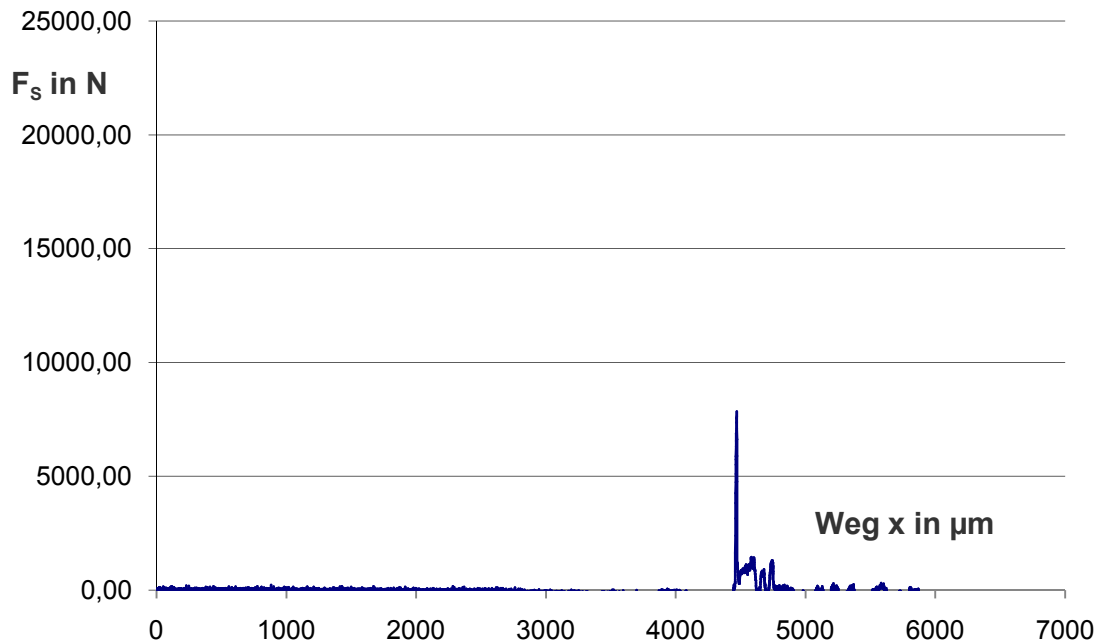


Abbildung 13.5: Schneidkraft  $F_s$  in N für Schneidspalte  $u= 10\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-25)

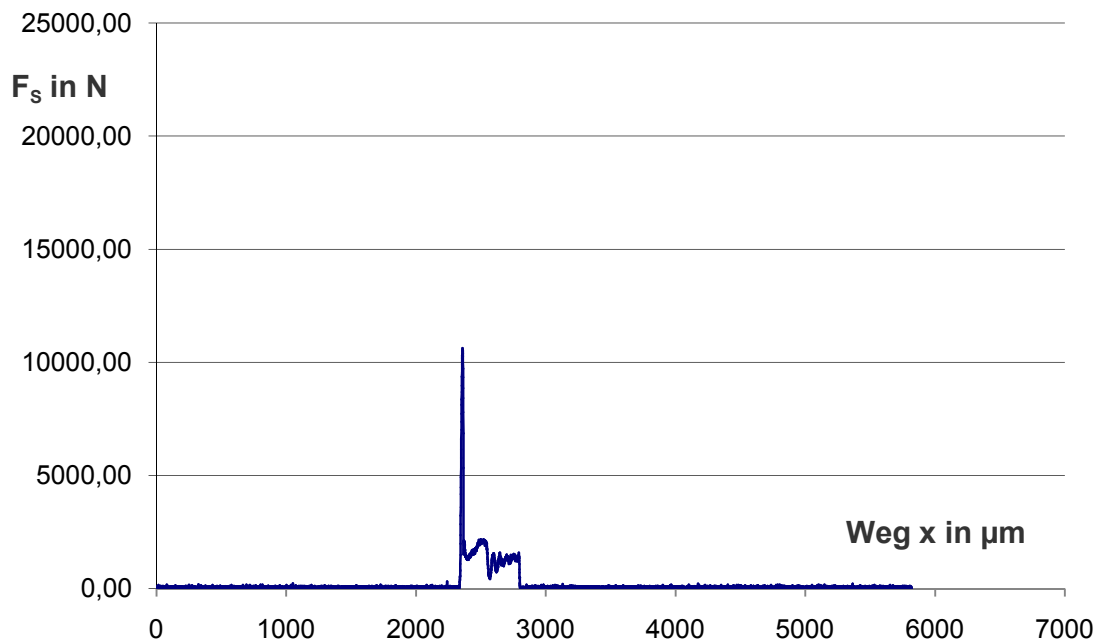


Abbildung 13.6: Schneidkraft  $F_s$  in N für Schneidspalte  $u= 10\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-25)



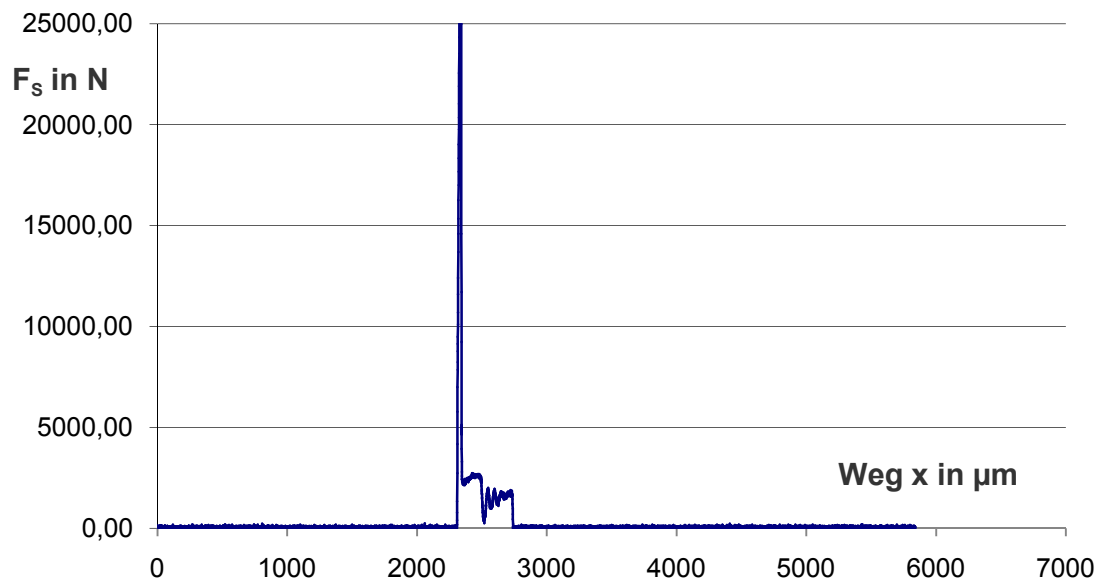


Abbildung 13.7: Schneidkraft  $F_S$  in N für Schneidspalte  $u= 20 \%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-31)

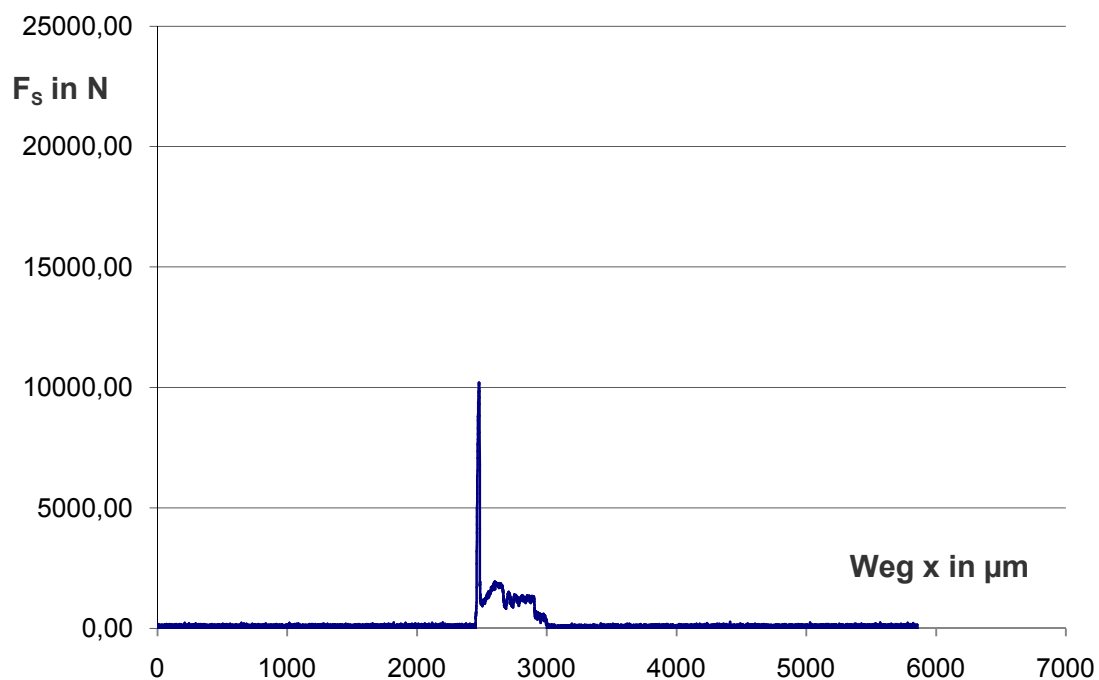


Abbildung 13.8: Schneidkraft  $F_S$  in N für Schneidspalte  $u= 20 \%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-31)

### 13.1.2 Scherscheiden mit Schneidspalt $u$ von 2,5 % bis 20 % (geschlossen)

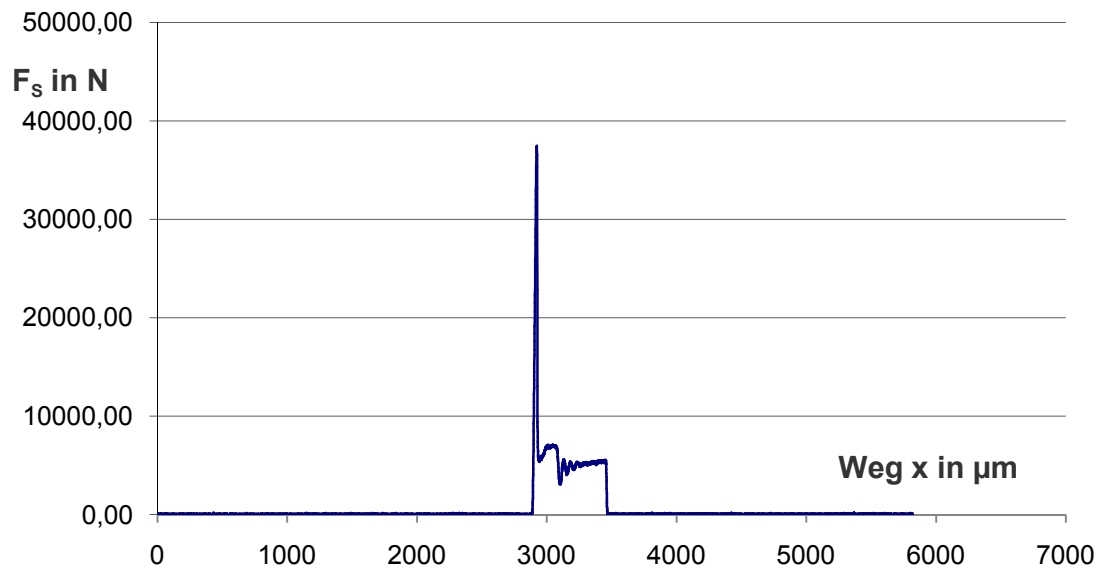


Abbildung 13.9: Schneidkraft  $F_s$  in N für Schneidspalt  $u = 2,5\%$  beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-16)

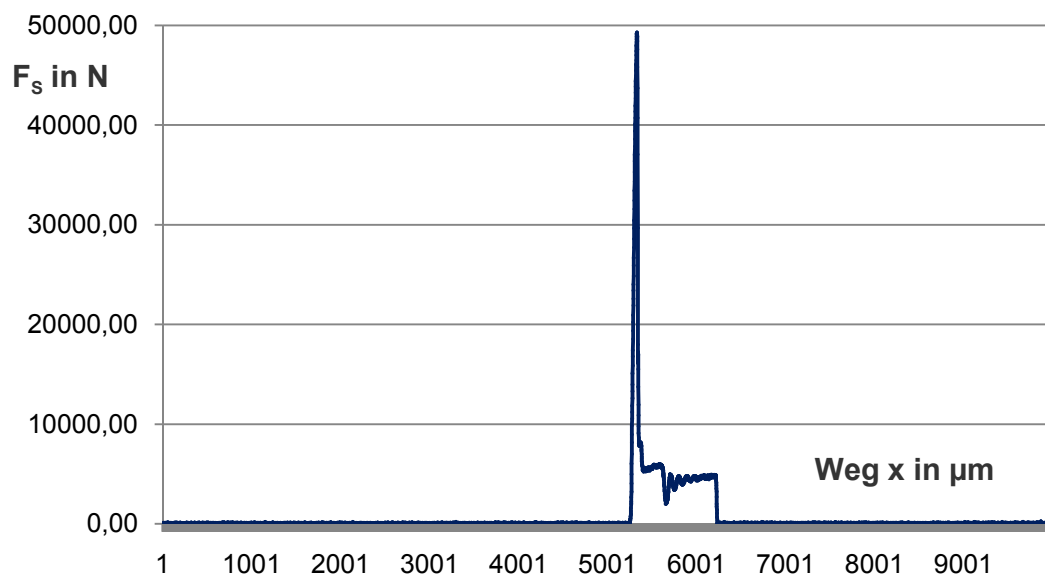


Abbildung 13.10: Schneidkraft  $F_s$  in N für Schneidspalt  $u = 2,5\%$  beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-16)

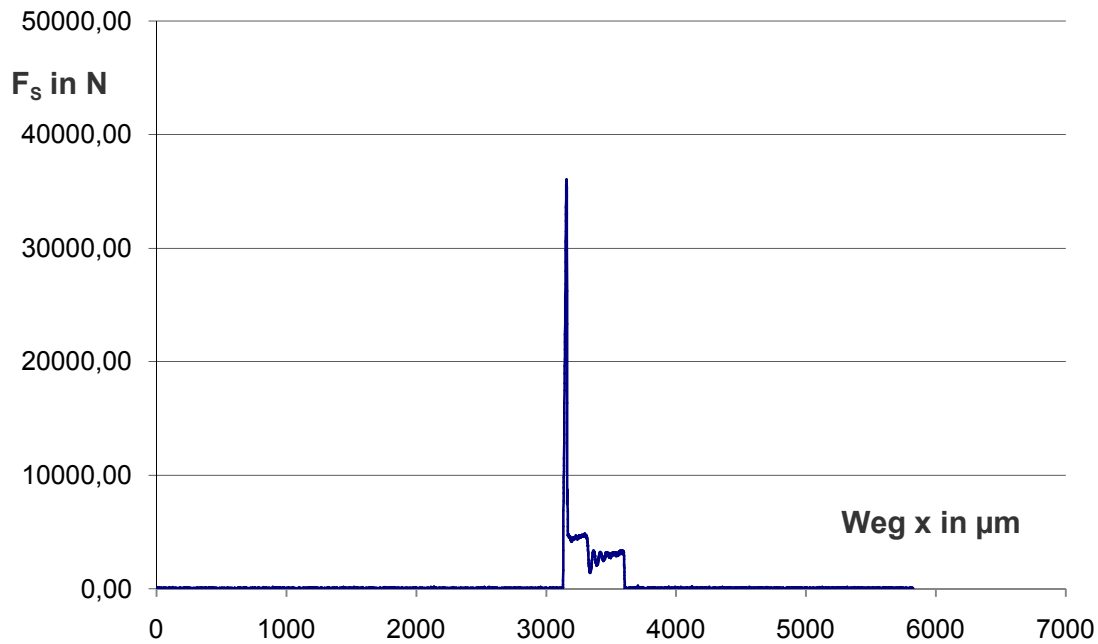


Abbildung 13.11: Schneidkraft  $F_S$  in N für Schneidspalte  $u= 5\%$  beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-22)

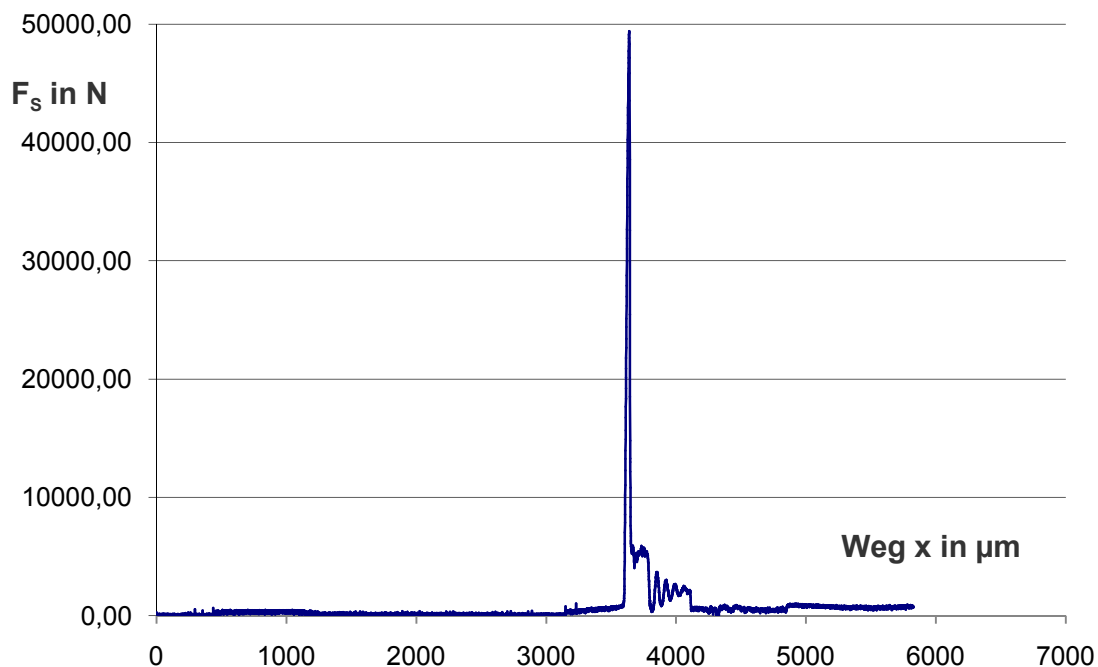


Abbildung 13.12: Schneidkraft  $F_S$  in N für Schneidspalte  $u= 5\%$  beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-22)

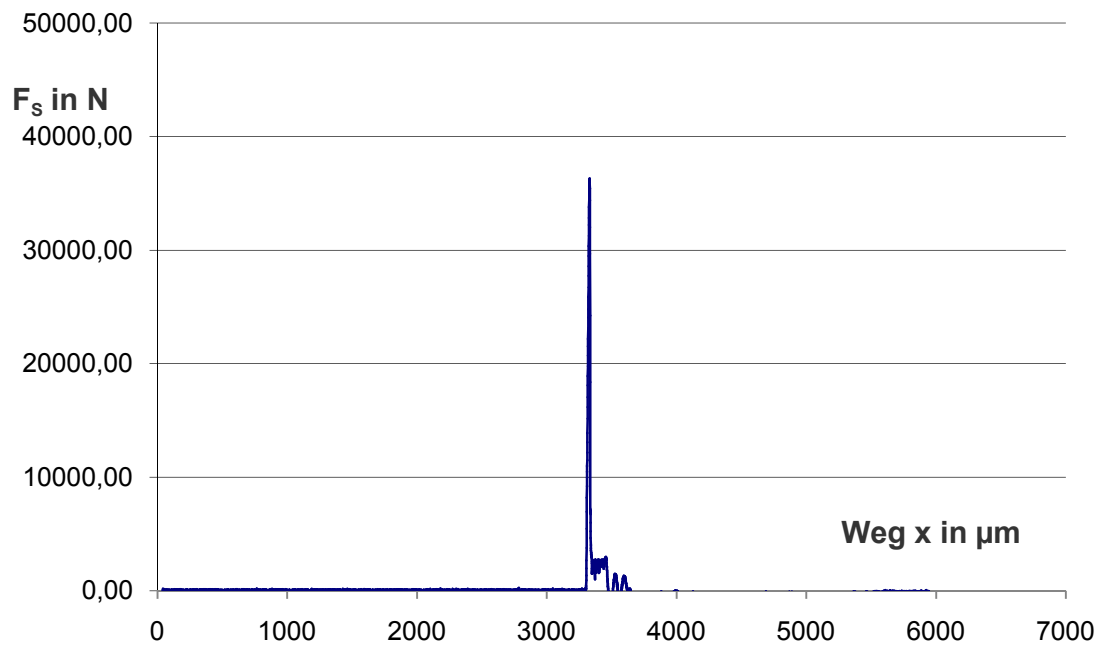


Abbildung 13.13: Schneidkraft  $F_s$  in N für Schneidspalte  $u= 10 \%$  beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-28)

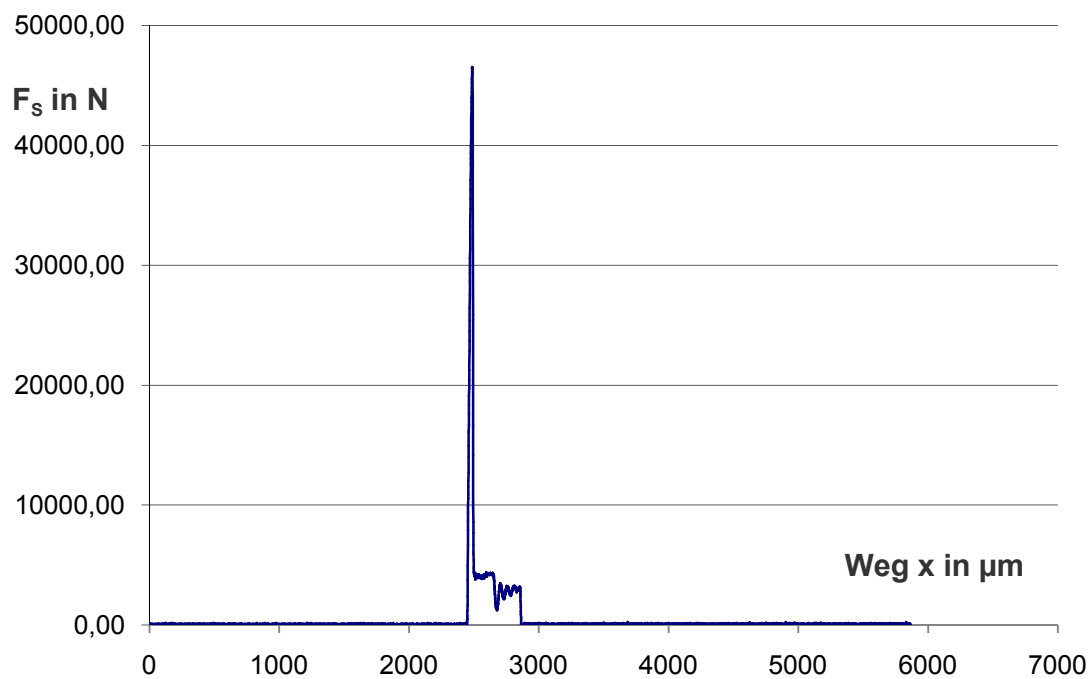


Abbildung 13.14: Schneidkraft  $F_s$  in N für Schneidspalte  $u= 10 \%$  beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-28)

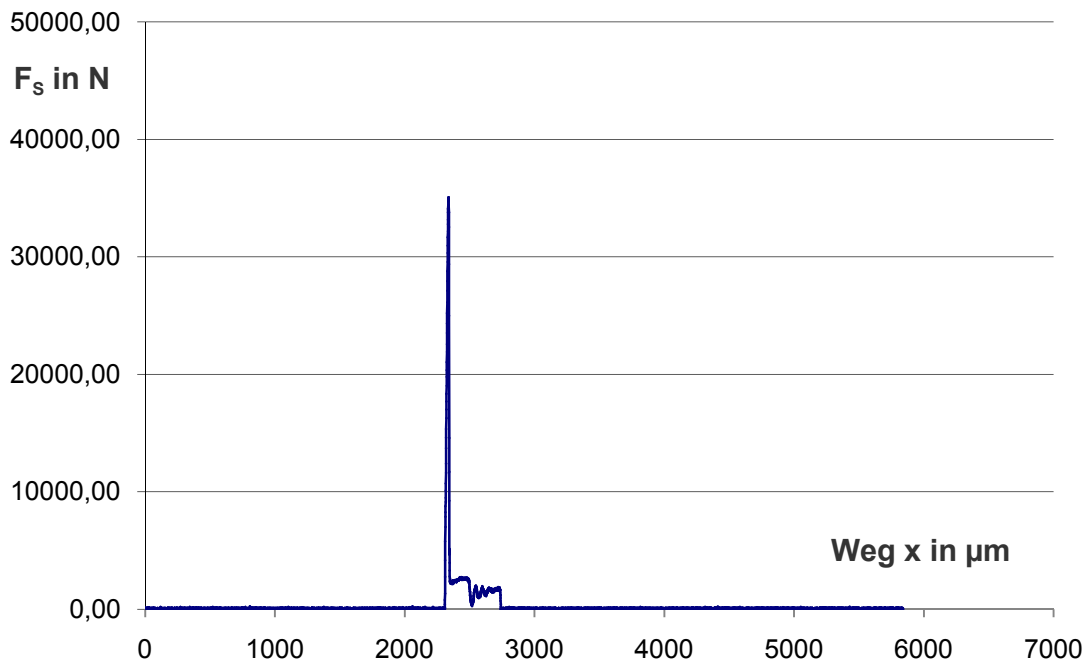


Abbildung 13.15: Schneidkraft  $F_S$  in N für Schneidspalte  $u=20\%$  beim geschlossenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-34)

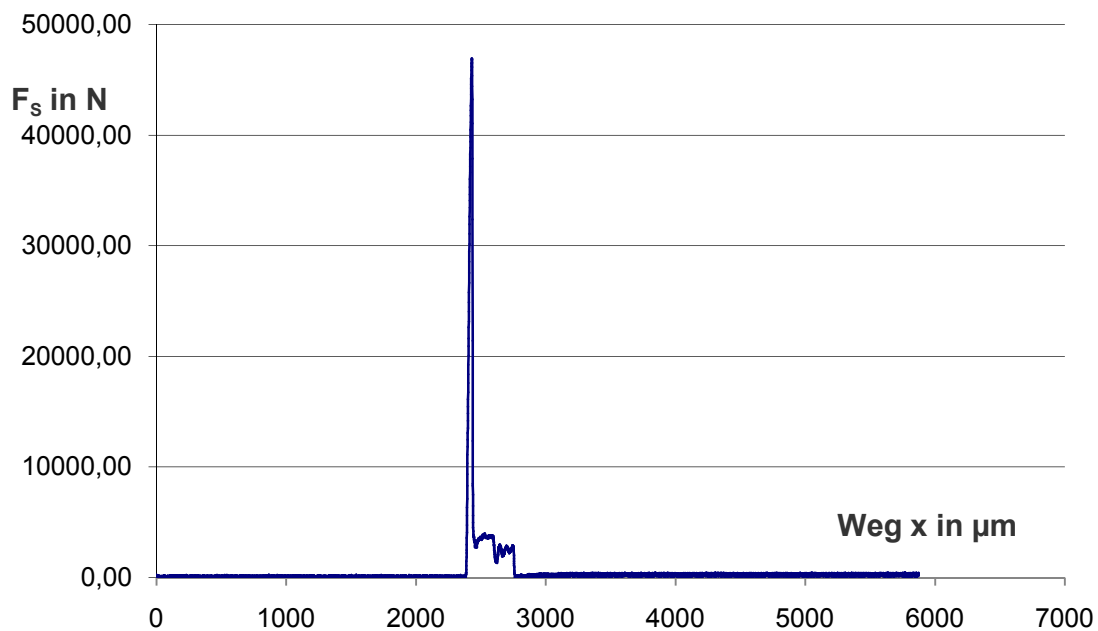


Abbildung 13.16: Schneidkraft  $F_S$  in N für Schneidspalte  $u=20\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden bei Raumtemperatur (RT) mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-34)

### 13.1.3 Scherschneiden bei Raumtemperatur bis 250 °C ( $u=5\%$ ; offen)

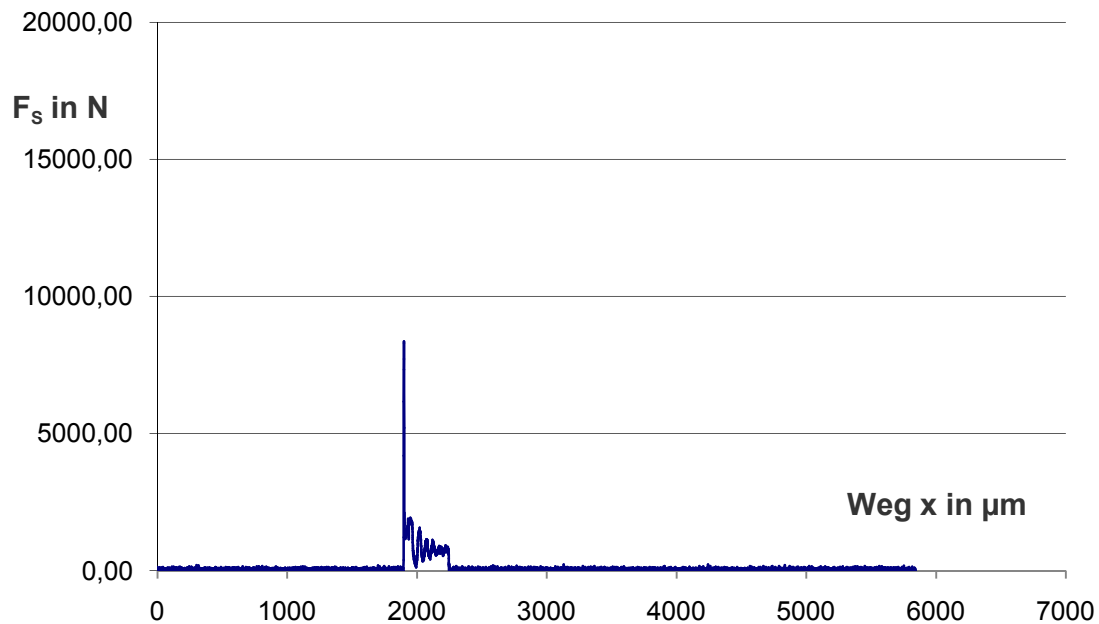


Abbildung 13.17: Schneidkraftbedarf  $F_S$  bei Raumtemperatur mit einem Schneidspalt  $u=2,5\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-19-RT)

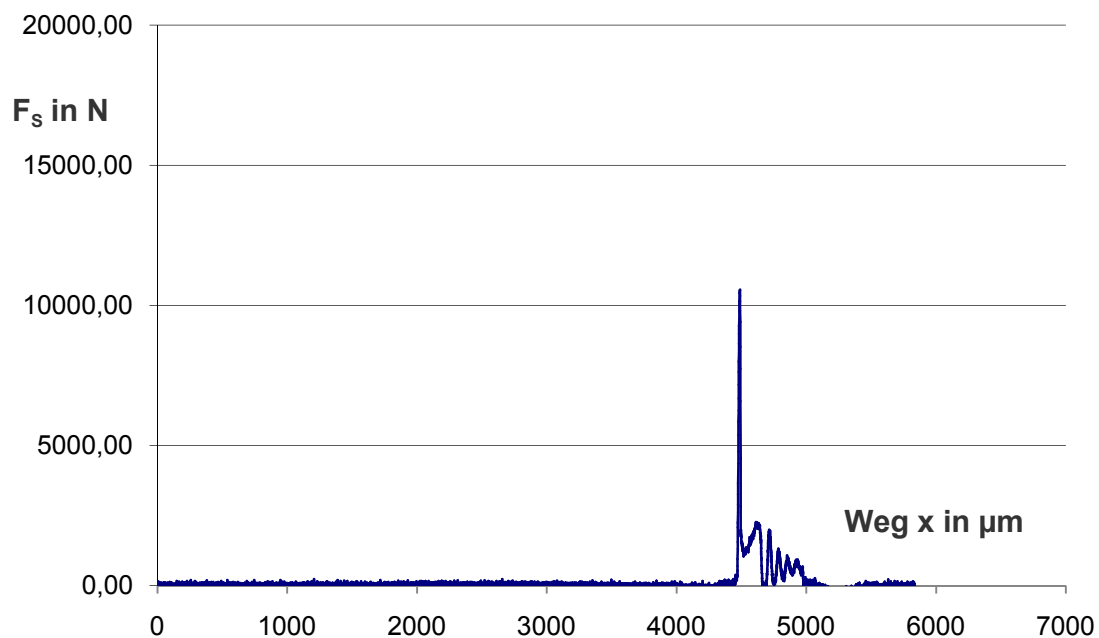


Abbildung 13.18: Schneidkraftbedarf  $F_S$  bei Raumtemperatur mit einem Schneidspalt  $u=2,5\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-19-RT)

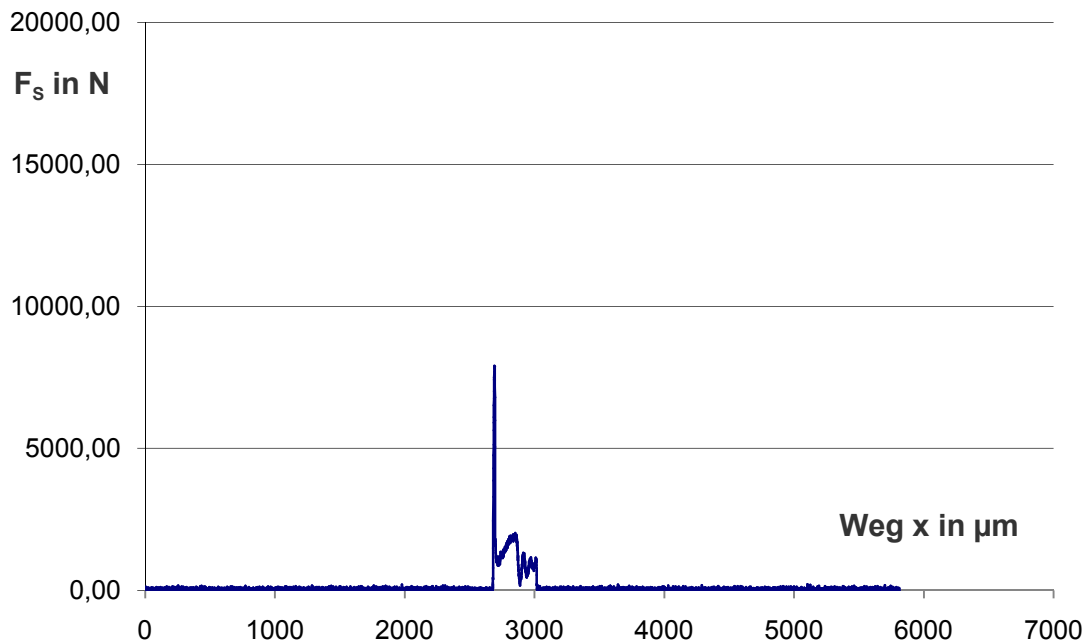


Abbildung 13.19: Schneidkraftbedarf  $F_S$  bei 100 °C mit einem Schneidspalt  $u= 2,5\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-19-100)

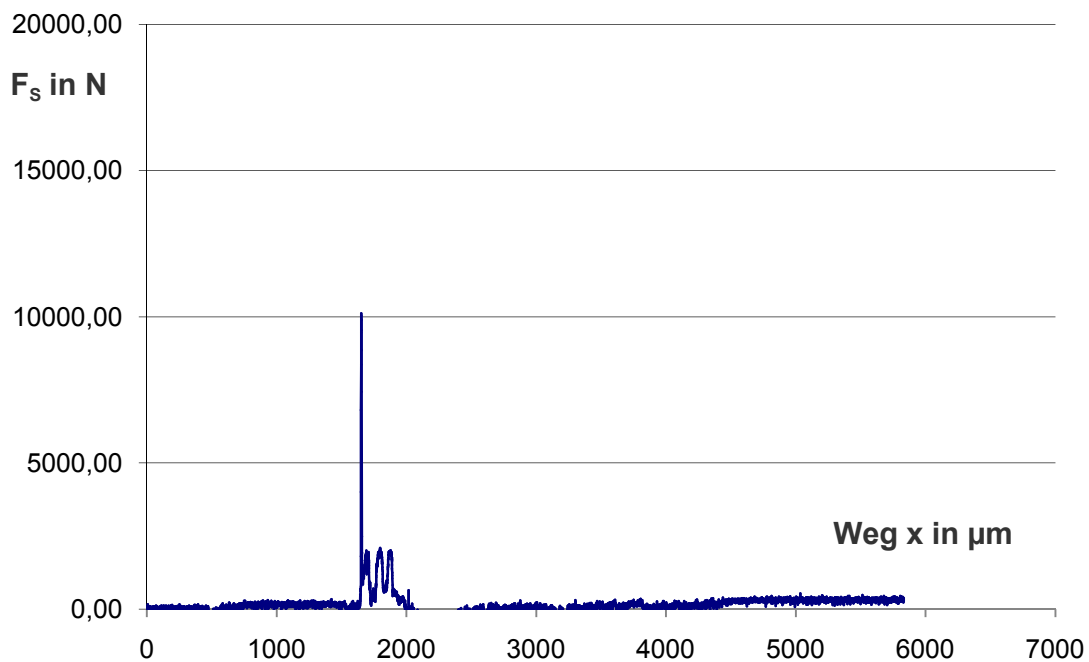


Abbildung 13.20: Schneidkraftbedarf  $F_S$  bei 100 °C mit einem Schneidspalt  $u= 2,5\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-19-100)

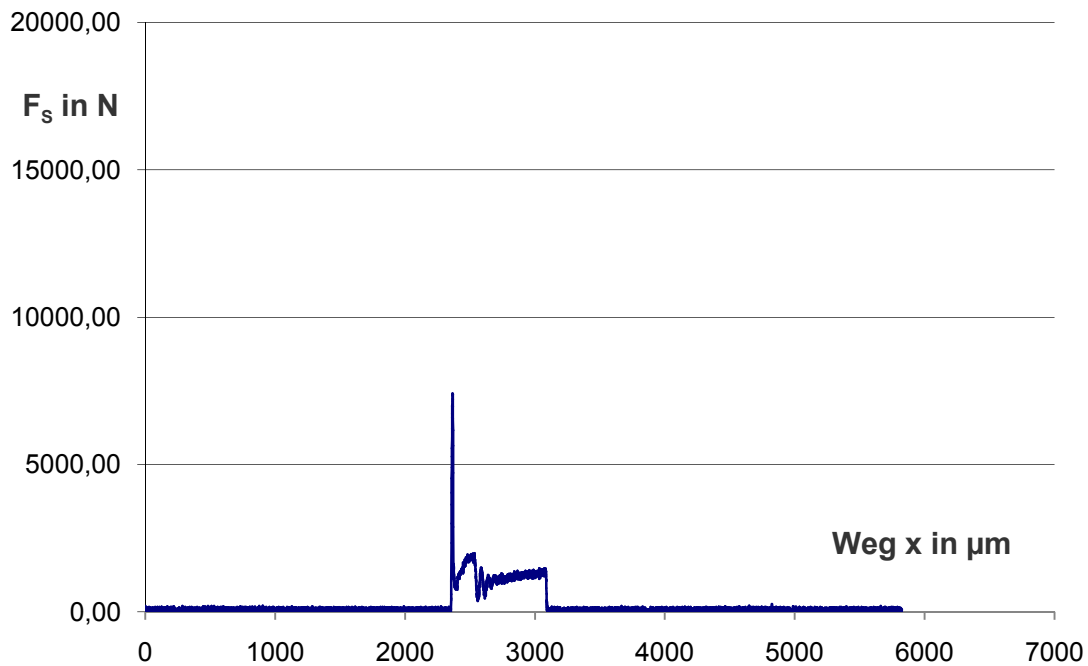


Abbildung 13.21: Schneidkraftbedarf  $F_S$  bei 150 °C mit einem Schneidspalt  $u= 2,5\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-19-150)

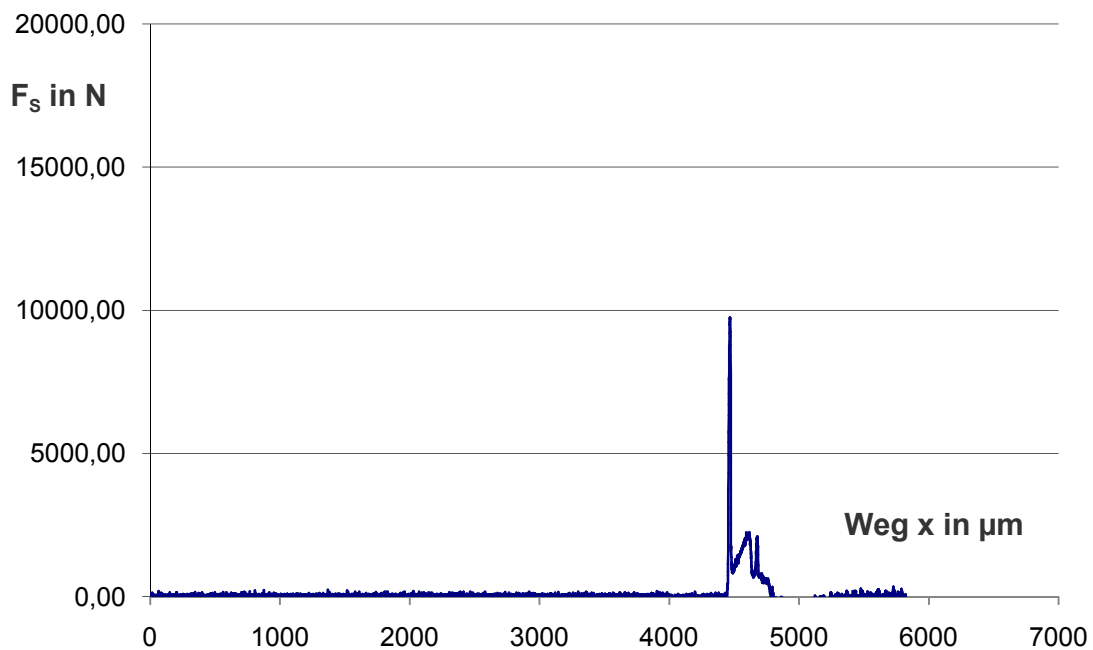


Abbildung 13.22: Schneidkraftbedarf  $F_S$  bei 150 °C mit einem Schneidspalt  $u= 2,5\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-19-150)



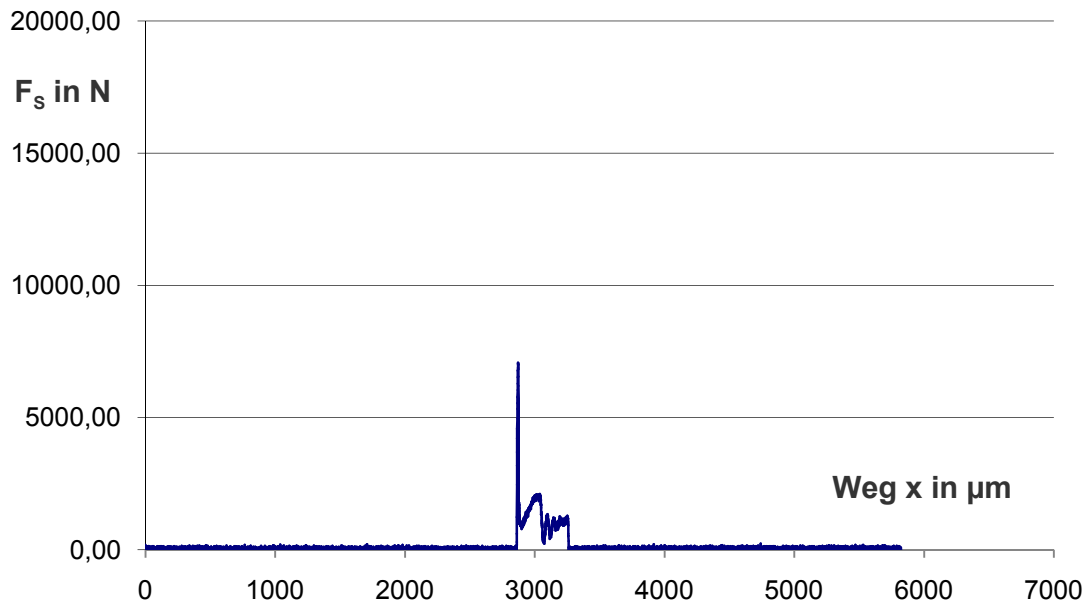


Abbildung 13.23: Schneidkraftbedarf  $F_S$  bei 200 °C mit einem Schneidspalt  $u= 2,5\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-19-200)

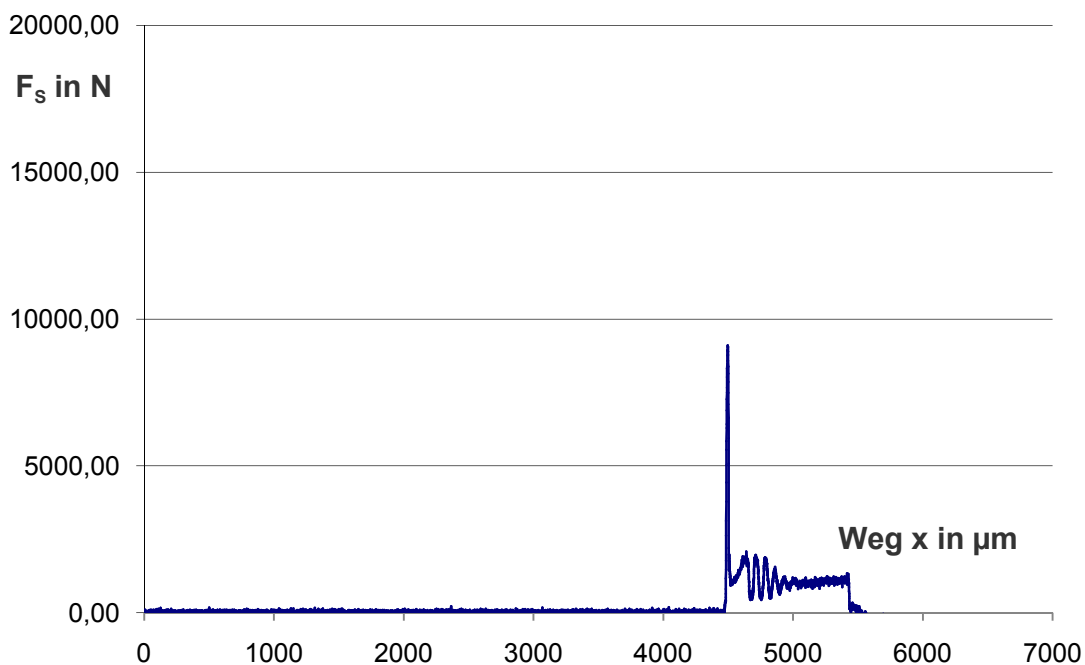


Abbildung 13.24: Schneidkraftbedarf  $F_S$  bei 200 °C mit einem Schneidspalt  $u= 2,5\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-19-200)

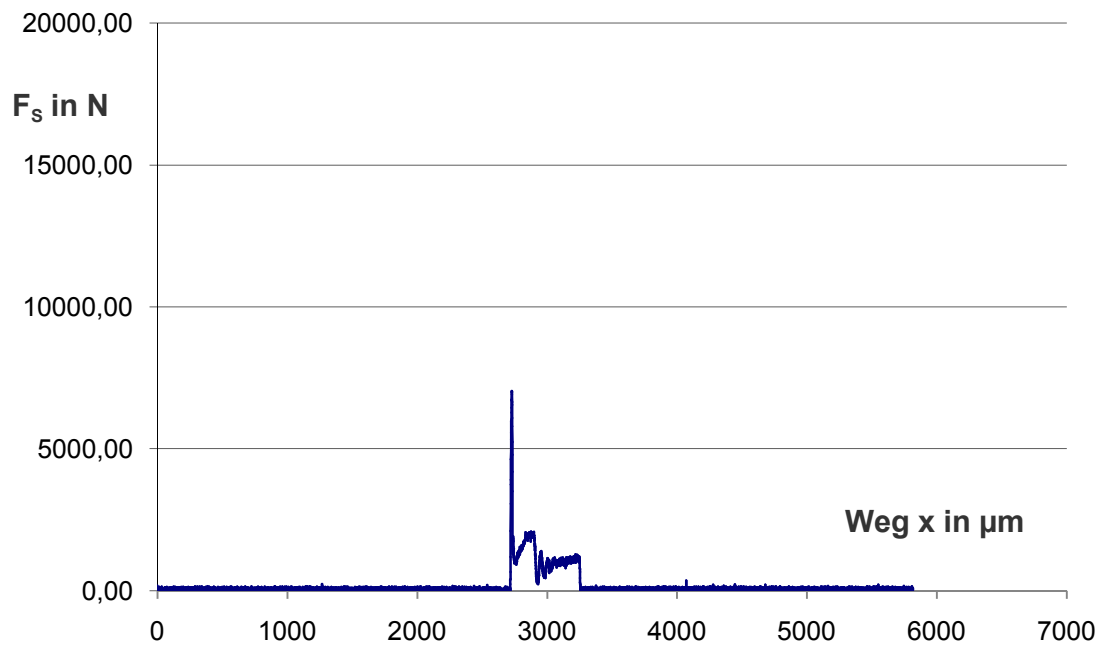


Abbildung 13.25: Schneidkraftbedarf  $F_S$  bei 250 °C mit einem Schneidspalt  $u= 2,5\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-19-250)

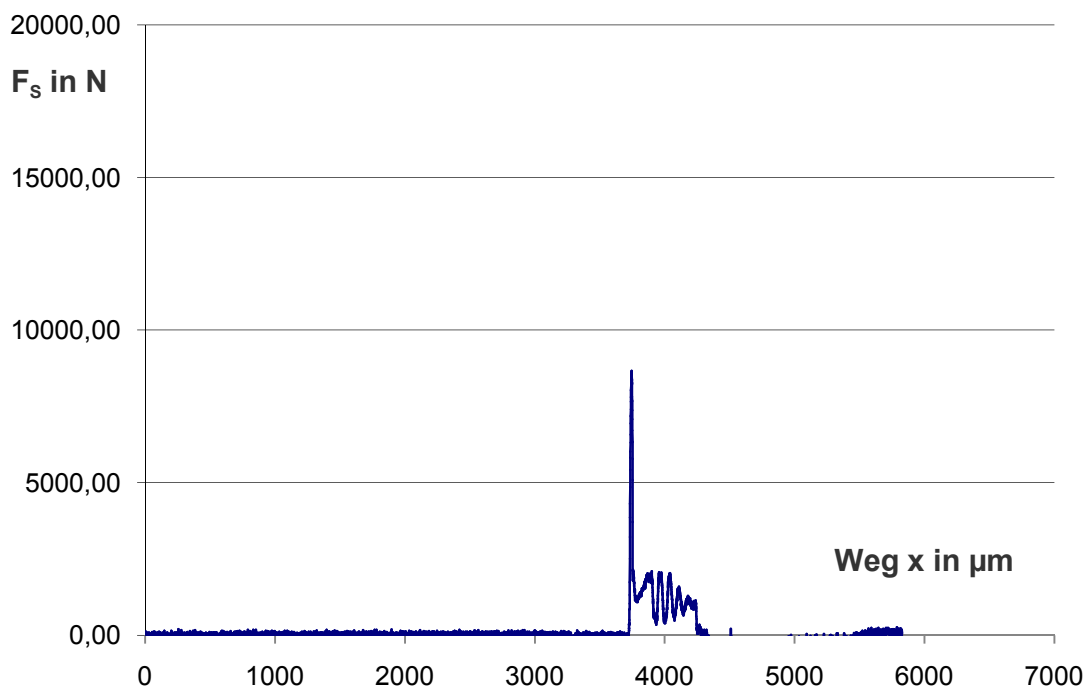


Abbildung 13.26: Schneidkraftbedarf  $F_S$  bei 250 °C mit einem Schneidspalt  $u= 2,5\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-19-250)

### 13.1.4 Scherschneiden mit negativen Schneidspalt

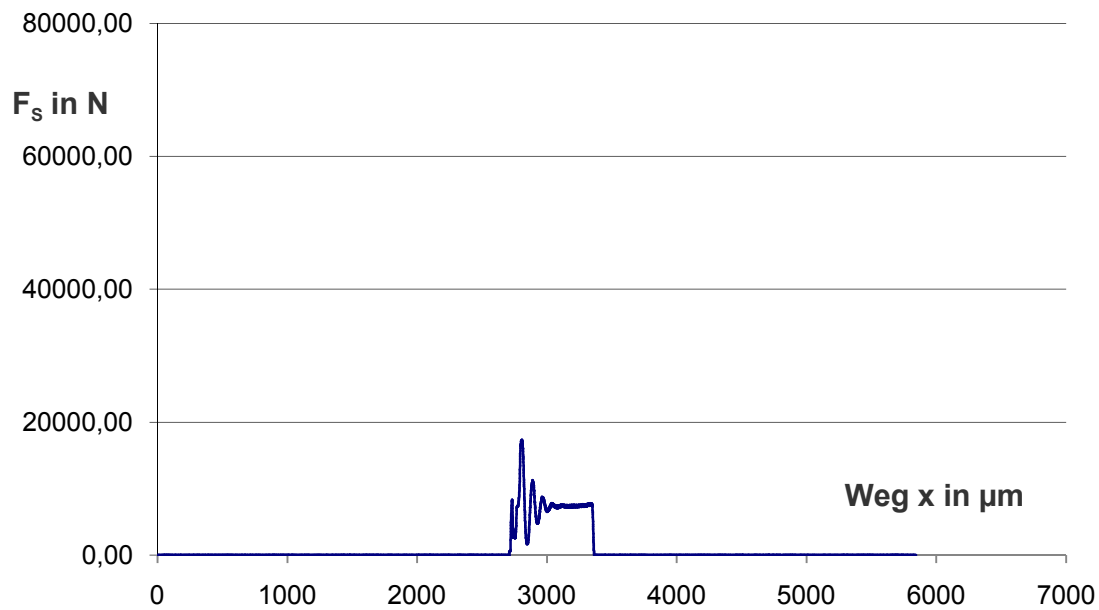


Abbildung 13.27: Schneidkraftbedarf  $F_S$  bei Raumtemperatur mit einem Schneidspalt  $u = -5\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-37-RT)

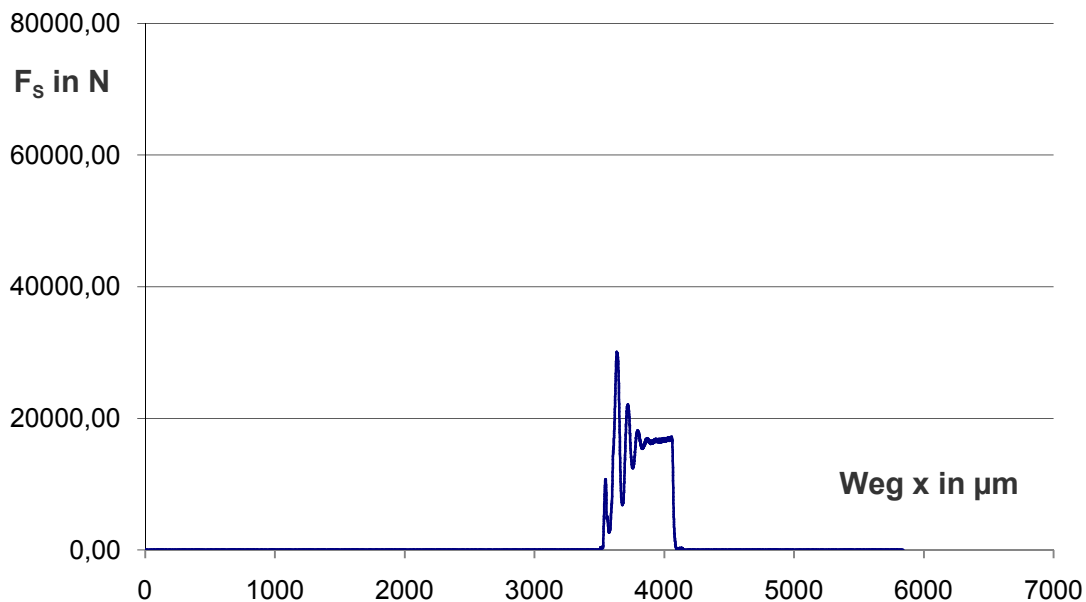


Abbildung 13.28: Schneidkraftbedarf  $F_S$  bei Raumtemperatur mit einem Schneidspalt  $u = -5\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-37-RT)

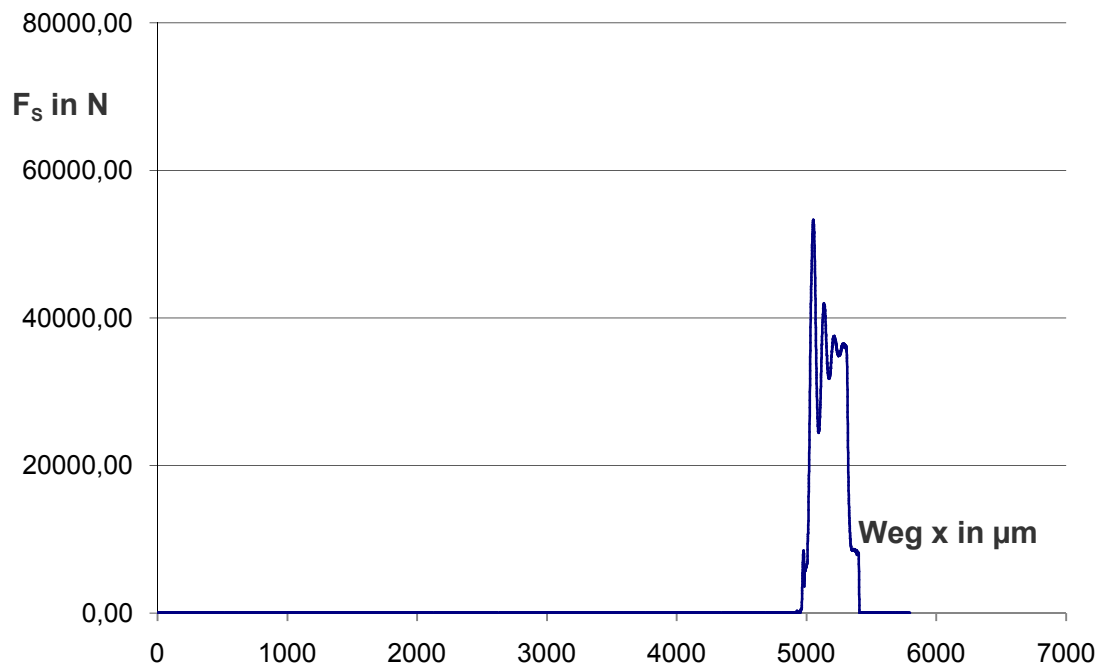


Abbildung 13.29: Schneidkraftbedarf  $F_S$  bei Raumtemperatur mit einem Schneidspalt  $u = -10\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-43-RT)

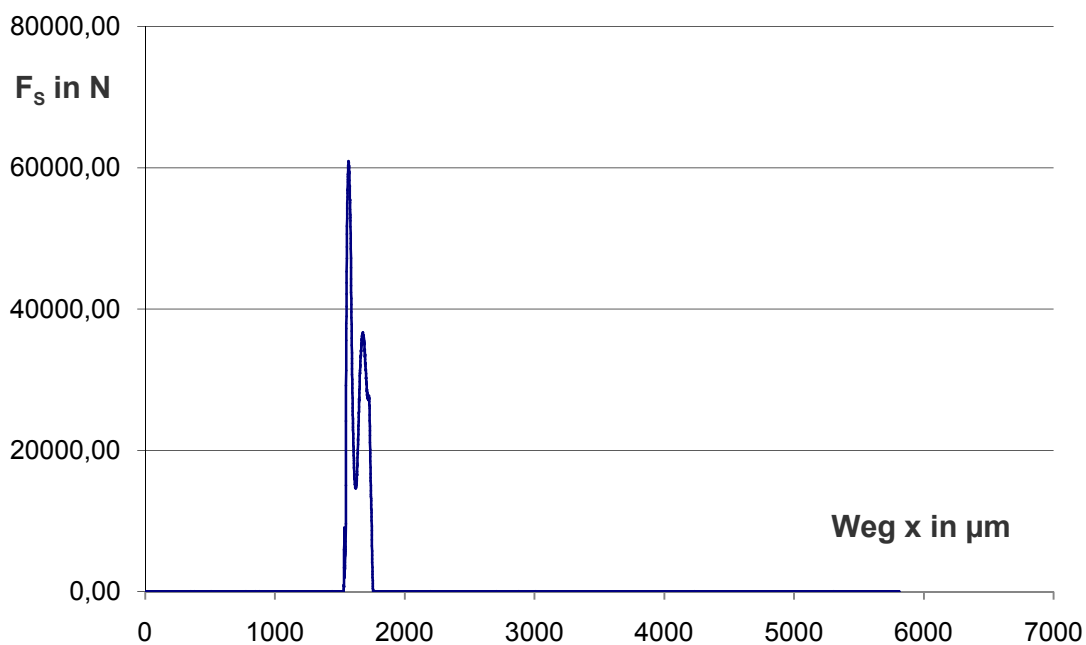


Abbildung 13.30: Schneidkraftbedarf  $F_S$  bei Raumtemperatur mit einem Schneidspalt  $u = -10\%$  beim offenen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-43-RT)

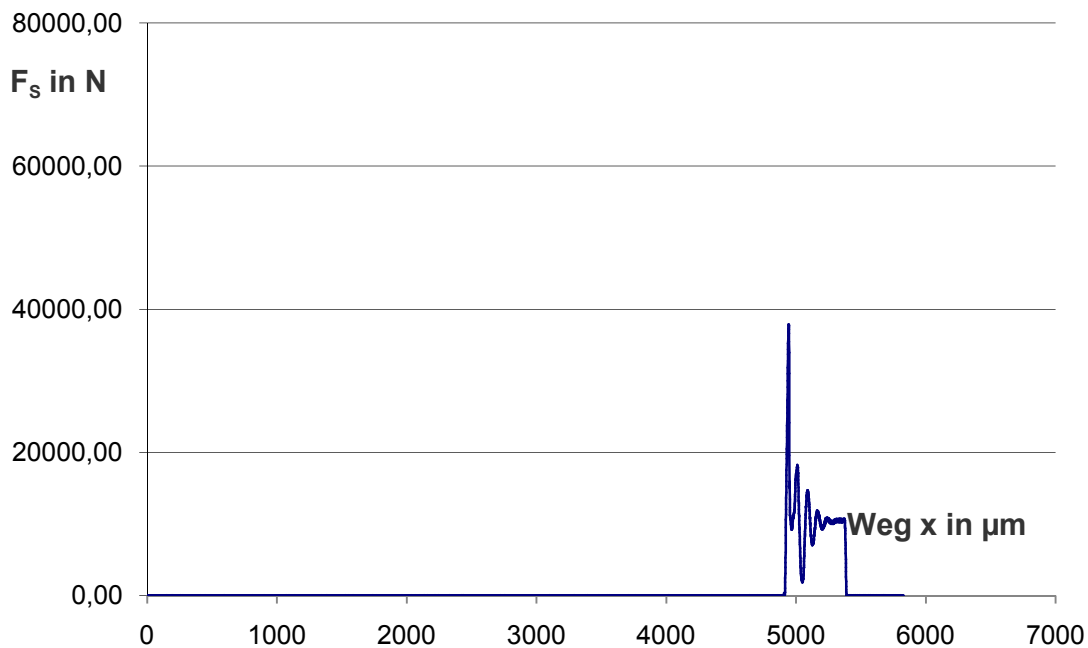


Abbildung 13.31: Schneidkraftbedarf  $F_S$  bei Raumtemperatur mit einem Schneidspalt  $u = -5\%$  beim geschlossen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-40-RT)

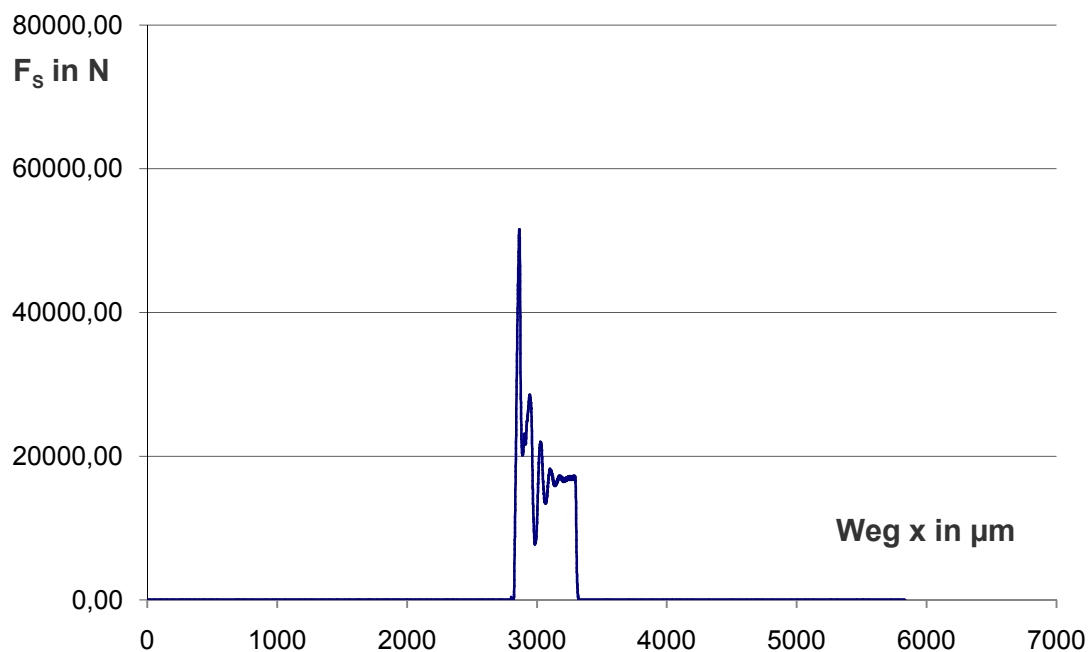


Abbildung 13.32: Schneidkraftbedarf  $F_S$  bei Raumtemperatur mit einem Schneidspalt  $u = -5\%$  beim geschlossen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-40-RT)

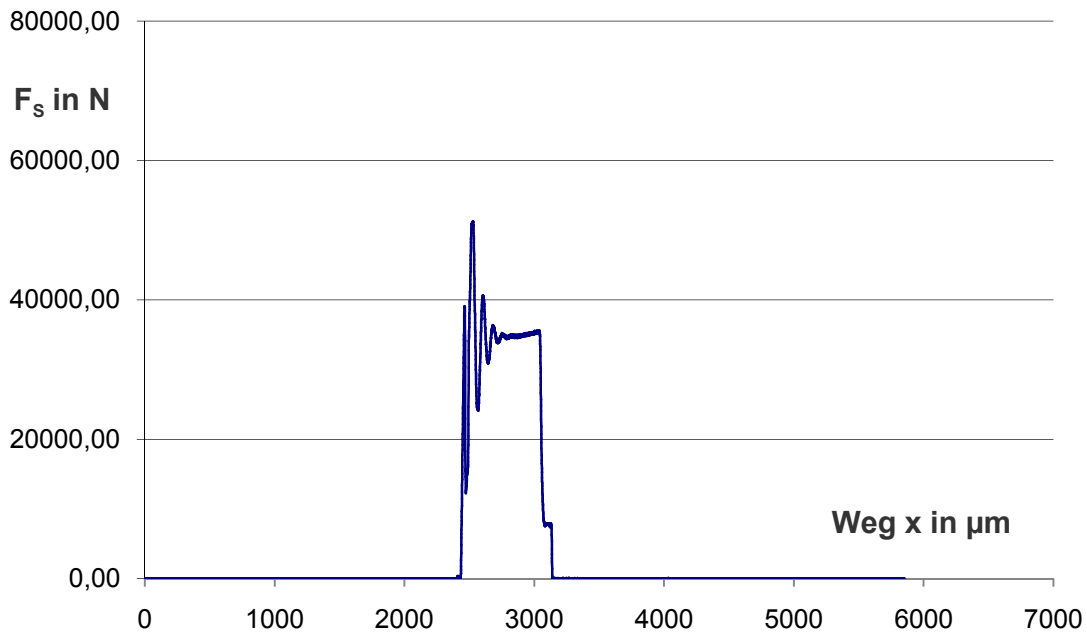


Abbildung 13.33: Schneidkraftbedarf  $F_S$  bei Raumtemperatur mit einem Schneidspalt  $u = -10\%$  beim geschlossen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 1,25 mm (S-2-46-RT)

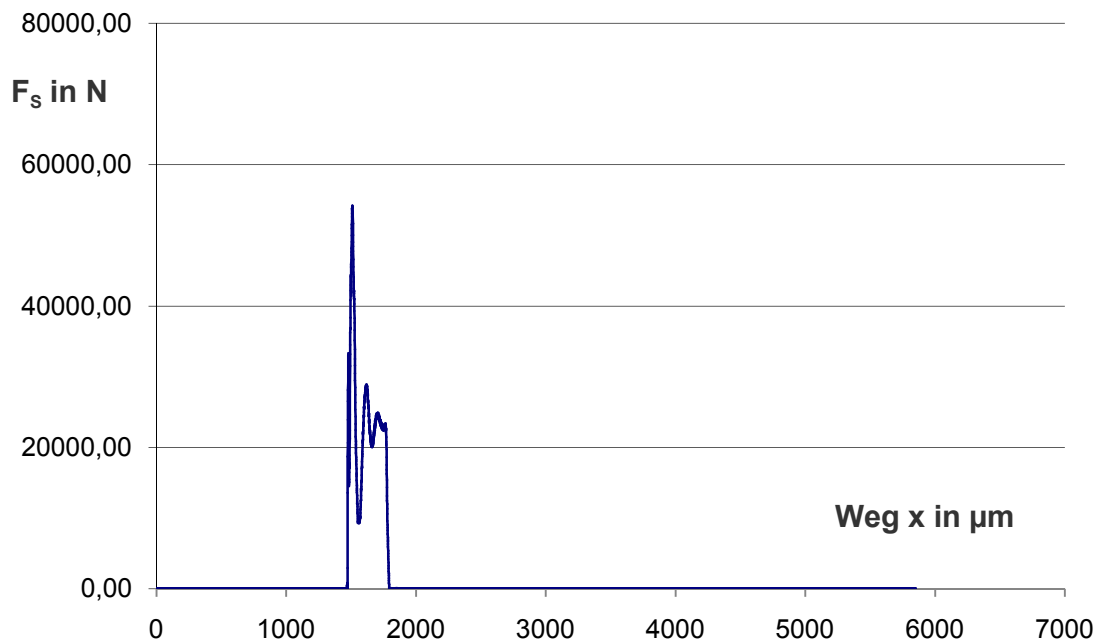


Abbildung 13.34: Schneidkraftbedarf  $F_S$  bei Raumtemperatur mit einem Schneidspalt  $u = -10\%$  beim geschlossen, vollkantigen Scherschneiden mit einer Blechdicke von 2,00 mm (S-1-46-RT)

## 13.2 Messerschneiden

### 13.2.1 Messerschneiden mit unterschiedlichen Keilwinkeln (offen)

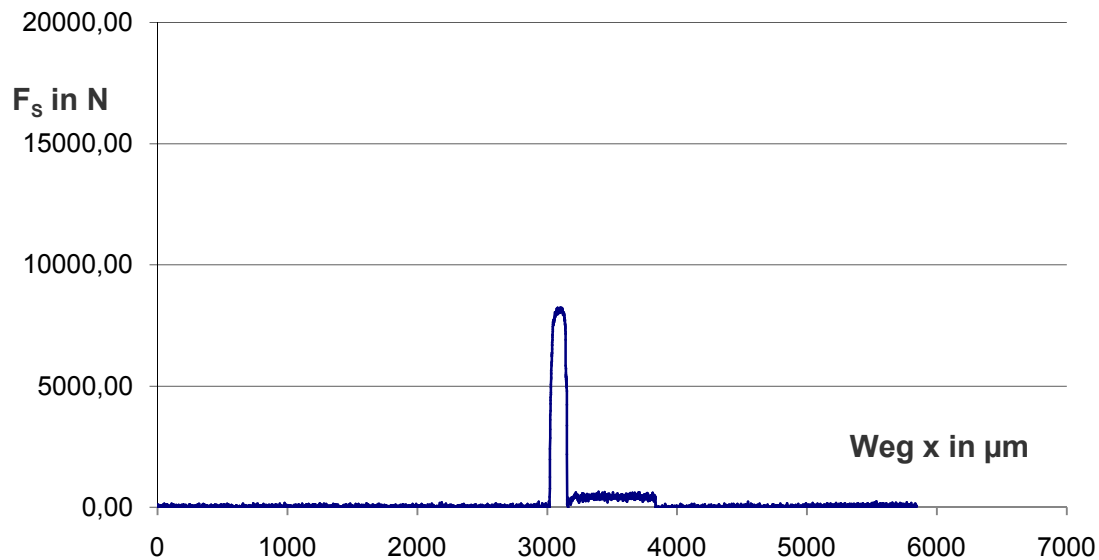


Abbildung 13.35: Schneidkraft  $F_s$  Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (M-2-01)

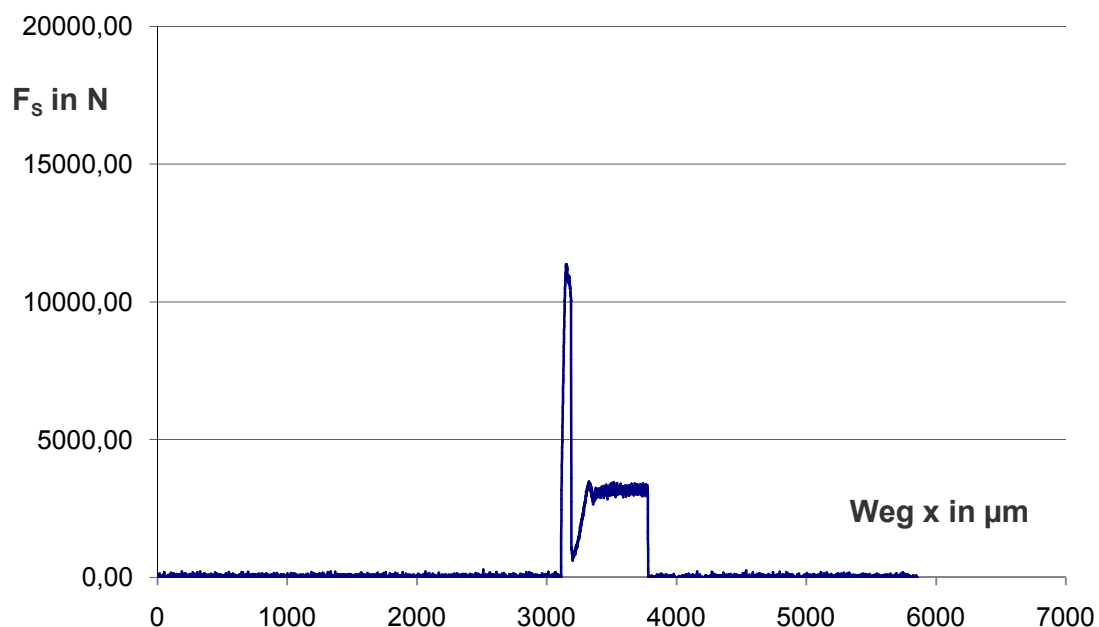


Abbildung 13.36: Schneidkraft  $F_s$  für Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (M-1-01)

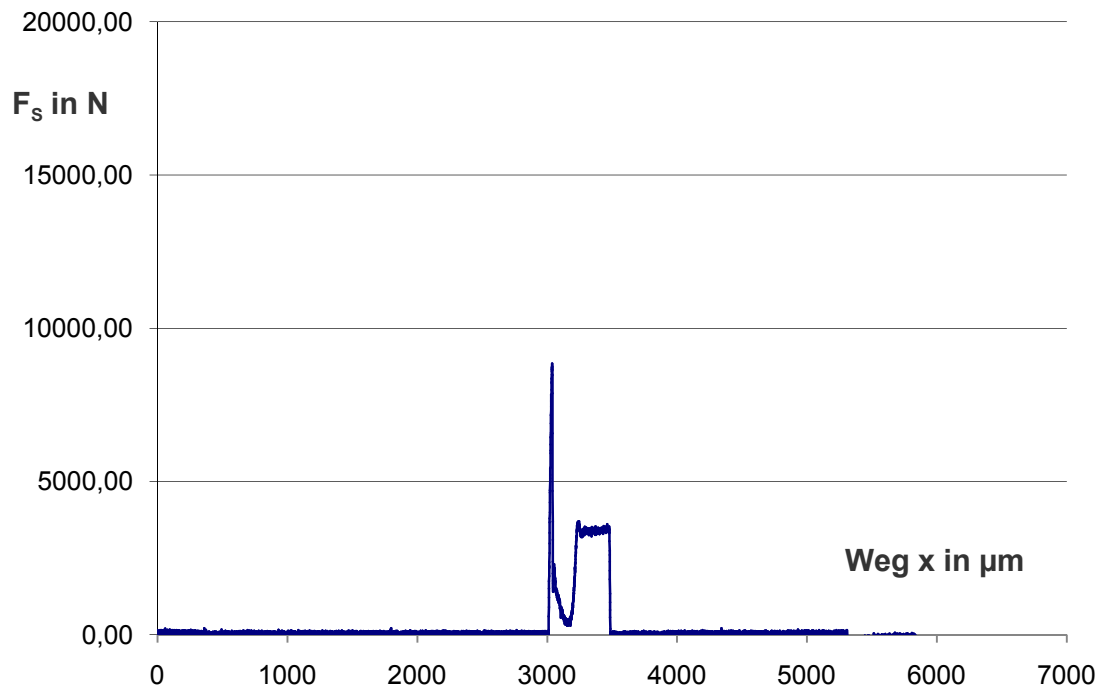


Abbildung 13.37: Schneidkraft  $F_s$  für Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (M-2-07)

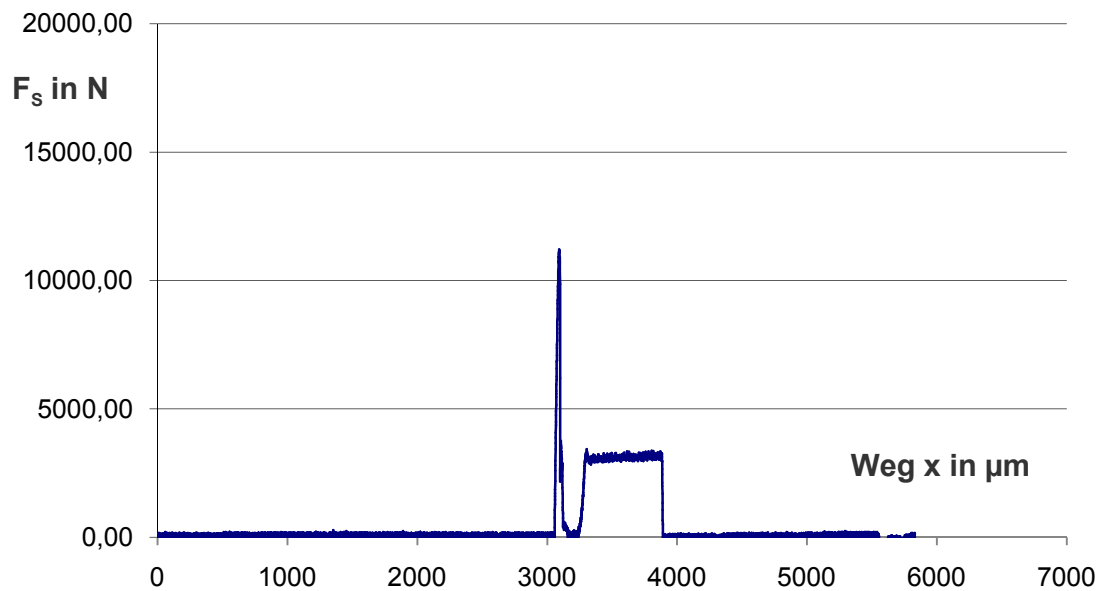


Abbildung 13.38: Schneidkraft  $F_s$  für Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (M-1-07)



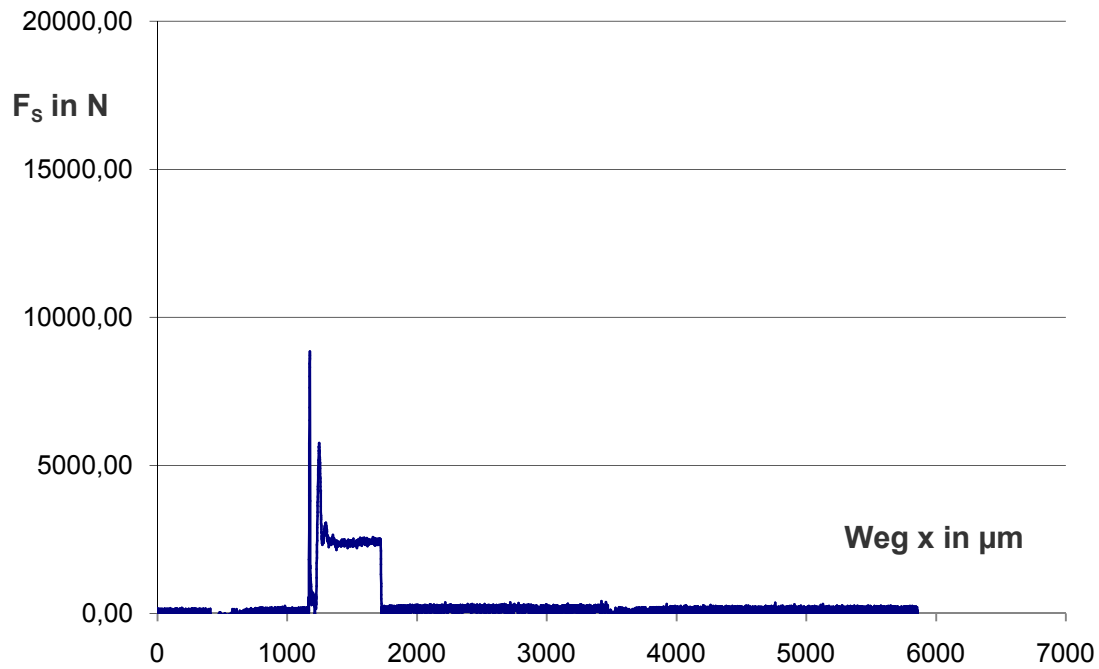


Abbildung 13.39: Schneidkraft  $F_S$  Keilwinkel  $\alpha = 45^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (M-2-13)

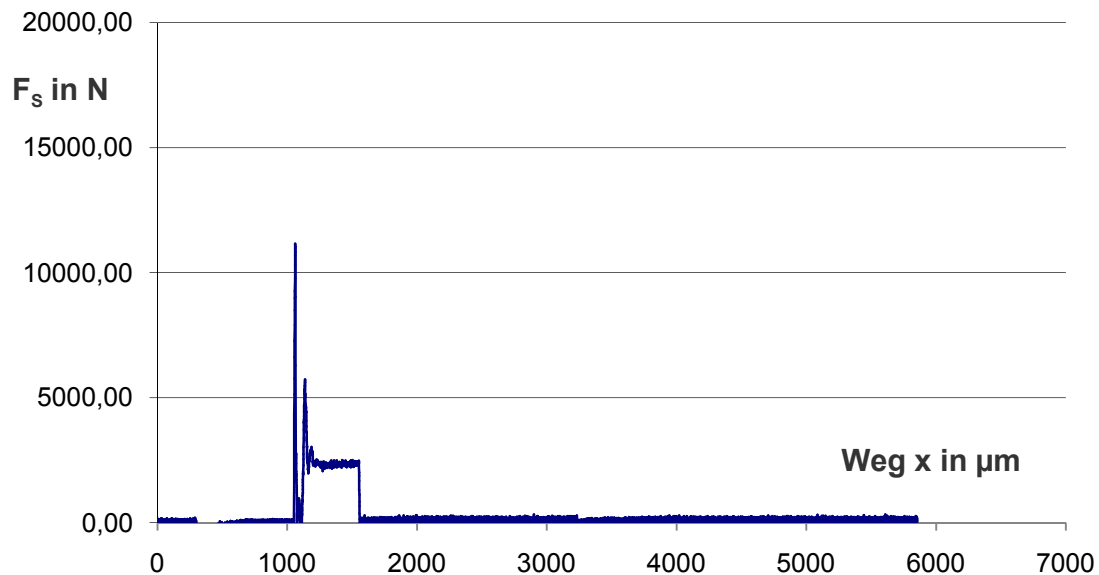


Abbildung 13.40: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\alpha = 45^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (M-1-13)

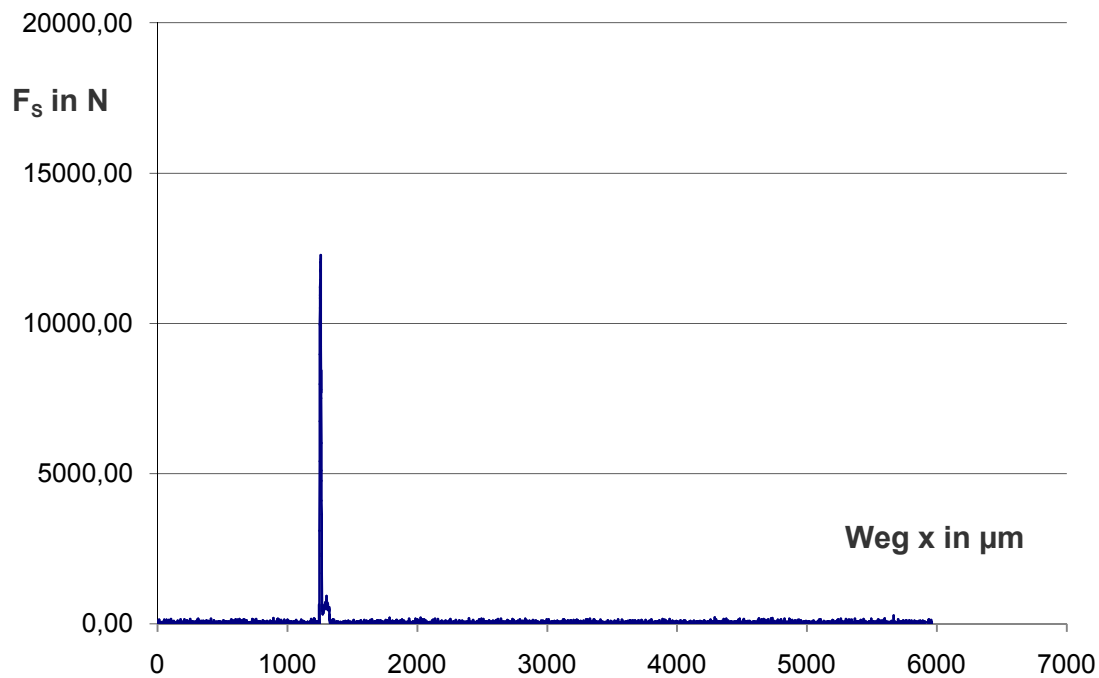


Abbildung 13.41: Schneidkraft  $F_s$  Keilwinkel  $\alpha = 60^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (M-2-19)

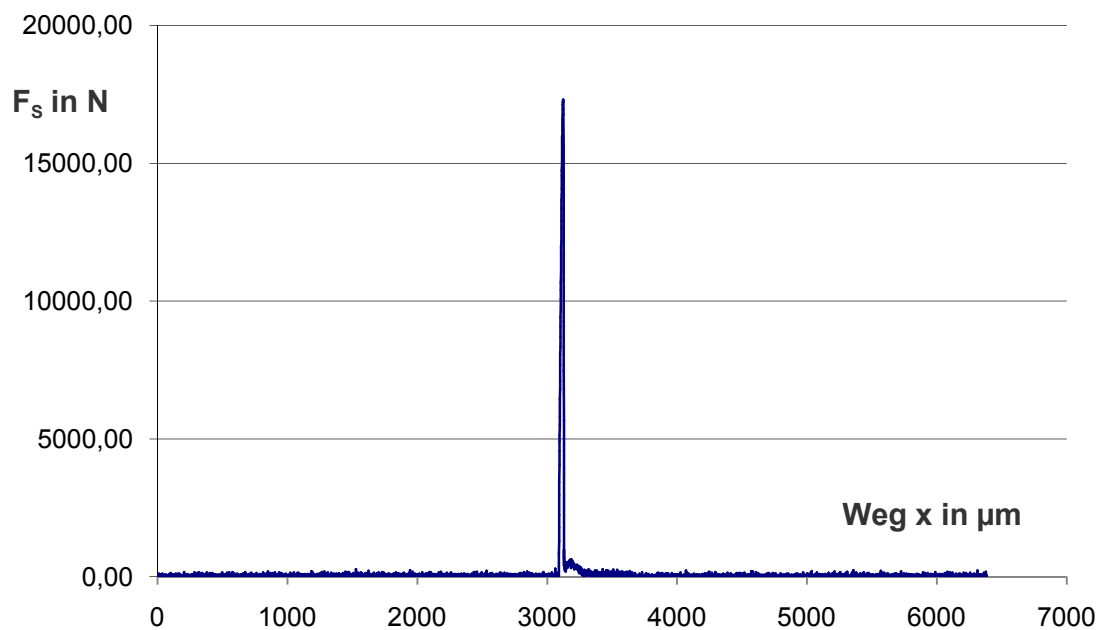


Abbildung 13.42: Schneidkraft  $F_s$  für Keilwinkel  $\alpha = 60^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (M-1-19)

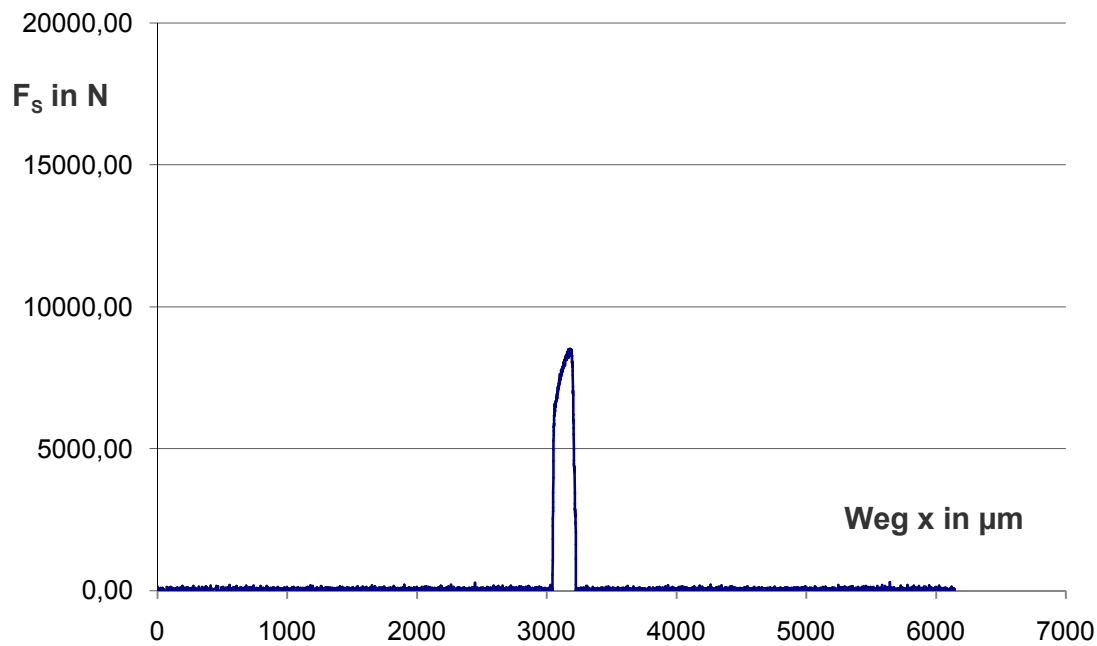


Abbildung 13.43: Schneidkraft  $F_s$  für Keilwinkel  $\beta = 22,5^\circ$  (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (M-2-25)

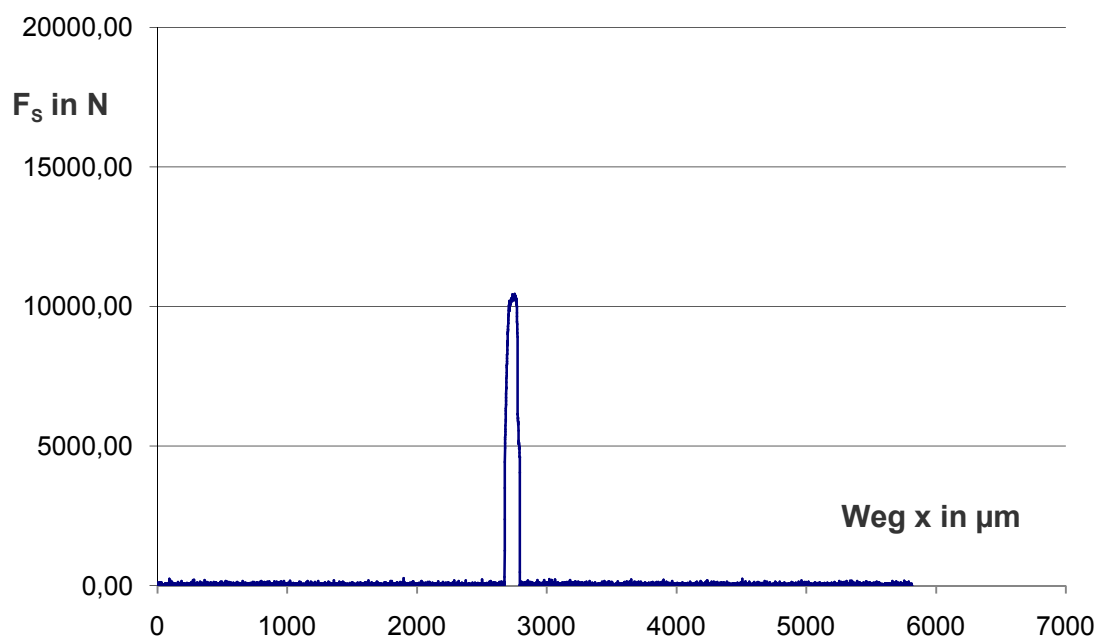


Abbildung 13.44: Schneidkraft  $F_s$  für Keilwinkel  $\beta = 22,5^\circ$  (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (M-1-25)

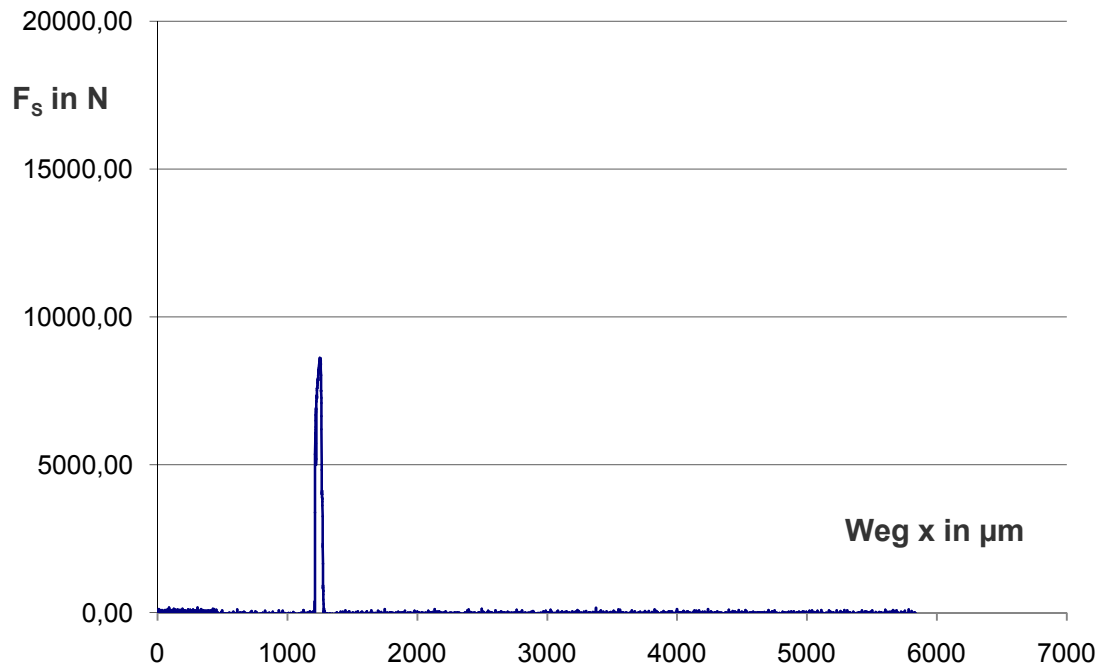


Abbildung 13.45: Schneidkraft  $F_s$  für Keilwinkel  $\beta = 30^\circ$  (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (M-2-31)

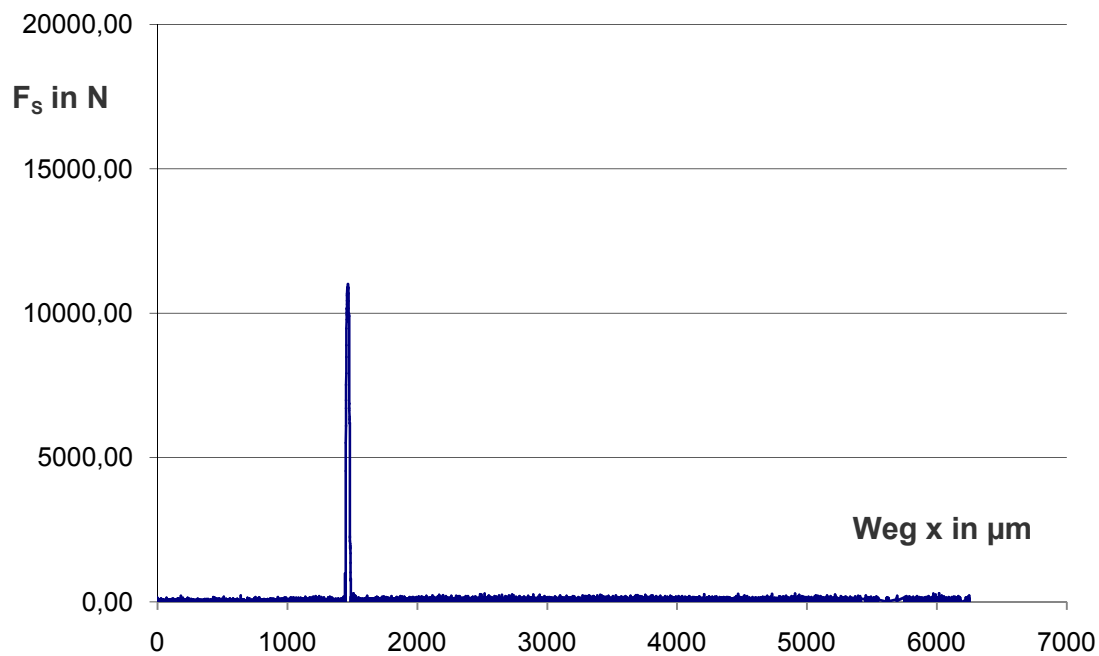


Abbildung 13.46: Schneidkraft  $F_s$  für Keilwinkel  $\beta = 30^\circ$  (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (M-1-31)

### 13.2.2 Messerschneiden mit unterschiedlichen Keilwinkeln (geschlossen)

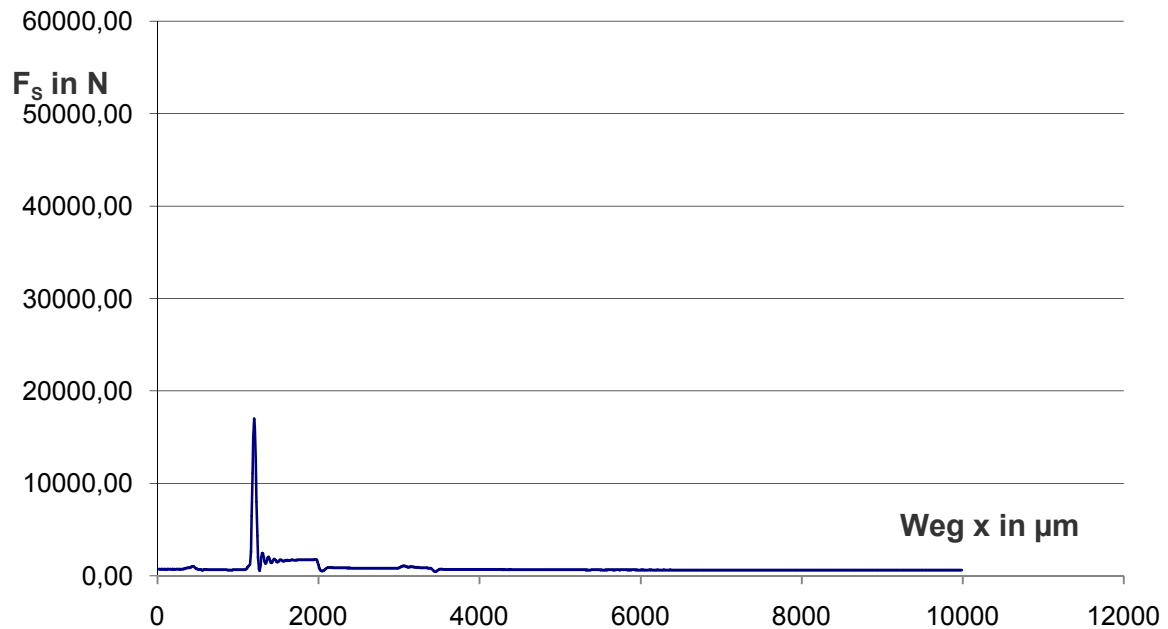


Abbildung 13.47: Schneidkraft  $F_S$  Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$  (symmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (M-2-04)

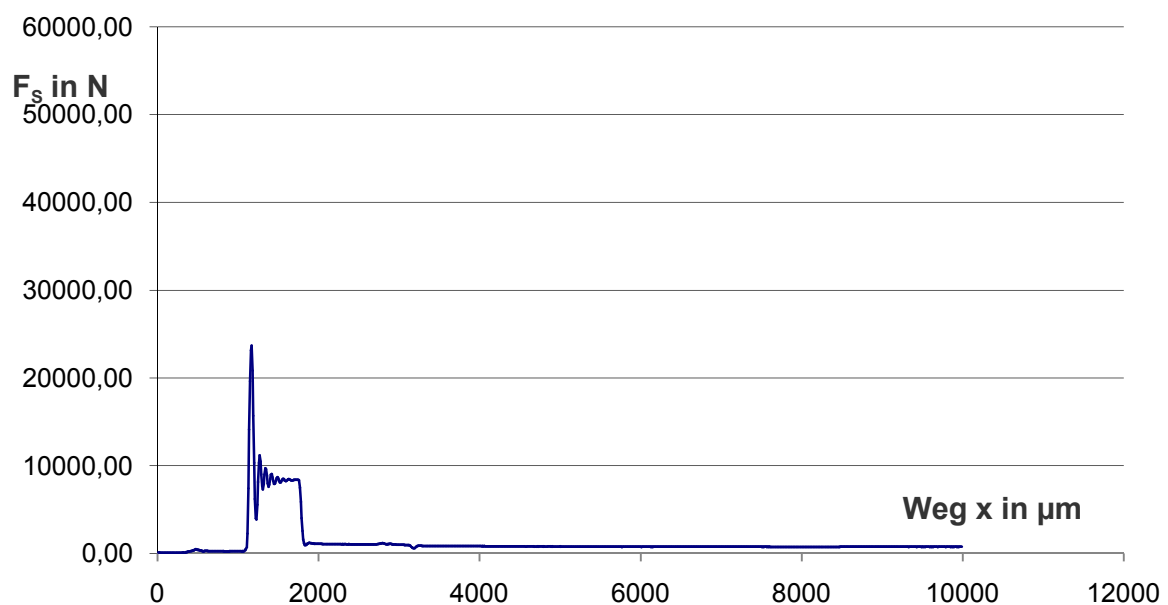


Abbildung 13.48: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$  (symmetrisch)) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (M-1-04)

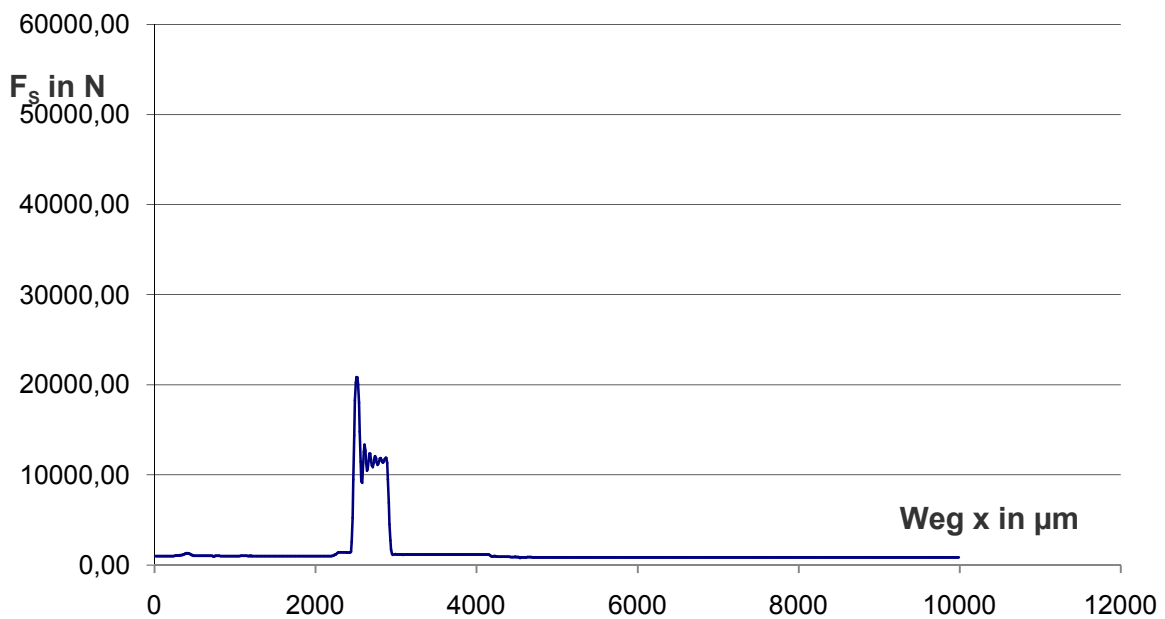


Abbildung 13.49: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$  (symmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (M-2-10)

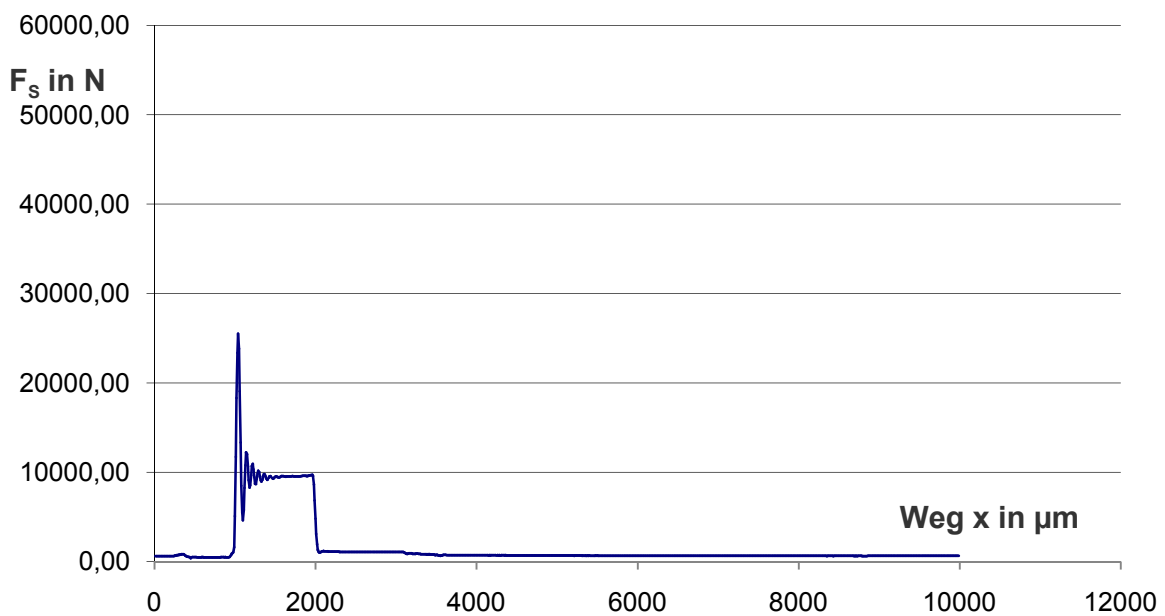


Abbildung 13.50: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$  (symmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (M-1-10)

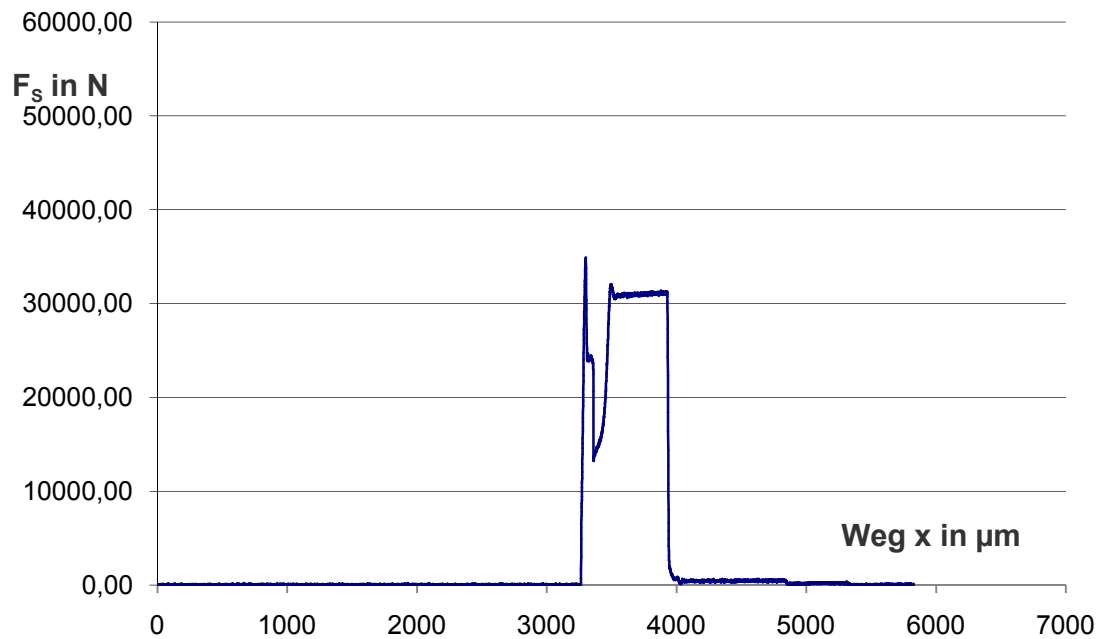


Abbildung 13.51: Schneidkraft  $F_S$  Keilwinkel  $\alpha = 60^\circ$  (symmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (M-2-22)

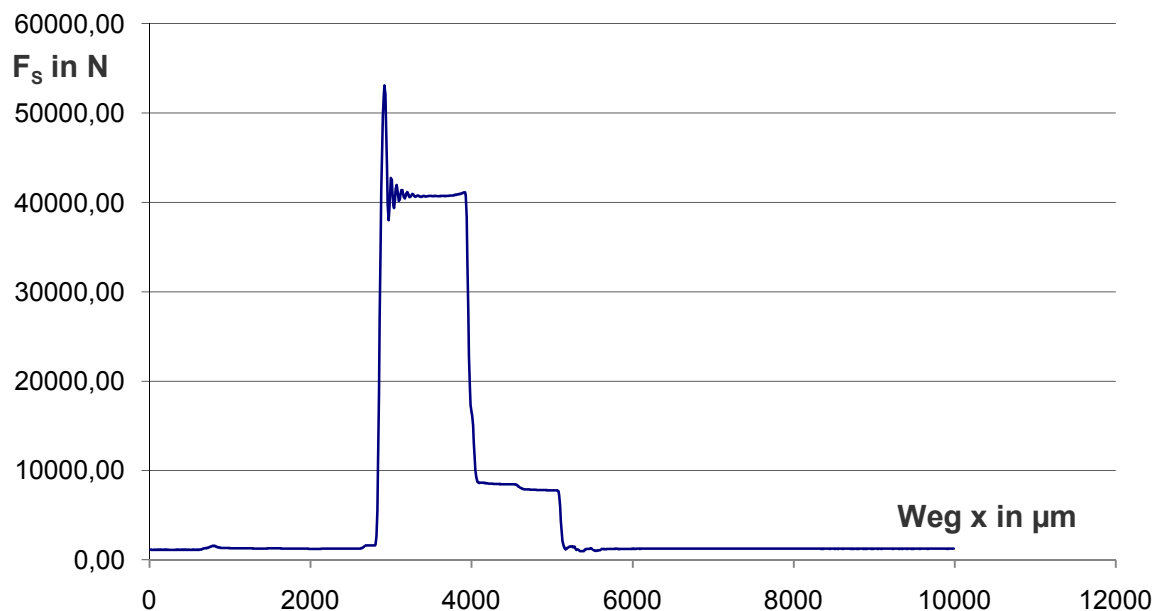


Abbildung 13.52: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\alpha = 60^\circ$  (symmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (M-1-22)

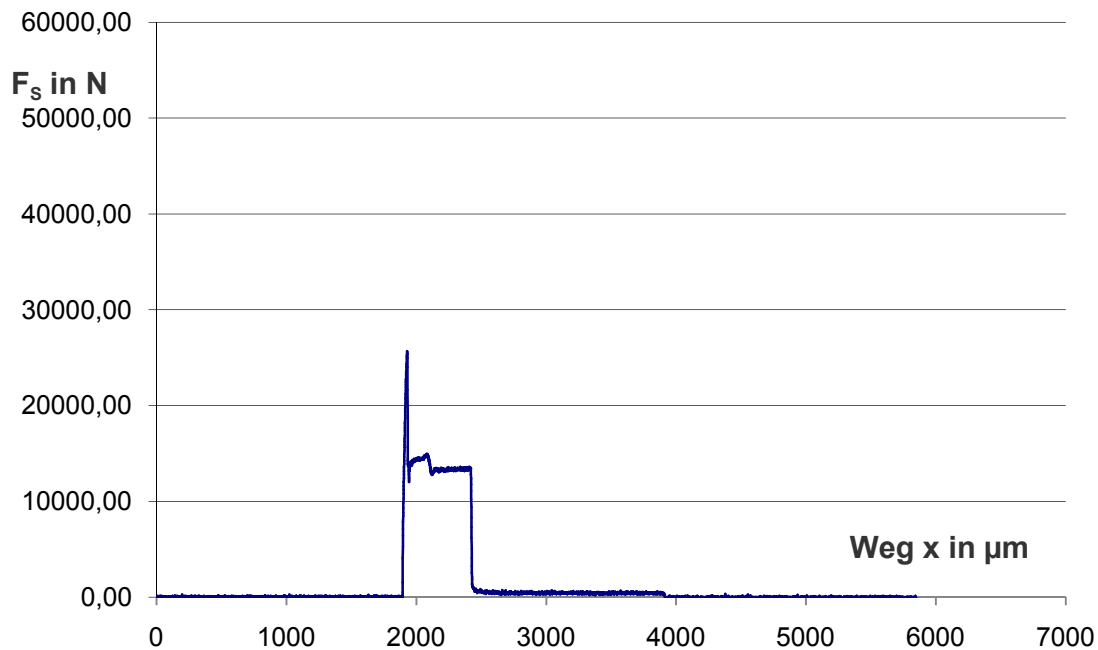


Abbildung 13.53: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\beta = 22,5^\circ$  (asymmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (M-2-28)

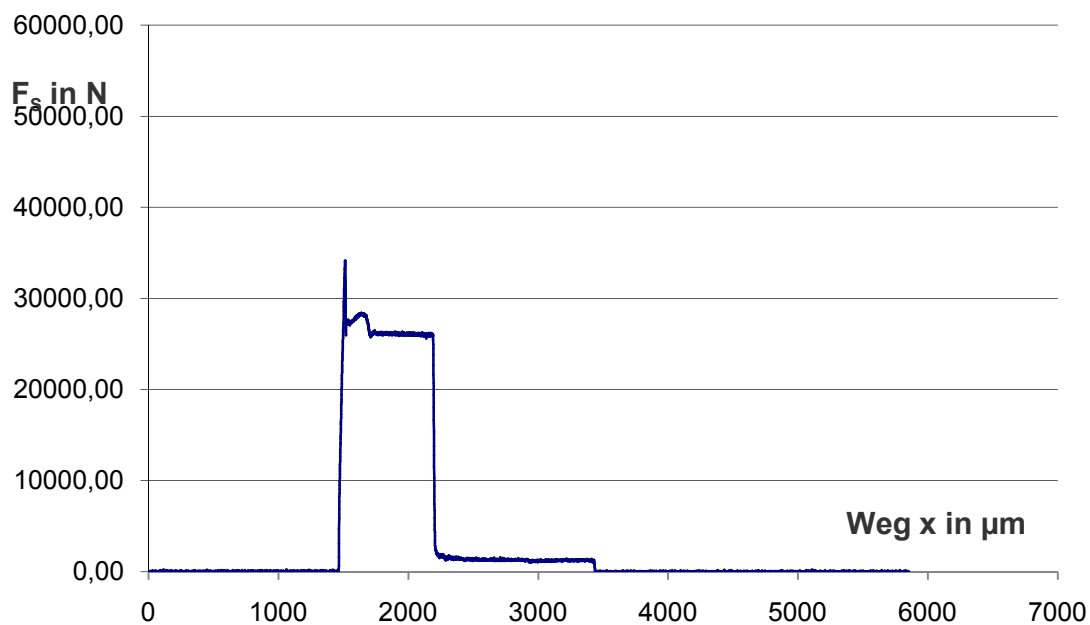


Abbildung 13.54: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\beta = 22,5^\circ$  (asymmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (M-1-28)



### 13.2.3 Messerschneiden bei Raumtemperatur bis 250 °C

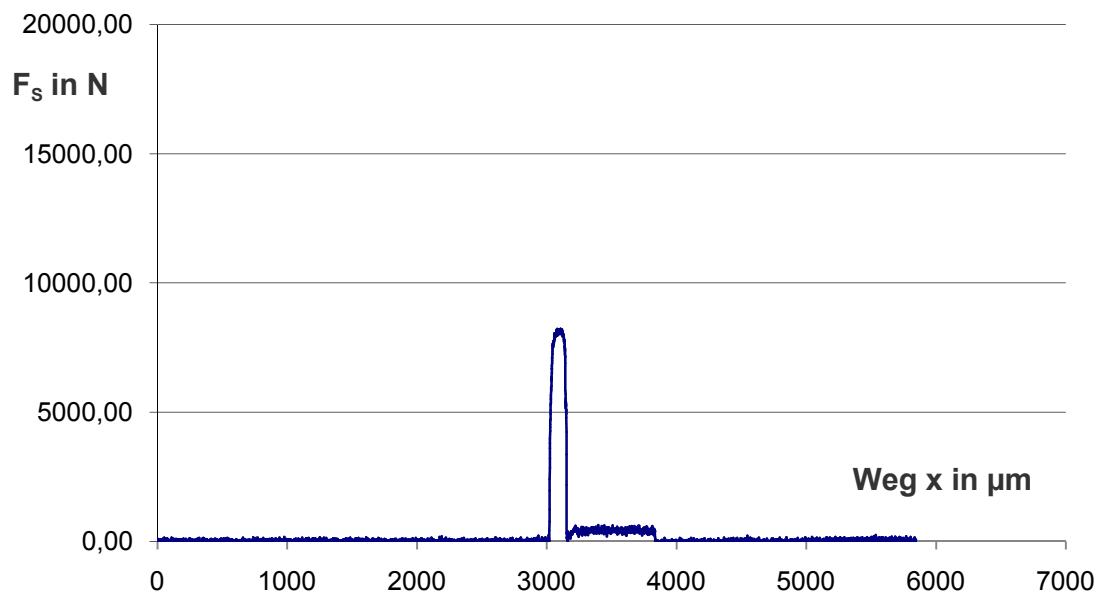


Abbildung 13.55: Schneidkraft  $F_S$  bei Raumtemperatur RT bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden mit einer Blechdicke 1,25 mm (M-2-01-RT)

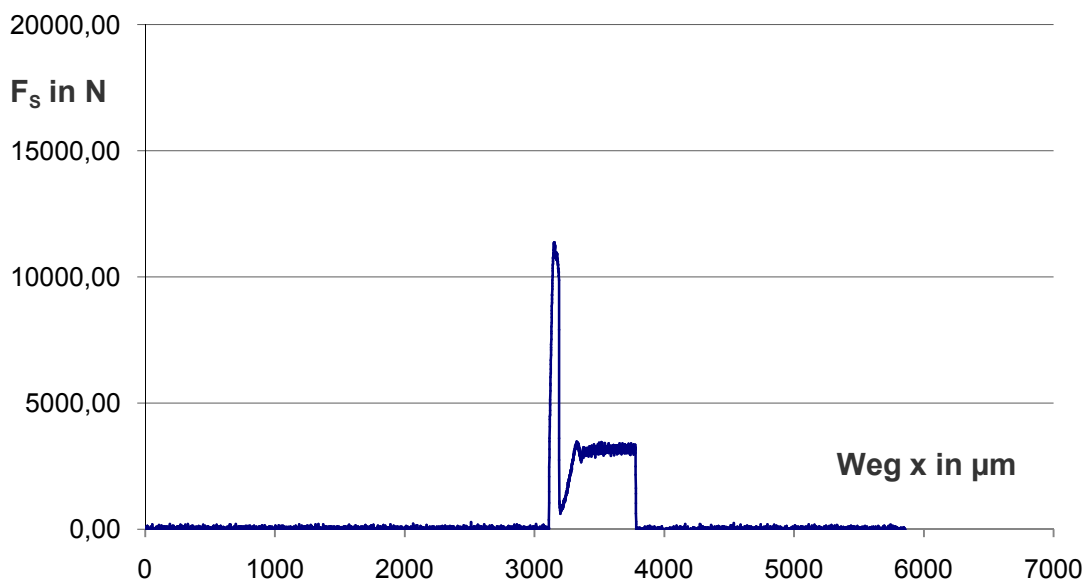


Abbildung 13.56: Schneidkraft  $F_S$  bei Raumtemperatur RT bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden mit einer Blechdicke 2,00 mm (M-1-01-RT)

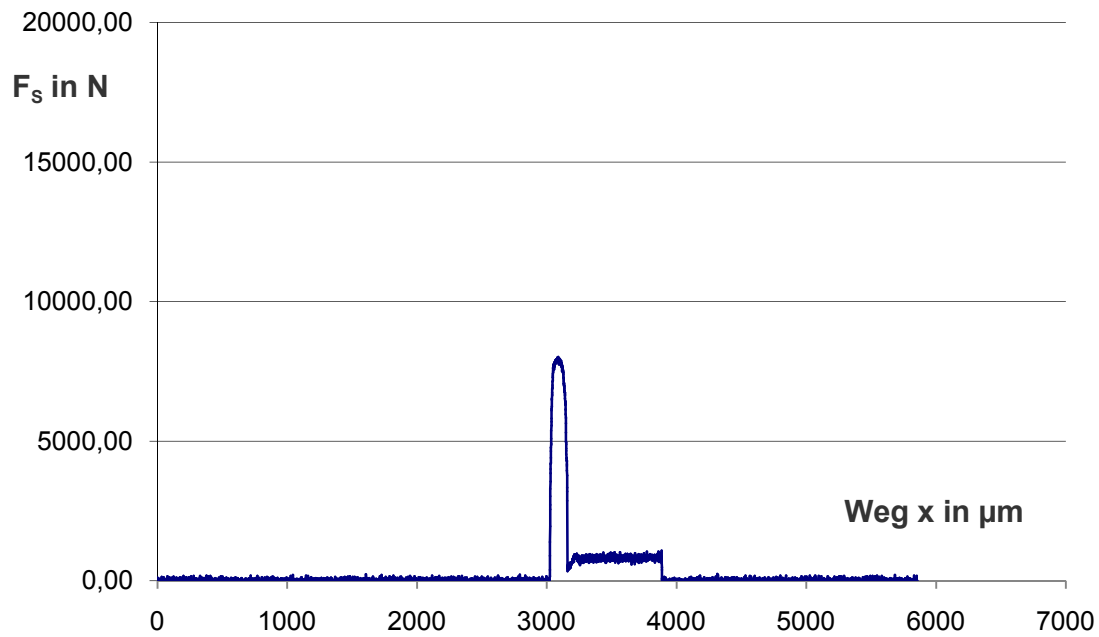


Abbildung 13.57: Schneidkraft  $F_S$  bei 100 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden mit einer Blechdicke 1,25 mm (M-2-01-100)

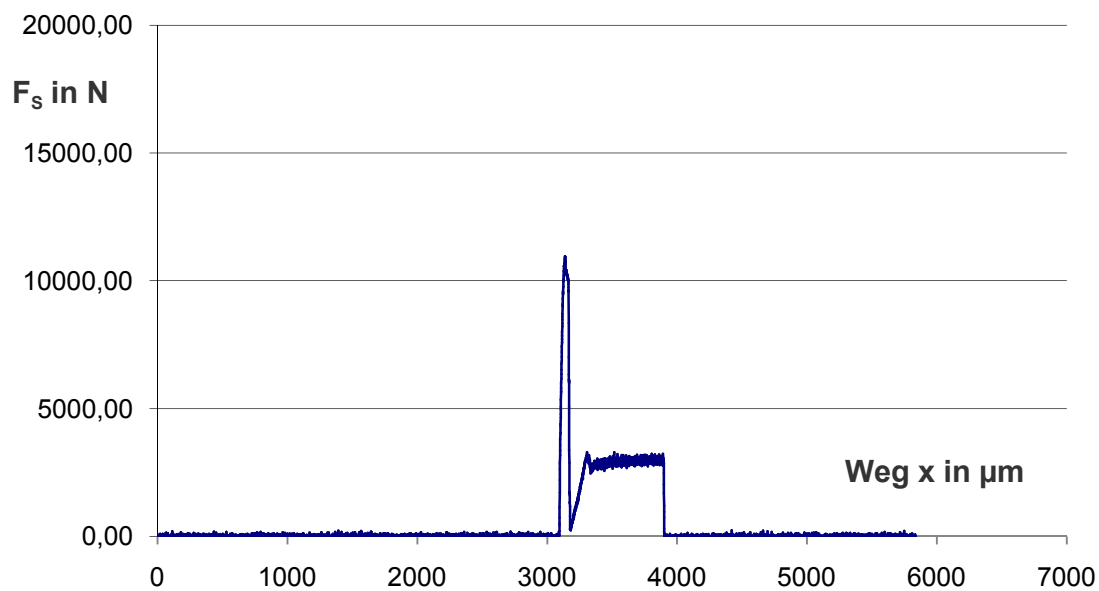


Abbildung 13.58: Schneidkraft  $F_S$  bei 100 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden mit einer Blechdicke 2,00 mm (M-1-01-100)

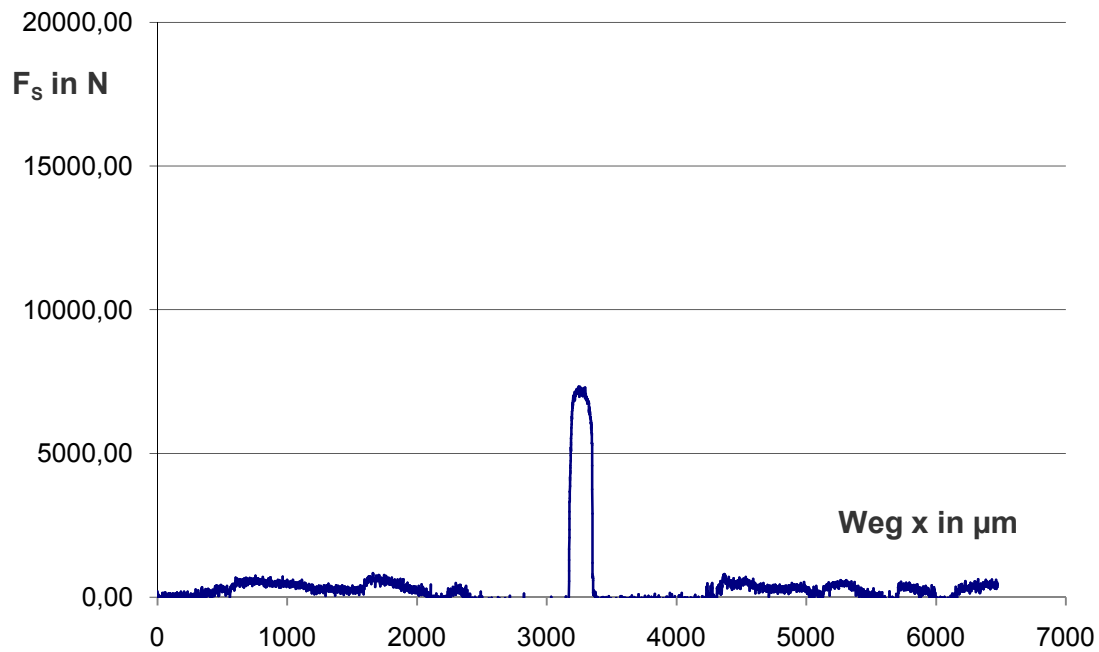


Abbildung 13.59: Schneidkraft  $F_S$  bei 150 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden mit einer Blechdicke 1,25 mm (M-2-01-150)

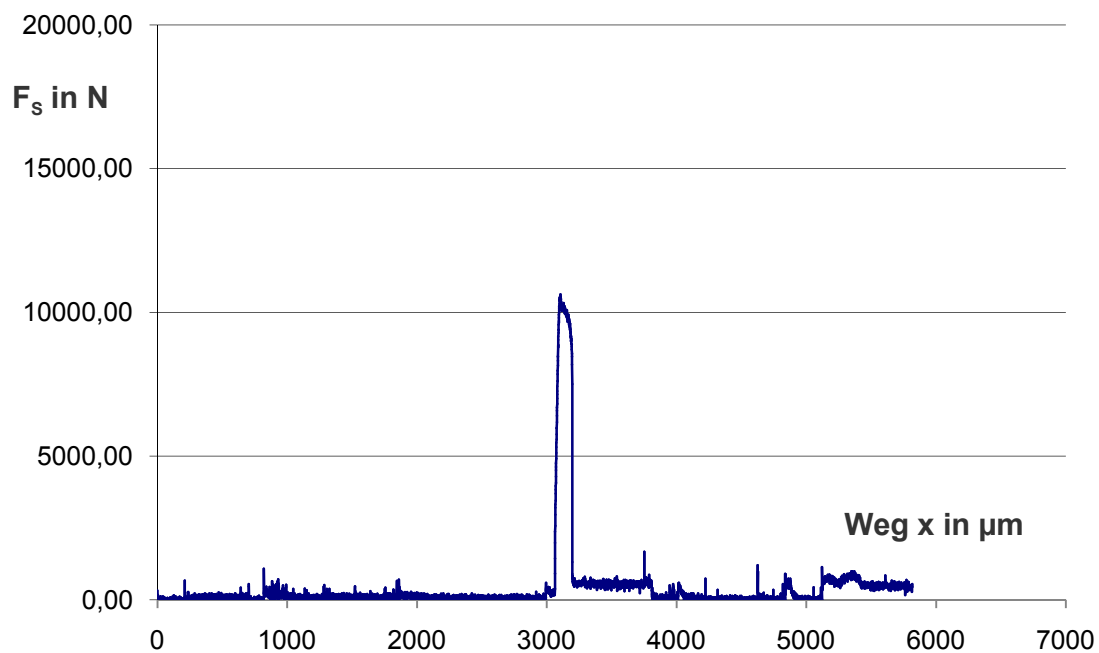


Abbildung 13.60: Schneidkraft  $F_S$  bei 150 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden mit einer Blechdicke 2,00 mm (M-1-01-150)

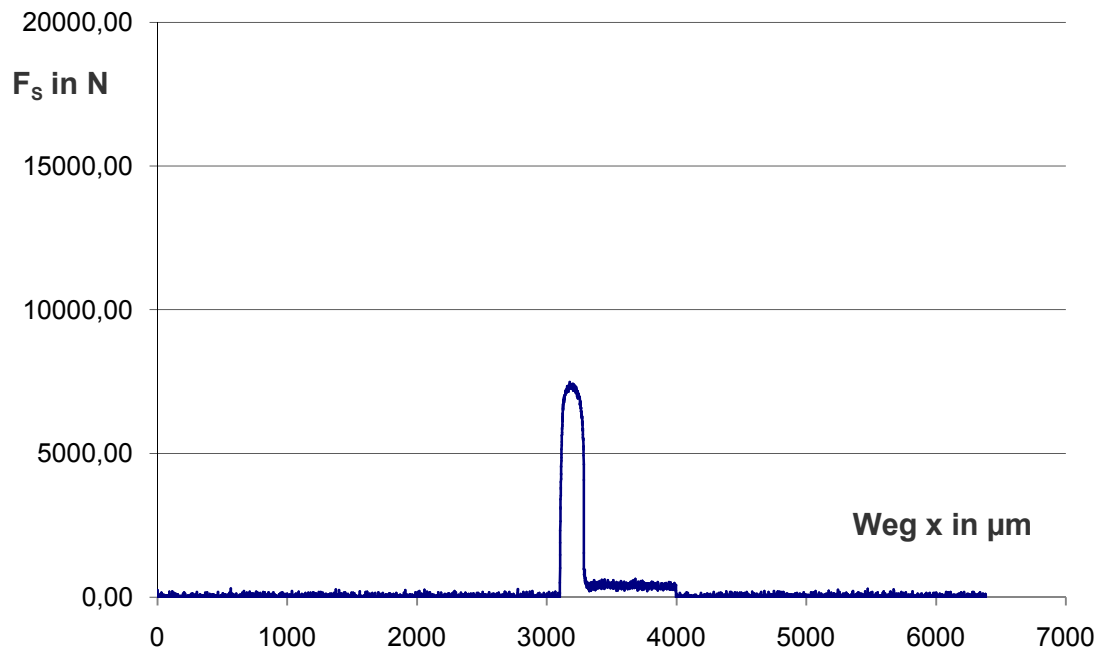


Abbildung 13.61: Schneidkraft  $F_S$  bei 200 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden mit einer Blechdicke 1,25 mm (M-2-01-200)

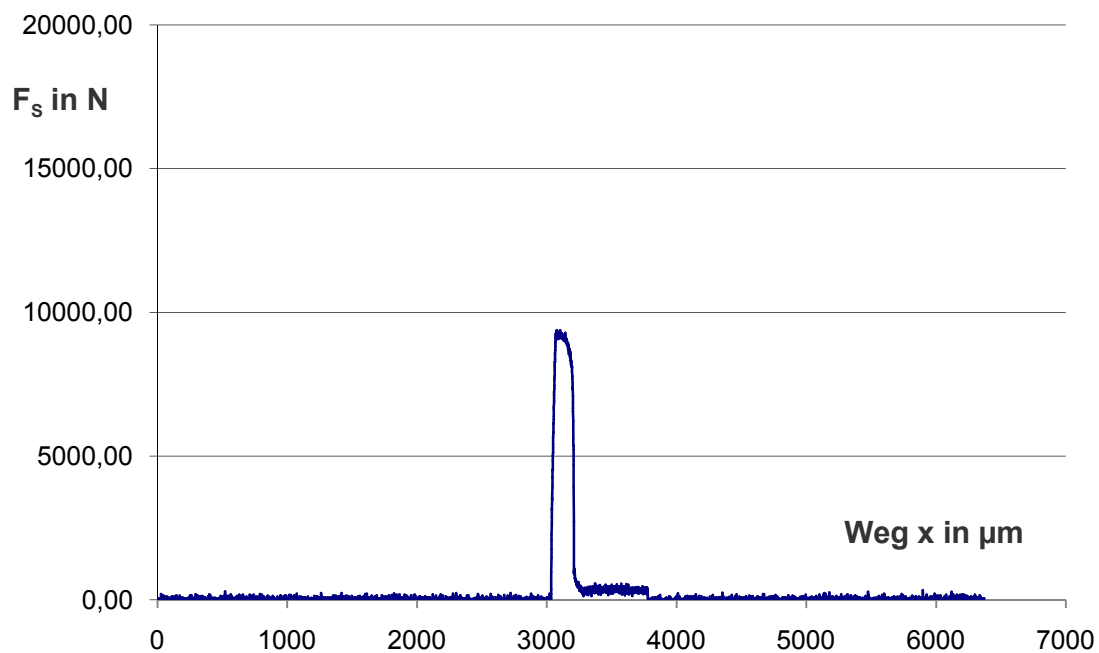


Abbildung 13.62: Schneidkraft  $F_S$  bei 200 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden mit einer Blechdicke 2,00 mm (M-1-01-200)

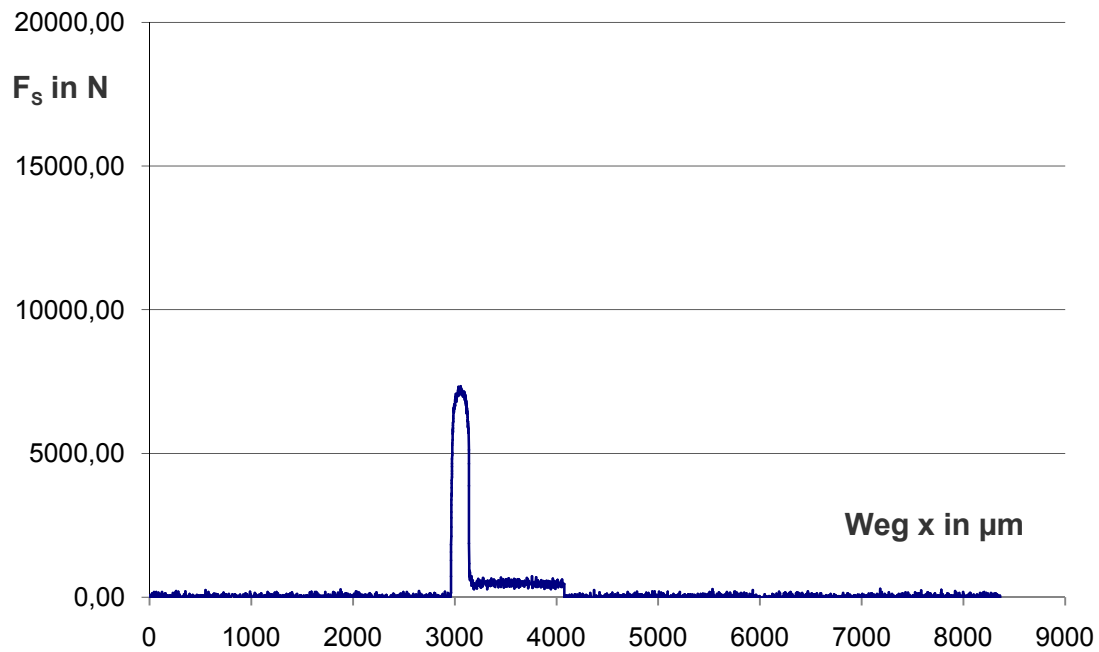


Abbildung 13.63: Schneidkraft  $F_s$  bei 250 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden mit einer Blechdicke 1,25 mm (M-2-01-250)

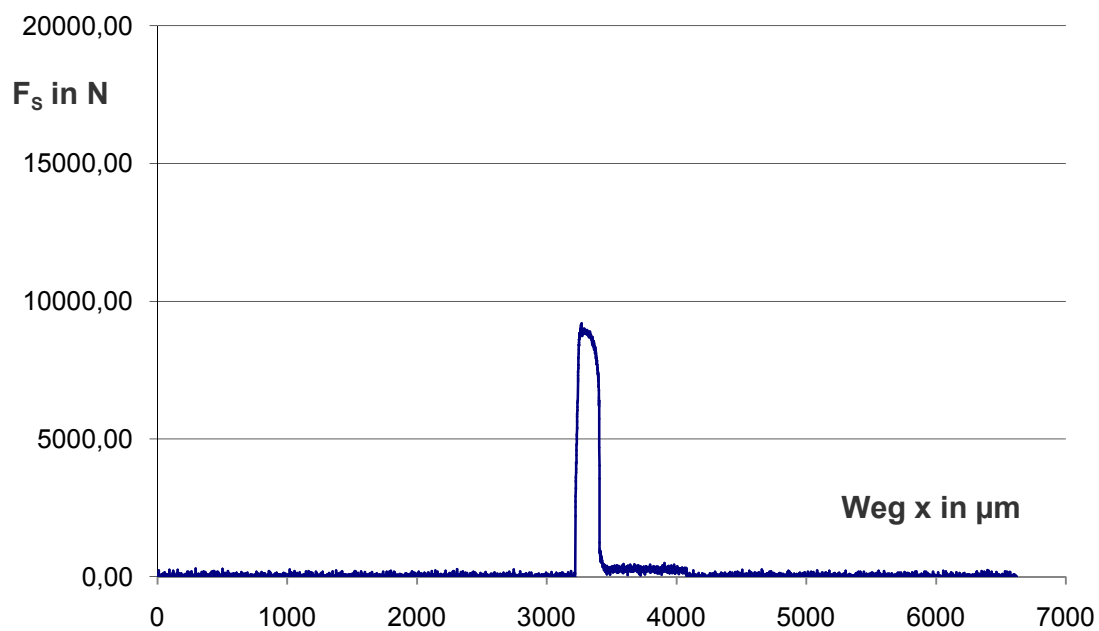


Abbildung 13.64: Schneidkraft  $F_s$  bei 250 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$ , im offenen Schnitt beim Messerschneiden mit einer Blechdicke 2,00 mm (M-1-01-250)

### 13.3 Beißschneiden

#### 13.3.1 Beißschneiden mit unterschiedlichen Keilwinkeln (offen)

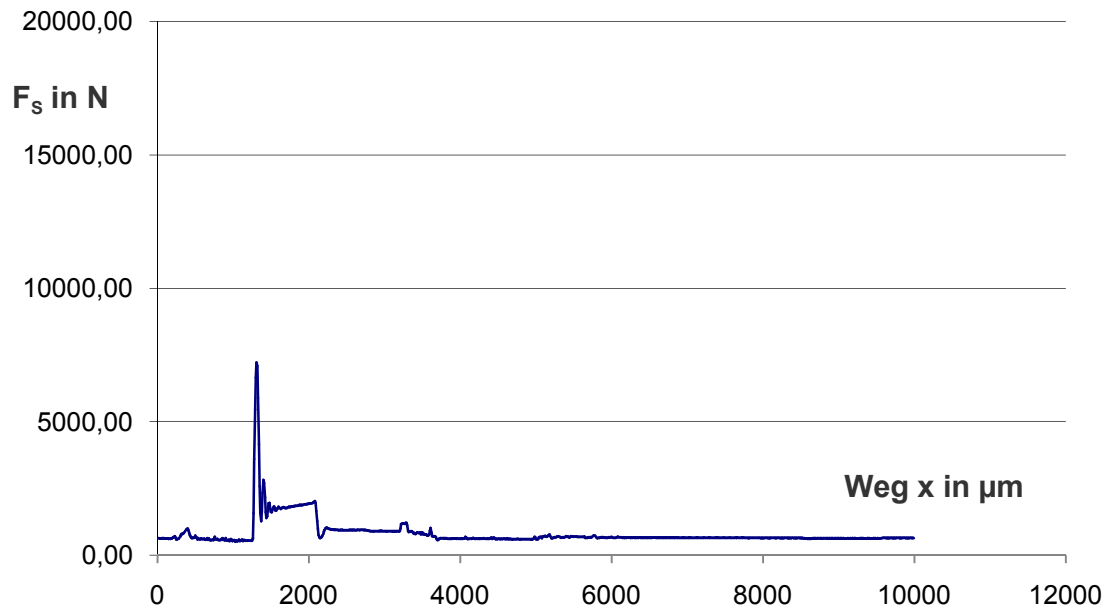


Abbildung 13.65: Schneidkraft  $F_s$  Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (B-2-01) beim Beißschneiden

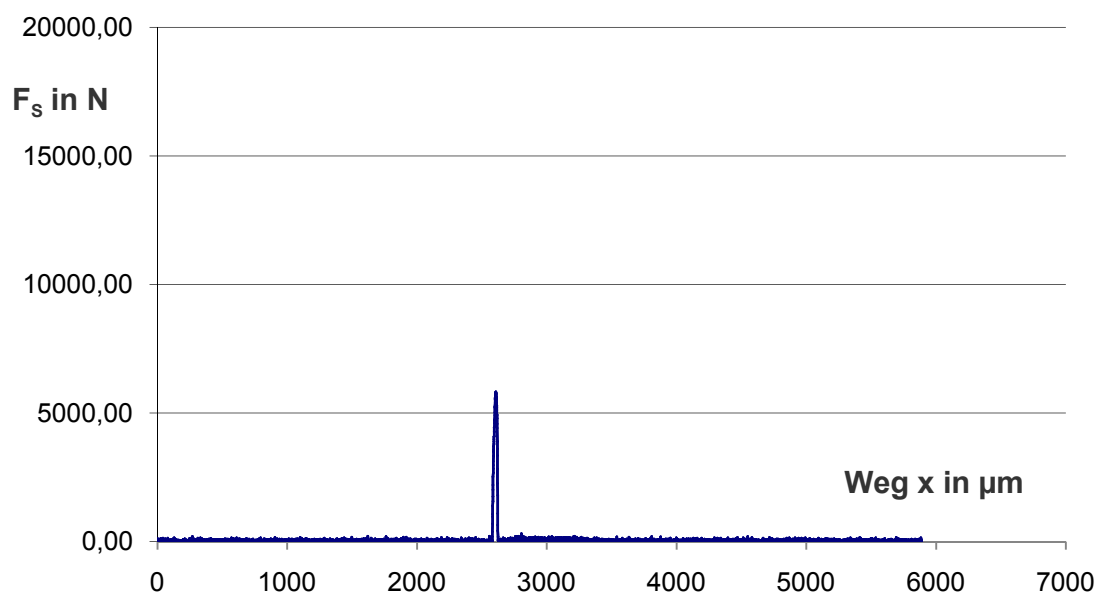


Abbildung 13.66: Schneidkraft  $F_s$  für Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (B-1-01) beim Beißschneiden

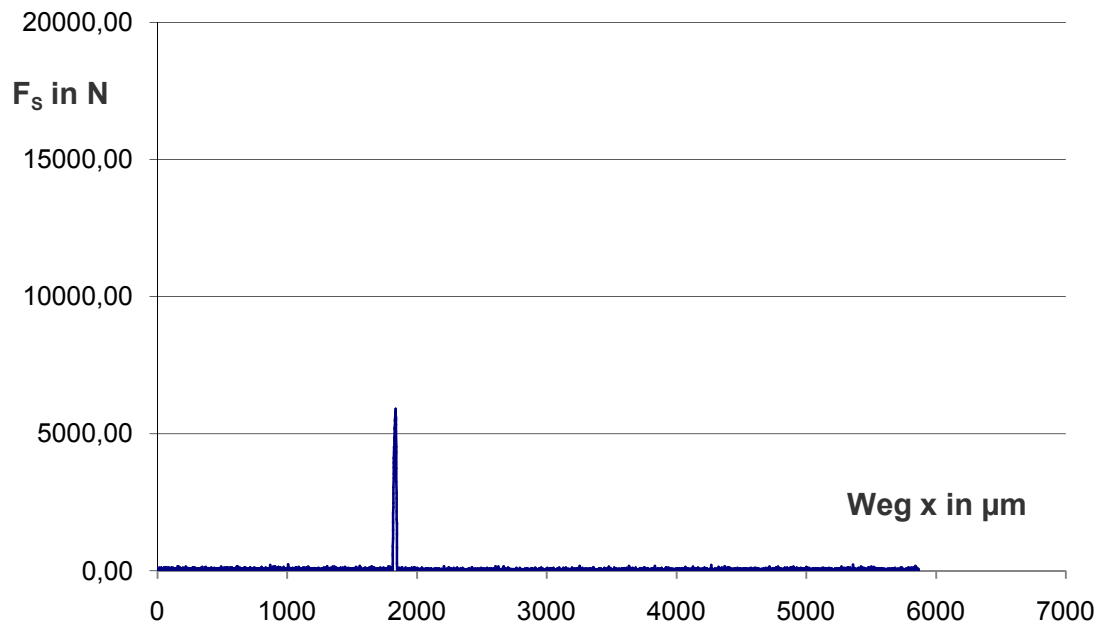


Abbildung 13.67: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (B-2-07) beim Beißschneiden

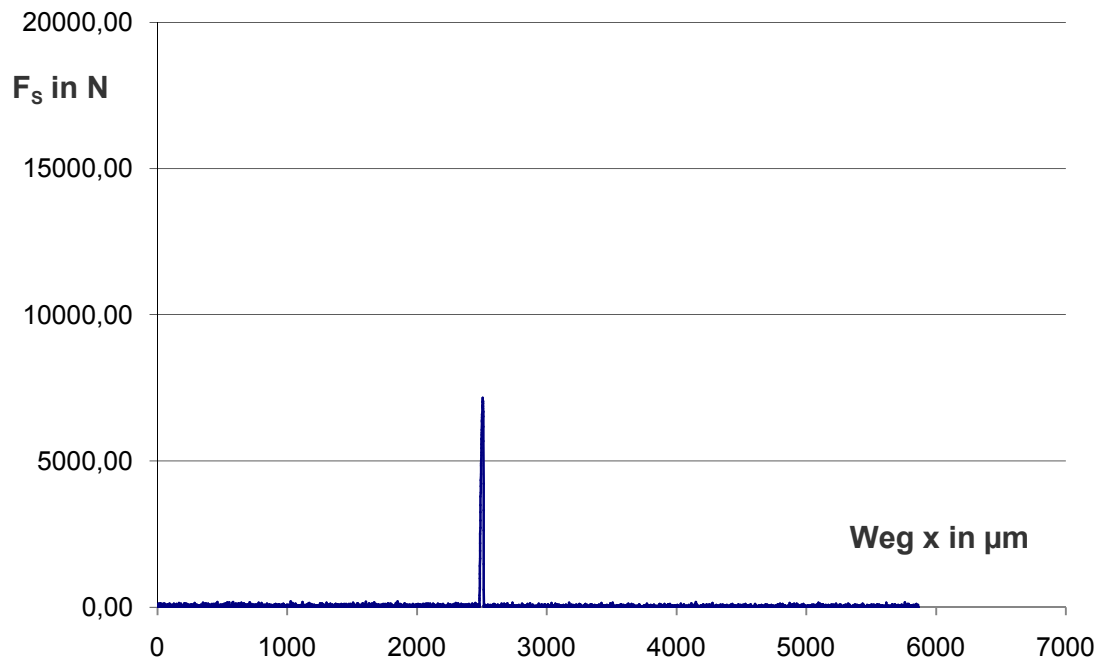


Abbildung 13.68: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (B-1-07) beim Beißschneiden

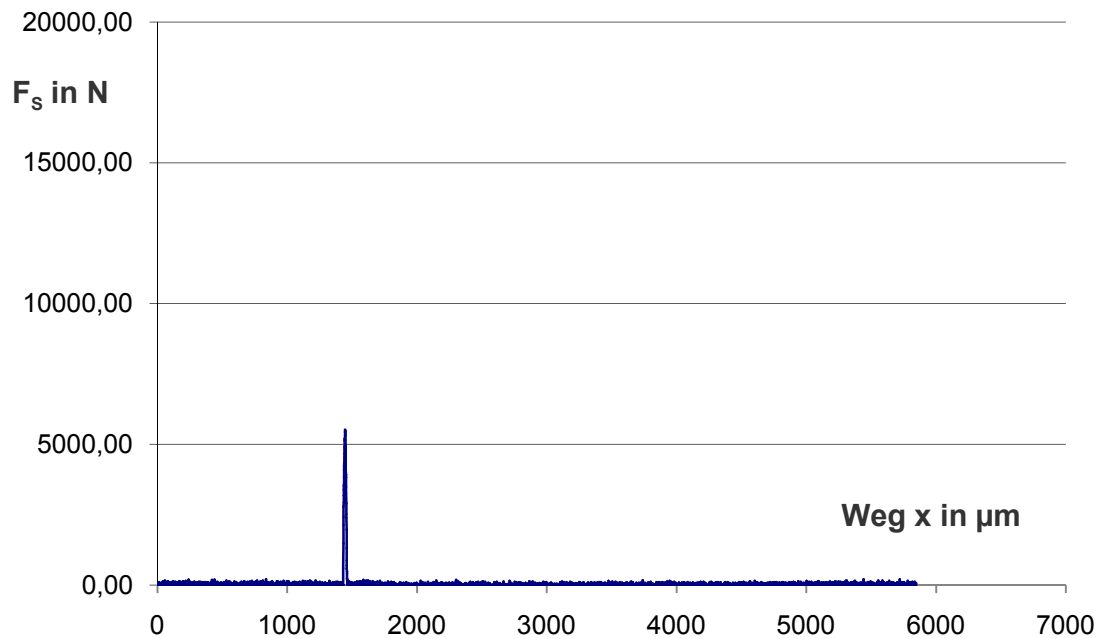


Abbildung 13.69: Schneidkraft  $F_S$  Keilwinkel  $\alpha = 45^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (B-2-13) beim Beißschneiden

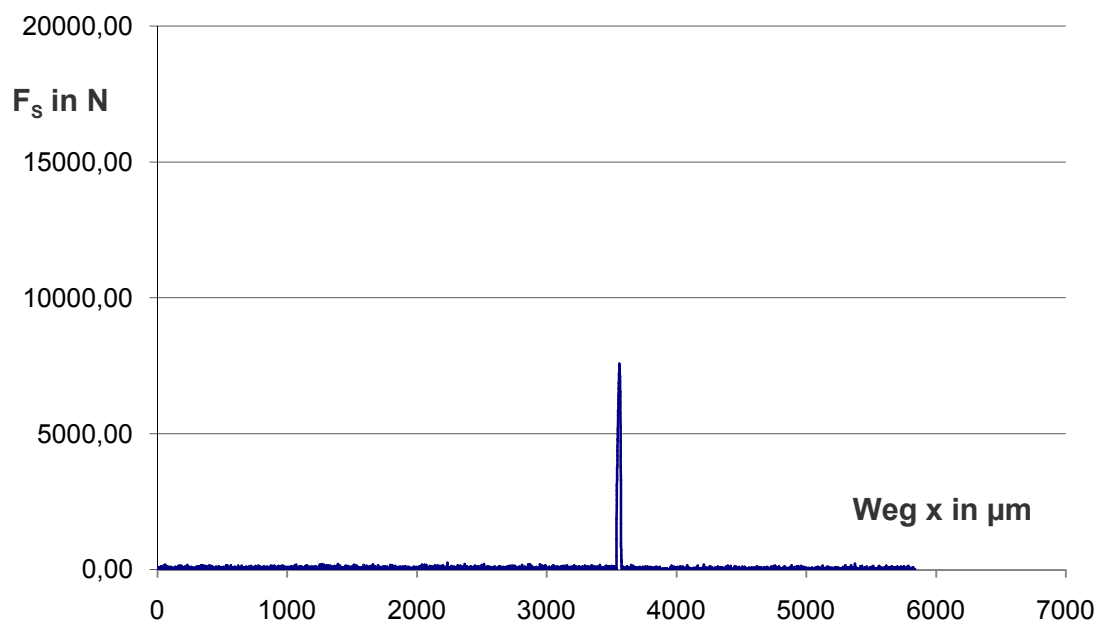


Abbildung 13.70: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\alpha = 45^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (B-1-13) beim Beißschneiden



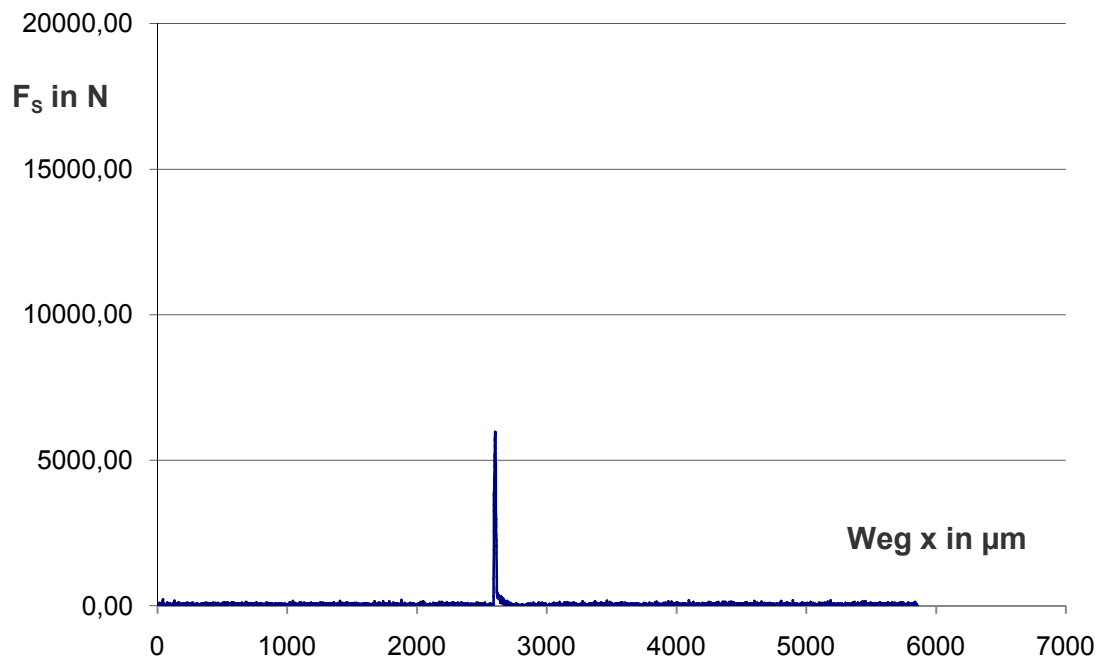


Abbildung 13.71: Schneidkraft  $F_S$  Keilwinkel  $\alpha = 60^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (B-2-19) beim Beißschneiden

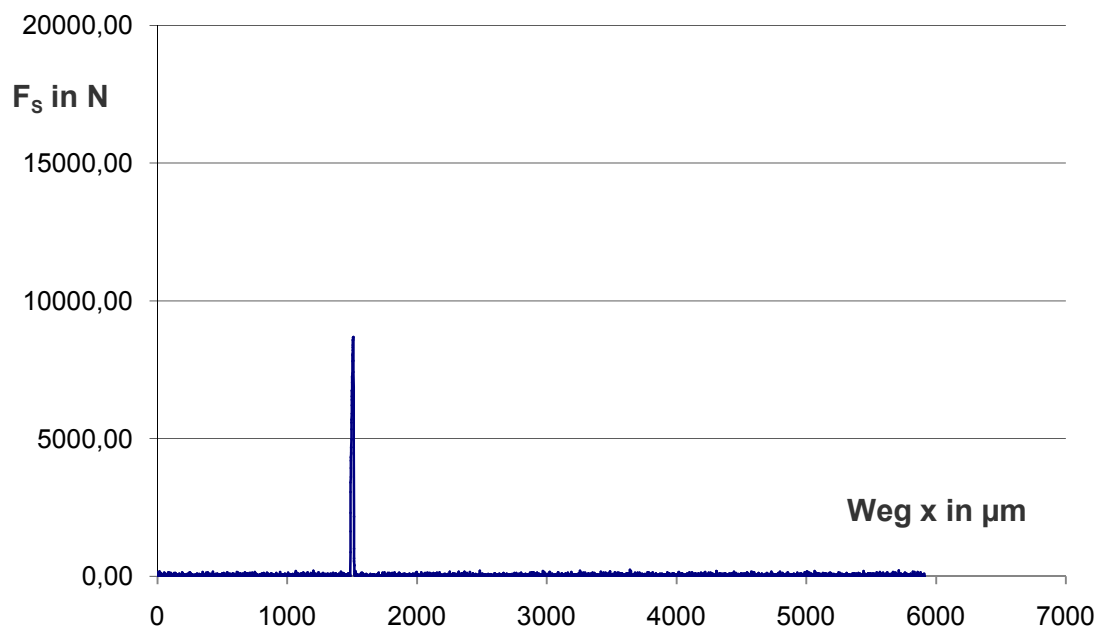


Abbildung 13.72: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\alpha = 60^\circ$  (symmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (B-1-19) beim Beißschneiden

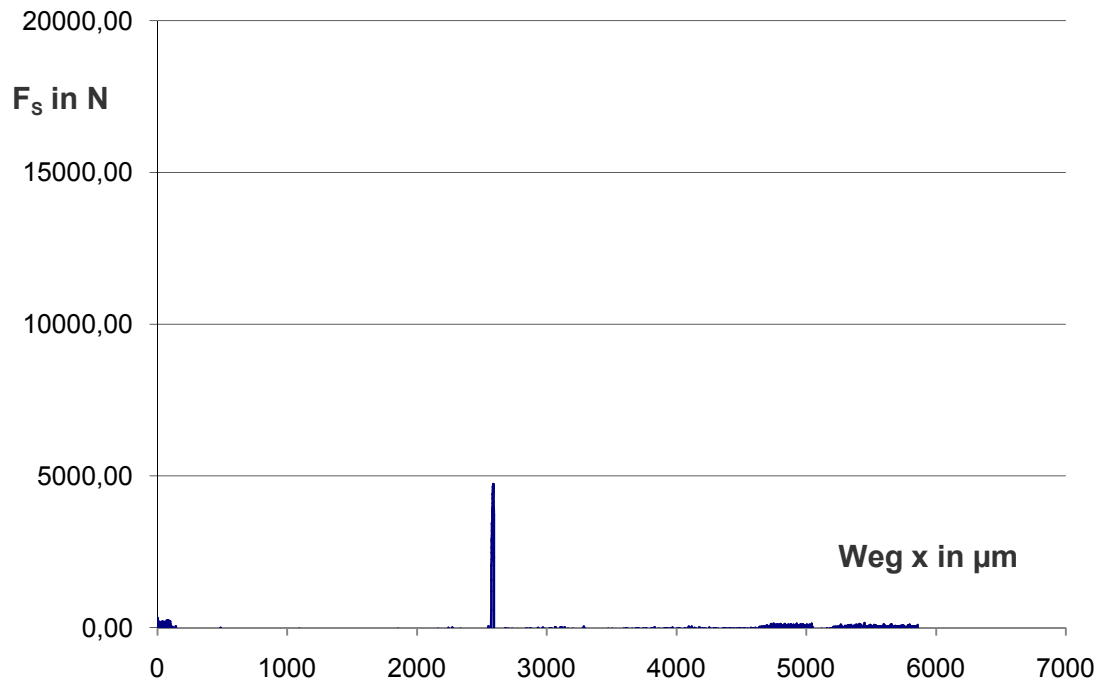


Abbildung 13.73: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\beta = 22,5^\circ$  (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (B-2-25) beim Beißschneiden

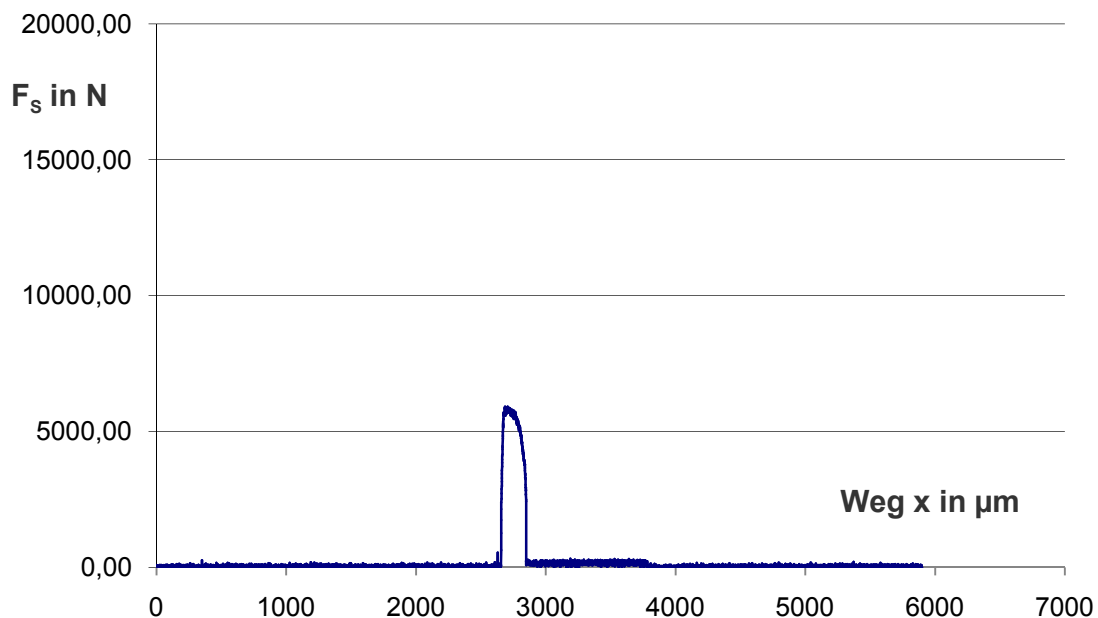


Abbildung 13.74: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\beta = 22,5^\circ$  (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (B-1-25) beim Beißschneiden

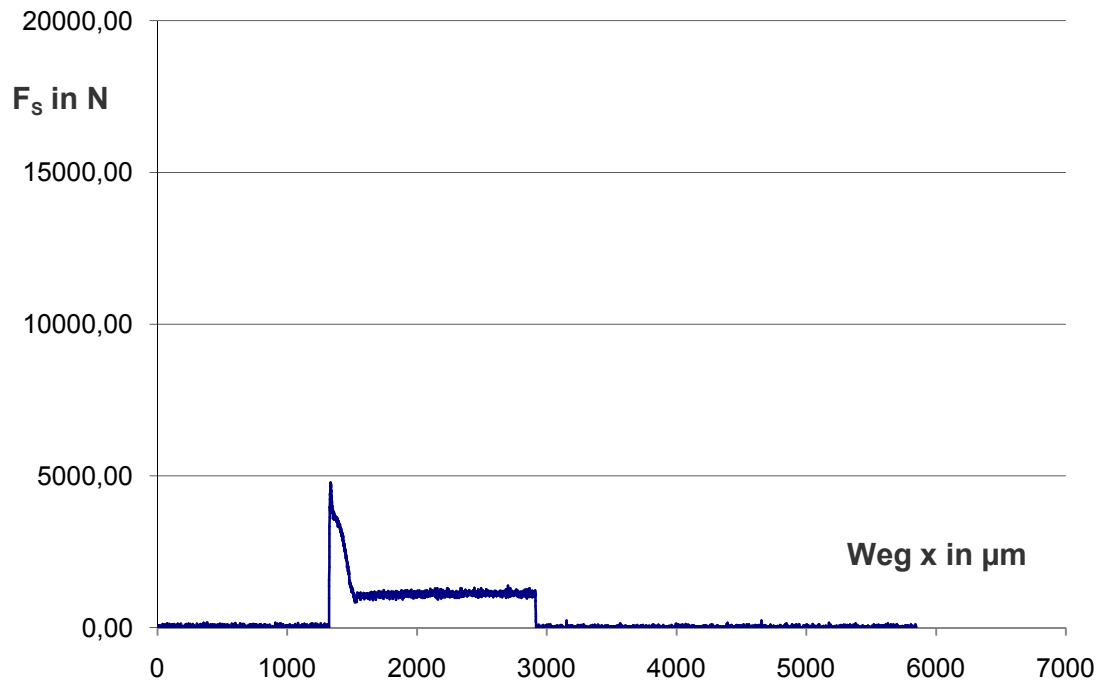


Abbildung 13.75: Schneidkraft  $F_s$  für Keilwinkel  $\beta = 30^\circ$  (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (B-2-31) beim Beißschneiden

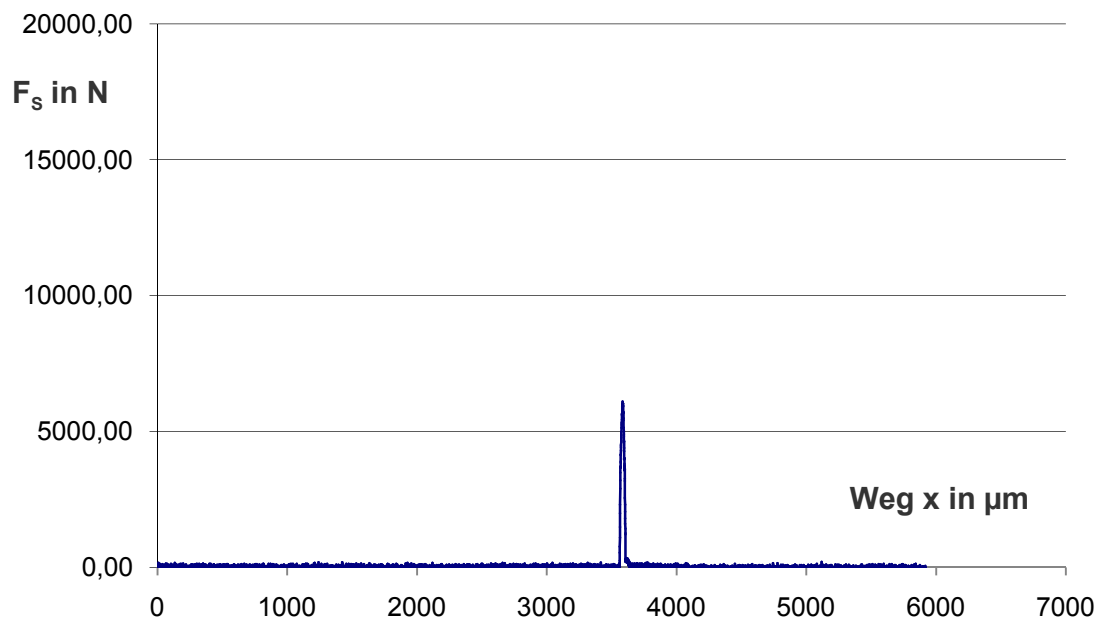


Abbildung 13.76: Schneidkraft  $F_s$  für Keilwinkel  $\beta = 30^\circ$  (asymmetrisch) bei offener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (B-1-31) beim Beißschneiden

### 13.3.2 Beißschneiden mit unterschiedlichen Keilwinkeln (geschlossen)

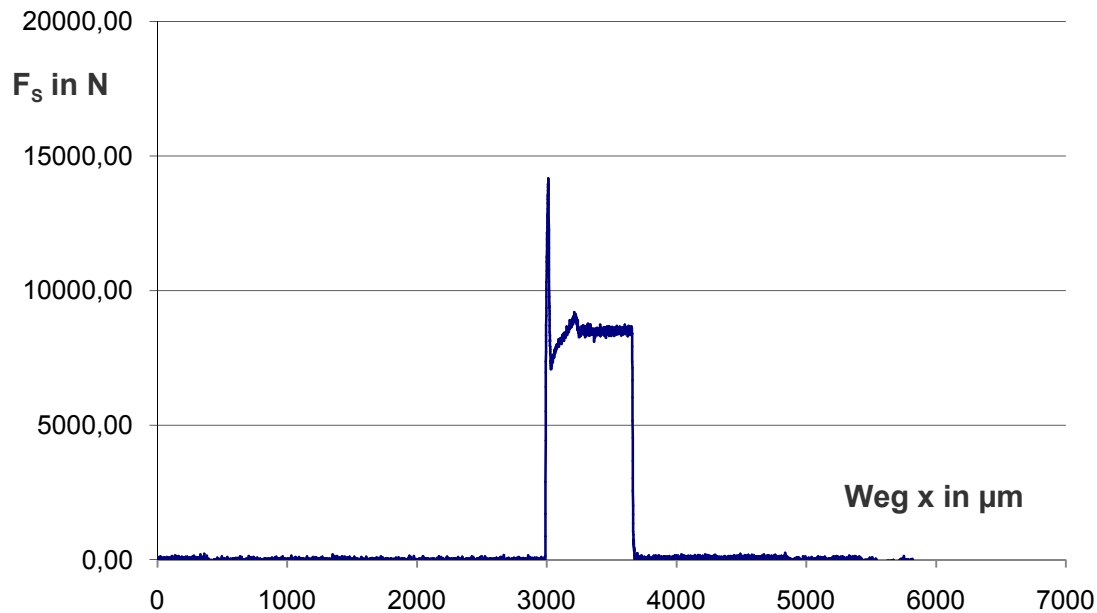


Abbildung 13.77: Schneidkraft  $F_s$  Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$  (symmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (B-2-04) beim Beißschneiden

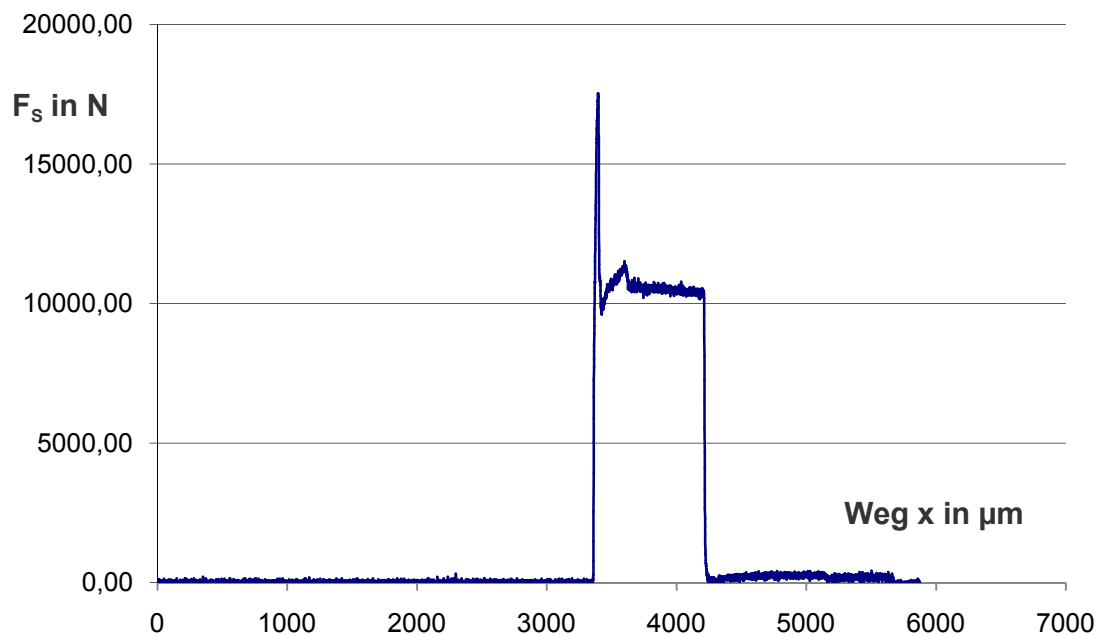


Abbildung 13.78: Schneidkraft  $F_s$  für Keilwinkel  $\alpha = 25^\circ$  (symmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (B-1-04) beim Beißschneiden

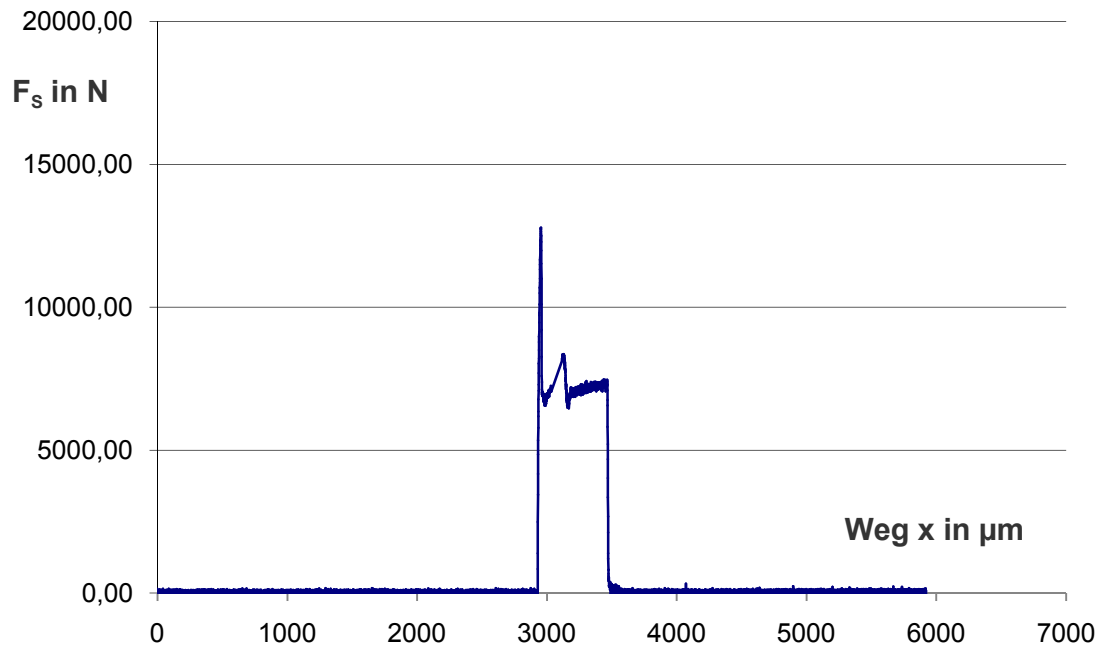


Abbildung 13.79: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$  (symmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (B-2-10) beim Beißschneiden

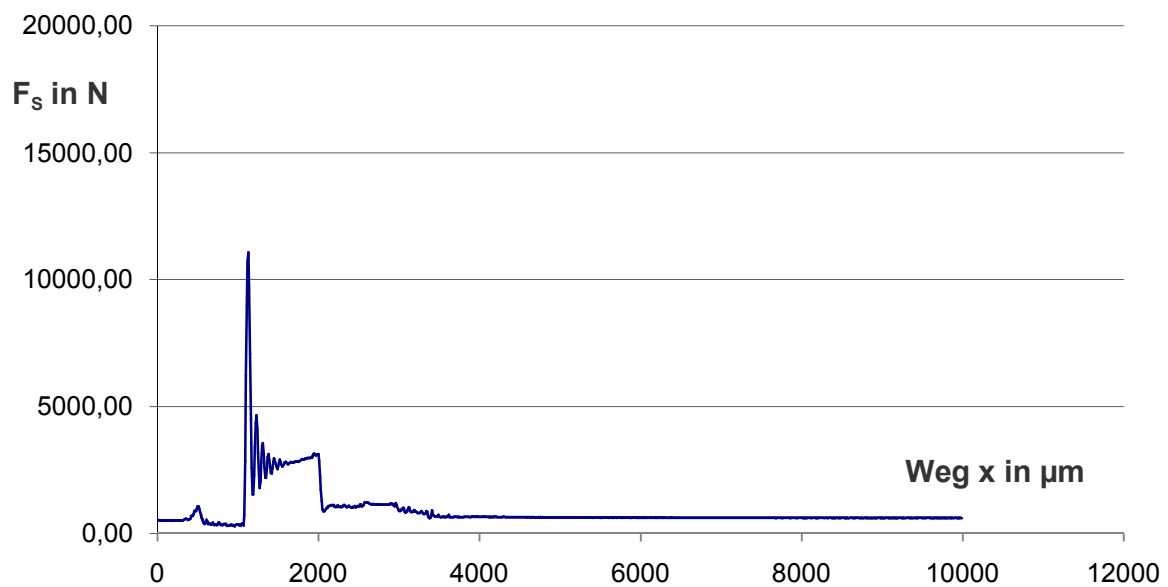


Abbildung 13.80: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$  (symmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (B-1-10) beim Beißschneiden

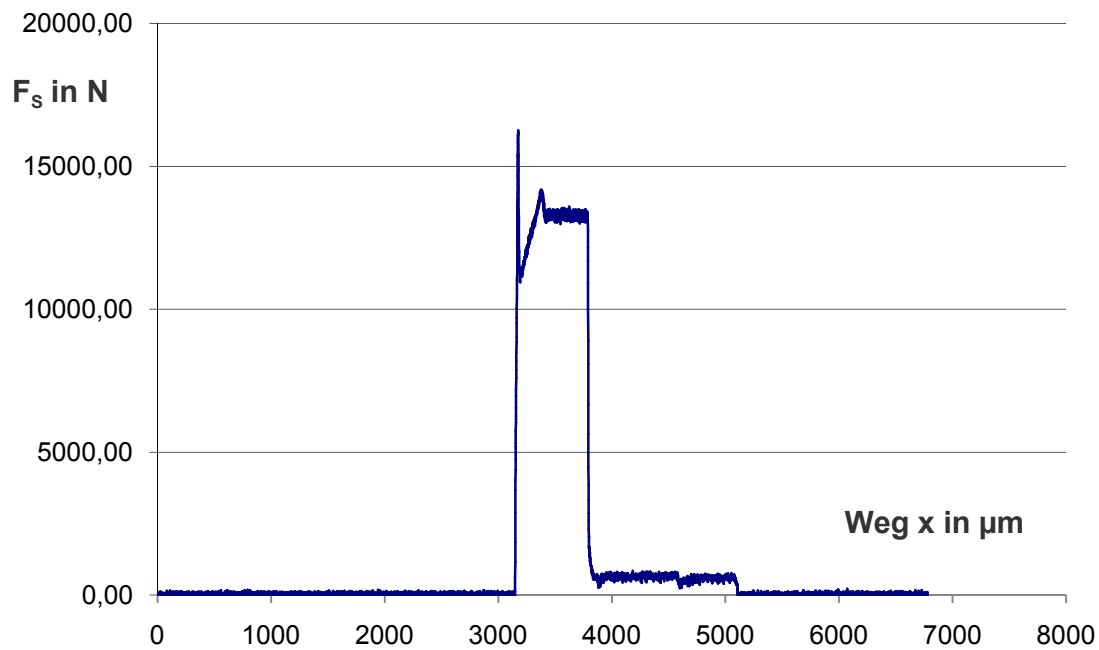


Abbildung 13.81: Schneidkraft  $F_s$  Keilwinkel  $\alpha = 60^\circ$  (symmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (B-2-22) beim Beißschneiden

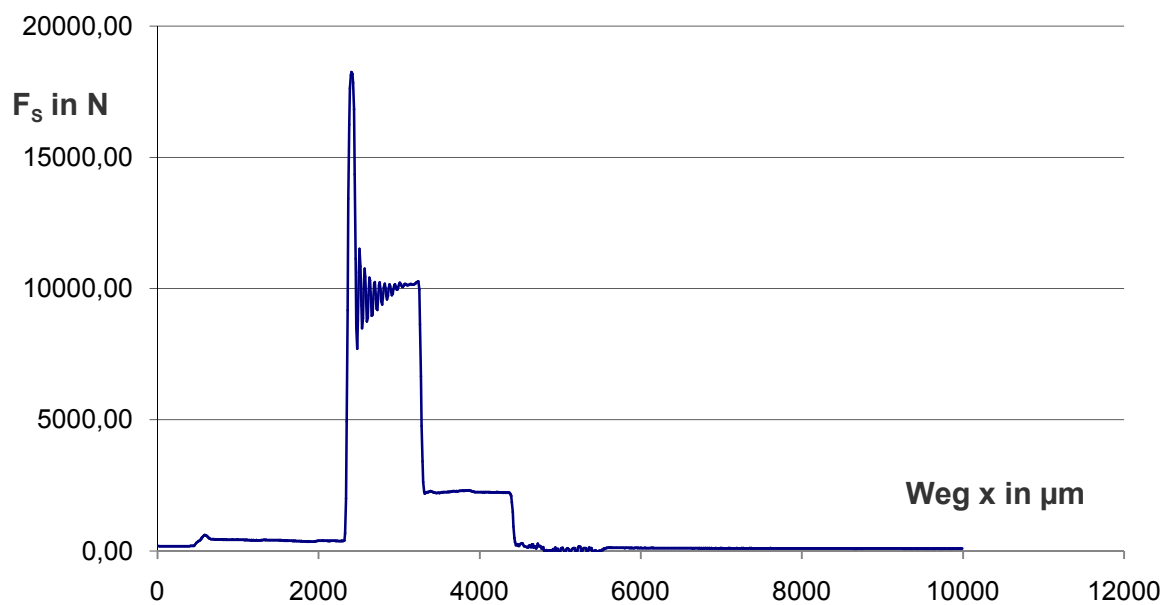


Abbildung 13.82: Schneidkraft  $F_s$  für Keilwinkel  $\alpha = 60^\circ$  (symmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (B-1-22) beim Beißschneiden

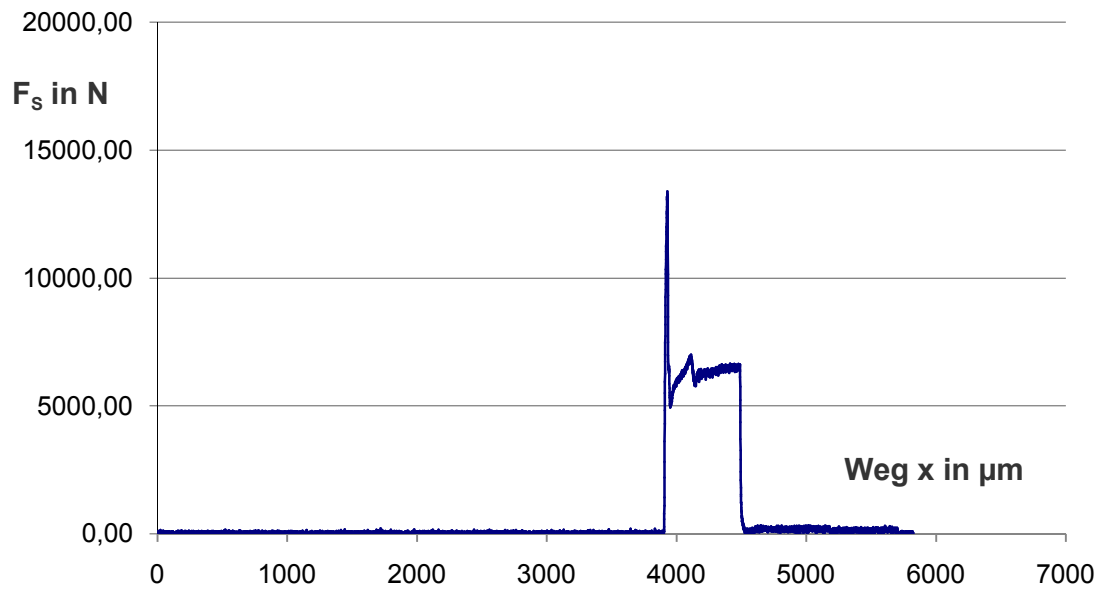


Abbildung 13.83: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\beta = 22,5^\circ$  (asymmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 1,25 mm (B-2-28) beim Beißschneiden

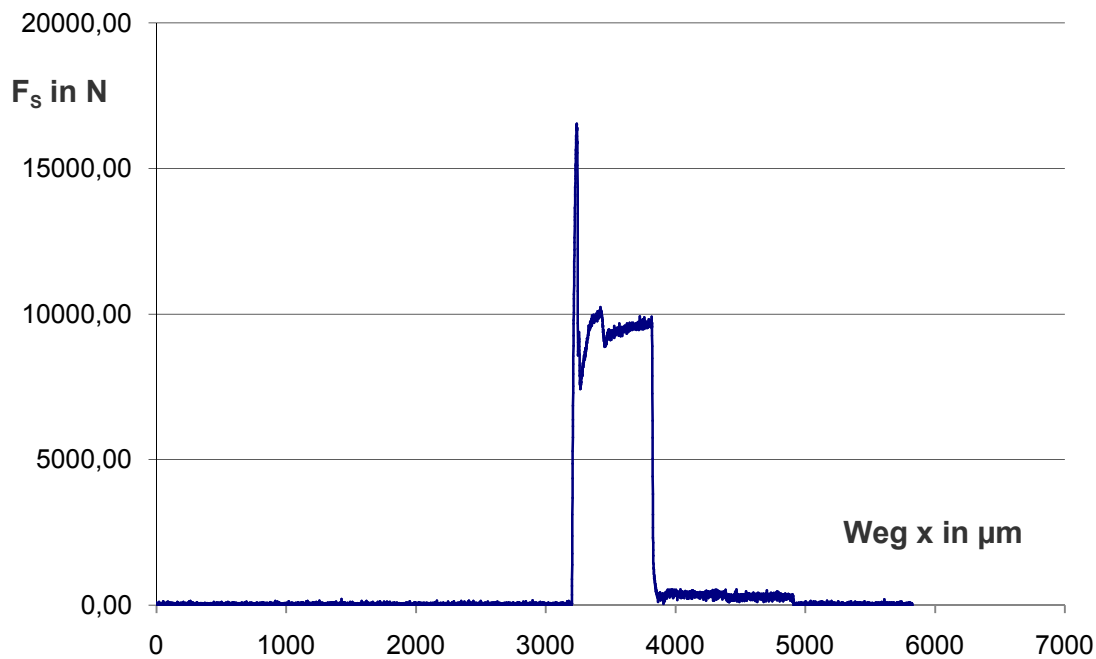


Abbildung 13.84: Schneidkraft  $F_S$  für Keilwinkel  $\beta = 22,5^\circ$  (asymmetrisch) bei geschlossener Schnittlinienführung und Raumtemperatur mit der Blechdicke 2,00 mm (B-1-28) beim Beißschneiden

### 13.3.3 Beißschneiden bei Raumtemperatur bis 250 °C

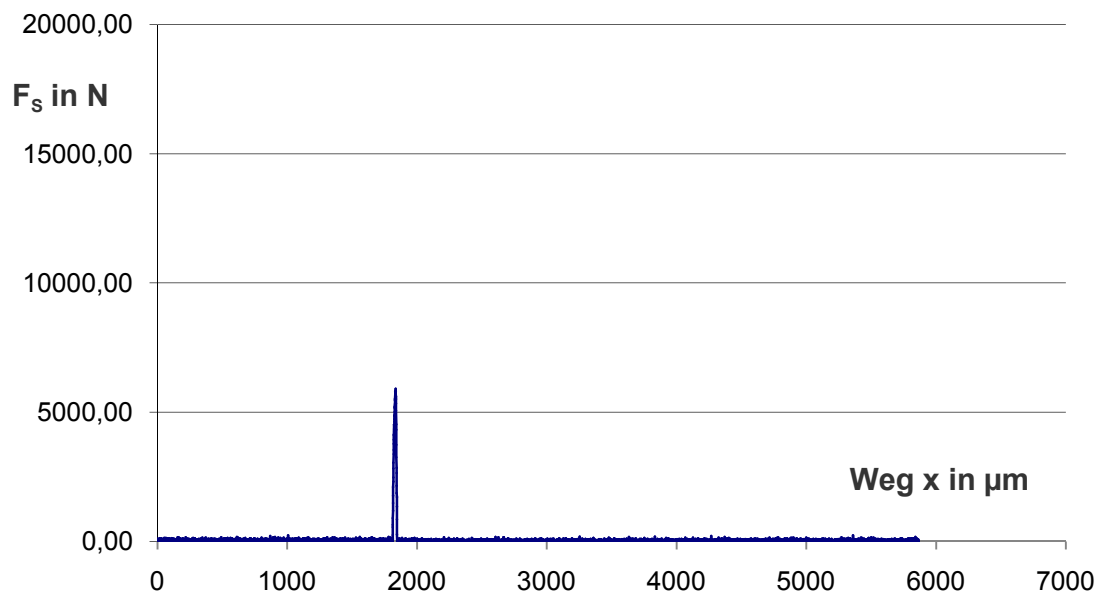


Abbildung 13.85: Schneidkraft  $F_S$  bei Raumtemperatur RT bei einem Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$ , im offenen Schnitt beim Beißschneiden mit einer Blechdicke 1,25 mm (B-2-07-RT)

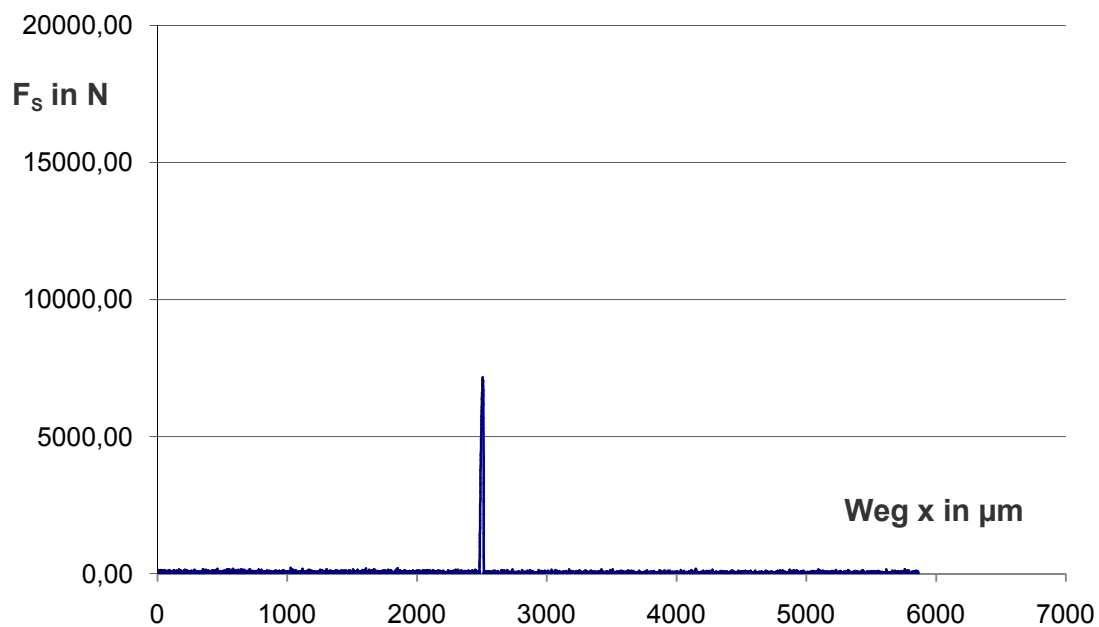


Abbildung 13.86: Schneidkraft  $F_S$  bei Raumtemperatur RT bei einem Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$ , im offenen Schnitt beim Beißschneiden mit einer Blechdicke 2,00 mm (B-1-07-RT)



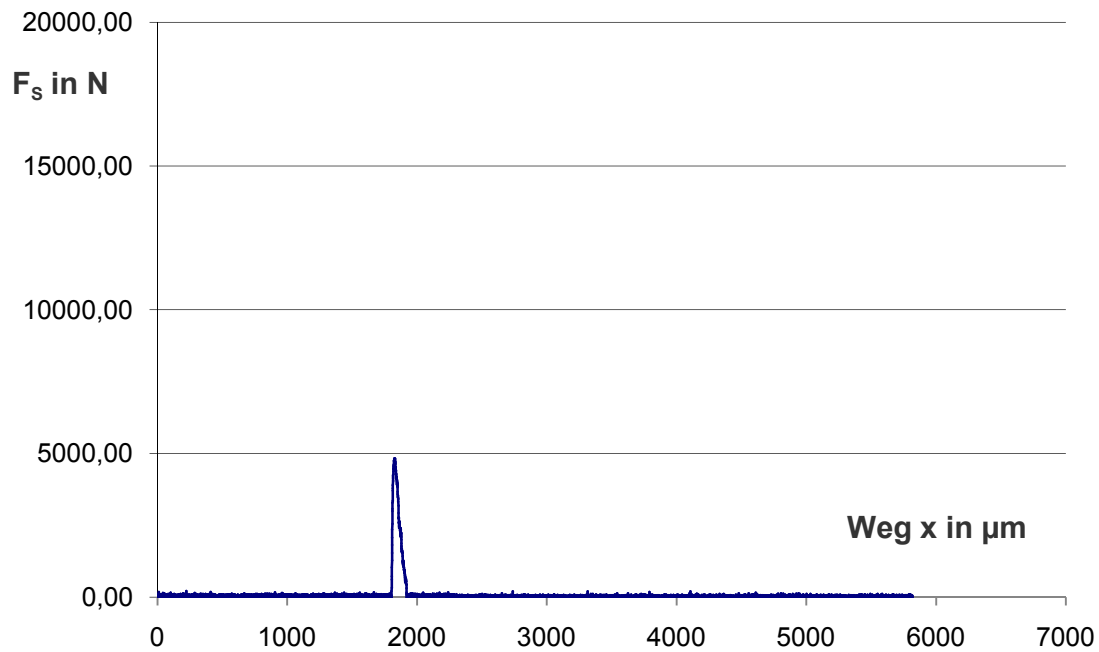


Abbildung 13.87: Schneidkraft  $F_S$  bei 100 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$ , im offenen Schnitt beim Beißschneiden mit einer Blechdicke 1,25 mm (B-2-07-100)

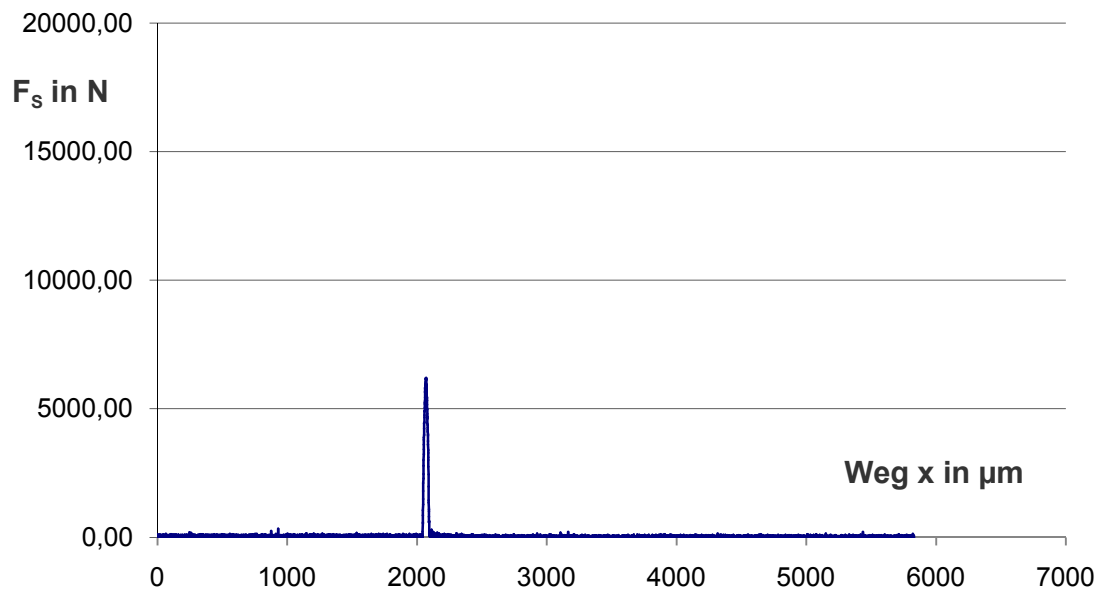


Abbildung 13.88: Schneidkraft  $F_S$  bei 100 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$ , im offenen Schnitt beim Beißschneiden mit einer Blechdicke 2,00 mm (B-1-07-100)

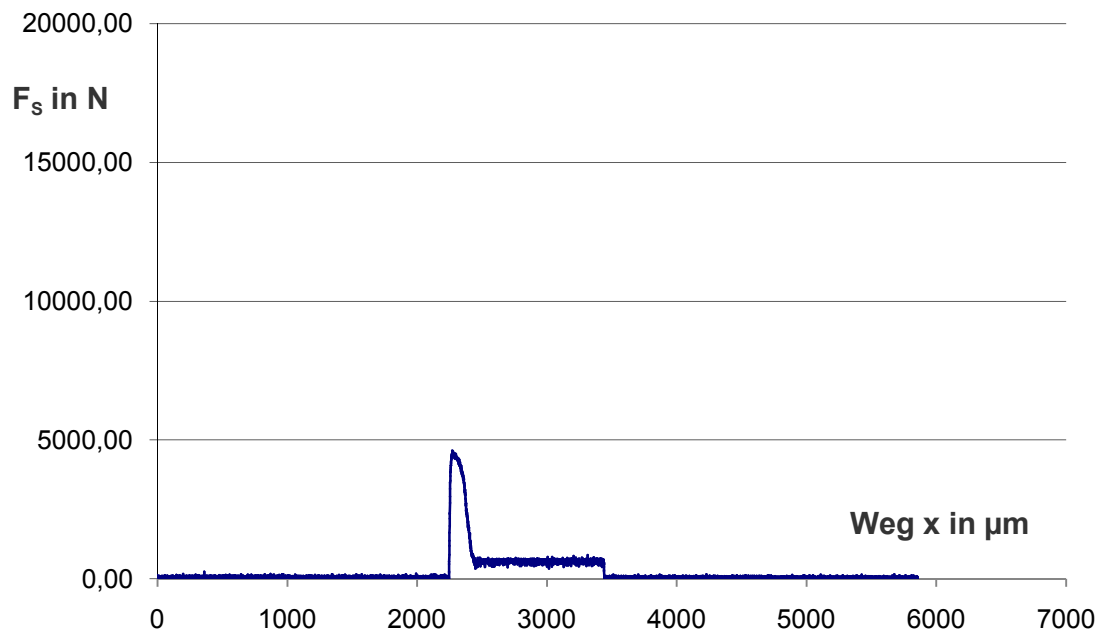


Abbildung 13.89: Schneidkraft  $F_s$  bei 150 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$ , im offenen Schnitt beim Beißschneiden mit einer Blechdicke 1,25 mm (B-2-07-150)

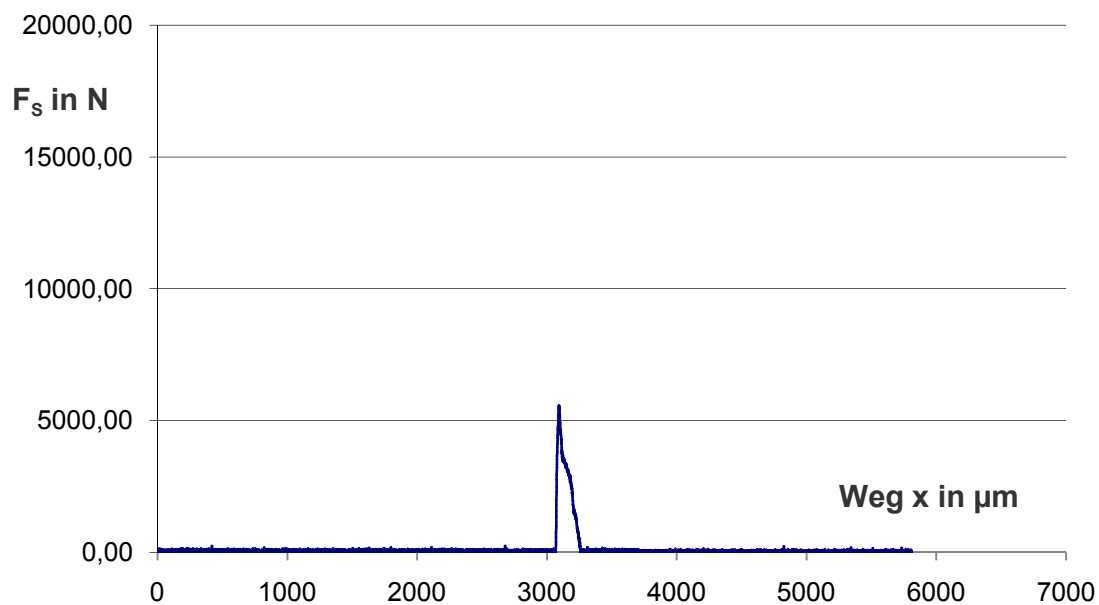


Abbildung 13.90: Schneidkraft  $F_s$  bei 150 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$ , im offenen Schnitt beim Beißschneiden mit einer Blechdicke 2,00 mm (B-1-07-150)

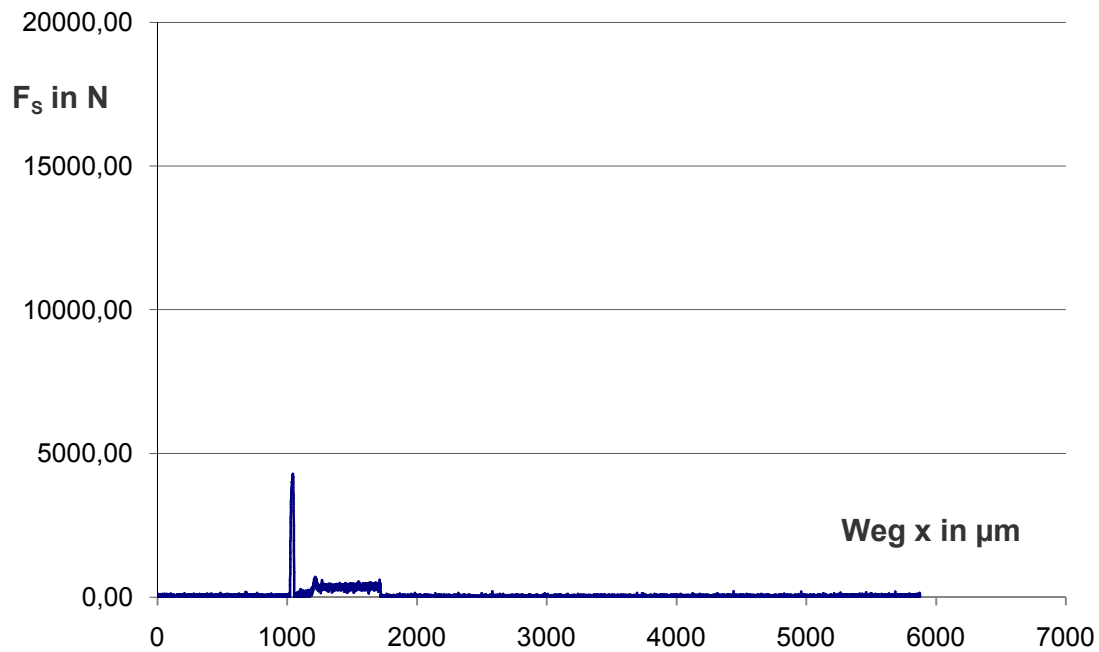


Abbildung 13.91: Schneidkraft  $F_s$  bei 200 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$ , im offenen Schnitt beim Beißschneiden mit einer Blechdicke 1,25 mm (B-2-07-200)

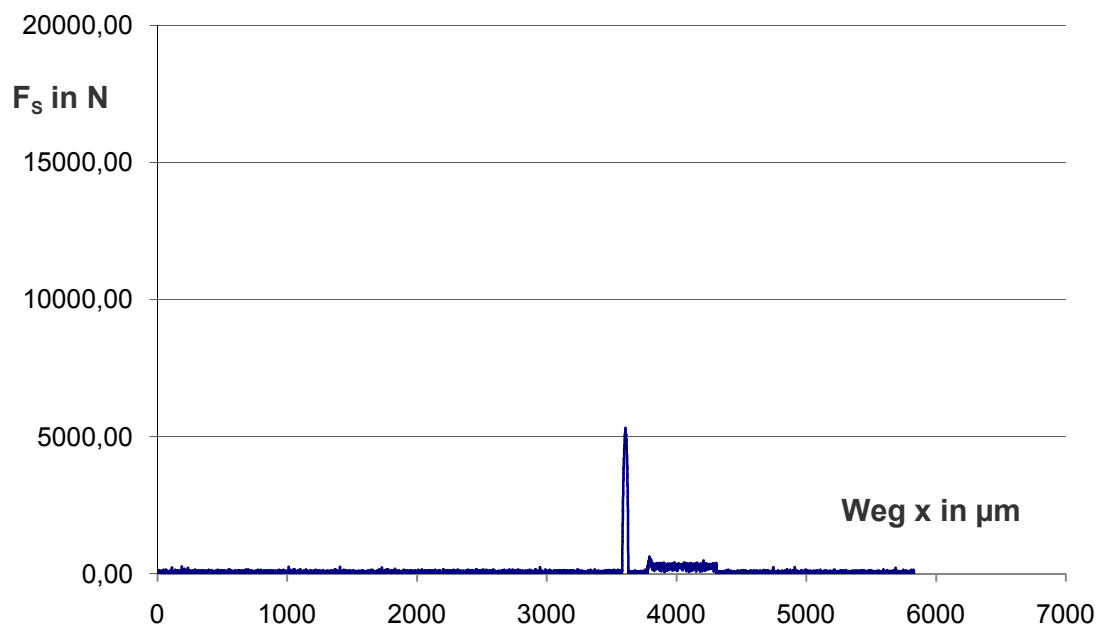


Abbildung 13.92: Schneidkraft  $F_s$  bei 200 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$ , im offenen Schnitt beim Beißschneiden mit einer Blechdicke 2,00 mm (B-1-07-200)

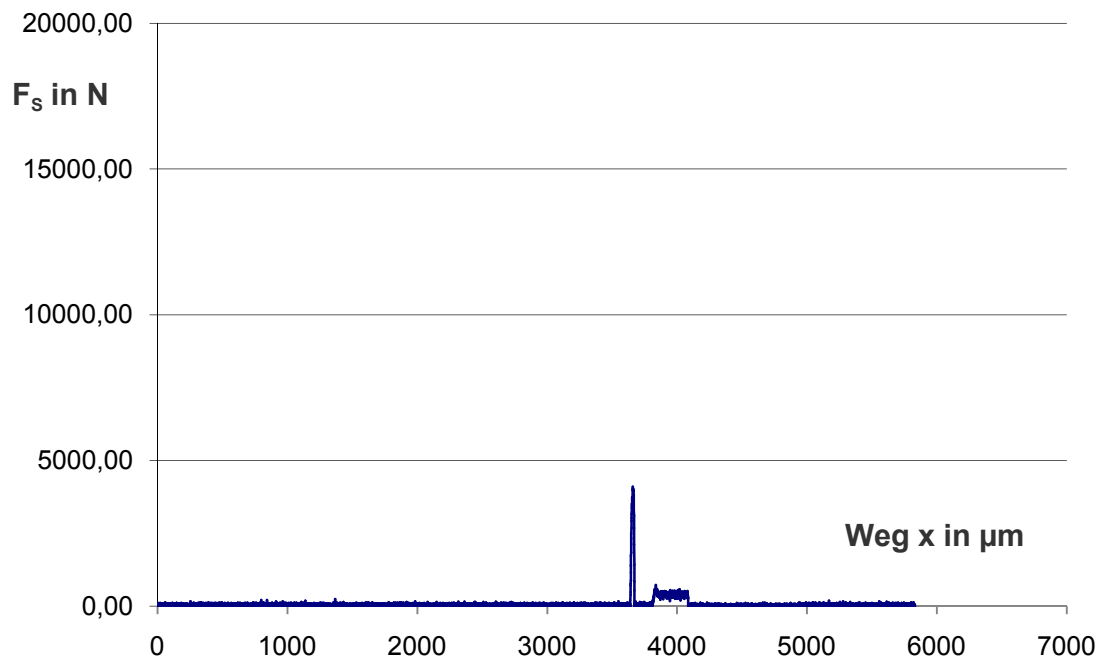


Abbildung 13.93: Schneidkraft  $F_s$  bei 250 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$ , im offenen Schnitt beim Beißschneiden mit einer Blechdicke 1,25 mm (B-2-07-250)

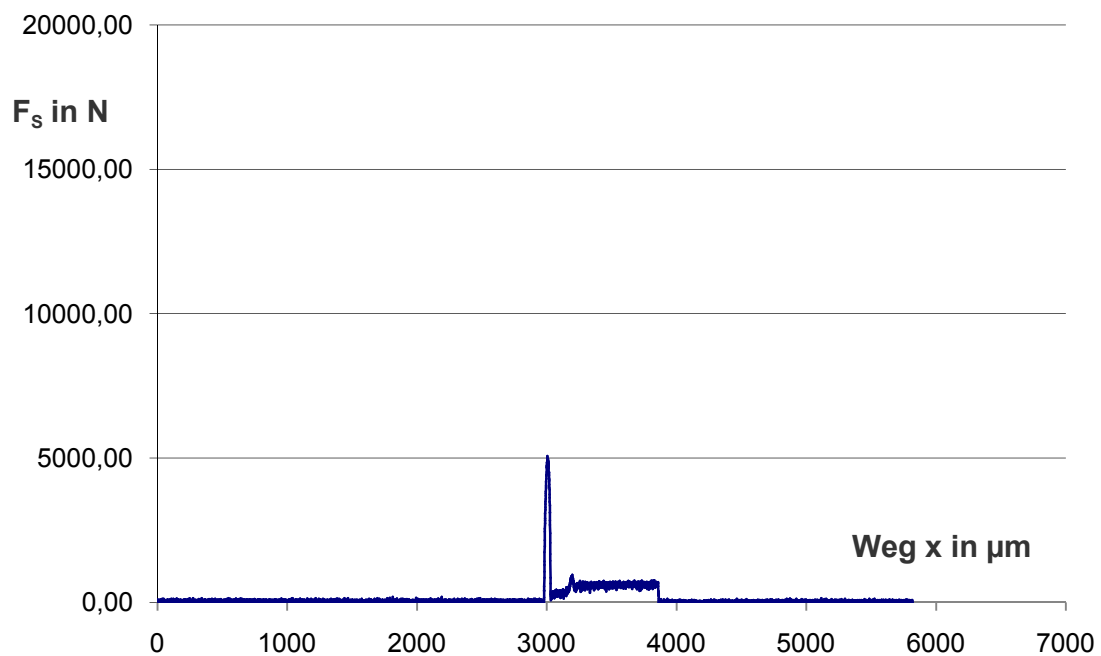


Abbildung 13.94: Schneidkraft  $F_s$  bei 250 °C bei einem Keilwinkel  $\alpha = 30^\circ$ , im offenen Schnitt beim Beißschneiden mit einer Blechdicke 2,00 mm (B-1-07-250)