



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Islam Arsanov

Entwicklung eines Laborversuchs zum Gleichkanalwinkelpressen und Ausle- gung eines Versuchswerkzeugs

Islam Arsanov

**Entwicklung eines Laborversuchs zum
Gleichkanalwinkelpressen und Auslegung
eines Versuchswerkzeugs**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

im Studiengang Maschinenbau und Produktion
am Department Maschinenbau und Produktion
der Fakultät Technik und Informatik
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Enno Stöver

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Benjamin Remmers

Abgabedatum: 24.10.2024

Zusammenfassung

Islam Arsanov

Thema der Bachelorthesis

Entwicklung eines Laborversuchs zum Gleichkanalwinkelpressen und Auslegung eines Versuchswerkzeugs

Stichworte

Gleichkanalwinkelpressen, Equal Channel Angular Pressing (ECAP), Equal Channel Angular Extrusion (ECAE)

Kurzzusammenfassung

Diese Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung eines Laborversuchs zum Gleichkanalwinkelpressen (ECAP) sowie der Konstruktion und Auslegung eines passenden Versuchswerkzeugs. Es werden theoretische Grundlagen des ECAP-Verfahrens erarbeitet, Annahmen für mögliche Gleichungen der Kräftebestimmung gemacht, potenzielle Lernziele für einen Laborversuch definiert und eine Versuchsbeschreibung für das Wahlpflichtmodul Umformtechnik erstellt.

Islam Arsanov

Title of the paper

Development of a laboratory test for co-channel angular pressing and design of a test tool

Keywords

Equal Channel Angular Pressing (ECAP), Equal Channel Angular Extrusion (ECAE)

Abstract

This bachelor's thesis deals with the development of a laboratory test for equal channel angle pressing (ECAP) as well as the construction and design of a suitable test tool. The theoretical principles of the ECAP process were developed, assumptions were made for possible formulas for determining forces, potential learning objectives for a laboratory test were defined and a test description for the compulsory elective module in forming technology was created.

Danksagung

Ich möchte mich herzlichst bei Prof. Dr.-Ing. Enno Stöver und Dipl.-Ing. Benjamin Remmers für die Möglichkeit bedanken diese Arbeit unter solch einer wunderbaren Betreuung zu schreiben.

Ebenso einen großen Dank an meine Kommilitonen die mich durch mein Studium begleitet haben.

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
1 Einleitung und Zielsetzung.....	1
2 Stand der Technik und Motivation	1
3 Theorie des Gleichkanalwinkelpressens	2
3.1 Der Prozess des Gleichkanalwinkelpressens	2
3.2 Prozessparameter beim Gleichkanalwinkelpressens.....	3
3.3 Änderungen der mechanischen Eigenschaften durch das Gleichkanalwinkelpressens	5
3.4 Grund der Verfestigung	6
4 Kräfte Bestimmung für die Auslegung des Werkzeugs	8
4.1 Welche Kräfte bestimmt werden müssen	8
4.2 Ansatz zur Kraftbestimmung.....	8
4.2.1 Gleichung für Winkel η	9
4.2.2 Annahme einer Gleichung für die Reibspannung τ	10
4.2.3 Annahme einer Gleichung für die Schubspannung k	11
4.3 Beispielrechnung für die Plausibilität	12
4.4 Vergleich der berechneten Kräfte	13
4.5 Presskraft für die Umformproben	13
5 Konstruktion und erste Auslegung eines Versuchswerkzeugs	14
5.1 Definition der Anforderungen an das Versuchswerkzeug in Form von User Stories	14
5.2 Konstruktive Randbedingungen	15
5.3 Mögliche Werkzeugdesigns	16
5.3.1 Stempel	17
5.3.2 Werkzeugausführung 1.....	18
5.3.3 Werkzeugausführung 2.....	20
5.3 Auswahl des optimaleren Designs	21
5.4 Nachweisrechnungen für das konstruierte Werkzeug	22
5.4.1 Werkzeugmaterialrechnung	22

5.4.2 Schraubenrechnung.....	23
5.4.3 Eulersche Knickfall für den Stempel	24
5.4.4 Auslegung vom Hydraulikzylinder	26
5.4 Herstellprozess des Werkzeugs	27
5.5 Anfragen an Werkzeughersteller	27
6 Laborversuch	28
6.1 Learning Outcomes	28
6.2 Versuchsbeschreibung	28
7 Fazit.....	33
Literaturverzeichnis	34
Anhang	36

Symbolverzeichnis

A_p	mm^2	Stempelquerschnittsfläche
D_0	mm	Durchmesser der Probe
F_{KK}	N	kritische Knickkraft
F_N	N	Normalkraft
F_{SK}	N	kritische Schraubenkraft
F_s	N	Stempelkraft
H_K	mm	Durchmesser des Kanals
L_A	mm	Länge des Ausgangskanals
L_{ES}	mm	Rundstablänge
L_K	mm	Länge des Kanals
L_P	mm	Länge der Probe
R_e	$\frac{N}{mm^2}$	Streckgrenze
R_m	$\frac{N}{mm^2}$	Zugfestigkeit
$R_{p0.02}$	$\frac{N}{mm^2}$	Elastizitätsgrenze
d_{ES}	mm	Durchmesser Rundstabes
d_K	mm	mittlere Korndurchmesser
k_f	$\frac{N}{mm^2}$	Fließspannung des Probenmaterials
r_A	mm	Radius des Ausgangskanal
μ_H		Haftreibwert
μ_w		Reibbeiwert
σ_0	$\frac{N}{mm^2}$	Startspannung für die Versetzungsbewegung
A	m^2	Fläche
Θ		die Hälfte des Winkels zwischen den zwei Kanälen
E	$\frac{N}{mm^2}$	Elastizitätsmodul
F	N	Kraft
I	m^4	Flächenträgheitsmoment
K	$MPa \cdot \sqrt{mm}$	Korngrenzwiderstand
Ra		mittlere Rauheit
S		Knicksicherheit
k	$\frac{N}{mm^2}$	Schubspannung
n		Anzahl an Schrauben
p	$\frac{N}{mm^2}$	Stempelspannung
s	mm	Knicklänge
β		Knicklängenbeiwert
η		Winkel zwischen Werkzeuggrenze und den Gleitlinien
σ	R_m	allgemeine Spannung
τ	$\frac{N}{mm^2}$	Reibspannung

Abkürzungsverzeichnis

ECAP	Equal Channel Angular Pressing
IPV	intensiven plastischen Verformungen
STL	Stereolithografie Datei

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Gleichkanalwinkelpressens [22]	2
Abbildung 2 : Routen beim Gleichkanalwinkelpressens [5]	3
Abbildung 3: Schematische Darstellung der einfachen Scherspannung [31]	3
Abbildung 4: Querschnitt eines Gleichkanalwinkelpresswerkzeugs mit eingezeichneten Gleitlinien [15].....	9
Abbildung 5: Presskanal in einer Matrixhälfte [12]	15
Abbildung 6: Umformstempel	17
Abbildung 7: Werkzeugausführung 1	18
Abbildung 8: Führungsbohrungen	19
Abbildung 9: Werkzeugausführung 2	20
Abbildung 10: Auswerfer	21

1 Einleitung und Zielsetzung

Beim Gleichkanalwinkelpressen (englisch: Equal Channel Angular Pressing, ECAP) handelt es sich um ein Umformverfahren, das Metalle durch extreme plastische Verformung in ultrafeinkörnige Strukturen überführt. Dabei werden die mechanischen Eigenschaften eines Materials verändert, ohne eine Änderung des Probenquerschnittes zu verursachen.

Das Verfahren gehört zu der Gruppe intensiven plastischen Verformungen (IPV) (englisch: severe plastic deformation), welche die Herstellung von ultrafeinkörnigen Werkstoffen ermöglicht. Unter anderem sind weitere Verfahren dieser Gruppe die Hochdrucktorsion, Drehkanalwinkelpressen, Drehkanalmehrwinkelpressen, zyklische Extrusion und Kompression, Akkumulationswalzverbindung. [2]

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Laborversuchs, der das Gleichkanalwinkelpressen erläutern soll. Dies umfasst die theoretische Erarbeitung des Verfahrens, die Konstruktion und Auslegung eines Umformwerkzeugs sowie die Erstellung einer Versuchsbeschreibung. Der Laborversuch soll den Studierenden die Möglichkeit geben, die Auswirkungen von Kaltverfestigung und Kornfeinung an Proben anhand praktischer Durchführung des Gleichkanalwinkelpressen zu beobachten.

2 Stand der Technik und Motivation

Die Motivation zur Anwendung des Gleichkanalwinkelpressens liegt in den vielen Vorteilen, die dieses Verfahren gegenüber anderen Methoden zur Festigkeitssteigerung mittels Kornstrukturverfeinerung bietet. Im Vergleich zu traditionellen Thermomechanischen Prozessen, wie jegliche Arten von Glühen oder einige Metallumformprozesse, wie dem Warmwalzen, ermöglicht das Gleichkanalwinkelpressen eine Verfeinerung der Kornstruktur bis in den ultrafeinen oder nanokristallinen Bereich.

Materialien, die durch Gleichkanalwinkelpressen verarbeitet wurden, zeigen eine signifikante Erhöhung der Festigkeit, ohne dass die Duktilität stark verringert wird. Im Vergleich mit anderen Umformverfahren ist der Prozess kostengünstig und es erfordert keine komplexen Technologien und kann mit einfachsten Universalpressen, welche über genug Kraft verfügen, durchgeführt werden. Und obwohl das Gleichkanalwinkelpressen ein im Vergleich sehr einfacher Prozess ist, kann durch Ändern der Prozessparameter, gezielt die gewünschten Eigenschaften im Material angepasst werden. [5]

Trotz dieser Vorteile findet das Verfahren nur in der Forschung statt und hat bis zum Stand dieser Arbeit noch keinen Eintritt in die breite Wirtschaft gefunden. Es gibt jedoch viele Forschungseinrichtungen weltweit, die an der Forschung und Anwendung vom Gleichkanalwinkelpressen arbeiten. Zahlreiche wissenschaftliche Publikationen und Veröffentlichungen aus Universitäten und Forschungseinrichtungen berichten über die vielen positiven Ergebnissen des Gleichkanalwinkelpressens, insbesondere hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften der verarbeiteten Werkstoffe. [1,2,4,5,8,9]

In Deutschland ist unter anderem das Helmholtz-Zentrum Hereon bekannt für seine Arbeit im Bereich der Werkstoffforschung, einschließlich der Anwendung von ECAP-Verfahren. Forschungsarbeiten wie die von Victoria-Hernandez et al. untersuchten den Einfluss des Gleichkanalwinkelpressens auf die Mikrostruktur und mechanischen Eigenschaften von Aluminiumlegierungen. [27]

Auch an der Technische Universität München wird in einer Dissertation von Gruber das Gleichkanalwinkelpressen als möglichen Prozess für die Festigkeitserhöhung beschrieben, welches Aluminiumwerkstoffe mehr industrielle Anwendbarkeit im Leichtbau gibt. [11]

Im Jahre 2008 veröffentlichte Hellmig aus der Technischen Universität Clausthal seine Habilitationsschrift über das Gleichkanalwinkelpressen und dessen Einwirkungen auf verschiedene metallische Werkstoffe. In seiner Publikation sind ebenfalls erste Arbeiten mit einer Simulation des Gleichkanalwinkelpressens zu finden. [12]

3 Theorie des Gleichkanalwinkelpressens

In diesem Kapitel werden die Grundlagen des Prozesses erörtert, unter anderem Prozessparameter dargestellt und dessen Wirkung auf mechanische Eigenschaften behandelt.

3.1 Der Prozess des Gleichkanalwinkelpressens

Das Gleichkanalwinkelpressen beginnt mit der Schmierung des Werkstücks, das in der Regel stabförmig oder quadratisch ist. Das Werkstück wird in eine Matrize eingelegt, deren Hauptbestandteil aus zwei Kanälen besteht, die denselben Querschnitt aufweisen und in einem bestimmten Winkel (typischerweise zwischen 90° und 120°) zueinander stehen. Sobald das Werkstück in der Vorrichtung positioniert ist, wird der Pressvorgang gestartet.

Der schematische Aufbau des Prozesses ist in der Abbildung 1 dargestellt.

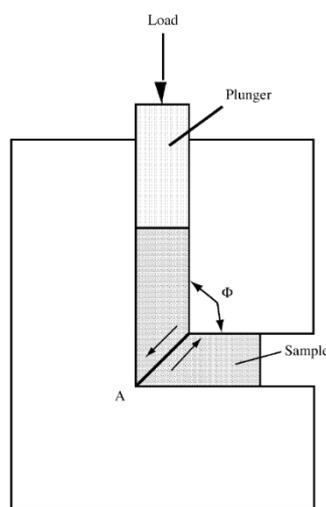
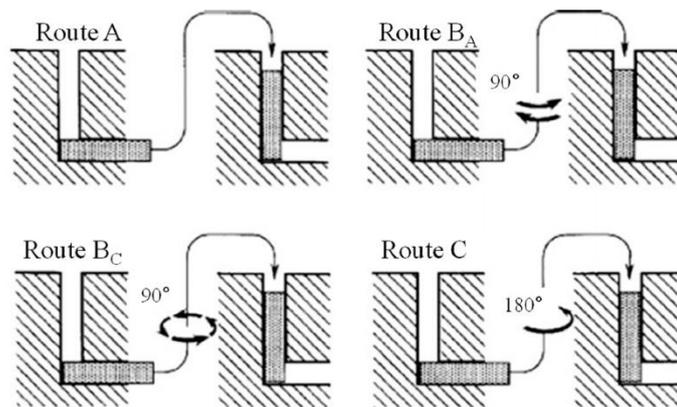


Abbildung 1: Schematischer Aufbau des Gleichkanalwinkelpressens [22]

Das Werkstück wird mit Druckkräften durch die Kanäle des Werkzeugs gedrückt. Während dieses Vorgangs erfährt das Material eine starke plastische Verformung, da es gezwungen wird, den Kanalwinkel zu durchlaufen. Hierbei tritt im Material eine einfache Scherung auf [10]. Einfache Scherung liegt vor, wenn parallele Ebenen in einem Material parallel bleiben und einen konstanten Abstand zueinander halten, während sie sich relativ zueinander bewegen.

Ein charakteristisches Merkmal des Gleichkanalwinkelpressens ist die Möglichkeit, den Prozess mehrmals zu wiederholen. Das Wiederholen des Prozesses wird in definierten Routen durchgeführt. Diese Routen ermöglichen es dem Werkstück, eine feinere und gleichmäßigere Kornstruktur zu erreichen, indem vorgegeben wird, wie das Werkstück im Durchgang ausgerichtet werden soll. Die Routen sind in Abbildung 2 dargestellt.



(b)

Abbildung 2 : Routen beim Gleichkanalwinkelpressens [5]

Bei der Route A wird das Werkstück nach jedem Durchgang durch den Kanal nicht gedreht und behält seine Ausrichtung bei. Die Routen B_A und B_C sind ähnlich, da bei beiden das Werkstück um 90° gedreht wird. Der Unterschied besteht darin, dass bei Route B_A die Drehrichtung gewechselt wird und bei Route B_C immer in dieselbe Richtung gedreht wird. Bei der Route C wird das Werkstück nach jedem Durchgang um 180° gedreht. [12]

3.2 Prozessparameter beim Gleichkanalwinkelpressens

Beim Gleichkanalwinkelpressen gibt es eine Anzahl von Parameter, die die mechanischen Eigenschaften des umgeformten Werkstückes beeinflussen können. Der Winkel zwischen den Kanälen und der Innen- und Außenradius der Kanäle der Pressmatrize zählen zu den wichtigsten Parametern. Der Winkel und die Radien zusammen sind entscheidend für die Intensität und Homogenität der Kornfeinung. Bei scharfen Winkeln im Bereich von 90° und scharfen Eckradien von $R = 0$ konzentriert sich die Verformung entlang einer spezifischen Scherebene, wie in Abbildung 3 zu sehen ist.

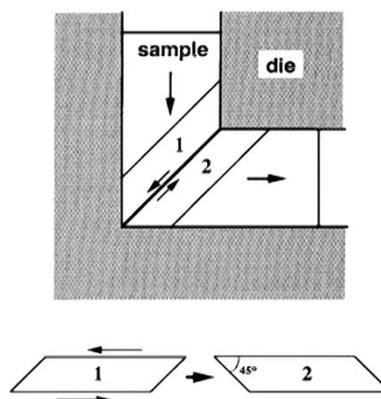


Abbildung 3: Schematische Darstellung der einfachen Scherspannung [31]

In dieser Zone tritt lokal eine sehr starke Dehnung und Umformung auf, was zu einer intensiven Kornfeinung und Verfestigung führt. Dies hat den Nachteil, dass es zu inhomogenen Mikrostrukturen führen kann, da die Umformung nur entlang der Scherzone stattfindet. Bei größeren Winkeln im Bereich von 120° bis 150° und Eckradien von ungefähr $R = 10 \text{ mm}$ [21] ist das Problem der Inhomogenität geringer, da die Scherverformung gleichmäßiger über das Werkstück verteilt ist. Der Eckwinkel ermöglicht eine größere Scherzone, wodurch mehr Material gleichmäßig umgeformt wird. Dies hat den Nachteil dass die Kornfeinung weniger stark ausgeprägt ist und somit eine geringe Festigkeit erreicht wird. [29]

Ein charakteristisches Merkmal des Gleichkanalwinkelpressens ist die Wiederholbarkeit der Umformung. Jeder weitere Durchgang verursacht eine weitere intensive plastische Verformung, was zu einer weiteren Verfeinerung der Kornstruktur führt und die Festigkeit erhöht. Mit jedem Durchgang verbessert sich auch die Homogenität der Kornstruktur, da es bei wenigen Durchgängen vorkommen kann, dass die Umformung nicht gleichmäßig im gesamten Material stattfindet. Mit einer höheren Anzahl an Durchgängen wird sichergestellt, dass die mechanischen Eigenschaften im gesamten Material konsistenter werden. Allerdings sollten nicht zu viel Umformungen durchgeführt werden, da die Duktilität darunter leiden kann. [29] Wie viele Umformungen, als zu viele gelten, ist Material abhängig und kann nicht allgemein definiert werden.

Mit der richtigen Wahl der Prozessrouten kann ebenfalls eine bessere Homogenität im Material erreicht werden. Verschiedene Routen führen zu unterschiedlichen Kornorientierungen.

Bei Route A wird das Werkstück nach den Durchgängen nicht gedreht, sodass immer in dieselbe Richtung umgeformt wird. Diese Route führt tendenziell zu einer weniger homogenen Kornstruktur. Es können stark orientierte Körner entstehen, was zu anisotropen mechanischen Eigenschaften führen kann. Die Kornfeinung ist in der Regel weniger stark ausgeprägt als bei den anderen Routen, da die Scherung im Material nicht gleichmäßig verteilt ist. Bei **Route B** wird das Werkstück nach jedem Durchgang um 90° um die Längsachse gedreht, entweder oszillierend oder immer in dieselbe Richtung. Die Umformung erfolgt abwechselnd in zwei senkrecht zueinanderstehenden Richtungen, was zu einer gleichmäßigeren Verformungsverteilung führt. Die Scherkräfte wirken bei den Durchgängen in verschiedenen Richtungen, was zu einer intensiveren Kornfeinung und verbesserter Homogenität der mechanischen Eigenschaften führt. **Bei Route C** wird das Werkstück nach jedem Durchgang um 180° gedreht, wodurch die Verformung bei jedem Durchgang umgekehrt wird. Route C bietet die gleichen Vorteile der Kornfeinung und Homogenität wie Route B, allerdings stärker ausgeprägt. Die Verformungsrichtung wird nach jedem Durchgang durch die 180° -Drehung umgekehrt, was zu starken Wechselwirkungen führt, da die neue Verformungsebene immer der vorherigen entgegenwirkt. Diese Wechselwirkungen bewirken eine sehr intensive Kornfeinung und eine gleichmäßige Verteilung der mechanischen Eigenschaften. [10,12,29]

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Reibung und die dadurch beeinflusste Temperatur während des Umformprozesses. Die Temperatur hat einen großen Einfluss auf die Umformbarkeit von Metallen. Bei größeren Temperaturen wird das Werkstück duktiler, so dass es die starken Umformungskräfte besser aufnehmen und der Rissbildung entgegenwirken kann. Hohe Temperaturen wirken jedoch der Kornfeinung entgegen, da längere Abkühlzeiten zu größeren und gleichmäßigeren Korngefügen führen, was eine geringere Festigkeit, aber eine bessere Homogenität zur Folge hat. Bei niedrigen Temperaturen verhält sich das Material spröder, die Duktilität wird stark verringert und Rissbildungsrisiko steigt. [12,29]

3.3 Änderungen der mechanischen Eigenschaften durch das Gleichkanalwinkelpressens

Beim Gleichkanalwinkelpressen wird das Werkstück intensiv plastisch umgeformt, was Veränderungen in den mechanischen Eigenschaften bewirkt. Durch die Scherkräfte, die auf das Werkstück wirken, kommt es zu einer Zunahme der Versetzungsdichte im Material. Die erhöhte Versetzungsdichte führt zu einer bemerkbaren Verfestigung des Werkstoffs, da die Bewegungen der Versetzungen, die für die plastische Verformung verantwortlich sind, zunehmend behindert werden.

Ein weiterer Effekt beim Gleichkanalwinkelpressens ist die Kornfeinung. Mithilfe der Scherkräfte werden die ursprünglichen groben Körner in immer kleinere Körner zerkleinert, was Auswirkungen auf die Festigkeit und auch die Duktilität vom Material hat. Die kleineren Körner bieten dem Material mehr Korngrenzen, die ebenfalls die Bewegungen von Versetzungen erschweren und somit direkt die Festigkeit erhöht. Die Änderung der Duktilität steht jedoch in Abhängigkeit zur Quantität der Kornfeinung. Eine moderate Kornfeinung hat den Effekt, dass plastische Deformationen durch die feinen Körner besser im Material verteilt werden, was sich positiv auf die Duktilität auswirkt. Eine extreme Kornfeinung, insbesondere bei sehr kleinen Körnern, kann hingegen die Duktilität verschlechtern. Es wird vermutet, dass durch die vielen Korngrenzen die Versetzungsbewegungen stark behindert werden, was die plastische Verformbarkeit des Materials einschränken kann. [26]

Zusätzlich zur Erhöhung der Festigkeit und Duktilität kann das Gleichkanalwinkelpressen auch die isotropen Eigenschaften des Materials verbessern. Durch das wiederholte Umformen und der Möglichkeit, verschiedene Pressrouten zu nutzen, wird die Mikrostruktur homogener und die mechanischen Eigenschaften im Material gleichmäßiger verteilt. Dies ist ein wesentlicher Vorteil gegenüber anderen Umformprozessen, bei denen häufig anisotrope Mikrostrukturen entstehen, die zu ungleichmäßigen mechanischen Eigenschaften führen können.

3.4 Grund der Verfestigung

Beim Gleichkanalwinkelpressen kommt es zur Verfestigung des Metalls aufgrund der Entstehung und Wechselwirkung von Versetzungen im Kristallgitter des Materials. Versetzungen sind linienförmige Baufehler im Kristallgitter, die entweder als Stufenversetzungen, Schraubenversetzungen oder eine Mischung aus beiden auftreten. Diese Versetzungen spielen eine zentrale Rolle bei der plastischen Verformung von Metallen, da sie sich unter Krafteinwirkung durch das Kristallgitter bewegen und so die Verformung ermöglichen. [17]

Während des Gleichkanalwinkelpressens wird das Material extrem plastisch verformt, was eine massive Zunahme der Versetzungsdichte zur Folge hat. In einem weichen, geglähten Metall beträgt die Versetzungsdichte etwa $10^6 \frac{mm}{mm^3}$, kann jedoch durch plastische Verformung, wie sie beim Gleichkanalwinkelpressen auftritt, auf bis zu $10^{12} \frac{mm}{mm^3}$ ansteigen [8]. Diese hohe Versetzungsdichte führt dazu, dass die Versetzungen einander behindern, da ihre Spannungsfelder sich gegenseitig beeinflussen. Ebenso kommt es zu einem Aufstau von Versetzungen an Hindernissen, wie beispielsweise an Korngrenzen, Einschlüssen oder andere Versetzungslinien. [3,12]

Korngrenzen sind besonders wirksame Hindernisse, da sie eine energetisch ungünstige Struktur darstellen, die Versetzungen nicht einfach durchdringen können. Die Versetzungen stauen sich vor diesen Grenzen auf, was eine weitere Bewegung erschwert und zu einer Verfestigung des Materials führt. Die fortlaufende Verformung erzeugt dabei immer neue Versetzungen, die sich ebenfalls stauen und die Verfestigung weiter vorantreiben. [3]

Somit hat die Kornfeinung, die während des Gleichkanalwinkelpressens stattfindet, einen großen Einfluss auf die Festigkeit des Materials, indem immer mehr Hindernisse innerhalb des Materials geschaffen werden. Dies kann auch anhand der Hall-Petch-Beziehung und der damit in Beziehung stehenden Streckgrenze erklärt werden.

Die Hall-Petch-Beziehung setzt die Streckgrenze in Abhängigkeit von den mittleren Korndurchmessern und es ergibt sich folgende Gleichung:

$$R_e = \sigma_0 + \frac{K}{\sqrt{d_K}} \quad (3.1)$$

R_e ist die Streckgrenze

σ_0 ist die Startspannung für die Versetzungsbewegung

K ist der Korngrenzwiderstand, eine Konstante mit der Einheit $MPa \cdot \sqrt{mm}$

d_K ist der mittlere Korndurchmesser

Der Wert für σ_0 und K sind materialabhängige Konstanten.

Aus der Gleichung geht hervor, dass mit kleinerem mittlerem Korndurchmesser die Streckgrenze steigt. Durch die Verfeinerung der Kornstruktur verschiebt sich die Fließkurve insgesamt zu höheren Spannungen. Demnach müssen größere Kräfte aufgebracht werden, bevor das Material anfängt zu fließen. [12]

Es gibt jedoch kein umfassendes Modell, das die Mechanismen, die zur experimentell beobachteten Kornfeinung führen, vollständig erklärt. Ein möglicher Grund für die Kornfeinung ist die Zunahme der Versetzungsdichte und die damit verbundene Umorientierung der einzelnen Versetzungen. Diese Erklärung wurde von Meyers et al. modellmäßig in der Arbeit „*Dynamic Recrystallization in High-Strain-Rate Deformation*“ beschrieben. Es wird davon ausgegangen, dass die plastische Umformung zu einem Anstieg der Versetzungsdichte durch die in das Material eingebrachte Dehnung führt. [17]

Ein weiter möglicher Grund für die Kornfeinung bei starker Kaltumformung wird in der Arbeit von Humphreys et al. beschrieben. Dort wird davon ausgegangen, dass es bei der plastischen Umformung eines metallischen Werkstoffs neben der Verformung durch Versetzungsbewegungen, insbesondere bei Materialien mit hoher Stapelfehlerenergie, durch eine dynamische Erholung zur Ansammlung von Versetzungen in Kleinwinkelkorn-grenzen kommt. [24]

Da es keine eindeutige Erklärung für die Kornfeinung gibt und die genannten Theorien sehr komplex sind, wird hier auf eine detaillierte Erläuterung verzichtet. Für genauere Erklärungen wird auf zitierten Arbeiten verwiesen.

4 Kräfte Bestimmung für die Auslegung des Werkzeugs

Im folgenden Kapitel werden die Kräfte bestimmt auf dessen Grundlagen die Konstruktion und Auslegung des Werkzeugs basieren.

4.1 Welche Kräfte bestimmt werden müssen

Um das Werkstück zu verformen, wird eine Stempelkraft benötigt, die groß genug ist, um die Umformung und die wirkende Reibung zu überwinden und möglicherweise mehrere Durchgänge des Prozesses zu ermöglichen.

Die Summe dieser Anforderungen ergeben somit die benötigte Stempelkraft.

Im Folgenden werden die genutzten Gleichungen dargestellt und am Ende in einer Tabelle zusammengefasst, die im **Anhang A** zu finden ist.

4.2 Ansatz zur Kraftbestimmung

Ein möglicher Ansatz für die Bestimmung der Kraft bietet die Arbeit von Segal aus dem Jahr 1999 [24]. Segal hat unter der Annahme, dass sich das Material beim Gleichkanalwinkelpressen ideal plastisch verhält, mit der Gleitlinientheorie eine mögliche Gleichung für die Stempelspannung aufgestellt. Die Gleitlinientheorie ist ein Hilfsmittel bei Umformprozessen, um die Verformungsmechanismen von Materialien besser zu verstehen. Sie beschreibt die plastische Verformung von Materialien, indem sie die Richtungen maximaler Scherspannungen darstellt, entlang derer das Material fließt. [6]

Die Gleichung von Herrn Segal lautet wie folgt:

$$p = 2k[\cot \eta + 2(2\eta - \Theta)] + \frac{\tau}{\sin \eta (\sin \eta + \cos \eta)} + 2\tau \left(\frac{L_K}{H_K} \right) \quad (4.2)$$

p ist die Stempelspannung

k ist die Schubspannung des Materials

η ist ein Winkel zwischen Werkzeuggrenze und den Gleitlinien die in der Kurve herrschen

Θ ist die Hälfte des Winkels zwischen den zwei Kanälen

τ ist die Reibspannung zwischen Material und Kanälen

L_K ist die Länge des Kanals

H_K der Durchmesser des Kanals

Für ein besseres Verständnis dieser Variablen ist in Abbildung 4 ein Querschnitt eines Gleichkanalwinkelpresswerkzeugs mit diesen Gleitlinien dargestellt.

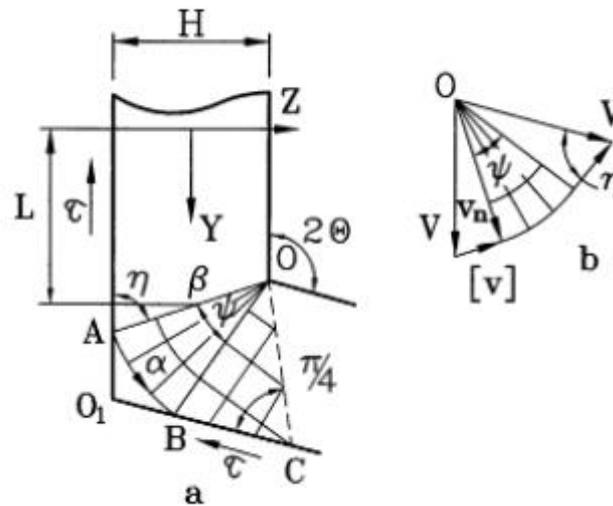


Abbildung 4: Querschnitt eines Gleichkanalwinkelpresswerkzeugs mit eingezeichneten Gleitlinien [15]

Um eine mögliche Stempelkraft zu bestimmen, müssen alle Variablen definiert und die zu berechnende Spannung in eine Kraft umgerechnet werden. Dafür wird die Stempelspannung durch die Stempelfläche dividiert.

Somit ist die Stempelkraft wie folgt definiert:

$$F_s = p * A_p \quad (4.3)$$

Wobei A_p der Stempelquerschnittsfläche darstellt.

4.2.1 Gleichung für Winkel η

Segal hat eine Gleichung für η in seiner Arbeit definiert.

$$\eta = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \text{Arccos} \left(\frac{\tau}{k} \right) \quad (4.4)$$

Für diese Gleichung müssen τ und k bestimmt werden. Da für diese Variablen keine konkreten Ansätze in der Arbeit veröffentlicht wurden, müssen Annahmen getroffen werden.

4.2.2 Annahme einer Gleichung für die Reibspannung τ

Die erste Annahme betrifft die Reibspannung τ , die zwischen dem umgeformten Werkstück und dem Kanal wirkt. Nach Überlegung und Recherche wurde entschieden, den Reibanteil der Presskraft beim Vorwärts-Vollstrangpressen zu verwenden. [7]

$$F = F_{pr} + F_R = \frac{A_0 \cdot k_f \cdot \varphi_h}{\eta_F} + D_0 \cdot \pi \cdot L_P \cdot \mu_w \cdot k_f \quad (4.5)$$

Der relevante Teil ist die zweite Hälfte der Gleichung. D_0 ist der Durchmesser der Probe, L_P ist die Länge der Probe, μ_w ist der Reibbeiwert und k_f die Fließspannung bei einem Umformgrad von $\varphi = 1$ des Probenmaterials.

Der Gedanke hierbei ist es, dass beim Reibkraftanteil vom Vorwärts-Vollstrangpressen die Geometrie und ebenfalls die anliegenden Spannungen beim Prozess betrachtet werden. Dies kann genutzt werden, um die Fläche einzusetzen, an der die Reibung tatsächlich stattfindet. Die Geometrie, bei welcher die Reibung beim Vorwärts-Vollstrangpressen wirkt, bezieht sich auf die Scherzone beim Umformen. Beim Gleichkanalwinkelpressen wirkt die Reibung aber nicht nur in der Scherzone, es muss daher die Geometrie der umgeformten Probe genutzt werden. Die Fließspannung bei einem Umformgrad von $\varphi = 1$ bleibt dabei bestehen, da sie als gute Näherung für die herrschende Spannung im Material dient. Da diese Spannung im gesamten Material gleich ist, kann auf Basis der Werkstückgeometrie eine Reibkraft bestimmt werden. Die so berechnete Kraft muss noch durch die Mantelfläche des Werkstücks dividiert werden, um die Reibspannung τ zu erhalten.

Somit wird folgende Gleichung gebildet:

$$\tau = \frac{D_0 \cdot \pi \cdot L_P \cdot \mu_w \cdot k_f}{D_0 \cdot \pi \cdot L_P} \quad (4.6)$$

Der Teil der Gleichung unter dem Bruchstrich beschreibt die Mantelfläche eines Zylinders.

Die Reibkoeffizient μ_w ist ein Beiwert für die herrschende Reibung zwischen den genutzten Materialien. Es wird angenommen, dass das Werkzeug aus einem Stahlwerkstoff und das umgeformte Werkstück aus einem Aluminiumwerkstoff besteht. Um eine gewisse Sicherheit einzubauen, wird der tatsächliche Wert von $\mu_w = 0,19$ [16] aufgerundet auf $\mu_w = 0,3$.

4.2.3 Annahme einer Gleichung für die Schubspannung k

Für die Schubspannung k liefert Dietrich, J. in *Praxis der Umformtechnik* [7] die folgende Definition:

„Die Fließspannung k_f ist diejenige Normalspannung beim einachsigen Spannungszustand, bei der zur elastischen Verformung eine plastische hinzukommt, bzw. eine plastische Verformung aufrechterhalten wird. Der Zusammenhang zwischen Fließschubspannung τ_f und Fließspannung k_f ergibt sich zu:“

$$k_f = \frac{\tau_f}{2} \quad (4.7)$$

Diese Gleichung stellt eine mögliche Annahme für die benötigte Schubspannung dar. Dabei gilt es doch zu beachten, dass diese sich auf einen einachsigen Spannungszustand bezieht, während das Gleichkanalwinkelpressen ein mehrachsiger Zustand ist. Zudem handelt es sich bei der Umformung durch das Gleichkanalwinkelpressen um einen Sonderfall der Scherung. Für diesen Sonderfall gibt es nach Recherche keine Gleichung, welche die tatsächliche herrschende Schubspannung beschreibt. Trotz dieser Unstimmigkeiten ist dies ein sinnvoller Ansatz und wird weiterhin für die Rechnungen verwendet. Um Verwirrung zwischen der Schubspannung τ_f und der Schubreibung τ zu vermeiden, wird die Schubspannung im Folgenden mit dem Wert k bezeichnet.

Mit diesem Wissen wird die Gleichung nach der Schubspannung k umgeformt.

$$k = k_f \cdot 2 \quad (4.8)$$

Diese Gleichung wird für die weiteren Berechnungen verwendet.

4.3 Beispielrechnung für die Plausibilität

Um die Plausibilität der Gleichungen zu überprüfen, wird eine Beispielrechnung auf Basis der Arbeit von Djavanroodi et al. durchgeführt. In der Arbeit „*Designing of ECAP parameters based on strain distribution uniformity*“ werden die Auswirkungen verschiedener Kanalwinkel auf die effektive Dehnung und Homogenität der Dehnungsverteilung in kommerziell reinem Aluminium untersucht. Um diese Auswirkungen mithilfe einer FEM-Analyse zu testen, musste die Gültigkeit dieser sichergestellt werden. Dafür wurde die benötigte Stempelkraft für eine definierte Probe von der FEM-Analyse und der experimentell bestimmten Kraft von Djavanroodi miteinander verglichen. Für die Rechnungen dieser Arbeit ist nur diese experimentell bestimmte Stempelkraft relevant. Diese beträgt $121,5 \text{ kN}$. Aus der Arbeit werden ebenfalls die Parameter der Probe entnommen und diese in die Gleichungen eingesetzt. Die berechnete Presskraft ist mit der aus der Arbeit von Djavanroodi et al. zu vergleichen. [8]

Die Rundstabprobe aus konventionellem Aluminium EN AW-1050A (Al99,5) hat einen Durchmesser von $19,7 \text{ mm}$ und eine Länge von 180 mm . Der Prozess wurde bei einem Winkel von 90° durchgeführt. [8]

Für die vollständige Rechnung wird noch die Fließspannung bei einem Umformgrad von $\varphi = 1$ von Al99,5 benötigt, diese beträgt in etwa 150 MPa . [7]

Damit ergibt sich eine Schubreibung nach (4.5) von $\tau = 30 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ und eine Schubspannung nach (4.2) von $k = 300 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$.

Somit sind alle Variablen der Gleichung (4.2) bestimmt und es ergibt sich eine Stempelkraft von:

$$F_s = 369 \text{ kN}.$$

4.4 Vergleich der berechneten Kräfte

Die berechnete Stempelkraft weicht um einen Faktor von 3,03 von der Stempelkraft der Arbeit von Djavanroodi ab. Diese Abweichung deutet auf eine falsche Annahme in den benutzten Gleichungen hin. Da die Rechnungen jedoch nur auf Annahmen basieren, ist es schwer zu bestimmen, welche Annahme falsch ist.

Eine mögliche Ursache könnte die verwendete Fließspannung sein. Es wird angenommen, dass der Umformgrad von $\varphi = 1$ die bestmögliche Annahme darstellt, da es beim Gleichkanalwinkelpressen keine Formänderung gibt.

Trotz dieser Abweichung ist der berechnete Wert höher als der experimentell bestimmte, was eine gewisse Sicherheit bietet. Daher werden die angenommenen Gleichungen weiterhin verwendet.

4.5 Presskraft für die Umformproben

Für den Laborversuch wird eine kleinere Probe mit einem Durchmesser von 10 *mm* und einer Länge von 100 *mm* verwendet, um sicherzustellen, dass die vorhandene Universalpresse der Hochschule den Umformprozess durchführen kann. Der Werkstoff der Probe bleibt derselbe mit Al99,5.

Nach den Gleichungen aus dem Abschnitt 4.3 berechnet sich die benötigte Presskraft mit $F_p = 101 \text{ kN}$.

Für die Laborversuche steht eine Universalpresse mit einer Presskraft von 900 *kN* zur Verfügung.

Die berechnete benötigte Presskraft für die Probe ist somit kleiner als die zur Verfügung stehende Presskraft der Presse und sollte somit durchführbar sein.

Die berechnete Stempelkraft gilt für den ersten Umformdurchgang. Da in der Literatur keine Angaben dazu gemacht werden, wie sich die benötigte Kraft mit weiteren Durchgängen verändert, können keine genaueren Aussagen getroffen werden. Sie wird lediglich in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren gesetzt wie dem Kanalwinkel, Eckwinkel, Reibkoeffizienten, Materialeigenschaften und der Anzahl an Durchgängen. Die einzige Aussage, die sich in den Quellen gleicht, ist das mit mehr Umformdurchgängen die benötigte Presskraft steigt [1,8,12,23]. Mit jedem Durchgang wird das Material fester und die Fließfähigkeit des Materials nimmt ab, somit muss mehr Kraft aufgewendet werden, um das Material weitere Male umzuformen.

5 Konstruktion und erste Auslegung eines Versuchswerkzeugs

Für den Laborversuch wird ein Umformwerkzeug für das Gleichkanalwinkelpressen benötigt. Im Folgenden werden zwei mögliche Entwürfe für die Werkzeuge dargestellt, ihre Vor- & Nachteile beschrieben und eine Entscheidung für die bessere Ausführung getroffen.

5.1 Definition der Anforderungen an das Versuchswerkzeug in Form von User Stories

1. Als Konstrukteur möchte ich die Funktionalität des Werkzeuges sicherstellen, damit die Anwendenden des Werkzeuges den Prozess des Gleichkanalwinkelpressens durchführen und veranschaulicht bekommen.
2. Als Konstrukteur möchte ich die Langlebigkeit des Werkzeuges sicherstellen, damit die Studierenden und Laborteilnehmer länger die Möglichkeit haben, sich mit dem Gleichkanalwinkelpressens zu beschäftigen.
3. Als Labordurchführender möchte ich ein sicheres und einfach nutzbares Versuchswerkzeug haben, damit ich das Labor erfolgreich durchführen und über den Prozess des Gleichkanalwinkelpressens lernen kann.
4. Als Laborführender möchte ich ein funktionierendes und verlässliches Versuchswerkzeug haben, damit der Laborversuch ohne große Unterbrechungen und Probleme stattfinden kann.
5. Als Laborführender möchte ich ein verschleißarmes Werkzeug haben, damit die Werkzeugwartung nicht zu häufig anfällt.
6. Als Labordurchführender möchte ich ein Werkzeug, welches eine Auswerffunktion für das Werkstück besitzt, damit nach jeder Durchführung das Werkzeug nicht ausgebaut und das Werkstück per Hand entfernt werden muss.
7. Als Werkzeughersteller möchte ich, dass die Herstellung des Werkzeuges mit den gegebenen technischen Zeichnungen möglich ist, damit die Produktion des Werkzeuges ohne Probleme abläuft.

5.2 Konstruktive Randbedingungen

Aus seiner Arbeit mit dem Gleichkanalwinkelpressens hat Hellmig viel über die Konstruktion von Werkzeugen für diesen Prozess gelernt und in seiner Arbeit beschrieben [12]. Die Erfahrungen werden hier im Folgenden erläutert und bei der Konstruktion des Werkzeuges berücksichtigt.

Der Name des Gleichkanalwinkelpressens leitet sich vom charakteristischen gleichen Querschnitt beider Kanäle der Werkzeugmatrix ab. In der Theorie bleibt der Querschnitt des umgeformten Werkstücks vor und nach dem Umformen gleich. Hellmig hat jedoch festgestellt, dass die Werkstücke nach dem Umformen einen geringfügig größeren Querschnitt aufweisen. Dies beruht auf der Tatsache, dass jede plastische Verformung eines Metalls auch immer einen elastischen Anteil hat, der sich nach dem Entspannen wieder zurückformt. Um dieser elastischen Rückfederung des Werkstücks entgegenzuwirken, wird der Ausgangskanal des Werkzeugs mit einem etwas kleineren Querschnitt ausgeführt. Der Ausgangskanal ist außerdem kürzer als der Eingangskanal, um die Entnahme der umgeformten Probe zu erleichtern.

Aus den Erfahrungen von Hellmig und anderer Arbeiten wie die Arbeit von Filho [19] wurde festgestellt, dass es von Vorteil ist, den Presskanal in einen der beiden Matrixhälften zu fertigen. Dieser Aufbau wird in der Abbildung 5 dargestellt.

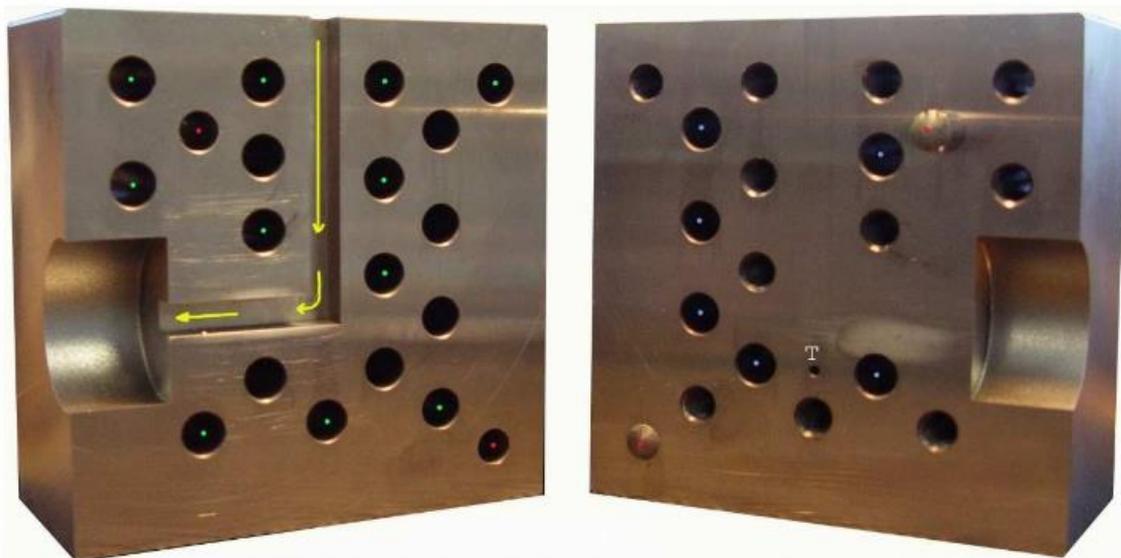


Abbildung 5: Presskanal in einer Matrixhälfte [12]

Dies hat den Vorteil, dass die eingeleitete Kraft auf den Presskanal mittels Presstempel, nicht direkt auf den Spalt der Werkzeughälften wirkt. Dies kann ungewünschten Materialfluss in den Schlitz zwischen den beiden Hälften vorbeugen. Da in dieser Arbeit mit einem runden Querschnitt der Probe gearbeitet wird, lässt die Geometrie des Werkstücks diese Konstruktion jedoch nicht zu.

Zuletzt zeigt die Arbeit von Hellmig sowie der Stand der Technik aus dem Bereich der Werkzeugfertigung, dass die Oberflächenbeschaffenheit eine wichtige Rolle spielt. Die Oberflächenbeschaffenheit bei Umformwerkzeugen hat einen direkten Einfluss auf die Qualität des umgeformten Werkstücks sowie auf die Lebensdauer des Werkzeuges. Eine glatte Werkzeugoberfläche reduziert die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück, was zu einem gleichmäßigeren Materialfluss führt und Defekte wie Risse oder Oberflächenunregelmäßigkeiten im Werkstück vorbeugen kann. Zudem verringert eine gut polierte oder beschichtete Oberfläche den Werkzeugverschleiß, da weniger abrasive Kräfte wirken, was die Lebensdauer des Werkzeugs verlängert. Im **Anhang B** befindet sich eine technische Zeichnung von Hellmig, welche ein Umformwerkzeug fürs Gleichkanalwinkelpressen darstellt. In diesem ist dargestellt, dass die Oberflächengüte des Werkzeuges eine mittlere Rauheit (Ra) von so niedrig wie $Ra = 0,1$ haben sollte. Somit müssen die Kanäle des Werkzeuges poliert werden.

5.3 Mögliche Werkzeugdesigns

Die Maße der Konstruktionen sind in den technischen Zeichnungen im **Anhang C** zu finden. Im Folgenden werden nur Informationen beschrieben, die eine Relevanz für die Auswahl des besseren Werkzeuges haben.

Lediglich für eine bessere Einordnung der Dimension betragen die Außenmaße der Werkzeuge $200\text{ mm} \times 200\text{ mm} \times 200\text{ mm}$.

Die Konstruktionen wurden auf die benötigte Stempelkraft aus den Rechnungen im Kapitel 4.5 ausgelegt. Für das Werkzeug ist der Werkstoff 100Cr6 vorgesehen. Diese Werkstoffwahl erfüllt die Definition Langlebigkeit aus der Userstory 2, da der Werkstoff für seine Verschleißfestigkeit bekannt ist.

5.3.1 Stempel

Der Umformstempel ist für beide Werkzeuge derselbe und wird in Abbildung 6 dargestellt. Es handelt sich um eine einfache Stempelform mit einer Erhebung zwischen Platte und Stempelstange, um die Stabilität zu verbessern. Es wurden vier Bohrungen mit Gewinde geplant. Zwei dieser Bohrungen sind für die Befestigung im Bauraum an der Presse. Die beiden anderen Bohrungen mit Gewinde sind für mögliche Führungsstäbe, um das Zentrieren des Stempels mit dem Kanal der Werkzeugmatrix zu erleichtern.



Abbildung 6: Umformstempel

5.3.2 Werkzeugausführung 1

In der Abbildung 7 ist die erste Ausführung eines Gleichkanalwinkelpresswerkzeugs dargestellt.

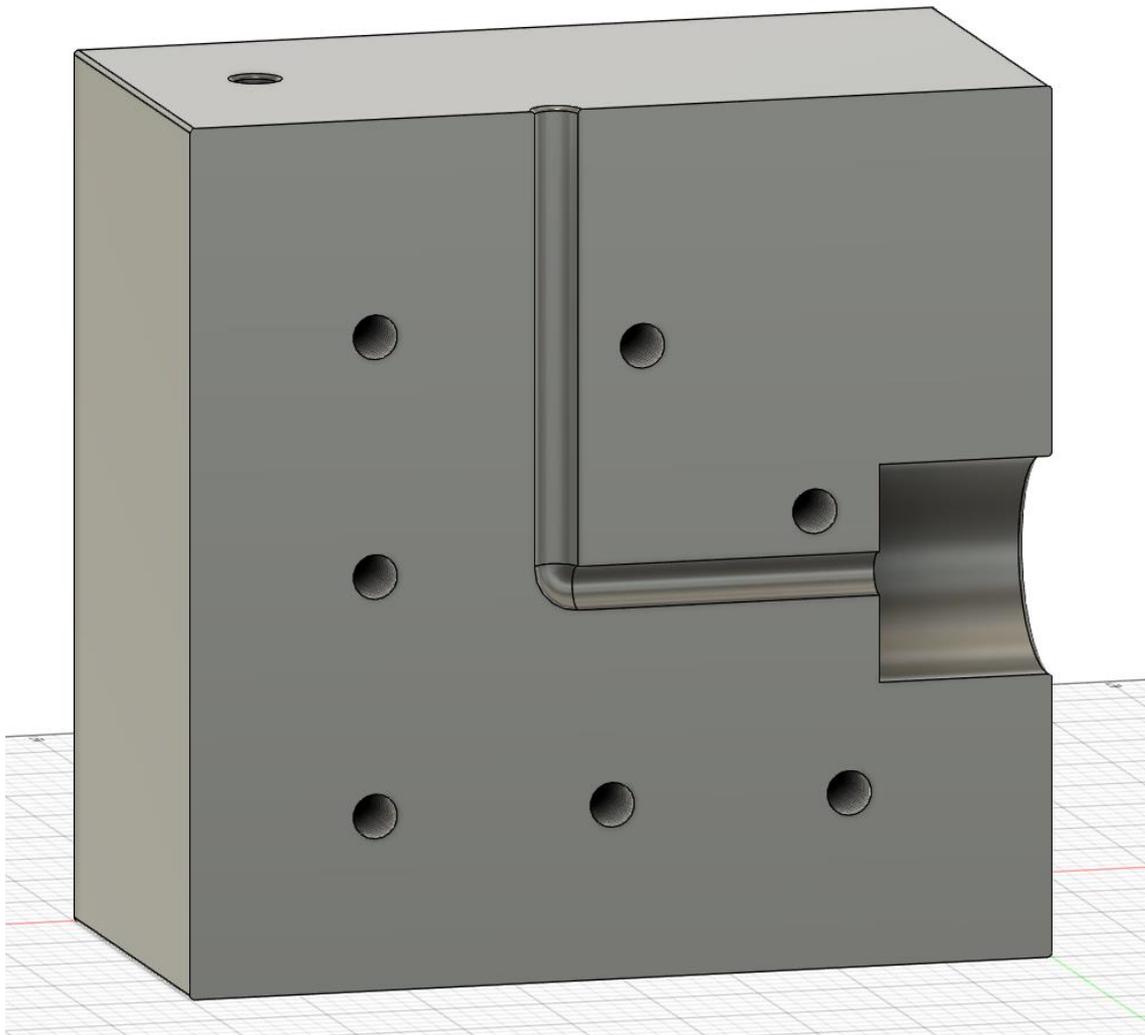


Abbildung 7: Werkzeugausführung 1

Die Werkzeugausführung ist die gängigste Werkzeugform, welche in den Arbeiten beschrieben wird [1,4,10,13,15,23,24]. Das Werkzeug wurde mit zwei Kanälen in einem 90° Winkel und einem Außenradius in der Kurve von 10 mm ausgeführt.

Dieser scharfe Winkel soll sicherstellen, dass eine intensive Kornfeinung und somit eine Verfestigung der Proben stattfinden. Der Radius der Kurve soll dem Problem der Inhomogenität entgegenwirken, in dem er die Umformzone vergrößert. Dieses Zusammenspiel ermöglicht eine gleichmäßige Steigerung der Festigkeit in der gesamten Probe und erfüllt somit die Anforderung der Funktionalität aus der Userstory 1.

Der Durchmesser des Eingangskanals beträgt 10 mm. Der Ausgangskanal wurde konisch ausgelegt, damit das Ende des Ausgangskanals 9,9 mm im Durchmesser beträgt. Dies soll der elastische Rückfederung der Probe durch das Umformen, wie in 5.2 beschrieben,

entgegenwirken. Außerdem wurde eine Aushöhlung am Ausgang konstruiert, um den Ausgangskanal zu verkürzen und die Entnahme der Probe zu erleichtern. Diese Entscheidung soll die Anforderung aus der Userstory 6 teilweise erfüllen, indem die Entnahme der Probe erleichtert wird.

Falls die Entnahme trotz der Einbuchtung nicht möglich ist, müssen die Werkzeugschrauben gelöst werden. Diese Konstruktion sieht sechs M12 8.8 Schrauben vor, die die beiden Matrixhälften zusammenhalten und Bewegungen während der Umformung verhindern.

Um die sichere Durchführung des Umformprozesses gemäß der Anforderung aus der Userstory 3 einzuhalten, wurden alle sichtbaren Kanten mit einer Rundung von 1 mm versehen.

In der gleichen Userstory für die Anforderung der einfachen Handhabung wurden auf der Oberseite der Matrix zwei Bohrungen für Führungsstäbe vorgesehen, wie in Abbildung 8 zu sehen ist. Diese Führungsstäbe führen vom Stempel in die Matrix und erleichtern das Ausrichten des Stempels auf die Kanalöffnung.

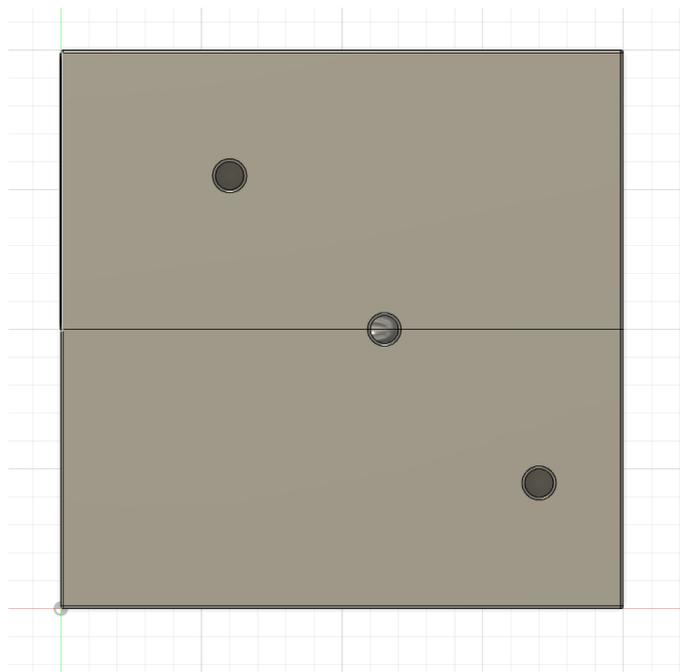


Abbildung 8: Führungsbohrungen

5.3.3 Werkzeugausführung 2

In Abbildung 9 ist die zweite Ausführung eines Gleichkanalwinkelpresswerkzeugs dargestellt. Diese Konstruktion ist weitgehend identisch mit der ersten Ausführung und die Angaben aus der ersten Variante gelten auch bei dieser.

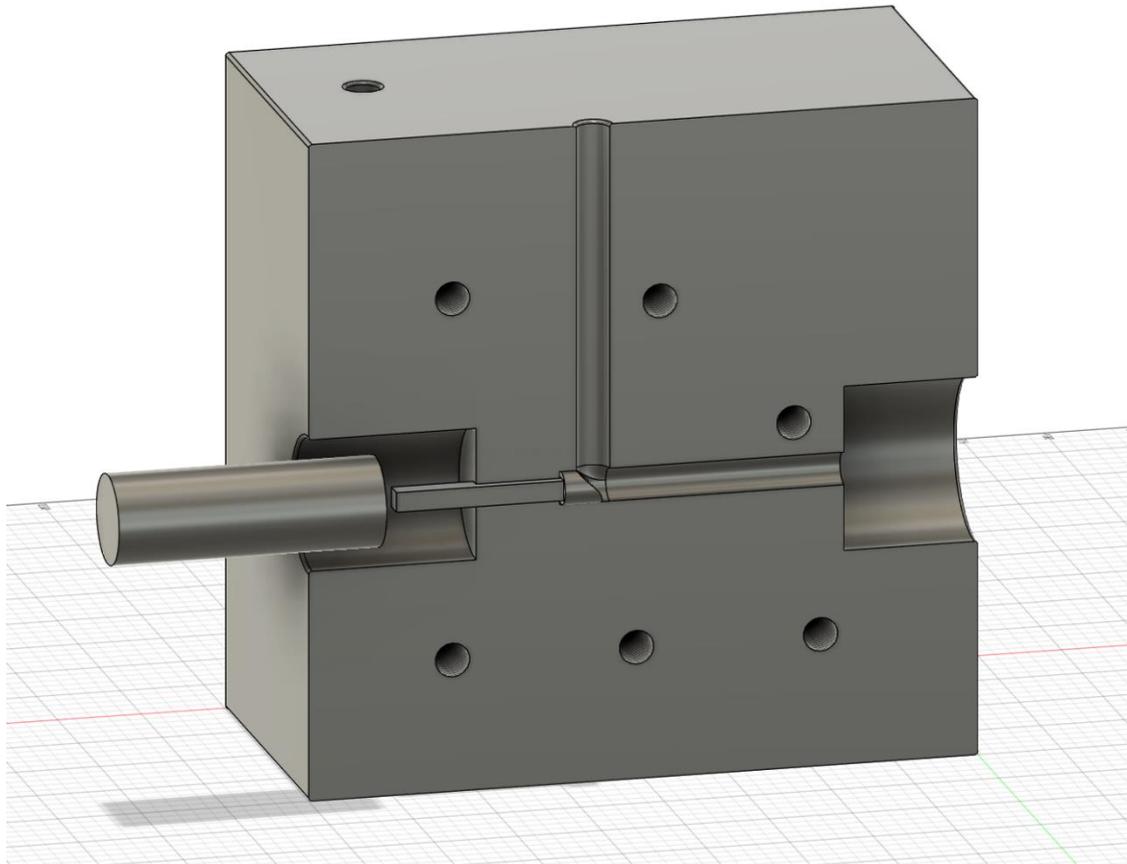


Abbildung 9: Werkzeugausführung 2

In dieser Ausführung wurde das Konzept eines Auswerfers für die Proben eingearbeitet. Der Auswerfer soll die Anforderung aus der Userstory 6 erfüllen und die Durchführung des Umformprozesses erleichtern. Mithilfe des Auswerfers wird verhindert, dass die Matrix nach jedem Umformvorgang auseinandergebaut werden muss.

Der Auswerfer ist auf der Höhe vom Ausgangskanal konstruiert und soll mittels einer Hydraulikpresse betrieben werden. Für den Hydraulikzylinder ist eine Ausbuchtung an der Seite des Auswerfers geplant, der den gleichen Durchmesser wie der Hydraulikzylinder haben soll. Diese Ausbuchtung soll den Zylinder aufnehmen und in der gleichen Achse wie der Ausgangskanal des Werkzeuges halten.

Nachdem die Probe durch den Stempel durch die Kurve des Werkzeuges gedrückt wurde, hat der Hydraulikzylinder die Aufgabe, den Auswerfer nach vorne in den Ausgangskanal zu drücken und so die Entnahme der umgeformten Probe aus der Matrix zu erleichtern. Wenn es möglich ist, soll die Hydraulik auch die Funktion erfüllen, den Auswerfer zurückfahren zu können. Diese Funktion ist abhängig vom eingesetzten Hydraulikzylinder und

somit nicht in der Konstruktion berücksichtigt. Falls die Hydraulik nicht die Möglichkeit bietet, muss der Auswerfer mittels eines Stabes durch den Ausgangskanal per Hand zurück in die Ausgangsposition gedrückt werden.

Der Nachteil dieses Werkzeugs besteht darin, dass es komplexer ist als die Werkzeugausführung 1. Ein zusätzliches Bauteil, der Auswerfer dargestellt in Abbildung 10, muss gefertigt werden.

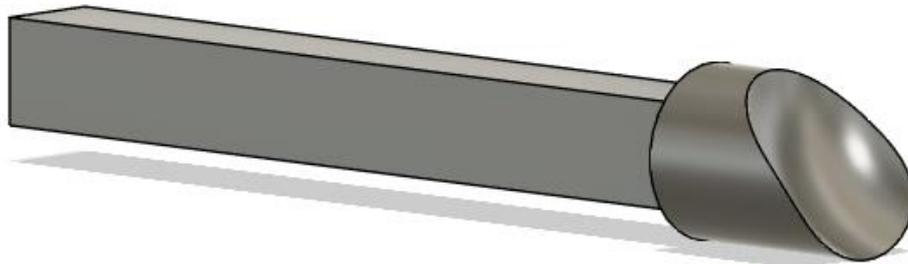


Abbildung 10: Auswerfer

Dieses Bauteil muss die Form des Umformkanals in der Kurve möglichst genau nachbilden, um den Umformprozess nicht zu beeinträchtigen. Zudem wird ein Hydraulikzylinder benötigt, was ein weitere Komponente darstellt.

5.3 Auswahl des optimaleren Designs

Beide Konstruktionen haben Vor- und Nachteile. Die erste Konstruktion ist fertigungstechnisch einfacher, jedoch aufgrund der fehlenden Möglichkeit einer unkomplizierten Entnahme nach dem Umformprozess ist diese nicht für eine benutzerfreundliche Bedienung geeignet. Nach jedem Umformschritt muss die Maschine auseinandergeschraubt, die Probe entnommen, das Werkzeug wieder zusammengesetzt und anschließend in den Bauraum der Presse eingebaut werden. Dieser Prozess ist zeitaufwendig und ungeeignet für einen Laborversuch.

Der Nachteil der zweiten Konstruktion liegt in der höheren Komplexität und dem zusätzlichen Bauteil des Hydraulikzylinders, was den Fertigungsaufwand und die Kosten erhöht. Diese Nachteile sind jedoch im Vergleich zum Nutzen gering. Der Auswerfer spart Zeit, und dies ist der entscheidende Grund, warum die Wahl auf die zweite Werkzeugausführung fällt.

5.4 Nachweisrechnungen für das konstruierte Werkzeug

Um sicher zu stellen, dass das Werkzeug wie geplant funktioniert, müssen Berechnungen durchgeführt werden. Diese Berechnungen sollen der Konstruktion eine gewisse Sicherheit gewähren, um im Prozess weder zu versagen, noch beschädigt zu werden.

5.4.1 Werkzeugmaterialrechnung

Für die Konstruktion eines Umformwerkzeug muss der richtige Werkstoff gewählt werden. Ein üblicher verwendeter Stahl, der für die Konstruktion infrage kommt, ist 100Cr6. Dieser Stahl wird üblicherweise in der Produktion von Kugellagern eingesetzt, ist aber für seine Verschleißfestigkeit bekannt. Bei diesem Werkstoff handelt es sich um einen legierten Stahl mit Anteilen aus Silizium, Magnesium und Chrom.

Der Werkstoff hat eine Streckgrenze von $1370 \frac{N}{mm^2}$ [30]. Die eingesetzte Presse muss nach den Berechnungen mit einer Presskraft von etwa 101 kN die Proben mittels Stempel durch das Werkzeug drücken. Der Stempel hat einen Durchmesser von 10 mm . Die maximale Spannung, die im Werkzeug auftreten kann, wird nach der allgemeinen Gleichung der Spannung σ wie folgt berechnet:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (5.1)$$

σ ist die allgemeine Spannung

F ist eine definierte Kraft

A ist eine definierte Fläche

Bei der Fläche A handelt es sich um die Querschnittfläche des Stempels (Kreisfläche)

Daraus ergibt sich nach (5.1) die Spannung mit:

$$\sigma = \frac{101 \text{ kN}}{113,1 \text{ mm}^2} \approx 1,30 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2}.$$

Dieser Wert liegt deutlich unter der Belastungsgrenze des Werkstoffes. Der Werkstoff ist somit für die Konstruktion ausreichend.

5.4.2 Schraubenrechnung

Als Nächstes wird sichergestellt, dass die geplanten Schrauben eine ausreichende Zugfestigkeit aufweisen. Diese Konstruktion ist keine geeignete Schraubenkonstruktion. Schrauben sollten in Konstruktionen genutzt werden, um eine Reibkraft zwischen zwei Ebenen zu erzeugen und diese Reibkraft sollte gegen die auftretenden Belastungen entgegenwirken. Dies ist in diesem Fall nicht umsetzbar, daher muss sichergestellt werden, dass die eingesetzten Schrauben nicht unter der wirkenden Belastung versagen. Daher wird die Zugfestigkeit der Schrauben mit der angenommenen Belastung verglichen. Es wird vereinfacht angenommen, dass die gesamte Kraft der Presse, die von oben auf das Werkzeug wirkt, auch horizontal auf die Schrauben übertragen wird. Diese Annahme ist sehr grob, liefert aber eine hinreichende Abschätzung. Die Belastung auf die Schrauben beträgt somit die vollen $F_P = 101 \text{ kN}$. Die geplanten M12 8.8 Schrauben haben eine Zugfestigkeit von $R_m = 800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Multipliziert man diesen Wert mit dem Querschnitt des Kerndurchmessers der Schraube (Kreisfläche mit 10,2 mm Durchmesser) ergibt sich die kritische Kraft F_{SK} , die diese Schrauben aushalten müssen.

Somit lautet die Berechnung:

$$F_{SK} = R_m \cdot \frac{\pi}{4} \cdot r_S^2 \quad (5.2)$$

r_S ist der Radius des Kerndurchmessers der Schraube

Daraus folgt:

$$F_{SK} = 800 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 5,1 \text{ mm}^2 \approx 16,3 \text{ kN}$$

Für die benötigte Anzahl an Schrauben teilen wir die Stempelkraft F_P durch die kritische Kraft F_{SK} .

Es folgt:

$$n = \frac{F_P}{F_{SK}} = \frac{101 \text{ kN}}{16,3 \text{ kN}} \approx 6,2$$

n ist die Anzahl an Schrauben

Unter der Annahme, dass die gesamte Stempelkraft auf die Schrauben wirkt, werden mehr als sechs Schrauben benötigt, um das Werkzeug zusammenzuhalten und ein Öffnen der Werkzeughälften zu verhindern. Es werden somit sieben Schrauben für die Konstruktion vorgesehen.

5.4.3 Eulersche Knickfall für den Stempel

Des Weiteren muss sichergestellt werden, dass sich der eingesetzte Stempel unter der Last nicht verformt oder im Extremfall bricht. Mithilfe der Eulersche Knickfälle kann überprüft werden, ob der Stempel unter der vorhandenen Last nicht versagt.

Die Eulerschen Knickfälle beschreiben das Verhalten von schlanken Stäben unter Druckbelastung, bei dem der Stab seitlich ausweicht (knickt), bevor dieser versagt. Die vier Knickfälle unterscheiden sich durch die Lagerungsbedingungen der Stäbe und helfen, die kritische Knicklast zu berechnen, die für die Stabilität tragender Bauteile wie Säulen oder Stützen entscheidend ist. [18]

Für den Stempel müssen zwei Fälle untersucht werden. Der erste Fall, bei dem eine Seite fest eingespannt ist und die andere Seite frei gelagert ist, tritt auf, wenn der Stempel aus der ausgefahrenen Position in die eingefahrene Position fährt und auf die Probe trifft.

Um zu berechnen, ob ein Knicken eintritt, wird als Erstes die kritische Knickkraft F_{KK} bestimmt:

$$F_{KK} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{s^2} \quad (5.3)$$

E ist das Elastizitätsmodul des Materials des Stabes in $\frac{N}{mm^2}$

I ist das axiale Flächenträgheitsmoment des Querschnittes des Stabes

s ist die Knicklänge in mm

Die Knicklänge steht mit der Stablänge L in folgender Beziehung

$$s = \beta \cdot L_{EL} \quad (5.4)$$

β ist ein Knicklängenbeiwert, der für jeden Knickfall unterschiedlich ist

L_{ES} ist die Stablänge in mm

Für die Bestimmung der kritischen Knickkraft wird das Elastizitätsmodul von 100Cr6 benötigt. Dieser beträgt $210.000 \frac{N}{mm^2}$ [30].

Das Flächenträgheitsmoment eines Rundstabes wird mit folgender Formel bestimmt:

$$I = \frac{\pi}{64} \cdot d_{ES}^4 \quad (5.5)$$

d_{ES} ist der Durchmesser des Rundstabes

Somit beträgt $I = 490,9 \text{ mm}^4$.

Der Knicklängenbeiwert beträgt im ersten Fall $\beta = 2$.

Mit diesen Werten ergibt sich aus der Gleichung (5.3) eine kritische Knickkraft von $F_{KK} \approx 2359,5 \text{ kN}$.

Die Stempelkraft beträgt 101 kN .

Die kritische Knickkraft wird mit der wirkenden Stempelkraft in folgende Beziehung gesetzt, um eine Knicksicherheit S zu bestimmen.

$$S = \frac{F_{KK}}{F_S} \quad (5.6)$$

Die Knicksicherheit S nach (5.6) beträgt für den ersten Fall $S \approx 23$.

Damit besteht beim Einfahren des Stempels und beim ersten Kontakt mit der Probe keine Gefahr für ein Knicken des Stempels.

Im zweiten Fall, bei dem der Stempel in eine gewisse Tiefe des Eingangskanals eingefahren ist, tritt der dritte Eulersche Knickfall auf. Dieser geht von einem einseitig eingespannten und auf der anderen Seite gelenkig gelagerten Stab aus.

In diesem Fall ändert sich der Knicklängenbeiwert zu $\beta = \frac{1}{2}\sqrt{2}$.

Hier beträgt die kritische Knickkraft nach (5.3) $F_k \approx 2408,5 \text{ kN}$ und die Knicksicherheit nach (5.6) $S \approx 24$. Auch in diesem Fall besteht keine Gefahr auf Knicken.

5.4.4 Auslegung vom Hydraulikzylinder

Für den Auswerfer wird ein Hydraulikzylinder benötigt. Um die erforderliche Druckkraft des Zylinders in Bar zu ermitteln, muss eine Annahme für die herrschende Reibkraft getroffen werden.

Der Ausgangskanal des Umformwerkzeugs ist, wie im Kapitel 5.2 beschrieben im Durchmesser kleiner als der Eingangskanal, um der Elastische Rückfederung entgegenzuwirken. Nach dem Umformprozess bleibt die Probe aufgrund ihrer elastischen Rückfederung im Ausgangskanal stecken. Es wird angenommen, dass die Spannung, mit der die Probe auf die Wand des Ausgangskanals drückt, der Elastizitätsgrenze $R_{p0.02}$ des Werkstoffs der Probe entspricht. Diese Spannung wird mit der Fläche des Ausgangskanals (Zylindermantelfläche) multipliziert und diese Kraft als die Normalkraft angesehen, die zur Bestimmung der Reibkräfte genutzt wird.

Die Normalkraft ergibt sich somit aus:

$$F_N = R_{p0.02} \cdot 2 \cdot r_A \cdot \pi \cdot L_A \quad (5.7)$$

r_A ist der Radius des Ausgangskanals

$R_{p0.02}$ ist die Elastizitätsgrenze des Materials

L_A ist hier die Länge des Ausgangskanals

Die Elastizitätsgrenze von Al99,5 beträgt $R_{p0.02} = 20 \frac{N}{mm^2}$ [31].

Die Mantelfläche des Ausgangskanals beträgt 2670 mm^2 .

Damit ergibt sich eine Normalkraft nach (5.7) mit $F_N = 0,008 \text{ N}$.

Die Reibkraft F_R wird durch die Multiplikation der Normalkraft und dem Haftreibwert μ_H bestimmt:

$$F_R = F_N \cdot \mu_H \quad (5.7)$$

Der Haftreibwert zwischen Stahl und Aluminium beträgt $\mu_H = 0,19$ [16].

Daraus folgt:

$$F_R = 0,008 \text{ N} \cdot 0,19 = 0,00152 \text{ N}$$

Der Hydraulikzylinder muss somit eine Kraft von $0,00152 \text{ N}$ oder $0,0152 \text{ Bar}$ aufbringen.

5.4 Herstellprozess des Werkzeugs

Ein möglicher Herstellprozess für das Werkzeug ist das Fräsen. Durch den Aufbau mit zwei Hälften können die Kanäle präzise und einfach aus dem Material gefräst werden. Da Werkzeugstahl sehr hart ist, muss sichergestellt werden, dass das verwendete Werkzeug für das Fräsen von Werkzeugstahl geeignet ist.

Der Auswerfer ist komplexer in der Herstellung, da es sich um eine Freiform handelt. Die STL-Datei (Stereolithografie Datei) des Auswerfers muss mittels eines CAM-Prozessors in ein für die Fräsmaschine lesbaren G-Code umgewandelt werden. Dieser G-Code wird in eine fünfachsige Fräse eingelesen, die mit einem Kugelkopffräser ausgestattet ist, um die Kontur des Auswerfers möglichst präzise nachzubilden.

Der Stempel ist ebenfalls ein fräsbares Bauteil. Hier ist das Problem, dass dieser aus dem Vollen gefräst werden muss und somit viel Material verschwendet wird.

5.5 Anfragen an Werkzeughersteller

Das konstruierte Werkzeug soll im Laborversuch eingesetzt werden und muss dafür hergestellt werden. Im Rahmen der Arbeit wurden zwei Unternehmen in Norddeutschland kontaktiert, um Auskunft über die Machbarkeit und Kosten der Werkzeugfertigung zu erhalten.

Zum Zeitpunkt der Arbeit liegen keine Rückmeldungen vor, sodass keine weiteren Aussagen zur Herstellung und Kosten gemacht werden können.

6 Laborversuch

6.1 Learning Outcomes

Der Laborversuch sowie die Durchführung des Gleichkanalwinkelpressens sollen den Laborteilnehmern das Konzept der Kaltverfestigung und dessen Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Probe näherbringen. Das Verfahren soll den Studierenden zeigen, dass die Kaltverfestigung durch Umformen nicht zwingend mit einer Änderung der Geometrie des Werkstückes zu tun hat.

Der Laborversuch kann den Laborteilnehmern ebenfalls das Konzept der Kornfeinung und dessen Einfluss auf das Gefüge der Probe näherbringen. Durch nötige Vorbereitung von verschiedenen Proben, vor und nach dem Umformprozess, könne die Änderung im Gefüge den Studierenden demonstriert werden.

6.2 Versuchsbeschreibung

Im Folgenden wird eine mögliche Versuchsbeschreibung für das Labor im Wahlpflichtmodul Umformtechnik im Bachelorstudium dargestellt. Diese Beschreibung orientiert sich an dem üblichen Aufbau von Versuchsbeschreibungen in anderen Laboren.

Umformtechnik-Labor

Versuch **Gleichkanalwinkelpressen**

Ort Institut für Produktionstechnik, Berliner Tor 21, Raum 016

Betreuer Prof. Stöver, Dipl.-Ing. Remmers

Aufgabe

1. Bestimmung der benötigten Stempelkraft F_P nach gegebenen Gleichungen
2. Zugprobe an nicht umgeformter Probe durchführen
3. Durchführung des Prozesses des Gleichkanalwinkelpressens
4. Zugprobe an umgeformter Probe durchführen
5. Zugfestigkeit beider Proben vergleichen

Laborvorbereitung:

- Für das Labor wird empfohlen sich mit dem Begriff der Kaltverfestigung auseinander zu setzen.
- Für das Labor wird empfohlen zu wissen was die Fließspannung ist und wie diese mit gegeben Umformgrad aus einem Graphen abliest.

Hinweise:

- Im Labor sind geschlossenes Schuhwerk und enganliegende Kleidung (inkl. langer Hose) zu tragen.
- Den Anweisungen der Betreuer ist Folge zu leisten.
- Voraussetzung für die Anerkennung des Labors ist die Teilnahme an der gesamten Labordurchführung.
- Die Sicherheitsbelehrung zu Beginn des Labortermins ist zwingende Voraussetzung für die Teilnahme am Versuch.

Ausstattung

Für den Laborversuch stehen folgende Einrichtungen und Materialien zur Verfügung:

- eine zweifach wirkende 900 kN-Hydraulikpresse mit SPS-Steuerungsprogramm für automatischen Versuchsablauf
- Ein Umformwerkzeug für das Gleichkanalwinkelpressen
- Aluminiumproben aus Al99,5 (EN AW-1050A)
- Werkstoffkennwerte für die verwendete Aluminiumprobe

Ablauf

Zu 1 Bestimmung der benötigten Stempelkraft F_S nach gegebenen Gleichungen.

Auf der letzten Seite sind die Gleichungen und der Fließspannungsverlauf für Al99,5 zu finden.

- Berechnen Sie mit den gegebenen Gleichungen die benötigte Stempelkraft der Maschine.
- Die Maße der Probe sind selbst nachzumessen.
- Bestimmen Sie die Fließspannung von Al99,5 bei einem Umformgrad von $\varphi = 1$.
- Zeigen Sie anhand der Rechnungen, ob die Universalpresse genügend Kraft aufbringen kann oder nicht.

Zu 2 Durchführen einer Zugprobe an einer nicht umgeformten Probe

- Bestimmung der Zugfestigkeit der Probe vor dem Umformen mit dem Gleichkanalwinkelpressens.

Einschalten der Maschine

- Zum Einschalten der Maschine wird der Rote Drehschalter auf der Rückseite der Maschine auf die Position 1 gedreht.
- Das System fährt hoch und lädt das zuletzt geöffnete Tiefziehprogramm.
- Am Bedienpult wird der Produktionsmodus-Drehschalter entsperrt und auf Halbautomatisch (Pos. 2) gestellt.
- **Mit dem Normprüffinger wird (bei jedem erneuten Einschalten der Maschine) die einwandfreie Funktion des Lichtvorhangs überprüft!**
- Das System wird durch Drücken des Quittier-Tasters (Blauer-Taster am Bedienpult) initialisiert.
- Die Hydraulik wird über Betätigen des weißen Tasters am Bedienpult eingeschaltet.
- Die Hydraulikpresse ist jetzt betriebsbereit.

Zu 3 Durchführen des Gleichkanalwinkelpressens

- Positionieren Sie die Probe in die Umformmatrix.
- Starten Sie die Presse mit dem Betätigen des weißen Tasters.
- Lassen Sie den Umformprozess durchlaufen.
- Hydraulikzylinder für den Auswerfer ausfahren und einfahren lassen.
- Entnahme der Probe

Zu 4 Durchführen des Zugversuchs mit umgeformter Probe

- Bestimmung der Zugfestigkeit der Probe nach dem Umformen mit dem Gleichkanalwinkelpressens.

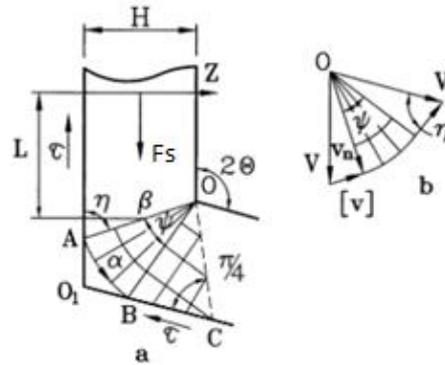
Zu 5 Zugfestigkeit beider Proben vergleichen

Durch das Vergleichen der Proben miteinander sollen die Laborteilnehmer feststellen, ob eine Festigkeitssteigerung stattgefunden hat.

- Vergleichen Sie die Zugfestigkeit der Probe vor und nach dem Umformen mit dem Gleichkanalwinkelpressens.
- Diskutieren Sie Ihre Ergebnisse mit anderen Laborteilnehmern.

Gleichungen

$F_S =$	N
$p =$	N/mm ²
$\eta =$	
$k =$	N/mm ²
$\tau =$	N/mm ²
$L =$	110 mm
$H =$	10 mm



Segal, V. M. (1999)

Stempelkraft

$$F_S = p \cdot A_S$$

Stempelspannung

$$p = 2k[\cot \eta + 2(2\eta - \Theta)] + \frac{\tau}{\sin \eta (\sin \eta + \cos \eta)} + 2\tau \frac{L}{H}$$

Winkel zwischen Werkzeuggrenze und den Gleitlinien die in der Kurve

$$\eta = \frac{\pi}{2} - \frac{1}{2} \text{Arccos} \left(\frac{\tau}{k} \right)$$

Schubspannung

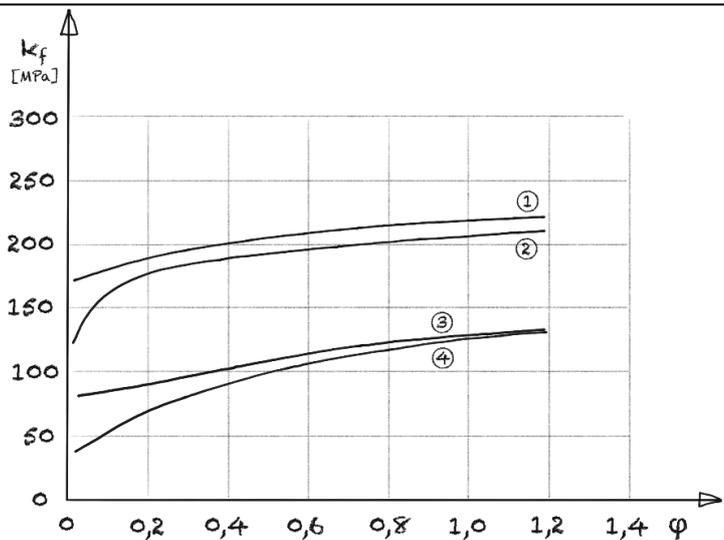
$$k = k_f \cdot 2$$

Reibspannung

$$\tau = \frac{D_0 \cdot \pi \cdot l \cdot \mu_w \cdot k_f}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot H}$$

Fließkurve von Al99,5

Ablesen von Kurvenverlauf 1



<https://4ming.de/de/forming-handbuch/al-99-5>

7 Fazit

In dieser Bachelorarbeit wurde ein Laborversuch zum Gleichkanalwinkelpressen entwickelt und ein passendes Versuchswerkzeug konstruiert. Ziel des Versuchs ist es, den Studierenden die Auswirkungen von plastischen Verformungen auf die mechanischen Eigenschaften von Werkstoffen näherzubringen mit der Besonderheit, dass die Geometrie des Werkstücks sich nicht signifikant ändert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zunächst die theoretischen Grundlagen des Verfahrens erarbeitet und unter anderem die Prozessparameter sowie deren Einfluss auf die Umformung erläutert. Darauf aufbauend wurden mögliche Lernziele für den Laborversuch definiert, die den Studierenden das Konzept der Kaltverfestigung und der Kornfeinung näherbringen.

Ein wichtiges Ergebnis der Arbeit ist die Konstruktion und erste Auslegung eines Umformwerkzeugs für den Laborversuch. Es wurden zwei verschiedene Werkzeugausführungen entwickelt und verglichen. Nach einer Analyse hinsichtlich Funktionalität, Handhabung und Herstellbarkeit fiel die Wahl auf die zweite Ausführung, welche über eine Auswerffunktion verfügt.

Die durchgeführten Berechnungen zur Werkzeugauslegung haben gezeigt, dass das gewählte Material und die Konstruktionsparameter den Anforderungen des Prozesses gerecht werden. Die Nachweisrechnungen zur Stabilität des Werkzeugs und der Sicherheit des Stempels haben bestätigt, dass die Konstruktion den Belastungen standhält und eine sichere Durchführung des Laborversuchs möglich ist.

Für zukünftige Arbeiten bietet es sich an, die Erfahrungen aus den Laborversuchen zu nutzen, um das Versuchswerkzeug weiter zu optimieren. Ebenso können weitere Werkzeughersteller kontaktiert werden und die Produktion des Werkzeugs ermöglicht werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Agwa, M. A., Ali, M. N., & Al-Shorbagy, A. E. (2016). Optimum processing parameters for equal channel angular pressing. *Mechanics of Materials*
- [2] Azushima, A.; Kopp, R.; Korhonen, A.; Yang, D.Y.; Micari, F.; Lahoti, G.D.; Groche, P.; Yanagimoto, J.; Tsuji, N.; Rosochowski, A.; et al. Severe plastic deformation (SPD) processes for metals. *CIRP Ann.* 2008
- [3] Bargel, H. & Schulze, G. (2018). *Werkstoffkunde*. Springer-Verlag.
- [4] Berbon, P. B., Furukawa, M., Horita, Z., Nemoto, M., & Langdon, T. G. (1999). Influence of pressing speed on microstructural development in equal-channel angular pressing. *Metallurgical and Materials Transactions A*
- [5] Cui, L., Shao, S., Wang, H., Zhang, G., Zhao, Z. & Zhao, C. (2022). Recent Advances in the Equal Channel Angular Pressing of Metallic Materials. *Processes*, 10(11), 2181
- [6] Department of Materials Science and Metallurgy - University of Cambridge. (o. D.). Slip line field theory. Creative Commons Attribution -NonCommercial-ShareAlike 4.0 International. https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/metal-forming-3/slip_line_field.php
- [7] Dietrich, J. (2017). *Praxis der Umformtechnik: Umform- und Zerteilverfahren, Werkzeuge, Maschinen*. Springer-Verlag S. 6
- [8] Djavanroodi, F., Omranpour, B., Ebrahimi, M., & Sedighi, M. (2012). Designing of ECAP parameters based on strain distribution uniformity. *Progress in Natural Science Materials International*, 22(5), 452–460
- [9] Franz, M.; Mingler, B.; Krystian, M.; Sajti, L.; Pohl, D.; Rellinghaus, B.; Wolf-Brandstetter, C.; Scharnweber, D. Strengthening of Titanium by Equal Channel Angular Pressing—Impact on Oxide Layer Properties of Pure Titanium and Ti6Al4V. *Adv. Mater. Interfaces* 2020
- [10] Furukawa, M., Horita, Z., Nemoto, M. et al. Review Processing of metals by equal-channel angular pressing. *Journal of Materials Science* 36, 2835–2843 (2001)
- [11] Gruber, M. Equal-Channel Angular Pressing für industriell anwendbare Aluminiumblechwerkstoffe, 2024
- [12] Hellmig RJ, Hochgradige plastische Umformung durch Equal channel angular pressing (ECAP), 2008
- [13] Horita, Z., Fujinami, T., Nemoto, M., & Langdon, T. G. (2001). Improvement of mechanical properties for Al alloys using equal-channel angular pressing. *Journal of Materials Processing Technology*
- [14] Hyun, CY., Lee, JH. & Kim, HK. Microstructures and mechanical properties of ultrafine grained pure Ti produced by severe plastic deformation. *Res Chem Intermed* 36, 629–638 (2010).
- [15] Iwahashi, Y., Horita, Z., Nemoto, M., & Langdon, T. G. (1998). *The process of grain refinement in equal-channel angular pressing*. *Acta Materialia*

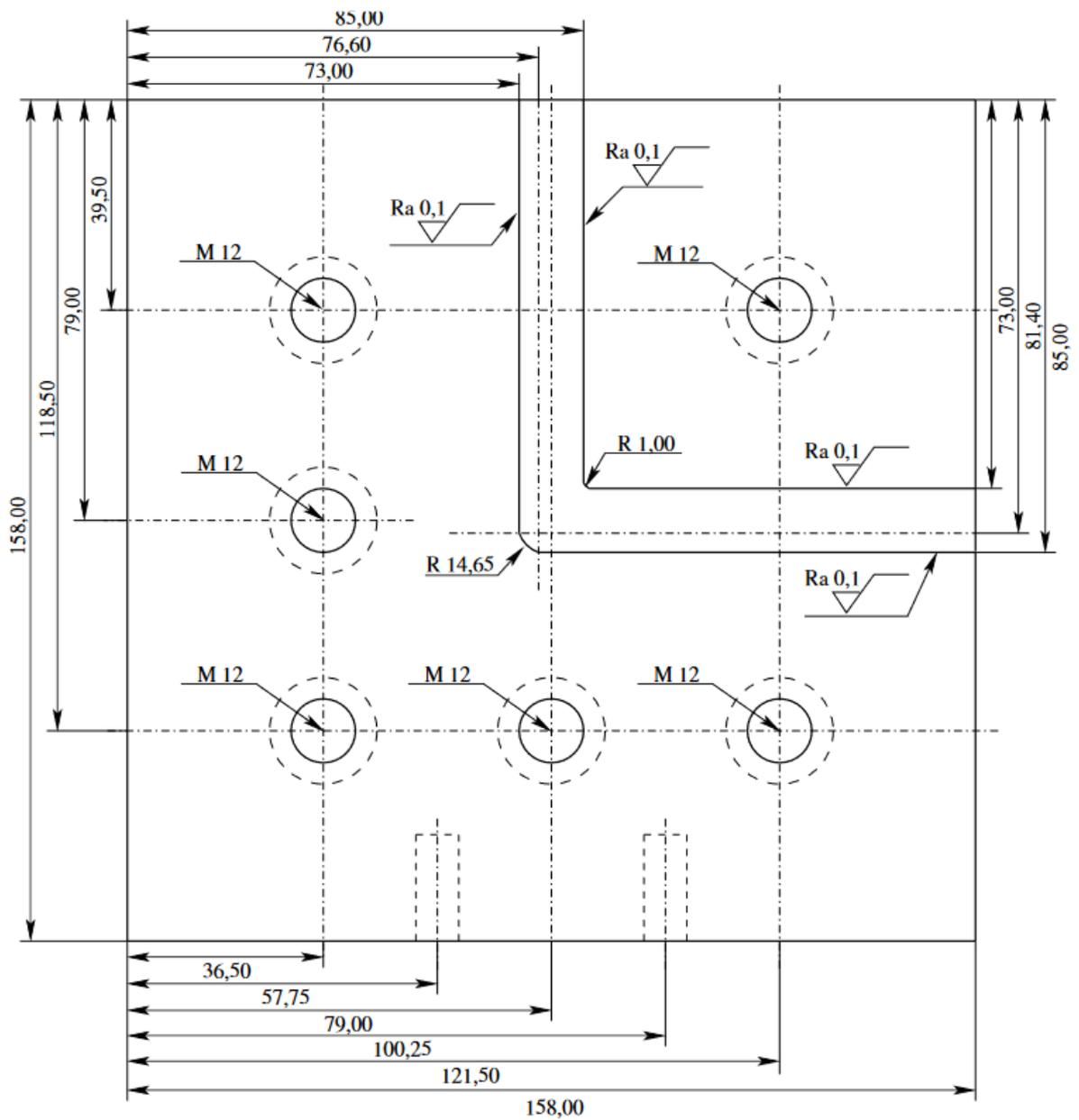
- [16] Kuchling, H. (1978). Taschenbuch der Physik
- [17] M.A. Meyers, J.C. LaSalvia, V.F. Nesterenko, Y.J. Chen und B.K. Kad, "Dynamic Recrystallization in High-Strain-Rate Deformation", in: T.R. McNelley (ed.), "Recrystallization and Related Phenomena", Proceedings of 3rd Int. Conf. Of Recrystallization and Related Phenomena (ReX'96), Monterey 1997, S. 279–286
- [18] Mahnken, R. (2015). Lehrbuch der Technischen Mechanik - Elastostatik. Springer
- [19] Mendes Filho, A. de A., Prados, E. F., Valio, G. T., Rubert, J. B., Sordi, V. L., & Ferrante, M. (2011). Severe plastic deformation by equal channel angular pressing: product quality and operational details. *Materials Research*
- [20] Nakashima, K., Horita, Z., Nemoto, M. & Langdon, T. G. (2000). Development of a multi-pass facility for equal-channel angular pressing to high total strains. *Materials Science And Engineering A*, 281(1–2), 82–87.
- [21] Patil, B. V., Chakkingal, U. & Kumar, T. S. P. (2010). Influence of Outer Corner Radius in Equal Channel Angular Pressing. Zenodo (CERN European Organization For Nuclear Research)
- [22] Pürçek, G. (2005). Improvement of mechanical properties for Zn–Al alloys using equal-channel angular pressing. *Journal Of Materials Processing Technology*, 169(2), 242–248.
- [23] Ruslan Z. Valiev; Terence G. Langdon. (2006). Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement
- [24] Segal, V. M. (1999). Equal channel angular extrusion from macromechanics to structure formation. *Materials Science and Engineering A*
- [25] Sheremetyev, V.; Churakova, A.; Derkach, M.; Gunderov, D.; Raab, G.; Prokoshkin, S. Effect of ECAP and annealing on structure and mechanical properties of metastable beta Ti-18Zr-15Nb (at.%) alloy. *Mater. Lett.* 2021
- [26] T. Hao; Z.Q. Fan; T. Zhang; G.N. Luo; X.P. Wang; C.S. Liu; Q.F. Fang. Strength and ductility improvement of ultrafine-grained tungsten produced by equal-channel angular pressing, *Journal of Nuclear Materials*, Volume 455, Issues 1–3, 2014
- [27] Victoria-Hernandez, J.; Kurz, G.; Suh, J.S.; Letzig, D. Microstructure development and related mechanical behavior of the ZEW200 Mg alloy processed by differential speed rolling and equal channel angular pressing In: *Materials Science Forum, THERMEC 2018 (2018) Trans Tech Publications*
- [28] Yan, K.; Sun, J.; Bai, J.; Liu, H.; Huang, X.; Jin, Z.; Wu, Y. Preparation of a high strength and high ductility Mg-6Zn alloy wire by combination of ECAP and hot drawing. *Mater. Sci. Eng. A* 2019
- [29] Zhao, G.; Xu, S.; Luan, Y.; Guan, Y.; Lun, N.; Ren, X. Grain refinement mechanism analysis and experimental investigation of equal channel angular pressing for
- [30] IBC- https://www.ibc-waelzlager.com/files/IBC_Waelzlagerwerkstoffe.pdf
- [31] amco-metall.de/fileadmin/downloads/Datenblaetter/Datenblatt_AMCO_1050A.pdf

Anhang

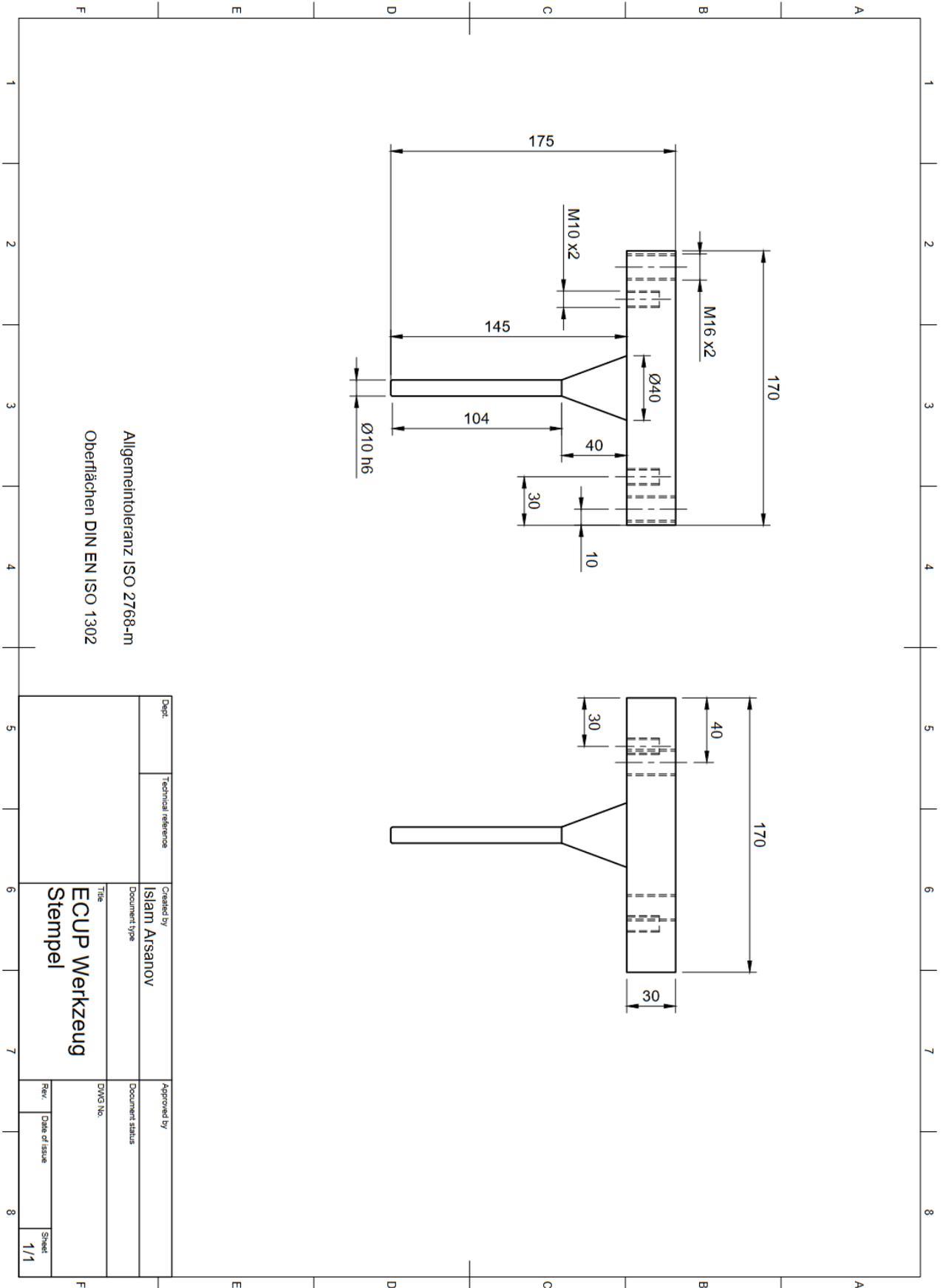
A Die Exceltabelle (Tabelle ist im digitalen Anhang zu finden)

Rechner für benötigte Kraft beim ECUP Umformen mit einer 90T Universalpresse			
Informationen Werkstück			
Umzuformender Werkstoff	=	AlMgSi1	
Fließspannung Werkstoff k_f 100% [N/mm ²]	=	150	
μ_w	=	0,2	
Durchmesser [mm]	=	10	farbige Felder müssen ausgefüllt werden
Länge Werkstück [mm]	=	100	
Informationen Werkzeug			
Länge Kanal [mm]	=	110	
Winkel zwischen Kanälen [Grad]	=	90	
Zwischenrechnungen			
Querschnitt Werkstück	=	79	
Mantelfläche zylindrischer Werkstück	=	3142	
Winkel zwischen Kanälen [Bogenmaß]	=	1,57	
Schubreibung τ	=	30	
Schubspannung k	=	300	
Stempeldruckspannung p	=	1291	
benötigte Stempelkraft F	=	101	
Möglichkeitsüberprüfung			
Presskraft Presse =	=	900	
benötigte Stempelkraft F	=	101	
Differenz	=	799	Grün bedeutet ist möglich
			Rot bedeutet ist nicht möglich

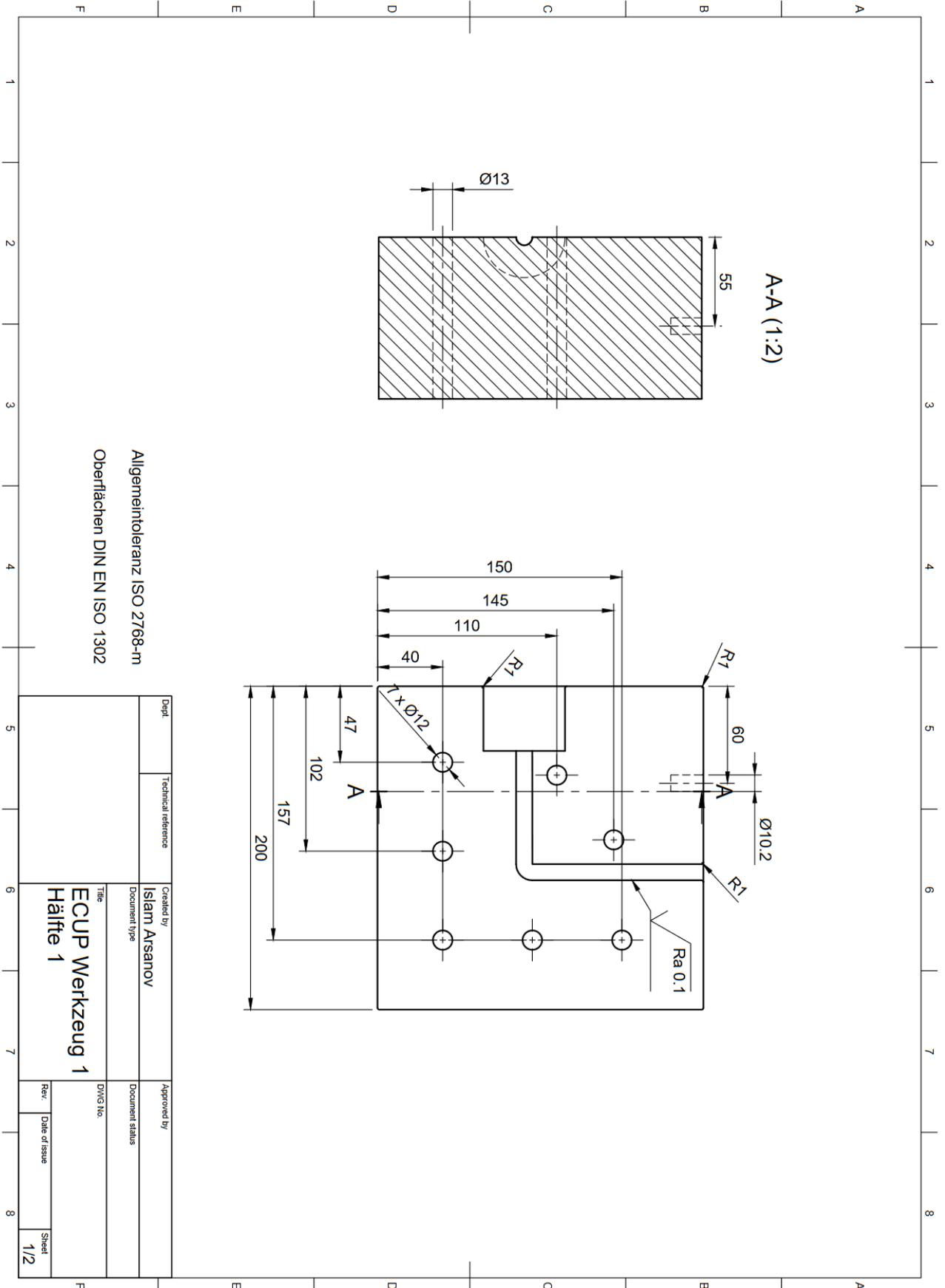
B Technische Zeichnung aus der Arbeit von Hellmig [12]



C Technische Zeichnungen (PDF und STL-Dateien im Digitalen Anhang zu finden)

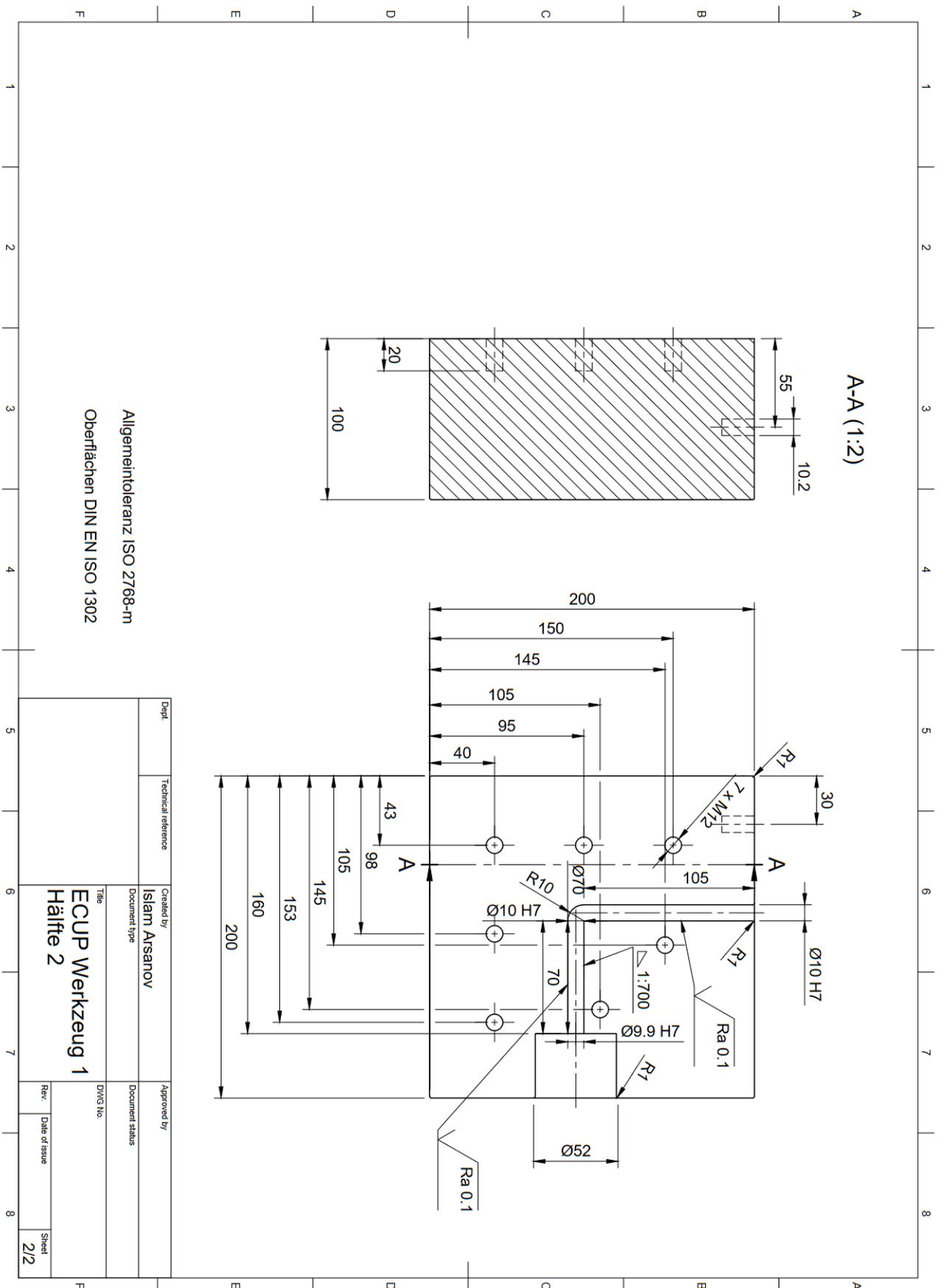


Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
		Islam Arsanov	
	Document type	Document status	
	Title	DWG No.	
	ECUP Werkzeug		
	Stempel		
Rev.	Date of issue		Sheet
			1/1



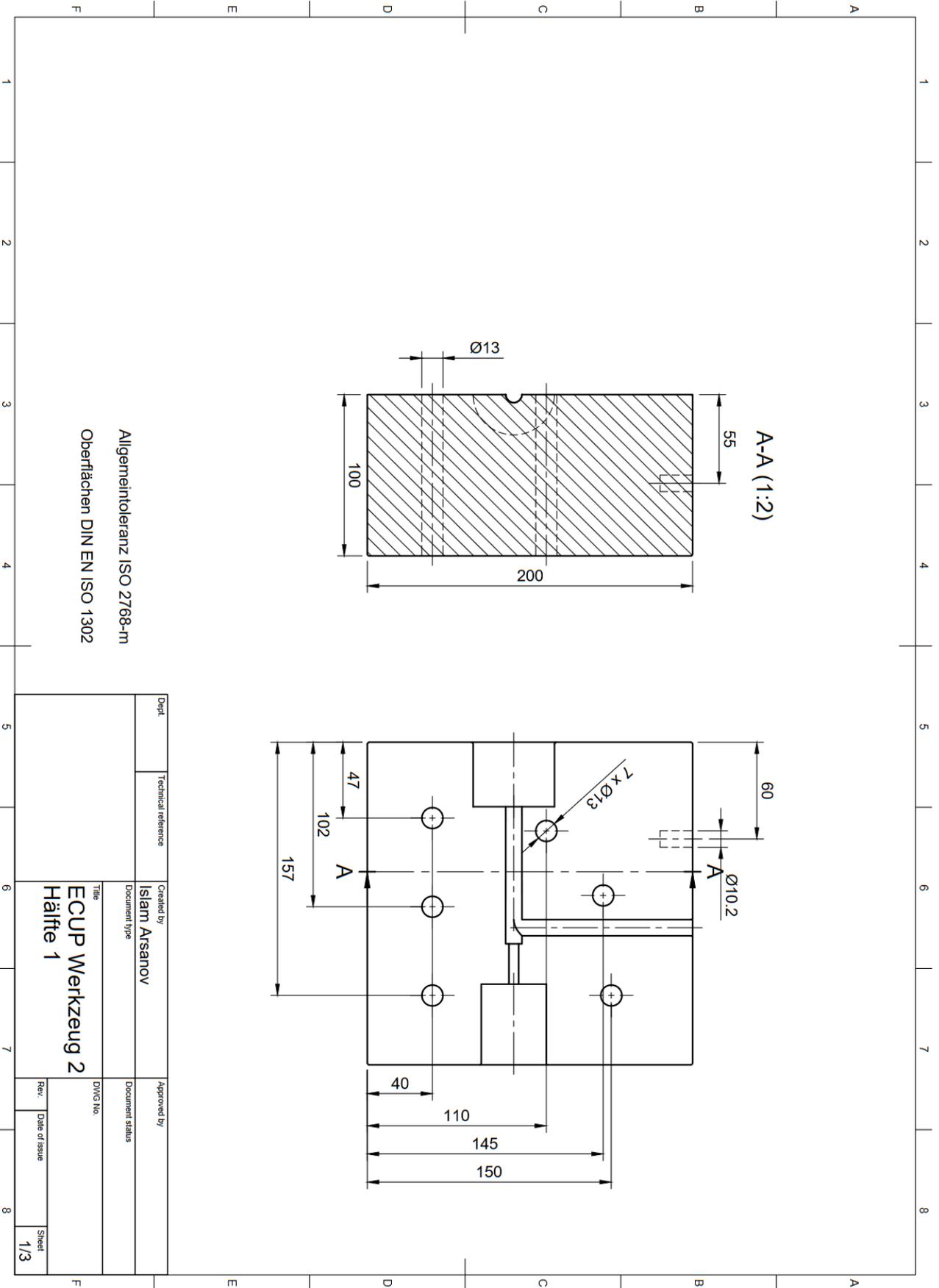
Allgemeintoleranz ISO 2768-m
Oberflächen DIN EN ISO 1302

Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
		Islam Aisanov	
	Document type	Document status	
	Title	DWG No.	
	ECUP Werkzeug 1		
	Hälfte 1		
Rev.	Date of Issue		Sheet
			1/2



Allgemeintoleranz ISO 2768-m
Oberflächen DIN EN ISO 1302

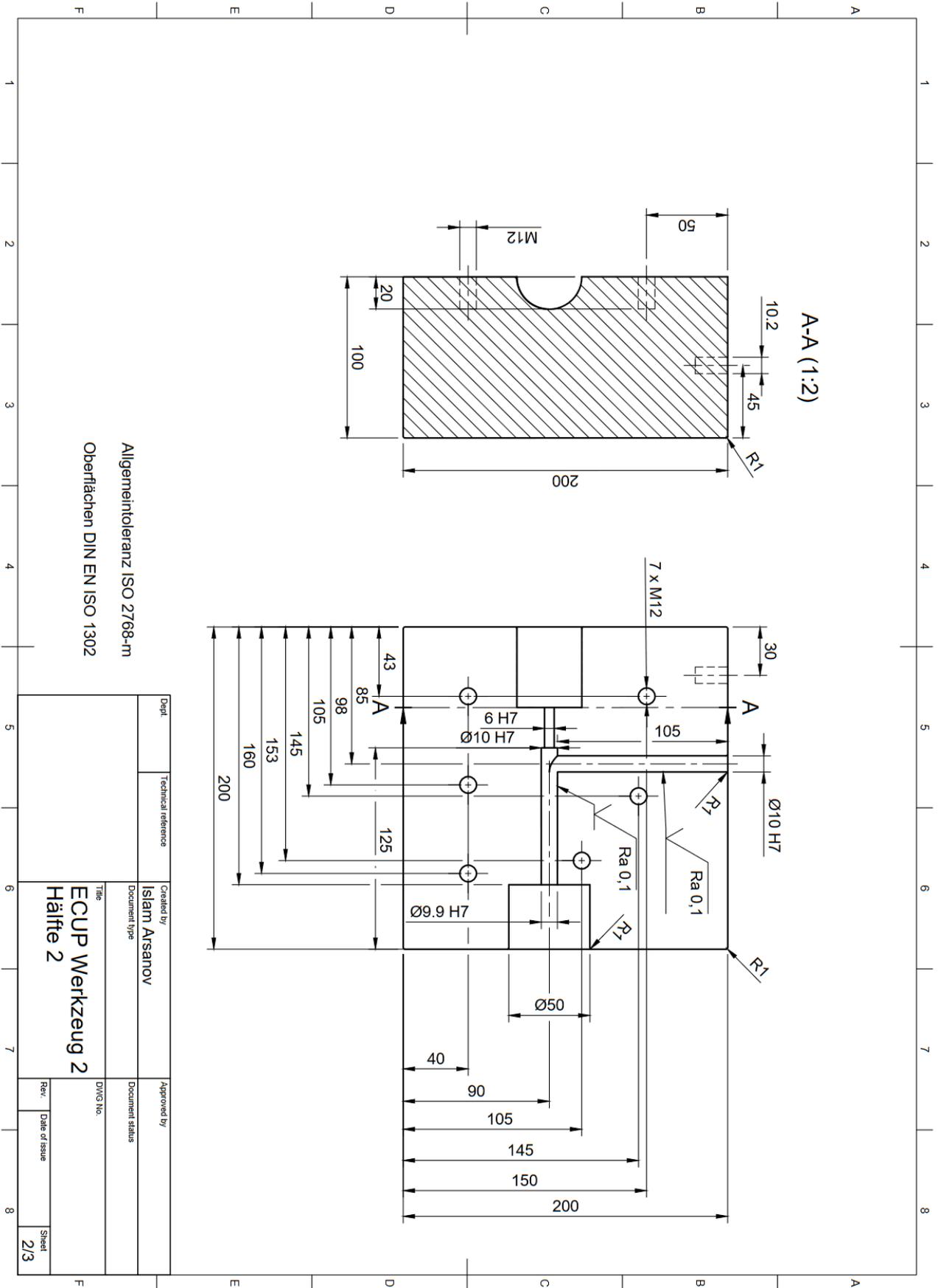
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
		Islam Afsanov	
	Document type	Document status	
	Title	DWG No.	
	ECUP Werkzeug 1		
	Hälfte 2		
Rev.	Date of Issue		Sheet
			2/2



A-A (1:2)

Allgemeintoleranz ISO 2768-m
Oberflächen DIN EN ISO 1302

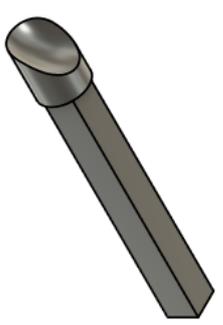
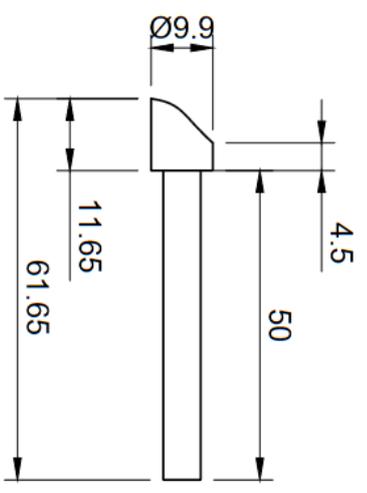
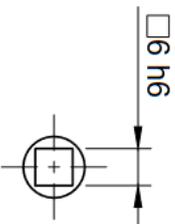
Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
		Islam Arsanov	
		Document type	Document status
		Title	DWG No.
		ECUP Werkzeug 2	
		Hälfte 1	
		Rev.	Date of issue
			Sheet
			1/3



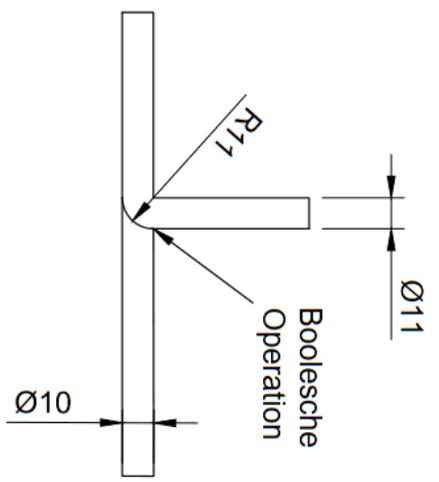
A-A (1:2)

Allgemeintoleranz ISO 2768-m
Oberflächen DIN EN ISO 1302

Dept.	Technical reference	Created by	Approved by
		Islam Arsanov	
	Document type	Document status	
	Title	DWG No.	
	ECUP Werkzeug 2		
	Hälfte 2		
Rev.	Date of issue		
	Sheet		
	2/3		



Allgemeintoleranz ISO 2768-m
Oberflächen DIN EN ISO 1302



Dept.	Technical reference	Created by Islam Arsanov	Approved by
		Document type	Document status
Title		DWG No.	
ECUP Werkzeug 2 Auswerfer			
Rev.	Date of issue	Sheet	
		3/3	



Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung einer Abschlussarbeit

Gemäß der Allgemeinen Prüfungs- und Studienordnung ist zusammen mit der Abschlussarbeit eine schriftliche Erklärung abzugeben, in der der Studierende bestätigt, dass die Abschlussarbeit „– bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit [(§ 18 Abs. 1 APSO-TI-BM bzw. § 21 Abs. 1 APSO-INGI)] – ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich zu machen.“

Quelle: § 16 Abs. 5 APSO-TI-BM bzw. § 15 Abs. 6 APSO-INGI

Dieses Blatt, mit der folgenden Erklärung, ist nach Fertigstellung der Abschlussarbeit durch den Studierenden auszufüllen und jeweils mit Originalunterschrift als letztes Blatt in das Prüfungsexemplar der Abschlussarbeit einzubinden.

Eine unrichtig abgegebene Erklärung kann -auch nachträglich- zur Ungültigkeit des Studienabschlusses führen.

Erklärung zur selbstständigen Bearbeitung der Arbeit

Hiermit versichere ich,

Name:

Islam

Vorname:

Arsanov

dass ich die vorliegende Bachelorarbeit bzw. bei einer Gruppenarbeit die entsprechend gekennzeichneten Teile der Arbeit – mit dem Thema:

Entwicklung eines Laborversuchs zum Gleichkanalwinkelpressen und Auslegung eines Versuchswerkzeugs

ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

- die folgende Aussage ist bei Gruppenarbeiten auszufüllen und entfällt bei Einzelarbeiten -

Die Kennzeichnung der von mir erstellten und verantworteten Teile der -bitte auswählen- ist erfolgt durch:

Hamburg
Ort

24.10.2024
Datum

Unterschrift im Original