

Entwicklung einer Umformtechnologie zur Herstellung endkonturnaher Slicermesser

Von der Fakultät für Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen der
Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt

von

Dipl.-Ingenieur

Gammoul, Abir

Geboren am 10.04.1974 in Homs

Vorsitzender: Professor Dr.-Ing. R. Woll

Gutachter: Professor Dr.-Ing. B. Viehweger

Gutachter: Professor Dr.-Ing. habil. V. Michailov

Tag der mündlichen Prüfung: 13.11.2012

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als Promotionsstudentin am Lehrstuhl Konstruktion und Fertigung der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus.

Herrn Professor Dr.-Ing. B. Viehweger danke ich sehr herzlich für seine stete Unterstützung bei der Betreuung und Durchführung dieser Arbeit. Ebenso bedanke ich mich herzlich bei Herrn Professor Dr.-Ing. habil. V. Michailov für die Durchsicht der Dissertation und die sich daraus ergebenden wertvollen Hinweise.

Dem Geschäftsführer Herrn B. Marquardt † und dem Entwicklungsleiter Herrn M. Fleischhauer der Firma ASTOR Schneidwerkzeuge GmbH danke ich für das Interesse an der Arbeit und die Unterstützung bei Realisierung der Arbeit.

Mein Dank gilt auch Herrn Dipl.-Ing. W.-J. Detlefsen und allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Produktionsforschung, die mich bei Durchführung und Anfertigung dieser Arbeit unterstützt haben.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meinem Mann, meiner Familie und meiner Heimatuniversität Tischrin.

Cottbus, Mai 2012

Inhaltsverzeichnis

1	<i>Einleitung</i>	1
2	<i>Stand der Technik</i>	5
2.1	Slicermesserkonstruktionen und Technologievergleich	5
2.1.1	Herkömmliches Slicermesser	5
2.1.2	Kunststoff beschichtetes Slicermesser	6
2.1.3	Geripptes Slicermesser	7
2.1.4	Gesicktes Slicermesser	8
2.2	Sonstige Messer	8
2.3	Stähle zur Herstellung von Messern	11
2.4	Herstellungsverfahren	17
2.4.1	Konventionelle Herstellungsverfahren	17
2.4.2	Umformen dicker Bleche	17
2.4.2.1	Begriff Blech	17
2.4.2.2	Umformverfahren für dicke Bleche	18
2.5	Produktentwicklung	21
3	<i>Ziel der Arbeit</i>	27
4	<i>Entwicklung von aus Blech gefertigten Slicermessern</i>	29
4.1	Anforderungen	30
4.2	Mögliche Beanspruchungen des Slicermessers	31
4.2.1	Torsionsbeanspruchung.....	31
4.2.2	Beanspruchungen durch Fliehkraft	31
4.2.3	Biegebeanspruchung durch Randkraft	32
4.3	Analyse der Eigenschaften des herkömmlichen Slicermessers	32
4.3.1	Berechnung der Auslenkung durch Flächenlast	33
4.3.2	Berechnung der Auslenkung und der Vergleichsspannung durch Fliehkraft	34
4.4	Konstruktive Problemerkklärung und Lösungsprinzip	36
4.4.1	Definition von Sicken.....	37
4.4.2	Prinzipielle Versteifungswirkung von Sicken	39
4.4.3	Methode zur Sickengestaltung und Dimensionierung	40
4.4.3.1	Experimentelle und manuelle Methoden	41
4.4.3.2	Auslegung der Sicken mittels FEM	41
4.4.3.3	Konstruktion nach Sickenkatalogen	42
4.4.3.4	Konstruktion mit Optimierungsprogrammen	43

4.5	Entwerfen eines aus Blech formbaren Slicermessers	43
4.5.1	Vorgehensweise	43
4.5.2	Konstruktion mit Optimierungsprogramm	44
4.5.3	Auslegung der Sicken mittels FEM.....	46
4.6	Konstruktive Auslegung der Blechmesser	51
4.7	Analyse der Eigenschaften des konstruierten Blechmessers.....	53
4.7.1	Berechnung der Auslenkung durch Flächenlast	53
4.7.2	Berechnung der Auslenkung und der Vergleichsspannung durch Fliehkraft	54
4.8	Vergleich der berechneten Eigenschaften.....	57
5	<i>Technologiekonzepte und Fertigungsplanung.....</i>	60
5.1	Festlegung der Fertigungsfolge.....	60
5.2	Werkstoffkennwerte und Verfahrensgrenzen	62
5.2.1	Versuchswerkstoff.....	62
5.2.2	Chemische Zusammensetzung	62
5.2.3	Ausgangsgefüge	63
5.2.4	Ermittlung von Werkstoffkennwerten	64
5.2.5	Aufnahme der Fließkurve.....	70
5.2.6	Einfluss der Temperatur auf das Umformverhalten des Werkstoffes.....	71
5.2.7	Ermittlung des Grenzformänderungsschaubilds.....	73
5.3	Simulation der Fertigungsprozesse	76
5.3.1	Modellbildung	77
5.3.2	Simulationsergebnisse	78
5.3.2.1	Herstellbarkeit	78
5.3.2.2	Presskräfte	79
5.3.2.3	Dickenänderung.....	80
5.4	Experimentelle Untersuchungen des umgeformten Halbzeugs	81
5.4.1	Versuchsplanung	81
5.4.2	Versuchswerkzeuge und Versuchsdurchführung	83
5.4.2.1	Kaltumformung	85
5.4.2.2	Halbwarmumformung.....	85
5.4.2.3	Warmumformung	88
5.4.3	Auswertung der Umformversuche	90
5.4.4	Eigenschaften des Tiefziehteils	91
5.4.4.1	Härteverteilung:	93
5.4.4.2	Gefügestruktur	96
5.4.4.3	Dickenänderung.....	99
5.4.4.4	Formabweichung	100

5.4.4.5	Maßabweichung.....	102
5.5	Weiterbearbeitung des umgeformten Halbzeugs.....	104
5.6	Experimentelle Untersuchungen des gefertigten Slicermessers	105
5.6.1	Gewicht	105
5.6.2	Formabweichung.....	105
5.6.3	Auslenkung der Messer durch Fliehkraft	108
5.6.4	Werkstoffeinsatz	110
6	Zusammenfassung.....	112
7	Literaturverzeichnis.....	115

Formelzeichen und Abkürzungen

Formelzeichen	Einheit	Begriffe
τ	N/mm^2	Torsionsspannung
M	$N.m$	Drehmoment
D	mm	Durchmesser
S	mm	Dicke
r	mm	Radius
w	$1/s$	Winkelgeschwindigkeit
m	g	Masse
dm	g	Massedifferenz
ρ	kg/m^3	Dichte
dA	mm^2	Querschnittsdifferenz
dr	mm	Radiusdifferenz
S_F	-	Sicherheitsfaktor
I	mm^4	Flächenträgheitsmoment
C_b	mm	Biegesteifigkeit
h	mm	Sickenhöhe
$R_{P0.2}$	N/mm^2	Dehngrenze
R_m	N/mm^2	Zugfestigkeit
A_0	mm^2	ursprünglicher Querschnitt
F_m	N	Maximalkraft
A_g	%	Gleichmaßdehnung
L_0	mm	Anfangslänge
L_{pm}	mm	plastische Längenänderung
A	%	Bruchdehnung
ΔL	mm	Längenänderung
L_u	mm	Länge nach dem Bruch
d_0	mm	Anfangsdurchmesser
E	N/mm^2	Elastizitätsmodul
n -Wert	-	Verfestigungsexponent
k_f	N/mm^2	Fließspannung

F	N	Kraft
ε	%	Dehnung
ε_g	%	Gleichmaßdehnung
φ	%	Umformgrad
φ_g	%	logarithmische Gleichmaßdehnung
A_1	mm^2	Wahrer Querschnitt
r -Wert	-	senkrechte Anisotropie
r_m -Wert	-	ebene Anisotropie
r_0	-	r -Wert in Walzrichtung 0°
r_{45}	-	r -Wert in Walzrichtung 45°
r_{90}	-	r -Wert in Walzrichtung 90°
s_0	mm	Anfangsdicke
b	mm	Breite
b_0	mm	Anfangsbreite
e	-	Euler-Zahl

Abkürzungen

FEM	Finite-Element-Methode
HRC	Härteprüfung nach Rockwell
HV	Härteprüfung nach Vickers
CAD	Computer Aided Design
2D	2- dimensional
3D	3- dimensional
CVD	Chemical Vapour Deposition
PVD	Physical Vapour Deposition
PA-CVD	Plasma Assisted Chemical Vapor Deposition
C	Kohlenstoff
Cr	Chrom
Mo	Molybdän
Si	Silizium
V	Vanadium
Mn	Mangan
Ac ₁	Beginn der Umwandlung Alpha-Gamma bei 723°C
T700	bei 700 °C umgeformtes Teil
T850	bei 850 °C umgeformtes Teil
TW850	bei 850°C umgeformtes und weichgeglühtes Teil
ZTU-Schaubild	Zeit- Temperatur-Umwandlungsschaubild
CNC	Computerized Numerical Control

1 Einleitung

Als Slicermesser werden kreisförmige Scheibenmesser zum Schneiden von Lebensmittelprodukten bezeichnet.

Die hier betrachteten Slicermesser sind planatisch umlaufende, angetriebene Scheibenmesser. Die Schneide wird durch den Scheibenrand gebildet. Aufgrund des Schneidens von relativ weichen Lebensmitteln ist die Schneide mit einem kleinen Keilwinkel ausgeführt (Bild 1).

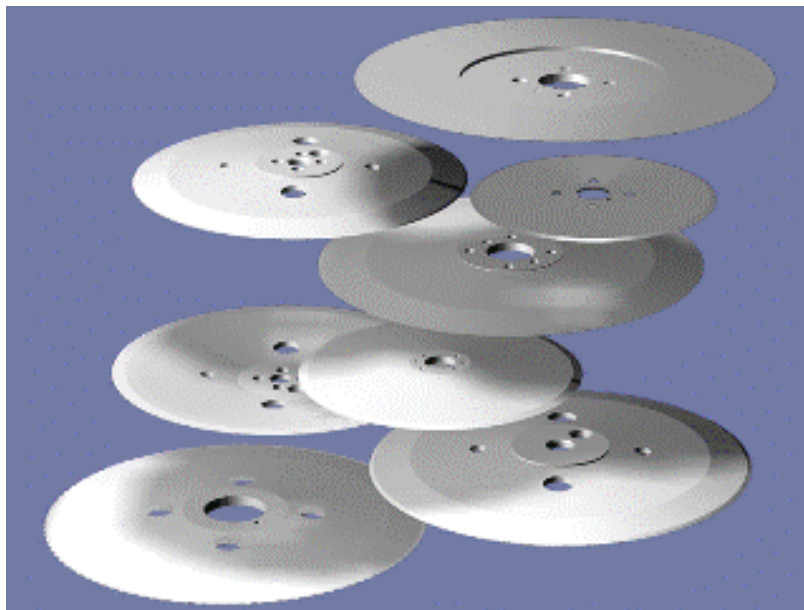


Bild 1: Slicermesser /Ast11/

Die Slicermesser werden in Hochleistungsschneidemaschinen (Bild 2), so genannten Slicern eingesetzt um große Mengen von Lebensmittelprodukten, insbesondere Wurst, Schinken, Specke, Fleisch, Käse und dergleichen mit möglichst hoher Geschwindigkeit scheibenförmig aufzuschneiden. In einer solchen Zirkularschneidemaschine rotiert das Slicermesser an einer Exzentrerschwinge, die wiederum mit dem Hauptantrieb verbunden ist, so dass das Slicermesser nach Art eines Planetenrads auf einer Kreisbahn umläuft.

Zur Erzielung einer möglichst großen Schnittgeschwindigkeit bei gleichzeitiger hoher Schnittqualität werden die Slicermesser mit hoher Drehzahl von 3450 bis 5600 min^{-1} angetrieben. Die hohen Drehzahlen und die auftretenden Schnittkräfte erfordern eine sehr stabile Ausführung des Slicermessers. Die sehr hohen

Anforderungen hinsichtlich Steifigkeit und Festigkeit führen dazu, dass die Messer in aufwändigen Herstellungsverfahren gefertigt werden müssen und ein relativ hohes Gewicht von 5250 g aufweisen. Durch das hohe Gewicht werden während der Drehung die Lagerungen des Slicermessers und der Exzentrerschwinge verhältnismäßig stark belastet und verschleifen daher schnell /Off1, Off2, Off3/.

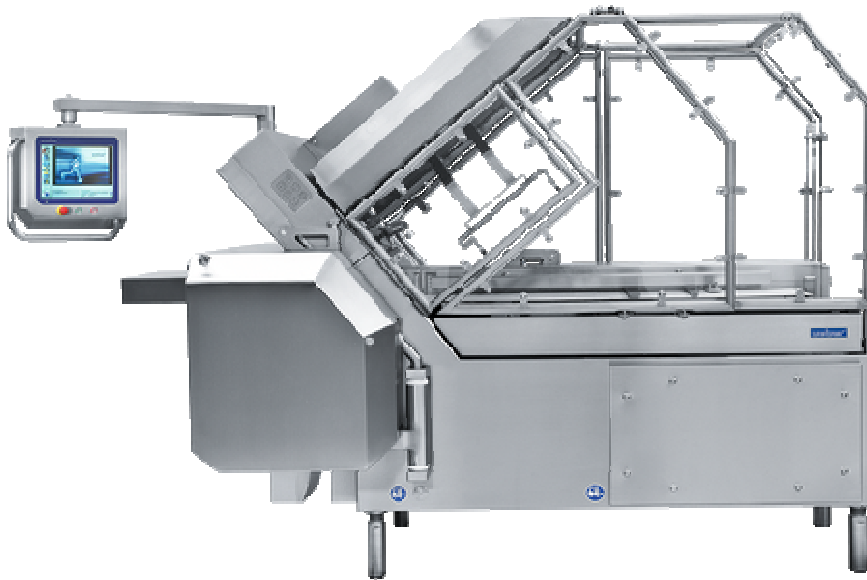


Bild 2: Slicer /Web11/

Diese Herausforderungen hinsichtlich Stabilität, Steifigkeit, Gewichtseinsparung, Werkstoffeinsatz und Fertigungsaufwand fordern eine Weiterentwicklung. Der Schlüssel zur Lösung dieser Probleme könnte in der endkonturnahen Fertigung durch Blechumformung liegen. Als Ausgangshalbzeug werden in der Blechumformung durch Walzen hergestellte Blechronden verwendet. Ausgehend von diesen ebenen Blechen erfolgt die Formgebung in mehreren Stufen. Während der Blechumformung bleibt die Blechdicke ohne Änderung /Doe06, Lan90/. Die Vorteile der Fertigung aus Blech sind vielfältig und liegen im sparsameren Werkstoffeinsatz, der Fertigungszeitreduzierung, einem geringeren Energieverbrauch und einer besseren Umweltverträglichkeit. Dazu bietet der Einsatz von umformtechnisch hergestellten Blechteilen im Vergleich zu Guss-, Schmiede- und spanend gefertigten Teilen die Möglichkeit, eine beanspruchungsoptimierte Leichtbauweise zu realisieren /Sch79, Sch85, Bec79, Pet99, PeE96, Kue80, Kue82, Kuw80, Pet98, Pet96, Sch90/. In vielen Bereichen des Maschinen-, Geräte- und Fahrzeugbaus werden heute in steigendem Maße Blechformteile im Blechdickenbereich von 2 bis 6 mm anstelle von Guß- oder Schmiedeteilen eingesetzt /Pet96/.

In der Literatur sind viele Beispiele von herkömmlich gefertigten Teilen belegt, die sich vorteilhaft durch Blechumformung als alternatives Fertigungsverfahren herstellen lassen. Einige Beispiele sind in der Tabelle 1 aufgeführt.


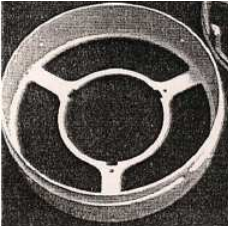
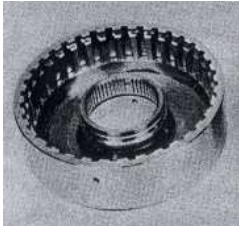

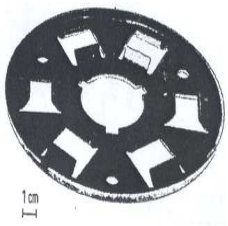
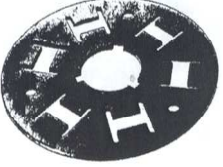
Die Fertigungsverfahren zur Blechumformung erfordern im allgemeinen hohen Werkzeugaufwand, der durch Einsparungen beim Werkstoffeinsatz und /oder der gesamten Bearbeitungszeit in einen Kostenvorteil verwandelt werden muss /Sch90/.

Beim Slicermesser kann die Blechumformung besondere Vorteile bieten. Mit der Fertigung aus Blech wird es möglich, ein Slicermesser mit konstruktiven Leichtbauformelementen, z. B. Sicken, zu entwickeln. Durch Einsatz dieser gewichtsneutralen und versteifenden Formelemente wird es möglich, ein leichteres Slicermesser mit ausreichender Stabilität zu fertigen oder bei gleichem Gewicht durch Erhöhung der Steifigkeit ein stabileres Slicermesser zu realisieren. Neben der Gewichtseinsparung und der Erhöhung der Steifigkeit bietet die Blechumformung hierbei eine bessere Werkstoffausnutzung. Die herkömmlichen Slicermesser werden bisher aus einem Rohling von 463 mm Durchmesser und 23 mm Dicke spanend gefertigt. Das Spanvolumen ist dabei relativ groß, insbesondere der zu Herstellung von Slicermesser verwendete Stahl ist ein teurer Werkzeugstahl.

Die Fertigung aus Blech kann durch Kombination von mehreren Fertigungsverfahren wie Tiefziehen, Schneiden, Prägen, Wärmebehandlung usw. erfolgen. Dadurch kann eventuell die Anzahl der Bearbeitungsschritte bzw. die Fertigungszeit reduziert werden.

Wichtige Kriterien sind dabei das Umformvermögen des zur Herstellung von Slicermesser verwendeten Werkstoffes, die Funktionsfähigkeit, die technische Zuverlässigkeit und die Sicherheit des aus Blech gefertigten Slicermessers. Diese Kriterien sollen im Rahmen der vorliegenden Arbeit überprüft werden.

Tabelle 1: Beispiele Blechteile

Herkömmliche Fertigungsverfahren	Substitutionsverfahren	Vorteile der Blech-Umformung
<p style="text-align: center;">Halterung für Elektromotor /Ble11/</p> <p style="text-align: center;">Gussteil</p> 	<p style="text-align: center;">Blechteil</p> 	
<p style="text-align: center;">Außenlammellenträger /Sch90/</p> <p style="text-align: center;">Schmiedeteil</p> 	<p style="text-align: center;">Blechteil</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -Werkstoffeinsparung 50% -Arbeitszeit reduziert sich auf 1/3 -Kosteneinsparung zw.30% und 40 % /Sch90/
<p style="text-align: center;">Kuplung-Abdeckscheibe /Haa89/</p> <p style="text-align: center;">Dreh-Frästeil</p> 	<p style="text-align: center;">Blechteil</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -Gewicht reduziert sich auf 1/3 -Fertigungskosten reduziert sich auf 1/4 /haa89/

2 Stand der Technik

2.1 Slicermesserkonstruktionen und Technologievergleich

Neben dem herkömmlichen Slicermesser wurden Konstruktionsvorschläge zu Slicermesser als Patente in der Klasse B26 D aufgeführt, die zum Ziel die Erhöhung der Schneidhaltigkeit, Steifigkeit und Korrosionsbeständigkeit, die Einsparung von Gewicht und eine vereinfachte kostengünstige Messerfertigung haben.

Diese Konstruktionsvorschläge von Slicermessern konnten sich aus wirtschaftlichen oder technischen Gründen nicht durchsetzen.

2.1.1 Herkömmliches Slicermesser

Die herkömmlichen Slicermesser sind einstückig aus Werkzeugstahl 1.2379 hergestellt und im Nabenbereich mit Befestigungsbohrungen versehen, während ihr Umfangsrand die eigentliche Messerschneide bildet. Die umlaufende Schneide ist, bezogen auf ihren Querschnitt, keilförmig mit einem kleinen Keilwinkel ausgebildet /Off2/. Die maximale Dicke des Messers befindet sich im Nabenbereich. Die Messerscheibe ist mit 4 Wuchtbohrungen versehen.

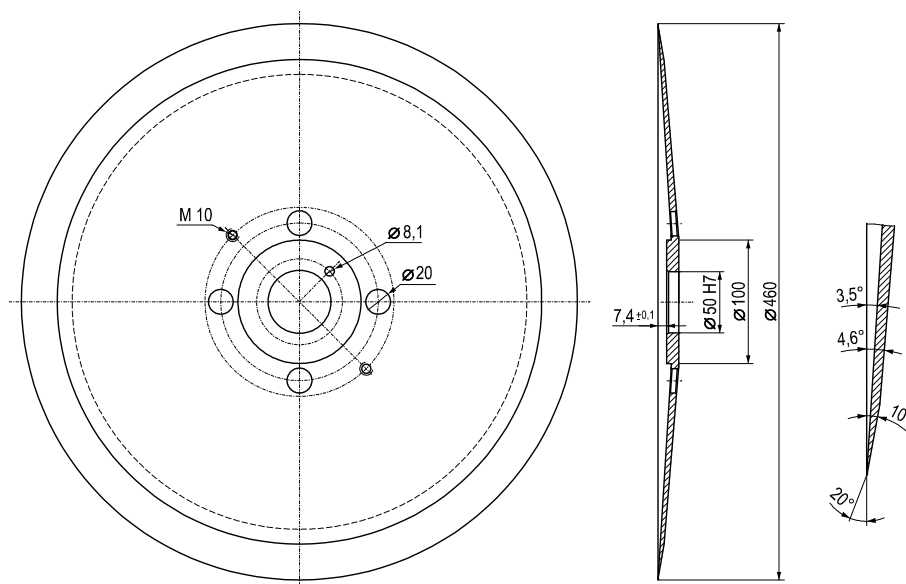


Bild 3: herkömmliches Slicermesser (Fa. ASTOR)

Die Form und Abmessungen des Slicermessers können Bild 3 entnommen werden. Das herkömmliche Slicermesser wird durch Zerspanen hergestellt, anschließend wird die Schneide gehärtet und geschliffen.

Nachteile sind der relativ große Werkstoffabfall beim Zerspanen, das relativ große Gewicht und die Vielzahl von Bearbeitungsschritten.

2.1.2 Kunststoff beschichtetes Slicermesser

Die Offenlegungsschrift von Paul Kohlhaas /Off2/ empfiehlt eine sandwichartige Bauweise (Bild 4). Das Messer besteht aus einer umgeformten Metallscheibe, die im Nabenteil bzw. dem mittleren Teil wesentlich dünner ausgebildet ist und mit einer oberen und unteren Kunststoffschicht sandwichartig verbunden ist. Durch die Kunststoffschicht wird die Korrosion der Metallscheibe vermieden, während die nach wie vor aus Metall bestehende Schneide durch den ständigen Kontakt mit dem Schnittgut praktisch blank bleibt. Die Herstellung des Slicermessers aus einem relativ dicken Rohling entfällt und das Gewicht des Messers kann reduziert werden. Außerdem entfallen im Vergleich zum herkömmlichen Slicermesser die großen Werkstoffverluste durch Zerspanen.

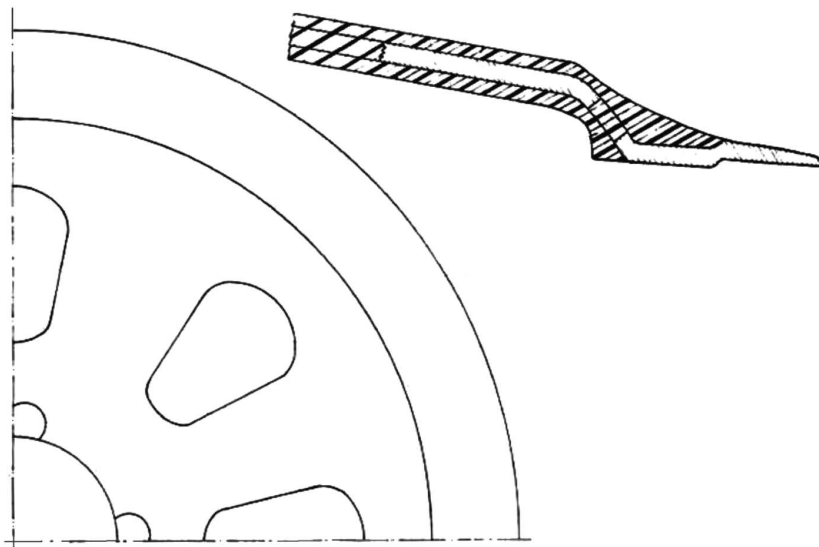


Bild 4: Kunststoff beschichtetes Slicermesser /Off2/

Zur Gewährleistung des Verbunds zwischen der Messerscheibe und dem Kunststoff ist die Scheibe mit Aussparungen, Löchern oder dergleichen versehen. Als Kunststoff für den Nabenteil wurden Polyamid, glasfaserverstärkte Polyamide oder der unter dem Handelsnamen Ultramid bekanntgewordene Kunststoff gewählt. Wegen der im Lebensmittelbereich nachteiligen Wirkung der Glasfaser und auch wegen der unzureichenden Steifigkeit hat sich diese Messerkonstruktion nicht durchsetzen können /Wie05/.

2.1.3 Geripptes Slicermesser

In der Offenlegungsschrift von Horst Heinze /Off3/ wird ein einstückig aus vergütetem Stahl hergestelltes Slicermesser vorgestellt, bei dem auf der konkaven Seite der Scheibe radiale Rippen angeordnet sind, die den Schneidenring mit dem Spiegel der Nabe verbinden und somit der Messerscheibe Formsteifigkeit geben. Zwischen den Rippen sind dreieckige, trapezförmige oder kreisförmige Aussparungen ausgebildet (Bild 5). Die erfindungsgemäß ermöglichte Gewichtsersparnis liegt im Bereich von 40 % gegenüber herkömmlichen Slicermessern.

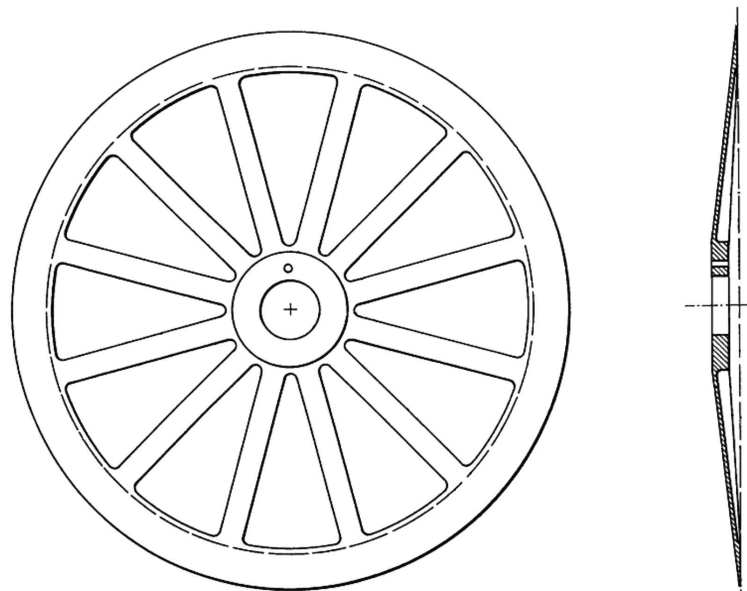


Bild 5: geripptes Slicermesser /Off3/

Die Rippen werden spanend aus dem Vollen gefräst, die Fertigung ist zeit- und kostenaufwendig /Wie05/.

2.1.4 Gesicktes Slicermesser

In der Offenlegungsschrift von Günther /Off1/ wird ein Slicermesser vorgestellt, das mit einem Stabilisierungsbereich in Form von mindestens einer umlaufenden Auswölbung zwischen dem Schneidenring und dem Befestigungsbereich (Anlagefläche) ausgeführt ist (Bild 6). Dieser Ausführungsform führt im Vergleich zu herkömmlichen Slicermesser bei vergleichsweise geringer Materialstärke zu höherer Steifigkeit bzw. zu höherer Festigkeit bei gleichzeitig geringerem Gewicht.

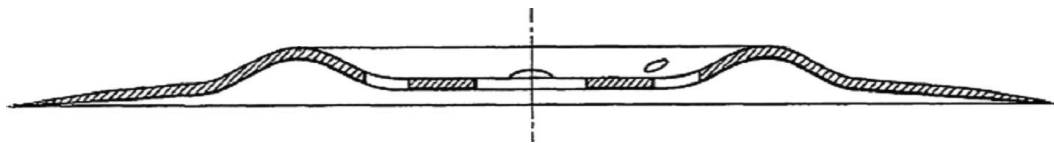


Bild 6: gesicktes Slicermesser /Off1/

Zur Herstellung dieses Messers wurden in dieser Offenlegungsschrift keine Verfahren erwähnt und von dem Patentinhaber keine Untersuchung dazu durchgeführt.

2.2 Sonstige Messer

Neben Slicermesser gibt es eine reiche Vielfalt von Messerarten. Messer können grob eingeteilt werden in:

- Handmesser
- Maschinenmesser

Die Handmesser (Bild 7) bestehen grundsätzlich aus einer Klinge und einem Griff. Die Klinge wird aus Metall (vor allem Stahl und Eisen) oder Keramik in verschiedenen Formen und Größen hergestellt. Der Griff wird aus einer Vielzahl von Werkstoffen (Holz, Metall, Keramik, Glas, Leder, Kristall,...) hergestellt /Gab96/. Hinsichtlich des Verwendungszwecks des Handmessers kann man z. B. folgende Handmesserarten unterscheiden:

Spickmesser, Schlachtmesser, Salamimesser, Ausbeinmesser, Kochmesser (Bild 7), Stechmesser, Rindschlachter, usw.



Bild 7: Handmesser (Kochmesser) /Ast11/

Das Messer wurde zunächst aus Kupfer hergestellt. Kupfer war allerdings nicht robust und zu weich, so wurden Zinn und Kupfer zu Bronze-Legierungen geschmolzen und die Messer aus Bronze hergestellt /Gab96/. Die Bronzemesser wurden gegossen. Später wurde das Eisen zur Herstellung des Messers verwendet. Die Stahlmesser werden durch Spanen oder Schmieden hergestellt /Gab96/.

Die wichtigsten Bearbeitungsschritte bei dem geschmiedeten Messer nach ISS Solingen /Fir11/ sind:

- Formschneiden: Aus dem Flachmaterial werden Spaltstücke in der Form eines langen, spitzen Dreieckes abgespaltet (Bild 8).



Bild 8: Spaltstücke zum Schmieden eines Handmessers /Fir11/

- Erhitzen: Die Spaltstücke werden auf etwa 1100°C erhitzt.
- Gesenkschmieden: Im Gesenk (Schmiedeform) erhalten die Spaltstücke die erste, rohe Form eines Messers (Bild 9).



Bild 9: Schmiedeteil eines Handmessers /Fir11/

- Rohling ausschneiden: Grat und Überstände werden auf einer Exzenterpresse weggeschnitten und die Messer werden ausgestanzt (Bild 10).



Bild 10: geschmiedetes Handmesser /Fir11/

- Härten: Das Härten wird in einem Vakuumhärteofen durchgeführt. Während des Härtevorgangs kommen die Werkstücke nicht mehr mit Sauerstoff in Berührung. Durch eine rasche Abschreckgeschwindigkeit, die über das Einbringen von Stickstoff unter hohem Druck erreicht wird, lässt sich eine große Härte bei minimalem Härteverzug erzielen.
- Schleifen: Fertigung der endgültigen Schneidengeometrie.
- Montage: Die Anbringung der Griffelemente.
- Abziehen der Schneide: Die Schneide bei Messern wird abgezogen, d.h. die Schneidware erhält ihre Funktionsfähigkeit. Das Abziehen erfolgt traditionell auf einem Stein, je nach gewünschter Funktion wird die Schneide unterschiedlich gestaltet.
- Beschichten: In der Schneidwareindustrie ist traditionell aus Korrosionsschutz- und dekorativen Gründen die Oberfläche der Schneidware beschichtet (z.B. Vernicklung, Vergoldung, usw.) /Fir11/.

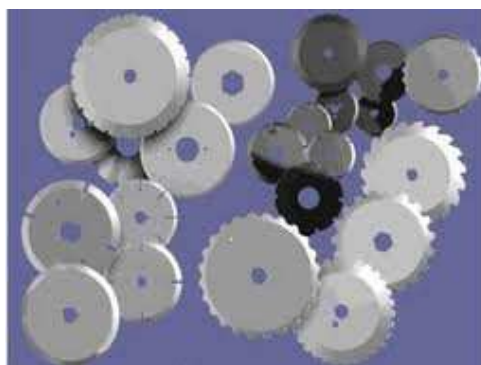


Bild 11: Maschinenmesser (Kreismesser) /Ast11/

Die Maschinenmesser (Bild 11) werden in einer Maschine fest eingespannt. Die Maschinenmesser werden zur Herstellungs- und Bearbeitung von verschiedenen Werkstoffen verwendet. Mit Maschinenmesser werden Papiere, Textilgewebe, Blech,

Holz, Kunststoffe und Lebensmittel insbesondere Fleisch, Käse, Brot usw. geschnitten /Ind11/.

Zu den Maschinenmessern gehören z. B:

Abschneidmesser, Kreismesser (Bild 11), Slicermesser, Entschwartungsklingen, Kuttermesser, Gattermesser, Messer für Verpackungsmaschinen, Gefriergut-schneider usw.

Die Maschinenmesser bestehen meist aus Werkzeugstahl oder rostfreiem Stahl und lassen sich durch Spanen fertigen.

Die Hauptschritte bei Herstellung eines Messers durch Spanen sind:

- Messerkontur lasern
- Spanende Fertigung (Drehen, Bohren,...)
- Härten
- Schleifen
- Beschichten.

2.3 Stähle zur Herstellung von Messern

Messerstahl ist ein zur Herstellung eines Messers geeigneter Werkstoff. Um gute Schneid- und Gebrauchseigenschaften wie Schneidhaltigkeit, Schneidfähigkeit, Schärffbarkeit und Schnittgeschwindigkeit zu gewährleisten, benötigen die Schneidstoffe die folgenden mechanischen Eigenschaften.

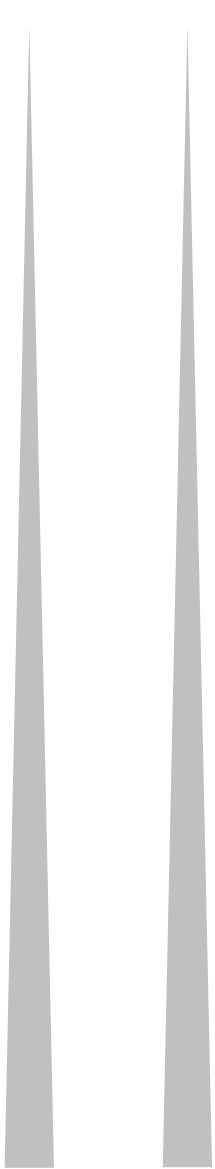
- o Härte und Druckfestigkeit
- o Zähigkeit und Biegefestigkeit
- o Korrosionsbeständigkeit,
- o Verschleißfestigkeit /Klo08/.

Diese erforderlichen Eigenschaften können durch die chemische Zusammensetzung, die Herstellungstechnologie und die nachfolgende Wärme- und Oberflächenbehandlung der Stähle erzielt werden.

Allgemein ist der Einfluss der Legierungselemente auf die Eigenschaften von Eisen sehr groß. Die für feinschneidige Werkzeuge besonders günstigen Legierungselemente sind Kohlenstoff, Stickstoff, Chrom, Wolfram, Niob/Tantal (als Karbidbildner). Bei rostbeständigen Legierungen wird außer Chrom in geringen Mengen Molybdän zur Verbesserung des Korrosionswiderstandes zulegiert. Weiter tragen geringe Gehalte an Nickel und Mangan zur Steigerung der Festigkeit bei. In

geringen Maßen kann auch Vanadium zugegeben werden. Wichtig ist dabei die richtige Menge der einzelnen Gehalte. Die Abstimmung und Festlegung dieser Gehalte ist sehr kompliziert /Lan02/.

Tabelle 2: Einteilung der Messerstähle nach Legierungstypen /Lan02/

Legierungsgrößen	Legierungstyp	Legierung	Werkstoff Nr.	Stahlgruppe
 <p>Legierungs- gehalt (%)</p> <p>Karbid- menge und größe</p>	<u>Typ I</u>			
	Untereutektoide bis	60 W Cr V 7	1.2550	Kaltarbeitsstahl
	übereutektoide	75 Cr 1	1.2003	„
	Stahllegierung mit	100 Cr 6	1.2067	„
	geringen Zusätzen an	110 W Cr V4	1.2109	„
	Legierungselemente	120 W V 4	1.2516	„
	(ca. 0,5 bis 5%)	140 Cr V1	1.2206	„
		142 W V 13	1.2562	„
		USW.		
	<u>Typ II</u>			
	Übereutektoide, teils	X40 Cr 13	1.4034	Rostfreier Stahl
	ledeburitische Stahl-	X45 Cr Mo V15	1.4116	„
	legierungen mit	X65 Cr 13	1.4037	„
	Zusätzen an	USW.		
	Legierungselementen			
	(ca. 5 bis 15%)			
	<u>Typ III</u>			
	Ledeburitische	X 110 Cr Mo V 15	1.4111	Rostfreier Stahl
Stahllegierungen mit	X 90 Cr Mo V 18	1.4112	„	
größeren Zusätzen an	X 105 Cr MO 17	1.4125	„	
Legierungselementen	X155 Cr V Mo 12 1	1.2379	Kaltarbeitsstahl	
(größer ca. 15%)	USW.			

Die Einteilung der Messerstähle kann nach dem Legierungstyp und dem Legierungsgehalt erfolgen (Tabelle 2) /Lan02/.

Diese für den Schneidvorgang geeigneten Stähle sind im Stahlschlüssel /Wge07/ in folgende Gruppen zusammengefasst worden:

- Werkzeugstähle
 - o Legierte und unlegierte Kaltarbeitsstähle,
 - o Schnellarbeitsstähle
- Nichtrostende Stähle
 - o Rost- und säuerbeständige Stähle (Korrosionsbeständige Stähle)

Werkzeugstähle

Werkzeugstähle sind nach DIN EN ISO 4957 Edelmessstähle, die zum Be- und Verarbeiten von Werkstoffen sowie zum Handhaben und Messen von Werkstücken geeignet sind. Man unterscheidet zwischen Kaltarbeitsstählen, Warmarbeitsstählen und Schnellarbeitsstählen. Kaltarbeitsstähle bzw. Warmarbeitsstähle sind für Verwendungszwecke geeignet, bei denen die Oberflächentemperatur im Einsatz i. Allg. unter 200 °C liegt. Schnellarbeitsstähle können dagegen bis zu Temperaturen von 600 °C eingesetzt werden. Aus Kaltarbeitsstählen und Schnellarbeitsstählen werden vor allem Werkzeuge zum Schneiden hergestellt /Klo08/.

Kaltarbeitsstähle erhalten ihre Verschleiß- und Zähigkeitseigenschaften durch Vergüten, bestehend aus Erwärmen auf Austenitisierungstemperatur, Abschrecken im Öl- oder Wasserbad (hohe Abkühlgeschwindigkeit erforderlich, Martensithärte) und Anlassen (mit dem Ziel eines teilweisen Härteabbaus und dabei entstehender Zähigkeitserhöhung) /Klo08/.

Die Kaltarbeitsstähle lassen sich in unlegierte und legierte Stähle einteilen. Die unlegierten Werkzeugstähle (Kohlenstoffstähle) enthalten bis zu 1,25% C und in geringen Mengen Si und Mn.

Die Härte und der Verschleißwiderstand unlegierter Werkzeugstähle hängen von der Ausbildung des martensitischen Gefüges ab. Der Verschleißwiderstand nimmt mit der Härte und mit steigendem Kohlenstoffgehalt zu, gleichzeitig fällt aber die Zähigkeit ab und damit wird die Empfindlichkeit während der Wärmebehandlung und des Werkzeugeinsatzes größer. Alle unlegierten Werkzeugstähle sind Schalenhärter,

d. h. sie härten nicht über den gesamten Querschnitt gleichmäßig durch, sondern nur an der Werkstückoberfläche /Klo08/.

Tabelle 3: Beispiele für unlegierte und legierte Kaltarbeitsstähle nach /Wge07, Klo08/

Unlegierte Kaltarbeitsstähle								
Bezeichnung Werkstoff Nr.	Zusammensetzung							Anwendung
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	
C45W 1.1730	0,40 0,50	0,15 0,40	0,60 0,80					Messer aller Art, Hämmer, Gabeln, Scheren, Aufbaumaterial für Schneiden und Stanzen
C85W 1.1830	0,80 0,90	0,25 0,40	0,50 0,70					Maschinenmesser, Holzsägen jeder Art, wie Kreis- und Gattersägen, Handsägen
C 125W 1.1563	1,20 1,35	0,10 0,30	0,10 0,35					Besonders harte Messer, kleine Fräsmesser, Papiermesser
Legierte Kaltarbeitsstähle								
X100CrMoV15 1.2363	0,95 1,05	0,10 0,40	0,40 0,80	4,80 5,50	0,90 1,20	0,15 0,35	-	Schnitt- und Stanzwerkzeuge, Lang und- Kreisscherenmesser
X155CrVMo121 1.2379	1,45 1,60	0,10 0,60	0,20 0,60	11,0 13,0	0,70 1,00	0,70 1,00		Bruchempfindliche Schnitte, Scherenmesser
90MnCrV8 1.2510	0,90 1,05	0,15 0,35	1,00 1,20	0,50 0,70		0,05 0,15	0,50 0,70	Schnitt- und Stanzwerkzeuge, Fräser, Reibahlen

Die Vorteile der legierten gegenüber den unlegierten Werkzeugstählen liegen in der Erhöhung der Verschleißfestigkeit (Zusatz von karbidbildenden Elementen), der Anlassbeständigkeit und Warmfestigkeit (Zulegieren von Chrom, Wolfram, Molybdän, Vanadium) und in der höheren Härte (in Lösung gegangener Kohlenstoff). Außerdem sinkt die kritische Abkühlgeschwindigkeit, so dass eine bessere Durchhärbarkeit erzielt werden kann.

Tabelle 4: Beispiele für Schnellarbeitsstähle nach /Wge07/

Schnellarbeitsstähle								
Bezeichnung Werkstoff Nr.	Zusammensetzung							Anwendung
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	W	
S10-4-3-10 1.3207	1,20 1,35	0,45	0,40	3,80 4,50	3,20 3,90	3,00 3,50	9,00 10,0	Drehstähle für Schrupp- und Schlichtarbeit, Formstähle
HS6-5-2 1.3343	0,86 0,94	0,45	0,40	3,80 4,50	4,70 5,20	1,70 2,10	5,90 6,70	Fräser, Dreh-, Hobel- und Zahnradstoßmesser,

Schnellarbeitsstähle sind hochlegierte Stähle, die als Hauptlegierungselemente Wolfram, Molybdän, Vanadium, Kobalt und Chrom enthalten. Sie verfügen über eine verhältnismäßig hohe Biegebruchfestigkeit und damit über günstige Zähigkeitseigenschaften /Klo08/.

Gegenüber den Kaltarbeitsstählen zeichnen sie sich durch eine verbesserte Anlassbeständigkeit des Grundgefüges und eine höhere Härte aus. Ihre Härte von etwa 60–67 HRC behalten sie bis zu Temperaturen von 600 °C bei /Klo08/.

Nichtrostender Stähle

Nichtrostender Stähle sind nach EN 10088-1 Stähle, die mindestens 10,5 % Chrom und höchstens 1,2 % Kohlenstoff enthalten. Sie werden nach ihren wesentlichen Eigenschaften weiter unterteilt in korrosionsbeständige, hitzbeständige und warmfeste Stähle.

Aus korrosionsbeständigen Stählen werden vor allem Messerklingen hergestellt. Korrosionsbeständige Stähle sind Stähle mit guter Beständigkeit gegen gleichmäßige oder punktuelle Korrosion. Der Schutz wird bei mehr als 10,5 % Cr durch spontane Bildung einer Chromoxidschutzschicht erreicht. Die korrosive Umgebung kann eine Atmosphäre bei Umgebungstemperatur (in Gebäuden, ländlich, städtisch, industriell oder maritim) oder eine Elektrolytlösung sein.

Tabelle 5: Beispiele für Rost- und Säurebeständige Stähle /Wge07/

Rost- und säurebeständige Stähle							
Bezeichnung Werkstoff Nr.	Zusammensetzung						Anwendung
	C	Si	Mn	Cr	Mo	V	
X46Cr13 1.4034	0,43 0,50	1,00	1,00	12,5 14,5			Schneidwerkzeuge, Tafelmesser, Maschinenmesser, Rasiermesser, Scheren
X55CrMo14 1.4110	0,48 0,60	1,00	1,00	13,0 15,0	0,50 0,80	0,15	Chirurgische Instrumente, Fleisch- und Wurstmesser, Rasiermesser
X110CrMoV15 1.4111	1,05 1,15	1,00	1,00	14,0 16,0	0,40 0,60	0,10 0,15	Rasierklingen, Messerklingen, Tellermesser für die Fleischindustrie, chirurgische Instrumente,
X90CrMoV18 1.4112	0,85 0,95	1,00	1,00	17,0 19,0	0,90 1,30	0,07 0,12	Berufsmesser, hochwertige Schneiden chirurgischer Instrumente
X50CrMoV5 1.4116	0,45 0,55	1,00	1,00	14,0 15,0	0,50 0,80	0,10 0,20	Hochwertige Schneidwaren aller Art, wie chirurgische Instrumente

Die Wahl des Werkstoffs basiert auf der Schneidaufgabe und den Schneidbedingungen des Messers.

In der Arbeit wird als Versuchswerkstoff der zur Herstellung des herkömmlichen Slicermessers eingesetzte Stahl 1.2379. verwendet.

2.4 Herstellungsverfahren

2.4.1 Konventionelle Herstellungsverfahren des Slicermessers

Das Slicermesser ist ein Maschinenmesser und besteht aus Werkzeugstahl. Zur Herstellung eines solchen Slicermessers geht man von einem relativ dicken Rohling von 23 mm Dicke und 463 mm Durchmesser aus. Die derzeitige konventionelle Technologie für die Herstellung eines Slicermessers beinhaltet Folgendes:

- Drehen
- Härten
- Auf erforderliche Höhe drücken
- Bohrungsmaß kontrollieren
- Gewinde schneiden
- Vorschleifen
- Unwucht kontrollieren
- Gleitschleifen
- Wiegen, fertig schleifen
- Auswuchten
- Hartverchromen
- Polieren
- Schneide abziehen

Nachteile sind der relativ große Werkstoffabfall beim Zerspanen von 82,4 %, und die Vielzahl von Bearbeitungsschritten. Diese Nachteile können durch Verwendung der Umformverfahren dicker Bleche zur Herstellung des Slicermessers reduziert werden.

2.4.2 Umformen dicker Bleche

2.4.2.1 Begriff Blech

Blech ist nach DIN EN 10079 definiert als ein gewalztes Flacherzeugnis, mit etwa rechteckigem Querschnitt, dessen Breite viel größer als die Dicke ist. Blech wird unterteilt in:

- Feinblech: Dicke < 3 mm
- Grobblech: Dicke > 3 mm

Unter dem Begriff dicke Bleche werden in diesem Zusammenhang die Grobbleche verstanden.

2.4.2.2 Umformverfahren für dicke Bleche

Immer mehr flache technische Produkte oder Teilprodukte, die noch vor einem Jahrzehnt durch Spanen, Gießen oder Fügen hergestellt wurden, werden heute mit wesentlich geringern Werkstoffaufwand durch Umformen aus Blech hergestellt. Dies ist besonders bedeutsam wegen der zunehmenden Rohstoffverknappung bzw. –ver-
teuerung in allen Bereichen, aber auch erhebliche Zeiteinsparungen werden durch den richtigen Einsatz von Maschine und Werkzeug erreicht. Die Herstellung der Dickblechteile als Fertigprodukte kann durch verschiedene Blechumformverfahren wie Biegen, Tiefziehen und Drücken erfolgen. Hierzu gehören z. B. das Biegen von Schüssen für Behälter-, Kessel- und Reaktorbau, wobei je nach Biegeverfahren, Biegelänge und Festigkeit des Blechs Blechdicken bis 180 mm kalt und bis 400 mm warm gebogen werden und die Bödenherstellung durch Warmziehen, Kümpeln, Bördeln und Drücken. Bei der Bödenherstellung durch Warmziehen, Kümpeln, Bördeln werden Blechdicken bis 30 mm kalt und bis 300 mm warm verarbeitet. Beim Drücken von Böden im Kaltverfahren können Stähle je nach Festigkeit bis 35 mm Dicke gedrückt werden, nichtrostende Qualitäten bis 12 mm, mit Zwischenglühen bis 25 mm Dicke /Bec79/. Häufig erfolgt die Herstellung der Dickblechteile in gezielter Kombination mit Verfahrenselemente wie Tiefziehen in Verbindung mit Abstreckgleitziehen, Stülpziehen, Prägen, Schneiden, Kragenziehen, Stauchen und Fliesspressen mit Elementen anderer Verfahren wie Schweißverfahren und Wärmebehandlungsverfahren /Sch90, Sue06/.

Die folgende Ausführung beschränkt sich auf das Tiefziehen.

Das Tiefziehen

Das Tiefziehen wird seit langer Zeit in großem Umfang industriell genutzt /Bau83/. Die meisten Blechteile, die im Fahrzeugbau verwendet werden, sind durch Tiefziehen hergestellt. Darüber hinaus werden Teile wie Badewannen, Töpfe usw. gezogen /Wes06/. Überwiegend werden Feinst- und Feibleche mit Blechdicken bis 3 mm verarbeitet. Erst in letzter Zeit beginnt man, das Tiefziehen auch für dickere Bleche anzuwenden. Abgesehen von Kupferwerkstoffen, die schon vor langer Zeit, auch in Dicken bis zu 20 mm, in der Munitionsindustrie verarbeitet wurden, werden jetzt auch z. T. sehr komplizierte Werkstücke aus Stahl oder Aluminiumlegierungen

mit teilweise beachtlichen Blechdicken durch Tiefziehen hergestellt. In aller Regel sind es Werkstücke mit rotationssymmetrischer Geometrie. Beispiele aus der Praxis für das Tiefziehen von Dickblechteile sind die Herstellung eines Planetenträgers aus einer 4,5 mm dicken Ronde, die Herstellung einer Motorgehäuseabdeckung aus einer 3,6 mm dicken Ronde /Bec79/.

Definition des Tiefziehens

Tiefziehen ist nach DIN 8584-3 Zug-Druckumformen eines Blechzuschnittes (je nach Werkstoff aus einer Folie oder Platte, einer Tafel, einem Ausschnitt oder Abschnitt) zu einem Hohlkörper oder Zug-Druckumformen eines Hohlkörpers zu einem Hohlkörper mit kleinerem Umfang ohne beabsichtigte Veränderung der Blechdicke.

Prinzip des Tiefziehens

Beim Tiefziehen besteht das Werkzeug in der Regel aus Stempel, Matrize, und Niederhalter. Bild 12 zeigt das Prinzip des Tiefziehens rotationssymmetrischer Bauteile.

Zunächst wird die Blechrunde zwischen dem Ziehring und dem Niederhalter eingespannt. Die durch die Presse oder das Werkzeug aufgebrachte Niederhalterkraft verhindert die Faltenbildung im Flanschbereich.

Zum Beginn des Umformvorgangs wird der Ziehteilboden unter Zug-Zug-Belastung geformt. Dieser Vorgang wird als Streckziehen bezeichnet, dabei fließt der Werkstoff aus der Blechdicke. Anschließend beginnt die zweite Phase des Umformvorgangs, der eigentliche Tiefziehvorgang, bei der der Flansch unter Zug-Druck-Bearbeitung umgeformt wird. Das Tiefziehen ist, streng genommen, eine Kombination aus Abstreckziehen und Tiefziehen /Hal02/.

Die Tiefziehgrenze ist erreicht, wenn die größte zulässige Ziehkraft nicht mehr in die Umformzone übertragen werden kann /Hel09/.

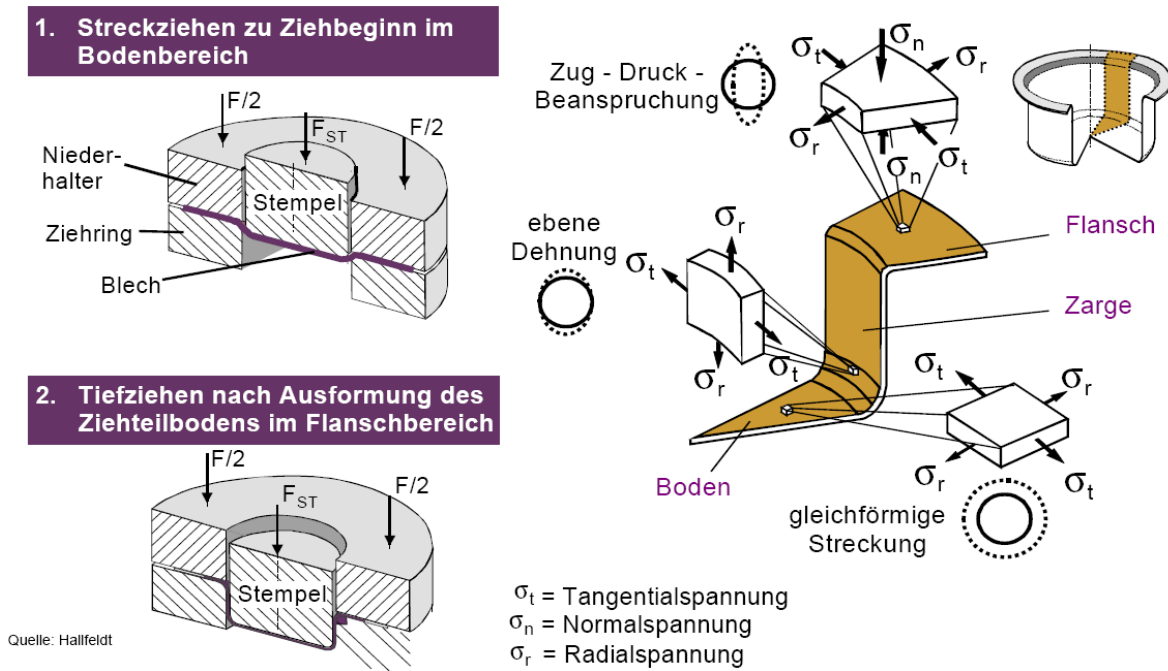


Bild 12: Prinzip des Tiefziehens mit Niederhalter/Hal02, Sim89, Beh10/

Beim Tiefziehen dicker Bleche kann eventuell auf die Anwendung eines Niederhalters verzichtet werden, da das Blech genügend knickstabil ist und die Neigung zur Faltenbildung gering ist /Hes95, Dre72, Zie72/. Das niederhalterlose Tiefziehen wird vorzugsweise als Formstempeltiefziehen mit starrem Ziehring durchgeführt. Auch die Anwendung als Gesenktiefziehen ist denkbar, so dass die Herstellung verschiedener Bodenformen möglich wird /Sue06/.

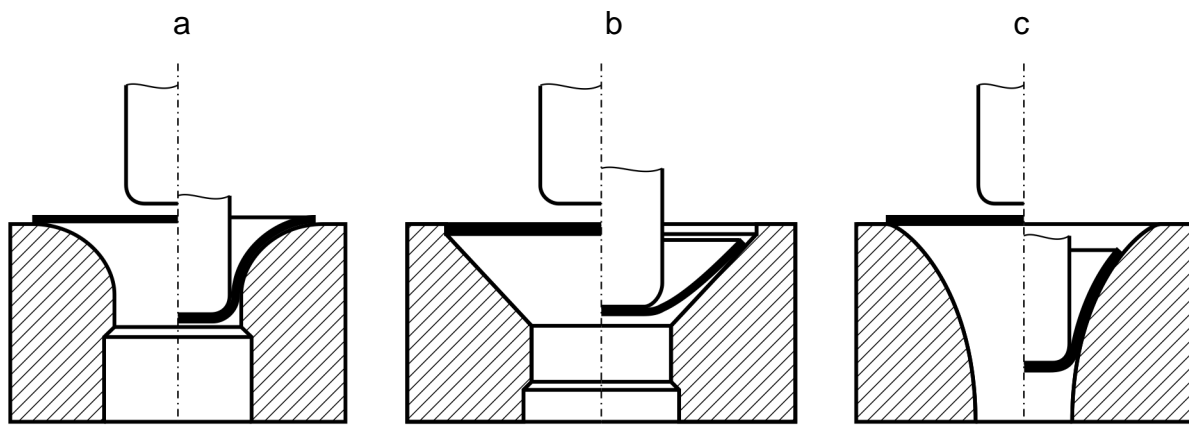


Bild 13: Prinzip des Tiefziehens ohne Niederhalter /lan90/

- a) kreisförmiger Ziehring
- b) kegelförmiger Ziehring
- c) Traktrixförmiger Ziehring

Mit normalen Tiefziehwerkzeugen ohne Niederhalter lassen sich nur Teile mit kleinen Ziehverhältnissen herstellen. Wesentlich verbessern kann man das Ziehergebnis durch Verwendung von viertelkreisförmigen, kegeligen oder traktrixförmigen Ziehringen. Bild 13 zeigt das Verfahrensprinzip des Tiefziehens ohne Niederhalter /Lan90/.

Das niederhalterlose Tiefziehen erlaubt durch das Fehlen der Niederhalterreibung größere Ziehverhältnisse gegenüber dem Tiefziehen mit Niederhalter /Fro79, Boe85, Kue81/.

Ein Werkzeug ohne Niederhalter weist einen einfachen Aufbau auf und kann auf einfach wirkenden Pressen eingesetzt werden /Fro79/.

Während für das niederhalterlose Tiefziehen rotationssymmetrischer Teile mit senkrechter Zarge Untersuchungen vorliegen, ist dies für geometrisch komplizierte Teile nicht der Fall /Sue06/.

2.5 Produktentwicklung

Produkte für Kunden zu erstellen und zu vertreiben, ist Hauptzweck produzierender Unternehmen. Unter der Produkterstellung versteht man den Vorgang der Erzeugung eines Produkts von der ersten Idee bzw. der Auftragserteilung bis zur Auslieferung an den Nutzer /Kla07/. Bild 14 zeigt den Lebenslauf eines Produkts /Pah93/. Ausgangspunkt sind unternehmensexterne (Markt, Kunde) und /oder unternehmensinterne Anforderungen und Bedingungen. Diese definieren entweder direkt die Entwicklungs- bzw. Konstruktionsaufgabe oder werden in einer vorgeschalteten Produktplanung zur Produktidee bzw. Aufgabenstellung verarbeitet. Im Entwicklungs- und Konstruktionsbereich erfolgt dann eine Produktkonkretisierung bis zu den Ausführungs- und Nutzungsangaben (Produktdokumentation), so dass eine Realisierung durch Teilefertigung und Montage erfolgen kann. Anschließend findet eine Prüfung bzw. Erprobung des so geschaffenen Produkts statt, ehe es über den Vertrieb bzw. Verkauf einem Gebrauch oder einem Verbrauch zugeführt wird. Trotz zwischengeschalteter Instandhaltungsmaßnahmen oder nachgeschalteter Aufarbeitung zur Wiederverwendung ist die Produktnutzungsdauer in der Regel begrenzt. Anzustreben ist dann ein Recycling des Altprodukts durch Wiederverwertung der Altstoffe /VDI - Richtlinie 2221/.

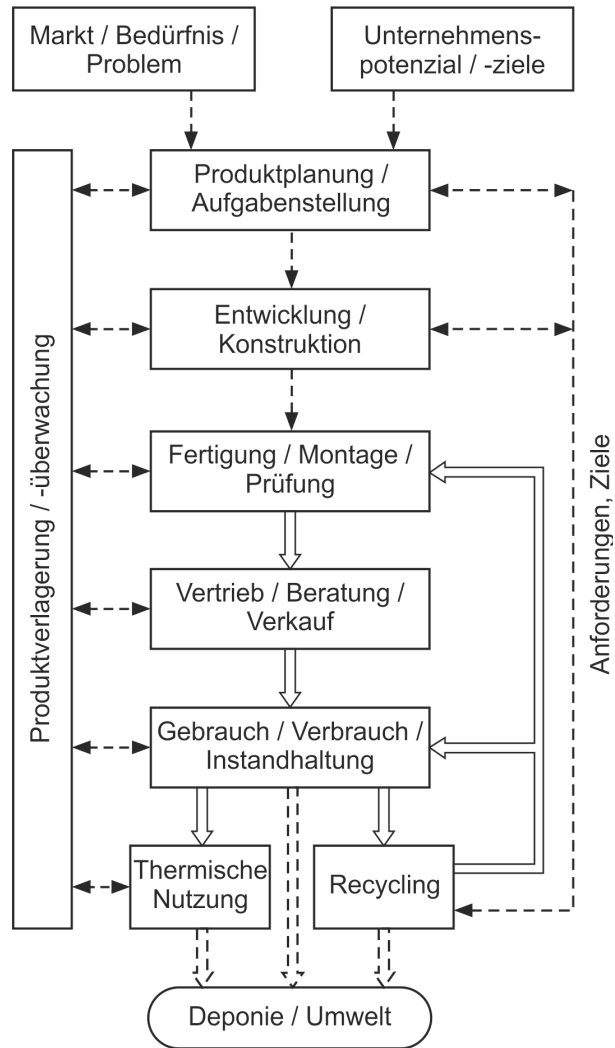


Bild 14: Lebenslauf eines Produkts /Pah93/

Ein solcher Ablauf erfolgt für ein Produkt der Einzelfertigung im Maschinen- und Anlagenbau in der Regel nur einmal. Bei Produkten der Serienfertigung im Maschinen-, Fahrzeug-, Geräte- und Feingerätebau wäre eine unmittelbare Realisierung zum Endpunkt zu risikoreich. Hier erfolgt ein erster Planungs-, Konstruktions-, Fertigungs-, und Montagedurchlauf zunächst bis zu einem Funktions- bzw. Labormuster, das durch seine Erprobung gegebenenfalls Möglichkeiten zur Verbesserung der Konstruktion erkennen lässt. Solche Informationen fließen in einen erneuten Entwicklungs-, Konstruktions-, und Fertigungszyklus ein, entweder um ein verbessertes Funktionsmuster herzustellen und zu erproben oder um z.B. aus dem Funktionsmuster einen Prototypen mit praktisch vollständigen Produktfunktionen oder schon eine Nullserie zu schaffen. Nach Erprobung des Prototypen bzw. der Nullserie können wiederum Verbesserungen lohnend sein, die schließlich nach

erneutem Durchlauf dieses Produktentstehungsprozesses zum Endprodukt bzw. zur Serienreife führen /VDI - Richtlinie 2221/, (Bild 15).

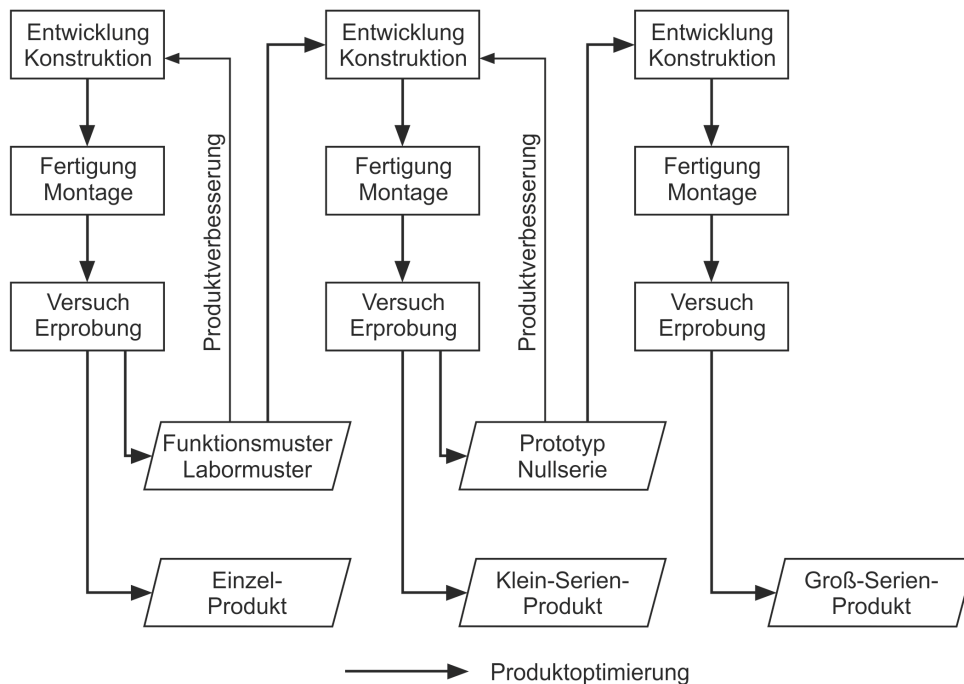


Bild 15: Schrittweises Entwickeln eines Serienprodukt /Pah93/

Generelles Vorgehen zum Entwickeln und Konstruieren

Die VDI – Richtlinie 2221 schlägt ein generelles Vorgehen zum Entwickeln und Konstruieren technischer Produkte vor, und zwar mit Betonung einer breiten Anwendung in Maschinenbau, der Feinwerktechnik, der Schaltungs- und Softwareentwicklung und der Planung von verfahrenstechnischen Anlagen. Der branchenübergreifende Vorgehensplan (Bild 16) sieht im Zuge der Produktentwicklung sieben grundlegende Arbeitsschritte vor /Pah93/.

Die 7 Arbeitsschritte werden wie folgt beschrieben:

- 1- Nach der Klärung und Präzisierung der Aufgabenstellung stehen die möglichst vollständigen und konkreten Anforderungen in Form einer Anforderungsliste zur Verfügung.
- 2- Daraus lassen sich abstrakte (Teil-)Funktionen ableiten, die zu einer Funktionsstruktur zusammengefasst werden.
- 3- Für die Funktionen werden Lösungsprinzipien gesucht und zur prinzipiellen Lösung (Konzept) kombiniert.

- 4- Diese Lösung wird in realisierbare Module gegliedert.
- 5- Diese Module werden gestaltet und konkretisiert.
- 6- Die so entstandenen Vorentwürfe werden in einen Gesamtentwurf integriert.
- 7- Der Gesamtentwurf bildet die Grundlage für weitere Ausarbeitung /Kla07/.

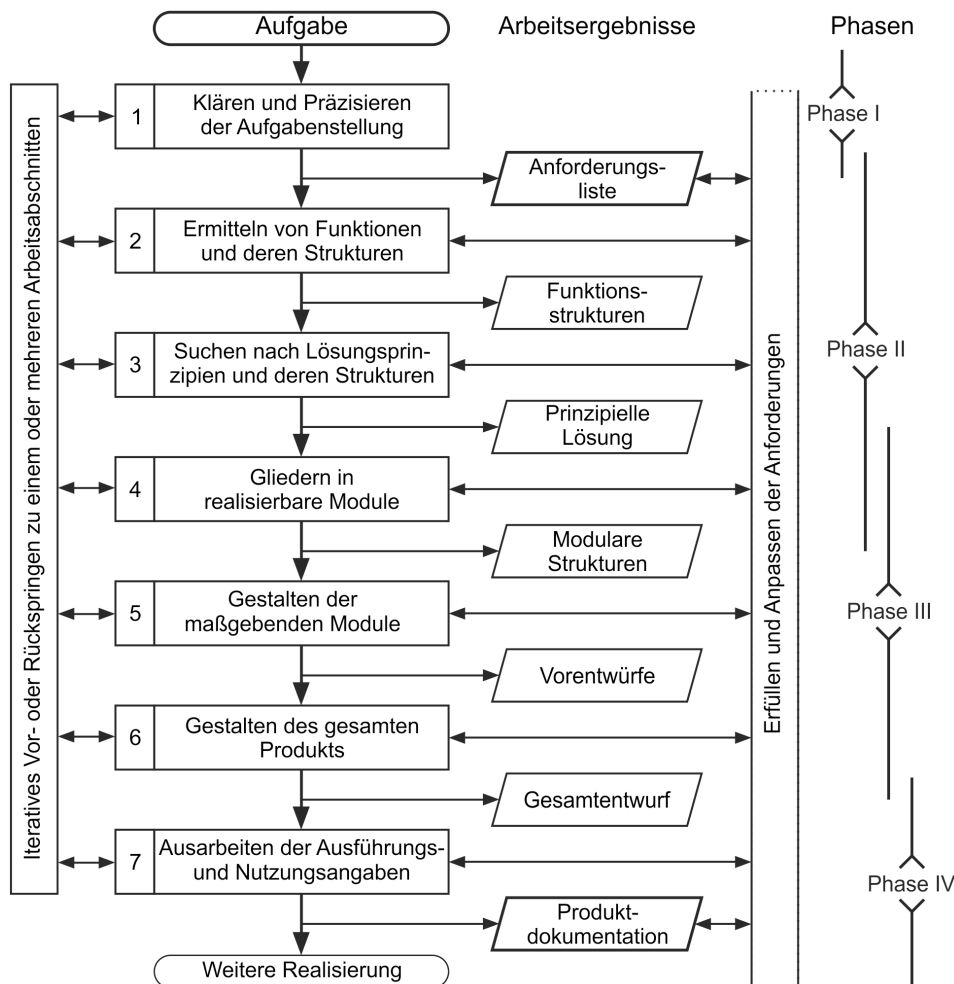


Bild 16: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren /Pah93/

Rechnereinsatz in der Entwicklung

Für die Bearbeitung einzelner Konstruktionsaufgaben bzw. die Unterstützung entsprechender Konstruktionstätigkeiten sind eine Vielzahl von Einzelprogrammen und Programmsystemen verfügbar.

Die Hauptaufgaben dieser Programme sind:

- Berechnung von Teilen, Gruppen oder Produkten (Nachrechnung oder Auslegung), z.B. hinsichtlich Festigkeit, Maschinendynamik, oder thermischem Verhalten /Pah93/,
- Optimierung von Produkten, Komponenten, oder Prozessen /Pah93/: Ziel der meisten technischen Untersuchungen ist es, einen gegebenen Zustand zu verbessern, ihn zu optimieren. In der Konstruktion bedeutet Optimieren im Allgemeinen, eine gegebene Geometrie so zu modifizieren, dass das geforderte Ziel besser erreicht wird. Ziel kann z.B. die Reduktion der Masse, die Steigerung der Lebensdauer, die Erhöhung der kleinsten Eigenfrequenz, die Verringerung der maximalen Verformung oder eine andere für die Funktion des Bauteils relevante Größe sein. Modifikationen bedeuten hier Änderungen der Bauteilabmessungen, wobei die grundsätzliche Gestalt des Bauteils feststeht (Formoptimierung). Seit Anfang der 90er Jahre des letzten Jahrhunderts fanden verschiedenen Versuche statt, Bauteile in einem vorgegebenen Bauraum dadurch abzuleiten, dass im Bauraum die hochbelasteten Bereiche große tragende Querschnitte erhalten, die weniger belasteten ausgedünnt oder gar entfernt werden (Topologieoptimierung). Zusätzlich gibt es Optionen, um Bauteile optimal mit Sicken zu versehen /Ste04/.
- Simulieren von Bewegungszusammenhängen und Arbeitsprozessen: Typische Anwendungsbeispiele sind die Simulation der Bewegungen von Werkstück und Werkzeug im Arbeitsraum von Werkzeugmaschinen oder die Bewegung von Industrierobotern. Hierbei kann die Abhängigkeit der wesentlichen Objektmerkmale von der Zeit dargestellt werden /Pah93/.
- Zeichnen geometrischer Gebilde und Strukturen /Pah93/,
- Aufbau und Änderung von geometrischen und technologischen Objektmodellen („Produktmodellierung“) /Pah93/.
- Bereitstellen von gespeicherten Informationen in Form von Daten, Texten oder Zeichnungen vielfältigster Art, z.B. von Normen, Werkstoffen, Zukaufteilen, Maschinenelementen, Altprodukten, physikalischen Effekten, Wirkprinzipien u.a. /Pah93/.

Die Anwendung solcher Programme durch den Konstrukteur bedeutet bereits eine große Unterstützung und führt zu Produkt- und Arbeitsverbesserungen /Pah93/.

Mit Hilfe der Simulation werden die Ideen der Entwickler überprüft und frühzeitig prognostiziert, die Anzahl und der Zeitaufwand der erforderlichen Versuche reduziert und die Produkte kommen schneller und kostengünstiger auf den Markt /Ste04/.

3 Ziel der Arbeit

Die Slicermesser werden in Zirkularschneidemaschinen, so genannten Slicern eingesetzt, um große Mengen von Lebensmittelprodukten mit möglichst hoher Geschwindigkeit scheibenförmig aufzuschneiden. Zur Erzielung einer möglichst großen Schnittgeschwindigkeit bei gleichzeitig hoher Schnittqualität werden die Slicermesser mit hoher Drehzahl von 3450 bis ca. 5600 min^{-1} angetrieben. Aufgrund dieser hohen Drehzahl und des beim Schneiden der Lebensmittelprodukte entstehenden Widerstands müssen die herkömmlichen Slicermesser stabil ausgeführt sein und besitzen dadurch ein relativ hohes Gewicht von ca. 5250 g.

Die bisherigen Slicermesser werden durch Spanen hergestellt.

In der Industrie gibt es den Trend, bisher geschmiedete, gegossene oder aus Stahlscheiben spanend gefertigte Teile durch dickwandige Tiefziehteile zu ersetzen /Pet99, PeE96/.

Maßgebend für diese Entwicklung dürfte sein, dass das Tiefziehen dicker Bleche im Vergleich zum Gießen, Schmieden, oder Spanen die angesichts steigender Kosten für Energie und Rohstoffe immer wichtigere Forderung nach kurzen Fertigungszeiten bei optimalem Werkstoff- und Energieverbrauch und höherer Qualität der Produkte erfüllt. Insbesondere kann bei Tiefziehteilen aus dickem Blech eine aufwendige spanende Nacharbeit entfallen oder reduziert werden, was einerseits die Werkstoffausnutzung erhöht und andererseits Bearbeitungskosten reduziert /Kue80, Kue82/.

Promotionsziele:

- Entwicklung eines werkstoffeffizienten, aus Stahlblech hergestellten Slicermessers. Das entwickelte Slicermesser sollte die Stabilität des herkömmlichen Slicermessers bei gleichem Gewicht erreichen oder verbessern. Die Verbesserung der Stabilität erlaubt die Möglichkeit eine Leichtbauweise zu realisieren. Die Slicermesser werden auf Zirkularschneidemaschinen eingesetzt, die für ein Messergewicht von 5250 ± 50 g ausgelegt sind. Das Leichtbaupotential der neu entwickelten Slicermesser wird daher nur theoretisch betrachtet.

- Die Entwicklung einer ressourceneffizienten Umformtechnologie zur Herstellung des Slicermessers.
- Die Funktionsfähigkeit, die technische Zuverlässigkeit und die Sicherheit der hergestellten Slicermesser experimentell zu überprüfen und mit dem herkömmlichen Slicermesser zu vergleichen.
- Überprüfung der Vorhersagemöglichkeiten der FEM-Methode zur Abschätzung der Aufbiegung des Slicermessers unter Einwirkung der Fliehkraft.

4 Entwicklung von aus Blech gefertigten Slicermessern

Unter Produktentwicklung (PE) wird die Tätigkeit zum Lösen einer technischen Aufgabe verstanden. Der Arbeitsfluss beim Planen und Konstruieren wurde in allgemeiner Form sowie branchen- und produktunabhängig in den VDI - Richtlinien 2221 und 2222 erarbeitet. Prinzipiell verläuft der Planungs- und Konstruktionsprozess von der Planung der Aufgabe und Klärung der Aufgabestellung über das Erkennen der erforderlichen Funktionen, das Erarbeiten prinzipieller Lösungen, den Aufbau modularer Baustrukturen mit Baugruppen und Bauteilen bis hin zur Dokumentation des gesamten Produktes /Pah93/.

Zum Konstruieren des geformten Slicermessers wurden die folgenden Hauptarbeitsschritte festgelegt:

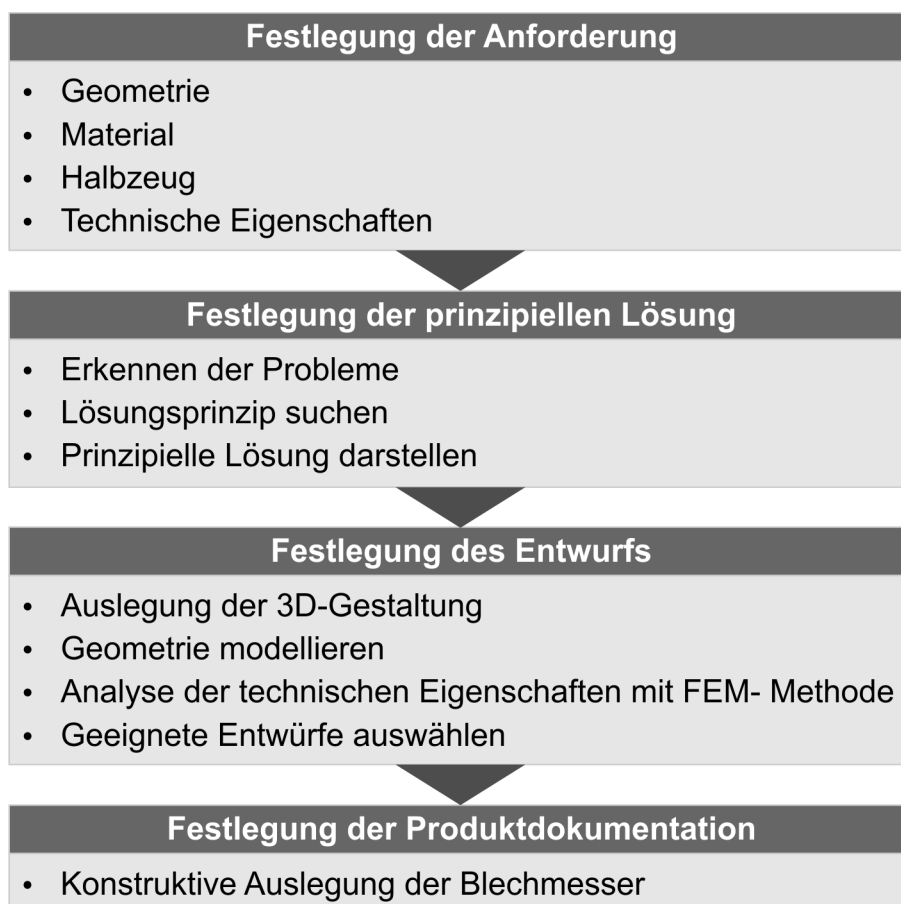


Bild 17: Hauptarbeitsschritte der Konstruktion des umgeformten Slicermessers

4.1 Anforderungen

Folgende Anforderungen sind für die Entwicklung der Slicermesser zu berücksichtigen:

Geometrie

- Durchmesser: 460 mm
- Formabweichung (Seitenschlag): max. 0.1 mm
- Schneidwinkel: 30°
- Nebenwinkel: 10°
- Abstand Schneidenebene zu Messerkopfanlagefläche: 11,9 mm,
- Nabenanlagefläche: Ø 100 mm,
- Produktkontaktzone auf der konvexen Messerseite: 40 – 60 mm
- Produktkontaktzone auf der konkaven Messerseite: 30 mm

Eigenschaften

- Gewicht des Messers: max. 5250±50 g
- Steifigkeit wie herkömmliches Messer oder besser
- Vergleichsspannung wie herkömmliches Messer oder kleiner
- Werkstoff: Werkzeugstahl 1.2379
- Härte des Schneidenbereichs: 59 HRC
- Härte des Scheibenbereichs: weichgeglüht
- Ausgangswerkstoff: Blechrunde

Fertigungsverfahren

- Fertigungsverfahren: Blechumformverfahren

Kräfte und Momente

- Drehzahl des Messers: 5600 min⁻¹
- Drehmoment an der Messerwelle: 20 Nm
- Drehzahl der Exzenterwelle: 800 min⁻¹
- Drehmoment an der Exzenterwelle: 7 Nm
- Randkraft durch Schneidgut: 40 - 300 N

4.2 Mögliche Beanspruchungen des Slicermessers

Die Slicermesser sind durch Torsion, Fliehkraft und eine durch das Schnittgut in axialer Richtung wirkende Randkraft beansprucht. Ein Versagen des Slicermessers kann durch Überschreiten der zulässigen Spannungen oder durch Überschreiten der zulässigen Verformungen und Verschiebungen entstehen.

4.2.1 Torsionsbeanspruchung

Die Slicermesser sind rotierende Scheiben. Das Drehmoment beansprucht die Messer auf Verdrehung (Torsion). Die Schubspannung τ ist von der Fliehkraft unabhängig und in der Regel ganz gefahrlos /Bie53/. Mit der Vereinfachung, dass das Slicermesser eine flache Scheibe mit konstanter Dicke von $s = 5 \text{ mm}$ und Durchmesser von $D = 460 \text{ mm}$ ist, kann die Schubspannung τ nach Formel (4.1) berechnet werden:

$$\tau = \frac{M}{2\pi \cdot r^2 \cdot s} \quad (4.1)$$

Die Schubspannung bei $r = 50 \text{ mm}$ beträgt $2,5 \cdot 10^{-4} \text{ N/mm}^2$ und bei $r = 230 \text{ mm}$ beträgt $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ N/mm}^2$.

4.2.2 Beanspruchungen durch Fliehkraft

In einem mit der Winkelgeschwindigkeit w umlaufenden Bauteil wirkt die Zentrifugalkraft $w^2 \cdot r \cdot dm = w^2 \cdot r \cdot \rho \cdot dA \cdot dr$, auch Fliehkraft genannt. Die Fliehkraft ist eine vom Zentrum nach außen wirkende Radialkraft und wächst quadratisch mit der Rotationsgeschwindigkeit (Drehzahl). Die Fliehkraft bewirkt in rasch umlaufenden Scheiben erhebliche radiale und tangentialen Spannungen, die für die Festigkeit der Scheibe von entscheidender Bedeutung sind /Bie53/. Das Slicermesser ist keine ebene, flache Scheibe, sondern hat einen kegeligen Querschnitt (Bild 3), so dass die Fliehkraft eine zusätzliche Biegebeanspruchung bewirkt und das Messer parallel zur Drehachse auslenkt. Die durch Fliehkraft entstehenden Spannungen und Verformungen lassen sich nach den Regeln der Statik und Festigkeitslehre ermitteln,

wenn man im Sinne des d'Alembertschen Prinzips die Fliehkräfte als äußere Kräfte an den Massenelementen ansetzt /Dub04/.

4.2.3 Biegebeanspruchung durch Randkraft

Die Messer werden beim Schneiden durch die axialen Schneidgutkräfte auf Biegung beansprucht und parallel zur Drehachse ausgelenkt. Je nach Messerwinkelstellung und verarbeitetem Schneidgut variiert die Axialkraft zwischen 40 und 300 N.

Die im Messer entstehenden Spannungen und Verformungen werden mit Hilfe von FEM-Programmen berechnet.

4.3 Analyse der Eigenschaften des herkömmlichen Slicermessers

Zur Bewertung der Eigenschaften des herkömmlichen Slicermessers wurde eine statische Analyse mit einem FEM-Programm durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Analyse bilden die Grundlage für die Anforderungen an die neuentwickelten Slicermesser.

Modellbildung

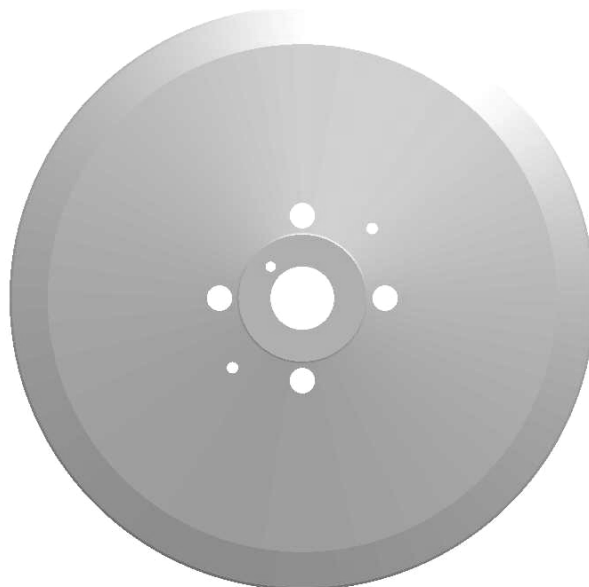


Bild 18: ProEngineer Modell

Zunächst wurde aus der 2D-CAD Zeichnung des herkömmlichen Slicermessers in Bild 3 ein 3D-ProEngineer Modell erzeugt (Bild 18).

Dann wurde das 3D-Modell mittels Export/Import über die IGES-Schnittstelle in das FEM-Programm HyperMesh transportiert.

Im FEM-Programm wurde das FEM-Modell erzeugt (Bild 19).

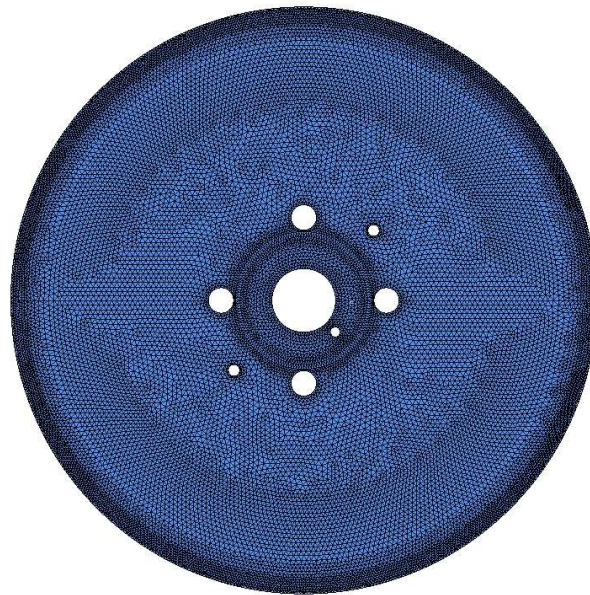


Bild 19: FEM-Modell des herkömmlichen Slicermessers in HyperMesh

Anschließend wurde die Simulation durchgeführt. In der Simulation wurde das Slicermesser jeweils separat unter statischer Last und unter Einwirkung der Fliehkraft bewertet.

Als Randbedingung wurde nur Rotation der Zentralbohrung um die Drehachse definiert. Alle anderen Freiheitsgrade wurden fixiert. Ausgewertet wurden die Auslenkung und die Vergleichsspannung.

4.3.1 Berechnung der Auslenkung durch Flächenlast

Als Flächenlast in axialer Richtung wirkt das Schnittgut. Für die Berechnung wurde ein üblicher Schnittgutdurchmesser von 100 mm angesetzt. Der Mittelpunkt der kreisförmigen Flächenlast liegt 50 mm vom Schneidenrand entfernt in Richtung des Messermittelpunkts. Messungen der realen Schnittkraft zeigen eine Kraft zwischen 30 N und 300 N in axialer Richtung. Der Wert variiert in Abhängigkeit vom

verwendeten Schnittgut. Dieser Kraftbereich wurde zur Berechnung der Flächenlast verwendet. Die Berechnung der maximalen Auslenkung durch die Flächenlast ergab dabei folgenden Verlauf (Bild 20).

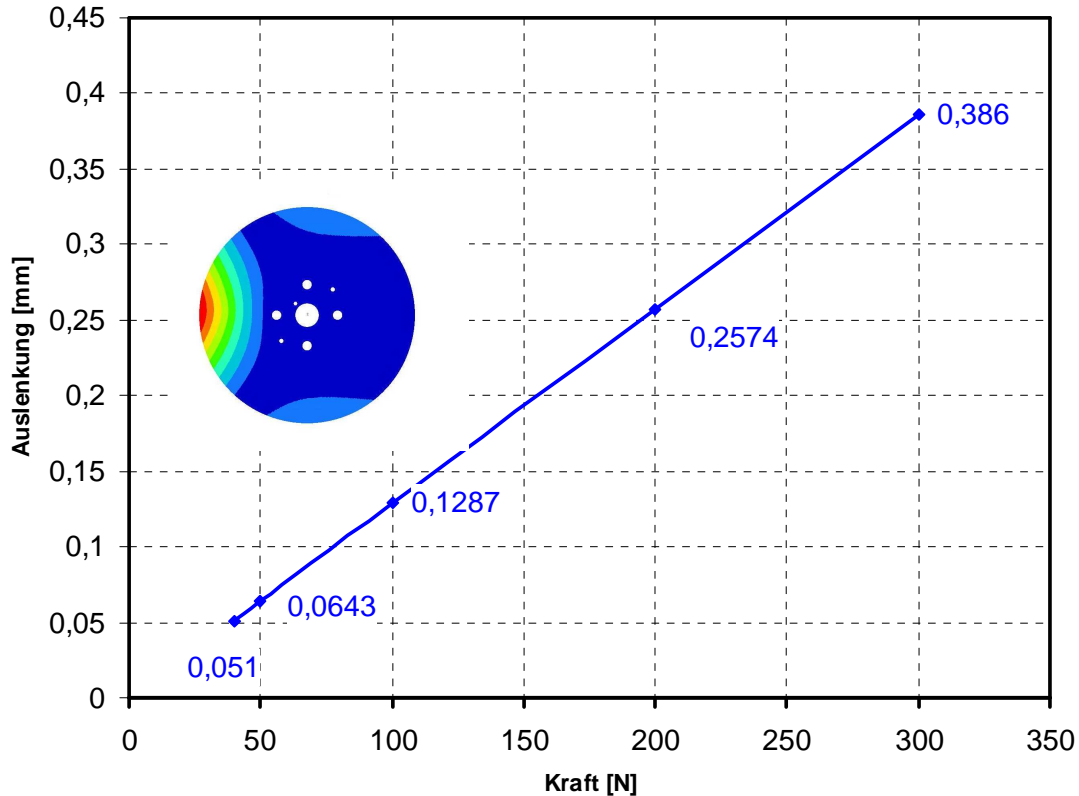


Bild 20: Auslenkung des herkömmlichen Slicermessers durch Flächenlast

4.3.2 Berechnung der Auslenkung und der Vergleichsspannung durch Fliehkraft

Zur Untersuchung des Verformungsverhaltens des Slicermessers unter Einwirkung der zentrifugalen Last wurde eine Zentrifugallast für alle Elemente definiert. Die Drehzahl für Zentrifugallast wurde mit 5600 min^{-1} definiert.

Die maximale Auslenkung des herkömmlichen Slicermessers bei 5600 min^{-1} beträgt 1.107 mm (Bild 21).

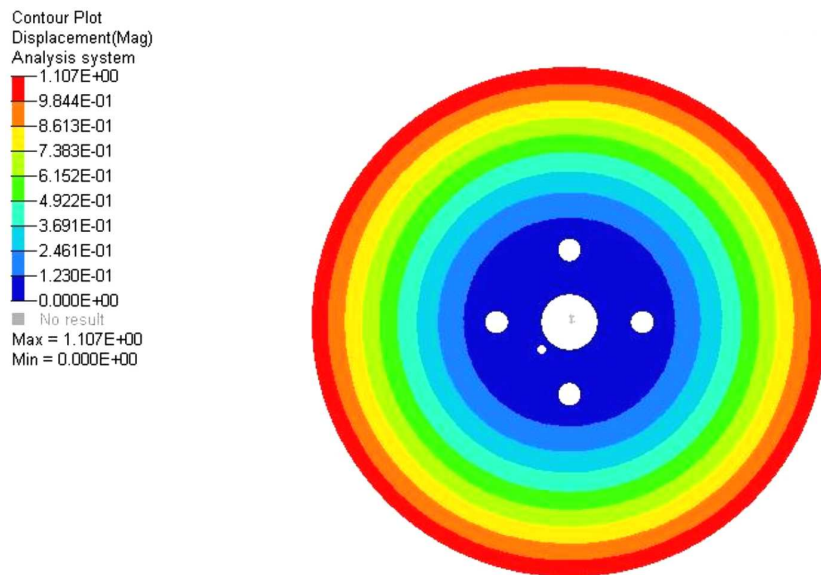


Bild 21: Auslenkung des herkömmlichen Slicermessers durch Fliehkraft bei 5600 min⁻¹

Die Auslenkung ist von der Drehzahl abhängig und steigt mit zunehmender Drehzahl an. Die Berechnung der maximalen Auslenkung des herkömmlichen Slicermessers durch die Fliehkraft bei Drehzahlen von 30 min⁻¹ bis 5600 min⁻¹ ergab dabei folgenden Verlauf (Bild 22).

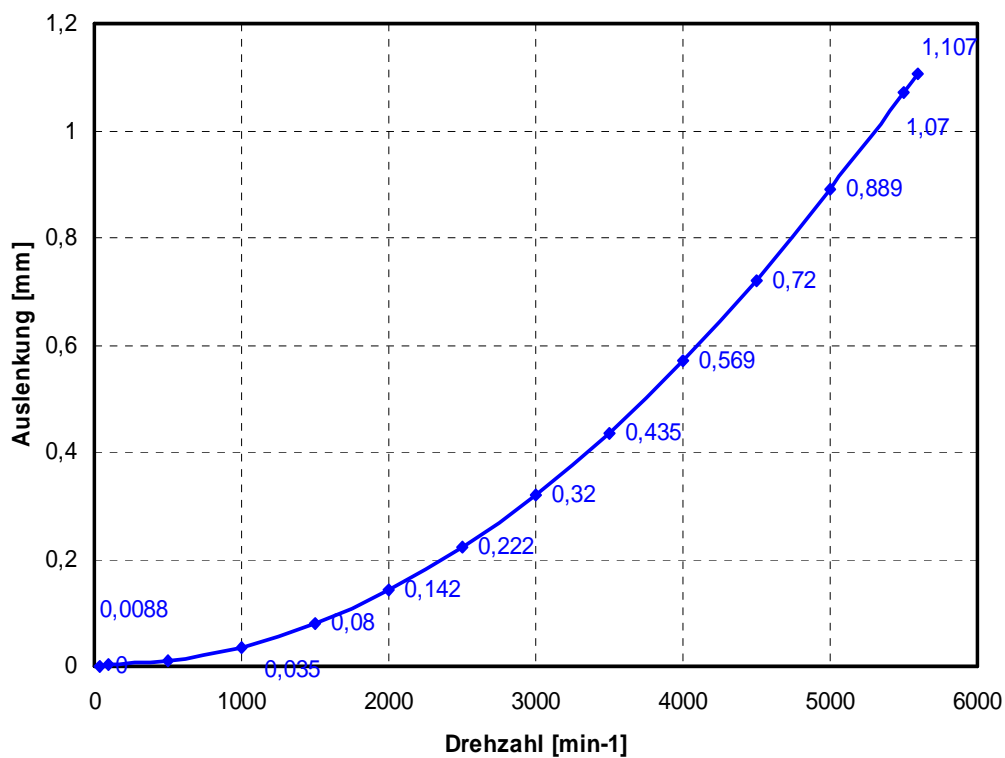


Bild 22: Auslenkung des herkömmlichen Slicermessers in Abhängigkeit von der Drehzahl

Die maximale Vergleichsspannung des herkömmlichen Slicermessers bei 5600 min^{-1} nach von Mises in dem gesamten Slicermesser beträgt 163 N/mm^2 (Bild 23).

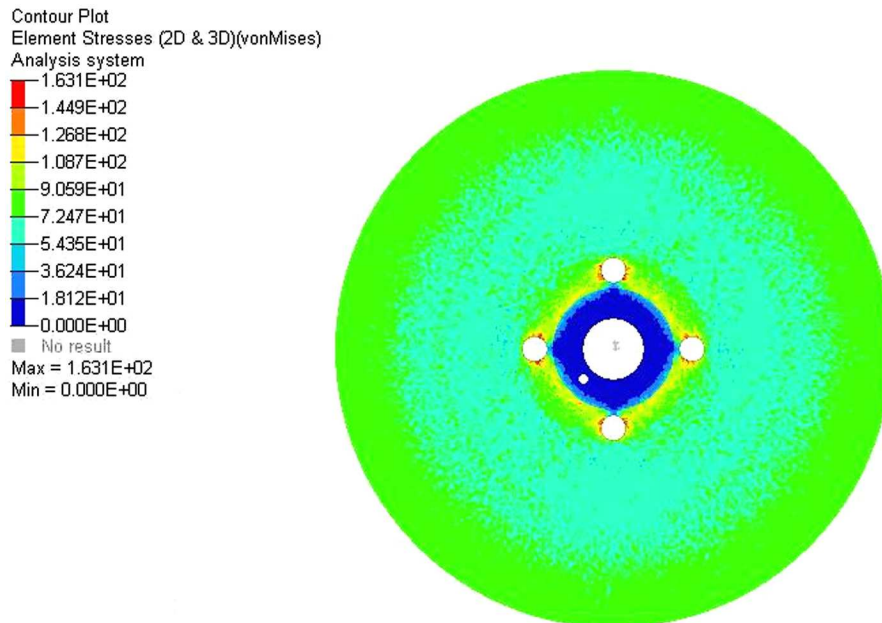


Bild 23: Vergleichsspannung des herkömmlichen Slicermessers durch Fliehkraft bei 5600 min^{-1}

Mit der 0,2 % Dehngrenze des Messerwerkstoffes $699,5 \text{ N/mm}^2$ ist der Sicherheitsfaktor bei der maximalen Vergleichsspannung von 163 N/mm^2 ca. 4,1. Der ausreichende Sicherheitsfaktor gegen Verformung beträgt $S_F = 1,2 - 2$ /Dub04/.

4.4 Konstruktive Problemerkklärung und Lösungsprinzip

Ziel ist es, ein aus Blech herstellbares Slicermesser zu schaffen, das im Vergleich zu herkömmlichen Slicermessern eine höhere Steifigkeit bei gleichbleibendem Gewicht oder geringeres Gewicht bei ausreichender Steifigkeit und Festigkeit aufweist. Das bedeutet, dass die Neukonstruktion als Blechkonstruktion erfolgen muss und die Konstruktionselemente aus Blech die erforderliche Tragfähigkeit und Bruchfestigkeit erfüllen müssen oder verbessern können ohne dass das Messergewicht größer wird. Die gezielte Erhöhung der Steifigkeit kann durch werkstoffspezifische und/oder durch konstruktive Maßnahmen erreicht werden. Diese Arbeit bezieht sich auf den Einsatz von konstruktiven Maßnahmen. Der Einsatz anderer Werkstoffe oder mehrerer verschiedener Werkstoffe zur Herstellung von Slicermessern wird in dieser Arbeit

nicht betrachtet. Unter konstruktiven Versteifungen sollen gezielt eingebrachte geometrische Anisotropien verstanden werden, die helfen, die Steifigkeit einer Leichtbaukonstruktion zu erhöhen. Wenn möglich, soll die Versteifung ohne zusätzlichen Werkstoffaufwand erfolgen, so dass bei konstantem Eigengewicht gleichzeitig eine Steigerung der Tragfähigkeit eintritt. Nach der geometrischen Form und dem Einbringverfahren unterscheidet man:

- Versteifung durch schalenförmige Gestaltung
- Ausbildung von Sicken
- Anformung von Rippen
- Formung von Randversteifungen, Durchzüge und Falze /Kle07/.

Da das Bauteil durch Blechumformverfahren hergestellt wird und durch die Funktion des Messers Versteifungen nur im Scheibenbereich möglich sind, ist die Einbringung von Sicken in diesem Bereich die günstigste Lösung. Im Naben- und Schneidenbereich sind Geometrieänderungen nicht möglich. Die Sicke ermöglicht eine Versteifung von Blechteilen ohne zusätzliche Bauelemente, in dem sie direkt ins Blech bzw. in die aus Blech gefertigten Teile eingebracht wird /Wid85, Oeh71, Kie55, Oeh70, Ebe65, Gar56/.

Rippen sind durch Blechumformverfahren nicht herstellbar und bieten mehr Angriffsfläche für Verschmutzung. Randversteifungen und Durchzüge sind bei einteiligen Messern nicht herstellbar.

4.4.1 Definition von Sicken

Sicken sind rinnenartige Vertiefungen oder Erhöhungen in ebenen oder gewölbten Blechflächen, wobei die Tiefe gegenüber der Länge klein ist /Pet72, Pet91, Her97/.

Gebräuchliche Querschnitte, Anordnungen und Arten von Sicken zeigt Bild 24.

Die am häufigsten angewendeten Sickenquerschnitte sind die Halbrundsicke sowie die Trapezsicke /Klu79/. Dies liegt vor allem daran, dass sich diese Querschnitte durch ihre Schrägen für Fertigungsprozesse wie Gießen und Tiefziehen besonders gut eignen /Emm04, Adl00/. Andere Formen sind dreieckig oder viereckig. Der Sickenverlauf kann sowohl gerade als auch gekrümmt sein /Wid84/. Außerdem können offene oder geschlossene Sicken unterschieden werden.

Sicken können zu Mehrfachsicken oder zu Sickengruppen angeordnet werden. Diese Anordnungen werden als Sickenbilder bezeichnet /Sch03/.

Das Hauptanwendungsgebiet von Sicken in der Technik ist der Einsatz als Versteifungselement. Grundsätzlich können Sicken jedoch auch andere Funktionen haben:

- zum Verzieren
- zum Fügen
- als Anschlag
- zur Oberflächenvergrößerung /Emm04/.

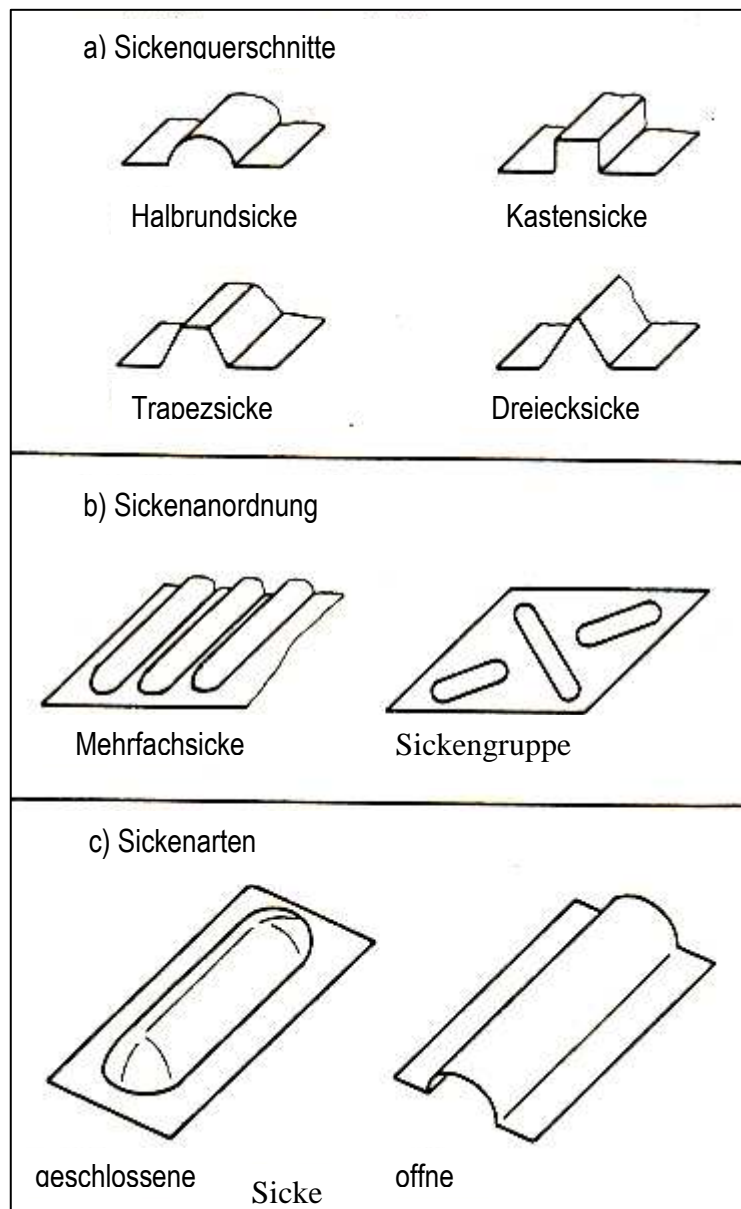


Bild 24: verschiedene Grundformen der Sicke /Wid84/

- a) Sickenquerschnitte
- b) Sickenanordnungen
- c) Sickenarten

Eigenfrequenz des Bleches. Die Zunahme des Flächenträgheitsmomentes und der Steifigkeitsgewinn sind damit maßgeblich von der Sickenhöhe abhängig.

Diese Zusammenhänge können über analytische Formeln dargestellt werden /Adl00/.

Danach ist die Eigenfrequenz eine Funktion der Biegesteifigkeit C_b :

$$f_{eig} = f(\sqrt{C_b}) \quad (4.3)$$

Eine hohe Biegesteifigkeit C_b des Bleches kommt durch ein großes Flächenträgheitsmoment I zustande:

$$C_b = f(I) \quad (4.4)$$

Ein großes Flächenträgheitsmoment wird durch die Verschiebung der Schwerelinie erreicht. Es nimmt mit steigender Sickenhöhe h zu:

$$I = f(h^3) \quad (4.5)$$

Da diese Struktureigenschaft unabhängig von den Werkstoffkennwerten ist, ist diese Feststellung allgemeingültig und nicht werkstoffspezifisch.

4.4.3 Methode zur Sickengestaltung und Dimensionierung

Die Einbringung von Sicken in einem Blech ist oft problematisch und kompliziert.

In einem Blechfeld kann man eine unendliche Anzahl von Sickenbildern in verschiedenster Art anordnen /Emm04/.

Bei der Versickung von Blechen hat der Konstrukteur in der Praxis bisher im Prinzip folgende Möglichkeiten:

1. Experimentelle und manuelle Methoden ohne FEM
2. Auslegung der Sicken mittels FEM
3. Konstruktion nach Sickenkatalogen
4. Konstruktion mit Optimierungsprogrammen

4.4.3.1 Experimentelle und manuelle Methoden

Diese Methode zur Auslegung von Sicken erfolgt durch manuelle Rechnung, die auf allgemein bekannten Gestaltungsrichtlinien, Erfahrungswerten und Kenntnissen von den Werkstoffeigenschaften basiert. Danach werden die mechanischen Eigenschaften wie Steifigkeit und Eigenfrequenzen der konstruierten Bleche durch Versuche ermittelt. Diese einfache 2D-Methode für die Auslegung von Sicken ohne FEM als Hilfsmittel reicht nicht mehr aus /Emm04/ und ist zeit- und kostenaufwendig.

4.4.3.2 Auslegung der Sicken mittels FEM

Diese Methode hat Herrmann /Her97/ für „Systematisches Anordnen der Aussteifungen im Blech“ verwendet. Dazu versieht er z. B. ein ebenes Blech mit einer Sicke, bringt eine Belastung auf und bewertet dann mittels FEM die mechanischen Eigenschaften. Wenn diese mechanischen Eigenschaften nicht in den gewünschten Bereichen liegen, korrigiert er das Sickenbild manuell und führt wieder eine numerische Analyse durch, bis alle gewünschten Eigenschaften erfüllt sind.

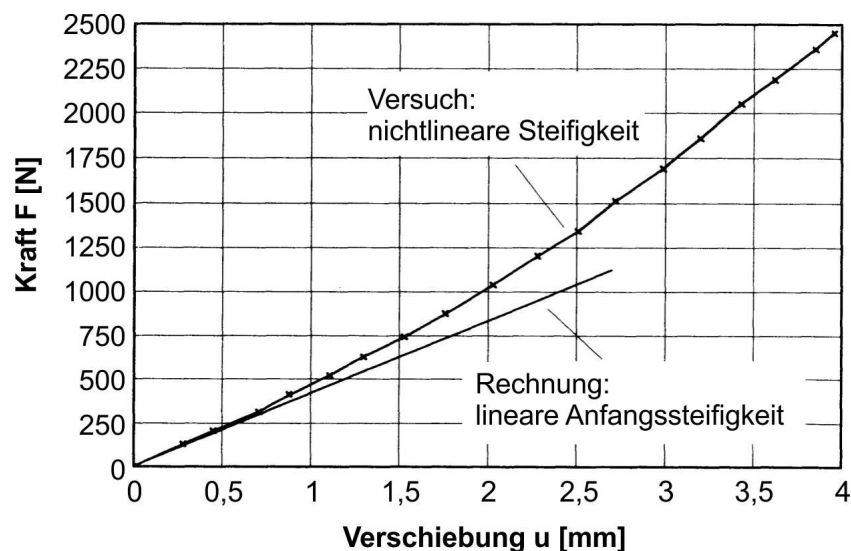


Bild 26: Experimentell und mittels FEM ermittelte Steifigkeitskennlinie für den Lastfall Normallast /Her97, Emm04/

Durch diese Konstruktionsmethode kann die Sickenkonstruktion schnell und einfach durchgeführt und aufwendige Versuche zur Ermittlung der mechanischen Eigenschaften vermieden werden. Die Arbeit zeigt, dass diese numerisch

berechneten Eigenschaften mindestens im linear elastischen Bereich eine sehr gute Übereinstimmung zum Versuch aufweisen (Bild 26) /Her97, Emm04/.

4.4.3.3 Konstruktion nach Sickenkatalogen

Die zur Verfügung stehenden Sickenbilder in Konstruktionskatalogen sind konventionelle Sickenbilder und optimierte Sickenbilder. Die konventionellen Sickenbilder wurden auf Basis von Versuchen mit rechteckigen Blechen entworfen. Die Möglichkeiten, die FEM als Hilfsmittel zur Konstruktion und zur schnellen Verifikation zu nutzen, gab es zu dieser Zeit noch nicht. Sie entsprechen nicht den heutigen fertigungstechnischen Möglichkeiten und sind lastfallspezifischen Sickenanordnungen deutlich unterlegen. Untersuchungen, welchen Einfluss die Randbedingungen auf die Sickengestaltung haben, sind nicht dokumentiert (Bild 27) /Emm04/.

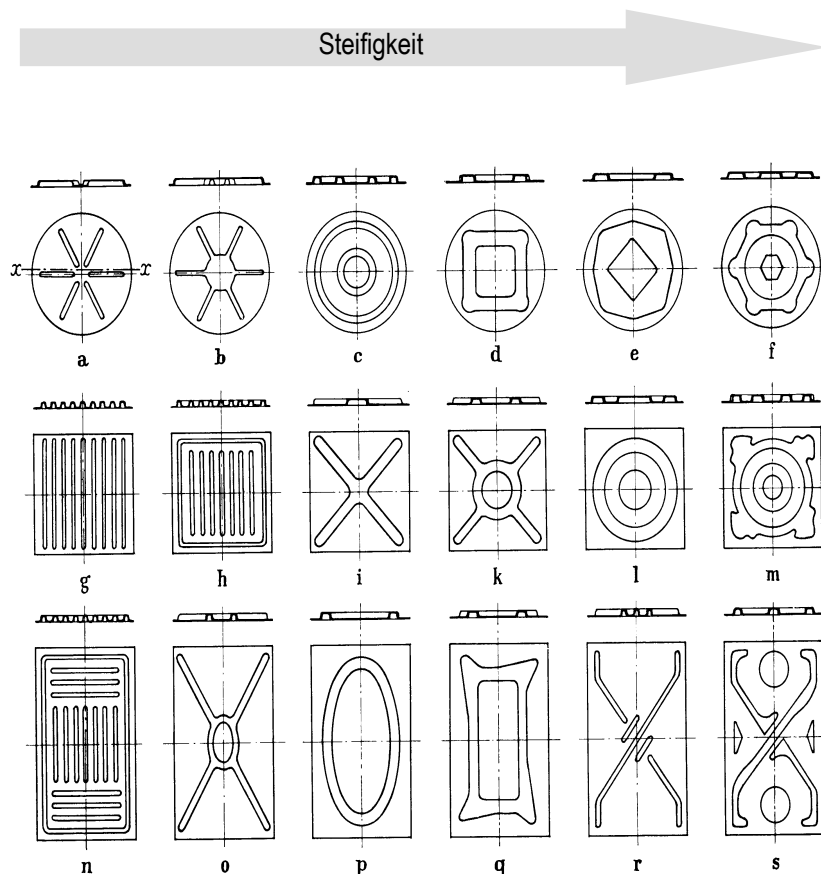


Bild 27: Sickenbilder nach /Oeh72/
Steifigkeit von links nach rechts zunehmend

Optimierte Sickenbilder wurden mit Hilfe von Optimierungsprogrammen entworfen und im Sickenatlas dokumentiert. Als Optimierungsprogramm hat Schwarz. D. hierzu

OptiStruct benutzt. Diese optimierten Sickenbilder sind den klassischen Sickenbildern oftmals deutlich überlegen /Sch02/.

Die Sickenkataloge können bei einfachen Blechgeometrien und Belastungen helfen.

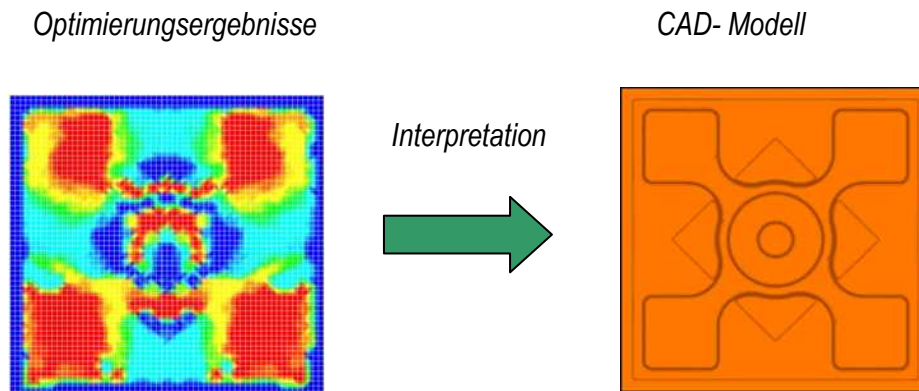


Bild 28: Optimierungsergebnis und CAD- Kontur des Optimierten Sickenbilds /Sch02/

4.4.3.4 Konstruktion mit Optimierungsprogrammen

Seit mehreren Jahren werden rechnerische Optimierungsprogramme für die optimale Auslegung von Blechen mit Sicken eingesetzt. Die Programme basieren auf der Methode der Finiten Elemente und ermöglichen die automatische Ermittlung von Sickenanordnungen. Für die Formulieren des sogenannten "Optimierungsproblems" wird, basierend auf einem Anfangsmodell, in Abhängigkeit von einer oder mehreren Optimierungsvariablen eine Zielfunktion definiert. Mit Hilfe eines iterativen Verfahrens wird, unter Einhaltung von definierten Randbedingungen, die Optimierungsvariable im Hinblick auf die Erfüllung der Zielfunktion verändert /Sch02/.

4.5 Entwerfen eines aus Blech formbaren Slicermessers

4.5.1 Vorgehensweise

Die Auslegung der Sickenbilder zur Versteifung der Scheibe des Blechmessers erfolgte am Anfang mit Hilfe eines Optimierungsprogramms (OptiStruct) und danach mit der Methode von Herrmann „Systematisches Anordnen der Aussteifungen im Blech“ /Her97/.

Die aus Blech konstruierten Slicermesser mit versteifter Scheibe wurden anhand verschiedener Eigenschaften, wie Steifigkeit, Gewicht, und Belastbarkeit bewertet, und danach mit den Eigenschaften der herkömmlichen Slicermesser verglichen.

Auf der Scheibe wurde aus dem Funktionsprofil des Slicermessers folgender Gestaltungsbereich festgelegt (Bild 29).

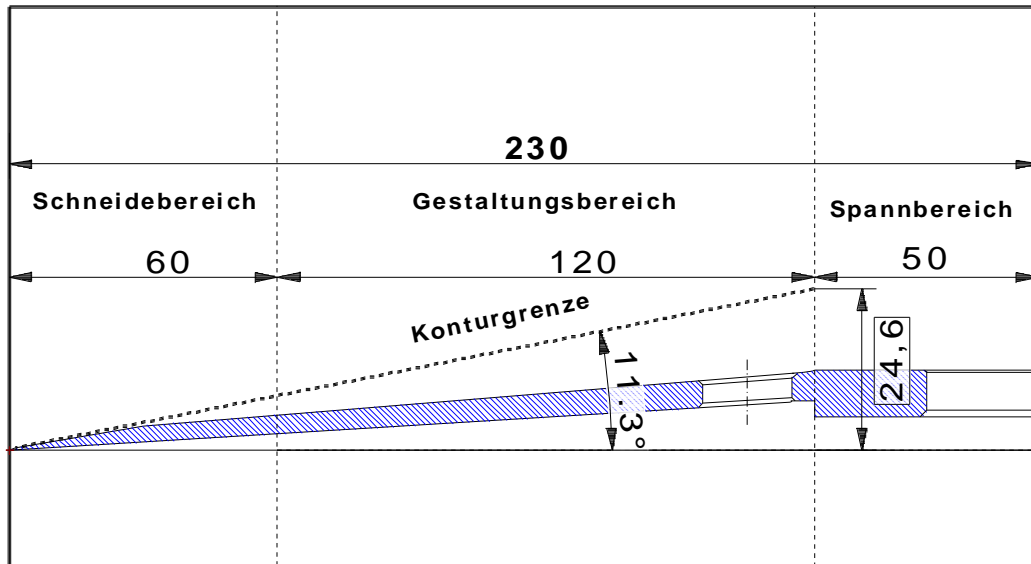


Bild 29: Gestaltungsbereich für Sicken

4.5.2 Konstruktion mit Optimierungsprogramm

Zur optimalen Auslegung des Sickenbilds zur Versteifung der Scheibe wurde das am Lehrstuhl zur Verfügung stehende Programm OptiStruct eingesetzt. Die Bildung des FEM-Modells erfolgte durch den Preprozessor *HyperMesh* (Bild 30).

Als Ausgangmodell wurde ein kegelförmiges Blech mit den folgenden Geometrien:

größter Durchmesser 460 mm,

kleinster Durchmesser 100 mm,

Blechstärke 4,8 mm

verwendet.

Die Durchmessergrößen ergeben sich aus den geometrischen Vorgaben für das Slicermesser und die Blechstärke resultiert aus der Gewichtsgrenze.

Als Randbedingung wurde nur Rotation der Zentralbohrung um die Drehachse definiert. Alle anderen Freiheitsgrade wurden fixiert.

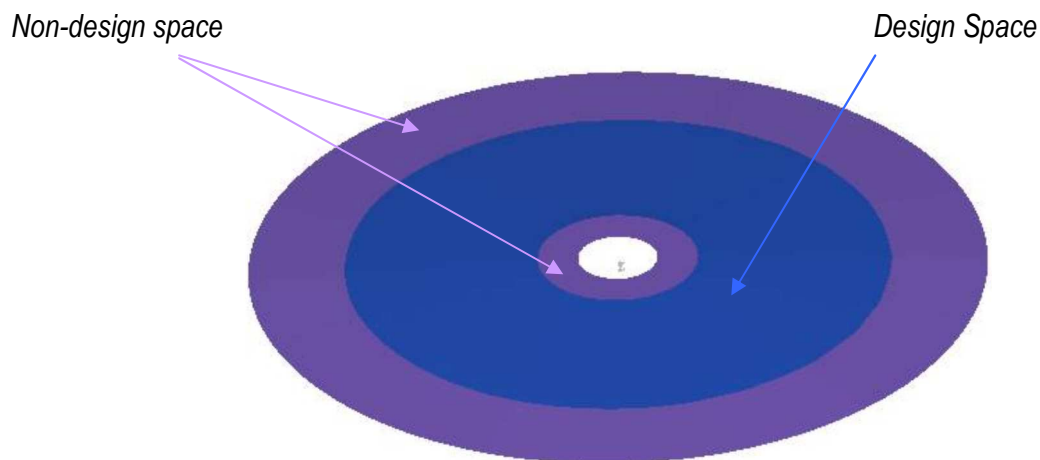


Bild 30: FEM- Modell mittels OptiStruct

Der Bereich des Bleches, in dem ein Sickenbild generiert werden soll, wird als „Design space“ definiert. Der Randbereich des Bleches, der aufgrund der Schneidengeometrie nicht versickt werden soll, und der Nabenbereich werden als „Non-design space“ definiert.

Der Kegel wurde mit einer Zentrifugallast für alle Elemente belastet. Die Drehzahl für die Zentrifugallast wurde mit 5600 min^{-1} definiert.

Für die Definition der Sickengeometrie im „Design space“ können verschiedene Vorgaben definiert werden. Diese beziehen sich auf die geometrische Kontur der Sicken: maximale Sickenhöhe, minimale Sickenweite und Flankenwinkel.

Die Eingabe der Parameter erfolgte dabei in einer sogenannte „Bead Card“. Durch die Eingabe der Parameter ist die Kontur der entstehenden Sicken beschrieben. Als Zielfunktion wurde die maximale Steifigkeit definiert. Als Ergebnisse der Optimierung entstand das topographische Bild (Bild 31), der sogenannte „Contour Plot“. In dem Contour Plot sind die Sicken rot dargestellt, die Ausgangshöhe ist blau gekennzeichnet.

Das Ergebnis von OptiStruct zeigt eine umlaufende Sicke mit unterschiedlicher Größe in radialer Richtung. Diese Auslegung ist patentrechtlich /Off1/ geschützt und wird in dieser Arbeit daher nicht weiter verwendet.

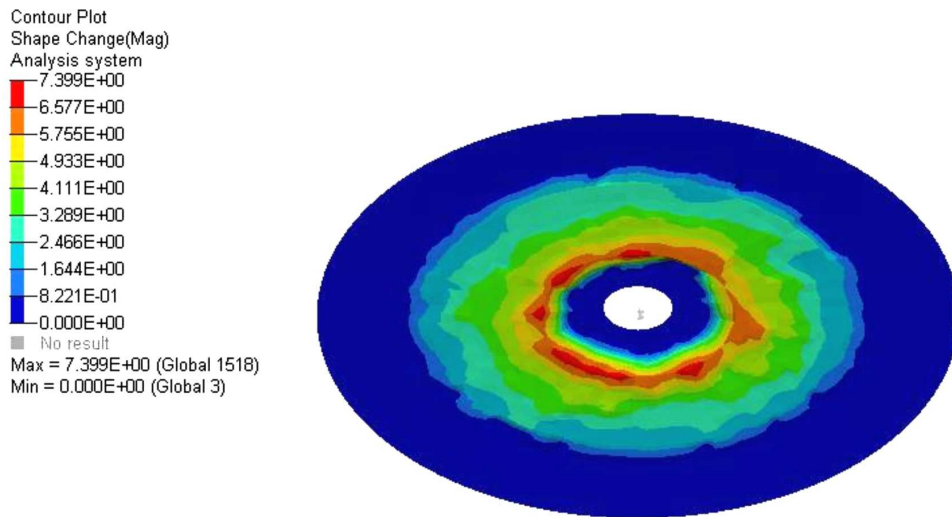


Bild 31: Contour Plot als Optimierungsergebnisse nach OptiStuckt

4.5.3 Auslegung der Sicken mittels FEM

Die theoretisch große Vielfalt an Sickenbildern wird durch den Einsatzzweck, den Bauraum eines rotierenden Blechmessers und das dafür vorgesehenen Herstellungsverfahren begrenzt.

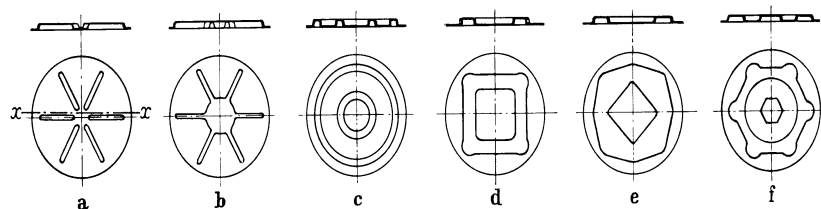


Bild 32: Sickenbilder nach /Oeh72/
Steifigkeit von links nach rechts zunehmend

Bild 32 zeigt Vorschläge für das Versicken kreisförmiger Bleche nach /Oeh72/. Die Steifigkeit nimmt von links nach rechts zu. Dabei handelt es sich um konventionelle Sickenbilder. Die Steifigkeit dieser Sickenbilder wurde experimentell ermittelt. Das Sickenbild 32 b ist in unserem Fall durch die zur Verfügung stehenden Gestaltungsfläche nicht nutzbar. Der Nabenbereich und der Schneidenbereich des Slicermessers müssen frei von Sicken bleiben. Die Sickenbilder 32 c und 32 f zeigen umlaufende Ringsicken. Diese Lösungen kommen aus bereits erwähnten patentrechtlichen Bestimmungen in diesem Fall nicht zum Einsatz. Die Sickenbilder 32 d und 32 e zeigen eine ungleichmäßige rotationssymmetrische Massenverteilung.

Diese ungleichmäßige Massenverteilung führt zu ungleichmäßiger axialer Auslenkung. Es sollten nur annähernd rotationssymmetrische Sickenbilder verwendet werden. Streng genommen handelt es sich bei den Bildern 32 d und 32 e auch um Ringsicken.

Die Auslegung der Sicken wie im Sickenbild 32 a stellt einen möglichen nutzbaren Weg zur Versteifung des Slicermessers dar. Das Bild 32 a zeigt rotationssymmetrisch aufgebraachte Einzelsicken. Beim Aufbringen von mehreren, zu einander versetzten Ringmustern ist eine Verringerung der Verformungen des Außenrands möglich. Allerdings bewirken rotationssymmetrisch aufgebraachte Einzelsicken eine ungleichförmige radiale Verformung des Außenrands. Die Unterschiede sind um so größer, je größer der Abstand / Zwischenraum der Sicken zueinander ist. Zweckmäßig sind also möglichst wenige, große Sicken mit geringem Abstand zueinander. Anders verhält es sich bei der Versteifungswirkung der Sicken gegen die Auffederung. Die Erhöhung der in diesem Fall wirkenden Biegesteifigkeit geht einher mit einer Vergrößerung der Sickenlänge in radialer Richtung. Die Vergrößerung der Flankensteilheit und Sickenhöhe wirkt zusätzlich erhöhend auf die Biegesteifigkeit.

Ein großer Einflussfaktor in unserem konkreten Fall sind jedoch die Grenzen, die das gewählte Fertigungsverfahren setzt. Die Umformung von dicken Blechen erfordert relativ große Werkzeugradialen und Flankenwinkel, um das Umformvermögen des Werkstoffs nicht zu überschreiten.

Bild 32 f zeigt, dass die umlaufende radiale Sicke die größte Steifigkeit hat. Ein Weg diesen Vorteil zu nutzen, könnte sein, den Auslauf der Einzelsicken zu krümmen, um so das Sickenbild der umlaufenden radialen Sicke anzunähern ohne die patentrechtlichen Bestimmungen zu verletzen.

Aus genannten Gründen wurden für diese Arbeit nur zwei Sickenbilder festgelegt, die einerseits den Forderungen nach hoher Formstabilität und Biegesteifigkeit gerecht werden und andererseits die technologischen Bedingungen des Umformprozesses berücksichtigen.

Die erste Variante ist eine rechteckige Sicke mit gekrümmtem Auslauf in radialer Ausrichtung und kreisförmiger Anordnung (Bild 33), die zweite Variante ist eine gerade Sicke in gleicher Anordnung (Bild 34). Die Auslegung des Sickenbildes zur Versteifung der Scheibe des Blechmessers erfolgte hierbei mit der Methode von Herrmann „systematisches Anordnen der Aussteifungen im Blech“ /Her97/. Die zugrunde liegende Konstruktionsmethode beinhaltet keine konkreten

Gestaltungsregeln /Emm04/. Auf diese Weise wurde das kegelförmige Blech im Gestaltungsbereich (Bild 29) mit den oben beschriebenen Sickenbildern (radial gerade, radial gekrümmt) versehen. Die ausgewählten Varianten wurden modelliert. Die CAD-Modelle wurden vernetzt und eine statische Analyse mittels FEM durchgeführt. Dabei wurden die Modelle durch Zentrifugalkraft und Flächenlast belastet.

Die Simulationsergebnisse wurden überprüft und beide Varianten manuell optimiert, bis alle Anforderungen erfüllt waren.



Bild 33: Variante 1-gekrümmter Auslauf



Bild 34: Variante 2-gerader Auslauf

Zur Optimierung können die folgenden Optimierungsparameter, die Einflüsse sowohl auf die Eigenschaften des versickten Blechs als auch auf die Herstellbarkeit haben, variiert werden:

1. Sickentiefe

Die Sickentiefe hat einen alles überragenden Einfluss auf die Versteifungswirkung. Das Trägheitsmoment steigt mit der 3. Potenz der Sickenhöhe.

Die maximale zulässige Sickentiefe in dem Gestaltungsbereich des Messers ist durch die Konturgrenze beschränkt. Bei der Konstruktion der Messer wurde die maximale mögliche Sickentiefe, die der Gestaltungsbereich zulässt, ausgenutzt.

2. Blechstärke

Die Blechstärke hat nach der Sickentiefe den größten Einfluss auf die Versteifungswirkung.

Die Blechstärke wurde variiert bis das gewünschte Gewicht erreicht war. Die Dicke des konstruierten Messers bei einem Gewicht von ca. 5250 ± 50 g beträgt 4,8 mm.

3. Sickenbreite

Die Gestaltungsregel lautet: Bleche mit mehreren parallelen schmalen Sicken weisen eine höhere Bodensteifigkeit als Bleche mit einer einzelnen breiten Sicke auf /Sch03/.

Die Sicken der Messer sind mit 20 mm Breite konstruiert.

4. Werkzeugsradius

Die durch Umformung erreichbare Sickenhöhe wird nur wenig von der Sickenanordnung beeinflusst. Der Einfluss der Werkzeugradien ist deutlich größer. Die größte erreichbare Sickentiefe bei der Herstellung nimmt mit dem wachsendem Stempelradius und wachsendem Ziehkantenradius zu /Wid85/. Vorteilhaft ist es, die Stempel- und Matrizenradien möglichst groß zu gestalten.

Als Stempel- und Ziehkantenradius wurde für alle Sicken $r = 10$ mm ausgewählt.

5. Anzahl der Sicken

Die Anzahl der Sicken ergibt sich aus den gewünschten Forderungen wie Formstabilität, Biegesteifigkeit, und Gewicht. Tabelle 6 zeigt, die erforderlichen Eigenschaften der Varianten 1 und 2 in Abhängigkeit von der Sickenanzahl. Die Ergebnisse zeigen, dass die Biegesteifigkeit für beide Varianten mit zunehmender Sickenanzahl ansteigt. Gleichzeitig steigen aber auch die auftretenden Spannungen und das Gewicht. Aus diesen Ergebnissen und im Vergleich zum herkömmlichen Slicermesser wurde für die Variante 1 die maximale Sickenanzahl 6 und für die Variante 2 die maximale Sickenanzahl 8 bestimmt. Bei einer höheren Sickenanzahl wird das Gewicht für beide Varianten größer als das zulässige Gewicht.

Tabelle 6: Simulationsergebnisse der Varianten 1 und 2 in Abhängigkeit von der Sickenanzahl:

	Variante 1: radial gekrümmt		
Sickenanzahl	7	6	5
Vergleichsspannung bei 5600 min ⁻¹ [N/mm ²]	173	166,8	163,7
Auslenkung bei 5600 min ⁻¹ [mm]	0,56	0,62	0,73
Gewicht [Kg]	5,302	5,27	5,24
	Variante 2: radial gerade		
Anzahl	9	8	7
Vergleichsspannung bei 5600 min ⁻¹ [N/mm ²]	153,6	144	141,2
Auslenkung bei 5600 min ⁻¹ [mm]	0,723	0,744	0,79
Gewicht [Kg]	5,28	5,26	5,24

6. Flankenwinkel

Der Flankenwinkel beeinflusst die mechanische Eigenschaften des versickten Bleches auf verschiedene Art. Flache Flankenwinkel begünstigen die Schubsteifigkeit des Bleches, steile Winkel hingegen die Bodensteifigkeit. Da die Sickenbleche durch Tiefziehen hergestellt werden sollen, muss der Flankenwinkel

kleiner als 90° sein, um die Entformbarkeit des Bauteils zu gewährleisten. Zudem steigt mit zunehmendem Flankenwinkel in der Regel der lokale Umformgrad, was zu Rissen führen kann /Sch02/.

Bei flachen Sicken in dicken Blechen ist der Einfluss der Flankenwinkelgröße auf die Biegesteifigkeit in der Regel begrenzt, da der gerade Anteil der Sickenflanke und damit auch dessen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften, sehr klein wird. Der Flankenwinkel wurde für alle Sicken auf 60° festgelegt.

Die beiden Varianten werden modelliert und berechnet. Nach der Auswertung der Simulationsergebnisse wird eine Variante praktisch realisiert.

4.6 Konstruktive Auslegung der Blechmesser

Die Bilder 35 und 36 zeigen die Drauf- und Seitenansicht der Blechmesser (Variante 1 (Bild 35), Variante 2 (Bild 36)). Die Draufsichten weisen ein Messer mit einem kreisförmigen Scheibenelement und einer zentralen Nabe aus. Am Umfang des Scheibenelements wird die Schneide gebildet. Zur Befestigung des Messers ist die Nabe im Zentrum mit einer Befestigungsbohrung versehen.

Auf dem Scheibenelement der Variante 1 sind sechs radiale gekrümmte von der Nabe zur Schneide verlaufende Sicken angeordnet.

Die sechs radialen gekrümmten Sicken sind identisch und mit gleichen Winkelabständen von 60° zentrisch auf dem Scheibenelement angeordnet.

Auf dem Scheibenelement der Variante 2 sind acht radiale von der Nabe zur Schneide verlaufende Sicken angeordnet.

Die acht radialen Sicken sind identisch und mit gleichen Winkelabständen von 45° zentrisch auf dem Scheibenelement angeordnet.

Es ist möglich, die Breite und Anzahl der Sicken sowie die Flankenwinkel so zu variieren, dass sich die Vergleichsspannung und Steifigkeit im Vergleich zum herkömmlich hergestellten Slicermesser nicht verschlechtern.

Die Seitenansichten zeigen, dass die Profilhöhe der Sicken in Richtung Schneide abnimmt damit das Schneidgut nicht gegen die Sicken stößt und gut abgelegt werden kann.

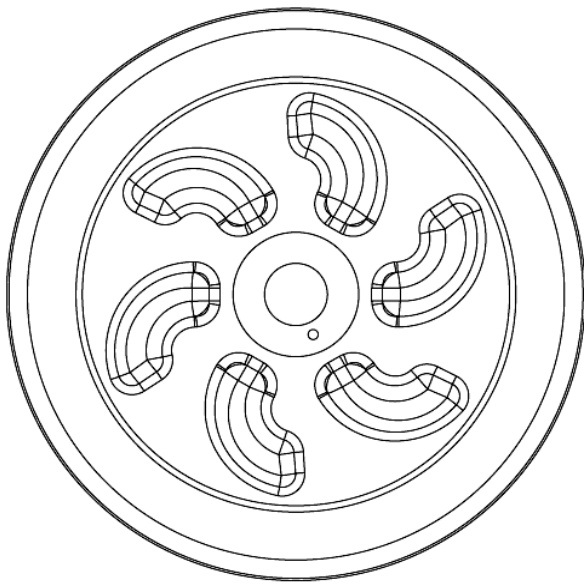


Bild 35: Zeichnung Variante 1

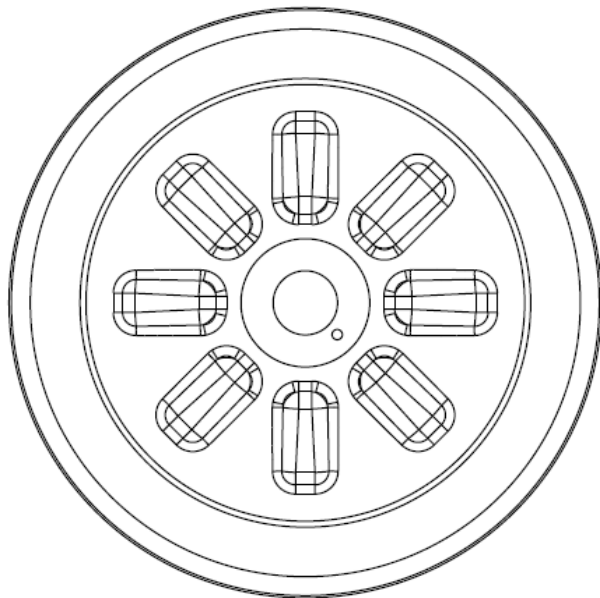


Bild 36: Zeichnung Variante 2

4.7 Analyse der Eigenschaften des konstruierten Blechmessers

Die Eigenschaften des neuen konstruierten Blechmessers wurden wie beim herkömmlichen Slicermesser berechnet.

Die Berechnung wurde in dem FEM-Programm *HyperMesh* durchgeführt.

Als Randbedingung wurde nur Rotation der Zentralbohrung um die Drehachse definiert. Alle anderen Freiheitsgrade wurden fixiert. Ausgewertet wurden die Auslenkung und die Vergleichsspannung.

4.7.1 Berechnung der Auslenkung durch Flächenlast

Als Flächenlast wurde die axial wirkende Kraft mit 40 bis 300 N definiert. Die Berechnung der maximalen Auslenkung durch die Flächenlast ergab dabei folgenden Verlauf (Bild 37). Die Ergebnisse zeigen, dass die Auslenkung bei Variante 1 geringfügig kleiner ist.

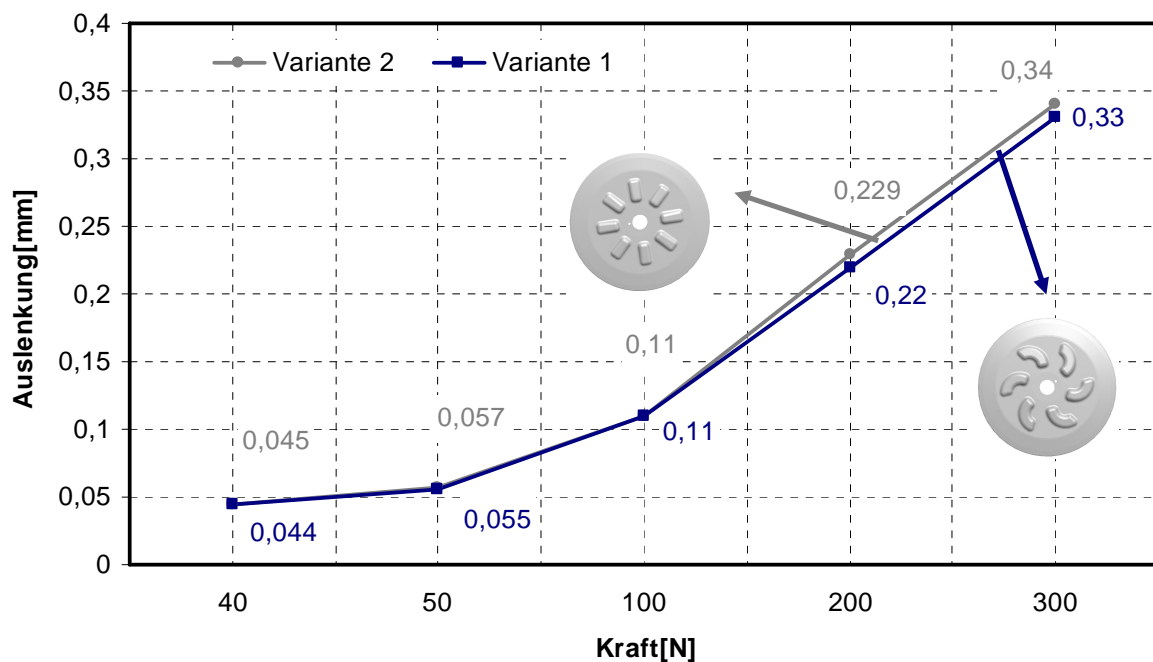


Bild 37: Auslenkung der Varianten 1, 2 durch Flächenlast

4.7.2 Berechnung der Auslenkung und der Vergleichsspannung durch Fliehkraft

Als Last wurde eine Zentrifugallast für alle Elemente definiert. Die Drehzahl für Zentrifugallast wurde mit 5600 min^{-1} definiert.

Variante 1

Die maximale Vergleichsspannung bei Variante 1 bei 5600 min^{-1} beträgt $166,8 \text{ N/mm}^2$ (Bild 38).

Mit der 0,2 %-Dehngrenze des Werkstoffes 1.2379 von $699,5 \text{ N/mm}^2$ ergibt sich für die berechnete Vergleichsspannung eine ca. 4,1-fache Sicherheit.

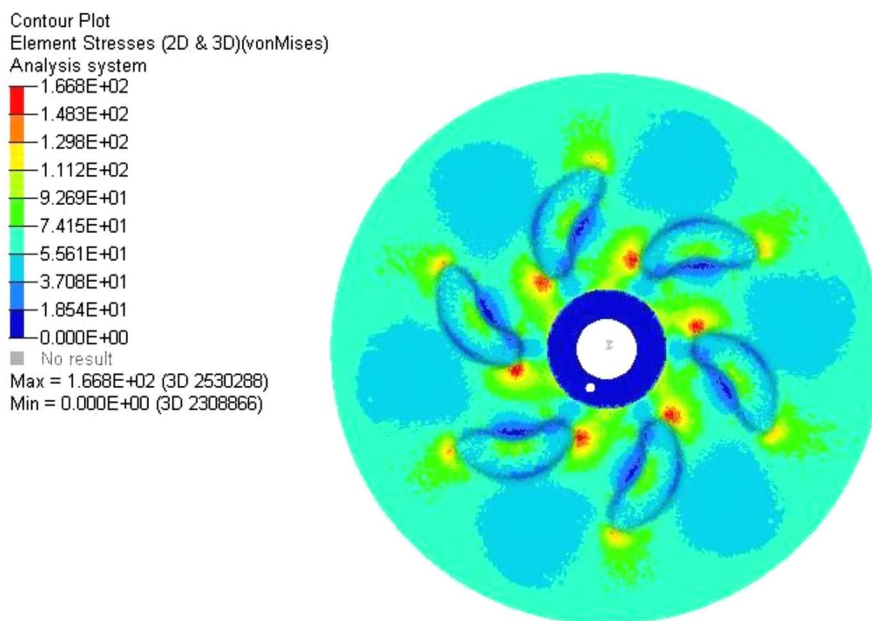


Bild 38: Vergleichsspannung der Variante 1 durch Fliehkraft bei 5600 min^{-1}

Die maximale Auslenkung bei Variante 1 durch die Fliehkraft bei 5600 min^{-1} beträgt $0,628 \text{ mm}$ (Bild 39).

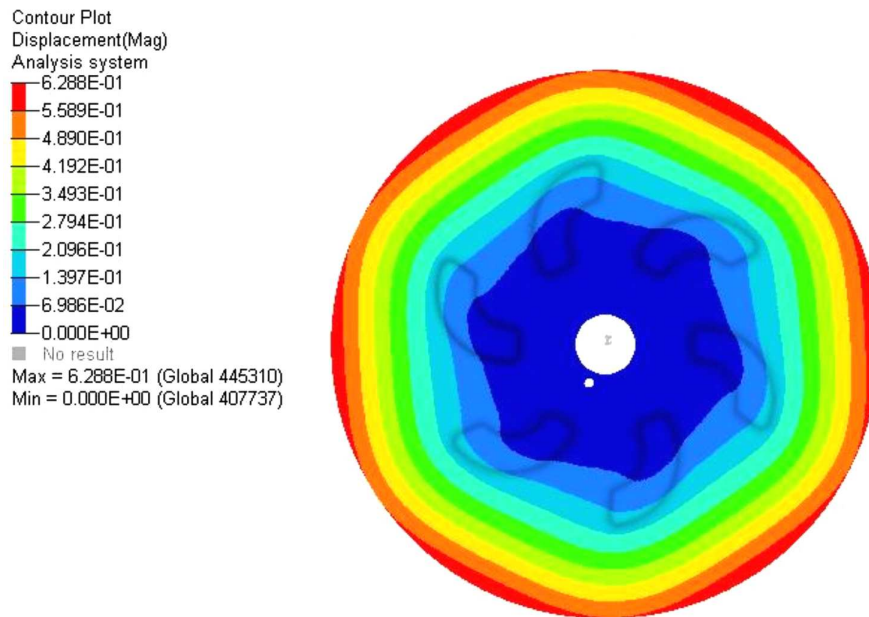


Bild 39: Auslenkung der Variante 1 durch Fliehkraft bei 5600min⁻¹

Variante 2

Die maximale Auslenkung bei Variante 2 durch die Fliehkraft bei 5600 min⁻¹ beträgt 0,744 mm (Bild 40).

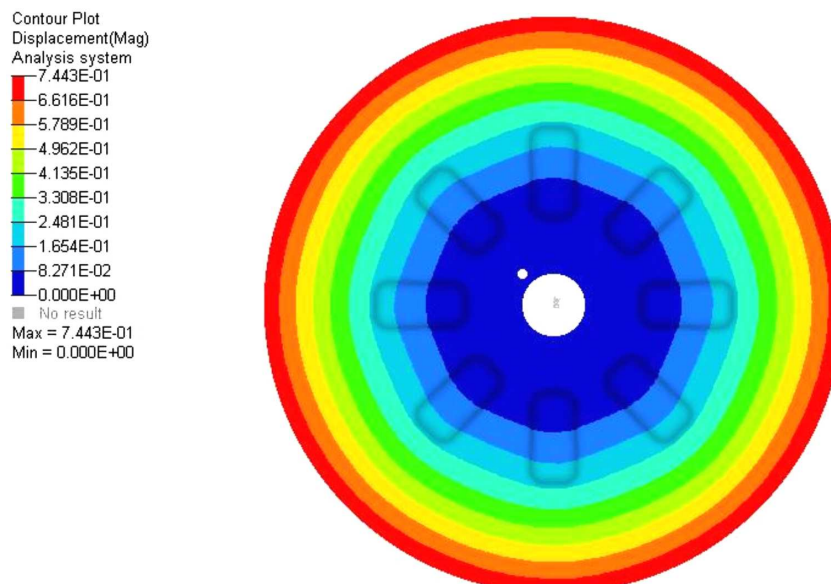


Bild 40: Auslenkung der Variante 2 durch Fliehkraft bei 5600min⁻¹

Die maximale Vergleichsspannung bei Variante 2 bei 5600 min^{-1} beträgt 144 N/mm^2 (Bild 41).

Mit der 0,2 %-Dehngrenze des Werkstoffes 1.2379 von $699,5 \text{ N/mm}^2$ ergibt sich für die errechnete Vergleichsspannung eine ca. 4,8-fache Sicherheit.

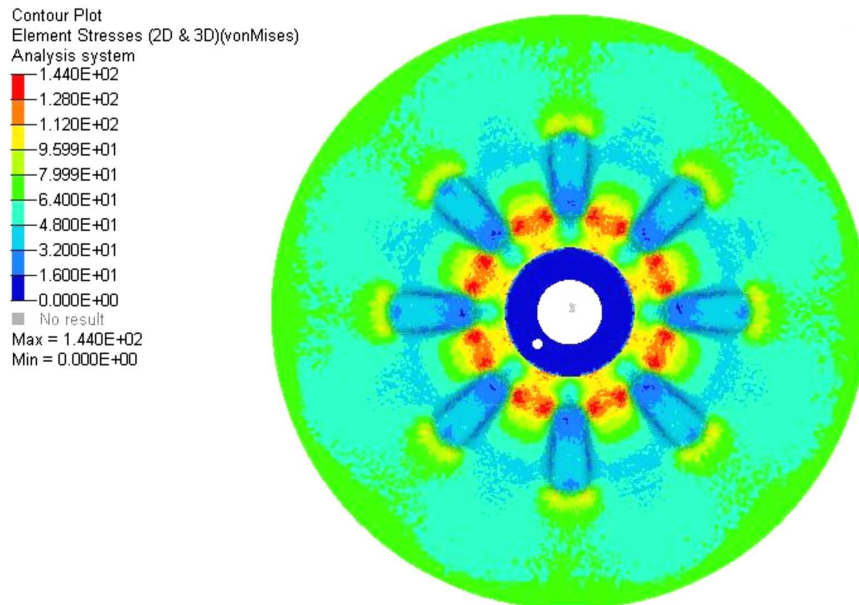


Bild 41: Vergleichsspannung der Variante 2 durch Fliehkraft bei 5600 min^{-1}

Leichtbaupotential

Zur Abschätzung des Leichtbaupotentials der beiden Sickenbilder wurden CAD-Modelle mit verschiedenen Blechstärken kleiner als $4,8 \text{ mm}$ erstellt und gerechnet. Die Ergebnisse zeigen, dass für beide Ausführungsformen die Blechdicke bis $4,2 \text{ mm}$ reduziert werden kann. Dadurch kann ein Gewichtersparnis im Vergleich zu herkömmlichen Slicermessern bei fast gleichbleibender Vergleichsspannung und besserer Steifigkeit erzielt werden. Die Reduzierung der Blechstärke unter $4,2 \text{ mm}$ bewirkt im Vergleich zum herkömmlichen Slicermesser eine größere Vergleichsspannung. Die Gewichtseinsparung bei $4,2 \text{ mm}$ Blechdicke beträgt gegenüber herkömmlich hergestellten Slicermessern ca. $12,5 \%$ (Tabelle 7).

4.8 Vergleich der berechneten Eigenschaften

Die berechneten maximalen Auslenkungen der verschiedenen Varianten von Slicermessern einschließlich eines ringförmigen versickten Messers wurden verglichen und in Bild 42 dargestellt. Die Werte zeigen, dass die maximalen gesamten Auslenkungen versickter Blechmesser (Blechdicke 4,8 mm) gegenüber dem herkömmlichen Slicermesser niedriger und außerdem sehr nah zu einander sind. Die Leichtbauvarianten 1, 2 (Blechdicke 4,2 mm) zeigen im Vergleich zu den Varianten 1, 2 (Blechdicke 4,8 mm), die das gleiche Gewicht wie herkömmliche Slicermesser (5,25 kg) besitzen, eine größere maximale Auslenkung. Die Variante 1 (Blechdicke 4,8 mm) zeigt die niedrigste gesamte maximale Auslenkung bzw. die bessere Steifigkeit. Daraus ergibt sich, dass die beste Biegesteifigkeit der Slicermesser durch die gemischte radiale-tangentiale Sickenauslegung erreicht werden kann.

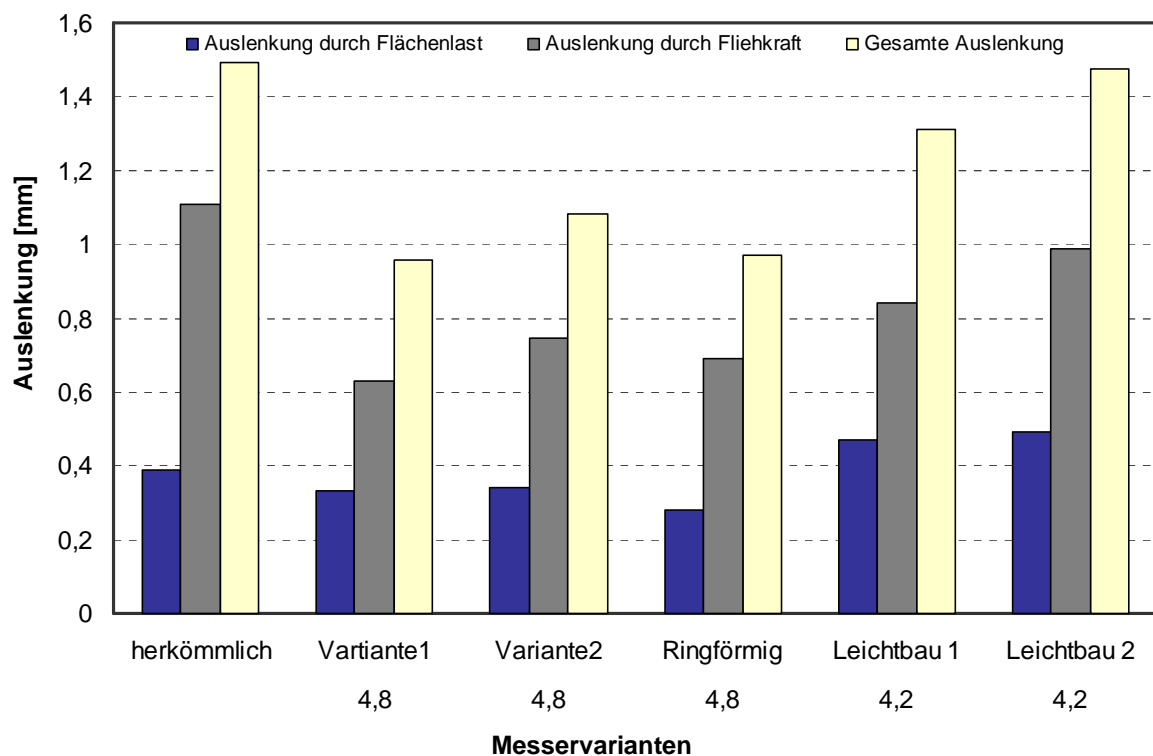


Bild 42: Auslenkung bei 5600min⁻¹

Neben der Auslenkung wurde die auftretende Vergleichsspannung bewertet. Die berechneten Werte sind in Bild 43 dargestellt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die durch Fliehkraft auftretenden maximalen Vergleichsspannungen bei den versickten Blechmessern (Blechdicke 4,8 mm) im Vergleich

zum herkömmlichen Slicermesser niedriger sind und unter der zulässigen Streckgrenze des Messerwerkstoffs liegen. Die Vergleichsspannung bei dem ringförmig versickten Blechmesser ist die niedrigste.

Die maximalen Vergleichsspannungen der Leichtbauvarianten 1, 2 (Blechdicke 4,2 mm) im Vergleich zu den Varianten 1, 2 (Blechdicke 4,8 mm) sind höher, aber sie liegen noch im zulässigen Bereich des Messerwerkstoffs 1.2379.

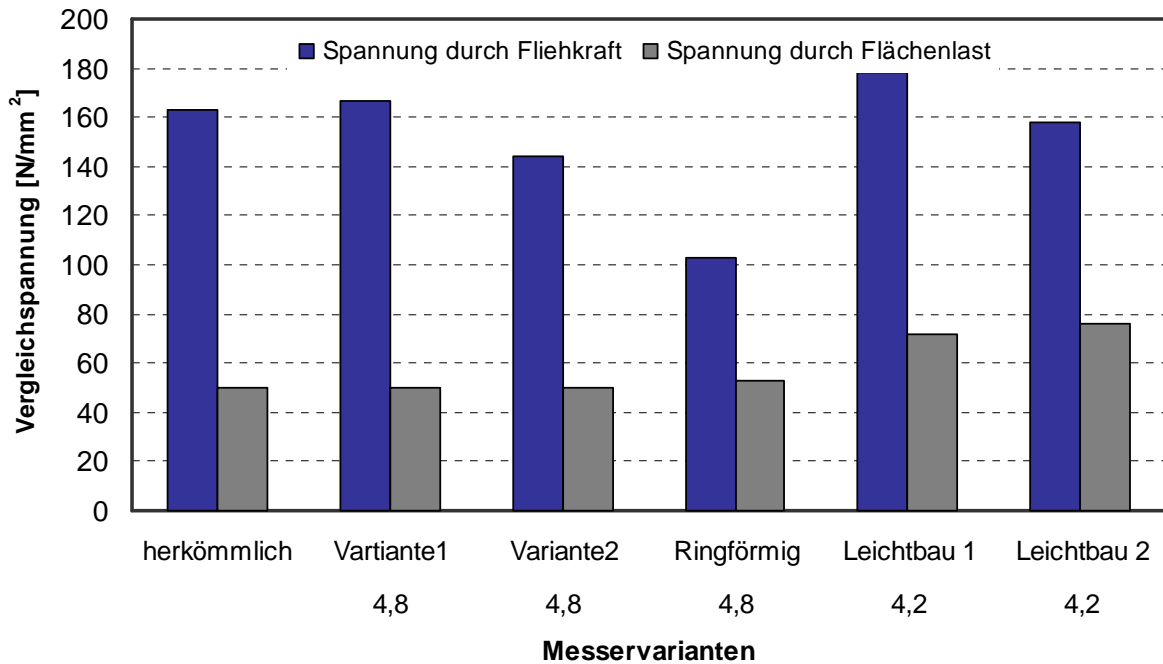








Bild 43: Vergleichsspannung bei 5600min^{-1}

Alle verglichenen Eigenschaften sind in der Tabelle 7 eingetragen. Die aufgeführten Ergebnisse zeigen, dass bei allen durch Blechumformung herstellbaren Slicermessern Verbesserungen hinsichtlich der Steifigkeit, bei gleichzeitig möglicher Reduzierung des Gewichtes möglich sind. Die Verbesserungen der Steifigkeit bei allen Blechmessern (4,8 mm) sind fast gleich. Die auftretende Vergleichsspannung beim ringförmig versickten Messer ist am günstigsten.

Da die tangentielle ringförmige Auslegung patentrechtlich /Off1/ geschützt ist, war für die experimentellen Untersuchungen zwischen den Varianten 1 und 2 (Blechdicke 4,8 mm) zu entscheiden, Die Variante 2 mit der Sickenform radial gerade zeigt im Vergleich zur Variante 1 eine günstigere Vergleichsspannung und etwas niedrigere Biegesteifigkeit. Da die geringere Vergleichsspannung angestrebt wird und die Vergleichsspannung der Variante 2 im Vergleich zur Variante 1 deutlich geringer ist, führte dies zur Entscheidung, die Variante 2 praktisch zu realisieren.

Table 7: Vergleich der mechanischen Eigenschaften:

Messer	Herkömmlich	Ringförmig	Variante 1 radial gekrümmt	Variante 2 radial gerade	Leichtbau- Variante 1 gekrümmt	Leichtbau- Variante 2 gerade
Bild						
Auslenkung durch Flächenlast bei 300N [mm]	0,386 100%	0,28 72,5%	0,33 85,5%	0,34 88%	0,47 121,7%	0,49 126,9%
Auslenkung durch Fliehkraft bei 5600min ⁻¹ [mm]	1,107 100%	0,69 62,33%	0,628 56,7%	0,744 67,2	0,84 75,8%	0,987 89,1%
Vergleichs- spannung durch Flächenlast [N/mm ²]	50 100%	53 106%	50 100%	50 100%	72 144%	76 152
Vergleichs- spannung durch Fliehkraft bei 5600 min ⁻¹ [N/mm ²]	163,1 100%	103 63,15%	166,8 102,2%	144 88,2%	178 109,1%	158 96,87
Gewicht [g]	5250 100%	5242 99,84%	5275 100,4%	5266 100,3%	4600 87,6%	4590 87,4%

5 Technologiekonzepte und Fertigungsplanung

5.1 Festlegung der Fertigungsfolge

Zur Herstellung der in den Zeichnungen dargestellten Slicermesser wurde die Fertigungsstufenfolge *Tiefziehen-Schneiden-Spanen* gewählt.

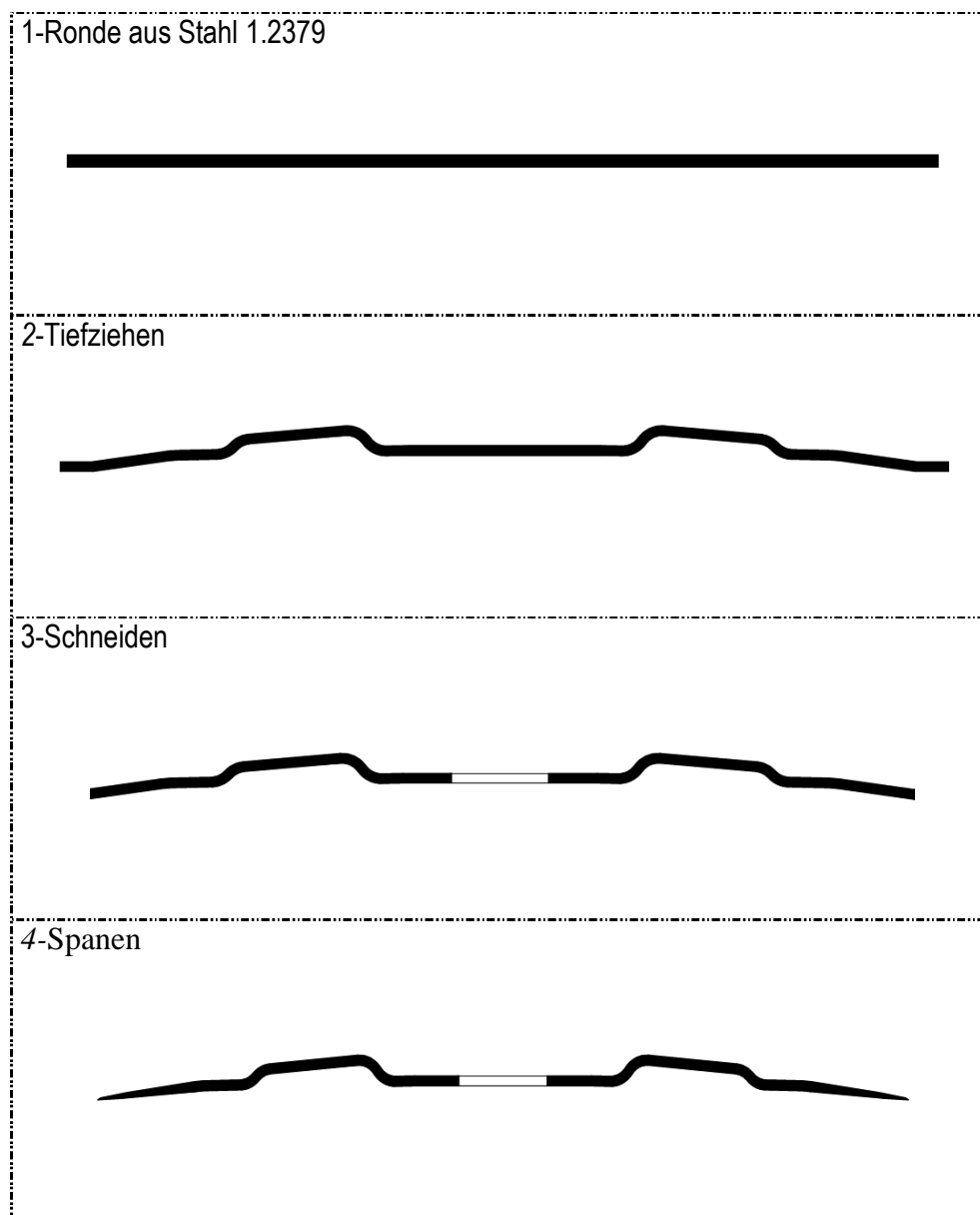


Bild 44: Fertigungsstufenfolge zur Herstellung des umgeformten Slicermessers

Bild 44 zeigt die gewählte Fertigungsfolge. Im ersten Schritt erfolgt der Zuschnitt der für die Umformung erforderlichen Blechrolle. Daran schließt sich der Umformprozess an. Dabei wird die kegelige Messerform mit dem gewünschten Sickenbild durch niederhalterloses Tiefziehen hergestellt. Als dritter Fertigungsschritt folgt ein Schneidprozess bei dem überstehendes Werkstoff des Umformprozesses abgeschnitten und eventuell die Mittelbohrung ausgeschnitten wird. Eine Kombination der Fertigungsschritte Umformen und Schneiden ist mit geeigneten Maschinen und Werkzeugen möglich (mehrachsiges Pressen, integrierte Schneidwerkzeuge). Der abschließende Fertigungsschritt ist die spanende Bearbeitung, um die Endkontur des Messers herzustellen.

Die größte Herausforderung in dieser Fertigungsfolge stellt das Tiefziehen von dicken Blechen aus Messerstahl dar. Die nachfolgenden Fertigungsschritte verursachen weniger große Schwierigkeiten, da für die Bearbeitung des Werkstoffs durch spanende Verfahren bereits hinreichende Erfahrungen vorliegen.

In der vorliegenden Arbeit wird nur der Tiefziehprozess zur Herstellung der Slicermesser untersucht.

Die Grenzen konventioneller Umformverfahren werden im Wesentlichen durch das Umformvermögen des Werkstoffs und die Verfahrensgrenzen bestimmt. Die zur Bestimmung des Umformvermögens des Werkstoffs erforderlichen Kennwerte wurden im Rahmen der Arbeit ermittelt und bewertet.

5.2 Werkstoffkennwerte und Verfahrensgrenzen

5.2.1 Versuchswerkstoff

Die herkömmlichen Slicermesser werden aus dem Werkzeugstahl Nr. 1.2379, Kurzname X153CrMoV12 hergestellt. *DIN EN ISO 4957* bezeichnet diesen Werkstoff als legiertem Kaltarbeitsstahl. Die Trennung der Werkzeugstähle von den übrigen Stählen auf Grund ihrer chemischen Zusammensetzung oder ihres Reinheitsgrades oder gar ihrer Erschmelzung ist heute nicht mehr möglich /Hei64/. Dieser Werkstoff wurde im Rahmen der Untersuchung als Versuchswerkstoff verwendet.

Der Werkstoff 1.2379 ist ledeburitischer Chromstahl (Legierungsanteil 12 %) mit folgenden wichtigen Eigenschaften:

- Sehr hoher Widerstand gegen abrasiven und adhäsiven Verschleiß durch einen hohen Volumengehalt harter Karbide im Gefüge /Gei04/
- Gute Korrosionsbeständigkeit
- Gute Zähigkeit
- Maßänderungsarm
- Hohe Druckfestigkeit
- Sekundärhärtend, daher als Grundwerkstoff für eine anschließende Nitrierung oder Beschichtung (CVD, PVD, PA-CVD) sehr gut geeignet /Doe10/.

Auf Grund dieser Eigenschaften ist der Werkstoff 1.2379 vielseitig einsetzbar z.B.:

- Umform-, Biegewerkzeuge, Maschinenmesser
- Fräser, Räumnadeln
- Kunststoffformen
- Messzeuge
- Schnitt-, Stanz-, und Schneidwerkzeuge
- Tiefzieh- und Fließpresswerkzeuge und etc /Gob06, Sch98/.

5.2.2 Chemische Zusammensetzung

Die Legierungselemente im Eisen haben wesentliche Bedeutung und nehmen in unterschiedlichem Maße Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Eisens. Durch Legieren können die Eigenschaften der Werkzeugstähle in vielfältiger Weise verändert werden. Die entweder im Eisengitter gelösten oder Sonderkarbide

bildenden Legierungselemente verändern die Härte, Festigkeit und Zähigkeit sowie den Verschleißwiderstand in unterschiedlichem Maße /Sch98/.

Der Werkstoff 1.2379 weist eine Kohlenstoffkonzentration von 1,55 %, eine Chromkonzentration von 12 %, eine Molybdänkonzentration von 0,8 % und eine Vanadiumkonzentration von 0,9 % auf (Tabelle 8) /Esc04/.

Tabelle 8: Chemische Analyse des Stahls 1.2379

Werkstoff		Richtanalyse [%]					
DE-Marke	W.- Nr.	C	Mn	Si	Cr	Mo	V
CPPU	1.2379	1,55	0,30	0,25	12,00	0,80	1

Die spezifische Wirkung der wichtigsten Legierungselemente ist wie folgt:

Kohlenstoff C: Wesentlichstes Begleitelement aller Stähle, erhöht die Festigkeit, das Härteverhalten und damit die Verschleißfestigkeit /Moe08/.

Chrom Cr: Hauptlegierungselement für nichtrostende Stähle, bildet harte Karbide und verleiht dem Stahl eine ausreichende Korrosionsbeständigkeit /Nic89/.

Molybdän Mo: Wird in den Werkzeugstählen vor allem wegen seiner die Härteverbessernden Wirkung verwendet. Als starker Sonderkarbidbildner erhöht es die Verschleißfestigkeit und die Anlassbeständigkeit /Hei64, Sch98/.

Vanadium V: Hemmt durch die schwer löslichen Sonderkarbide das Kornwachstum bei höheren Austenitisierungstemperaturen und verstärkt den Verschleißwiderstand /Sch98/. Vanadium wird den härtbaren Chromstählen zur Karbidbildung in geringen Mengen zulegiert, um den Stahl gegen Überhitzung unempfindlich zu machen /Nic89/.

5.2.3 Ausgangsgefüge

Der Werkstoff 1.2379 ist ein gut härtbarer Stahl. Der Gefügestand hängt sehr stark von der vorausgegangenen Wärmebehandlung ab.

Die Halbzeuge der Werkzeugstähle werden in der Regel im weichgeglühten Zustand geliefert. Durch das Weichglühen im Anschluss an die Warmformgebung wird ein für das Zerspanen oder Kaltumformen günstiger Gefügestand erzielt /Sch98/.

Das Weichglühen von 1.2379 erfolgt in der Regel bei Temperaturen kurz unter oder selten auch oberhalb von A_{c1} (820-850°C) /Doe10/. Zur Analyse der Gefügeänderung durch Umformung wurde das Ausgangsgefüge untersucht.

Als Halbzeug für die experimentellen Versuche wurden gewalzte weichgeglühte Bleche verwendet. Für die Gefügeuntersuchung wurde eine Probe aus dem geliefertem Blech entnommen. Die Probe wurde geschliffen, poliert, mit Ätzmittel 3 %alkoholische Salpetersäure behandelt und dann unter einem Auflichtmikroskop betrachtet. Bild 45 zeigt das Gefügebild der Probe. Der Stahl weist ein Gefüge aus Ferrit mit körnigem Zementit und primäre Chromkarbide auf. Der Werkstoff ist ein ledeburitischer Chromstahl.

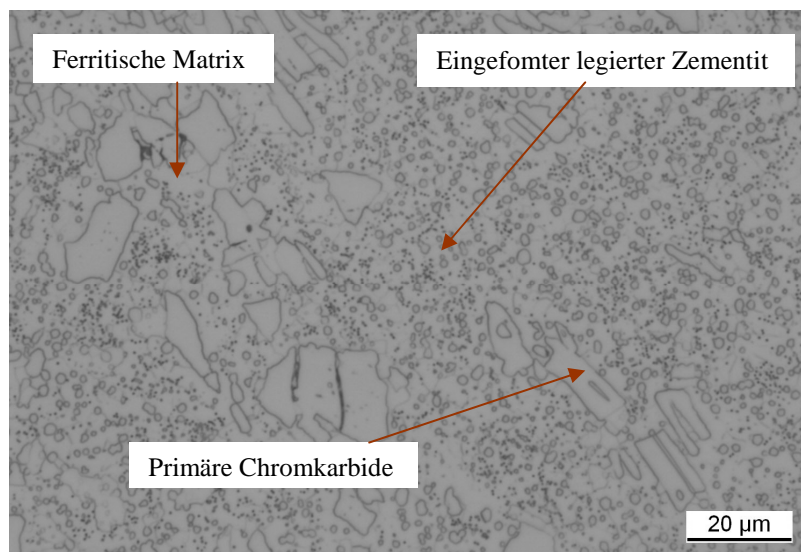


Bild 45: Weichgeglühtes Gefüge des Stahls 1.2379

5.2.4 Ermittlung von Werkstoffkennwerten

Zur Charakterisierung des Umformvermögens und zur Bestimmung der für die Simulation erforderlichen Kenngrößen und Werkstoffkennwerte sind entsprechende Versuche durchzuführen.

5.2.4.1 Zugversuch

Der Zugversuch ist ein wichtiger Versuch der mechanischen Werkstoffprüfung und stellt eine wichtige Grundlage für die Werkstoffauswahl und die Bauteilberechnung dar. Der Zugversuch ermöglicht die Ermittlung von Festigkeitswerten (Streckgrenze, Zugfestigkeit) und Verformungskennwerten (Bruchdehnung, Gleichmaßdehnung, Brucheinschnürung).



Bild 46: Universalprüfmaschine Inspekt 100 KN

Während des Versuchs wurden die Zugproben kontinuierlich durch Zugkräfte in Längsrichtung bis zum Bruch gedehnt und die Kraft an der Probe sowie die Längenänderung kontinuierlich gemessen. Aus den gemessenen Werten wurde das Spannungs-Dehnungs-Diagramm ermittelt (Bild 47). Als Zugproben wurden Rundproben nach DIN EN 10002 1-5 verwendet.

Die Versuche wurden bei Temperaturen zwischen 20 und 800 °C durchgeführt. Die Versuchsdurchführung bei Temperaturen oberhalb 800 °C war nicht möglich, da die Probenaufnehmer der Prüfmaschine nur für Temperaturen bis 800 °C geeignet sind. Die Dehnungsgeschwindigkeit ist konstant und beträgt 1 mmmin^{-1} bzw. 0.016 mms^{-1} . Als Versuchseinrichtung stand eine Universalprüfmaschine Inspekt (100 KN) mit Ofen zur Verfügung, die mit einem temperaturbeständigen Wegaufnehmer ausgerüstet war (Bild 46).

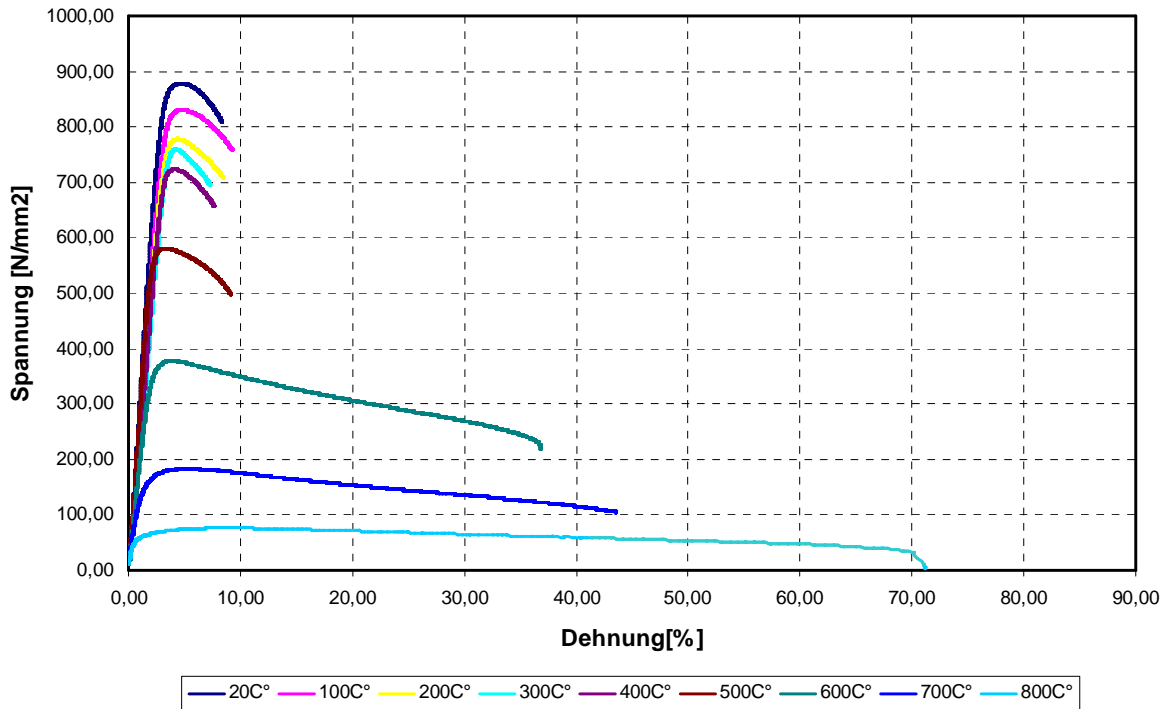


Bild 47: Spannung-Dehnungs-Diagramme des Stahls 1.2379

5.2.4.2 Streckgrenze und Zugfestigkeit

Aus den gemessenen Kraft-Verlängerungs-Werten wurden die Werte nach DIN EN 10002-1-5 für Streckgrenze und Zugfestigkeit abgeleitet. Anstelle der Streckgrenze wurde die 0,2-Dehngrenze $R_{p0.2}$ bestimmt, weil die Proben einen stetigen Übergang vom elastischen in den plastischen Bereich (keine ausgeprägte Streckgrenze) aufwiesen.

Die Zugfestigkeit R_m für alle Proben wurde als die Spannung berechnet, die sich aus der auf den ursprünglichen Querschnitt der Probe A_0 bezogenen Maximalkraft F_m ergibt.

$$R_m = \frac{F_m}{A_0} \quad (5.1)$$

Die berechneten Werte bei verschiedenen Temperaturen sind in Tabelle 9 eingetragen.

5.2.4.3 Gleichmaßdehnung und Bruchdehnung

Die Gleichmaßdehnung und Bruchdehnung wurden nach DIN EN 10002-1-5 bestimmt.

Die Gleichmaßdehnung A_g ist die auf die Anfangslänge L_0 bezogene plastische Längenänderung $L_{pm} - L_0$ bei der Beanspruchung der Zugprobe mit Höchstkraft F_m .

$$A_g = \frac{L_{pm} - L_0}{L_0} \cdot 100\% \quad (5.2)$$

Die Bruchdehnung A ist die auf die Anfangsmesslänge L_0 bezogene bleibende Längenänderung ΔL nach dem erfolgten Bruch der Zugprobe.

$$A = \frac{\Delta L}{L_0} \cdot 100\% = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100\% \quad (5.3)$$

L_u : Länge nach dem Bruch

Bei der Rechnung wurde die Messlänge $L_0 = 5 \cdot d_0$ benutzt.

Die berechneten Werte bei verschiedenen Temperaturen sind in Tabelle 9 eingetragen.

5.2.4.4 Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul E wurde als die Steigung des Graphen im Spannungs-Dehnungs-Diagramm bei einachsiger Belastung innerhalb des linearen Elastizitätsbereichs definiert. Dieser lineare Bereich wird auch als Hook'sche Gerade bezeichnet.

Der Betrag des Elastizitätsmoduls ist umso größer, je mehr Widerstand ein Werkstoff seiner Verformung entgegensetzt.

Die ermittelten Werte sind in der Tabelle 9 geschrieben.

5.2.4.5 Der Verfestigungsexponent

Der Verfestigungsexponent n ist die Steigung der Fließkurve, wenn diese in doppelt-logarithmischer Darstellung aufgetragen ist. Experimentell kann man den n -Wert nach DIN ISO 10275 durch Berechnung der Steigung der durch Zugversuch ermittelten und danach doppelt-logarithmisch aufgetragenen Fließkurve ermitteln. Nach Reihle /Rei61/ entspricht der n -Wert der logarithmischen Gleichmaßdehnung und kann aus Zugversuchswerten mit der Gleichung:

$$n = \varphi_g = \ln(1 + \varepsilon_g) \quad (5.4)$$

berechnet werden.

Je höher n -Wert ist, desto steiler verläuft die Fließkurve und der Werkstoff fließt beim Tief- und Streckziehen bevorzugt aus der Blechebene in die Umformzone, die Blechdicke ändert sich ebenfalls wenig. Das führt dazu, dass die Gefahr der Rissbildung im Blech gering ist /Kug09/.

Die berechneten Werte sind in Tabelle 9 eingetragen.

5.2.4.6 Senkrechte und ebene Anisotropie, r -Wert

Der r -Wert ist das Verhältnis der wahren Breitenformänderung zur wahren Dickenformänderung.

$$r = \frac{\ln(b/b_0)}{\ln(s/s_0)} \quad (5.5)$$

Ist der Wert des r -Werts gleich 1, liegt ein isotropes plastisches Verhalten des Werkstoffs vor, d. h. die Längenformänderung setzt sich zu gleichen Teilen in eine Breiten- und Dickenformänderung um.

Ist der Wert des r -Werts kleiner als 1, wandelt sich die Längenformänderung zum großen Teil in eine Dickenformänderung um.

Ist der Wert des r -Werts größer als 1 bedeutet das, dass der Werkstoff mehr aus der Breite als aus der Dicke fließt. Dieses Verhalten ist beim Tiefziehen von Vorteil, da

dann die Änderung der Blechdicke beim Umformen klein ist und die Gefahr der Rissbildung im Blech klein ist /Kug09/.

Die Ermittlung der senkrechten Anisotropie r erfolgte nach ISO 10113 bei 15 % Dehnung an Proben mit einer Dicke von 3 mm bei Raumtemperatur. Der r -Wert ist abhängig von der Orientierung der Flachzugprobe zur Walzrichtung. Es werden deshalb r -Werte für Proben, deren Mittelachsen 0 °, 45 ° und 90 ° zur Walzrichtung ausgerichtet waren, ermittelt und der mittlere r - Wert mit der Gleichung:

$$r_m = (r_0 + 2 \cdot r_{45} + r_{90}) / 4 \quad (5.6)$$

berechnet.

Der ermittelte Wert beträgt 0,52. Der Werkstoff ist anisotrop und für das Tiefziehen bei Raumtemperatur nur bedingt geeignet.

Table 9: Werkstoffkennwerte des Stahls 1.2379

Temperatur [C°]	20	100	200	300	400	500	600	700	800
Zugfestigkeit [MPa]	876	830	778	758	718	580	377	183	76,5
Streckgrenze [MPa]	699,5	641	600	629	627	511	315	131	52,5
Bruchdehnung [%]	5,99	6,6	5,7	4,33	5,24	7,37	34	46,19	91,09
Gleichmaßdehnung [%]	2,09	1,9	1,66	1,24	1,54	1,46	1,68	5,4	7,7
E- Modul [MPa]	210	214	214	235	224	171	96	81	69,5
Verfestigungsexponent n- Wert	0,020	0,018	0,016	0,012	0,015	0,014	0,016	0,054	0,074

5.2.5 Aufnahme der Fließkurve

Die Fließkurve ist die Fließspannung k_f aufgetragen über dem Umformgrad φ . Aus dem Spannungs-Dehnungs-Diagramm erhält man die Fließkurve, wenn die Dehnung ε in den Umformgrad φ und die Spannung in die tatsächliche Spannung oder die Fließspannung k_f umgerechnet wird /Kug09/. Die Dehnung ε wird mit der Gleichung:

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon) \quad (5.7)$$

umgerechnet.

Die Fließspannung k_f ist die Kraft bezogen auf den tatsächlichen Probenquerschnitt:

$$k_f = \frac{F}{A_1} \quad (5.8)$$

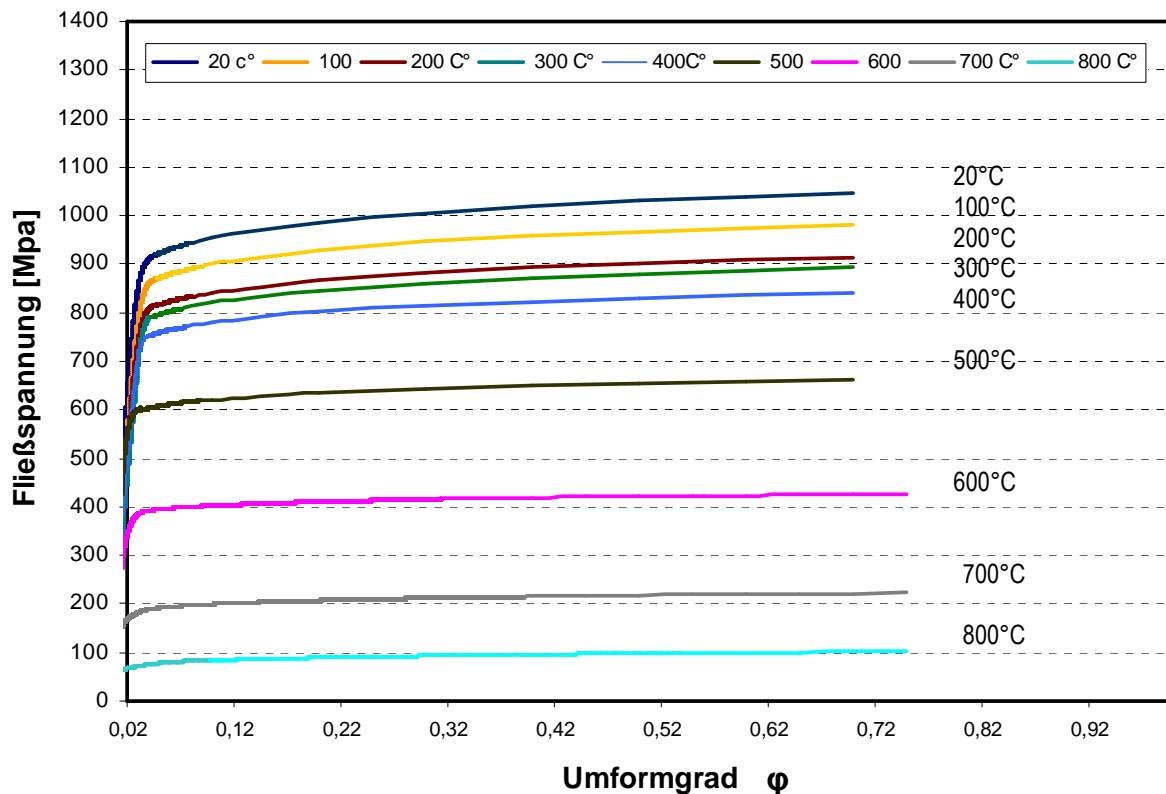


Bild 48: Fließkurve des Stahls 1.2379

Die Fließkurven wurden im einachsigen Zugversuch bis zur Gleichmaßdehnung ermittelt, Für Dehnwerte, die größer als die Gleichmaßdehnung sind, wurde die Fließkurve durch Extrapolation nach Ludwik /Lud09/ bestimmt.

$$k_f = C \cdot \varphi_g^n \quad (5.9)$$

n : Verfestigungsexponent

$$C = R_m \left(\frac{e}{n} \right)^n$$

e : Euler-Zahl

R_m : Zugfestigkeit

Die ermittelten Fließkurven bei verschiedenen Temperaturen sind im Bild 48 dargestellt.

5.2.6 Einfluss der Temperatur auf das Umformverhalten des Werkstoffes

Bild 49 zeigt die Abhängigkeit der 0,2%-Dehngrenze und der Zugfestigkeit des untersuchten Werkstoffes von der Temperatur.

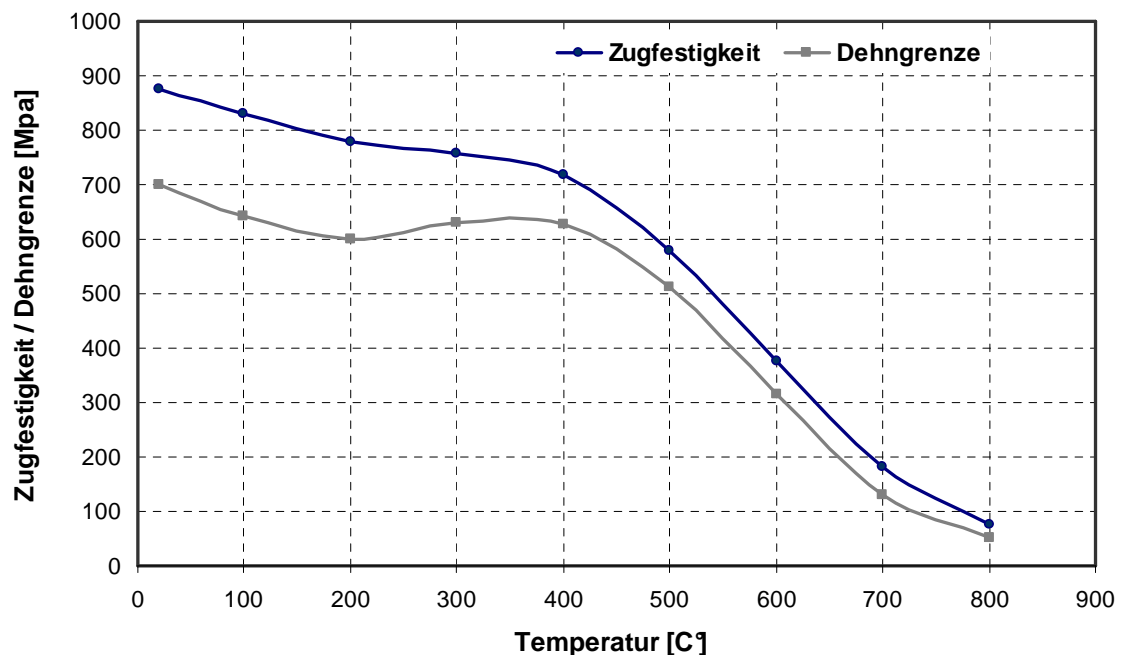


Bild 49: Abhängigkeit der 0,2%-Dehngrenze und der Zugfestigkeit von der Temperatur von 1.2379

Der Werkstoff zeigt mit zunehmender Temperatur bis 200°C einen geringen Abfall der Dehngrenze $R_{0,2p}$, danach steigen die Werte mit zunehmender Temperatur bis 300°C an. In diesem Bereich handelt es sich um Blausprödigkeit (*Alterung*).



Bild 50: gezogene Probe bei 300 C°

Zwischen 200-400 °C diffundieren die im Stahl gelösten Stickstoffatome in die Versetzungsbereiche und blockieren die Versetzungen. Der Stahl versprödet. Dies führt zu einem Anstieg der Dehngrenze bei gleichzeitiger Abnahme der Dehnfähigkeit /R₀₀₅, Dom86/.

Die blaue Anlauffarbe der Bruchfläche ist der Grund für die Bezeichnung als Blausprödigkeit /Her08/. In Bild 50 ist die blaue Farbe einer bei 300°C gezogenen Probe deutlich zu erkennen. Eine weitere Erhöhung der Temperatur bewirkt eine stetige Abnahme der Streckgrenze bis 800 °C.

Bild 51 zeigt die Abhängigkeit der Gesamtdehnung (Bruchdehnung) des untersuchten Werkstoffes von der Temperatur.

Die Gesamtdehnung (Bruchdehnung) nimmt mit wachsender Temperatur bis 200°C gering zu. In Bereich der Blausprödigkeit von 200-400°C nehmen die Werte der Bruchdehnung ab. Bei weiterer Erhöhung der Temperatur bis 800 °C steigt die Bruchdehnung stetig an.

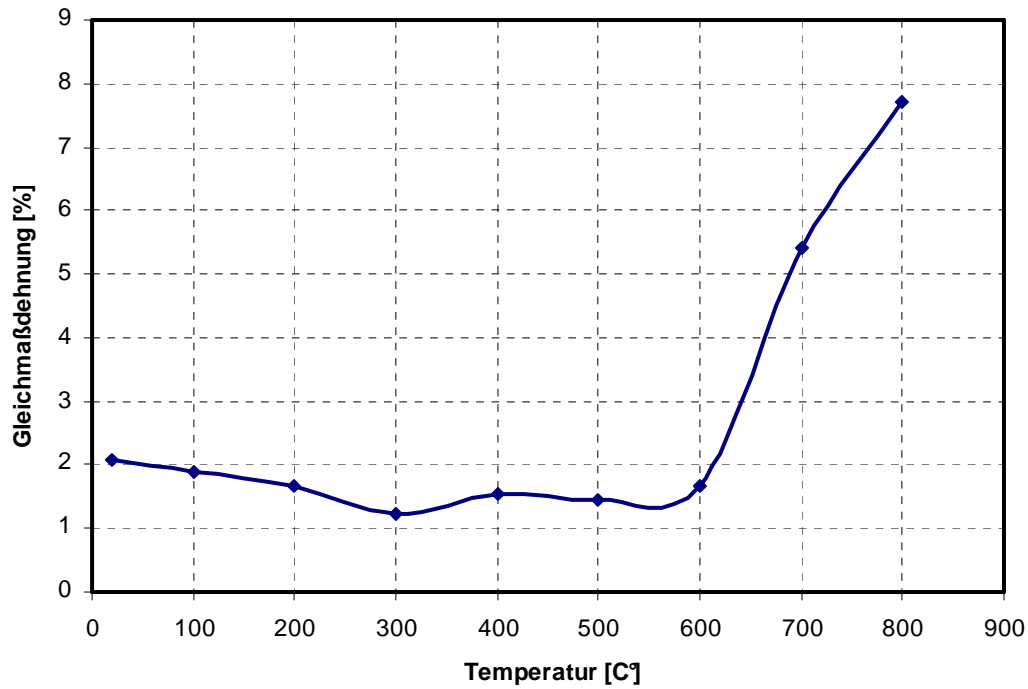


Bild 51: Abhängigkeit der Bruchdehnung von der Temperatur von 1.2379

5.2.7 Ermittlung des Grenzformänderungsschaubilds

Zum Charakterisieren des Umformverhaltens sowie der Umformgrenzen des Werkstoffes bei unterschiedlichen Beanspruchungszuständen wird das Grenzformänderungsschaubild herangezogen.

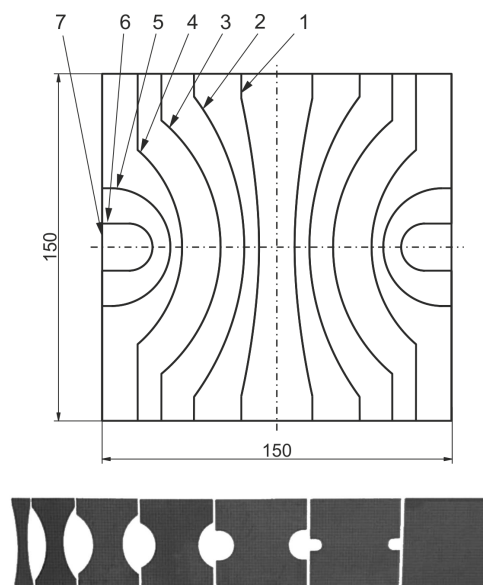


Bild 52: Probenformen für die Aufnahme der Grenzformänderungskurve

Im Grenzformänderungsschaubild ist für unterschiedliche Beanspruchungszustände das Versagen durch Einschnürung bzw. das Auftreten von Rissen dargestellt.

Zur experimentellen Ermittlung der Grenzformänderungskurve des Werkstoffs 1.2379 bei Raumtemperatur wurden Proben mit kreisförmigen, auf zwei Seiten ausgeschnittenen Platinen eingesetzt (Bild 52). Vor der Umformung wurde auf der Probenoberfläche ein kreisförmiges Raster aufgebracht.

Die Versuche wurden auf einer hydraulischen Tiefziehpresse, Typ HPDZb 500, der Fa. HYDRAP Pressen GmbH durchgeführt. Bild 53 zeigt das Versuchswerkzeug. Die Proben wurden mit einem $\varnothing 100$ halbkugelförmigen Stempel und konstanter Geschwindigkeit von 1mmmin^{-1} bis zum Bruchbeginn gezogen.

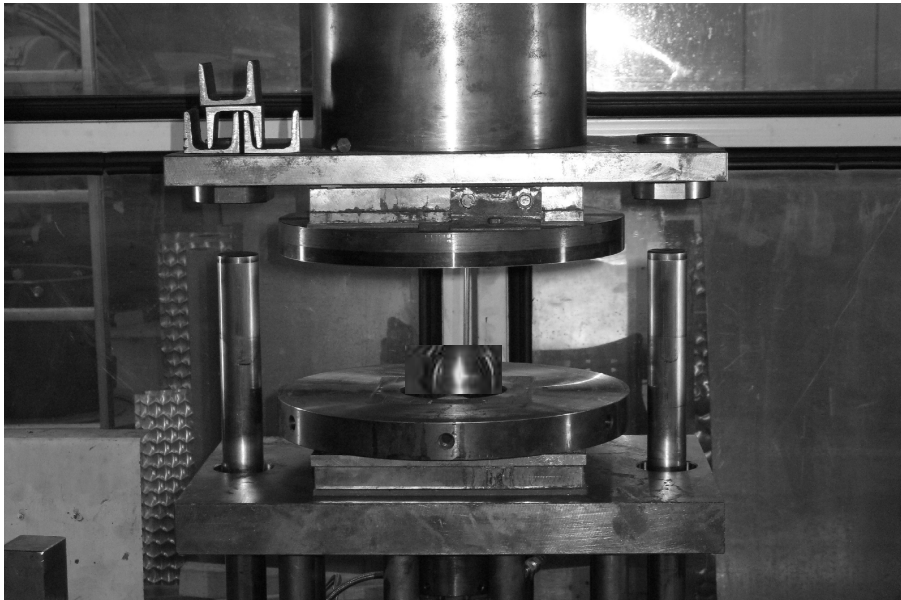


Bild 53: Versuchswerkzeug

Während der Versuche wurden die Proben durch die maximale zur Verfügung stehende Niederhalterkraft 2000 kN geklemmt. Als Schmierstoff wurde *Raziol CLF W-100 (Zibulla & Sohn GmbH)* in allen Versuchen verwendet.

Die erreichten Formänderungen beim Versagen durch Einschnürungs- und Bruchbeginn aller Probenformen wurden optisch mit Hilfe des ARGUS-Systems bestimmt. Die Formänderungen wurden in das Grenzformänderungsschaubild eingetragen und so die Grenzformänderungskurve bestimmt (Bild 54).

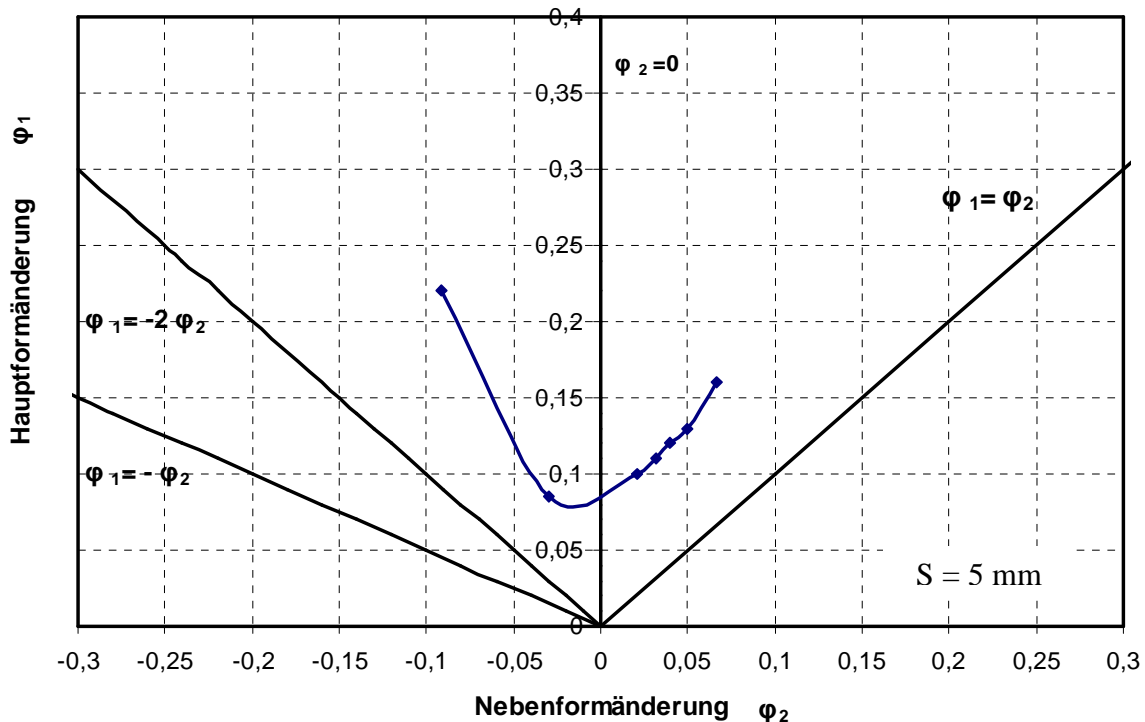


Bild 54: Grenzformänderungsschaubild des Stahls 1.2379 bei Raumtemperatur

Die Grenzformänderungskurve kann sowohl experimentell ermittelt oder anhand semi-empirischer mathematischer Modelle berechnet werden. Die Berechnungsmethode nach Keeler liefert für weiche Stahlblechgüten, wie z. B. DC06, ein hinreichendes Ergebnis im Vergleich zu experimentellen Messpunkten, jedoch bei hochfesten Stahlblechwerkstoffen sowie Aluminium-Legierungen ist der Unterschied deutlich größer /HeD09/. Das zur Durchführung der Simulation verwendete Programm *LS-DYNA* bietet eine berechnete Grenzformänderungskurve an. Die Berechnungsmethode für diese Grenzformänderungskurve basiert nach Keeler auf einer Korrelation zwischen Blechdicke und Verfestigungsexponent. In der Simulation des Fertigungsprozesses wurde bei Raumtemperatur die experimentell ermittelte Grenzformänderungskurve eingesetzt, während für höhere Temperaturen die von *LS-DYNA* angebotene berechnete Grenzformänderungskurve benutzt wurde. Eine experimentelle Ermittlung der Grenzformänderungskurve bei erhöhten Temperaturen war nicht möglich, da kein zufriedenstellendes Verfahren zur hitzebeständigen Berasterung der Proben gefunden wurde.

5.3 Simulation der Fertigungsprozesse

Die numerische Simulation ist heute zweifellos eine unerlässliche Entscheidungshilfe zum Optimieren des Ziehvorgangs. Sie bietet die Möglichkeit, sowohl Werkstück als auch Werkzeug auf ihr Verhalten während der Umformung zu überprüfen, ohne aufwendige Versuche auf einer Presse durchführen zu müssen /Dut99/. Das bedeutet, dass mit der Einführung der Prozesssimulation in den Produktentstehungsprozess von Blechformteilen bereits große Einsparungen erzielt wurden. Diese ergeben sich im Wesentlichen durch eine schnellere Entwicklung der Werkzeuge sowie eine starke Verringerung des *Trial and Error* Prozesses bei der Fertigung des Serienwerkzeugs /RoI07/.

Mit den heute eingesetzten Simulationsprogrammen lassen sich mit mehr oder weniger großer Genauigkeit, Blechdickeverteilung, Verformung, Spannung, Falten, Brüche, usw. vorausbestimmen /Dut99/. Bild 55 zeigt die Vorhersage- und Einsatzmöglichkeiten der Blechumformsimulation /RoI07, RoI02/.

Vorhersagemöglichkeiten bei der Blechumformsimulation		
Gut	Durchschnittlich	Schlecht
<ul style="list-style-type: none"> - Versagen durch Reißen - Faltenbildung im freien Umformbereich - Blechdicken- und Dehnungsverteilung - Stofffluss - Niederhalterpressung 	<ul style="list-style-type: none"> - Umformkräfte - Blecheinzug - Ausgangskontur der Platine - Spannungsverteilung - Oberflächenfehler (dehnungsbedingt) - Rückfederungsbedingte Formänderungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Oberflächenfehler (spannungsbedingt) - Faltenbildung unter Kontaktbedingungen

Bild 55: Stand der Vorhersagemöglichkeiten bei der Blechumformsimulation nach /RoI07, RoI02/

Die Simulation des Umformprozesses des Messers erfolgte mit Hilfe des am Lehrstuhl zur Verfügung stehenden FE-Programms *LS-DYNA*. Die wichtigsten Ziele sind dabei die Überprüfung der Herstellbarkeit des Blechteils, Ermittlung der Dickenänderungen und Berechnung der zur Umformung benötigten Presskraft.

5.3.1 Modellbildung

Zunächst wurde das 3D-Modell erstellt und dann mittels Import in das FE-Programm *LS-DYNA* über die IGES-Schnittstelle überführt.

In *LS-DYNA* wurde die Vernetzung durchgeführt. Als maximale Elementgröße wurde 5 mm gewählt. Danach wurde das erforderliche Werkzeug über ein Offset erzeugt.

Das für die FEM-Prozesssimulation des Tiefziehens aufgebaute Modell ist in Bild 56 dargestellt.

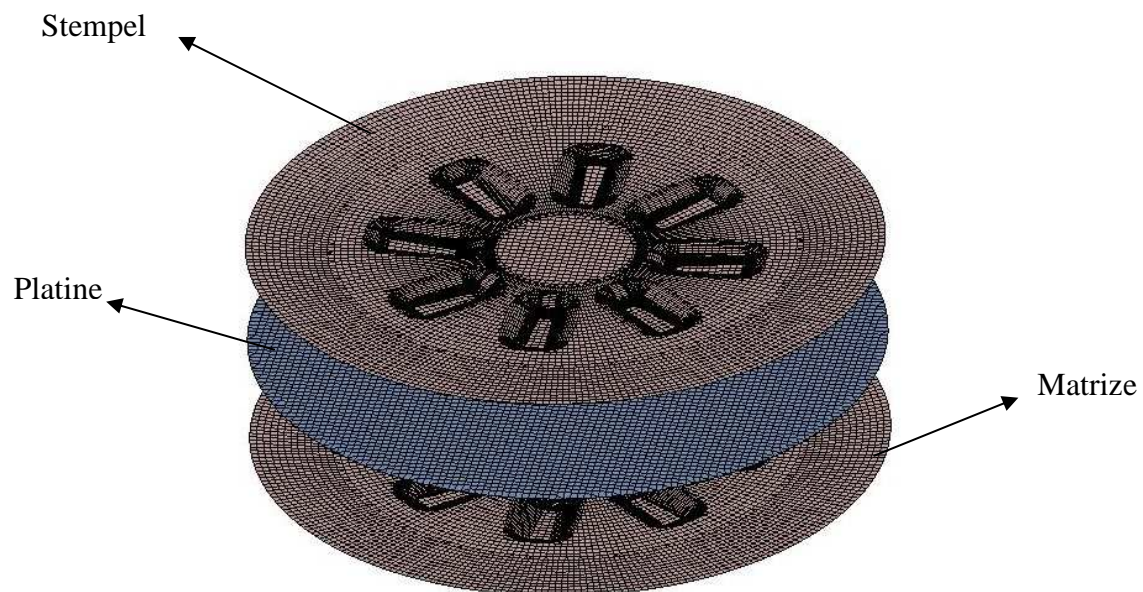


Bild 56: FEM-Tiefziehmodell

Das Modell besteht aus Stempel, Matrize und der Platine.

Bei der Modellbildung wurden folgende Vereinfachungen vorgenommen:

- Keine Berücksichtigung von Geschwindigkeitseffekten.
- Das FE-Modell beschränkt sich auf das Werkstück und die Werkzeugaktivelemente (keine thermisch-mechanischen Wechselwirkungen mit der Umgebung) /PeS96/.
- In /Ste94/ wurde die Reibungszahl bei der Blechumformung in Abhängigkeit von der Oberflächengüte des Bleches und der Gleitgeschwindigkeit ermittelt. Die Reibwerte liegen bei einer Gleitgeschwindigkeit von 25 mms^{-1} und einem R_a -Wert von 1,6 (geschlichtete Oberfläche) bei ca. 0,12. Als Reibungszahl wurde für alle Kontaktflächen deshalb der Wert 0,12 verwendet.

5.3.2 Simulationsergebnisse

5.3.2.1 Herstellbarkeit

Der Umformprozess wurde hinsichtlich der Verarbeitbarkeit des Werkstoffs mittels der Grenzformänderungskurve ausgewertet. Mit Hilfe der Grenzformänderungskurve konnten Aussagen über die Versagenswahrscheinlichkeit und den Werkstofffluss gemacht werden /Dut99/. Die Grenzformänderungskurve kann sowohl experimentell ermittelt oder anhand semi-empirischer mathematischer Modelle berechnet werden. Bei Raumtemperatur wurde hierbei die experimentell ermittelte Grenzformänderungskurve eingesetzt, während für höheren Temperaturen die von *LS-DYNA* angebotene berechnete Grenzformänderungskurve benutzt wurde.

Die Ergebnisse der Prozesssimulation sind in den Bildern 57 und 58 dargestellt. Bild 57 zeigt, dass die Umformung bei Raumtemperatur nicht möglich ist. Bessere Ergebnisse konnten durch Erhöhung der Prozesstemperatur erzielt werden. Bild 58 zeigt, dass ab einer Temperatur von 700°C die Umformung möglich ist. Das Bauteil zeigt keine Risse und keine Falten.

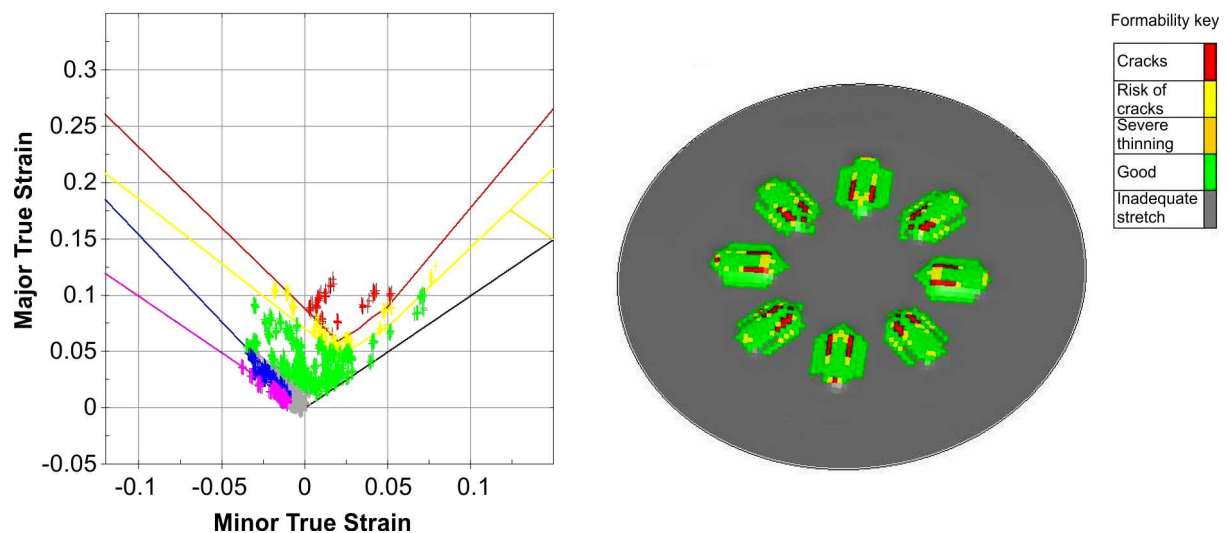


Bild 57: Herstellbarkeit bei Raumtemperatur

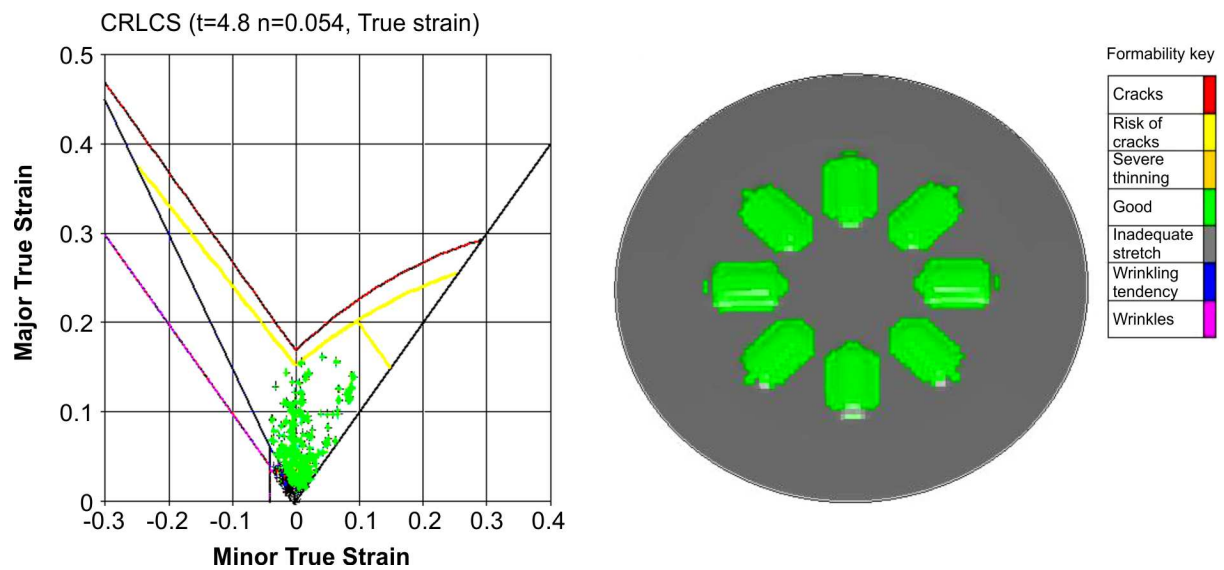


Bild 58: Herstellbarkeit bei 700° C

5.3.2.2 Presskräfte

Bilder 59 und 60 zeigen den aus der Prozesssimulation ergebnen Verlauf der Presskraft in Abhängigkeit vom Weg.

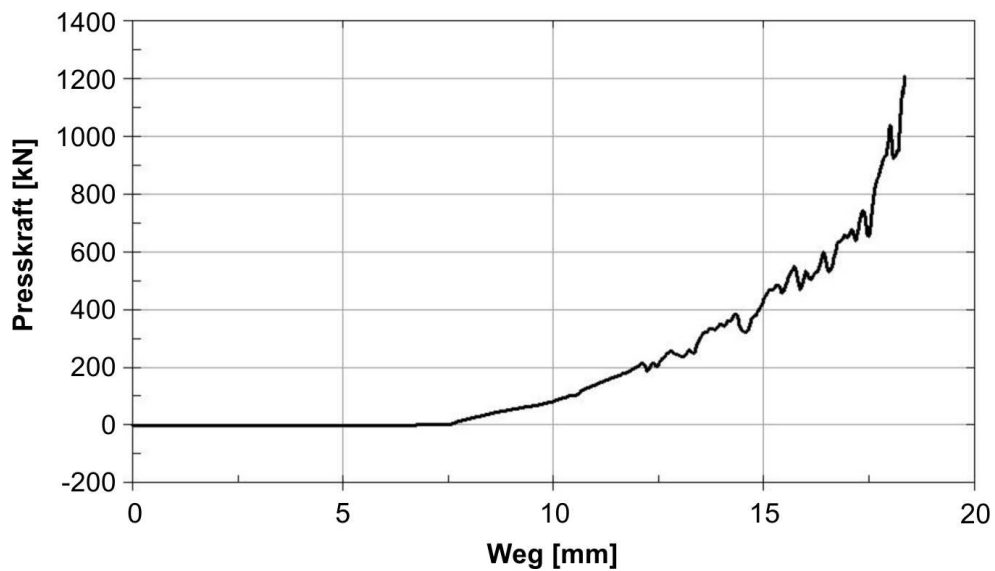


Bild 59: Verlauf der Presskraft bei 700° C

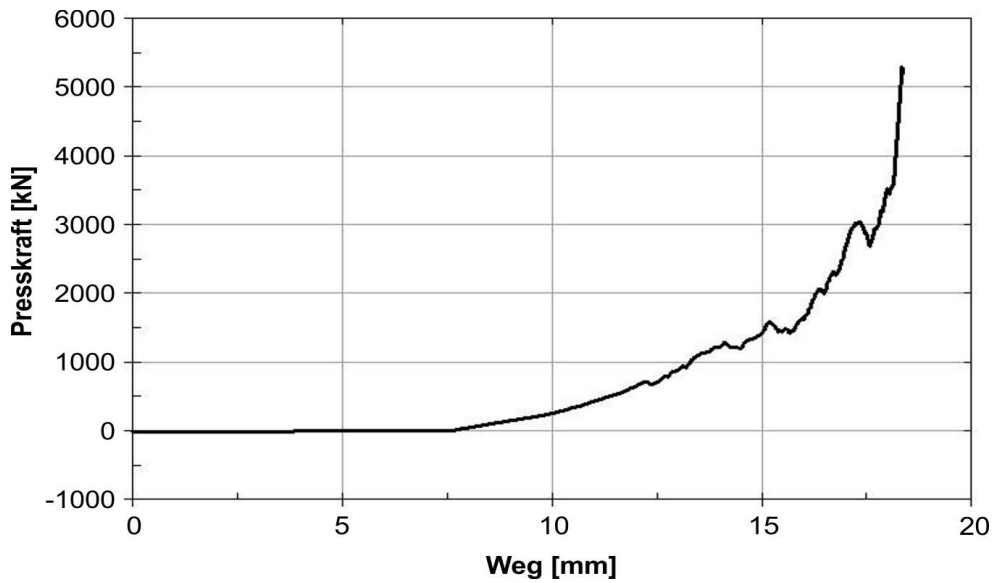


Bild 60: Verlauf der Presskraft bei 20° C

Die Presskraft steigt während des Umformprozesses bei allen Temperaturen mit zunehmendem Weg an und erreicht das Kraftmaximum am Ende des Ziehvorgangs. Die maximale erforderliche Presskraft bei 700°C beträgt ca. 1212 kN, bei Raumtemperatur ist sie mit 5316 kN ca. 4-fach höher.

5.3.2.3 Dickenänderung

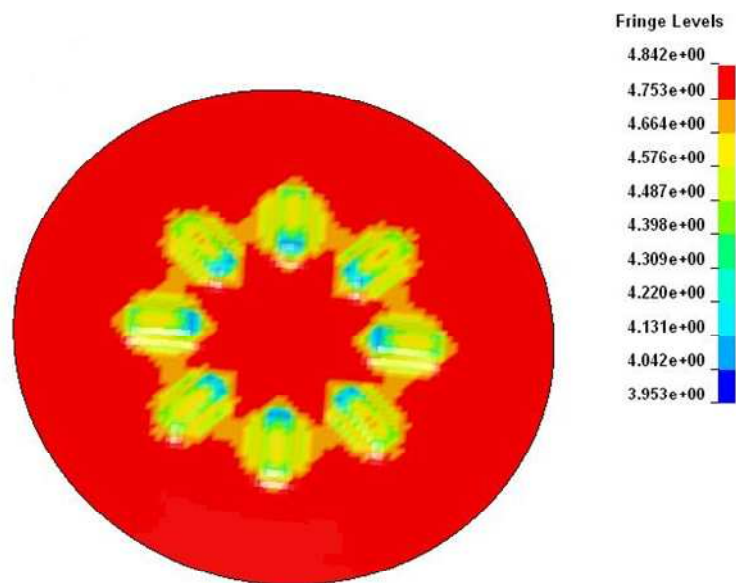


Bild 61: Dickenänderung bei 700C°

Eine starke Dickenänderung der Platine im Vergleich zum ursprünglichen Dicke kann einen guten oder einen schlechten Einfluss auf das Endprodukt haben. In den meisten Fällen will man eine kleine und homogene Dickenänderung erzielen /Opt11/. Bild 61 zeigt die rechnerischen Ergebnisse der Dickenänderung bei 700°C. Die Ergebnisse zeigen, dass der Ort der größten Blechdickenänderung, wie erwartet mit dem Ort des maximalen Umformgrads übereinstimmt. Die größte Dickenänderung beträgt ca. -20 %.

5.4 Experimentelle Untersuchungen des umgeformten Halbzeugs

Die theoretisch festgelegte Fertigungsfolge zur Herstellung des Messers wurde in Versuchen mit dem Werkstoff 1.2379 überprüft.

5.4.1 Versuchsplanung

Ziel der Versuche ist die Herstellbarkeit des Slicermessers durch Tiefziehen zu überprüfen. Da die Duktilität des Versuchswerkstoffes bei Raumtemperatur gering ist, wird die Herstellbarkeit in den folgenden Versuchen bei verschiedenen Temperaturen überprüft. Durch die Erhöhung der Temperatur im Rahmen der Umformung kann das Formänderungsvermögen positiv beeinflusst werden /Esc04/. In der Umformtechnik lässt sich zwischen Kalt- und Warmumformung unterscheiden. Nach DIN 8582 wird dabei unterschieden, ob ein Werkstück vor dem Umformen über die übliche Raumtemperatur hinaus erwärmt wird oder nicht. Getrennt davon ist zu berücksichtigen, ob sich nach dem Vorgang eine bleibende Festigkeitsänderung feststellen lässt oder während des Vorganges eine nur vorübergehende Festigkeitsänderung auftritt. Mit Hilfe dieser zwei Merkmale lassen sich die Umformverfahren in folgender Weise unterscheiden:

- a) Umformen nach Anwärmen = Warmumformung,
Umformen ohne Anwärmung = Kaltumformung,
- b) Umformen ohne Festigkeitsänderung,
Umformen mit vorübergehender Festigkeitsänderung,
Umformen mit bleibender Festigkeitsänderung /Lan84/.

In dieser Arbeit wird die folgende Einteilung nach /Esc04/ in Tabelle 10 angenommen:

Tabelle10 :Konzepte für die Umformung nach/Esc04/

Kaltumformung	ohne Vorwärmung
Halbwarmumformung	Vorwärmung ohne vollständige Gefügeumwandlung Vorwärmtemperatur < Ac_1
Warmumformung	Vorwärmung im Austenitgebiet <ul style="list-style-type: none"> - Langsame Abkühlung Glühfestigkeit - Schnelle Abkühlung Festigkeitssteigerung <li style="padding-left: 150px;">= Warmformvergüten <li style="padding-left: 150px;">= Presshärten

Im Eisen-Kohlenstoff-Diagramm liegt die Linie Ac_1 bei 1,55%C (der Beginn Alpha-Gamma-Umwandlung) bei 723°C. Die Legierungselemente im Stahl wirken sich ebenfalls auf die Umwandlungstemperaturen aus /Ger04/. Für den Werkstoff 1.2379 liegt die Linie Ac_1 höher, ca. bei 800 °C /Doe10/. Grund dafür ist die Anwesenheit von Legierungselementen wie Chrom, Silizium und Vanadium, die das Gebiet der γ -Mischkristalle verkleinern oder abschnüren und den Haltepunkt Ac_1 nach oben verschieben /Wei07/.

Die Einflüsse des Schmierstoffs und der Walzrichtung wurden in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt. Nach /Got94, Lan83/ beträgt der Einfluss des Schmierstoffes auf die erreichbare Sickenntiefe 3 % und die Walzrichtung hat praktisch keinen Einfluss.

Als Stößelgeschwindigkeit wurde bei Raumtemperatur 1 mms^{-1} festgelegt. Bei erhöhten Temperaturen wurde die maximale Stößelgeschwindigkeit der Presse von 23 mms^{-1} verwendet. Eine hohe Pressengeschwindigkeit bei Halb-Warmumformung ist vorteilhaft /Kol04/, dann kann die Umformwärme nicht schnell abgeleitet werden. Die erforderliche Vorwärmungszeit für jede Temperatur wurde experimentell ermittelt. Zu diesem Zweck wurde die Ronde mit einer radialen Bohrung vom Rand aus versehen. Die Bohrung befand sich etwa in der Mittelschicht der Blechdicke. Mittels eines Thermolements wurde die Temperatur kontinuierlich gemessen und der

Zeitpunkt der vollständigen Durchwärmung ermittelt. Die ermittelten Zeiten sind in Tabelle 11 eingetragen.

Tabelle 11: Versuchsplanung

Blehtemperatur (Ofentemperatur) [C°]	Stößel- geschwindigkeit [mm/sec]	Vorwärmungszeit [min]	Anmerkung
20	1mm/sec	-	kalt
200	-	-	Sprödigkeit
300	-	-	Sprödigkeit
400	-	-	Sprödigkeit
500	-	-	gefährlich
550	-	-	gefährlich
600	1- 23	15-30	Halbwarm
700	23	20	Halbwarm
850	23	10	Warm
1050	23		Warm

5.4.2 Versuchswerkzeuge und Versuchsdurchführung

Die Versuche wurden auf einer hydraulischen Tiefziehpresse, *Typ HPDZb 500*, der Fa. *HYDRAP Pressen GmbH* durchgeführt. Die maximal zur Verfügung stehende Presskraft betrug 5000 kN.

Zur Versuchsdurchführung wurde ein Versuchswerkzeug konstruiert und gefertigt. Das Versuchswerkzeug wurde in die Presse eingebaut. Bild 62 zeigt den Werkzeugaufbau. Das Versuchswerkzeug besteht aus Matrize und Stempel. Auf einen Niederhalter wurde verzichtet, da beim Tiefziehen dicker Bleche auf diesen verzichtet werden kann /Hes95, Dre72, Zie72/.

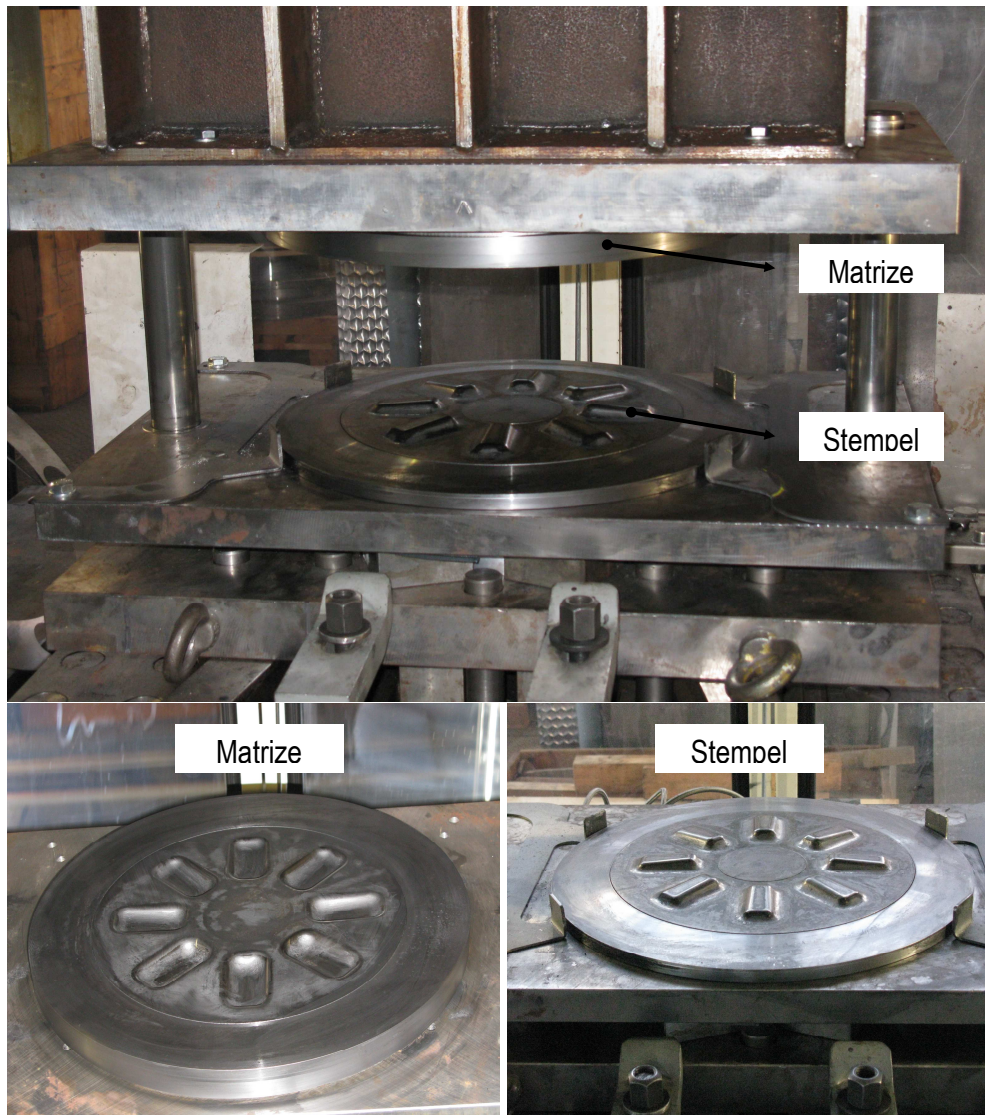


Bild 62: Versuchswerkzeug

Die Werkzeugteile sind aus dem Werkzeugstahl 1.2379 hergestellt und wurden während der Versuche nicht temperiert und nicht isoliert. Der Einsatz eines gekühlten Stempels beim Warmtiefziehen wäre vorteilhaft. Durch den Einsatz eines gekühlten Stempels beim Warmtiefziehen lassen sich die Umformkräfte durch die Verfestigung gut über die Bauteilzarge in den Flanschbereich übertragen und damit höhere Ziehtiefen und Grenzziehverhältnisse erreichen [Vie05, Deo00, Nn77].

In diesem Fall weist das Ziehteil keinen ausgeprägten Zargenbereich auf. Allerdings kann man die Sickenflanken als Zargen betrachten. Die Blechrunde hat eine Dicke von 4,8 mm. Die Blechrunde wird mit Hilfe von Einlegeschaablonen und einer Zentrierbohrung im Werkzeug positioniert.

Während der Umformung wurden der Stempel und die Matrize geschmiert. Als Schmierstoff bei Raumtemperatur als auch bei erhöhten Temperaturen wurde der Schmierstoff Grafit (*Hydrokollag 300A/ Acheson Industries*) verwendet. Der grafithaltige Schmierstoff hat sich bereits bei Tiefziehen bei erhöhten Temperaturen als sehr geeignet erwiesen /Dro99, Hal02/.

Kriterium für den Nachweis der Herstellbarkeit war, mindestens 2 Proben ohne erkennbare Einschnürungen oder Risse umzuformen.

5.4.2.1 Kaltumformung

Die Kaltumformung erfolgte bei Raumtemperatur ohne Vorwärmung. Die experimentellen Ergebnisse bestätigten die Ergebnisse der Simulation und zeigten, dass eine Umformung bei Raumtemperatur nicht möglich ist. Das Ziehteil weist erkennbare Risse im Bereich der Sickenkanten auf (Bild 63).



Bild 63: Umgeformte Probe bei Raumtemperatur

5.4.2.2 Halbwarmumformung

Bei der Halbwarmumformung werden die Blechproben auf eine Temperatur unterhalb der A_{c1} -Linie (800 °C) vorgewärmt. Die Umformversuche wurden bei den Temperaturen 600 und 700°C (Ofentemperatur) durchgeführt.



Bild 64: umgeformte Probe bei 600 C° und 23 mmS⁻¹

Im Temperaturbereich um 300 °C ist im Allgemeinen keine Umformung möglich. Es handelt sich um den Bereich der Blaubruchsprödigkeit. Bei 550°C besteht die Gefahr, dass durch Abkühlung im Werkzeug die Temperatur der Blaubruchzone erreicht wird /Lan08/. Die Stößelgeschwindigkeit wurde auf 23 mms⁻¹ eingestellt.



Bild 65: umgeformte Probe bei 600° C und 1mmS⁻¹

Bild 64 zeigt, dass die Umformbarkeit bei 600°C nicht möglich. Die Probe versagte durch Risse im Bereich der Sickenkanten. Ursache könnte die noch nicht ausreichende Fließspannungssenkung sein.

Zur Beurteilung des Einflusses der Umformgeschwindigkeit auf die Herstellbarkeit wurde zum Vergleich eine Probe bei 600°C mit einer Umformgeschwindigkeit von 1 mms^{-1} umgeformt (Bild 65).



Bild 66: umgeformte Probe bei 700°C

Die Ergebnisse zeigen größere Risse. Die Ursache dafür ist sehr wahrscheinlich die längere Kontaktzeit zwischen Probe und kaltem Werkzeug. Die damit verbundenen Abkühlung führt zu einem Anstieg der Fließspannung.

Bild 66 zeigt das bei 700°C gezogene Teil. Das Teil weist keine Risse und Falten auf. Allerdings verzog sich die Probe nach der Kraftentlassung. Sie nahm die im Bild 67 gezeigte gekrümmte Form an (Welligkeit). Diese große Formabweichung würde die Herstellung der geforderten Messerwinkel unmöglich machen. Ursachen sind möglicherweise eine Entfestigung durch Erwärmung, Textureinflüsse und Rückfederung. Die elastische Rückfederung tritt bei Umformverfahren zusätzlich zu der gewünschten bleibenden Verformung auf. Die elastische Rückfederung ist normalerweise im Verhältnis zu der gewünschten plastischen Formänderung gering, muss aber berücksichtigt werden /Lan90/. Diese Rückfederung bewirkt bei den Messern eine Abweichung von der angestrebten Form.

Die Rückfederung ist abhängig vom verwendeten Werkstoff (vor allem Härte, Streckgrenze und Blechdicke), dem Biegeradius und der Walzrichtung./Heh11/.



Bild 67: umgeformte Probe bei 700° C, Abkühlung an Luft



Bild 68: umgeformte Probe bei 700° C, Abkühlung im geschlossenen Werkzeug

Der Effekt der elastischen Formabweichung lässt sich jedoch minimieren. Zur Verminderung des Verzugs des Ziehteils wurde die Probe anschließend mit deutlich verlängerter Haltezeit umgeformt. D.h., die Beaufschlagung durch die Presskraft wurde nach dem Erreichen der Ziehtiefe aufrecht erhalten. Die Ergebnisse zeigen, dass der Verzug deutlich kleiner geworden ist (Bild 68).

5.4.2.3 Warmumformung

Bei der Warmumformung werden die Blechproben im Austenitgebiet auf Temperaturen oberhalb der A_{c1} -Linie (800°C) vorgewärmt.

Die Umformversuche wurden bei den Temperaturen 850 und 1050°C Ofentemperatur durchgeführt. Bei 850 °C ist noch keine vollständige Umwandlung in Austenit erfolgt.

Die Stößelgeschwindigkeit wurde auf 23 mm s^{-1} eingestellt.



Bild 69: umgeformte Probe bei 850° C, Abkühlung an Luft



Bild 70: umgeformte Probe bei 850° C, Abkühlung im geschlossenen Werkzeug

Bild 69 zeigt eine bei 850°C umgeformte Probe. Das Teil weist keine Risse und Falten auf. Allerdings verzog sich die Probe nach der Kraftentlassung. Sie nahm die im Bild 69 gezeigte gekrümmte Form an (Welligkeit). Diese große Formabweichung würde die Herstellung der geforderten Messerwinkel unmöglich machen. Ursachen sind auch hier möglicherweise eine Entfestigung durch Erwärmung, Textureinflüsse und Rückfederung. Der Versuch bei 850°C° wurde bei verlängerter Haltezeit wiederholt. Die Ergebnisse zeigen, dass der Verzug nicht mehr sichtbar ist (Bild 70). Bild 71 zeigt eine bei 1050°C umgeformte Probe. Nach dem ZTU-Schaubild von 1.2379 erfolgt oberhalb 1030 °C die vollständige Umwandlung des Gefüges in Austenit. Die Ergebnisse zeigen, dass die Herstellbarkeit im vollständig ausgebildeten Austenitgebiet möglich ist.



Bild 71: umgeformte Probe bei 1050° C, Abkühlung im geschlossenen Werkzeug

5.4.3 Auswertung der Umformversuche

Die Versuche haben gezeigt, dass die Herstellung der Messer durch Tiefziehen unterhalb von 700°C nicht möglich ist. Es kommt zu starker Rissbildung. Der Ort des Werkstoffversagens ist, wie erwartet, im Bereich der Sickenkante. Ab 700°C bis 1050°C ist die Herstellung durch Tiefziehen möglich, es gab keine Risse und Falten. Allerdings verzogen sich die Proben nach der Kraftentlastung. Ursachen sind möglicherweise eine Entfestigung durch Erwärmung, Rückfederung und Textureinflüsse. Die Rückfederung lässt sich nicht vollständig verhindern. Der Einfluss auf die Formabweichung lässt sich jedoch minimieren [11]. Zum Vermindern des Verzugs des Ziehteils wurden die Proben anschließend mit deutlich verlängerter Haltezeit umgeformt. D.h., die Beaufschlagung durch die Presskraft wurde nach dem Erreichen der Ziehtiefe aufrecht erhalten. Die Ziehteile weisen nach der Kraftentlastung keinen sichtbaren Verzug auf. Die Entscheidung, bei welcher Temperatur das Messer hergestellt werden muss, ist maßgeblich für die Qualität des Ziehteils. Zu berücksichtigen ist weiterhin, dass jede Erhöhung der Umformtemperatur mit Kostensteigerungen bei diesem Fertigungsschritt verbunden ist. Diese zusätzlichen Kosten resultieren aus dem erhöhten Energiebedarf und erhöhten Anforderungen an die verwendeten Werkzeugwerkstoffe. Zum Charakterisieren der Eigenschaften der Ziehteile wurden weitere Untersuchungen durchgeführt.

5.4.4 Eigenschaften des Tiefziehteils

Zum Charakterisieren der Eigenschaften der Ziehteile und zur Auswertung des Tiefziehprozesses wurden die Härte, die Dickenänderung, die Formabweichung, die Maßabweichung und die Gefügestruktur untersucht.

Zur Untersuchung wurden die bei $T=700^{\circ}\text{C}$ und bei $T=850^{\circ}\text{C}$ gezogenen Teile ausgewählt. Das bei $T=1050^{\circ}\text{C}$ umgeformte Ziehteil zeigte keine Verbesserung hinsichtlich des Rückfederungsverhalten und wurde wegen des größeren Energieverbrauchs nicht weiterverfolgt.

Für die Weiteruntersuchung wurden die Ziehteile gekennzeichnet:

T700	bei 700°C umgeformtes Teil
T850	bei 850°C umgeformtes Teil
TW850	bei 850°C umgeformtes und weichgeglühtes Teil

Messgeräte

Zur Bestimmung der Dickenänderung und der Maßabweichung kam eine CNC-Koordinatenmessmaschine, Typ ZEISS-Eclipse, zum Einsatz (Bild 72 a).

Zur Härtmessung wurde eine Härteprüfmaschine UT100 verwendet (Bild 72 b).

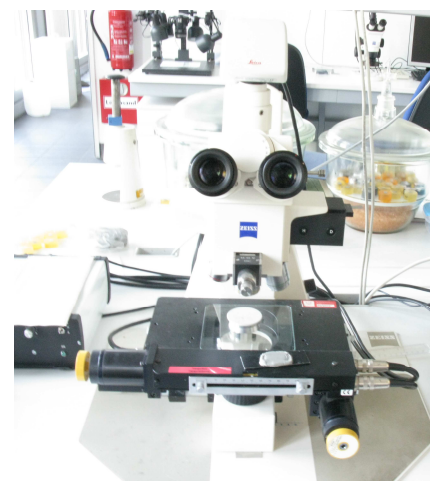
Für die Untersuchung der Gefüge wurde ein Lichtmikroskop verwendet (Bild 72 c).



a) Koordinatenmessmaschine
ZEISS Eclipse



b) Härteprüfmaschine
UT 100



c) Lichtmikroskopie
ZEISS

Bild 72: Prüfmaschinen

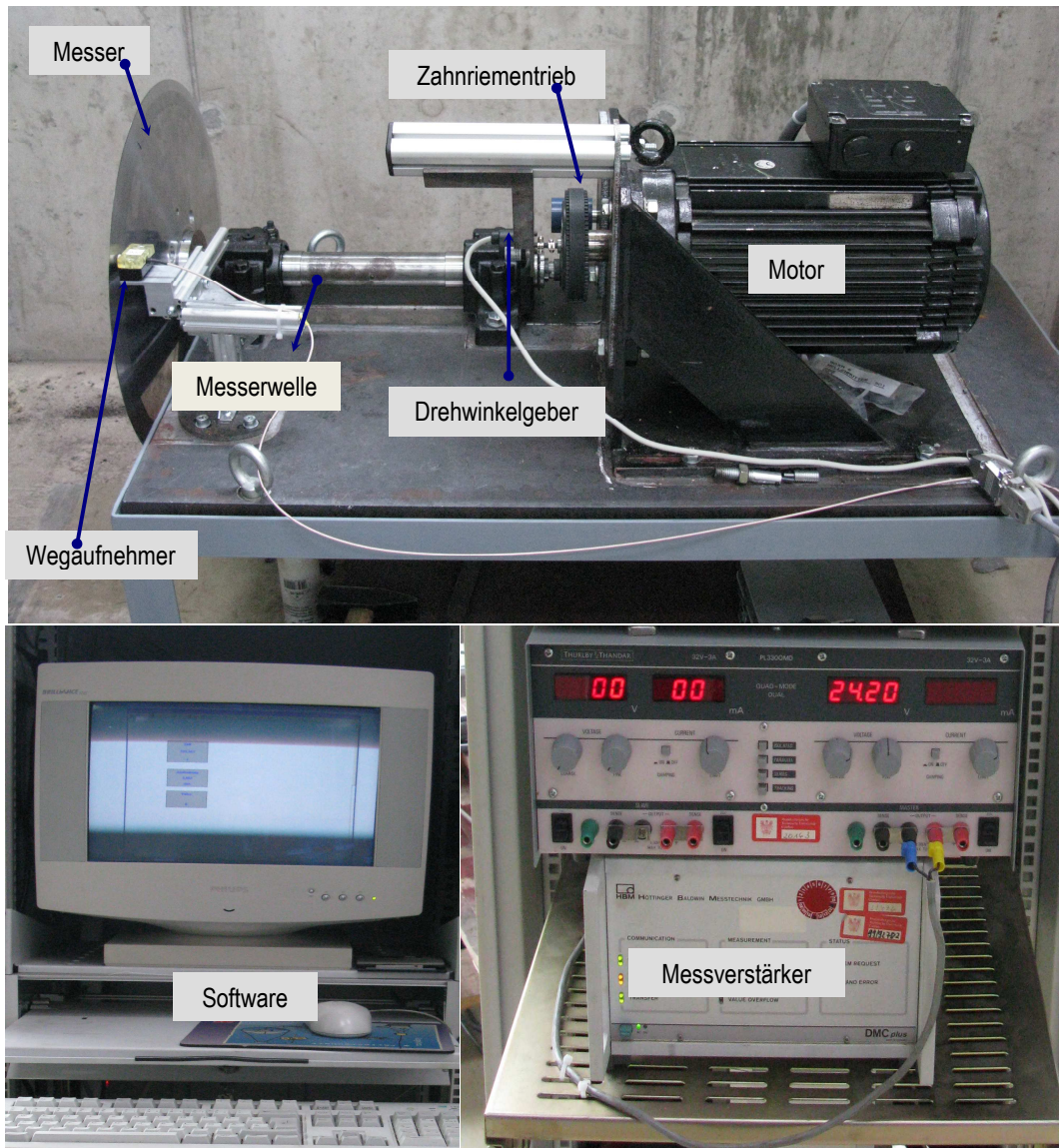


Bild 73: Prüfstand zur Ermittlung der Formabweichung und Auslenkung

Zur Ermittlung der Formabweichung wurde ein Prüfstand konstruiert und aufgebaut. Bild 73 zeigt den Prüfstand. Der Prüfstand besteht aus einem regelbaren Antriebsmotor, der Messerwelle, einem Messverstärker, einem induktiven Wegaufnehmer und einem inkrementellen Drehwinkelgeber. Die Zienteile bzw. die fertigen Messer (herkömmliches Messer und fertiges Blechmesser) werden auf die Messerwelle montiert. Die maximale Drehzahl des Antriebsmotors beträgt 2000 min^{-1} . Um den Versuchstand auch zur Ermittlung der Auslenkung der Messer durch Fliehkraft zu benutzen und die Messer mit der geforderten Drehzahl von ca. 5600 min^{-1} rotieren lassen zu können, wurde ein Zahnriementrieb mit dem Übersetzungsverhältnis 3:1 benutzt. Der Wegaufnehmer ist ein Wirbelstrom-

Wegaufnehmer *WayCon TX 3*. Dieses Messgerät misst die Abstände berührungslos im Messbereich von 0 bis 3 mm. Der Wegaufnehmer wurde auf den Werkstoff 1.2379 kalibriert.

5.4.4.1 Härteverteilung:

Zur Charakterisieren der örtlichen Eigenschaften der bei verschiedenen Temperaturen gezogenen Teile wurde die Härte mit dem Verfahren nach Vickers (HV 2) nach DIN EN ISO 6507 gemessen. Härtemessungen erlauben es, zerstörungsfrei, indirekt über die erfasste Härteverteilung, Aussagen zu den Festigkeits-eigenschaften der hergestellten Werkstücke treffen und somit die örtlichen Änderungen der stofflichen Eigenschaften charakterisieren zu können. Aussagen bezüglich der Art der Beanspruchungen des Werkstoffes lassen sich jedoch aus dem Verlauf der Härte nicht ableiten /Ott71/.

Die Härte der Ziehteile wird mit der Härte des Ausgangblechs verglichen. Die Ausgangshärte des Ausgangblechs liegt zwischen 200 und 300 HV 2. Größere Härtewerte nach der Umformung weisen auf eine Aufhärtung durch Gefügeänderungen hin. Auch eine Verfestigung durch zunehmende plastische Dehnung ist möglich. Im Allgemeinen reagieren metallische Werkstoffe bei zunehmender plastischer Dehnung mit einer Zunahme der Festigkeit. Mit zunehmender Härte verringert sich allerdings die Zähigkeit des Werkstoffes und damit steigt die Bruchgefahr. Für das Messer ist eine hohe Zähigkeit von größerer Bedeutung.

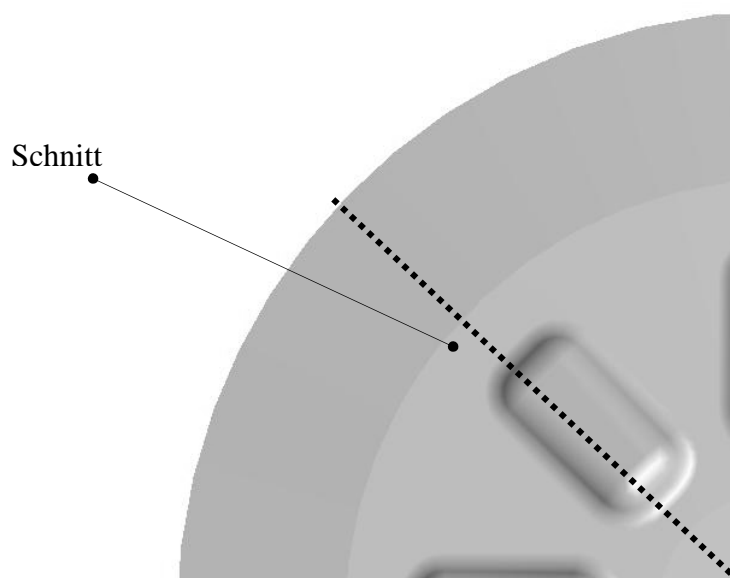


Bild 74: Schnittverlauf für Werkstoffuntersuchungen

Für die Untersuchung wurden radiale Schnitte quer durch die Sicke angefertigt und geschliffen (Bild 74). Zur Bestimmung der Härteverteilung kam das Verfahren nach Vickers zur Anwendung. Dabei wurden über jedem Querschnitt 4 Härteverläufe Innenseite-Kern-Außenseite aufgenommen. Der Abstand der Messpunkte eines Verlaufs betrug 1 mm.

Bild 75 zeigt die Verteilung der Härte für das Teil T700 im Schnitt.

Das bei 700°C gezogenen Teil T700 weist im Vergleich zur Ausgangshärte einen Härteanstieg von ca. 50 HV 2 auf. Die Härtewerte liegen zwischen 200 und 350 HV 2. Dieser Härteanstieg kann auf die Karbidausscheidung und Restaustenitumwandlung zurück geführt werden.

Die Karbide werden von den Elementen Chrom, Vanadium und Molybdän gebildet.

Der Härteanstieg des Ziehteils T700 ist im Vergleich zur Ausgangshärte nicht sehr groß und das Ziehteil T700 ist zäh und für die Scheibenbereich des Messers geeignet.

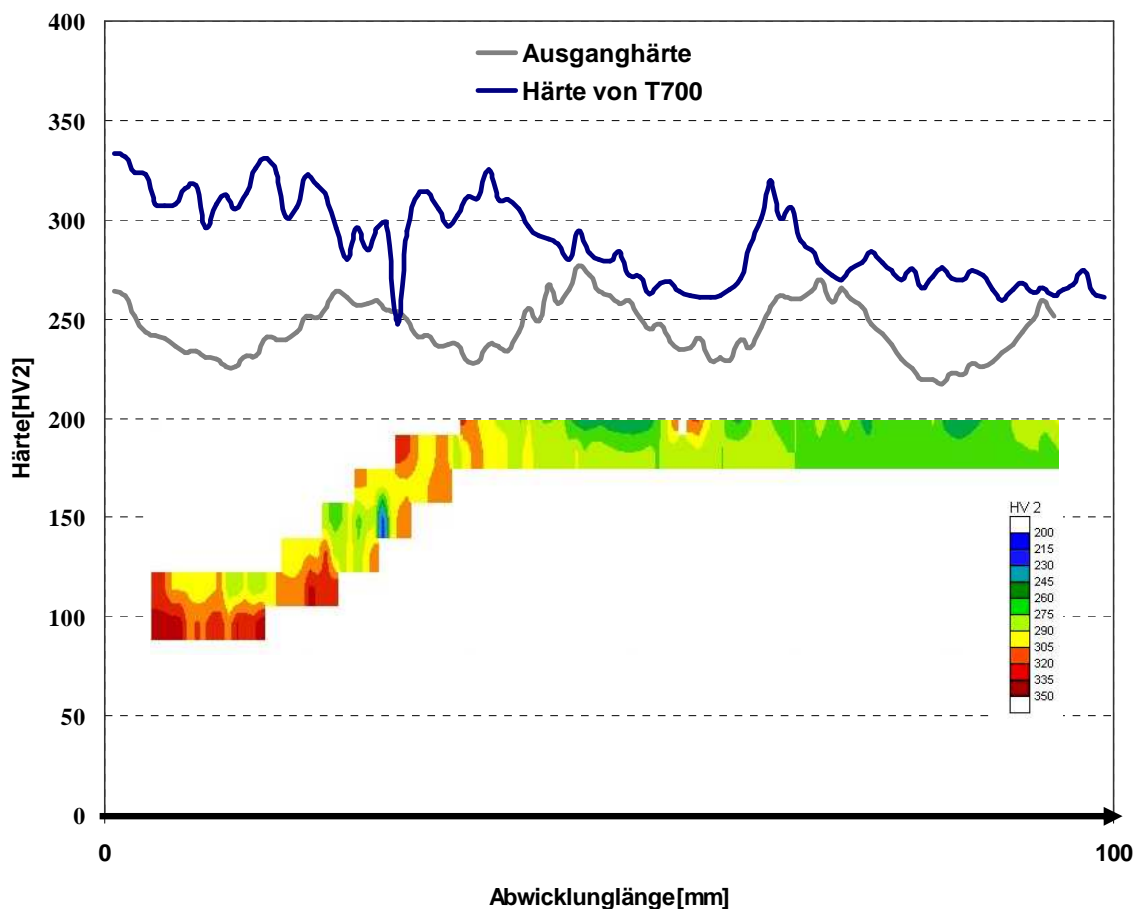


Bild 75: Härteverlauf und Härtekontur für das Teil T700

Für das Teil T850 ist deutlich zu erkennen, dass es den größeren Härteanstieg hat (Bild 76). Die Härte­werte liegen zwischen 630 und 750 HV 2. Grund ist die Aushärtung. Wenn ein Stahl, der einige Prozent Chrom enthält, auf eine Temperatur von 800 C° erhitzt wird und dann an der Luft abgekühlt wird, so wird er allmählich härter und schließlich bei kleinen Querschnitten ganz hart. Dies bedeutet, dass der Werkstoff ohne irgendwelche nachfolgende Härtebehandlung, wie Abschrecken in Öl oder Wasser, selbsthärtende Eigenschaften besitzt /Bre22/.

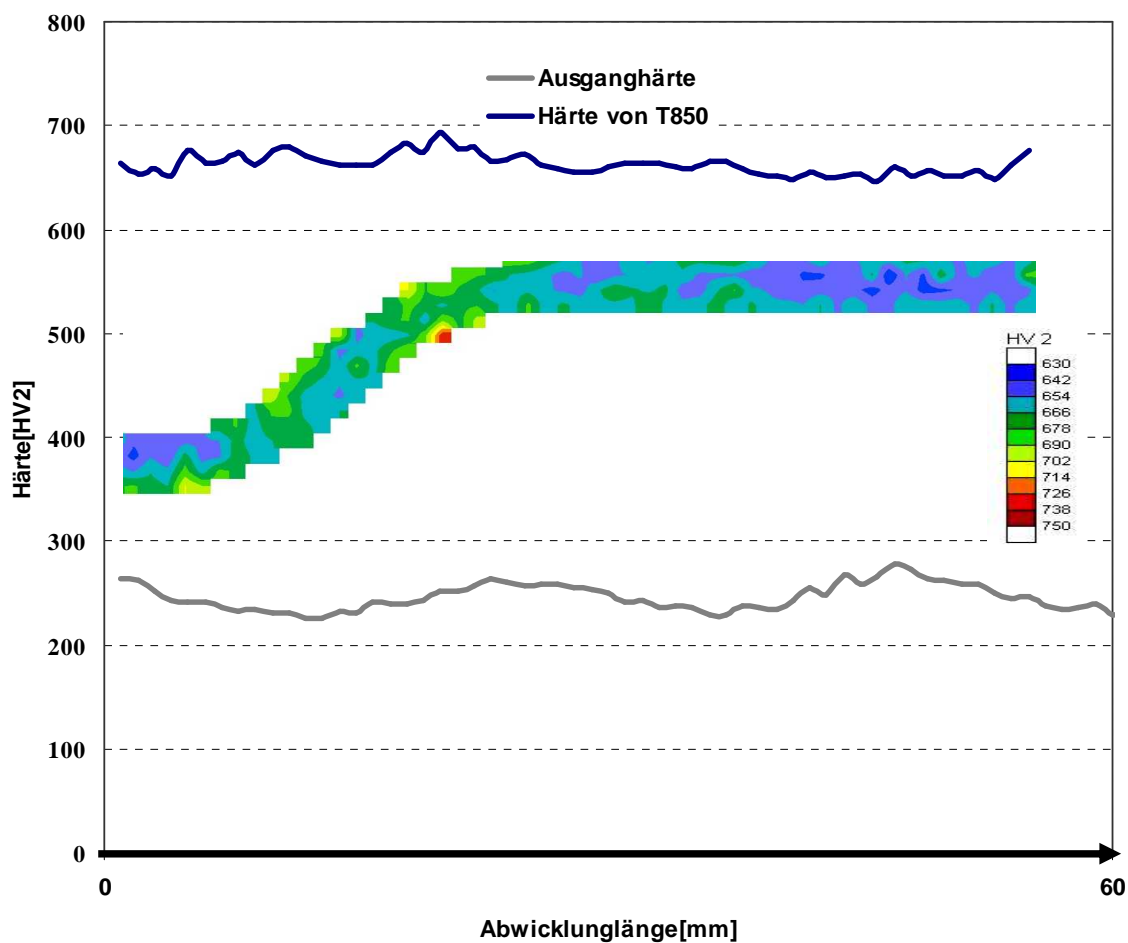


Bild 76: Härteverlauf und Härtekontur für das Teil T850

Da der große Härteanstieg des Teils T850 wegen der damit verbundenen geringeren Zähigkeit unerwünscht ist, wurde ein bei 850 °C umgeformtes Teil weichgeglüht. Das Weichglühen erfolgte bei $T = 750^{\circ}\text{C}$ über eine Zeit von 7 Stunden. Danach wurde das Teil über 17 Stunden im Ofen langsam auf 300 °C abgekühlt.

Nach dem Weichglühen wurde die Härteverteilung mit dem Verfahren nach Vickers ermittelt. Bild 77 zeigt die Verteilung der Härte für das Teil TW850 im Schnitt. Durch

die Wärmebehandlung wurde eine Härte von zwischen 200 und 300 HV 2 erreicht. Die Härte des wärmebehandelten Teils entspricht nahezu der Härte des Ausgangsblechs und ist für Scheibenbereich des Messers geeignet.

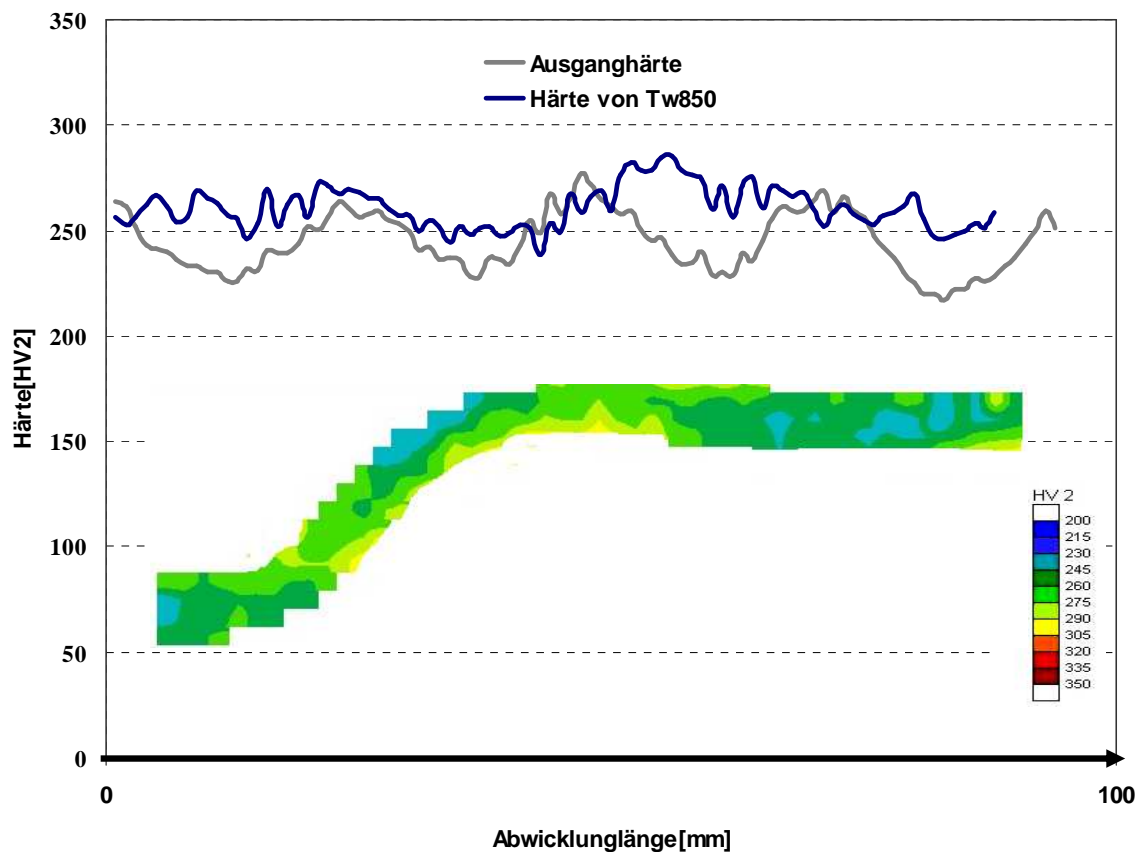


Bild 77: Härteverlauf und Härtekontur für das Teil TW850

5.4.4.2 Gefügestruktur

Zum Charakterisieren der Eigenschaftsänderung an den Ziehteilen während der Umformung wurden Gefügeuntersuchungen durchgeführt. Für die Untersuchung wurden 3 Proben aus den Ziehteilen entnommen (Bild 78).



Bild 78: Probe für Gefügeuntersuchung

Die Proben wurden geschliffen, poliert, mit Ätzmittel 3%-alkoholische Salpetersäure behandelt und dann mit einem Auflichtmikroskop betrachtet. Bei der Betrachtung der Gefügestruktur im Schliffbild wurden keine lokalen Unterschiede der Gefügestruktur über dem betrachteten Querschnitt festgestellt. Dieses Verhalten war bei allen Proben zu verzeichnen. Aus diesem Grund wurde nur ein Gefügebild je Probe ausgewählt.

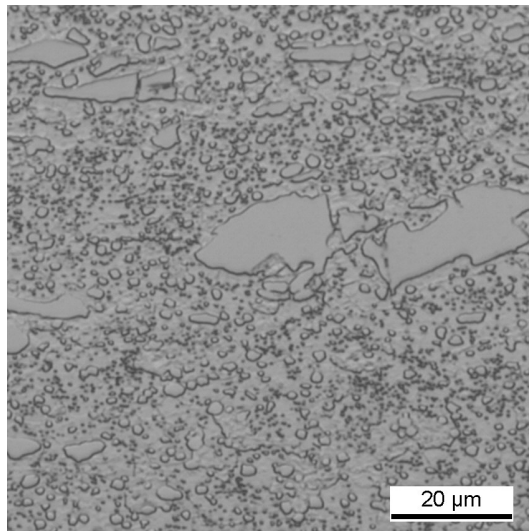


Bild 79: Gefüge des Ziehteils T700 (umgeformt bei 700C°)

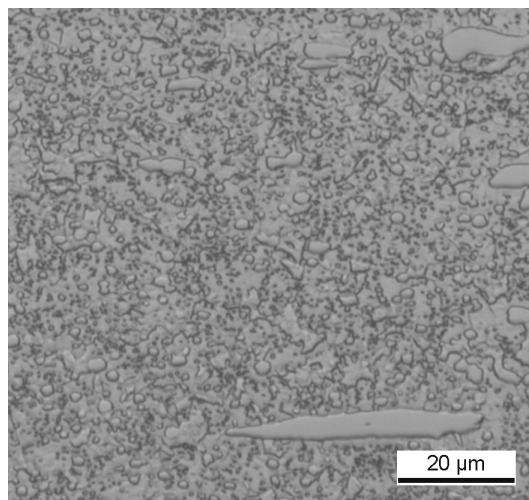


Bild 80: Gefüge des Ziehteils TW850 (umgeformt bei 850° C° und weichgeglüht)

Bild 79 und Bild 80 zeigen die Gefüge der Proben des Ziehteils T700 und des Ziehteils TW850. Im Vergleich mit dem Ausgangsgefüge in Bild 45 konnte keine deutliche Gefügeänderung nachgewiesen werden. Bei dem Ziehteil T700 treten teilweise größere Karbide auf, die man auf Sonderkarbidausscheidungen zurück-

führen kann. Da die Gefügeänderung der Ziehteile T700 und TW850 im Vergleich zum Ausgangsgefüge nicht deutlich ist, sind diese Ziehteile zäh und zur Herstellung des Slicermessers prinzipiell geeignet.

Die Gefügestruktur für das Ziehteil T850 zeigt Bild 81. Die Gefügestruktur weist im Vergleich zum Ausgangsgefüge ein Gefüge mit starker Karbidausscheidung auf. Dies führt zur stärkeren Festigkeitssteigerung.

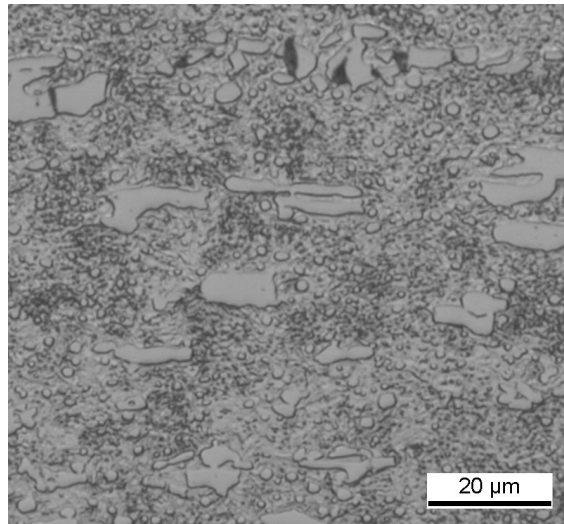


Bild 81: Gefüge bei Ziehteil TW850 (umgeformt bei 850° C)

Durch das kurze Aufwärmen der Probe auf eine Temperatur über 800 °C (Ac_1) erfolgt eine unvollständige Umwandlung der Kristalle in Austenit. Der Zementit geht teilweise geringfügig im Austenit in Lösung. Sonderkarbide werden meist nicht aufgelöst. Durch die darauf folgende relativ schnelle Abkühlung im Werkzeug wurde die Kohlenstoffdiffusion im $\gamma-Fe$ unterdrückt. Es erfolgte die Umwandlung des $\gamma-MK$ in ein kohlenstoffübersättigtes $\alpha-MK$. Im $\alpha-MK$ ist aber die Diffusionsgeschwindigkeit der Kohlenstoffatome wesentlich größer als im $\gamma-MK$, so dass es zu einer erneuten Diffusion der Kohlenstoffatome und zur Bildung von Fe_3C kam.

Diese starke Gefügeänderung des Zienteils T850 im Vergleich zum Ausgangsgefüge führt zu einem großen, unerwünschten Härteanstieg. Das Zienteil T850 ist wegen der geringen Zähigkeit für die Herstellung des Slicermessers nicht geeignet.

5.4.4.3 Dickenänderung

Während des Tiefziehprozesses ändert sich die Blechdicke lokal. Beim Tiefziehen wird eine möglichst geringe Dickenänderung angestrebt. Zur Beurteilung der Ziehteilqualität und Bestimmung der Versagensgefahr ist die Dickenänderung im Teil zu untersuchen. Die Feststellung der Blechdickenänderung wurde mit der CNC- Koordinatenmessmaschine durchgeführt. Die Kontur der Sicke wurde in der Mitte von beiden Seiten gescannt, die Ergebnisse in ein CAD-Programm überführt und die maximale Dickenänderung ermittelt.

Die Ergebnisse sind in Bild 82 und 83 aufgeführt.



Bild 82: Ort der minimalen Dicke des Ziehteils T700

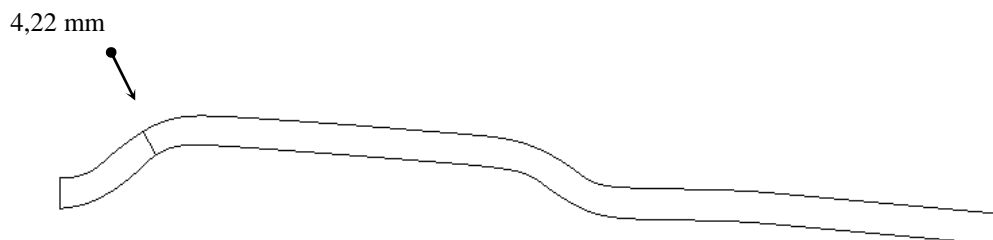


Bild 83: Ort der minimalen Dicke des Ziehteils TW850

Der Ort der größten Blechdickenreduktion liegt im Sickenbereich - dem Bereich des maximalen Umformgrads - und stimmt mit den Simulationsergebnissen überein. Dieses Ergebnis ist unabhängig von der Umformtemperatur.

Die maximale Dickenreduktion bei dem bei 700°C gezogenen Ziehteil beträgt 12,9 % (4,18 mm). Bei dem bei 850°C gezogenen Ziehteil beträgt die maximale Dickenreduktion 12,08 % (4,22 mm) nach der Wärmebehandlung. Diese Dickenreduktion der Ziehteile ist noch akzeptabel und die Versagensgefahr im Sickenbereich klein.

5.4.4.4 Formabweichung

Die Formabweichung ist ein Formfehler am Werkstück und bedeutet die Abweichung von der makrogeometrischen Idealgestalt des Körpers /Lan84/. Als Formabweichung wurde die Abstandsdifferenz des Rands des Ziehteils in den Drehwinkeln von 0 bis 360 ° zu einem Referenzpunkt definiert. Um die Formabweichung messtechnisch zu ermitteln, wurde der Prüfstand im Bild 73 verwendet.

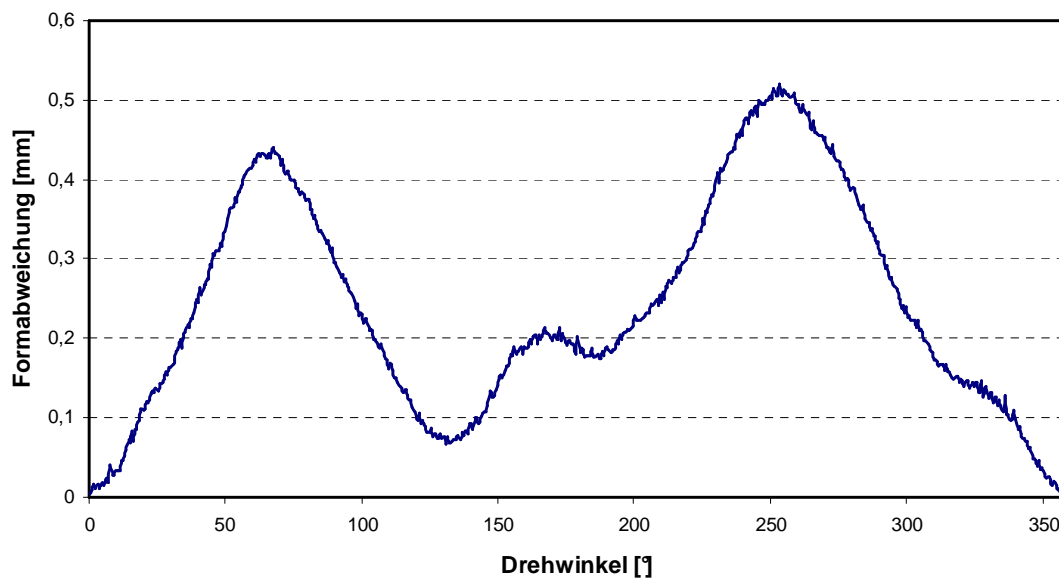


Bild 84: Verlauf der Formabweichung des Ziehteils T700

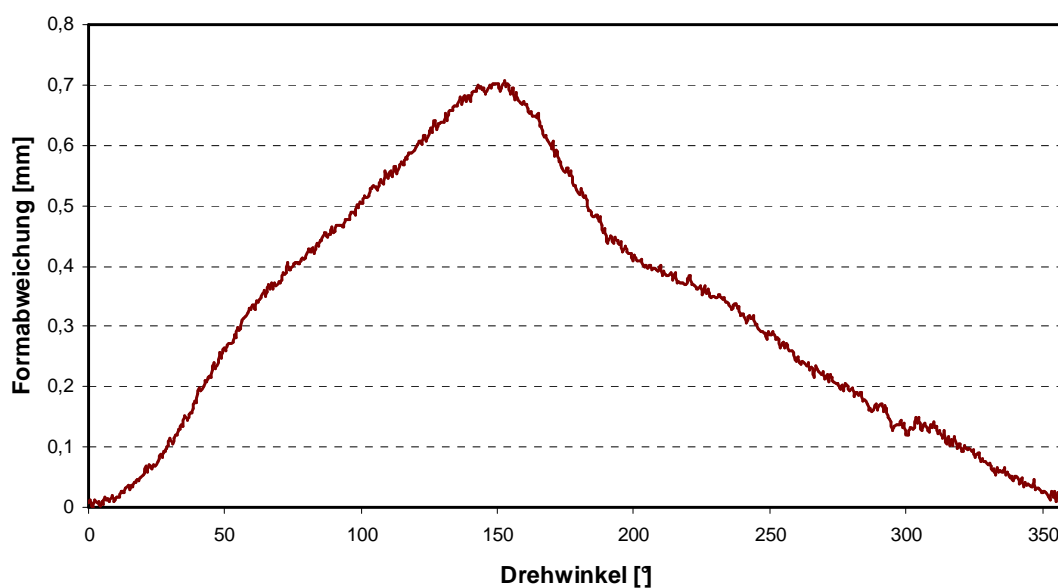


Bild 85: Verlauf der Formabweichung des Ziehteils T850

Die Ergebnisse sind in den Bildern 84 bis 86 aufgeführt. Der Verlauf der Formabweichung der Ziehteile T700 und TW850 zeigt 2 Spitzen. Die Minima und Maxima sind ca. 90° zueinander versetzt und auf den Textureinfluss des Blechs zurückzuführen. Die maximale Formabweichung bei T700 beträgt 0,52 mm und bei TW850 0,65 mm.

Der Vergleich der Formabweichung des Ziehteils vor der Wärmebehandlung (T850) mit dem Ziehteil nach der Wärmebehandlung (TW850) zeigt für das Ziehteil vor der Wärmebehandlung nur eine Spitze im Verlauf der Formabweichung. Das kann auf den Härteanstieg des Ziehteils T850 durch die Umformung bei 850 °C zurückgeführt werden, wodurch der Textureinfluss zurückgedrängt wurde.

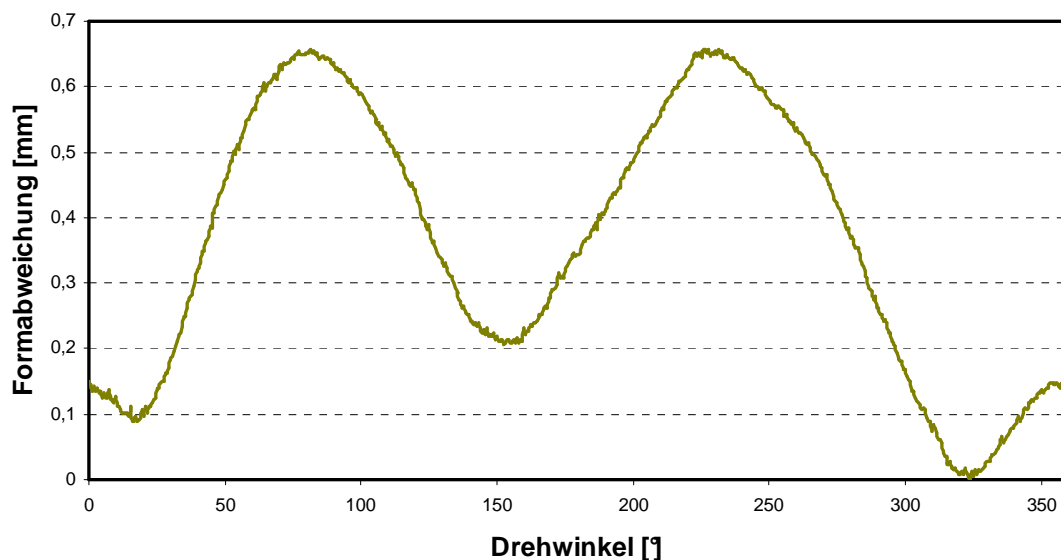


Bild 86: Verlauf der Formabweichung des Ziehteils TW850

Die vorgegebene zulässige Formabweichung des Slicermessers beträgt 0,1 mm. Die Formabweichung der beiden Ziehteile T700 und TW850 hat die zulässige Formabweichung überschritten. Die Formabweichung ist aber nicht zu groß, um die endgültige Schneidengeometrie durch spanende Bearbeitung heraus zu arbeiten.

5.4.4.5 Maßabweichung

Die Maßabweichung ist die Abweichung eines Werkstückmaßes vom Sollwert /Lan84/. Die Messer sind kegelförmige Teile und die wichtigsten Maße dabei sind die Kegelwinkel, die den Schneiden- und den Scheibenwinkel bilden (Bild 87). Der Sollwert des Scheibenwinkels ist $1,2^\circ$ und der Sollwert des Schneidenwinkels ist 5° . Nach der Umformung der ersten Proben wurde der Schneidenwinkel vermessen, um den Einfluss der Rückfederung abschätzen zu können. Daraufhin wurde das Werkzeug im Schneidenbereich modifiziert. Der Schneidenwinkel des Werkzeugs wurde von 5° auf 6° vergrößert.

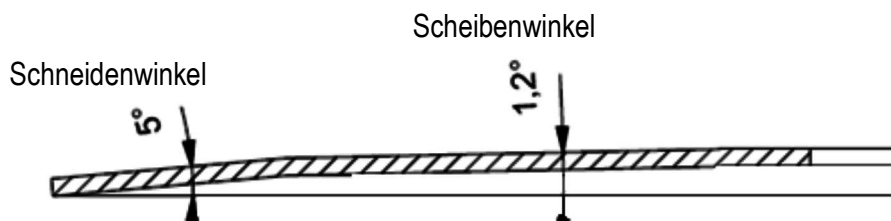


Bild 87: Schneidenwinkel und Scheibenwinkel

Zur Untersuchung der Maßhaltigkeit nach dem Umformprozess wurden mit der CNC-Koordinatenmessmaschine die Winkel der Scheibe in der Mitte zwischen der Sicken und die Winkel im Bereich der Schneide in den Drehwinkel von 0° bis 360° des Messers gemessen und mit dem Sollwert verglichen. Die Ergebnisse sind in den Bildern 88 und 89 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass alle Ziehteile Maßabweichungen vom Sollwinkel haben. Diese einerseits auf die Rückfederung zurück zu führen. Andererseits zeigen die Ziehteile auch Maßabweichung der Kegelwinkel von einem Drehwinkel zum anderen im gleichen Ziehteil. Diese Maßabweichung ist auf den Textureinfluss zurückzuführen.

Die Ergebnisse im Bild 88 zeigen, dass die durch die Rückfederung entstehende Maßabweichung des Schneidenwinkels aller Ziehteile vom Sollwert 5° sehr klein ist. Diese kann man noch durch weitere Werkzeugmodifizierung, d.h., mittels Vergrößerung des Schneidenwinkels einstellen. Die durch den Textureinfluss entstehende Maßabweichung der Schneidenwinkel in Abhängigkeit vom Drehwinkel im Ziehteil kann durch die abschließende spanende Bearbeitung ausgeglichen werden.

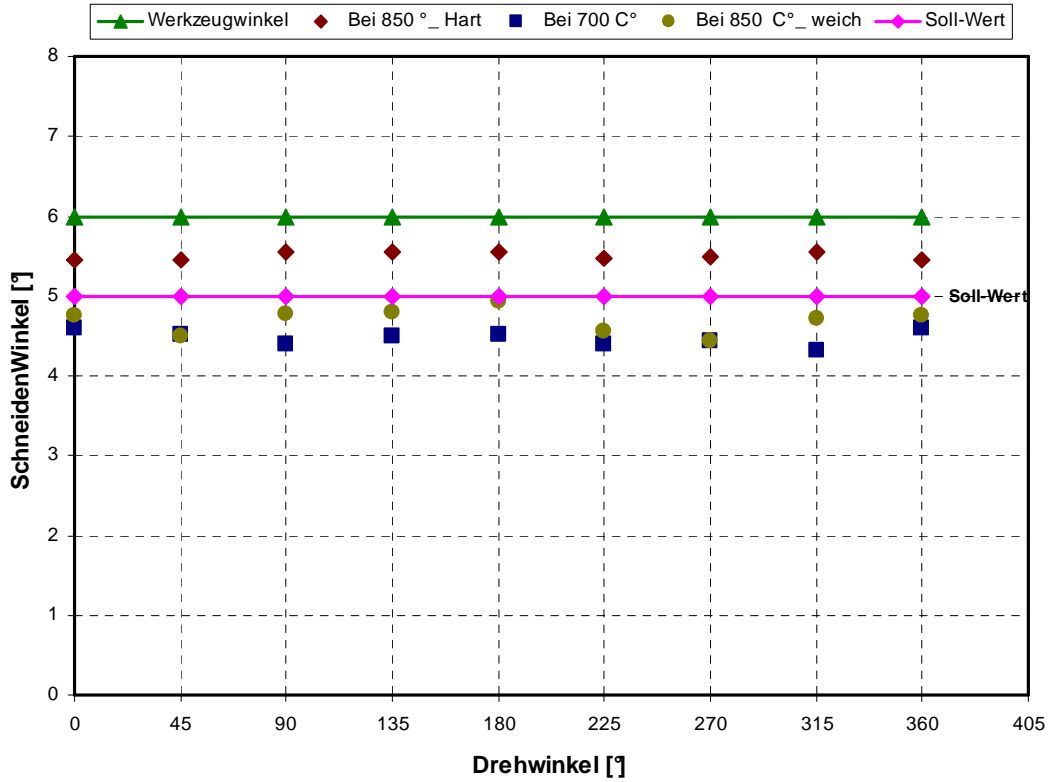


Bild 88: Schneidenwinkel in Abhängigkeit von Drehwinkel

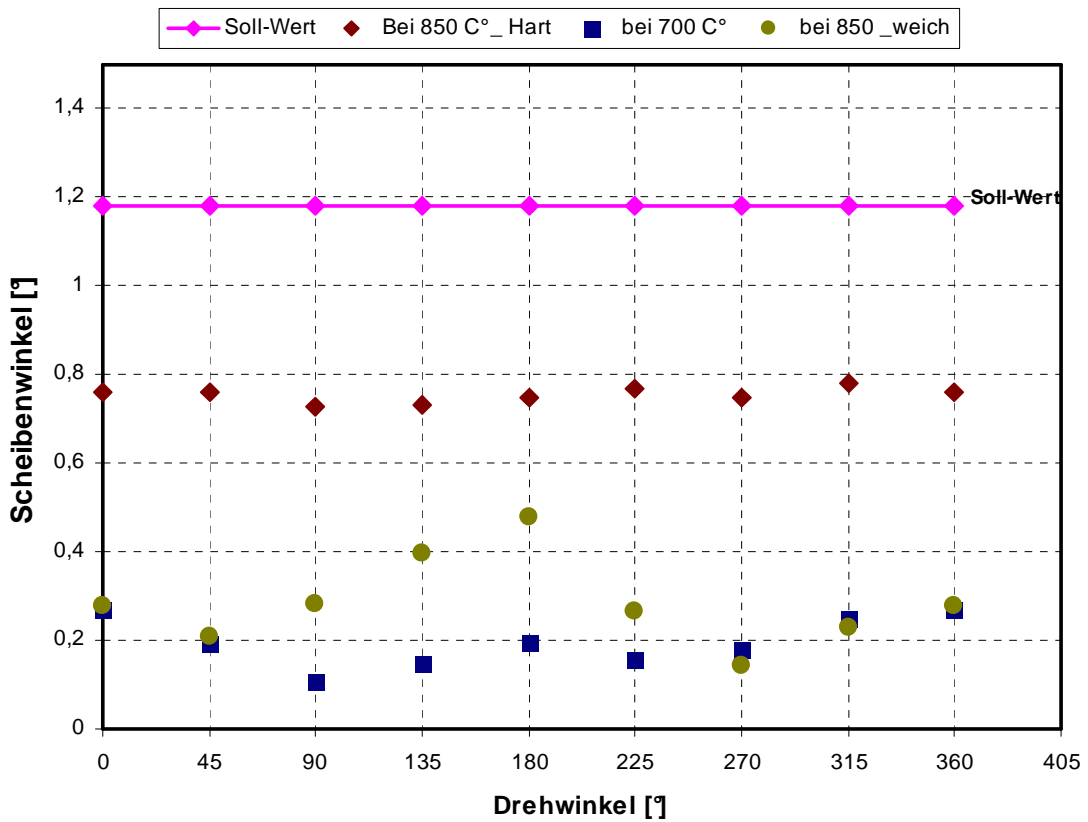


Bild 89: Scheibenwinkel in Abhängigkeit von Drehwinkel

Die Ergebnisse im Bild 89 zeigen, dass die durch die Rückfederung entstehende Maßabweichung des Scheibenwinkels vom Sollwinkel relativ groß ist. Auch diese kann durch Werkzeugmodifizierung korrigiert werden. Am Versuchswerkzeug wurde auf diese Modifizierung verzichtet, da die Wirksamkeit der Maßnahme schon am Beispiel des Schneidenbereichs nachgewiesen wurde und eine komplette Neufertigung des Werkzeugs sehr kosten- und zeitaufwändig wäre. Allerdings können die durch den Textureinfluss bewirkten Maßabweichungen der Scheibenwinkel in Abhängigkeit vom Drehwinkel im Ziehteil nicht korrigiert werden. Die Maßabweichung der Scheibenwinkel vom Sollwert beeinflusst die Weiterbearbeitung geringfügig.

5.5 Weiterbearbeitung des umgeformten Halbzeugs

Die Weiterbearbeitung der umgeformten Ziehteile wurde durch verschiedene Verfahren durchgeführt. Die Mittenbohrung wurde gefräst und der Außendurchmesser des Messers und die Schneide geschliffen.

Bild 90 zeigt das aus Blech gefertigte, vollständig bearbeitete Slicermesser.



Bild 90: gefertigtes Blechmesser

5.6 Experimentelle Untersuchungen des gefertigten Slicermessers

5.6.1 Gewicht

Das Gewicht der vollständig bearbeiteten Blechmesser wurde mit dem Gewicht des herkömmlichen Slicermessers verglichen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 12 dargestellt. Das herkömmliche Slicermesser hat ein Gewicht von 5250 g, die bei 700 °C bzw. 850 °C umgeformten Blechmesser jeweils 5294,3 g bzw. 5088,6 g. Der Gewichtsunterschied zwischen den beiden umgeformten Blechmessern ist ungewöhnlich groß. Er lässt sich mit den unterschiedlichen Form- und Maßabweichungen der Blechmesser erklären. Auf Grund der stärkeren Form- und Maßabweichungen des bei 850 °C umgeformten Blechmessers ist ein größerer Werkstoffabtrag bei der nachfolgenden spanenden Bearbeitung erforderlich, um die Sollgeometrie im Schneidenbereich zu fertigen. Bei den bei 700 °C umgeformten Blechmessern sind diese Form- und Maßabweichungen geringer.

Tabelle 12: Gewicht

Messer	Gewicht [g]
Herkömmliches Messer	5250
Bei 700° C umgeformt	5294,3
Bei 850° C umgeformt	5088,6

5.6.2 Formabweichung

Um die Formabweichung (Seitenschlag) der Schneide während der Rotation experimentell zu ermitteln, wurde der im Bild 65 gezeigte Prüfstand verwendet.

Als Seitenschlag bezeichnet man die seitliche Verformung der Spur eines Rades aus seiner Ebene an einer oder mehreren Stellen. Wir definieren den Seitenschlag als den maximalen Ausschlag bei den Drehwinkeln von 0° bis 360°. Die Messwerte wurden normiert, indem das Minimum als Null definiert wurde. Die Ergebnisse sind in Bildern 91, 92, 93 aufgeführt.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Formabweichung des herkömmlichen Slicermessers ca. 0,17 mm, die Formabweichung des bei 700 °C umgeformten Messers ca. 0,25 mm und die Formabweichung des bei 850 °C umgeformten Messers

ca 0,27 mm beträgt. Die Formabweichung der umgeformten Messer ist im Vergleich zum herkömmlichen Slicermesser größer, ca 0,08 bis 0,1 mm, und hat die zulässige Formabweichung überschritten.

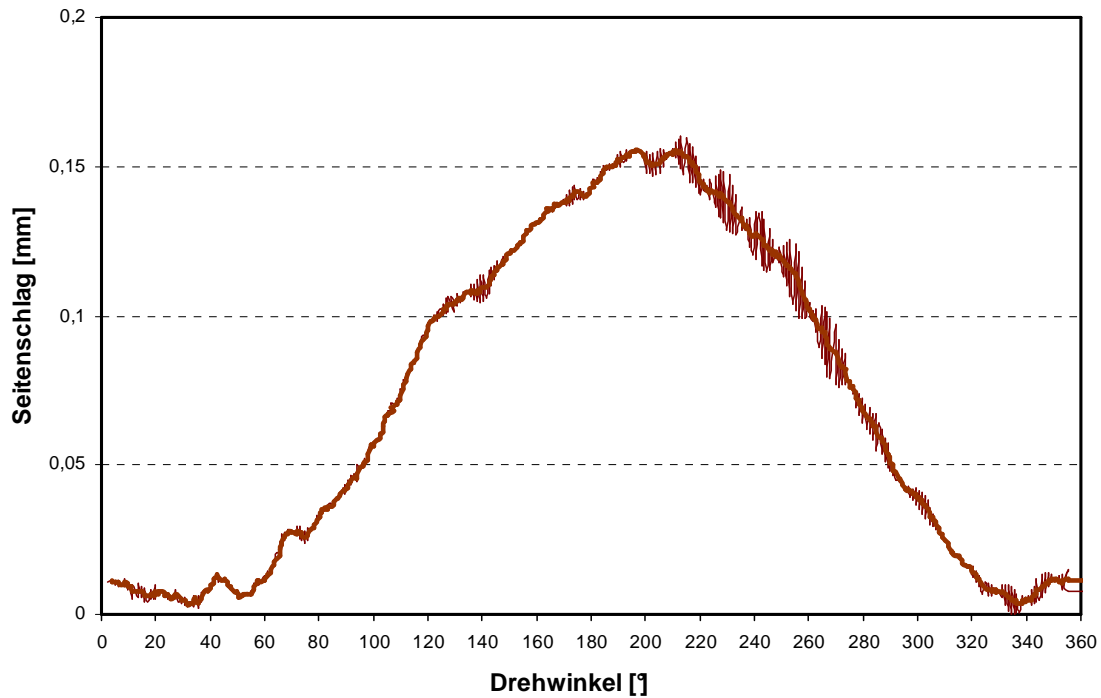


Bild 91: Formabweichung des herkömmlichen Slicermessers



Bild 92: Formabweichung des bei 700° C umgeformten Messers

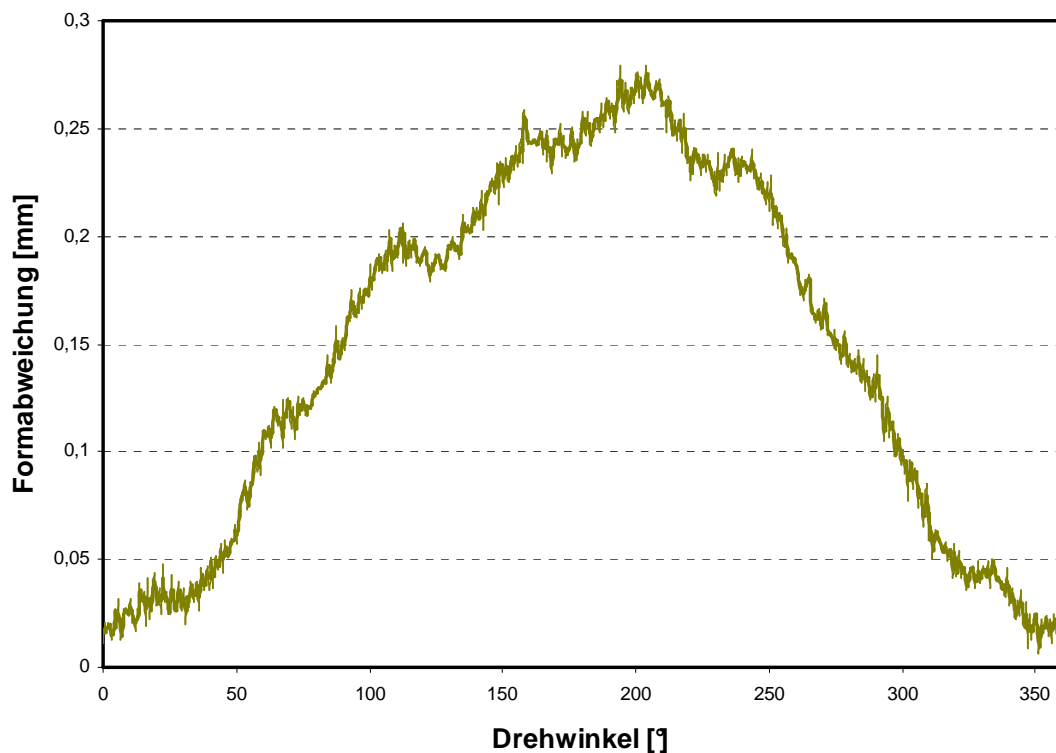


Bild 93: Formabweichung des bei 850° C umgeformten Messers

Die Formabweichung entsteht durch Rückfederung und Textureinfluss. Diese Einflüsse auf die Formabweichung konnten durch die abschließende spanende Bearbeitung reduziert aber nicht vollständig beseitigt werden. Um die Formabweichungen im zulässigen Rahmen zu halten, sind weitere Optimierungen in der Fertigungstechnologie erforderlich. Ein Ansatz für weitere Arbeiten wäre, den Einfluss anderer Parameter, z.B. Sickenanordnung unter Berücksichtigung der Texturrichtung, Verwendung anderer Werkstoffe, Ausnutzung des Presshärteverfahrens, zu untersuchen.

5.6.3 Auslenkung der Messer durch Fliehkraft

Mit Hilfe eines Wegaufnehmers wurde die Auslenkungen aller Messer bei verschiedenen Drehzahlen von 30 min^{-1} bis 5600 min^{-1} ermittelt. Die Ergebnisse werden in den Bildern 94, 95 dargestellt.

Bild 94 zeigt die von der Simulation berechneten und gemessenen Auslenkungen des herkömmlichen Slicermessers durch Rotation bei Drehzahlen von 30 min^{-1} bis 5600 min^{-1} . Erkennbar ist eine gute Übereinstimmung der gemessenen Werte mit den durch die Simulation voraus berechneten Werten. Die maximale gemessene Auslenkung bei Drehzahl 5600 min^{-1} beträgt 1,2 mm.

Bild 95 zeigt die von der Simulation berechneten und gemessenen Auslenkungen der umgeformten Blechmesser. Die gemessenen Werte liegen relativ nahe an den berechneten Werten. Die maximale gemessene Auslenkung bei Drehzahl 5600 min^{-1} für das bei 700°C umgeformte Blechmesser beträgt 0,546 mm und für das bei 850°C umgeformte Blechmesser 0,723 mm. Die unterschiedliche Auslenkung der umgeformten Blechmesser kann auf Gewichts- und Härteunterschiede zurück geführt werden.

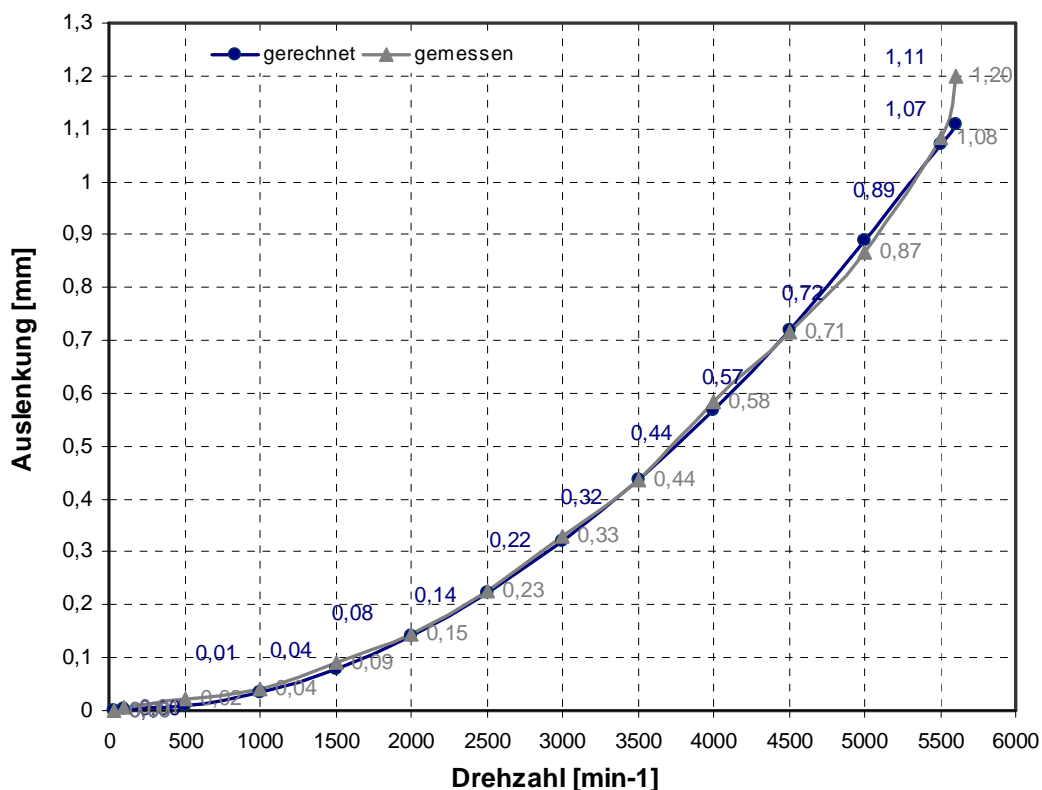


Bild 94: Auslenkung des herkömmlichen Slicermessers durch Fliehkraft

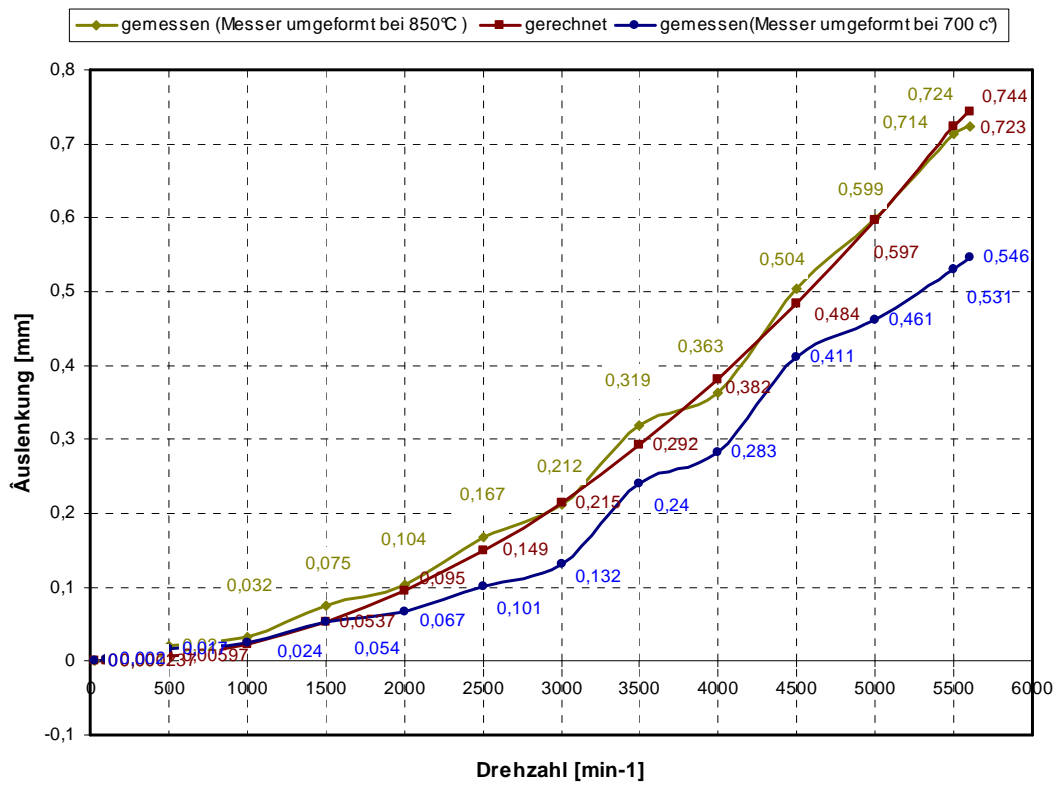


Bild 95: Auslenkung der umgeformten Blechmesser durch Fliehkraft

Die Mess- und Simulationsergebnisse zeigen eindeutig, dass die umgeformten Blechmesser im Vergleich zu dem herkömmlichen Slicermesser steifer sind.

5.6.4 Werkstoffeinsatz

Die Fertigungskostenverteilung der spanend gefertigten herkömmlichen Slicermesser ist im Bild 96 dargestellt.

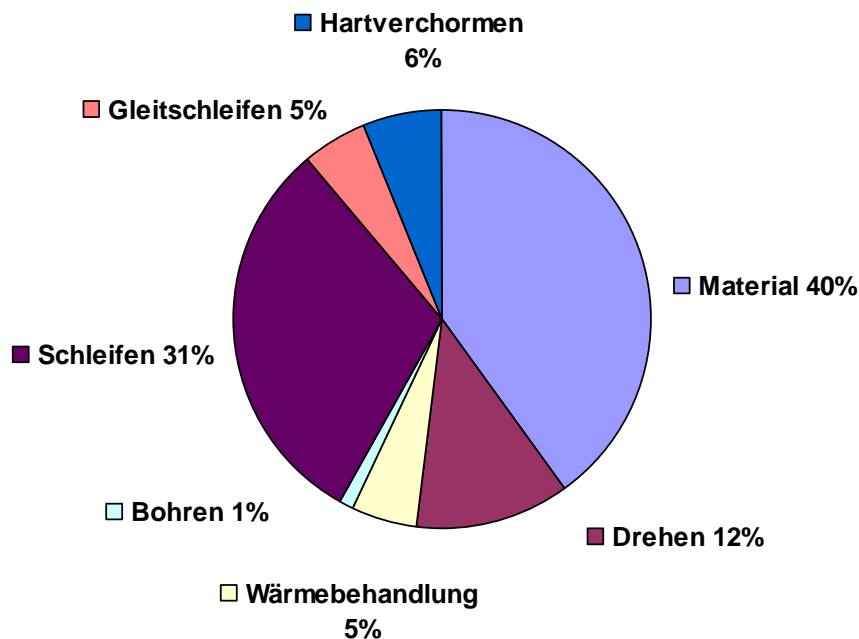


Bild 96: Fertigungskostenverteilung des spanend gefertigten Slicermessers nach ASTOR

Der Anteil der Werkstoffkosten beträgt 40 %. Die herkömmlichen Slicermesser werden aus einem relativ dicken Rohling von 23 mm Dicke und 463 mm Durchmesser gefertigt. Die umgeformten Slicermesser sind aus einem Blechzuschnitt mit der Dicke 4,8 mm und Durchmesser 470 mm hergestellt. Die Einsparung beim Werkstoffeinsatz bei Fertigung durch Umformverfahren im Vergleich zur Fertigung durch Spanen beträgt ca. 79,1 %. Die Kosten des Drehanteils werden bei der Fertigung durch Umformungsverfahren verringert. Gleichzeitig entstehen bei der Fertigung durch Umformverfahren zusätzliche Kosten durch die Vorwärmung des Blechzuschnitts und erforderliche Investitionen in Umformmaschine und -werkzeug. Eine genaue Abschätzung der Kosten der umgeformten Blechmesser bzw. für den Kostenunterschied zwischen den spanend gefertigten herkömmlichen Slicermessern und den umgeformten Blechmessern ist zurzeit noch nicht möglich. Tabelle 13 zeigt den Trend der Kostenentwicklung der

umgeformten Blechmesser im Vergleich zu den Herstellungskosten herkömmlicher Slicermesser.

Table 13: Trend der Kostenentwicklung

	Herkömmliches Slicermesser	Geformtes Slicermesser
Material	40%	↓
Umformmaschine und -werkzeug	-	↑
Drehen	12%	↘
Wärmebehandlung	5%	↗
Bohren	1%	→
Schleifen	31%	→
Gleitschleifen	5%	→
Hartverchromen	6%	→

6 Zusammenfassung

Die Entwicklung eines aus Blech aus dem Werkstoff 1.2379 herstellbaren Slicermessers ermöglicht es, ein Blechmesser zu schaffen, das im Vergleich zu herkömmlichen Slicermessern eine höhere Steifigkeit bei gleichbleibendem Gewicht oder ein geringeres Gewicht bei ausreichender Steifigkeit und Festigkeit aufweist. Die gezielte Einbringung von Steifigkeit kann durch Einsatz von konstruktiven Leichtbauformelementen, Sicken, erreicht werden. Die Einbringung von Sicken in einem Blech ist oft problematisch und kompliziert.

In einem Blechfeld kann man eine beliebig große Anzahl von Sickenbildern in verschiedenster Art anordnen. Für rotierende Blechmesser sind allerdings nur rotationssymmetrische Sickenbilder nutzbar. Die Vielfalt der Gestaltungsmöglichkeiten wird weiter durch den nutzbaren Gestaltungsbereich auf dem Messer und die Erfordernisse der Umformtechnologie eingeschränkt.

Die Gewichtsreduzierung des Messers ist durch die zulässige Beanspruchung des Werkstoffs beschränkt. Die Herstellung eines solchen gesickten Slicermessers kann durch die Kombination von Blechbearbeitungsverfahren (Tiefziehen und Schneiden) und spanende Bearbeitung erfolgen. Die konventionellen Umformverfahren sind im Wesentlichen durch das Umformvermögen des Werkstoffs und die Verfahrensgrenzen begrenzt. Der Messerwerkstoff 1.2379 ist ein hoch legierter Werkzeugstahl und hat bei Raumtemperatur eine geringe Duktilität bzw. ein kleines Umformvermögen, so dass die Umformbarkeit dieser konstruierten Blechmesser bei Raumtemperatur nicht möglich ist. Es kommt zu starker Rissbildung. Im Temperaturbereich um 300°C ist im Allgemeinen keine Umformung möglich. Es handelt sich um den Bereich der Blaubruchsprödigkeit. Bei 600°C ist die Umformbarkeit in einem unbeheizten Werkzeug nicht möglich. Die Proben versagen durch Risse im Bereich der Sickenkanten. Ursache könnte die noch nicht ausreichende Fließspannungssenkung sein.

Ab 700°C bis 1050°C ist die Umformung möglich, es gibt keine Risse und Falten. Allerdings verzogen sich die Proben nach der Kraftentlastung. Ursachen sind möglicherweise eine Entfestigung durch Erwärmung, Rückfederung und Texturinflüsse. Der Einfluss der Rückfederung auf die Formabweichung lässt sich minimieren. Durch Aufrechterhalten der Presskraft nach dem Erreichen der Ziehtiefe

können die textur- und rückfederungsbedingten Form- und Maßabweichungen reduziert werden. Der Verzug ist nach der Kraftentlastung nicht mehr sichtbar aber noch nicht vollständig beseitigt. Dieser verbleibende geringe Verzug behindert die nachfolgende spanende Bearbeitung nicht. Neben der Form- und Maßabweichung haben die im unbeheizten Werkzeug bei erhöhten Temperaturen umgeformten Teile einen Härteanstieg. Der Härteanstieg für die bei 700°C umgeformten Proben beträgt ca. 30 HV 2 und für die bei 850°C Proben beträgt er ca. 400 HV 2. Dies macht eine nachfolgende Wärmebehandlung erforderlich. Durch weitere spanende Bearbeitung, Fräsen, Drehen und Schleifen, wird die Fertiggeometrie hergestellt. Die unter diesen Bedingungen gefertigten Slicermesser zeigen im Vergleich zu den herkömmlichen Slicermessern eine bessere Steifigkeit. d. h. eine Gewichtsreduzierung ist möglich. Allerdings zeigen die gefertigten Blechmesser noch Maß- und Formabweichungen. Die Maßabweichung der Winkel von der Sollgeometrie kann durch Werkzeugmodifizierung minimiert werden. Die Formabweichung übersteigt das zulässige Maß. Die Formabweichung entsteht durch Rückfederung und Textureinfluss. Diese Einflüsse auf die Formabweichung konnten durch die abschließende spanende Bearbeitung reduziert aber nicht vollständig beseitigt werden. Um die Formabweichungen im zulässigen Rahmen zu halten, sind weitere Optimierungen in der Fertigungstechnologie erforderlich. Ein Ansatz für weitere Arbeiten wäre den Einfluss anderer Parameter, z.B. Sickenanordnung unter Berücksichtigung der Texturrichtung, Verwendung anderer Werkstoffe, Ausnutzung des Presshärteverfahrens, zu untersuchen.

Im Allgemeinen zeigt das bei 700 °C umgeformte Blechmesser im Vergleich zu dem bei 850 °C umgeformten Blechmesser bessere Eigenschaften hinsichtlich der Steifigkeit, der Form- und Maßabweichung und Gefügeeigenschaften und erfordert keine zusätzliche nachfolgende Wärmebehandlung.

Bei der Herstellung eines Slicermessers durch Blechumformung und nachfolgende spanende Bearbeitung beträgt die Werkstoffeinsparung am Beispiel einer Blechrunde von 470 mm Durchmesser und 4,8 mm Dicke ca. 79 % im Vergleich zur konventionellen Herstellung.

7 Literaturverzeichnis

- /Adl00/ T. Adler; B. Lux:
Neuartige Topologieoptimierung von Karosserieblechen
VDI - Berichte Nr. 1543, Düsseldorf, (2000)
- /Ast11/ Astor Schneidwerkzeuge
<http://www.astorblades.de/>, 01.03.2011
- /Bau83/ D. Bauer; F. J. Lenze:
Umformwirkungsgrad beim Tiefziehen von Edelstahl
Bänder Bleche Rohre 4(1983), Seite 96-98
- /Bec79/ H. Becker; M. Kübert:
Umformen dicker Bleche
Werkstatt und Betrieb 112 (1979) 10, Seite 709-720
- /Beh10/ B.-A. Behrens
Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen,
<http://www.graepel.de/fileadmin/download/pdf/InForm/Behrens.pdf>,
23.11.2010
- /Bie53/ C. Biezeno; R. Grammel:
Technische Dynamik, Dampfturbinen und Brennkraftmaschinen
Springer - Verlag, 1953
- /Ble11/ Blechbearbeitung und Automation im Metallbau-Handwerk
<http://www.hpihannover.de/ttnetzwerk/bestpractice/cd/PDFs/Innovationen/bp-northeim-innovation-blech-broschuere.pdf> /, 24.08.2011
- /Boe85/ E. Böhm
Anwendungsbeispiele zum Tiefziehen rotationssymmetrischer
Werkstückformen mit und ohne Niederhalter
Werkstatt und Betrieb 118(1985)6, Seite 359-363
- /Bre22/ Brearley-Schäfer:
Die Werkzeugstähle und ihre Wärmebehandlung
Springer-Verlag, 1922
- /Deo00/ E. Doege; K. Dröger; L.B. Elend:
Umformverhalten von Magnesiumblechen
Neuere Entwicklung in der Blechumformung, 2000

- /Doe06/ E. Doege†; B.-A. Behrens:
Handbuch der Umformtechnik,
Grundlagen, Technologien, Maschinen, Verlag - Springer, 2006
- /Doe10/ Dörrenberg Edelstahl GmbH
Hammerweg 7. D- 51766 Engelskirchen
www.doerrenberg.de, 07.06.2010
- /Dom86/ W. Domke:
Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung
Girardet - Verlag, 1986
- /Dre72/ E. J. Dreszik; A. Martini:
Technologische Untersuchungen zum Schalenpressen dicker
Stahlbleche
Fertigungstechnik und Betrieb 27(1972) 12, Seite 167-172
- /Dro99/ K. Dröder:
Untersuchungen zum Umformen von Feinblechen aus
Magnesiumknetlegierungen
Dissertation, Universität Hannover, 1999
- /Dub04/ Dubbel:
Taschenbuch für den Maschinenbau
Springer - Verlag, 2004
- /Dut99/ M. Dutilly; M. Fariello:
Hydromechanisches Umformen von Fahrzeugteilen simulieren
WB-Werkstatt und Betrieb * Band 132 (1999) Heft 10, Seite 22-23
- /Ebe65/ H. Ebertshäuser:
Technologie der Blechbearbeitung
Bänder, Bleche, Rohre, 6 (1965) Teil 1: Nr. 2, Seite 71-86, Teil 3: Nr. 6,
Seite 305 – 315
- /Emm04/ D. M. Emmrich:
Entwicklung einer FEM-basierten Methode zur Gestaltung von Sicken
für biegebeanspruchte Leitstützstrukturen im Konstruktionsprozess
Forschungsberichte, Institut für Produktentwicklung (IPEK) * Band 13
(2004) Seite 1-167

- /Esc04/ C. Escher; T. Henke:
Werkzeugwerkstoffe für die Verarbeitung von hochfesten
Stahlblechwerkstoffen
Neuere Entwicklungen in der Blechumformung, 2004
- /Fir11/ Firma ISS Solingen
Bahnhofstraße 15, 42651 Solingen, 01.12. 2011
<http://www.schneidwaren-solingen.de/fertigung/default.htm>
- /Fro79/ R. Frobin:
Anwendungsgrenzen und Vorteile des Tiefziehens ohne Niederhalter
Blech Rohre Profile 26(1979), Seite 120-128
- /Gab96/ G. Mandel:
Das Messer, Geschichte, Kunst und Kultur
Parkland – Verlag, 1996
- /Gar56/ F. Garbers; G. Gessner:
Beitrag zur Versteifung ebener Platten durch Sicken
Mitteilung der Forschungsgesellschaft Blechverarbeitung 7(1956) 13,
Seite 146-152
- /Gei04/ M. Geile:
Neue Entwicklung von Werkzeugstoffen für die Blechumformung
Neuere Entwicklung in der Blechumformung(2004), Seite125-141
- /Ger04/ J. Gerthsen:
Chemie für den Maschinenbau
Anorganische Chemie für Werkstoff und Verfahren
Universitätsverlag Karlsruhe, 2004
- /Gob06/ J. Gobrecht, E. Rumpler:
Werkstofftechnik- Metalle
Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2006
- /Got94/ R. Gottmann:
Hohlprägen tiefer Sicken
Blech Rohre Profile 41(1994)5, Seite 315-318
- /Haa89/ J. Haack:
Feinschneiden und Umformen kombinieren
Präzisionsfertigungstechnik aus der Schweiz, August 1989, Sonderteil
in Hanser – Fachzeitschrift, Seite 57-80

- /Hal02/ T. Hallfeldt:
 Untersuchung zur Beschreibung des Tief- und Streckziehverhaltens
 höherfester Feinbleche aus Stahlwerkstoffen
 Fortschr.-Ber. VDI Reihe 2 Nr. 602 Düsseldorf : VDI -Verlag, 2002
 196 Seiten, 116 Bilder, 7 Tabellen
- /Heh11/ P. Hehenberger:
 Computerunterstützte Fertigung: Eine Kompakte Einführung
 Springer - Verlag, 2011
- /Hei64/ E. Heinrich:
 Die Werkzeugstähle, Springer - Verlag, 1964
- /HeD09/ C. Held; J. Dadrich; R. Denninger; R. Schleich; K.A. Weidenmann; M.
 Liewald:
 Semi - empirische Berechnungsmethode zur Bestimmung des
 Grenzformänderungsdiagramms auf Basis mechanischer Kennwerte.
 Mat. – wiss. U. Werkstofftech. 2009, 40, No 11
- /Her97/ F. Herrmann:
 Rechnerische Untersuchung von ausgesteiften Karosserieblechen
 hinsichtlich ihres Steifigkeitsverhaltens und der auftretenden
 Spannungskonzentration unter Last
 Dissertation RWTH Aachen, Aachen, 1997
- /Her08/ H. Hermann; H. Bargel; G. Schulze:
 Werkstoffkunde. VDI- Buch
 Springer - Verlag, 2008
- /Hes95/ U. Hesberg; Isernhagen:
 Auslegung konischer Tiefziehteile mit elementaren Methoden
 Fortschritt-Berichte VDI Reihe 1: Konstruktionstechnik/
 Maschinenelemente. Nr. 261 (1995)
- /Ind11/ Industriemesser
<http://de.wikipedia.org/wiki/Industriemesser>, 01.12.2011
- /Kie55/ O. Kienzler:
 Die Versteifung ebener Böden und Wänden aus Blech
 Mitteilung der Forschungsgesellschaft Blechverarbeitung 6(1955) 7,
 Seite 77-83

- /Kla07/ K. Ehrlenspiel:
Integrierte Produktentwicklung,
Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit
Hanser – Verlag, 2007
- /Kle07/ B. Klein:
Leichtbaukonstruktion
Berechnungsgrundlagen und Gestaltung
Vieweg - Verlag, 2007
- /Klo08/ F. Klocke; W. König:
Fertigungsverfahren 1. Drehen, Fräsen, Bohren
VDI- Buch, Springer-Verlag, 2008
- /Kol04/ R. Kolleck; D. Steinhöfer; A. Feindt; F.J. Lenze:
Warmumformung und Kaltumformung- zwei ergänzende Verfahren für
den Karosserieleichtbau
Neuere Entwicklung in der Blechumformung (2004) Seite 245-254
- /Klu79/ S. Kluge:
Kraftbedarf für die Herstellung trapezförmiger Sicken durch
Prägesicken
Umformtechnik, 13(1979)2, Seite 39-46
- /Kug09/ H. Kugler:
Umformtechnik
Umformen metallischer Konstruktionswerkstoffe
Hanser - Verlag, 2009
- /Kue80/ M. Kübert:
Tiefziehen dicker Aluminiumbleche
VDI-Z 122(1980) Nr. 19 Okt. Seite 246 – 248
- /Kue81/ M. Kübert:
Verfahrensbeschreibung und Anwendungsbeispiele zum Tiefziehen
dicker Bleche mit und ohne Faltenhaltung
- /Kue82/ M. Kübert:
Niederhalterloses Tiefziehen kreiszylindrischer Näpfe aus Mittel- und
Grobblech unter Berücksichtigung der Anwendung eines Gegenhalters
Dissertation, Darmstadt 1982

- /Kuw80/ M. Kübert; R. Wieland:
Grundlagen und Anwendung des Tiefziehens von Mittel- und
Grobblech.1. Umformtechnisches Kolloquium, IFU Darmstadt, 1980
- /Lan83/ K. Lange; M. Widmann:
Sickenherstellung beim Ziehen von großen Blechteilen
Forschungsbericht Vr. 21, 1983, Deutsche Forschungsgesellschaft für
Blechverarbeitung e. V.
- /Lan84/ K. Lange:
Umformtechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft
Band 1: Grundlagen
Springer-Verlag, 1984
- /Lan90/ K. Lange:
Umformtechnik, Handbuch für Industrie und Wissenschaft
Band 3: Blechbearbeitung
Springer-Verlag, 1990
- /Lan02/ R. Lands:
Messerklängen und Stahl
Technologie Betrachtung von Messerschneiden
Wieland-Verlag, 2002
- /Lan08/ K. Lange; M. Kammerer; K. Pöhlandt; J. Schöck:
Fließpressen
Wirtschaftliche Fertigung metallischer Präzisionswerkstücke
VDI-Buch Springer-Verlag, 2008
- /Lud09/ P. Ludwik:
Elemente der technologischen Mechanik
Springer-Verlag, 1909
- /Oeh70/ G. Oehler:
Sickenversteifte Blechkonstruktion
Konstruktion 22 (1970) 12, Seite 481-487
- /Oeh71/ G. Oehler; E. Draeger:
Versteifen von Stahlblechteilen
Merkblatt 350, Beratungsstelle für Stahlverwendung, Düsseldorf 1971

- /Oeh72/ Oehler, G.; Weber, A.:
Steife Blech und Kunststoffkonstruktionen
Springer-Verlag, 1972
- /Off1/ Offenlegungsschrift
DE 10155048 Slicermesser, B26 B25/00, B26D 1/00
Patentinhaber: Weber Maschinenbau GmbH & Co. Kg, Seite 1-5
- /Off2/ Offenlegungsschrift
23 06 822 Scheibenmesser, B26 d, 1/14, Seite 1-14
- /Off3/ Offenlegungsschrift
DE 44 29 046 A1 Slicermesser, B26 D 1/00, Seite 1-8
- /Opt11/ Optimierung des Einsatzes der FEM Simulation für die neuartige
Lamellenwerkzeugtechnik
- /Ott71/ M. Otto:
Erweiterung der Umformgrenzen beim Tiefziehen und Kragenziehen
durch Nachschieben von Werkstoff
Dissertation genehmigt durch die Fakultät für Maschinenbau der Otto-
von-Guericke-Universität Magdeburg (1971)
- /Pah93/ G. Pahl; W. Beitz:
Konstruktionslehre, Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung
Methoden und Anwendung, Springer - Verlag, 1993
- /Pet72/ W. Petzold:
Grenzen bei der Herstellung von Versteifungssicken durch Rollen
Fertigungstechnik und Betrieb * Band 22 (1972) Heft 5, Seite 301-304
- /Pet91/ W. Petzold:
Steifigkeit ist Trumpf
Maschinenmarkt, Würzburg 97(1991)38, Seite 20-25
- /PeE96/ W. Petzold; A. Eckert:
Untersuchungen zur umformtechnischen Erzeugung von partiellen
Materialanhäufungen an scheibenförmigen Dickblechteilen
Abschlußbericht Forschungsvorhaben EFB / AiF 9423 B;1996
- /Pet96/ W. Petzold; A. Eckert:
Erzeugung partieller Materialanhäufung an scheibenförmigen
Dickblechen
Blech Rohre Profile 43 (1996) Seite 451-454

- /PeS96/ W. Petzold; U. Scheler:
FEM-Simulation in der Dickblechumformung
Blech Rohre Profile 43(1996)3. Seite 122 – 127
- /Pet98/ W. Petzold:
Leichtbau durch innovative Blechumformung
Tagungsband zur Fachtagung “Innovation und Tradition“
Magdeburg, 1998
- /Pet99/ W. Petzold; D. Reps:
Herstellung von Durchzügen an Blechteilen
Blech Rohre Profile 5/1999, Seite 54 – 60
- /Moe08/ E. Moeller:
Handbuch Konstruktionswerkstoffe
Auswahl, Eigenschaften, Anwendung
Hanser - Verlag, 2008
- /Nic89/ Nichtrostende Stähle,
Eigenschaften. Anwendung. Normen
Herausgeber: Edelstahl-Vereinigung mit Verein Deutscher
Eisenhüttenleute. Düsseldorf, Verl. Stahleisen, 1989
- /Nn77/ N. N.:
Armco Researchers Find Colled Punch Sharply Improves Drawability of
Carbon Steel
Metal Stamping, Volume 11, No. 1, January (1977).American Metal
Stamping Association, Ohio/USA
- /Rei61/ M. Reihle:
Ein einfaches Verfahren zur Aufnahme von Fließkurven von Stahl bei
Raumtemperatur
Arch. Eisenhüttenwesen 32(1961), 331-336
- /Rol02/ K. Roll; M. Rohleder:
Einsatz und Potenzial der Blechumformsimulation im
Entwicklungsprozess von Karosserieblechformteilen
17. Umformtechnisches Kolloquium. Hannover, 27.2.-28.2.2002

- /Rol07/ K. Roll; K. Wiegand:
Simulation der Blechumformung von Stahl und Aluminium-
Möglichkeiten und Grenzen. Umformtechnik Stahl und NE- Werkstoffe
„Der Zukunft Form geben“,
ASK, Achener Stahlkolloquium, 22 (2007) Seite 101- 109
- /Rol11/ K. Roll; T. Lemke; K. Wiegand:
Simulationsunterstützte Kompensation der Rückfederung
2004 copyright bei DYNAmore GmbH
[http://www.dynamore.de/documents/papers/forum2004/
simulationsgestutzte-kompensation-der-ruckfederung](http://www.dynamore.de/documents/papers/forum2004/simulationsgestutzte-kompensation-der-ruckfederung), 10.08.2011
- /Roo05/ E. Roos; K. Maile:
Werkstoffkunde für Ingenieure
Grundlagen, Anwendung, Prüfung
Springer-Verlag, 2005
- /Sch79/ D. Schmöckel:
Fertigung von Werkstücken aus dicken Blechen
Seminar „Neuere Entwicklung in der Massivumformung“, IFU Stuttgart
26 - 27. Juni 1979
- /Sch85/ D. Schmöckel; E. Böhm; H. -E. Engel:
Möglichkeiten der Umformung von Mittel- und Grobblech durch
Tiefziehen zur Substitution von Guss- und Schmiedeprodukten
Vortragsheft 3. Fachtagung Gestaltung von Fertigungsprozessen im
Maschinenbau, Magdeburg 1985
- /Sch90/ H.-D. Schacher:
Fertigung von Werkstücken aus dickem Blech durch Umformen und
Schneiden
Blech Rohre Profile 27(1890)10, Seite 657-662
- /Sch98/ W. Schatt; E. Simmchen; G. Zouhar:
Konstruktionswerkstoffe des Maschinen- und Anlagenbaues
1998 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
- /Sch02/ D. Schwarz:
Auslegung von Blechen mit Sicken (Sickenatlas)
FAT-Schriftenreihe, Forschungsvereinigung Automobiltechnik * Band
168 (2002) Seite 1-255

- /Sch03/ D. Schwarz:
 Gestaltung optimierter Sickenbilder für flächige Strukturen unter Einsatz
 numerischer Optimierungsverfahren
 Schriftenreihe Automobiltechnik, ika, RWTH Aachen * Band 64 (2003)
 Seite 1-185, Aachen: Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen (fka)
- /Sim89/ H. Simon:
 Rechnerunterstützte Ziehteilauslegung mit elementaren
 Berechnungsmethoden
 Dissertation, Universität Hannover, (1989)
- /Ste94/ J. Stäves:
 Beurteilung der Topografie von Blechen im Hinblick auf die Reibung bei
 der Umformung
 Dissertation, TU Darmstadt, 1994
- /Ste04/ R. Steinbuch:
 Simulation im konstruktiven Maschinenbau,
 Anwendung von FEM- und verwandten Systemen in der Konstruktion
 Carl Hanser – Verlag, 2004
- /Sue06/ D. Süße:
 Dickblechumformung rotationssymmetrischer Teile
 Dresden: TUD press Verlag der Wissenschaften(2006) Seite 1-192
- /Web11/ Weber:
<http://www.weberweb.com/de/produkte/slicer/505.html>, 2011
- /Wei07/ W. Weißbach:
 Werkstoffkunde, Struktur, Eigenschaften, Prüfung
 Vieweg+Teubner-Verlag, 2007
- /Wes06/ E. Westkämper; H.J. Warnecke:
 Einführung in der Fertigungstechnik
 Vieweg+Teubner - Verlag, 2006
- /Wge07/ C. Wegst / M. Wegst:
 Stahlschlüssel
 Wegst – Verlag, 2007

- Wid84/ M. Widmann:
Herstellung und Versteifungswirkung von geschlossenen
Halbrundsicken
Berichte aus dem Institut für Umformtechnik * Band 76 (1984)
Seite 1-149
- /Wid85/ M. Widmann:
Optimierte Herstellung und Versteifungswirkung von geschlossenen
Halbrundsicken
Blech, Rohre, Profile * Band 32 (1985) Heft 3, Seite 125-131
- /Wie05/ R. Wiegratz:
Entwicklung der ultraleichten Slicermesser auf der Grundlage neuer
Verbundmaterialien und Erstellung der Konstruktionsgrundlagen
TU-Cottbus, 2005
- /Vie05/ B. Viehweger; G. Richter; A. Karabet:
Tiefziehen von Blechen der Mg-Legierung AZ31, hergestellt aus
stranggegossenem Ausgangsmaterial
Metall 59. Jahrgang 4/ 2005 Seite 798- 803
- /Zie72/ G. Zielasko:
Tiefziehen von Blechen und Bändern aus Kupfer und Messing
Bänder Bleche Rohre 13(1972), Seite 331-337

Normen und Richtlinien

DIN 8584-3:
Fertigungsverfahren Zugdruckumformen - Teil 3:
Tiefziehen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe

DIN EN ISO: 4957 :
1999 Werkzeugstähle

DIN EN 10002-1:
Metallische Werkstoffe - Zugversuch - Teil 1:
Prüfverfahren bei Raumtemperatur

DIN ISO 10275:

Metallische Werkstoffe – Blech und Band- Bestimmung des
Verfestigungsexponenten im Zugversuch (ISO 10275:2007)

ISO 10113: 1991

Metallic materials- Sheet and strip- Determination of plastic strain ratio

VDI - Richtlinie 2221:

Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und
Produkte. Düsseldorf: VDI - Verlag 1986

VDI - Richtlinie 2222 Blatt 1

Konzipieren technischer Produkte

Düsseldorf: VDI - Verlag 1977

DIN EN ISO 6507

Metallische Werkstoffe-Härteprüfung nach Vickers

DIN EN 10088-1

Nichtrostende Stähle

DIN EN 10079

Begriffsbestimmung für Stahlerzeugnisse

DIN 8582

Fertigungsverfahren Umformen

Einordnung, Unterteilung, Begriffe, Alphabetische, Übersicht (2003)