



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Hamburg University of Applied Sciences

Bachelorarbeit

Maximilian Rolf Georg-Günther Krug

Thermoformwerkzeugherstellung im Gießverfahren vs. Rapid Prototyping

*Fakultät Technik und Informatik
Department Maschinenbau und Produktion*

*Faculty of Engineering and Computer Science
Department of Mechanical Engineering and
Production Management*

Maximilian Rolf Georg-Günther Krug
Thema der Bachelorarbeit
Thermoformwerkzeugherstellung im
Gießverfahren vs. Rapid Prototyping

Bachelorarbeit wurde eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

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

Erstprüfer : Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Helmut Schäfer
Zweitprüfer : Dipl.-Ing. Niels Eiben

Abgabedatum: 27.01.2017

Zusammenfassung

Name des Studierenden

Maximilian Rolf Georg-Günther Krug

Thema der Bachelorthesis

Thermoformwerkzeugherstellung im Gießverfahren vs. Rapid Prototyping

Stichworte

Thermoformverfahren, Gießverfahren, Rapid Prototyping Verfahren

Kurzzusammenfassung

Diese Arbeit umfasst die Herstellung zweier Thermoformwerkzeuge. Dabei wird ein maßstäbliches Automodell (Maßstab 1:18) zur Formherstellung mittels Gießverfahren herangezogen und mit einem im Rapid Prototyping Verfahren hergestellten Automodell verglichen. Bei der Gegenüberstellung der zwei Herstellungsarten sind die entscheidenden Faktoren Kosten, zeitlicher Aufwand, technische Machbarkeit, Lebensdauer der Form, Detailgetreue und die Oberflächengüte. Neben dem Vergleich der Ergebnisse befasst sich diese Bachelorarbeit auch mit den entstehenden Konstruktionsproblemen und ihren Lösungen.

Name of Student

Maximilian Rolf Georg-Günther Krug

Title of the paper

Thermoform-tool-manufacturing; casting method vs rapid prototyping

Keywords

Thermoforming process, casting process, rapid prototyping process

Abstract

This thesis discusses the manufacturing process of two thermoform tools. For this, a 1:18, true to scale car Modell is being used to manufacture a form using the casting method which is then being compared to a car Modell manufactured through rapid prototyping. When comparing these two methods, the main criteria are the following: total monetary costs, required time, technical feasibility, durability of the form and the attained levels of detail and surface quality. Besides result comparison, this thesis further discusses the arising problems of the construction process and possible solutions

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all denen Danken die es mir mit ihrer Unterstützung ermöglicht haben mein Studium zu einem erfolgreichen Abschluss zu bringen.

In erster Linie meinen Eltern Silvia Krug und Christian Krug die mich über mein komplettes Studium mental und finanziell unterstützt haben und immer ein offenes Ohr für mich hatten.

Meiner Großmutter und Vermieterin Ursula Jacobsen die, auch wenn sie den Großteil von dem was ich ihr aus meinem Studium erzählt habe nicht verstanden hat, immer sehr interessiert zugehört hat.

Meinen Großeltern Marianne Krug und Günther Krug die bis zum Schluss mitgefiebert haben und mich tatkräftig bei der Suche eines Praktikumsplatzes zum Abschluss meines Studiums unterstützten.

Weiterhin danke ich meinem betreuenden Professor Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Helmut Schäfer der mit seinem technischen Verständnis maßgeblich dazu beigetragen hat das ich aus dieser Bachelorthesis auch etwas für mein späteres Berufsleben mitnehmen kann.

Nicht zuletzt gilt mein Dank Christiane Ramcke die es zu Beginn meines Studiums immer geschafft hat mich zu motivieren und einst der ausschlaggebende Grund für mich war dieses Studium zu beginnen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	I
Tabellenverzeichnis	III
1.) Prozess	1
1.1) Grundlagen Thermoformen	1
1.2) Vor- /Nachteile des Verfahrens	3
2.) Thermoformmaschinen im Überblick	4
2.1) Plattenformmaschine UA 100Ed.....	4
2.2) Kleinformgerät KFG 37	5
3.) Halbzeug.....	7
3.1) Material	7
3.2) Randbedingungen	10
4.) Formwerkzeug	11
4.1) Arten	11
4.2) Vor- /Nachteile	12
4.3) Anforderungsliste	14
5.) Konventionelle Formherstellung	15
5.1) Modellvorbereitung	15
5.2) Formkastenherstellung	16
5.3) Abformen	17
5.3.1) Verwendete Silikonmasse	17
5.3.2) Abformverfahren	18
5.3.3) Nachbearbeitung der Form	20
5.4) Abgießen.....	21
5.4.1) Verwendetes Gießharz	21
5.4.2) Abgussverfahren	23
5.4.3) Nachbearbeitung des Formwerkzeuges	24
6.) Test Rapid Prototyping	28
6.1) Testwerkzeug: 3D-Automodell	28
6.2) Testwerkzeuge: Verhalten von Schichtdicke zu Oberflächengüte	29

7.) Formherstellung mittels Rapid Prototyping.....	31
7.1) Erstellung des 3D-Modelles	31
7.1.1) Konstruktionsvorgang	31
7.1.2) Besonderheiten	33
7.1.3) Erstellung des Maschinencodes	36
7.2) Erstellung des Formwerkzeuges	37
7.2.1) Vorbereitung	37
7.2.2) Verwendung verschiedener Materialien	39
7.2.3) Nachbearbeitung des Formwerkzeuges	40
8.) Herstellung der Unterkonstruktion für die Plattenformmaschine UA 100Ed	42
8.1) Randbedingungen	42
8.2) Herstellungsvorgang	42
8.3) Endmontage und Integration in der Maschine	45
9.) Tiefziehvorgang	46
9.1) Formwerkzeug des Porsche 356 auf KFG37	46
9.1.1) Testreihe des Formwerkzeuges Porsche 356	46
9.1.2) Verbesserungen am Formwerkzeug	47
9.2) Formwerkzeug des Audi R8 auf UA 100Ed	49
9.2.1) Testreihe des Formwerkzeuges Audi R8	49
9.2.2) Verbesserungen an der Unterkonstruktion	54
10.) Ergebnisse & Gegenüberstellung	58
10.1) Vergleich der Formwerkzeuge	58
10.2) Kosten- & Aufwandsvergleich	59
10.3) Bewertung & Aussicht	61

Anhang

Literaturverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

1.1	KFG 37.....	1
2.1	schematische Darstellung der Oberheizung mit Temperaturzonen	5
2.2	Bedienelemente	6
3.1	Wärmeformbeständigkeit.....	9
3.2	Verarbeitungsqualität aus subjektiver Sicht	9
4.1	Positivformwerkzeug.....	11
4.2	Negativformwerkzeug.....	12
4.3	Faltenbildung und Schreckmarken	13
5.1	vorbereitetes Modell	16
5.2	Abformverfahren.....	19
5.3	Negativform aus Silikon	20
5.4	Eigenschaften von UP Harzen.....	21
5.5	Eigenschaften von EP Harzen	22
5.6	Formwerkzeug Porsche 356	24
5.7	Gewindeinsatzvorrichtung Porsche 356	25
5.8	Formermittlung der Motorhaube	26
5.9	abgeformte Splines	26
6.1	Testwerkzeug 3D-Automodell abgeformt.....	29
6.2	Plättchen.....	30
6.3	Oberflächenqualität durch Schichtdicke.....	30
7.1	Solid Audi R8.....	31
7.2	HAW Logo mit Entlüftungsbohrungen	32
7.3	weitere Entlüftungsbohrungen	33
7.4	Trennung des Formwerkzeuges	33
7.5	Positionierung auf dem Druckbett	34
7.6	seitliche Hinterschneidungen	34
7.7	Öffnungen für die Verbindung mittels Klammern	35
7.8	Griffe am Formwerkzeug	35
7.9	Ausrichtung auf dem Druckbett	36

7.10	Testquader thermogeformt.....	39
7.11	Verbund der zwei Modellhälften	40
8.1	Silikondichtung	43
8.2	Integration der Unterkonstruktion in der Thermoformmaschine	45
9.1	unsauber ausgeformtes HAW Emblem	46
9.2	zerstörte Abbildung.....	46
9.3	Entlüftungsbohrungen im HAW Emblem.....	47
9.4	Entlüftungsbohrung Unterseite.....	47
9.5	entfernen der Hinterschneidungen	48
9.6	abgeformtes Modell.....	48
9.7	ungenügend erwärmte Folie	49
9.8	abgeformtes Modell mit Faltenbildung	50
9.9	abgeformtes Modell mit verstärkter Faltenbildung	51
9.10	abgeformtes Modell mit verringerter Vorblaszeit	52
9.11	abgeformtes Modell mit ungenügender Detailgetreue.....	53
9.12	Silikondichtung der Oberplatte	55
9.13	Silikondichtung der Unterplatte	55
9.14	aufgeblähte Folie.....	56
9.15	montierter Vakuumkanal.....	57
9.16	optimale Abformung des Audi R8	57
10.1	Abformung Porsche 356	58
10.2	Abformung Audi R8.....	58

Tabellenverzeichnis

1.1	Vor- /Nachteile Thermoformen.....	3
3.1	Plattenabmaße	10
4.1	Vor- und Nachteile der Positivformung	12
4.2	Vor- und Nachteile der Negativformung	13
4.3	Anforderungsliste	14
5.1	Druckparameter HAW Logo.....	27
6.1	Druckparameter Testwerkzeug: Automodell.....	28
6.2	Druckparameter Plättchen	29
7.1	Druckparameter 3D Modell Audi R8	36
9.1	Gussform HAW Emblem	47
9.2	Versuch 1	49
9.3	Versuch 2	50
9.4	Versuch 3	51
9.5	Versuch 4	52
9.6	Versuch 5	53
9.7	Druckparameter Vakuumkanal.....	56
10.1	Kosten Gießverfahren	59
10.2	Kosten Rapid Prototyping Verfahren	59
10.3	Zeit Gießverfahren	60
10.4	Zeit Rapid Prototyping Verfahren.....	60

1.1 Grundlagen Thermoformen

Beim Thermoformverfahren werden Bauteile aus dünnen Platten oder Folien mittels Wärme und Unter- oder Überdruck hergestellt. Es wird hierbei zwischen Positiv- und Negativformung unterschieden, wobei beide Verfahrenstypen ihre spezifischen Vor- und Nachteile besitzen (siehe Kap. 4.2). Folgend wird der Vorgang des Thermoformens am Beispiel des Kleinformgerätes KFG 37 (siehe Kap. 2.2) erklärt, welches im weiteren Verlauf nur als KFG bezeichnet wird.

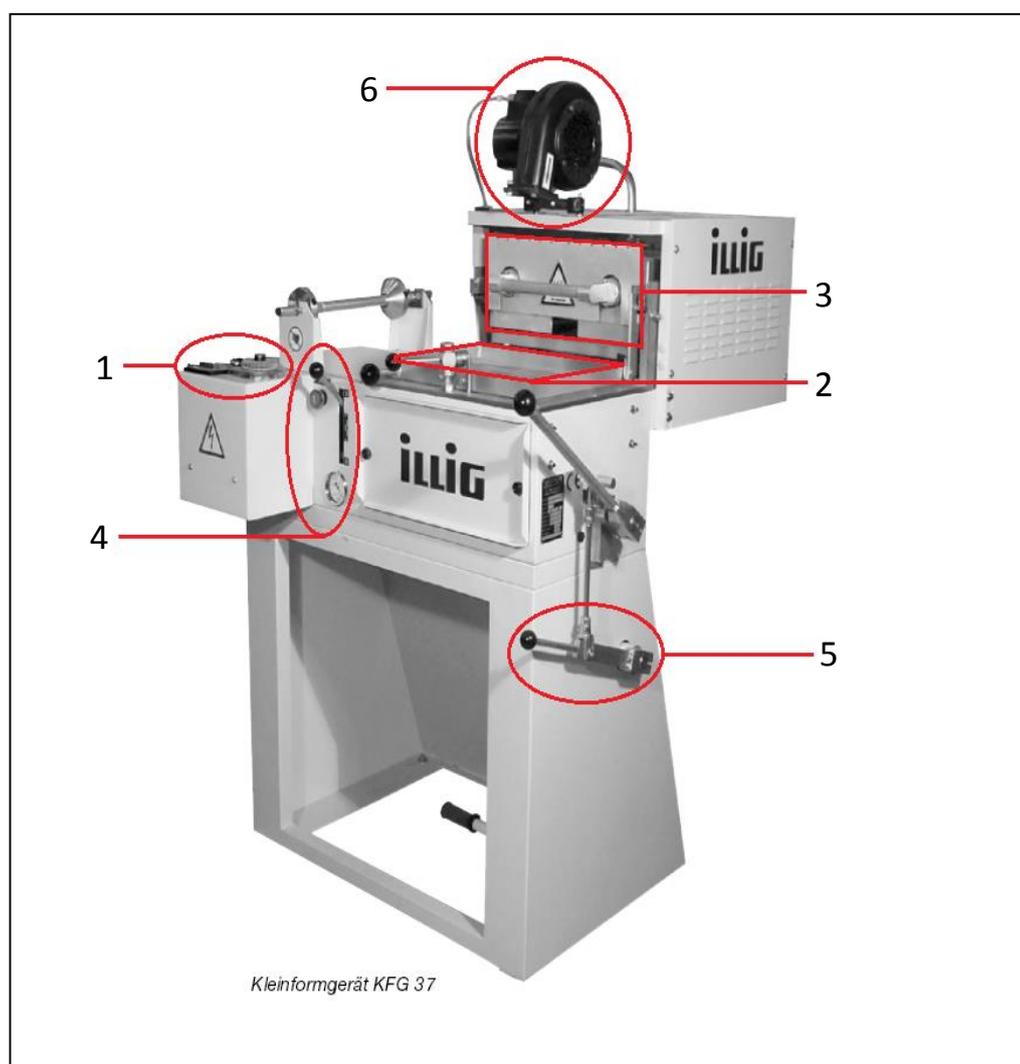


Abb. 1.1 KFG 37 [1]

Alle im weiteren Verlauf bezeichnenden Zahlen beziehen sich auf das KFG (Abb. 1.1). Der erste Schritt beim Thermoformprozess mit dem KFG ist das Aufwärmen der Flächenstrahler (3) auf Betriebstemperatur, dies geschieht über das Bedienelement (1). Hier wird die benötigte Temperatur, die Heizdauer und das Kühlgebläse eingestellt.

1. Prozess

Das Formwerkzeug wird nun auf dem unter dem Spannrahmen (2) liegenden Arbeitstisch positioniert, gegebenenfalls mit Silicon-Trennmittel (siehe Kap. 10) benetzt um das spätere Entfernen des Formwerkzeuges aus dem Werkstück zu erleichtern. Mit Hilfe des Hebelmechanismus wird das Werkstück nach unten gefahren. Hat der Heizstrahler (3) seine Betriebstemperatur (abhängig je nach verwendetem Material siehe Kap. 3.1) erreicht, folgt das Einspannen der zu verformenden Platte oder Folie unter dem vorgesehenen Spannrahmen (2). Durch das Spannen des Halbzeuges auf die unter dem Spannrahmen befindliche Dichtung wird ein darunterliegender luftdichter Raum erzeugt, der sog. Blaskasten. Der Heizstrahler (3) wird nun über die im Spannrahmen (2) eingespannte Platte oder Folie gebracht und erwärmt das Halbzeug über seine Erweichungstemperatur (Glasübergangstemperatur). Zum Vorstrecken des Halbzeuges und damit Anpassen der Wandung an die spätere dreidimensionale Geometrie wird während des Erwärmens ein Über- oder Unterdruck im Blaskasten erzeugt. Dieser Über- oder Unterdruck erfolgt mithilfe des Hebels und dazugehöriger Druckanzeige (4).

Hat die Platte ihre Erweichungstemperatur erreicht bildet sich durch den angelegten Über- oder Unterdruck eine entsprechende konkave oder konvexe Ausformung im Material. Den richtigen Zeitpunkt zu finden ist beim Handbetrieb mit dem KFG Übungssache und ein erfolgreicher Umformprozess benötigt genügend Praxiserfahrung. Der Heizstrahler (3) wird nun zurückgefahren und beinahe zeitgleich der Arbeitstisch mit dem Formwerkzeug mithilfe des Hebelmechanismus (5) nach oben gegen das erweichte Halbzeug gefahren. Durch das Betätigen des Hebelmechanismus (5) wird nach Durchfahren eines Sensors die Vakuumpumpe aktiviert. So entsteht im Blaskasten ein Vakuum und der atmosphärische Druck der Umgebung presst das noch weiche Halbzeug auf das Formwerkzeug. Das Kühlgebläse (6) wird eingeschaltet und kühlt das nun erzeugte Werkstück bis es erstarrt und seine endgültige Form erreicht hat.

Der Arbeitstisch wird mithilfe des Hebelmechanismus (5) nach unten gefahren und der Spannrahmen (2) wird zum Freigeben des Werkstückes geöffnet. War das Formwerkzeug nicht fest auf dem Arbeitstisch befestigt wird dieses nun im letzten Schritt aus dem Werkstück entfernt.

1.2 Vor- /Nachteile des Verfahrens

Wie bei jedem Verfahren ergeben sich auch hier spezifische Vor- und Nachteile, welche in der folgenden Tabelle (Tab. 1.1) aufgeführt werden. Hier als Gegenüberstellung zum Spritzgießen, welches als direktes Konkurrenzverfahren angesehen wird.

Tab. 1.1 Vor- /Nachteile Thermoformen

Vorteile	Nachteile
- Geringere Werkzeugkosten gegenüber dem Spritzgießen [2]	- Bildung von Schreckmarken und Schwimmhäuten
- Keine Entstehung von Fließnähten	- Keine homogene Wanddickenverteilung
- Weniger zeitintensiv als das Spritzgießen	- Mehr Nacharbeit erforderlich als beim Spritzgießen [3]
- Größe der Formteile ist verfahrenstechnisch nicht begrenzt [2]	- Zu scharfe Kanten führen zu punktuellen Ausdünnungen im fertigen Werkstück
- Möglichkeit mehrschichtige Halbzeuge zu verarbeiten (Nutzung mehrerer Materialvorteile) [4][5]	- Benötigte Entlüftungsbohrungen können Oberflächenfehler am fertigen Produkt hinterlassen
- Durch geringere Werkzeugkosten und einfachere Herstellung gut geeignet für Prototypenbau	- Verwendung kostenintensiverer Halbzeuge im Vergleich zum Spritzgießen (Granulat)
- Geringere Systemkosten bei Klein- & Mittelserienfertigung [5]	

Das Thermoformen besitzt wie jedes Verfahren seine Kernkompetenzen. Thermoformen wird immer dann eingesetzt wenn die inhomogene Wanddickenverteilung nicht von großer Bedeutung ist und es im Gegenzug auf dünne bis mitteldicke Bauteile ankommt die eine innere oder äußere Geometrie detailliert abbilden.

2.1 Plattenformmaschine UA 100 Ed

Die Plattenformmaschine UA 100 Ed ist eine halbautomatische Thermoformmaschine welche Platten mit den max. Abmaßen von 1000x600x10mm verarbeiten kann [6]. Diese Maschine verfügt über eine leistungsstarke Vakuumpumpe mit $40m^3/h$ und ist somit fähig Ziehtiefen von bis zu 300mm zu erreichen [6]. Aufgeheizt wird das Halbzeug von keramischen Infrarotstrahlern (HTS Strahlern [7]). Diese sind zwar im Vergleich zu Konvektionsheizungen träge, aber dafür auch sparsamer im Energieverbrauch. Über den TFT-Touchscreen lassen sich die Betriebsparameter über eine von der Firma Illig entwickelte Bedienoberfläche anwählen. Hier wird zwischen dem manuellen und dem halbautomatischen Betrieb unterschieden. Einstellen lassen sich unter anderem verschiedene Heizzonen (Abb. 2.1), so lässt sich eine gleichmäßige Plattenerwärmung über die gesamte Verformungsfläche erreichen, da sich durch das Wegfahren der Heizung im hinteren Bereich des Halbzeuges sonst eine längere Erwärmung einstellen würde. Die Plattenformmaschine UA 100 Ed verfügt neben der Oberheizung auch über eine Unterheizung. Diese soll gerade bei großen Plattenstärken eine gleichmäßige Erwärmung des Halbzeuges von allen Seiten gewährleisten. Das verstärkte Kühlgebläse besitzt 4 einstellbare Luftaustrittsstutzen um das thermogeformte Halbzeug gleichmäßig zu kühlen [6].

Über die Benutzeroberfläche lassen sich folgende Parameter einstellen:

- Heizzeiten [s] der Ober- und Unterheizung
- Verzögertes Einfahren des Untertisches
- Start- und Endzeit [s] des Vorblasens
- Start- und Endzeit [s] des Kühlgebläses
- Start- und Endzeit [s] des Vakuums
- 40 unterschiedlich anwählbare Heizzonen der Oberheizung
(in max. 3 unterschiedlichen Temperaturen einstellbar)
- 40 unterschiedlich anwählbare Heizzonen der Unterheizung
(in max. 3 unterschiedlichen Temperaturen einstellbar)

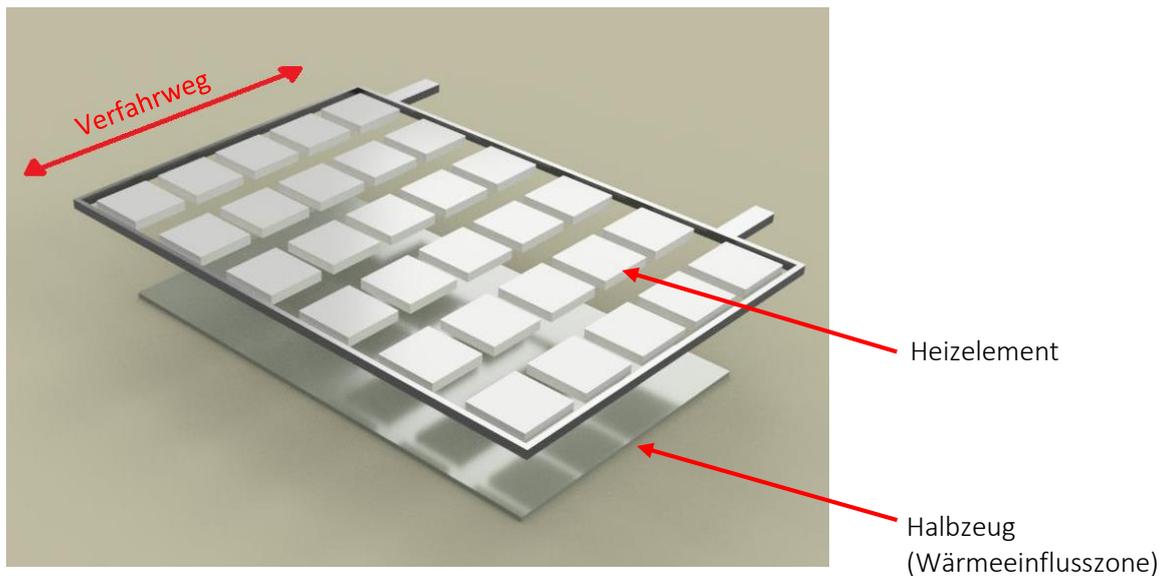


Abb. 2.1 schematische Darstellung der Oberheizung mit Temperaturzonen

2.2 Kleinformgerät KFG 37

Das Kleinformgerät KFG 37 ist eine manuell zu bedienende Thermoformmaschine mit einer maximalen Arbeitsfläche von 350x250mm [8]. Auf dieser Maschine lassen sich thermoplastische Folien mit einer Stärke bis zu 3mm ziehen, die maximale Ziehteilhöhe beträgt dabei 90mm [9]. Erwärmt wird das Halbzeug mit einer in horizontaler Richtung wegfuhrbarer Heizung. Als Heizelemente wurden Flächenstrahler verbaut, wobei die Elemente am Rand der Heizung einen höheren Heizwert besitzen als die Elemente in der Mitte [10] so lässt sich das langsamere Erwärmen und schnellere Abkühlen des Randes kompensieren.

Die in der Maschine verbaute Vakuumpumpe ist neben dem Erzeugen des benötigten Vakuums auch zur Erzeugung des Überdruckes zum Vorblasen verantwortlich. Dazu wird über das Tasthebelventil "Blasen" [11] die Abluft der Vakuumpumpe in den Blaskasten umgeleitet und so die Vorstreckung der Folie erreicht. Das maximal erreichbare Endvakuum der Vakuumpumpe kurz vor dem Ziehen der Folie beträgt 0.8 kp/cm^2 [12]. Durch ein Gebläse, welches über der wegfuhrbaren Heizung montiert, ist lässt sich die Folie nach erfolgreicher Umformung bis unter die Glasübergangstemperatur runterkühlen und erstarren lassen.

2. Thermoformmaschinen im Überblick

Über die Bedienelemente (Abb. 2.2) lassen sich folgende Funktionen des KFG 37 regeln:

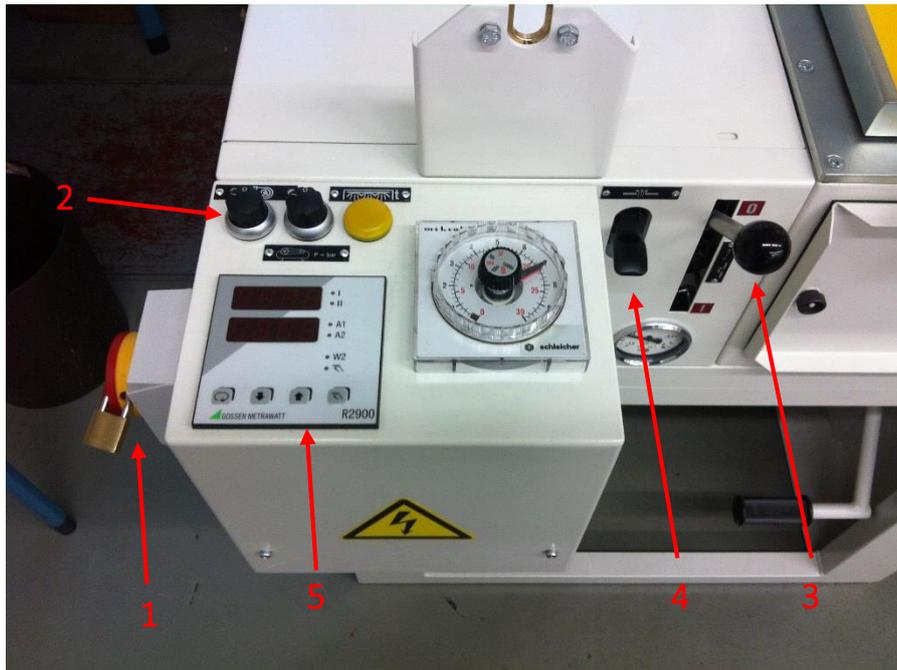


Abb. 2.2 Bedienelemente

- Einschalten der Maschine über den Hauptschalter (1)
- Ein- & Ausschalten des Gebläses (2)
- Ein- & Ausschalten der Vakuumpumpe (3)
- Vorstrecken der Folie durch Tasthebelventil "Blasen" (4)
- Regeln der Temperatur der Heizelemente (5)

3.1 Material

Alle verwendeten Materialien für den Thermoformprozess sind Thermoplasten und somit für den Warmumformprozess geeignet. Zuerst wurde getestet ob der Thermoformprozess mit einem Werkzeug funktioniert, welches durch Rapid Prototyping entsteht (Siehe Kap. 6). Das Halbzeug besteht aus Polypropylen (PP), welches mit rund 20% Anteil an der weltweiten Produktion [13] hinter Polyethylen (PE) liegt und durch seine guten Eigenschaften in vielen Bereichen Anwendung findet. Für den Vergleich der zwei Herstellungsarten der Thermoformwerkzeuge findet ausschließlich Polystyrol (PS) seine Anwendung. Alle weiteren Kunststoffe finden als Druckmaterial Anwendung im Rapid Prototyping Verfahren und werden anhand ihrer Eignung als Material für ein Thermoformwerkzeug miteinander verglichen. Anwendung finden hier Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polyactide (PLA) und ein Copolyester.

Polypropylen (PP)

Polypropylen ist ein thermoplastischer Kunststoff, der durch Kettenpolymerisation hergestellt wird. Er ähnelt mit seinen Eigenschaften dem Polyethylen (PE), ist jedoch etwas wärmebeständiger (bis zu 100°C Dauereinsatztemperatur) und fester als dieser [13]. Die höhere Festigkeit ist auf den meist isotaktischen Aufbau zurückzuführen, welcher durch den gleichmäßigen Aufbau einen sehr hohen Kristallisationsgrad zur Folge hat.

Polystyrol (PS)

Polystyrol ist ein Kunststoff welcher durch Polymerisation von Styrol (Vinylbenzol) hergestellt wird. Er gehört zur Gruppe der amorphen Thermoplasten und ist mit 10% an der weltweiten Gesamtproduktion der vierthäufigst verwendete Kunststoff [14]. Seine Dauergebrauchstemperatur liegt mit bis zu 80°C hinter der von Polypropylen. Seine anderen Eigenschaften bezüglich Festigkeit und Härte sind denen von Polypropylen dagegen überlegen [15].

3. Halbzeug

Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS)

ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol) ist ein thermoplastischer Kunststoff und wird durch Polymerisation von Acrylnitril, Butadien und Styrol hergestellt [16]. ABS ist nicht biologisch abbaubar, da es aus fossilen Brennstoffen erzeugt wird und deshalb eine geringere Umweltverträglichkeit als zum Beispiel PLA hat. Es besitzt eine hohe Zähigkeit, Festigkeit und Wärmeformbeständigkeit (Abb. 3.1) von bis zu 100°C. Diese Eigenschaften qualifizieren ABS als mögliches Druckmaterial zur Herstellung des Thermoformwerkzeuges (Abb. 3.2).

Polyactide (PLA)

Polyactide (PLA) oder auch Polymilchsäuren sind Thermoplaste, die durch aneinandergelagerte Milchsäuremoleküle aufgebaut sind [17]. PLA ist aufgrund der Verwendung von nachwachsenden Rohstoffen einer der umweltschonendsten Kunststoffe. Seine Festigkeit und Zähigkeit ist im Vergleich zu ABS gering und auch seine Wärmeformbeständigkeit (Abb. 3.1) ist mit einer Glasübergangstemperatur von ca. 45°C (abhängig von der Molekülmasse [17]) niedrig. Dieser Kunststoff ist wasserabweisend (hydrophob) und eignet sich daher sehr gut für die Verwendung im Rapid Prototyping Verfahren (Abb. 3.2), bei dem ein "feuchtes Material" zum Verzug des Bauteils führt und somit seine Maßhaltigkeit negativ beeinflusst.

Copolyester

Das verwendete Copolyester (nGen von der Firma ColorFabb [18]) entsteht durch die Polykondensation von dem Polymer Amphor 3D Polymer AM3300[19] der Firma Eastman. Seine Eigenschaften ähneln dem von PLA, es besitzt aber neben der leicht erhöhten Festigkeit und Zähigkeit eine mit ca. 85°C [18] fast doppelt so hohe Glasübergangstemperatur (Abb. 3.1). Dieses Copolyester ist mittig zwischen ABS und PLA anzusiedeln wenn es um Wärmeformbeständigkeit und Verarbeitungsqualität (Abb. 3.2) im Rapid Prototyping Verfahren geht.

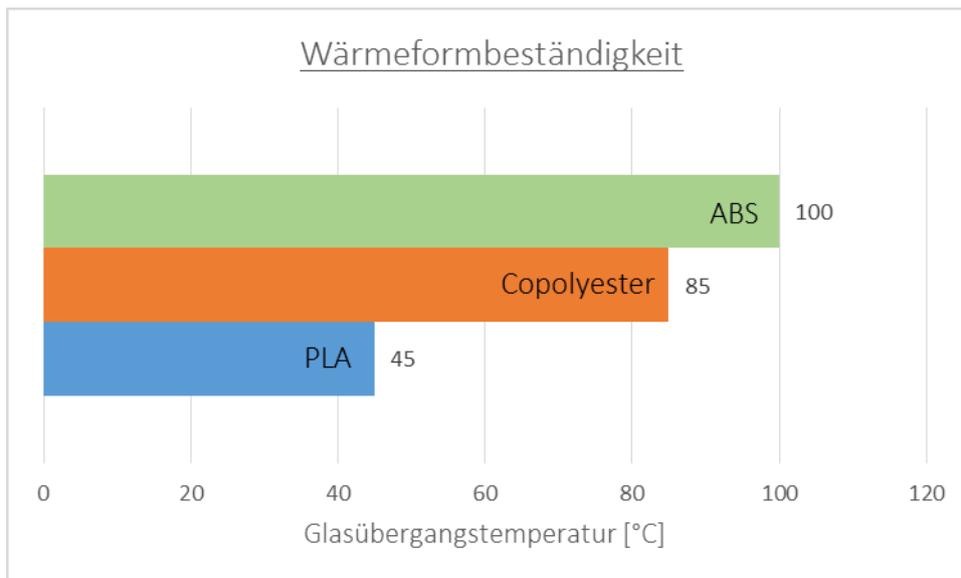


Abb. 3.1 Wärmeformbeständigkeit

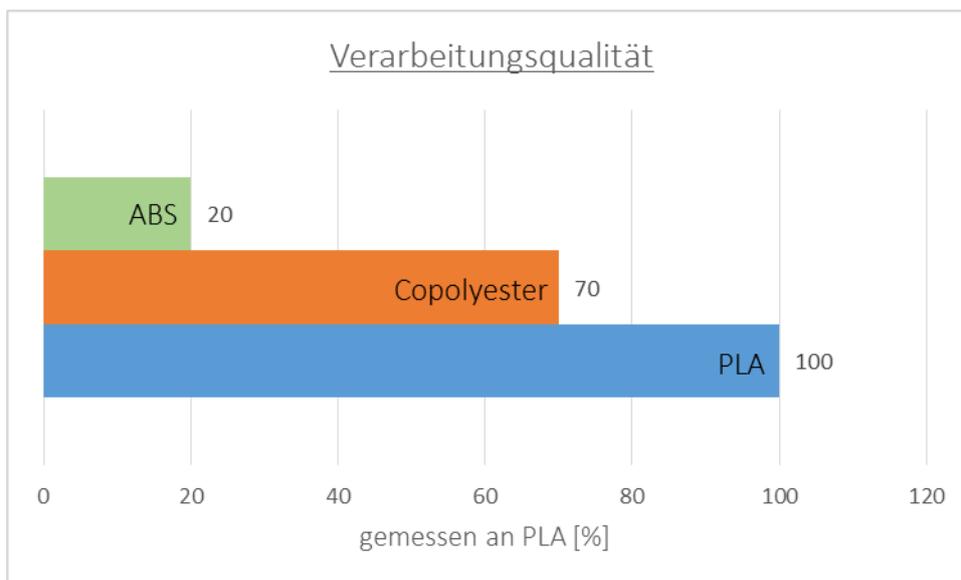


Abb. 3.2 Verarbeitungsqualität aus subjektiver Sicht

3.2 Randbedingungen

Das Halbzeug für den Thermoformprozess muss mehrere Eigenschaften aufweisen um das Ergebnis des Verfahrens nicht negativ zu beeinflussen. Bei dem Material muss es sich um einen Thermoplasten handeln dessen Erweichungstemperatur im Bereich der von den Thermoformmaschinen erreichbaren Temperaturen liegt. Es sollte eine gute Chemikalienbeständigkeit aufweisen da bei dem Versuch ein Silikonöl [20] als Trennmittel verwendet wird. Die Festigkeit und Zähigkeit des Materials sollte nach dem Erstarren ausreichend groß sein, um durch die Entfernung des Formwerkzeuges keine bleibenden Schäden an der Abformung zu hinterlassen. Des Weiteren sollte das Material physiologisch unbedenklich und so einen einfachen Umgang ohne Schutzbekleidung gewähren.

Die Abmaße der Halbzeuge sind je nach verwendeter Maschine:

Plattenabmaße

Tab. 3.1 Plattenabmaße [21][22]

	Länge [mm]	Breite [mm]	max. Dicke [mm]
KFG 37	370	270	3
UA 100 Ed	580	520	10

Nach längerer Suche und unter Berücksichtigung der anfallenden Kosten fiel die Wahl auf weiße Polystyrolplatten (PS) mit einer Stärke von 1mm. Diese wurden an einer Schlagschere auf die genannten Maße (Tab. 3.1) getrimmt. Dieses Material besitzt eine Glasübergangstemperatur von ca. 100°C [23] und liegt damit im Temperaturbereich der zwei Thermoformmaschinen (siehe Kap.2). Polystyrol (PS) hat gute Festigkeits- und Zähigkeitswerte [24] und eine gute Beständigkeit gegen Chemikalien im speziellen gegen Öle [24]. Es findet oft Verwendung bei Lebensmittelverpackungen und ist daher auch physiologisch unbedenklich und ohne weitere Schutzmaßnahmen zu handhaben [24]. Dieses Material eignet sich demnach als Halbzeug für die Versuchsreihen.

4.1 Arten

Positivformwerkzeug

Bei der Positivformung benötigt man ein wärmebeständiges Abbild des Gegenstandes den man abformen möchte. Entscheidend bei diesem Verfahrenstyp ist die Außenkontur (Abb. 4.1), welche eine detailgetreue Oberfläche mit geringer Rauheit aufweisen sollte. Des Weiteren sollte das Modell eine Ausformschräge zur leichteren Entfernung des Werkzeuges nach dem Thermoformprozesses aufweisen und entsprechende Entlüftungsbohrungen zur Abhilfe gegen Luftpolster am Werkzeug besitzen. Um nach erfolgreichem Thermoformprozess das Modell problemlos aus dem Werkstück entfernen zu können, sollten gegebenenfalls Werkzeugteilungen vorgesehen werden (siehe Kap. 7.1.2) und eventuelle Hinterschneidungen sollten mit separaten "Schiebern" realisiert werden. Das Werkstück wird beim Prozess über das Werkzeug gezogen und die außenliegende Kontur wird abgebildet.

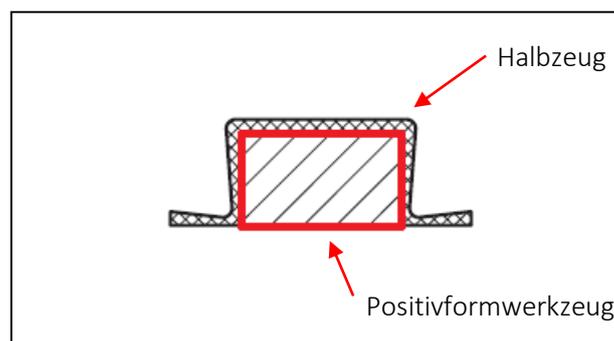


Abb. 4.1 Positivformwerkzeug [25]

4. Formwerkzeug

Negativformwerkzeug

Bei der Negativformung benötigt man dagegen das negative Abbild des Gegenstandes den man abformen möchte, auch dieses Modell muss entsprechend wärmebeständig sein und sollte ebenfalls eine detailgetreue Oberfläche mit geringer Rauheit aufweisen. Auch bei der Negativformung wird eine Ausformschräge zur besseren Entfernung des Werkstückes aus dem Formwerkzeug benötigt, diese muss sich aber entsprechend dem Negativmodell nach innen verjüngen (Abb. 4.2). Das Werkstück wird beim Prozess in das Werkzeug reingezogen und die innenliegende Kontur wird abgebildet.

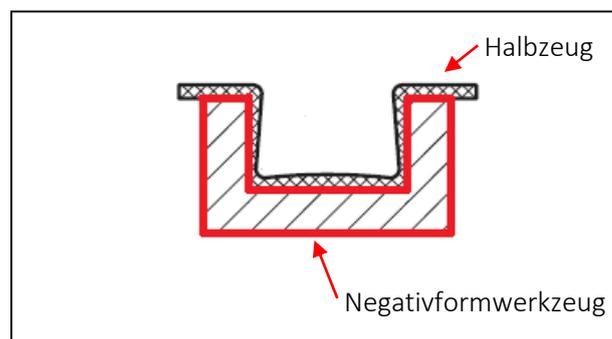


Abb. 4.2 Negativformwerkzeug [25]

4.2 Vor- /Nachteile

Beide Verfahrenstypen weisen unterschiedliche Vor- und Nachteile auf, welche in den folgenden Tabellen (Tab. 4.1 & Tab. 4.2) aufgeführt sind.

Positivformung

Tab. 4.1 Vor- und Nachteile der Positivformung

Vorteile	Nachteile
- weniger Entlüftungsbohrungen	- mögliche Faltenbildung am Boden [25]
- kostengünstigere Werkzeuge [26]	(siehe Abb. 4.3)
- große Ziehtiefen möglich [26]	- gefahr von Schreckmarken
- geringere Wanddickenunterschiede [26]	an Werkzeugecken [25] (siehe Abb. 4.3)

Negativformung

Tab. 4.2 Vor- und Nachteile der Negativformung

Vorteile	Nachteile
- keine Faltenbildung möglich [25]	- komplizierteres Werkzeug
- Maßhaltigkeit und Konturschärfe an der Sichtseite (i.d.R. außen) [26]	- Hinterschneidungen nur schwer zu realisieren
	- dünnste Stelle am Boden [25]
	möglicherweise Gefahr von Materialriss

Aufgrund der einfacheren Gestaltung des Formwerkzeuges wurde bei diesem Versuch die Positivformung verwendet, das Risiko der Faltenbildung (Abb. 4.3) an den Rändern und Bildung von Schreckmarken an höher gelegenen Kanten wurde dabei in Kauf genommen und wird während des Versuches beobachtet.

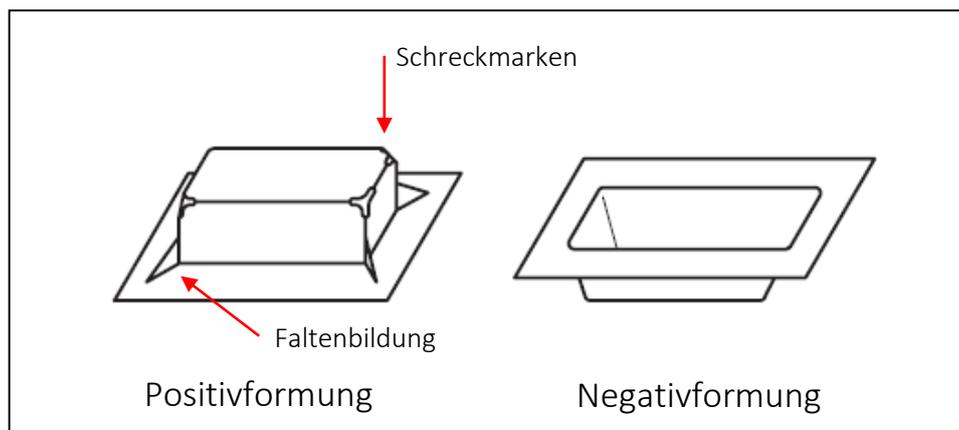


Abb. 4.3 Faltenbildung und Schreckmarken [25]

4.3 Anforderungsliste

Zur besseren Übersicht und Festlegung der Entwicklungsparameter wurde eine Anforderungsliste (Tab. 4.3) für die jeweiligen Formwerkzeuge aufgestellt. Alle für die Entwicklung und Produktion wichtigen Punkte wurden in dieser Liste aufgenommen und anhand ihrer Priorität bewertet.

Tab. 4.3 Anforderungsliste

W4 = sehr wichtig W3 = wichtig W2 = interessant W1 = wenn möglich F = Forderung		<u>Anforderungsliste</u>	Hinweise / Erläuterungen Erstellt am: 15.07.2016 von: Maximilian Krug Blatt 1 von 1
Lfd.	Forderung / Wunsch	Anforderung	Verantwortlich
		<u>1. Formwerkzeug (konventionell)</u>	
1	F	Wärmeformbeständig (bis ca. 120°C)	
2	W4	möglichst geringe Oberflächenrauheit	
3	F	1° Ausformschräge	
4	W3	genügend hohe Festigkeit	
5	W2	Abriebbeständigkeit	
6	F	Hinterschneidungsfrei	
7	F	Entlüftungskanäle (Verhinderung von Luft einschlüssen)	
8	W4	alle scharfen Kanten mit Radien versehen (min. 1mm)	
9	F	plane Unterseite	
10	W2	Möglichkeiten zur Befestigung auf Trägerplatte	
11	F	Anschluss zur Erzeugung von Vakuum in den Entlüftungskanälen	
12	F	Formwerkzeug darf max. Bauraum nicht überschreiten	
		<u>2. Formwerkzeug (3D-Druck)</u> <u>(Ergänzung zum konventionellen Formwerkzeug)</u>	
13	F	Formwerkzeug darf max. Bauraum des 3D-Druckers nicht überschreiten	
14	F	Wandstärke und Infill müssen der Steifigkeit wegen ausreichend groß dimensioniert sein	
15	W3	möglichst geringe Schichtdicke > ergibt geringere Oberflächenrauheit	
16	W4	keine groben Absätze > Druck ohne Stützgeometrie > bessere Oberfläche	
17	W4	Druck muss mit entsprechend kleiner Druckdüse erstellt werden um Details möglichst genau darzustellen	
18	F	Möglichkeit zur Entfernung des Formwerkzeuges aus dem fertigen Bauteil muss gegeben sein	

5.1 Modellvorbereitung

Zur Herstellung einer Negativform des Automodelles (Porsche 356) wurde in der Vorbereitung das Fahrgestell von der Karosserie getrennt und etwaige Kleinteile wie Außenspiegel und Lampen entfernt um ein möglichst hinterschneidungsfreies Modell zum Abguss bereitzustellen. Türen und Kofferraum wurden mit einem Modellierkunststoff auf Methacrylatbasis (Pattern Resin Ls [27]) verklebt welcher keine chemische Verbindung mit dem verwendeten Abformsilikon (Silikonkautschuk Typ 924-1 AT [28]) eingeht. Die Radhäuser wurden mit 1mm starken Polycarbonatplatten und dem Modellierkunststoff verschlossen. Im selben Verfahren wurden alle Schlitze und Fugen, in die beim Abguss das Abformsilikon eingelaufen wäre, mit Pattern Resin Ls verschlossen.

Um einen sauberen Abschluss des Modelles nach unten zu gewährleisten wurde ein Kunststoffstreifen aus Polycarbonat (1mm stark) zurechtgeschnitten und mittels Pattern Resin Ls mit der Karosserie verklebt (Abb. 5.1). Um das unkontrollierbare Absinken des Modelles im Abformsilikon zu verhindern wurde an den 4 Radhäusern jeweils eine Schlaufe aus einem Polyesterfaden ($\varnothing 2\text{mm}$) angebracht, mithilfe eines digitalen Messschiebers (Mitutoyo Absolut 150mm [29]) wurde der Abstand der Schlaufen zum vorher verklebten Abschluss des Modelles nach unten gemessen um eine gleichmäßige Länge zu gewährleisten.

Um das Modell beim Abgussverfahren an den 4 Schlaufen zu halten wurden 2 Distanzstreben ($\varnothing 8\text{mm}$ Holzstab) mit einer Länge von 200mm gefertigt, diese stützen sich an den seitlichen Wänden des Formkastens (siehe Kap. 5.2) ab und verhindern mit den Schlaufen das Absinken des Modelles in die Silikonmasse (Abb. 5.1).

5.2 Formkastenherstellung

Zur Herstellung des Formkastens für das Abgussverfahren wurden die Maße des Modelles mittels digitalem Messschieber (Mitutoyo Absolut 150mm [29]) erfasst (240x120x70mm), um einen ausreichend dicken Rand zu gewährleisten wurden in der Länge und Breite des Modelles 40mm hinzugefügt und der Höhe 30mm. So ergaben sich die inneren Abmaße des Formkastens zu 280x160x100mm. Als Material wurden 19mm starke beidseitig mit Melamin beschichtete Pressspanplatten verwendet, diese gewährleisten einerseits durch ihre glatte Oberfläche eine saubere Trennung zur Abgussmasse und bewegen sich andererseits mit 15€/qm [30] in einem guten preislichen Rahmen. Die 5 benötigten Platten wurden auf die entsprechenden Maße gesägt (techn. Zeichnung 001) und allseitig geschliffen um Verletzungen vorzubeugen. Um einen sauberen Abschluss der Platten zu erreichen wurden diese anschließend noch an den anliegenden Kanten angefasst. Zur Montage des Formkastens wurden jeweils 2 Seitenplatten mit einer Holzschraube (Senkkopf) verbunden. Vorher wurden die Platten miteinander verklammert um anschließend mit einem 2mm Holzbohrer vorzubohren und einem Kegelsenker entsprechend des Schraubenkopfes anzusenken. Nach diesem Verfahren wurden alle 4 Seitenplatten miteinander verbunden und anschließend mit der Bodenplatte und 4 Holzschrauben zusammengefügt. Abschließend wurden alle inneren Fugen mit Silikon (Sanitärsilikon [31]) abgedichtet um das spätere austreten der Abformmasse zu verhindern. Um Probleme beim späteren Abformverfahren im Vorfeld zu erkennen und zu verhindern wurde das Modell testweise im Formkasten mithilfe der Distanzstreben positioniert und auf Passgenauigkeit überprüft (Abb. 5.1).

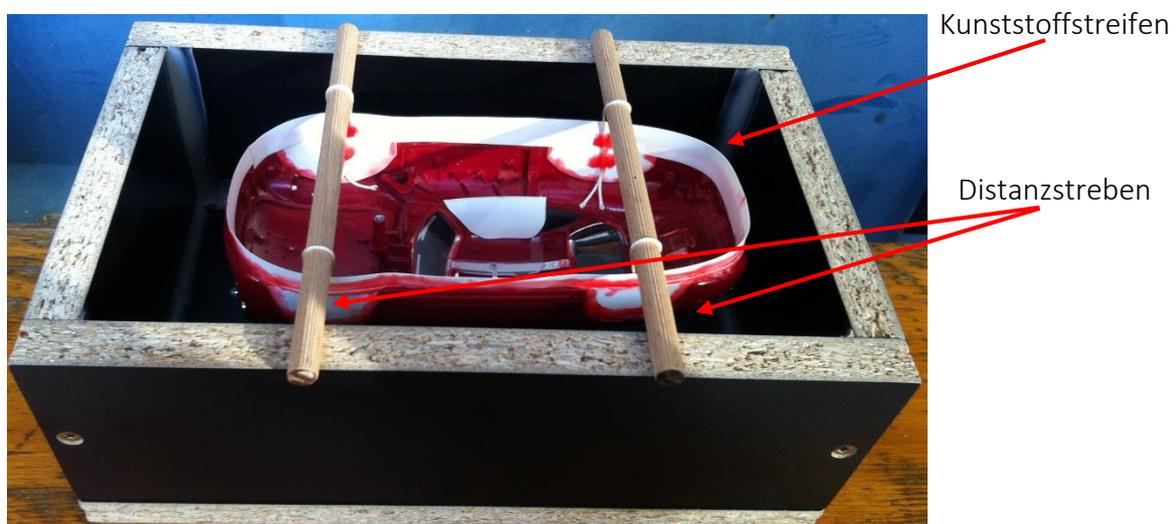


Abb. 5.1 vorbereitetes Modell

5.3 Abformen

5.3.1 Verwendete Silikonmasse

Zur detailgetreuen Abbildung des Automodelles ist eine Silikon Abformmasse prädestiniert. Hier gibt es grundsätzlich zwei verschiedene Varianten:

Kondensationsvernetzende Silikonkautschuke

Der kondensationsvernetzende Silikonkautschuk auf 2-Komponentenbasis zeichnet sich durch eine hohe Abformgenauigkeit und gute Dehnbarkeit nach der Aushärtung aus, zudem hat er aufgrund seiner Vernetzungsart selbsttrennende Eigenschaften. Bei der Vernetzung wird ein Spaltprodukt in Form von Alkohol frei welches während der Aushärtung aus der Silikonmasse diffundiert und sich am Modell abschlägt und so eine Art Trennschicht bildet welche beim späteren Auslösen des Modelles helfen kann. Das Problem bei dem kondensationsvernetzenden System ist die geringe Vergusstiefe von ca. 10mm [32], welche aufgrund des nötigen Atmosphäreneinflusses zur Aushärtung nicht überschritten werden sollte, da sich sonst Bereiche mit nicht ausgehärteter Silikonmasse bilden. Bei der Höhe unseres Modelles von ca. 70mm hätten also theoretisch 7 Vergussdurchgänge durchlaufen werden müssen, in dem Fall hätte man aber die Verbindung der Schichten nicht garantieren können. Auch wenn die selbsttrennenden Eigenschaften ein großer Vorteil bei der späteren Entformung gewesen wären, war das Ausschlusskriterium die zu geringe Vergusstiefe schlagkräftiger.

Additionsvernetzende Silikonkautschuke

Der additionsvernetzende Silikonkautschuk auf 2-Komponentenbasis zeichnet sich genau wie das kondensationsvernetzende System durch eine hohe Abformgenauigkeit und eine sehr gute Dehnung nach der Aushärtung aus. Die Aushärtung der Silikonmasse bei Raumtemperatur gewährleistet einen sehr geringen Schwund (ca. 0,1%), welcher ein großer Vorteil beim detailgetreuen Abbilden von Modellen ist. Des Weiteren erweist sich das additionsvernetzende System durch seine hohe Chemikalienbeständigkeit insbesondere gegen Gießharze als perfekter Kandidat für unseren Versuch. Bei der Aushärtung entstehen keine Spaltprodukte und Vergusstiefen von über 100mm sind aufgrund des nicht benötigten Atmosphäreneinflusses in der Praxis kein Problem.

5. Konventionelle Formherstellung

Die Entscheidung fiel aus den oben genannten Gründen letztendlich auf das 2-Komponentensystem Silikonkautschuk Typ 924-1 AT mit Vernetzer 924-1 AT von der Firma Bacuplast Faserverbundtechnik GmbH [28].

5.3.2 Abformverfahren

Mit der beschriebenen Silikonmasse (Silikonkautschuk Typ 924-1 AT [28]) wurde nun das vorbereitete Modell (siehe Kap. 5.1) mithilfe des Formkastens (siehe Kap. 5.2) abgeformt. Dazu wurde im ersten Schritt das Modell mit einem Silikontrennmittel eingesprüht [20], um das spätere Auslösen des Modelles aus der ausgehärteten Silikonmasse zu erleichtern. Das Abformverfahren fand aufgrund der entstehenden Dämpfe im Freien statt. Von der verwendeten Silikonmasse wurden mittels Messbecher 3500ml abgemessen und in den Formkasten gefüllt, um anschließend dem Mischungsverhältnis entsprechend (100:10) 350ml des mitgelieferten Vernetzers zuzugeben.

Mit einem Metallspatel wurden die 2 Komponenten in dem Formkasten ca. 15 min mit der Hand vermischt um eine gute Homogenität der Masse zu erreichen. Hierbei war darauf zu achten so wenig Luft wie möglich in die Masse mit einzurühren da sich die so entstehenden Luftblasen negativ auf die Abformqualität auswirken. Da das Homogenisieren ein handgeführtes Verfahren unter Atmosphäreneinfluss war konnte die Entstehung kleiner Luftblasen aber nicht vollständig verhindert werden, sodass im Anschluss an das Vermengen mit gegebenen Hilfsmitteln versucht wurde die entstandenen Luftblasen wieder aus der Masse zu entfernen. Zuerst wurde versucht durch die entstehenden Schwingungen eines an den Formkasten angehaltenen Delta Schleifers die im Gegensatz zur Abformmasse leichteren Luftblasen zum Aufsteigen zu zwingen. Aufgrund der zu geringen Größe der Luftblasen und der sehr niedrigen Viskosität der Silikonmasse stiegen die Luftblasen aber zu langsam an die Oberfläche und das gewünschte Ergebnis blieb aus. Um die Steiggeschwindigkeit der Luftblasen zu erhöhen wurden ein handelsüblicher Staubsauger und eine Kunststoffplatte, mit für den Staubsaugeraufsatz entsprechend großem Ausschnitt, benutzt um ein Vakuum in dem überbleibenden Hohlraum des Formkastens zu erzeugen. Auch dies führte am Ende nicht zu dem gewünschten Erfolg, da sich die Silikonmasse zu dicht am Einlass des Staubsaugeraufsatzes befand und angesaugt wurde.

Da die Abformmasse eine maximale Topfzeit von 80 min besitzt, wurde das Abformverfahren mit den entstandenen Luftblasen weiter betrieben um ein Aushärten vor dem Einsetzen des Modelles zu verhindern.

Das Automodell wurde langsam von oben in die Silikonmasse eingetaucht und mit den Distanzstreben durch die am Modell angebrachten Halterungsschlaufen am Rand des Formkastens gegen das zu tiefe Eintauchen gesichert (Abb. 5.2). Da das Modell innen hohl war entstand in der dichten Silikonmasse (Dichte ρ_S) ein entsprechender Auftrieb, diesem wurde mit Bleizuschnitt, welches in den Hohlraum des Modelles (Masse Modell M_M) gelegt wurde, entgegengewirkt. Mithilfe des Archimedischen Prinzips wäre die genaue Berechnung der einzulegenden Bleimasse M_{Blei} nach folgender Formel möglich gewesen:

$$M_{Blei} = V_M * \rho_S - M_M \quad (5.1)$$

Da aber das genaue verdrängte Volumen des Automodelles V_M nicht bekannt war und nur sehr umständlich bestimmt werden konnte, wurde einfach etwas mehr Bleizuschnitt als nötig in das Modell gelegt. Das überschüssige Gewicht wurde so von den Distanzstreben aufgenommen. Die Silikonmasse härtete im Anschluss für 48 Stunden bei Raumtemperatur aus um den geringen Schwund des additionsvernetzenden Silikonkautschuks auszunutzen und war dann für den nächsten Bearbeitungsschritt bereit.



Abb. 5.2 Abformverfahren

5.3.3 Nachbearbeitung der Form

Nach dem Aushärten der Silikonmasse wurden die Seitenteile des Formkastens demontiert. Dazu wurden die Schrauben entfernt und die an den Seitenteilen anhaftende Silikonmasse mit einem Messer gelöst. Nach diesem Arbeitsschritt wurde der Silikonblock mit einem Lappen äußerlich von nicht ausgehärtetem Silikon befreit und anschließend das Automodell mithilfe einer Flachzange aus der Form gehiebelt.

Das Modell ließ sich trotz kleinerer Hinterschneidungen dank dem vorherigen Aufbringen des Trennmittels sehr leicht aus der Silikonform entfernen und hinterließ einen detaillierten Abdruck. Die entstandene Negativform wurde nun mittels Lappen und Ethanol gereinigt und von Rückständen des Modellierkunststoffes (Pattern Resin Ls [27]) befreit um Fehlstellen beim späteren Abgussverfahren zu vermeiden. Des Weiteren wurden mit einem Skalpell etwaige Überstände abgetrennt die beim Einfließen in kleinste Fugen des Automodelles entstanden sind. Trotz der vielen kleinen Lufteinschlüsse in der Silikonmasse ergab sich eine oberflächlich sehr gute Abformung, da die Luftblasen scheinbar durch die an dem Automodell anhaftende Silikonmasse und der entstehenden Oberflächenspannung nicht bis zur Modelloberfläche vorgedrungen sind. Es bildete sich eine Art Schutzschicht aus Silikon auf der Oberfläche des Automodelles. Die Form war somit bereit für den nächsten Bearbeitungsschritt (Abb. 5.3).

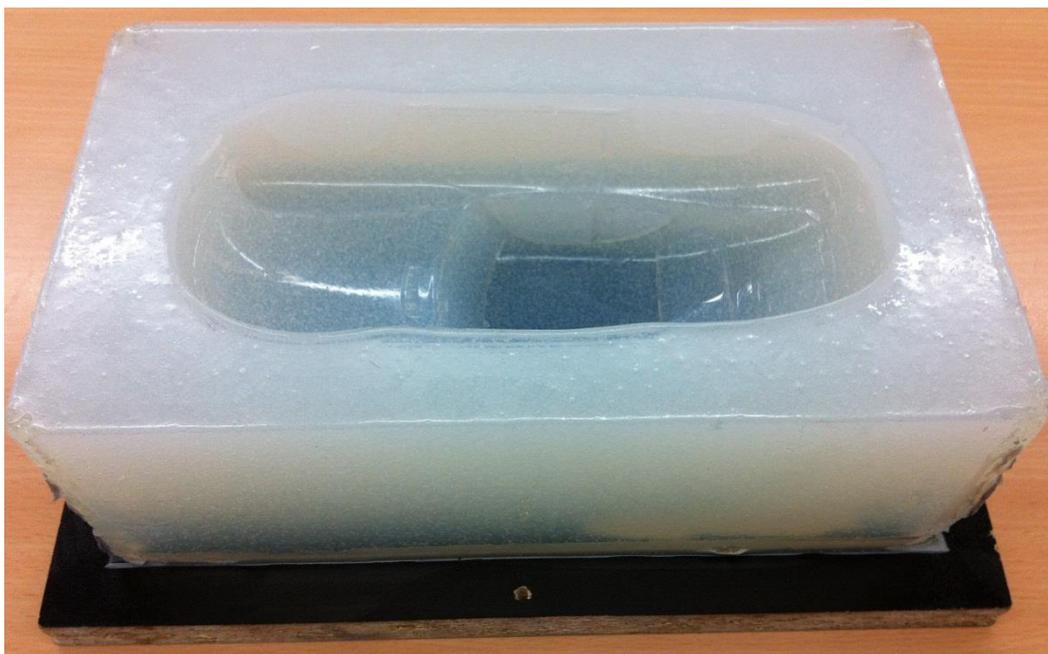


Abb. 5.3 Negativform aus Silikon

5.4 Abgießen

5.4.1 Verwendetes Gießharz

Als Gießharz kommen nur diese zur Auswahl, welche nach der Aushärtung eine große Härte und Temperaturbeständigkeit aufweisen. Diese Faktoren lassen alle Thermoplaste und Elastomere als ungenügend erscheinen und wir konzentrieren uns hier nur auf die Kunststoffgruppe der Duroplaste. Die folgenden Produkte sind eine Auswahl der möglichen Gießharze mit ihren Vor- und Nachteilen.

Ungesättigte Polyesterharze (UP)

Ungesättigte Polyesterharze gibt es in vielen unterschiedlichen Formen wie Gießharze, Prepregs und Formmassen. Die Vernetzung erfolgt durch Copolymerisation und es entsteht keinerlei Abspaltung von Reaktionsprodukten bei der Aushärtung. Die Eigenschaften lassen sich wie bei allen Gießharzen durch Einbringen von Fasern oder Füllstoff verändern. Da aber mit unverändertem Gießharz gearbeitet werden soll besitzt UP folgende Eigenschaften:

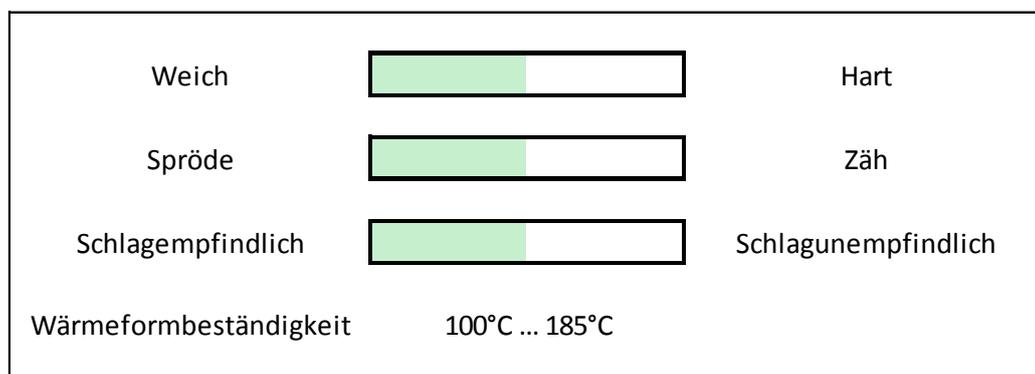


Abb. 5.4 Eigenschaften von UP Harzen [33]

Damit sind UP Gießharze für Standardanwendungen ohne hohe Ansprüche an Festigkeiten oder Wärmeformbeständigkeit prädestiniert und somit ein möglicher Kandidat für unseren Versuch.

5. Konventionelle Formherstellung

Polyurethane (PU)

Polyurethane und im speziellen die Isocyanat-Harze welche nach der Aushärtung zur Gruppe der Duroplaste gehören entstehen durch eine Polyadditionsreaktion von mehrwertigen Isocyanaten. Ihre Eigenschaften reichen von sehr hart bis sehr weich müssen hier aber aufgrund zweier Ausschusskriterien nicht weiter betrachtet werden. Das erste Ausschusskriterium ist der große Schwund [34], welcher aufgrund der hohen Reaktionswärme beim Aushärten und damit einhergehender Ausdehnung und gefolgtter Zusammenziehung entsteht. Das zweite Ausschusskriterium ist die Hydrophilie [34], also die Neigung des Materials Feuchtigkeit aufzunehmen und damit der Verlust der Formbeständigkeit durch "Aufblähen" des Formlings während der Aushärtung. Beide Faktoren, der unkontrollierbare Schwund und die unwillkürliche Aufnahme von Feuchtigkeit, machen Polyurethane unbrauchbar für diesen Versuch.

Epoxidharze (EP)

Epoxidharze liegen genau wie ungesättigte Polyesterharze als Gießharze, Prepregs und Formmassen vor. Ihre Vernetzung erfolgt durch Polyaddition wodurch während des Aushärtungsprozesses keinerlei Abspaltprodukte entstehen. Ein Vorteil ist die geringe Neigung zur Feuchtigkeitsaufnahme welche ein Pluspunkt in Bezug auf Formbeständigkeit ist. Epoxidharz hat weitere folgende Eigenschaften:

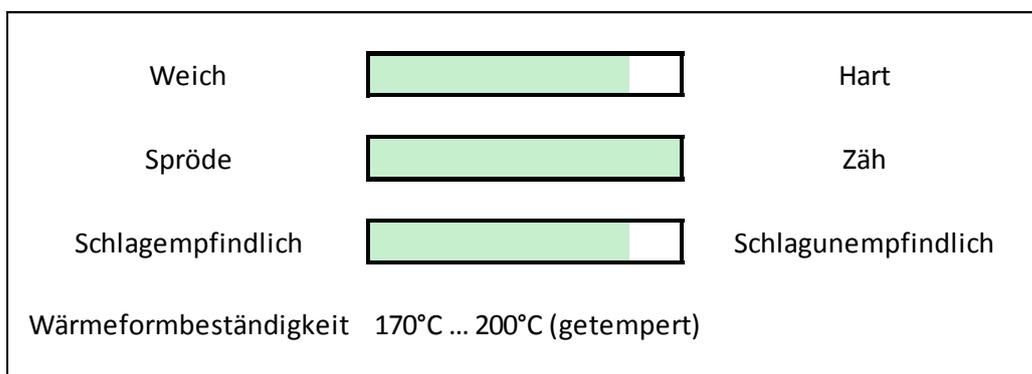


Abb. 5.5 Eigenschaften von EP Harzen [35]

Gerade der hohe Härtegrad und die Zähigkeit in Verbindung mit einer sehr guten Wärmeformbeständigkeit nach dem Tempern bis zu 200°C lassen Epoxidharze zum perfekten Kandidaten für unseren Versuch werden. Die Entscheidung fiel auf das Epoxidharzsystem Biresin G38 [36] (Produktdatenblatt siehe Anhang) der Firma Sika AG.

5.4.2 Abgussverfahren

Nach der Herstellung der Form und der Auswahl des richtigen Gießharzes folgt nun der eigentliche Abguss. Dazu wurden die zwei Komponenten mithilfe einer Feinwaage und einem Messbecher im Verhältnis 100:7 (Harz : Härter) abgewogen. Dies entsprach 1500g Harz gemischt mit 105g Härter. Um eine gute Homogenisierung der zwei Komponenten zu erreichen wurde das Gemisch anschließend mithilfe eines elektrischen Homogenisators für ca. 10min vermengt. Es wurde darauf geachtet den Messbecher während des Homogenisierungsvorganges kontinuierlich zu bewegen damit der Mischer des Homogenisators möglichst jede Ecke des Bechers erreicht. So wurde eine gleichmäßige Vermischung der zwei Komponenten erreicht und damit eine Garantie dass im späteren Modell keine unausgehärteten "Nester" aus nur einer Komponente entstehen.

Nun wurde die Mischung langsam und gleichmäßig aus ca. 30cm Höhe in die gesäuberte Form gegossen bis das Gießharz mit der oberen Kante der Negativform abschloss. Das Gießen aus einer gewissen Höhe sollte dabei das Einschließen von Luftblasen in der Vergussmasse verhindern da sich während des Gießens ein dünner Materialstrahl mit sehr geringem Querschnitt ausbildet in welchem sich nur schwer Luftblasen einschließen lassen.

5.4.3 Nachbearbeitung des Formwerkzeuges

Nach der Aushärtung des gegossenen Automodelles (i.F. Formwerkzeug genannt) wurde dieses aus der Silikonform entfernt. Als Hilfsmittel wurde dabei nur ein abgerundeter Metallspatel benutzt um weder die Form noch das Formwerkzeug zu beschädigen. Nachdem das Formwerkzeug von anhaftenden Silikonresten befreit wurde war eine Erhöhung der Härte und Wärmeformbeständigkeit durch Tempern nötig. Hierzu wurde das Formwerkzeug für 4 Stunden bei 60°C und anschließend für 2 Stunden bei 100°C in einem Laborofen erwärmt. Nach dem Beenden des Tempervorganges begann die mechanische Nacharbeit an dem Formwerkzeug. Um eine saubere und vor allem plane Auflagefläche des Formwerkzeuges zu erhalten und somit einen sicheren Stand in der Thermoformmaschine zu gewährleisten, wurde die Unterseite des Formwerkzeuges erst mit sehr groben Schleifpapier (60er Körnung) bearbeitet und im Anschluss mit immer feiner werdendem Nassschleifpapier, einem Exzentrerschleifer und Wasser zum Abtransport der gelösten Schleifpartikel und Material geschlichtet. Die Oberfläche des Formwerkzeuges war nicht wie gewünscht blasenfrei, daher mussten die Unebenheiten mit einem 2-Komponenten Polyestermetallspachtel [37] ausgeglichen werden und anschließend mit Nassschleifpapier (400er Körnung) und Wasser verschliffen werden (Abb. 5.6).



Abb. 5.6 Formwerkzeug Porsche 356

Um das Formwerkzeug während des Thermoformvorganges fest mit dem Arbeitstisch der Thermoformmaschine zu verbinden und so das Werkzeug nach dem erfolgreichem Umformvorgang durch Herunterfahren des Tisches automatisch aus dem fertigen Abbild zu entfernen wurde eine durch Rapid Prototyping erstellte Vorrichtung (techn. Zeichnung 002) verwendet, um 4 Gewindeeinsätze (Innengewinde M5) mit definiertem Abstand in der Unterseite des Formwerkzeuges zu verkleben. Dazu wurden die Gewindeeinsätze mit entsprechend langen M5 Zylinderkopfschrauben in die Vorrichtung geschraubt (Abb. 5.7) und anschließend das Bohrbild mittels Handfräsgesät auf die Unterseite des Formwerkzeuges übertragen. Die Bohrungen wurden entsprechend der Gewindeeinsätze ($\varnothing 8\text{mm} \times 12\text{mm}$) erstellt wobei sie ein wenig größer gefertigt wurden um ausreichend Raum zum Verkleben zu lassen. Die Bohrungen wurden außerdem nach unten konisch größer werdend gefertigt um nach dem Verkleben die entstandene Hinterschneidung als eine Art Formschluss zu verwenden, so wurde in der Verklebung mehr Festigkeit erreicht. Die Gewindeeinsätze wurden unterseitig mit Dichtfett bestrichen um das Eindringen von Klebstoff in die Gewindegänge zu verhindern und anschließend mit einem 2 Komponentenkleber [38] in den vorgefertigten Bohrungen der Unterseite des Formwerkzeuges verklebt. Die Vorrichtung gewährleistete dabei einerseits das achsparallele Einkleben der Gewindeeinsätze und andererseits durch die Distanzflächen (Abb. 5.7) die definierte und gleichmäßige Einstellung der Absatzhöhe aller Gewindeeinsätze. Diese definierte Absatzhöhe ist für die Entstehung des unter dem Formwerkzeug nötigen Spaltes zur gleichmäßigen Verteilung des Vakuums verantwortlich.

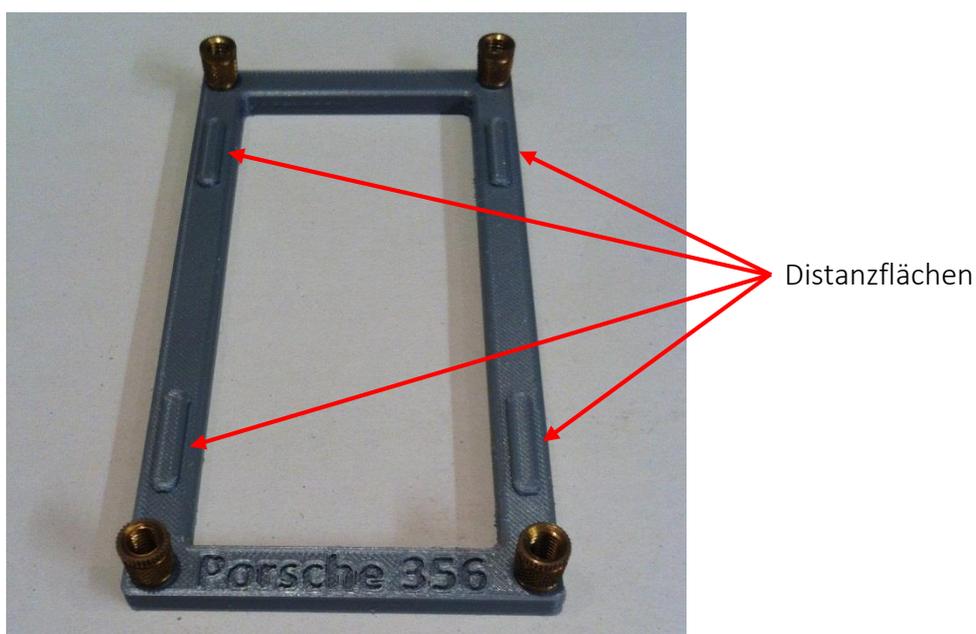


Abb. 5.7 Gewindeeinsatzvorrichtung Porsche 356

5. Konventionelle Formherstellung

Zum Abschluss der Nachbearbeitung soll nun noch das HAW Logo der Hochschule auf der Motorhaube des Porsche 356 Platz finden. Dazu wurde die Form der dreidimensional gebogenen Motorhaube mithilfe von 2 Komponenten Knete ermittelt, jeweils ein Streifen Knetmasse wurde an der oberen Kante, der unteren Kante und mittig auf der Motorhaube platziert (Abb. 5.8) um eine Kopie der jeweiligen Form zu erhalten. Die ausgehärteten Streifen wurden halbiert um eine scharfe Kante der Kontur zu erhalten (Abb. 5.9) und diese gut beleuchtet zu fotografieren. Diese Bilder wurden in die CAD Software Fusion 360 von Autodesk geladen und entsprechend der Position auf der Motorhaube angeordnet und richtig skaliert um die Konturen anschließend mit mehreren Splines zu rekonstruieren.



Abb. 5.8 Formermittlung der Motorhaube

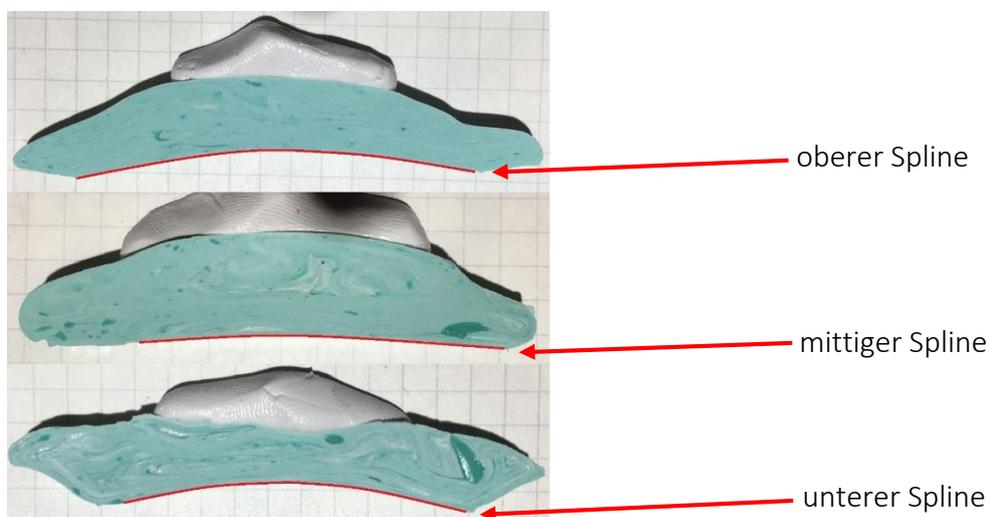


Abb. 5.9 abgeformte Splines

Mithilfe der 3 erhaltenen Splines konnte eine Fläche mit Mehrfachschnitten erzeugt werden welche die Oberfläche der Motorhaube widerspiegelt. Nach weiteren Bearbeitungsschritten entstand so ein Einsatz des HAW Logos (techn. Zeichnung 003) als 3D Objekt welcher umgewandelt ins STL Format (Standard Tessellation Language) auf einem 3D Drucker (Ultimaker 2) und den entsprechenden Parametern (Tab. 5.1) ausgedruckt wurde. Die entstandene Außenkontur wurde auf die Motorhaube übertragen und mit einem Handfräsgesät auf die nötige Tiefe ausgefräst, sodass das ausgedruckte Logo bündig mit der Oberfläche abschloss. Mit einem 2 Komponentenkleber [38] wurde das Logo in der Motorhaube verklebt, um anschließend mit einem 2-Komponenten Polyestermetallschleifpapier [37] die entstandene Fuge zu verschließen und mit Nassschleifpapier (400er Körnung) und Wasser zu verschleifen.

Tab. 5.1 Druckparameter HAW Logo

Parameter	Wert
Material	ABS
Düsendurchmesser	0.4mm
Düsentemperatur	245°C
Betttemperatur	100°C
Druckgeschwindigkeit	45mm/sec
Schichtdicke	0.05mm

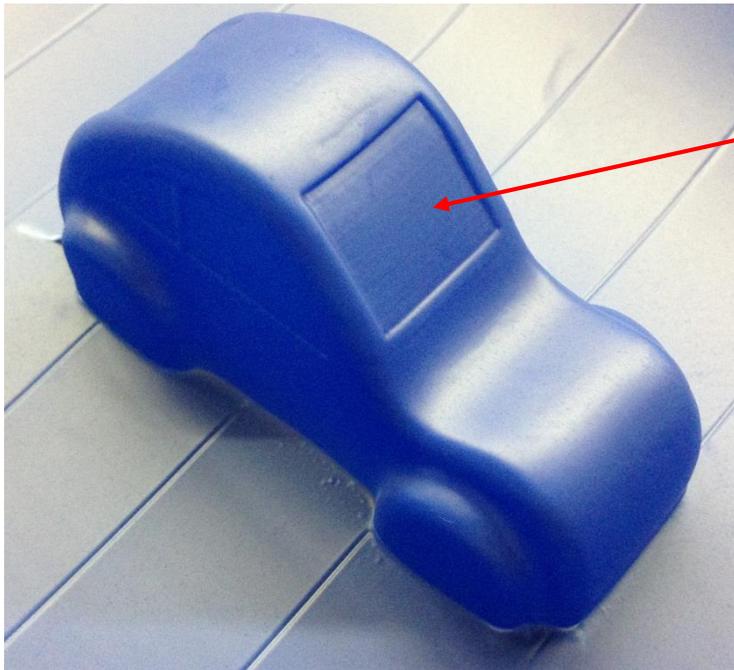
6.1 Testwerkzeug: 3D-Automodell

Um Herauszufinden ob ein Formwerkzeug, welches im Rapid Prototyping Verfahren aus Kunststoff hergestellt wurde einem Thermoformprozess standhält, wurde ein nicht maßstäbliches Modell von einem Auto hergestellt. Zuerst wurde das 3D Modell mithilfe der CAD Software Catia V5R19 von Dassault Systèmes konstruiert (techn. Zeichnung 004). Es wurde darauf geachtet Hinterschneidungen, Rundungen und nötige Entlüftungsbohrungen einzufügen um möglichst nah an das später verwendete Modell (Audi R8) zu gelangen und mögliche Probleme schon im Vorfeld zu erkennen. Das Modell wurde mithilfe der Slicing Software Cura 15.04.3 für den 3D Druck vorbereitet und mit den entsprechenden Parametern (Tab. 6.1) auf einem Ultimaker 2 gedruckt. Als Material wurde ABS aufgrund seiner hohen Glasübergangstemperatur (ca. 100°C) gewählt. So lässt sich die Formstabilität auch bei Erwärmung des Formwerkzeuges garantieren. Nach dem Drucken wurde das Modell entgratet, Fehlstellen mit einem 2-Komponenten Polyesterfeinspachtel [39] ausgeglichen und anschließend das gesamte Modell mit Nassschleifpapier (240er Körnung) und Wasser verschliffen um eine ebenmäßige Oberfläche zu erreichen.

Tab. 6.1 Druckparameter Testwerkzeug: Automodell

Parameter	Wert
Material	ABS
Düsendurchmesser	0.4mm
Düsentemperatur	245°C
Betttemperatur	100°C
Druckgeschwindigkeit	45mm/sec
Schichtdicke	0.25mm

Nun wurde das Modell an der KFG37 thermogeformt. Als Halbzeug wurde Polypropylen (PP) mit einer Stärke von 0.8mm benutzt. Das Ergebnis (Abb. 6.1) zeigt eine gute Abformung, keine Einfallstellen durch die Erweichung des Formwerkzeuges und leichte Bildung von Schwimmhäuten, welche man durch die Verwendung eines Negativformwerkzeuges oder eines dichter an das Modell gesetzten Spannrahmens verhindern könnte. Bei einer Halbzeugstärke von 0.8mm lassen sich die feinen Rillen der gedruckten Schichten noch erkennen. Um herauszufinden ab welcher Schichtdicke dies nicht mehr der Fall ist wurde das Verhalten von Schichtdicke zu Oberflächengüte untersucht (siehe Kap. 6.2).



feine Rillen der gedruckten Schichten

Abb. 6.1 Testwerkzeug 3D-Automodell abgeformt

6.2 Testwerkzeuge: Verhalten von Schichtdicke zu Oberflächengüte

Wie in Kapitel 6.1 erkannt wurde, hat die Schichtdicke eines im Rapid Prototyping hergestellten Objektes Auswirkungen auf die spätere Oberflächenqualität des thermogeformten Bauteils. Um den Zusammenhang von Schichtdicke zu Oberflächengüte des fertigen Bauteils festzustellen wurden mit der CAD Software Fusion 360 von der Firma Autodesk drei Testwerkzeuge (i.F. Plättchen genannt) konstruiert (techn. Zeichnung 005). Diese wurden im Anschluss mit der Slicing Software Cura 15.04.3 in das vom 3D-Drucker verwendete Format umgewandelt und entsprechend der Betitelung mit einer Schichtdicke von 0.1mm, 0.2mm & 0.3mm aufrecht stehend auf einem Ultimaker 2 entsprechend der Druckparameter (Tab. 6.2) gedruckt. Als Material wurde wie beim Testwerkzeug des Automodelles auf Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS) gesetzt um die Wärmeformbeständigkeit zu gewährleisten.

Tab. 6.2 Druckparameter Plättchen

Parameter	Wert
Material	ABS
Düsendurchmesser	0.4mm
Düsentemperatur	245°C
Betttemperatur	100°C
Druckgeschwindigkeit	35mm/sec
Schichtdicke	0.1 ... 0.3mm

6. Test Rapid Prototyping

Die Druckgeschwindigkeit wurde im Vergleich zum Automodell leicht reduziert um einen sehr sauberen, detaillierten Druck zu erreichen (Abb. 6.2). Nach dem Entgraten und Säubern der Plättchen wurden diese im Anschluss an der Thermoformmaschine KFG 37 mit 1mm starkem Polypropylen (PP) thermogeformt. Die Ausrichtung der Schichtlagen der Plättchen war dabei orthogonal zum Arbeitstisch der Thermoformmaschine. Aus den Ergebnissen (Abb. 6.3) lässt sich ein sichtbarer Unterschied zwischen 0.2mm und 0.3mm Schichtdicke erkennen. Der Unterschied zwischen 0.1mm und 0.2mm Schichtdicke ist nur noch schwer zu erkennen und lässt sich lediglich haptisch wahrnehmen. Die Erkenntnis aus diesem Vorversuch ist die Wahl einer 0.2mm starken Schichtdicke für unser im Rapid Prototyping hergestelltes Formwerkzeug, da eine 0.3mm starke Schichtdicke eine zu schlechte Oberflächenqualität am späteren Bauteil hinterlässt und eine 0.1mm starke Schichtdicke bei einem so großen Druckmodell nicht kosteneffizient genug für den sehr geringen Qualitätsanstieg ist.

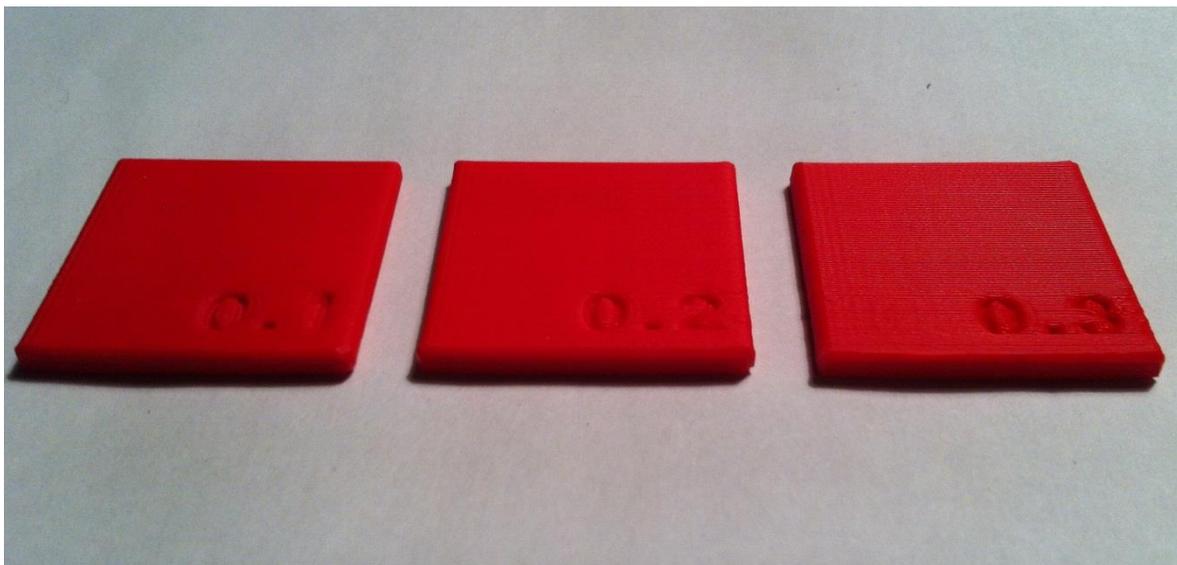


Abb. 6.2 Plättchen



Abb. 6.3 Oberflächenqualität durch Schichtdicke

7.1 Erstellung des 3D-Modelles

7.1.1 Konstruktionsvorgang

Zur Erstellung des 3D Modelles wurde ein Flächenmodell eines Audi R8 herangezogen [40]. Dieses wurde mithilfe der CAD Software Catia V5R19 in den folgenden Schritten soweit nachbearbeitet bis ein für das Rapid Prototyping verwendbares Modell entstand. Zuerst wurde das Flächenmodell insoweit vereinfacht, dass Teile wie Spiegel, Lichter und Kühlergrill wegen der zu feinen Detaillierung und Entstehung von Hinterschneidungen entfernt wurden. Im nächsten Schritt wurden die Radhäuser und die Bereiche in denen die Front- und Rückscheinwerfer sitzen mit der "Füllen" Funktion im Generative Shape Design von Catia V5R19 geschlossen und alle Einzelflächen über die Funktion "Zusammenfügen" verbunden. Das Modell wies durch ungenaue Konstruktion mehrere Unstetigkeiten zwischen angrenzenden Flächen auf, sodass an diesen Übergängen winzige Löcher in der Mantelfläche des Modelles entstanden. Nachdem diese Löcher mithilfe der "Reparatur" Funktion entfernt wurden ließ sich die Unterseite des Modelles durch eine Extrusionsfläche schließen und so das Modell zu einem sog. wasserdichten Modell umwandeln.

Dieses aus einer einzigen Mantelfläche bestehende Modell wurde nun im Part Design von Catia V5R19 mithilfe der Funktion "Fläche schließen" in ein Volumenmodell (auch Solid genannt) umgewandelt (Abb. 7.1) und war damit bereit für die Folgenden auf booleschen Operationen basierenden Konstruktionsschritte.

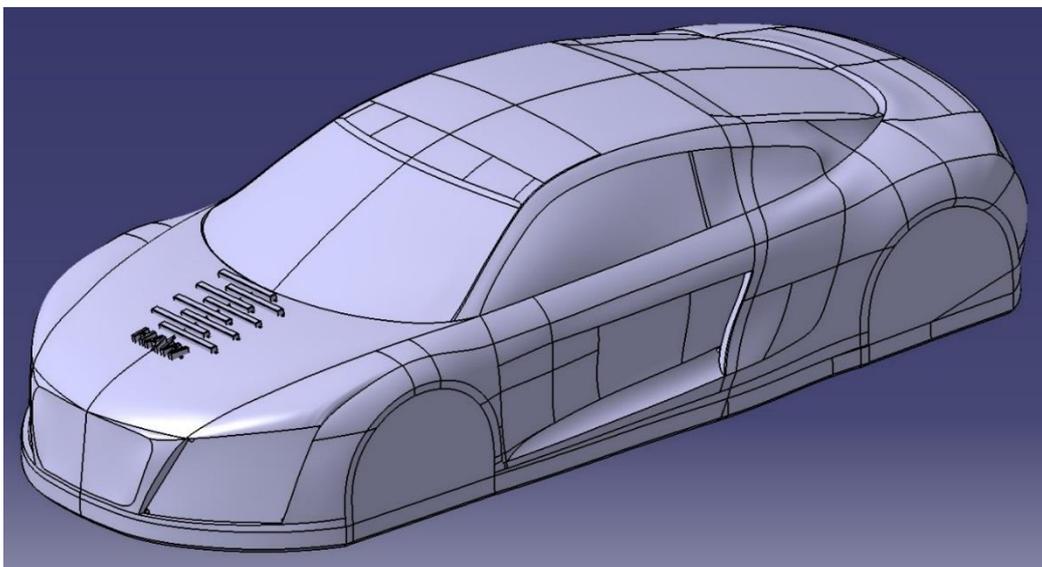


Abb. 7.1 Solid Audi R8

7. Formherstellung mittels Rapid Prototyping

Um beim späteren Rapid Prototyping Verfahren Zeit und Material zu sparen, wurde das solid unterseitig soweit ausgehöhlt bis nur noch eine ca. 20-30mm starke Außenhaut übrig blieb und so auch das Erreichen der später modellierten Entlüftungsbohrungen vereinfacht wurde. Zur besseren Identifizierung mit dem späteren Formwerkzeug wurde das Logo der HAW wie bei dem konventionell hergestellten Modell auf der Motorhaube platziert und mit entsprechend gesetzten Entlüftungsbohrungen versehen (Abb. 7.2).

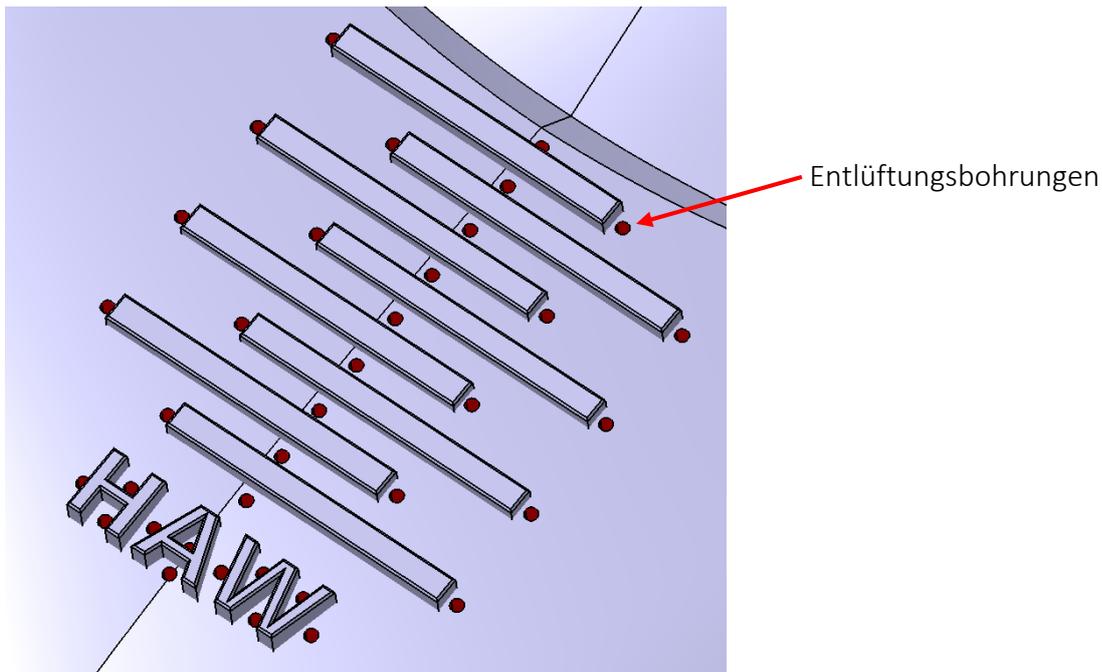


Abb. 7.2 HAW Logo mit Entlüftungsbohrungen

Um mögliche Lufteinschlüsse am späteren Formwerkzeug zu verhindern, wurden an den kritischen Stellen weitere Entlüftungsbohrungen platziert und mithilfe der Bohrungsfunktion bis zum innenliegenden Hohlraum geführt (Abb. 7.3). Zur einfacheren Herstellung des Formwerkzeuges auf dem 3D-Drucker wurde das Modell schräg geteilt und Trennwände mit Entformungsgriffen und Aussparungen zur gemeinsamen Fixierung wurden eingefügt. Genauere Erklärungen hierzu siehe Kap. 7.1.2.

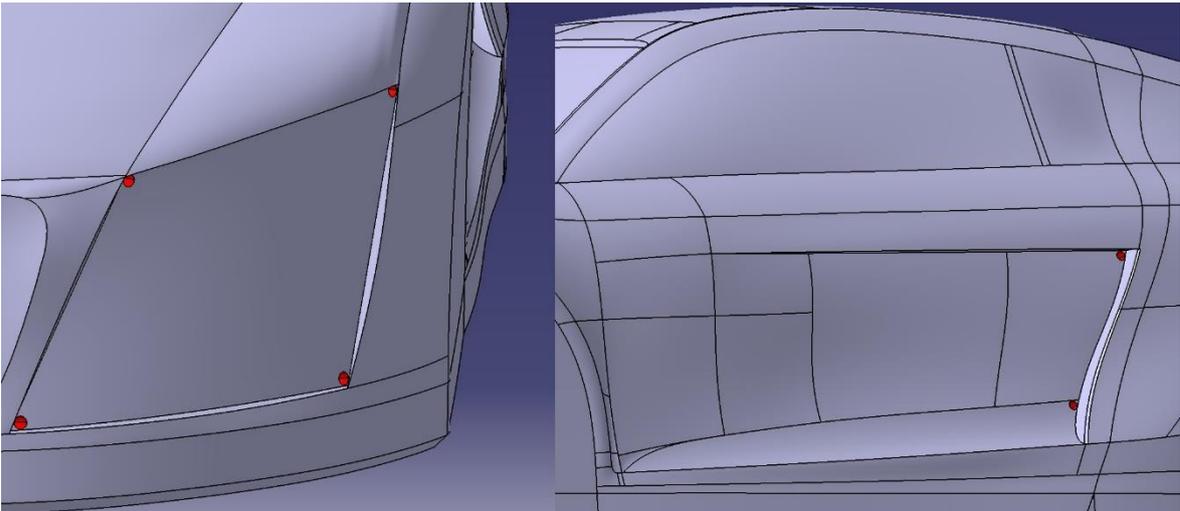


Abb. 7.3 weitere Entlüftungsbohrungen

7.1.2 Besonderheiten

Da der Druckraum des verwendeten 3D-Druckers (Ultimaker 2) mit 210x210x205mm zu klein für das gesamte Modell war, wurde eine Trennung des Formwerkzeuges vorgesehen (Abb. 7.4).

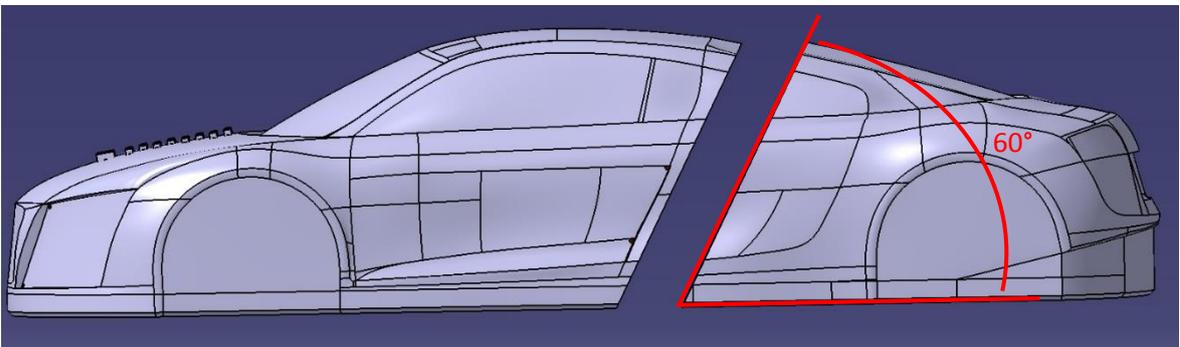


Abb. 7.4 Trennung des Formwerkzeuges

Durch die Trennung wurde das Modell in das Vorderteil (ca. 2/3 der Gesamtlänge) und das Hinterteil (ca. 1/3 der Gesamtlänge) aufgeteilt, dabei wurde aus mehreren Gründen eine zur Unterseite des Modelles schräge Trennebene (Winkel 60°) angewendet.

7. Formherstellung mittels Rapid Prototyping

Die durch das Logo der HAW auf der Motorhaube des Automodelles entstandenen Überhänge wurden durch die schräge Trennebene und somit schräge Platzierung des Modelles auf dem Druckbett kompensiert (Abb. 7.5). Des Weiteren wird die schräge Trennung später beim Entformen des Modelles aus der thermogeformten Folie helfen, da sich das Hinterteil wie eine Art einseitiger Konus nach unten entfernen lässt und so das Vorderteil mit seinen seitlichen Hinterschneidungen (Abb. 7.6) zum Entformen freigibt.

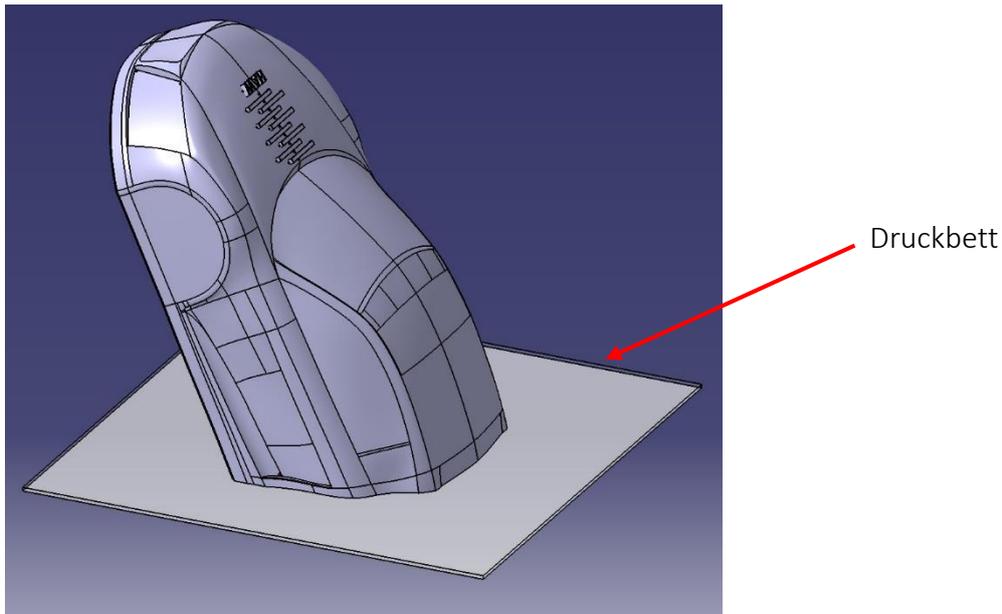


Abb. 7.5 Positionierung auf dem Druckbett

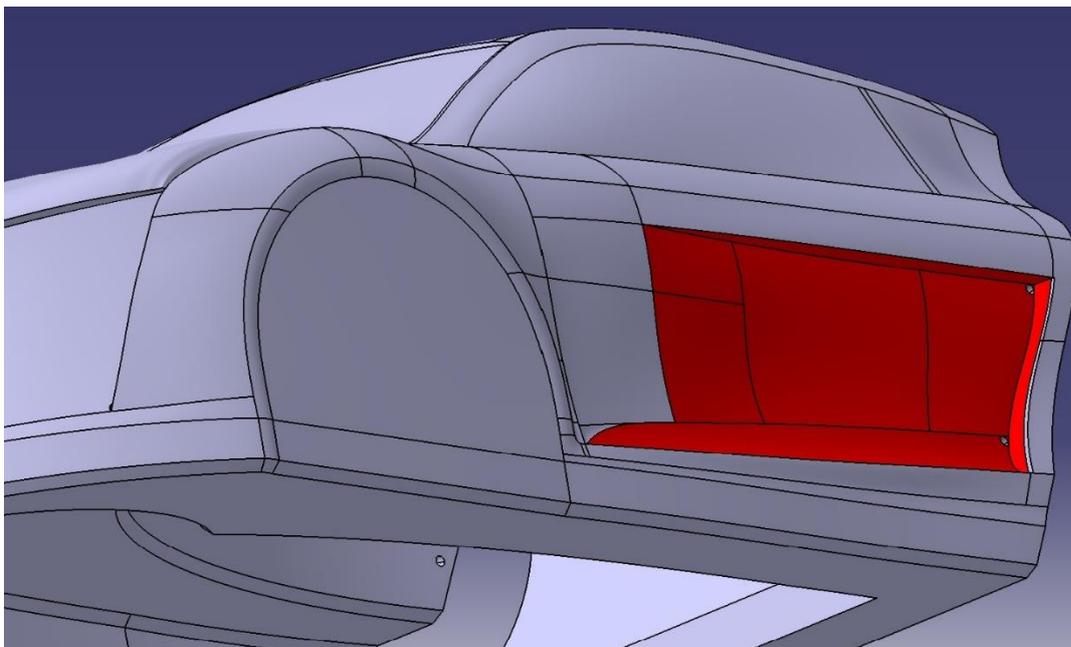


Abb. 7.6 seitliche Hinterschneidungen

Die am Vorder- und Hinterteil konstruierten Trennwände dienen einerseits als sauberer Abschluss für die Modellhälften haben andererseits aber auch einen praktischen Nutzen. Ihre seitlichen Aussparungen dienen dem Verbinden der beiden Formhälften mittels Klammern (Abb. 7.7) während des Thermoformprozesses. Die am unteren Ende der Trennhälften konstruierten Hinterschneidungen dienen als Griffe zur leichteren Entfernung der Formwerkzeughälften nach dem Thermoformprozess (Abb. 7.8).

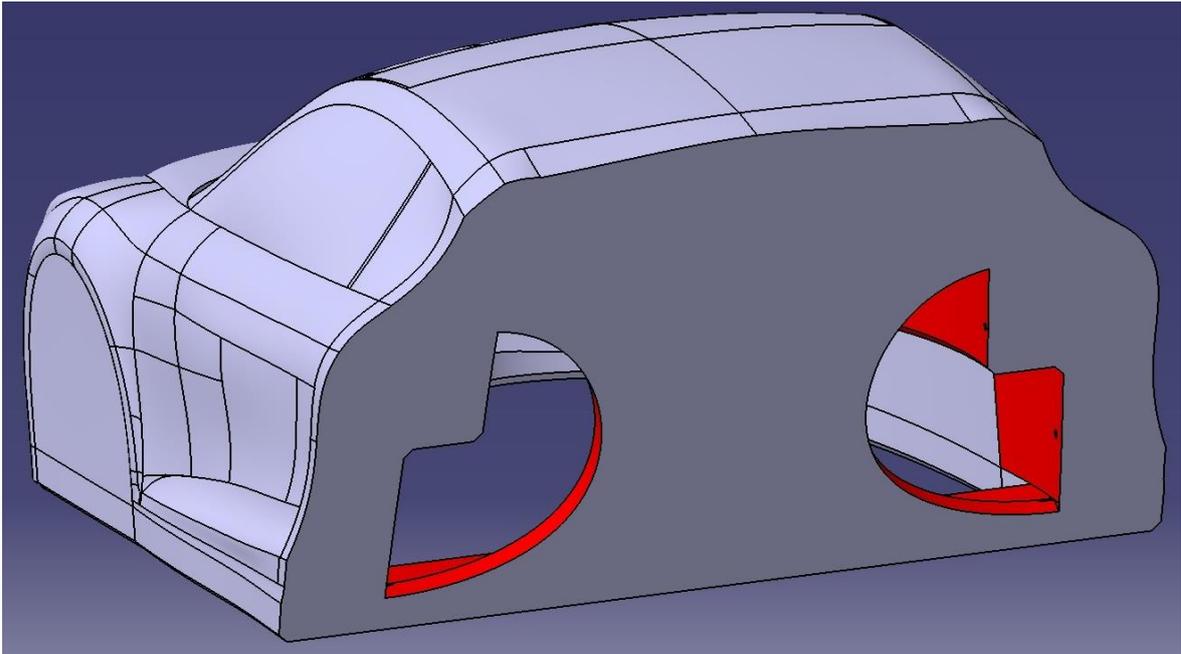


Abb. 7.7 Öffnungen für die Verbindung mittels Klammern

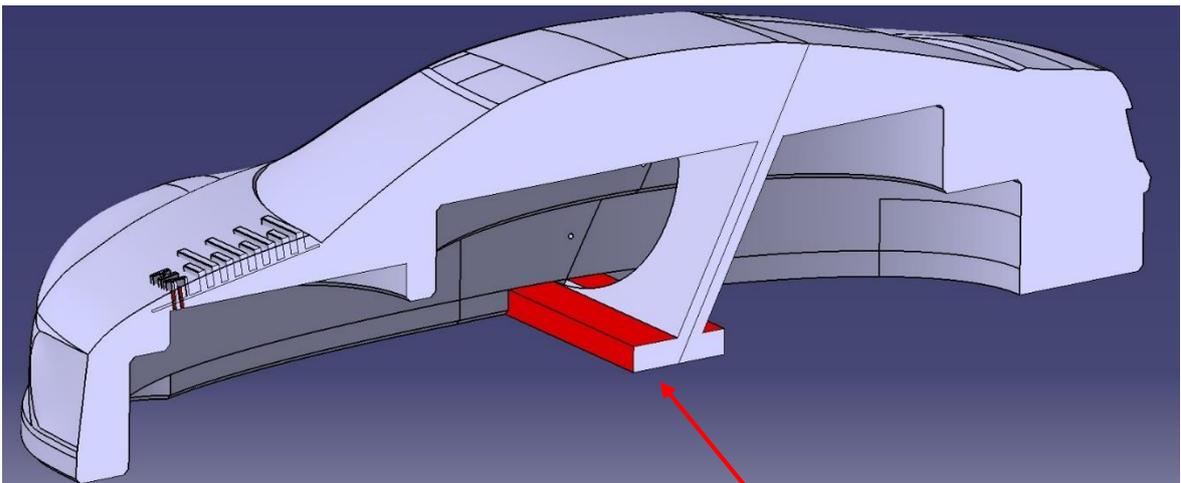


Abb. 7.8 Griffe am Formwerkzeug

Griffe

7. Formherstellung mittels Rapid Prototyping

7.1.3 Erstellung des Maschinencodes

Nach der Erstellung des 3D Modelles mittels Catia V5R19 wurde im Anschluss mithilfe der Slicing Software Cura 15.04.3 der von dem 3D Drucker (Ultimaker 2) verwendete Maschinencode generiert und die Modellhälften anhand der Parameter (Tab. 7.1) ausgedruckt. Die zwei Modellhälften wurden jeweils einzeln mit der Trennebene plan auf dem Druckbett positioniert. Es wurde darauf geachtet die Modellhälften parallel zur X-

Tab. 7.1 Druckparameter 3D Modell Audi R8

Parameter	Wert
Material	Co-Polyester
Düsendurchmesser	0.4mm
Düsentemperatur	230°C
Betttemperatur	80°C
Druckgeschwindigkeit	50mm/sec
Schichtdicke	0.2mm
Fülldicke	20%
Dicke der Außenhaut	0.8mm
Lüfter	50%

Achse des 3D Druckers auszurichten um möglichst viele einachsige Bewegungen bei der Erstellung des Modelles zu erreichen. Diese Art der Ausrichtung auf dem Druckbett spart einerseits durch die so häufige Verwendung von nur einer Achse beim Verfahren Energiekosten und andererseits werden die geraden Kanten des Modelles so präziser gefertigt (Abb. 7.9).

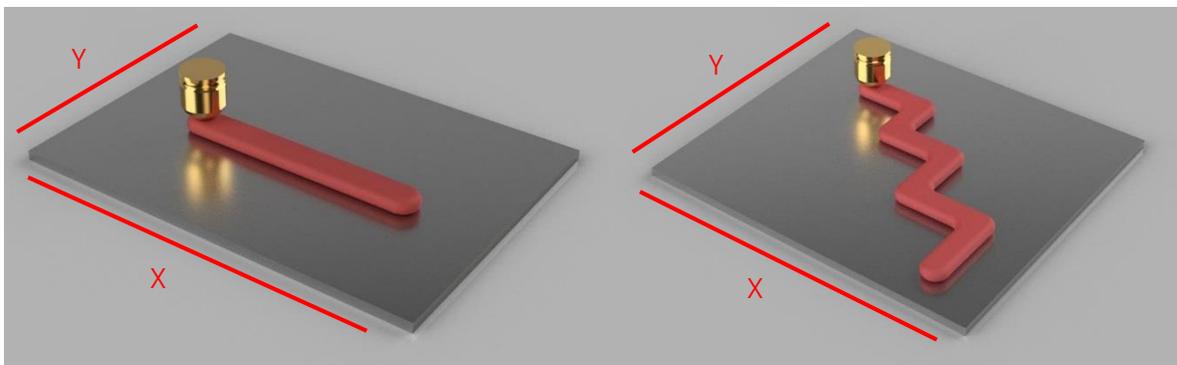


Abb. 7.9 Ausrichtung auf dem Druckbett

Hierbei handelt es sich um eine stark vergrößerte Darstellung, die das Prinzip erläutern soll. Die X- & Y-Achse befinden sich in beiden Bildern entlang der Druckbettkanten.

Als Material wurde ein Co-Polyester (siehe Kap. 7.2.2) gewählt welches mit einer 0.4mm Druckdüse und einer Schichtdicke von 0.2mm (siehe Kap. 6.2) ausgedruckt wurde. Die Düsen- und Betttemperatur wurde leicht gesenkt um bei den 2 großen Modellhälften die Energiekosten für die Fertigung zu reduzieren.

Die Fülldicke ist bei so großen Modellen ein entscheidender Zeit- und Festigkeitsfaktor. Wird die Fülldicke zu klein ausgelegt sinkt die Festigkeit des Modelles, wird sie dagegen zu groß ausgelegt steigt die Druckzeit und damit die Produktionskosten. Ein gutes Mittelmaß zwischen Festigkeit und Produktionskosten wurde mit 20% Fülldicke erreicht. Die Dicke der Außenhaut sollte immer ein Vielfaches des Düsendurchmessers sein. So lässt sich für die höhere Oberflächenqualität eine innere Wand gefolgt von der eigentlichen Außenhaut drucken welche sich an der inneren Wand "abstützt". Das Druckobjekt wird während der Herstellung von Lüftern gekühlt um die Erstarrung des Materiales herbeizuführen. Der Warping Effekt (Wärmeverzug des Druckobjektes) wird durch diesen Abkühlprozess jedoch verstärkt, weshalb die Lüfter nur mit der Hälfte der Maximaldrehzahl betrieben wurden. So wurde ein Kompromiss zwischen Oberflächengüte und Wärmeverzug gefunden. Zur besseren Haftung des Druckobjektes auf dem Druckbett und zur Einschränkung des Ablösens von dem Druckbett durch den beschriebenen Warping Effekt wurde ein Rand (Brim) von 20mm um das Modell erstellt.

7.2 Erstellung des Formwerkzeuges

7.2.1 Vorbereitung

Filament

Zur Erreichung eines besseren Schichtzusammenhaltes durch das Verschmelzen der einzelnen Schichten (Layer) wurde der Durchmesser des verwendeten Filaments an 10 verschiedenen Stellen mittels digitalem Messschieber (Absolute AOS Digimatic [29]) ermittelt.

Dieser Wert wurde abzüglich 0.05mm in den Materialeinstellungen des 3D Druckers eingetragen um durch den kleiner angegebenen Durchmesser einen leicht erhöhten Materialfluss und somit ein besseres Verschmelzen der Layer durch Materialüberfluss zu erreichen.

7. Formherstellung mittels Rapid Prototyping

Druckbett

Das Druckbett wurde plan ausgerichtet. Dazu wurde der Druckkopf mit der Druckdüse an 3 Stellen des Druckbettes positioniert und langsam heruntergefahren bis ein Papierstreifen (stärke ca. 0.1mm) gerade eben zwischen Druckdüse und Druckbett passte. Dabei wurde an den 3 unter dem Druckbett befindlichen Rändelschrauben die jeweilige Höhe eingestellt und so die zu dem verfahrenen Druckkopf nötige Parallelität erreicht. Die Glasplatte des Druckbettes wurde mit Glasreiniger und einem Microfasertuch von Staub und Verunreinigungen befreit und anschließend mit einer Schicht Klebeband (Tesa Masking Tape Precision Outdoor [41]) beklebt um die Haftung der ersten Druckschicht zum Druckbett zu erhöhen. Dabei wurde darauf geachtet, dass sich die einzelnen Streifen des Klebebandes weder überlappen noch sich eine Lücke zwischen den beiden bildet um eine möglichst ebene erste Druckschicht zu erreichen.

3D Drucker

Vor einem so zeitaufwendigen Druck wurden alle Achsen des 3D Druckers (Ultimaker 2) gereinigt, von Rückständen befreit und anschließend mit Nähmaschinenöl geölt. Nähmaschinenöl hat eine sehr geringe Viskosität und hindert so die Lager nicht an hohen Beschleunigungen und schnellem Verfahren auf den Achsen. Die Trapezgewindespindel der Z-Achse wurde mit entsprechendem Gewindefett gefettet und die Druckdüse vor dem Verwenden eines neuen Materiales mithilfe der Atomic Methode [42] gereinigt.

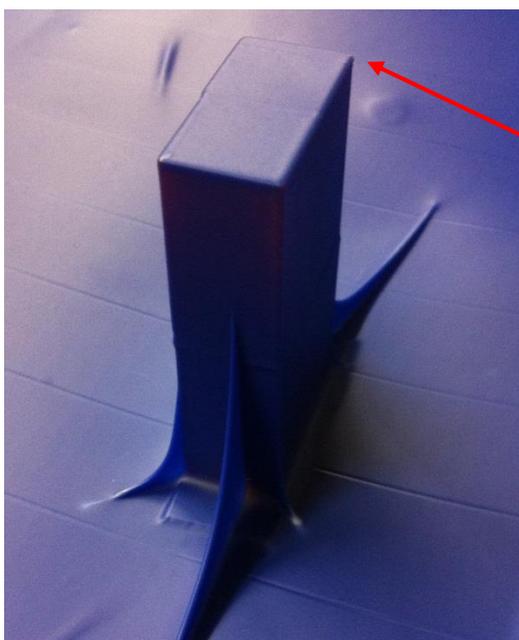
Wärmekammer

Das Modell wurde in einer eigens für den 3D Drucker (Ultimaker 2) entwickelten und hergestellten Wärmekammer gedruckt. Durch das Drucken in einer solchen Wärmekammer wird durch das langsamere und gleichmäßigere Abkühlen des Druckobjektes der Wärmeverzug minimiert, der Schichtzusammenhalt erhöht und die Oberflächenqualität verbessert.

7.2.2 Verwendung verschiedener Materialien

Um ein Formwerkzeug herzustellen welches den Anforderungen eines Thermoformprozesses genügt (siehe Kap. 4.3) wurden verschiedene Materialien für die Produktion des Druckobjektes herangezogen. Als erstes Material wurde PLA (Polylactide) verwendet, welches aber aufgrund seiner geringen Wärmeformbeständigkeit (Glasübergangstemperatur von ca. 40°C) ausschied nachdem es sich während des Thermoformprozesses durch die Strahlungswärme und das später angelegte Vakuum mitverformte und seine festgelegte Form verlor.

Um das Problem der ungewollten Erweichung des Formwerkzeuges zu lösen wurde als nächstes Material ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol) verwendet. Dieses besitzt eine Glasübergangstemperatur von ca. 100°C und sollte damit genug warmfest sein um bei dem Thermoformprozess seine Form zu behalten. Um dies zu überprüfen wurde ein Testquader aus diesem Material gedruckt welcher dieselbe Ausgangshöhe (ca. 90mm) wie das spätere 3D Modell besitzt. So wird die Nähe zu den in der Thermoformmaschine verbauten Heizstrahlern simuliert und es kann eine brauchbare Aussage über die Wärmeformbeständigkeit von ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol) während eines Thermoformprozesses getroffen werden. Der Testquader behielt seine gegebene Form und auch die Kanten wurden präzise ausgeformt (Abb. 7.10). Die Verarbeitung des Filaments war aber zu kompliziert um die zwei sehr großen Druckobjekte (Vorder- und Hinterteil des Audi R8) in ausreichend hoher Qualität zu drucken.



Keine eingeschmolzenen Kanten

Abb. 7.10 Testquader thermogeformt

7. Formherstellung mittels Rapid Prototyping

Als beste Alternative in Bezug auf Oberflächengüte, Wärmeformbeständigkeit und Verarbeitung ergab sich ein Co-Polyester (colorFabb nGen [18]), welches mit einer Glasübergangstemperatur von ca. 85°C ausreichend warmfest für den Thermoformprozess war. Das Material ließ sich auf dem Ultimaker 2 inklusive Wärmekammer sehr gut verarbeiten und es ergab sich eine entsprechend hohe Oberflächengüte.

7.2.3 Nachbearbeitung des Formwerkzeuges

Nach der Entfernung der 2 Druckobjekte (techn. Zeichnungen 006 & 007) vom Druckbett wurde der Brim entfernt und etwaige Fehlstellen mit Pattern Resin Ls [27] ausgebessert. Durch das unterschiedliche Abkühlen der Schichten während des Druckvorganges entstand ein leichter Verzug der auf dem Druckbett positionierten Trennebenen der Modellhälften. Dieser wurde mithilfe einer Abrichtplatte und Nassschleifpapier (120er Körnung) im handgeführten Schleifverfahren geebnet. Die 2 Formhälften wurden anschließend mittels zweier Klammern zusammengefügt (Abb. 7.11) und der entstandene Spalt mit Pattern Resin Ls [27] gefüllt. Vorher wurde die Trennebene einer der Formhälften mit einer dünnen Schicht Trennmittel (WD 40) benetzt um die Haftung des Modellierkunststoffes an dieser Fläche zu verhindern.

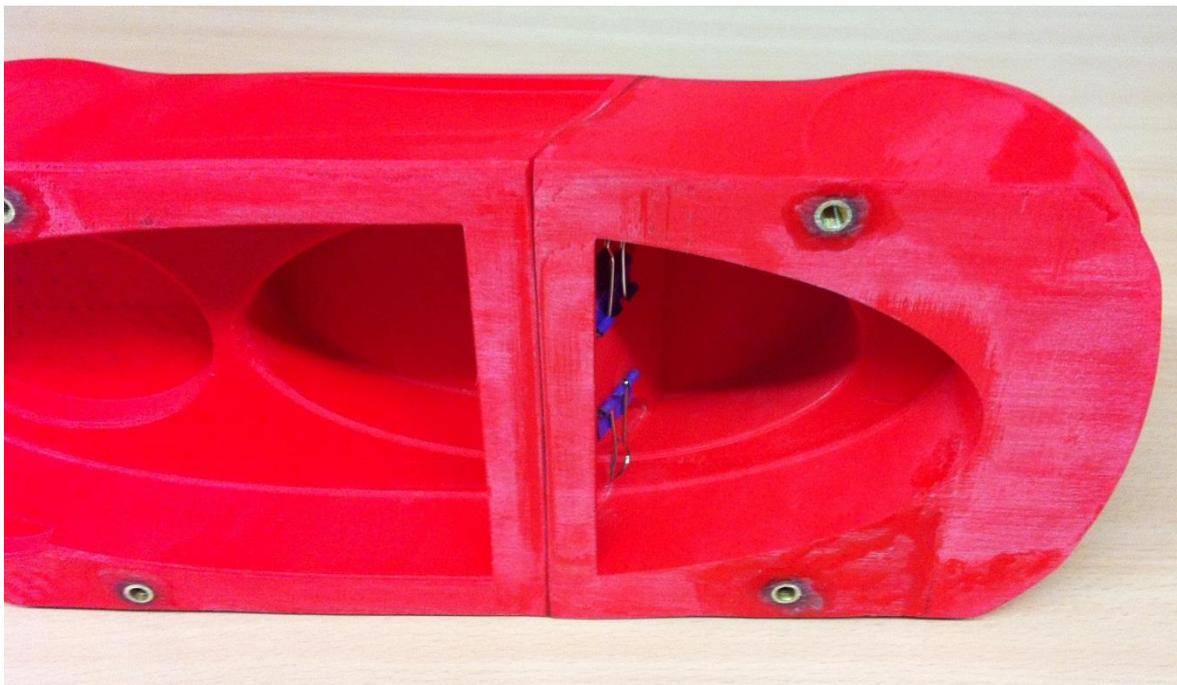


Abb. 7.11 Verbund der zwei Modellhälften

Nach der Aushärtung des Modellierkunststoffes wurde dieser mittels Nassschleifpapier (120er Körnung) in verbundenem Zustand beglichen bis sich ein sauberer Übergang der zwei Formhälften ergab. Zur Befestigung des Formwerkzeuges auf der Unterkonstruktion (siehe Kap. 8) wurden in den 2 Formhälften jeweils 2 Gewindeeinsätze mittels angefertigter Vorrichtung (techn. Zeichnung 008) im selben Verfahren wie beim konventionell hergestellten Formwerkzeug eingeklebt (siehe Kap. 5.4.3). Zuerst wurden an den entsprechenden Stellen die vier Bohrungen mittels Handfräsgerät gefertigt und anschließend die vier in die Vorrichtung eingeschraubten Gewindeeinsätze mit Pattern Resin Ls [27] eingeklebt. Der durch die Vorrichtung entstandene Abstand der Gewindeeinsätze zur Unterseite des Formwerkzeuges war zu groß, sodass sich ein zu großer Luftspalt ergeben hätte welcher die erwärmte Folie während des Thermoformprozesses unter das Modell gezogen hätte. Mittels Abrichtplatte und Nassschleifpapier (120er Körnung) wurde der Abstand von ca. 1.5mm auf ca. 0.3mm reduziert. Dabei wurde auf den gleichmäßigen Abtrag an allen 4 Gewindeeinsätzen geachtet um einen sicheren Stand auf der Unterkonstruktion der Thermoformmaschine zu gewährleisten.

8.1 Randbedingungen

Bevor nun der eigentliche Thermoformprozess beginnen kann musste zuerst noch eine Unterkonstruktion für die Plattenformmaschine UA 100Ed entworfen und hergestellt werden. Diese Unterkonstruktion hat folgende Aufgaben während des Thermoformprozesses:

- Das Abdichten des Vakuutraumes der Thermoformmaschine
- Das Überbrücken des Höhenunterschiedes von Untertisch der Maschine zur Oberkante des Spannrahmens
- Das Aufnehmen des Modelles über entsprechende Befestigungsbohrungen
- Das Weiterleiten des Vakuums von dem Untertisch der Maschine bis zum Formwerkzeug

Das Material der Unterkonstruktion sollte einerseits eine genügend hohe Festigkeit aufweisen um eine Konstruktion mit ausreichender Steifigkeit herstellen zu können, sollte andererseits aber so kostengünstig wie möglich sein. Es wurde sich für beidseitig mit Melamin beschichtete Pressspanplatten [30] entschieden. Diese haben eine Stärke von 19mm und liegen mit ca. 24€/qm im preislichen Rahmen der Bachelorthesis. Die entsprechenden Maße der Plattenformmaschine UA 100Ed wurden mittels Gliedermaßstab, Stahllineal und analogem Messschieber aufgenommen. Eine Skizze wurde angefertigt, mithilfe der CAD Software Fusion 360 wurde anschließend aus der Skizze ein 3D Modell erstellt aus welchem die Zusammenbauzeichnung (techn. Zeichnung 013), die Einzelteilzeichnungen (Anhang) und die Stückliste (Anhang) generiert wurde.

8.2 Herstellungsvorgang

Die beidseitig mit Melamin beschichteten Pressspanplatten wurde entsprechend der Einzelteilzeichnungen auf Maß gesägt und alle Kanten wurden mit Schleifpapier (80er Körnung) gebrochen. In der Unterplatte (techn. Zeichnung 009) wurde mittels Oberfräse und entsprechendem Einsatz in die Ober- und Unterseite jeweils eine Nut gefertigt und anschließend entgratet.

8. Herstellung der Unterkonstruktion für die Plattenformmaschine UA 100Ed

Mit einer Bohrmaschine und einem 13mm Holzspiralbohrer wurden die Befestigungsbohrungen erstellt, welche die Unterkonstruktion mit dem Untertisch der Plattenformmaschine UA 100Ed verbindet und mit einem Flachsenker für die entsprechenden Unterlegscheiben (Stückliste Pos. 11) aufgesenkt. Mit einer Lochsäge wurde die Vakuumbohrung des Untertisches auf die Unterplatte übertragen und die auf der Ober- und Unterseite gefertigten Nuten mit einem Silikon ausgefüllt und mit einem Formwerkzeug geglättet (Abb. 8.1), so wurde eine Abdichtung des Vakuumraumes zu beiden Seiten erreicht.



mit Formwerkzeug geglättet

Abb. 8.1 Silikondichtung

Drei der sechs Distanzplatten (techn. Zeichnung 010) wurden mit einer Hobelmaschine auf 16mm Stärke verringert, um nach dem Zusammenbau der Unterkonstruktion und Integration in der Plattenformmaschine UA 100Ed die benötigte Höhendifferenz von Untertisch zum Spannrahmen genau zu erreichen. Alle sechs Distanzplatten wurden miteinander verleimt, zusammen mit der Oberplatte (techn. Zeichnung 011) auf der Unterplatte positioniert und mit Schraubzwingen verspannt. Mit einer Bohrmaschine und einem 13mm Holzspiralbohrer wurden sechs Durchgangsbohrungen erzeugt, durch welche alle Elemente mittels Verschraubungen verbunden werden konnten.

8. Herstellung der Unterkonstruktion für die Plattenformmaschine UA 100Ed

Die in der Oberplatte so entstandenen Bohrungen wurden mit einem für die verwendeten Zylinderkopfschrauben (Stückliste Pos. 8) entsprechendem Flachsenker soweit aufgesenkt, dass der Kopf der Schrauben bündig mit der Oberseite abschließt. Die in der Unterseite entstandenen Bohrungen wurden mit sechs Gewindeeinsätzen (Stückliste Pos. 12) versehen. Mit einer Bohrmaschine, einer Lochsäge und einer Stichsäge wurde die Vakuumnut in der Oberplatte gefertigt und anschließend geschliffen und entgratet. Die Aluminiumplatte (techn. Zeichnung 012) wurde mit einer Schlagschere auf Maß gebracht, die Befestigungs- und Vakuumbohrungen wurden angerissen und mit den entsprechend großen Spiralbohrern für Metall an einer Ständerbohrmaschine gefertigt.

Nachdem die Befestigungsbohrungen für die verwendeten Senkkopfschrauben (Stückliste Pos. 6) aufgesenkt und die Platte mit Nassschleifpapier (120er...240er Körnung) und Spiritus geschliffen wurde, konnte das Bohrbild der Aluminiumplatte auf die Oberplatte übertragen werden. Die Befestigungsbohrungen für das Formwerkzeug auf der Oberplatte wurden wegen der benötigten Genauigkeit auf einer CNC Fräsmaschine gefertigt. Dieses Bohrbild wurde mit einem Forstnerbohrer ($\varnothing 14\text{mm}$) und einer Bohrschablone auf die Oberplatte übertragen um ausreichend Freiraum für die zur Befestigung des Formwerkzeuges verwendeten Zylinderkopfschrauben zu bekommen.

8.3 Endmontage und Integration in der Maschine

Nach der Fertigung aller Einzelteile wurde die Unterkonstruktion (techn. Zeichnung 013) komplett montiert und das Formwerkzeug (Audi R8) mittels Zylinderkopfschrauben auf der Aluminiumplatte (techn. Zeichnung 012) fixiert. Die Unterkonstruktion war nun bereit für die Integration in der Plattenformmaschine UA 100Ed. Dafür wurde der Untertisch der Maschine in seine unterste Position gefahren und die seitliche vakuumdichte Abdeckung des Arbeitsraumes entfernt. Nach dem Platzieren der Unterkonstruktion auf dem Untertisch (Abb. 8.2) wurde diese mittels Zylinderkopfschrauben und Unterlegscheiben fest verschraubt und auf Passgenauigkeit getestet. Dazu wurde der Untertisch inklusive Unterkonstruktion langsam über die manuelle Steuerung in den Spannrahmen gefahren bis der Endanschlag ausgelöst wurde. Die Unterkonstruktion passte nun berührungsfrei in den Spannrahmen und schloss nach oben bündig mit diesem ab.

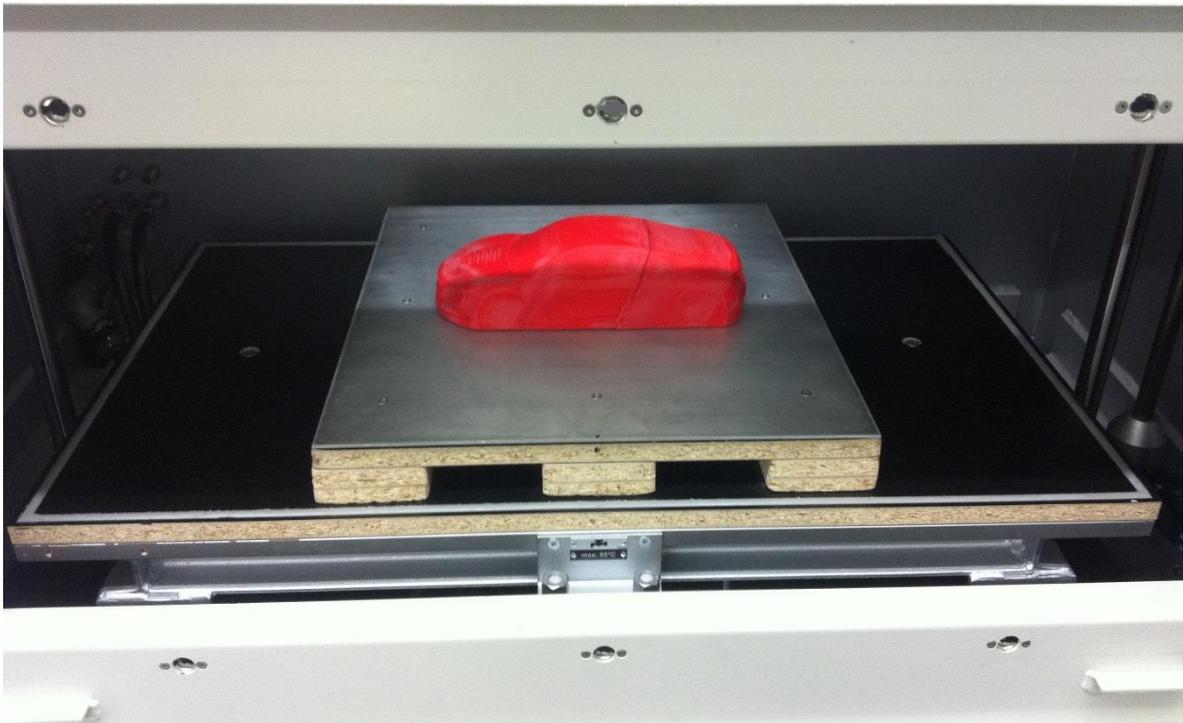


Abb. 8.2 Integration der Unterkonstruktion in der Thermoformmaschine

9.1 Formwerkzeug des Porsche 356 auf KFG37

9.1.1 Testreihe des Formwerkzeuges Porsche 356

Das Formwerkzeug (Porsche 356) aus Gießharz wurde an dem KFG 37 getestet. Als Halbzeug wurde Polystyrol (1mm stark) verwendet, welches durch die Flächenstrahler der Thermoformmaschine mit 385°C erwärmt wurde. Das Formwerkzeug wurde im Vorfelde durch dieselben Flächenstrahler auf ca. 80-100°C Betriebstemperatur gebracht, um den Wärmeunterschied möglichst gering zu halten und dem erwärmten Material so mehr Zeit zum Umformen auf dem Formwerkzeug zu geben. Vor dem Thermoformprozess wurde das Formwerkzeug mit Silikontrennmittel OKS 1361 [20] benetzt. Es ergaben sich die folgenden zwei Probleme:

- Das gedruckte und verklebte HAW Emblem wurde nicht sauber ausgeformt und die Ränder waren sichtbar, da sich das Emblem durch den zu großen Wärmeeinfluss und das später anliegende Vakuum verformt hat (Abb. 9.1).
- Das Formwerkzeug ließ sich nicht ohne Zerstörung der umgeformten Folie entfernen. Der Grund hierfür waren die zu großen Hinterschneidungen im unteren Bereich des Formwerkzeuges und im Bereich der Scheinwerfer (Abb. 9.2).



Abb. 9.1 unsauber ausgeformtes HAW Emblem



Abb. 9.2 zerstörte Abbildung

9.1.2 Verbesserungen am Formwerkzeug

Die sich ergebenden Probleme (siehe Kap. 9.1.1) verlangten nach einer Lösung. Das gedruckte HAW Emblem wurde mittels Heißluftfön und Skalpell aus der Motorhaube des Formwerkzeuges entfernt und eine Negativform des in Fusion 360 vorhandenen 3D Modells wurde als Gussform konstruiert und anschließend mit einer 0.25mm feinen Druckdüse auf dem Ultimaker 2 ausgedruckt (Parameter siehe Tab. 9.1). Nach dem Säubern und Entgraten der Gussform wurde diese mit Biresin G38 [36] (Produktdatenblatt siehe Anhang) ausgegossen und nach dem Aushärten getempert (siehe Kap. 5.4.3). Vor dem Einkleben und Verspachteln des gegossenen HAW Emblems wurden in diesem mit einem 0.5mm Spiralbohrer mehrere Entlüftungsbohrungen (Abb. 9.3) und anschließend mit einem 12mm Spiralbohrer in der Einfassung des Emblems auf der Motorhaube des Porsche 356 eine Durchgangsbohrung gefertigt (Abb. 9.4). So erreicht das unter dem Formwerkzeug anliegende Vakuum auch die Entlüftungsbohrungen des Emblems.

Tab. 9.1 Gussform HAW Emblem

Parameter	Wert
Material	PLA
Düsendurchmesser	0.25mm
Düsentemperatur	215°C
Betttemperatur	50°C
Druckgeschwindigkeit	35mm/sec
Schichtdicke	0.1mm

0.5mm Entlüftungsbohrung



Abb. 9.3 Entlüftungsbohrungen im HAW Emblem

12mm Entlüftungsbohrung



Abb. 9.4 Entlüftungsbohrung Unterseite

9. Tiefziehvorgang

Das Problem der Hinterschneidungen wurde mit 2-Komponenten Polyestermetallschicht [37] und Nassschleifpapier (400er Körnung) behoben. Zuerst wurde mittels Haarwinkel festgestellt in welchen Bereichen sich die entscheidenden Hinterschneidungen befanden. Dazu wurde das Modell auf einer ebenen Granitplatte platziert und mit dem Haarwinkel seitlich abgefahren sodass ein Schenkel des Winkels immer parallel zur Granitplatte stand. So konnten die Bereiche der Hinterschneidungen anhand des sich ergebenden Spaltes zwischen dem anderen Schenkel des Haarwinkels und der Modelloberfläche lokalisiert werden und anschließend mithilfe des Spachtels und dem Nassschleifpapier soweit angepasst werden bis sich ein annähernd hinterschneidungsfreies Formwerkzeug ergab (Abb. 9.5). Nach den Verbesserungen am Formwerkzeug wurde der Thermoformprozess an dem KFG 37 mit denselben Daten (siehe Kap. 9.1.1) wiederholt, es ergab sich eine qualitativ sehr gute Abformung des HAW Emblems. Das Formwerkzeug ließ sich nach der Abkühlung der umgeformten Folie zerstörungsfrei entfernen (Abb. 9.6).



Abb. 9.5 entfernen der Hinterschneidungen



Abb. 9.6 abgeformtes Modell

9.2 Formwerkzeug des Audi R8 auf UA 100Ed

9.2.1 Testreihe des Formwerkzeuges Audi R8

Das Formwerkzeug (Audi R8) aus dem 3D Drucker wurde an der UA 100Ed getestet. Als Halbzeug wurde auch hier 1mm starkes Polystyrol verwendet um im späteren Verlauf einen aussagekräftigen Vergleich der zwei Formwerkzeuge zu erhalten. Es wurde zuerst versucht einen stabilen Thermoformprozess zu gestalten. Da sich an dieser Thermoformmaschine viel mehr Faktoren verändern lassen als am KFG 37 mussten mehrere Versuche gefahren werden um die optimalen Zeiten und Temperaturen herauszufinden. Auch hier wurde wieder das Silikontrennmittel OKS 1361 [20] zur einfacheren Trennung des Formwerkzeuges von der umgeformten Folie benutzt.

Versuch 1

Mit den folgenden Parametern (Tab. 9.2) *Tab. 9.2 Versuch 1* wurde der erste Versuch gefahren. Das Ergebnis (Abb. 9.7) ist ungenügend. Das Halbzeug ist ganz offensichtlich nicht warm genug geworden um die benötigte Umformung zu vollziehen.

Parameter	Wert
Zeit Oberheizung [s]	12
Zeit Unterheizung [s]	0
Temp. Oberheizung [°C] (3 Temperaturzonen)	500,480,450
Temp. Unterheizung [°C] (3 Temperaturzonen)	0
Zeit Vorblasen [s]	2
Kühlzeit [s]	10



Abb. 9.7 ungenügend erwärmte Folie

Versuch 2

Mit den folgenden Parametern (Tab. 9.3) wurde der zweite Versuch gefahren. Das Ergebnis (Abb. 9.8) hat sich zum vorherigen Versuch verbessert, bleibt aber noch ungenügend, da sich das Modell noch nicht sauber abgeformt hat, sich aber schon Faltenbildung einstellt. Das Vakuum liegt wohl zu langsam an oder das Halbzeug hat noch nicht seine optimale Temperatur zum Umformen erreicht.

Tab. 9.3 Versuch 2

Parameter	Wert
Zeit Oberheizung [s]	12
Zeit Unterheizung [s]	10
Temp. Oberheizung [°C] (3 Temperaturzonen)	600,580,550
Temp. Unterheizung [°C] (3 Temperaturzonen)	350,330,310
Zeit Vorblasen [s]	2
Kühlzeit [s]	10



Abb. 9.8 abgeformtes Modell mit Faltenbildung

Versuch 3

Mit den folgenden Parametern (Tab. 9.4) *Tab. 9.4 Versuch 3*

wurde der dritte Versuch gefahren. Die Heizzeiten der Ober- und Unterheizung wurden erhöht und das Ergebnis (Abb. 9.9) ist weiterhin unbefriedigend. Die Abformung des Modelles hat sich zum vorherigen Versuch verbessert, jedoch hat sich die Faltenbildung verstärkt. Das Problem liegt also weiterhin an dem zu langsam anliegendem

Parameter	Wert
Zeit Oberheizung [s]	15
Zeit Unterheizung [s]	12
Temp. Oberheizung [°C] (3 Temperaturzonen)	600,580,550
Temp. Unterheizung [°C] (3 Temperaturzonen)	400,370,350
Zeit Vorblasen [s]	2
Kühlzeit [s]	10

Vakuum oder an der Zeit des Vorblasens, welche zu lang ist und so die Folie unnötig weit dehnt. Dies führt dann zu der ungewollten Faltenbildung.

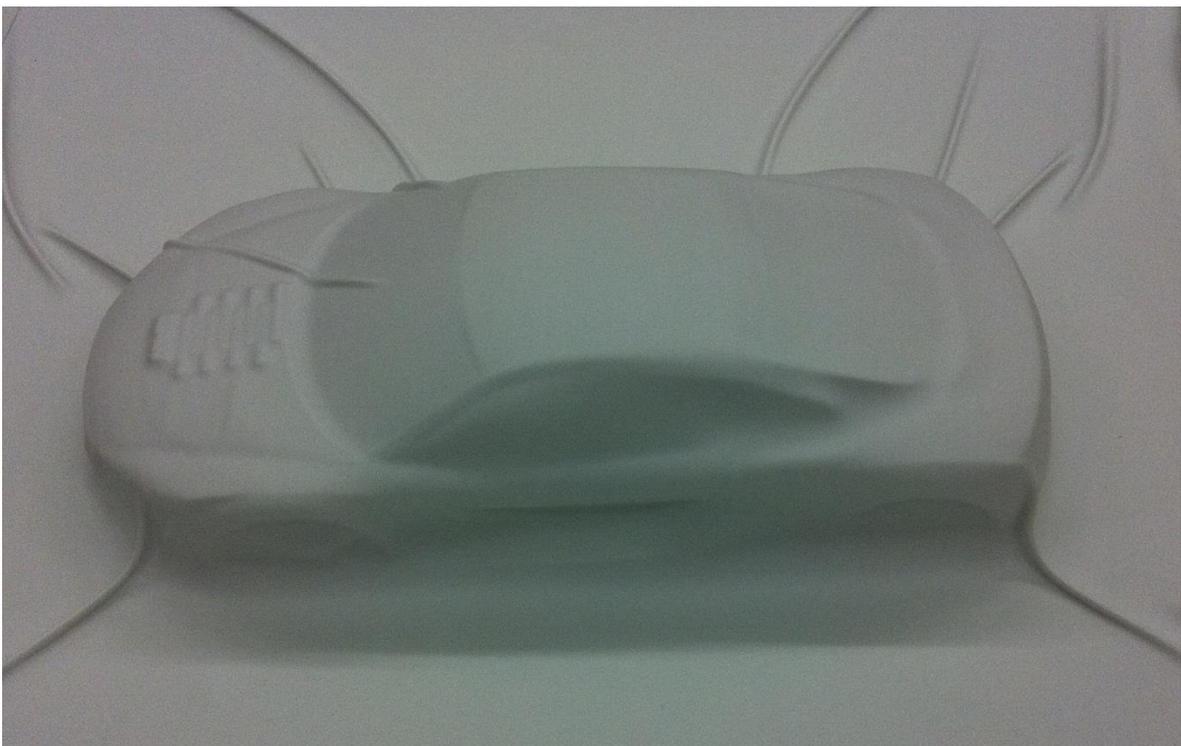


Abb. 9.9 abgeformtes Modell mit verstärkter Faltenbildung

Versuch 4

Mit den folgenden Parametern (Tab. 9.5) wurde der vierte Versuch gefahren. Die Zeit des Vorblasens wurde halbiert und das Formwerkzeug wurde auf 1mm starke Kunststoffplättchen gestellt um den Spalt unter dem Modell zu erhöhen und so das Vakuum schneller anliegen zu lassen. Das Ergebnis (Abb. 9.10) war besser als beim vorherigen Versuch aber immer noch nicht optimal.

Tab. 9.5 Versuch 4

Parameter	Wert
Zeit Oberheizung [s]	14
Zeit Unterheizung [s]	10
Temp. Oberheizung [°C] (3 Temperaturzonen)	600,580,550
Temp. Unterheizung [°C] (3 Temperaturzonen)	400,370,350
Zeit Vorblasen [s]	1
Kühlzeit [s]	10



Abb. 9.10 abgeformtes Modell mit verringerter Vorblaszeit

Versuch 5

Mit den folgenden Parametern (Tab. 9.6) *Tab. 9.6 Versuch 5*

wurde der fünfte Versuch gefahren. Das Vorblasen wurde auf 1,5 Sekunden erhöht und die 1mm starken Kunststoffplättchen wurden durch 3mm starke ausgetauscht, alle anderen Parameter wurden von dem vorherigen Versuch übernommen. Das Ergebnis (Abb. 9.11) wies die bis dahin beste Detailtreue auf. Die Faltenbildung und die

Parameter	Wert
Zeit Oberheizung [s]	14
Zeit Unterheizung [s]	10
Temp. Oberheizung [°C] (3 Temperaturzonen)	600,580,550
Temp. Unterheizung [°C] (3 Temperaturzonen)	400,370,350
Zeit Vorblasen [s]	1,5
Kühlzeit [s]	10

Abformung des HAW Emblems waren jedoch ungenügend. Die Testreihe ließ nur einen Schluss zu: das Vakuum lag nicht schnell genug an, sodass sich die erwärmte Folie entweder in Falten legte oder zu schnell erstarrte und Details wie das HAW Logo nicht genau genug darstellte.

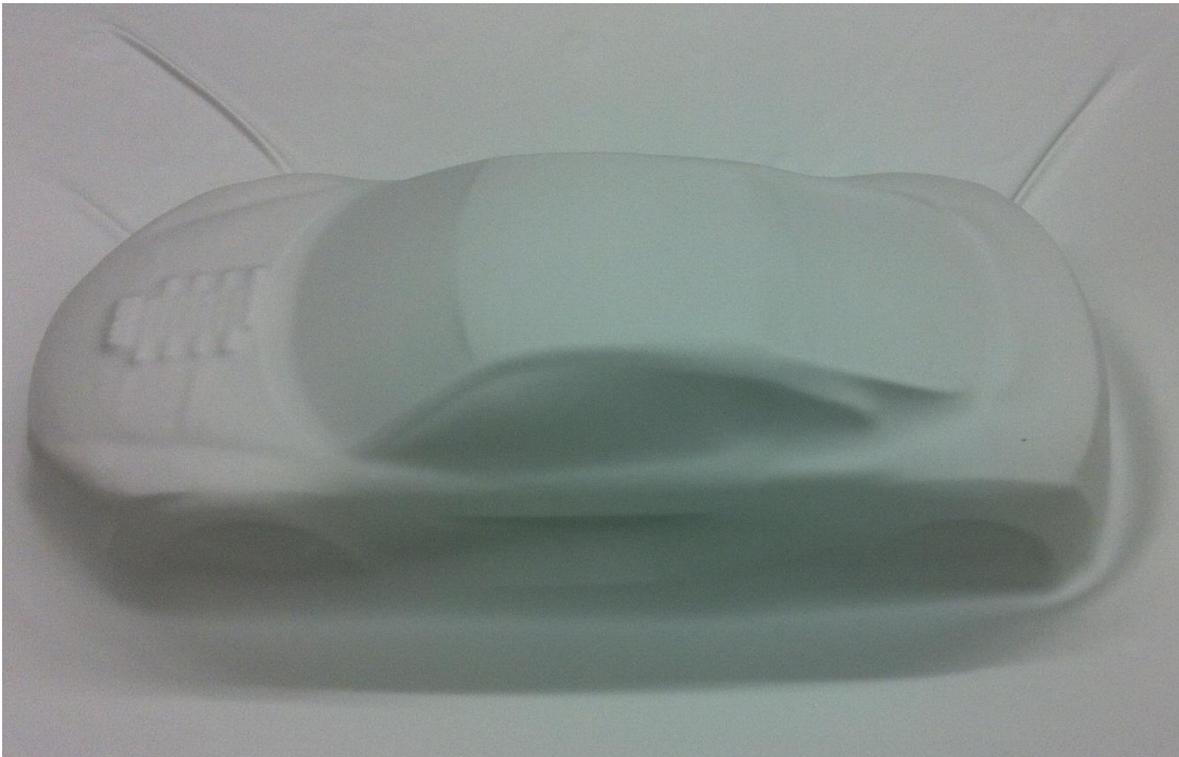


Abb. 9.11 abgeformtes Modell mit ungenügender Detailgetreue

9. Tiefziehvorgang

9.2.2 Verbesserungen an der Unterkonstruktion

Zur Lösungsfindung wurde sich die Unterkonstruktion genauer angesehen. Dabei fiel auf, dass die Vakuumpumpe der Thermoformmaschine erst in mehreren Hohlräumen der Unterkonstruktion das Vakuum erzeugen muss bevor der Bereich um das Formwerkzeug erreicht wird. Um einen besseren Überblick über die unnötig unter Vakuum gestellten Bereiche zu bekommen, wurden die Volumina dieser Bereiche Schritt für Schritt berechnet. Es handelt sich hierbei um eine ungefähre Abschätzung :

- Volumen zwischen Unterplatte (techn. Zchg. 009) und Maschinentisch

$$97\text{cm} \times 57\text{cm} \times 0,1\text{cm} \approx \underline{552\text{cm}^3}$$

- Volumen zwischen Unterplatte (techn. Zchg. 009) und Unterseite Spannrahmen

$$2 \times (57\text{cm} \times 23,5\text{cm} \times 0,2\text{cm}) \approx \underline{535\text{cm}^3}$$

- Volumen zwischen den Distanzplatten (techn. Zchg. 010)

Links & Rechts $2 \times (55\text{cm} \times 10\text{cm} \times 3,5\text{cm}) = \underline{3850\text{cm}^3}$

Mittelsteg $15\text{cm} \times 10\text{cm} \times 3,5\text{cm} = \underline{525\text{cm}^3}$

- Volumen zwischen Oberplatte (techn. Zchg. 011) und Aluminiumplatte (techn. Zchg. 012)

$$55\text{cm} \times 49\text{cm} \times 0,1\text{cm} \approx \underline{269\text{cm}^3}$$

Nach der Addition dieser Teilvolumina ergab sich ein Wert von ca. 5733cm³. Um dieses Volumen zu umgehen und das Vakuum schneller anliegen zu lassen wurde zuerst ein Langloch in der Aluminiumplatte an der Stelle gefertigt wo sich vorher die 3 Vakuumb Bohrungen befanden. Dieses hatte dieselben Abmaße wie das Langloch der Oberplatte.

Der Übergang der Oberplatte zur Aluplatte wurde mit einer Silikondichtung (Abb. 9.12) versiegelt. Im selben Verfahren wurde der Übergang der Unterplatte zum Maschinentisch an der Vakuumbohrung (Abb. 9.13) abgedichtet.



Abb. 9.12 Silikondichtung der Oberplatte



Abb. 9.13 Silikondichtung der Unterplatte

9. Tiefziehvorgang

Für den Bereich zwischen den Distanzplatten wurde ein Vakuumkanal (techn. Zeichnung 014) in Fusion 360 konstruiert und auf dem Ultimaker 2 mit den angegebenen Parametern (Tab. 9.7) ausgedruckt. Da das eingeschlossene Volumen des Vakuumkanales nicht eingespart werden kann wurde dieses,

Tab. 9.7 Druckparameter Vakuumkanal

Parameter	Wert
Material	PLA
Düsendurchmesser	0.8mm
Düsentemperatur	215°C
Betttemperatur	60°C
Druckgeschwindigkeit	50mm/sec
Schichtdicke	0.3mm

welches sich in Fusion 360 zu ungefähr 482cm^3 berechnete, von dem Zwischenergebnis abgezogen und es wurde eine effektive Ersparnis von ca. 5251cm^3 erreicht. Zur prozentualen Berechnung der Volumenersparnis wurde anschließend ein Modell (Abb. 9.14) der aufgeblähten Folie in Fusion 360 erstellt welches ungefähr der über dem Formwerkzeug (Audi R8) aufgespannten Folie entspricht. Das Volumen berechnete sich in Fusion 360 zu 7720cm^3 , Abzüglich des in Catia V5R19 berechneten Volumens des Formwerkzeuges (Audi R8) von 2804cm^3 ergab sich ein Volumen von 4916cm^3 welches addiert mit dem Volumen des Vakuumkanales von 482cm^3 zum effektiv benötigten Volumen von ca. 5398cm^3 wurde.

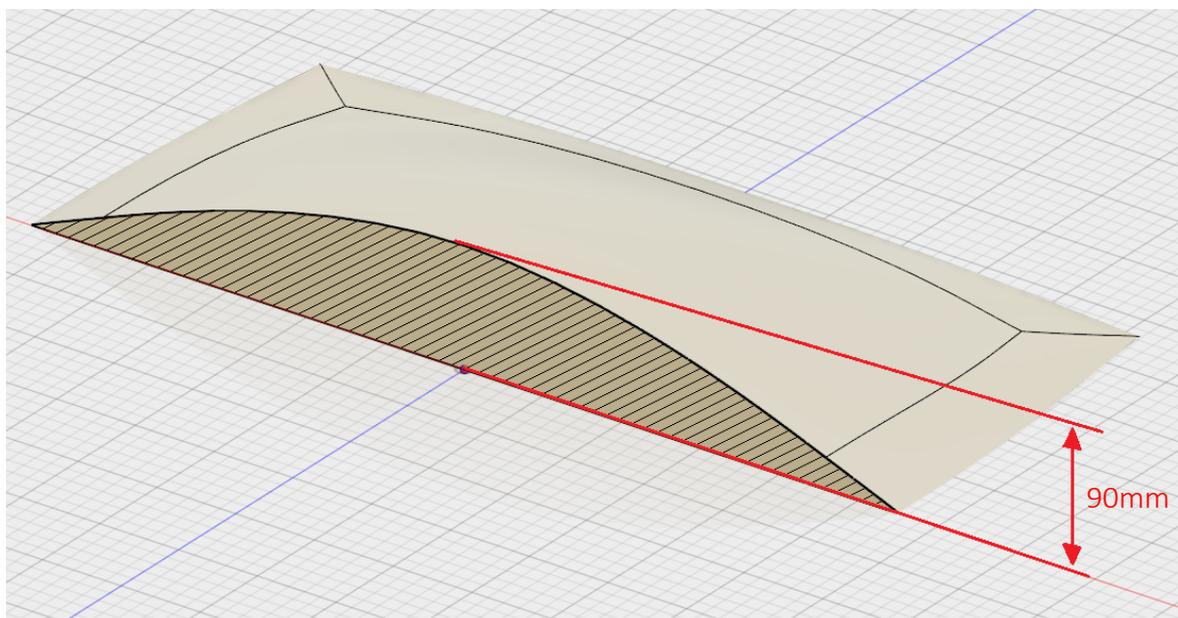


Abb. 9.14 aufgeblähte Folie

Eine Volumensparnis von ungefähr 50% wurde erreicht. Nach der Montage und Inbetriebnahme des Vakuumkanales (Abb. 9.15) und dem Thermoformprozess mit den Parametern aus Versuch 5 (Tab. 9.6) wurden optimale Ergebnisse erzielt (Abb. 9.16).



Abb. 9.15 montierter Vakuumkanal



Abb. 9.16 optimale Abformung des Audi R8

10.1 Vergleich der Formwerkzeuge

Vergleicht man die zwei Formwerkzeuge und ihre Entstehung miteinander fallen einige Unterschiede auf. Das Formwerkzeug aus Gießharz hat eine ebenmäßigere Oberfläche, welche im Einsatz mit 1mm starkem Halbzeug eine glatte Oberfläche hinterlässt (Abb. 10.1), eine höhere Festigkeit und Wärmeformbeständigkeit womit die Lebensdauer dieses Formwerkzeuges gerade im Dauereinsatz höher ist als die des im Rapid Prototyping hergestellte Formwerkzeuges.

Das im FDM Verfahren (Fused Deposition Modeling) hergestellte Formwerkzeug hat durch die einzelnen Druckschichten eine wellige Oberflächenbeschaffenheit, welche aber in der Praxis bei der Verwendung von 1mm starkem Halbzeug keinen Unterschied zu einer gegossenen Oberfläche ergibt (Abb. 10.2). Die Festigkeit und Wärmeformbeständigkeit ist geringer als die des gegossenen Formwerkzeuges womit es wohl durch die ständige Erwärmung im Dauereinsatz scheitern wird.



Abb. 10.1 Abformung Porsche 356



Abb. 10.2 Abformung Audi R8

10.2 Kosten- & Aufwandsvergleich

Um die zwei Verfahren der Herstellung objektiv miteinander zu vergleichen wurden die Parameter Kosten und Zeit gewählt. In den folgenden Tabellen wird der Vergleich vom Gießverfahren gegenüber dem Rapid Prototyping dargestellt:

Kosten Gießverfahren

Tab. 10.1 Kosten Gießverfahren

Parameter	Wert [€]
Modell Porsche 356 Maßstab 1:18	30,00
Material für den Formkasten	3,50
Silikonmasse Typ 924-1 AT zum Abformen (31,13€/Kg)	118,29
Gießharz Biresin G38 zum Ausgießen (11,87€/Kg)	17,67
Stromkosten des Ultimaker 2 für die Herstellung des HAW Emblems (0,05€/h)	0,20
Materialkosten des Ultimaker 2 für die Herstellung des HAW Emblems (44€/Kg)	1,50
2 Komponenten Polyestermetallspachtel Alu (27,60€/Kg)	5,50
weitere Materialien (Pattern Resin LS, 2 Komponenten Klebstoff, Schleifmittel)	2,00
Gesamt	178,66

Kosten Rapid Prototyping Verfahren

Tab. 10.2 Kosten Rapid Prototyping Verfahren

Parameter	Wert [€]
Stromkosten des Ultimaker 2 für den Versuch mit PLA (0,05€/h)	1,40
Materialkosten des Ultimaker 2 für den Versuch mit PLA (44€/Kg)	13,20
Stromkosten des Ultimaker 2 für die Herstellung des Formwerkzeuges (0,05€/h)	3,00
Materialkosten des Ultimaker 2 für die Herstellung des Formwerkzeuges (47€/Kg)	37,60
weitere Materialien (Pattern Resin LS, 2 Komponenten Klebstoff, Schleifmittel)	2,00
Gesamt	57,20

Die Werte des Kostenvergleiches sind auf eine Nachkommastelle gerundet und basieren auf den derzeitigen Material- & Stromkosten (Stand 20.12.2016).

10. Ergebnisse & Gegenüberstellung

Zeit Gießverfahren

Tab. 10.3 Zeit Gießverfahren

Parameter	Wert [h]
Modellvorbereitung	2,50
Formkastenherstellung	1,00
Abformverfahren	1,50
Nacharbeit der Form	1,00
Abgussverfahren	0,50
Nacharbeit des Formwerkzeuges	3,50
etwaige weitere Nacharbeiten (gegossenes HAW Emblem, entfernen von Hinterschneidungen)	3,00
Gesamt	13,00

Zeit Rapid Prototyping Verfahren

Tab. 10.4 Zeit Rapid Prototyping Verfahren

Parameter	Wert [h]
Erstellung des 3D Modelles	2,50
Erstellung des Maschinencodes aus STL Format	0,50
Vorbereitung des 3D Druckers	0,50
Nachbearbeitung des Formwerkzeuges	2,00
Gesamt	5,50

Die Werte des Zeitvergleiches sind gemessene und auf 15 min gerundete Zeiten. Die ca. 60 h Druckzeit des Vorder- & Hinterteiles vom Audi R8 (techn. Zeichnungen 006 & 007) wurden nicht in den Vergleich mitaufgenommen, da der 3D Drucker keine aktive Aufsicht benötigt und somit die Arbeitszeit des Bedieners entfällt.

10.3 Bewertung & Aussicht

Anhand des Kosten- & Aufwandsvergleiches (siehe Kap. 10.2) lässt sich erkennen, dass die Thermoformwerkzeugherstellung mittels Rapid Prototyping Verfahren gegenüber der konventionellen Herstellung im Gießverfahren um ca. 2/3 kostengünstiger ist und auch nur weniger als die Hälfte der Zeit in Anspruch nimmt. Die Ergebnisse der beiden Thermoformprozesse weisen keine auffallenden Unterschiede in der Detailgetreue oder Oberflächengüte auf. Das Formwerkzeug aus dem 3D Drucker hat sich im Thermoformprozess als funktional erwiesen und bietet, wie in Kapitel 10.2 zu erkennen, nicht zu vernachlässigende Vorteile gegenüber dem Gießverfahren. Als Herstellungsverfahren für Thermoformwerkzeuge im Dauereinsatz ist das Rapid Prototyping Verfahren noch nicht geeignet, da die benötigten Festigkeiten und Wärmeformbeständigkeiten derzeit noch von keinem im FDM (Fused Deposition Modeling) Verfahren verwendeten Material erreicht werden.

Die Verwendung von 3D Druckern mit Dual Extrusion (mehrere Druckdüsen) und wasserlöslichem PVA (Polyvinylalkohol) Filament als Stützmaterial wird die Herstellung von komplizierten Geometrien mit Überhängen in naher Zukunft vereinfachen und dabei eine gleichmäßig gute Oberflächenqualität bewahren. So wird sich dieses Verfahren einen Platz zwischen vielen Konkurrenzverfahren im Bereich Modellherstellung sichern. Das Gießverfahren wird sich mit seinen Vorteilen im Bereich des Thermoformprozesses nicht vertreiben lassen, jedoch erweitert das Rapid Prototyping Verfahren die Möglichkeiten.

Biresin® G38 Wärmebeständiges Gießharz, gefüllt

Anwendungsbereiche

- Herstellung von wärmebeständigen Formen, wie z. B. Vakuumtiefziehformen
- Gießen wärmebeständiger Hinterfüllungen von Gießereiformplatten
- Gießen wärmebeständiger Formkörper

Produktvorteile

- gutes Fließverhalten und gute Entlüftung
- gießbar bis 40 mm Schichtstärke
- ohne Wärmebehandlung entformbar
- geringe Schwundwerte
- gute mechanische Eigenschaften, auch bei höheren Temperaturen
- weitere Verbesserung der mechanischen Eigenschaften durch zusätzliche Temperung
- ausgehärtete Teile mechanisch bearbeitbar

Beschreibung

- Basis 2K-EP-System
- Komponente A **Biresin® G38**, Epoxidharz, grau
- Komponente B **Biresin® G38**, Amin, bernsteinfarben

Verarbeitungsdaten		Komponente A	Komponente B
Einzelkomponenten		Biresin® G38	Biresin® G38
Viskosität, 23°C	mPa.s	~ 40.000	~ 200
Dichte	g/ml	1,86	0,96
Mischungsverhältnis A : B	in Gewichtsteilen	100	7
		Mischung	
Mischviskosität, 23°C	mPa.s	~ 11.000	
Topfzeit, 500 g, RT	min	120	
Entformzeit, RT, ohne Temperung	h	16 - 24	

Physikalische Daten (ca. Werte)

Biresin® G38 (A) mit Komponente B			Biresin® G38	
Härtungsbedingungen	Zeit		14 d	4 h + 2 h
	Temperatur		RT	60°C 100°C
Dichte	ISO 1183	g/cm³	1,8	
Shore-Härte	ISO 868	-	D 88	D 90
Biegefestigkeit	ISO 178	MPa	51	68
Druckfestigkeit	ISO 604	MPa	94	112
Schlagzähigkeit	ISO 179	kJ/m²	5	8
Wärmeformbeständigkeit	ISO 75B	°C	54	> 130
Linearer Schwund	intern	%	0,08	
Lin. Wärmeausdehnungskoeff. α_T	DIN 53 752	K ⁻¹		35-40 x 10 ⁻⁶

Verpackung

Einzelbinde	Biresin® G38 (A) Biresin® G38 (B)	10 kg; 5 kg netto 6 x 0,7 kg netto im Karton
-------------	--	---

Verarbeitung

- Die Material-, Verarbeitungs- und Formentemperatur soll zwischen 18 und 25°C liegen.
- Vor der Verarbeitung muß die Komponente A sorgfältig homogenisiert werden.
- Es ist besonders darauf zu achten, dass eine gründliche, möglichst blasenfreie Mischung der Komponenten erfolgt.
- Danach sind die Mischungen, an der tiefsten Stelle beginnend, mit geeigneter Gießtechnik in die sorgfältig mit Trennmitteln (z. B. Sika® Trennmittel 810 oder 815 Quick bzw. Sika® Trennwachs 818, nähere Angaben siehe jeweilige Produktdatenblätter) vorbehandelten Formen zu gießen.
- Zur Reinigung der ausgehärteten Formstoffe von Wachsresten sollten nur möglichst umweltfreundliche Wachslöser, wie z. B. Sika® Reinigungsmittel 5, verwendet werden. Bei der Anwendung von anderen Reinigern ist zuvor deren Verträglichkeit mit dem Harz zu testen.

Lagerung

- In temperierten Räumen (18 - 25°C) und ungeöffneten Originalgebinden beträgt die Lagerfähigkeit für Biresin® G38 Harz (A) mindestens 18 Monate und für Biresin® G38 Härter (B) mindestens 24 Monate.
- Durch ungünstige Lagerbedingungen kristallisierte Komponenten sind durch vorsichtiges, möglichst kurzzeitiges Erwärmen auf max. 70°C zu entkristallisieren und vor der Verarbeitung wieder auf Raumtemperatur abzukühlen.
- Angebrochene Gebinde sind stets sofort wieder feuchtigkeitsdicht zu verschließen und baldmöglichst zu verarbeiten.

Gefahrenhinweise

Informationen zum sicheren Umgang von chemischen Produkten, sowie die wesentlichen physikalischen, sicherheitstechnischen, toxikologischen und ökologischen Daten sind den aktuellen Sicherheitsdatenblättern zu entnehmen. Die einschlägigen Vorschriften, wie z.B. die Gefahrstoffverordnung sind zu beachten. Weitere Hinweise und Infodatenblätter zur Produktsicherheit und Entsorgung finden Sie im Internet unter www.sika.de. Hautkontakt mit Epoxidharzen kann zu Allergien führen! Beim Umgang mit Epoxidharzen ist der direkte Hautkontakt unbedingt zu vermeiden! Zur Auswahl einer geeigneten Schutzausrüstung stellen wir Ihnen unter www.sika.de unsere Infodatenblätter 7510 „Allgemeine Hinweise zum Arbeitsschutz“ und 7511 „Allgemeine Hinweise zum Tragen von Schutzhandschuhen“ zur Verfügung.

Entsorgung

Nicht ausgehärtete Produkte sind in der Regel besonders überwachungsbedürftige Abfälle und müssen ordnungsgemäß entsorgt werden. Ausgehärtetes Material kann nach Absprache mit der jeweils zuständigen Behörde oder Deponie als Haus- / Gewerbeabfall entsorgt werden.

Auskunftspflichtig für die ordnungsgemäße Entsorgung sind die örtlichen Behörden, wie z.B. Landratsamt, Umweltschutzamt oder Gewerbeaufsichtsamts.

Datenbasis

Alle technischen Daten, Maße und Angaben in diesem Datenblatt beruhen auf Labortests. Tatsächlich gemessene Daten können in der Praxis aufgrund von Umständen außerhalb unseres Einflussbereiches abweichen.

Rechtshinweise

Die vorstehenden Angaben, insbesondere die Vorschläge für Verarbeitung und Verwendung unserer Produkte, beruhen auf unseren Kenntnissen und Erfahrungen im Normalfall, vorausgesetzt die Produkte wurden sachgerecht gelagert und angewandt. Wegen der unterschiedlichen Materialien, Untergründen und abweichenden Arbeitsbedingungen kann eine Gewährleistung eines Arbeitsergebnisses oder eine Haftung, aus welchem Rechtsverhältnis auch immer, weder aus diesen Hinweisen, noch aus einer mündlichen Beratung begründet werden, es sei denn, dass uns insoweit Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit zur Last fällt. Hierbei hat der Anwender nachzuweisen, dass er schriftlich alle Kenntnisse, die zur sachgemäßen und erfolgversprechenden Beurteilung durch Sika erforderlich sind, Sika rechtzeitig und vollständig übermittelt hat. Der Anwender hat die Produkte auf ihre Eignung für den vorgesehenen Anwendungszweck zu prüfen. Änderungen der Produktspezifikationen bleiben vorbehalten. Schutzrechte Dritter sind zu beachten. Im übrigen gelten unsere jeweiligen Verkaufs- und Lieferbedingungen. Es gilt das jeweils neueste Produktdatenblatt, das von uns angefordert werden sollte.

Weitere Informationen:

Sika Deutschland GmbH

Niederlassung Bad Urach

Stuttgarter Str. 139

D - 72574 Bad Urach

Deutschland

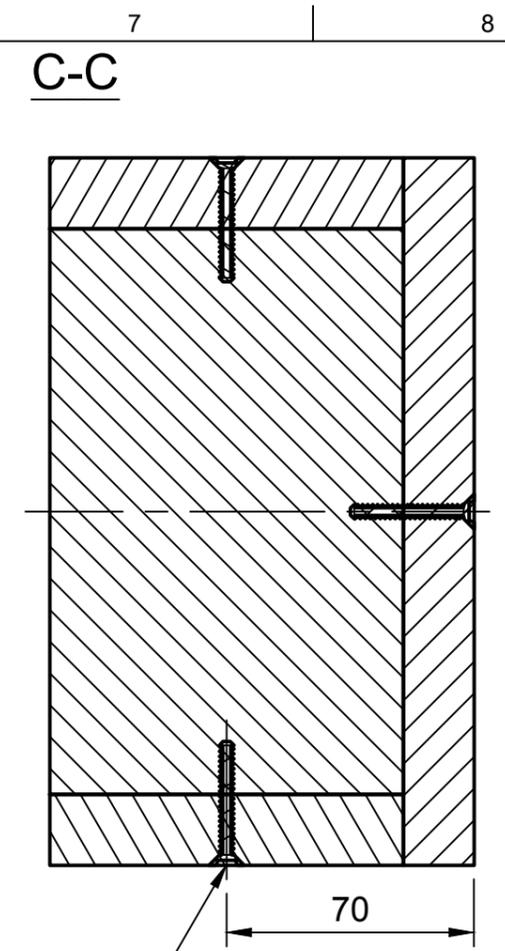
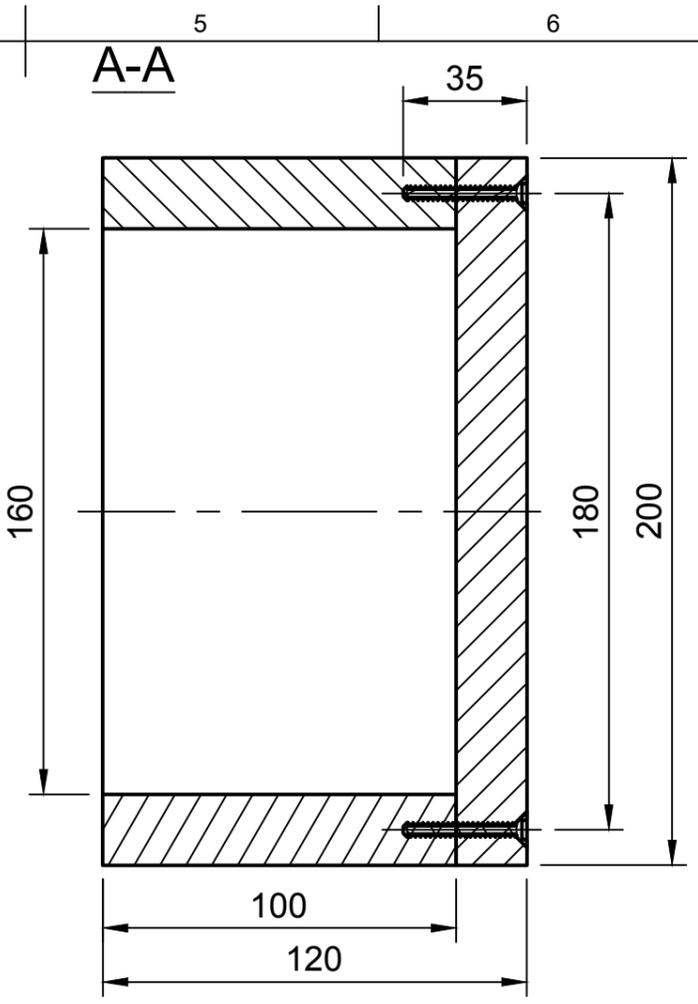
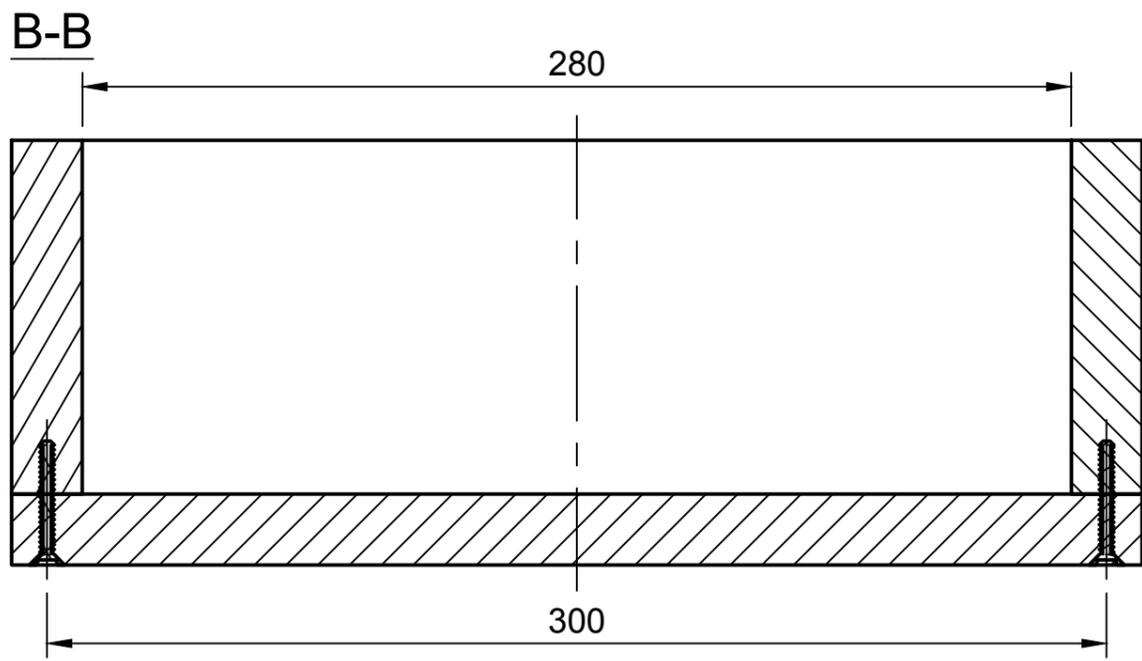
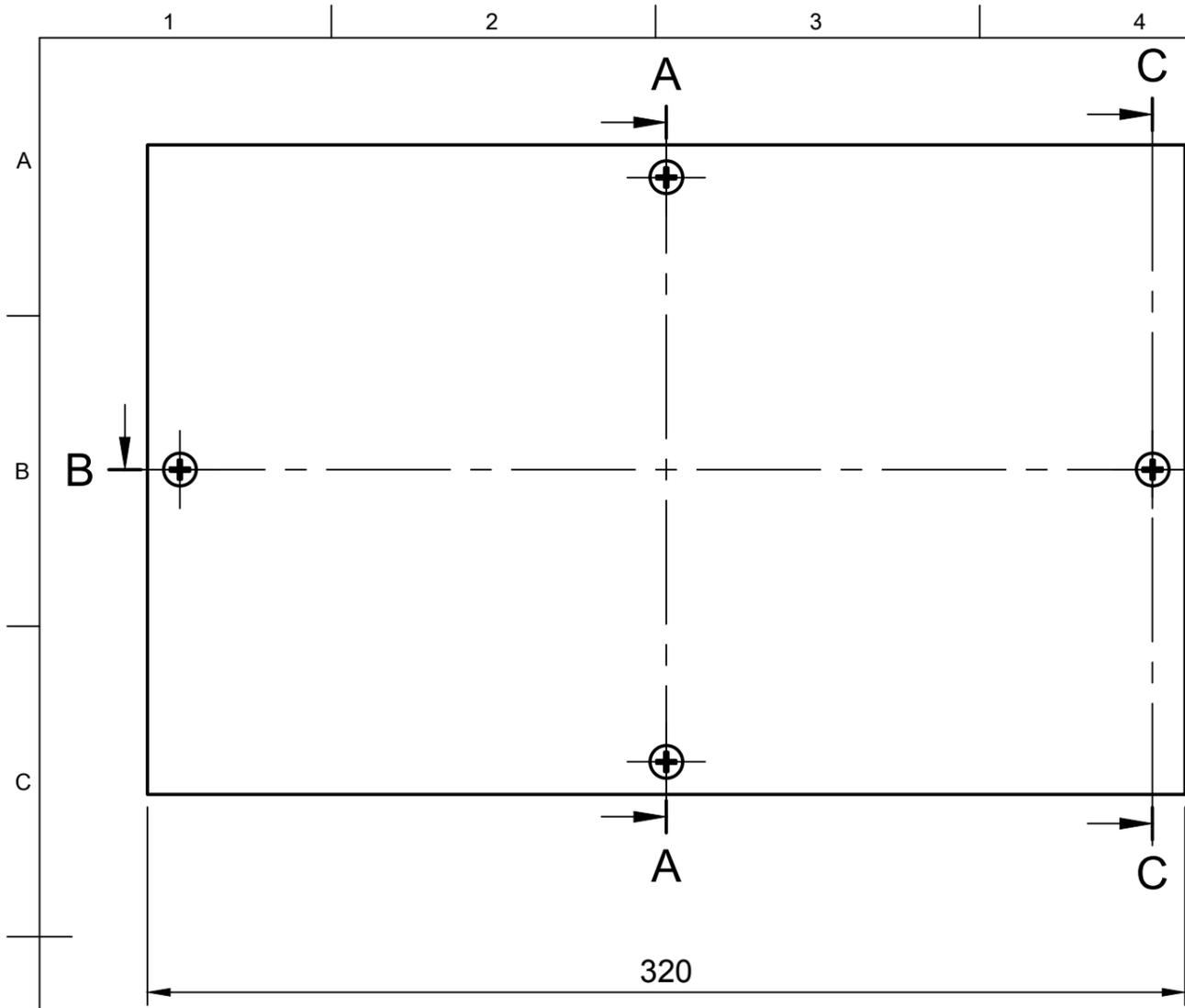
Tel: +49 (0) 7125 940 492

Fax: +49 (0) 7125 940 401

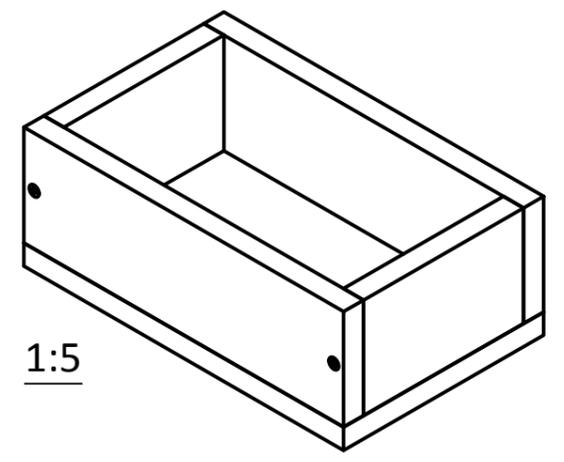
Email: tooling@de.sika.com

Internet: www.sika.de

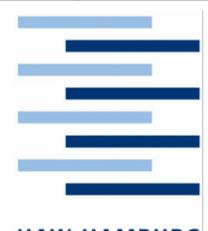


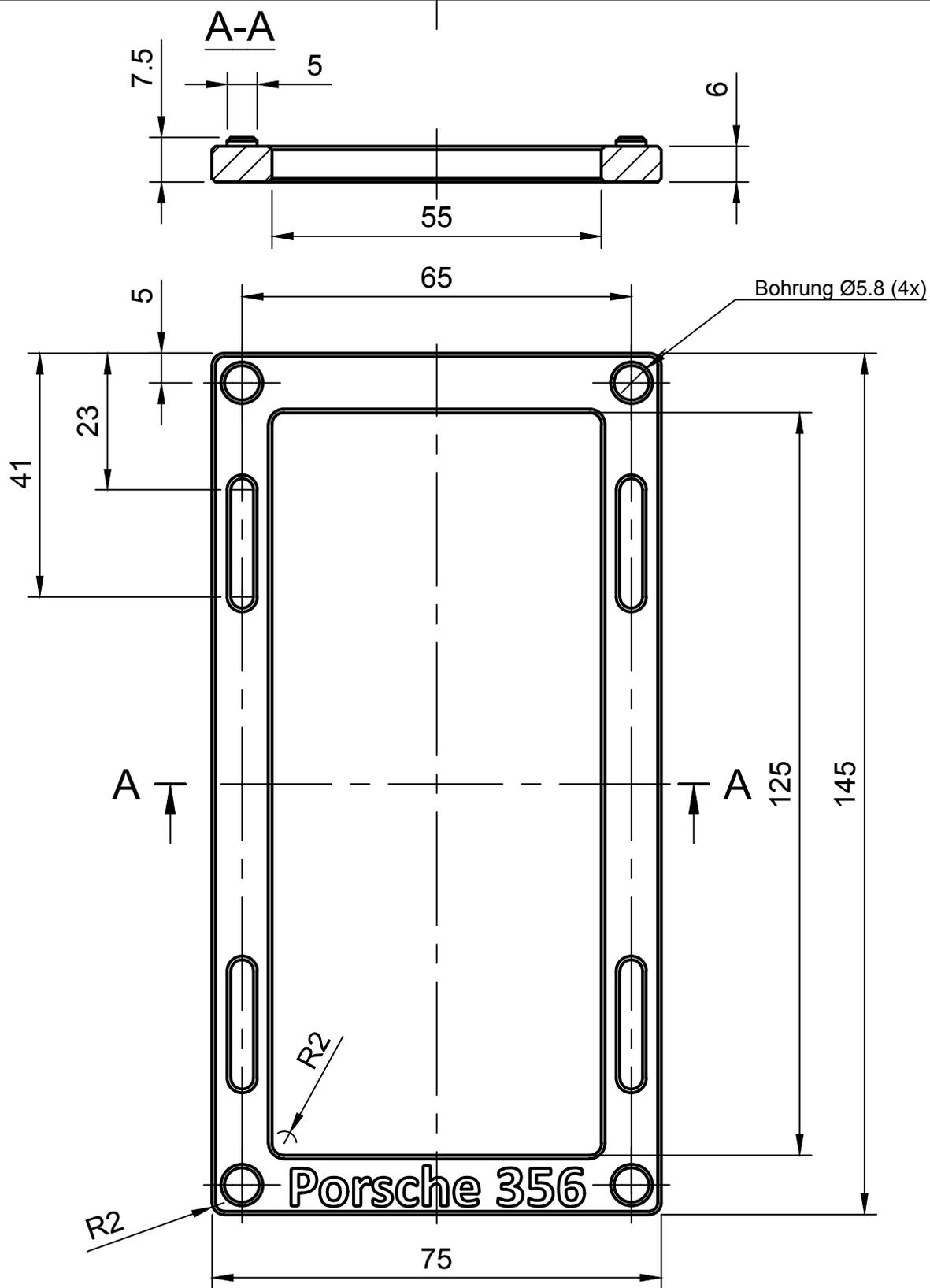


Ø4x35 Senkkopfschraube (8x)
(selbstschneidend)



Maßstab 1:2 Allgmeintoleranzen DIN ISO 2768 - m Alle nicht bemaßten Fasen 0.5x45°

Dept.	Technical reference	Created by Maximilian Krug	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Einzelteilzeichnung Formkasten	DWG No. 001	
Rev.	Date of issue 16.01.2017	Sheet 1/1		

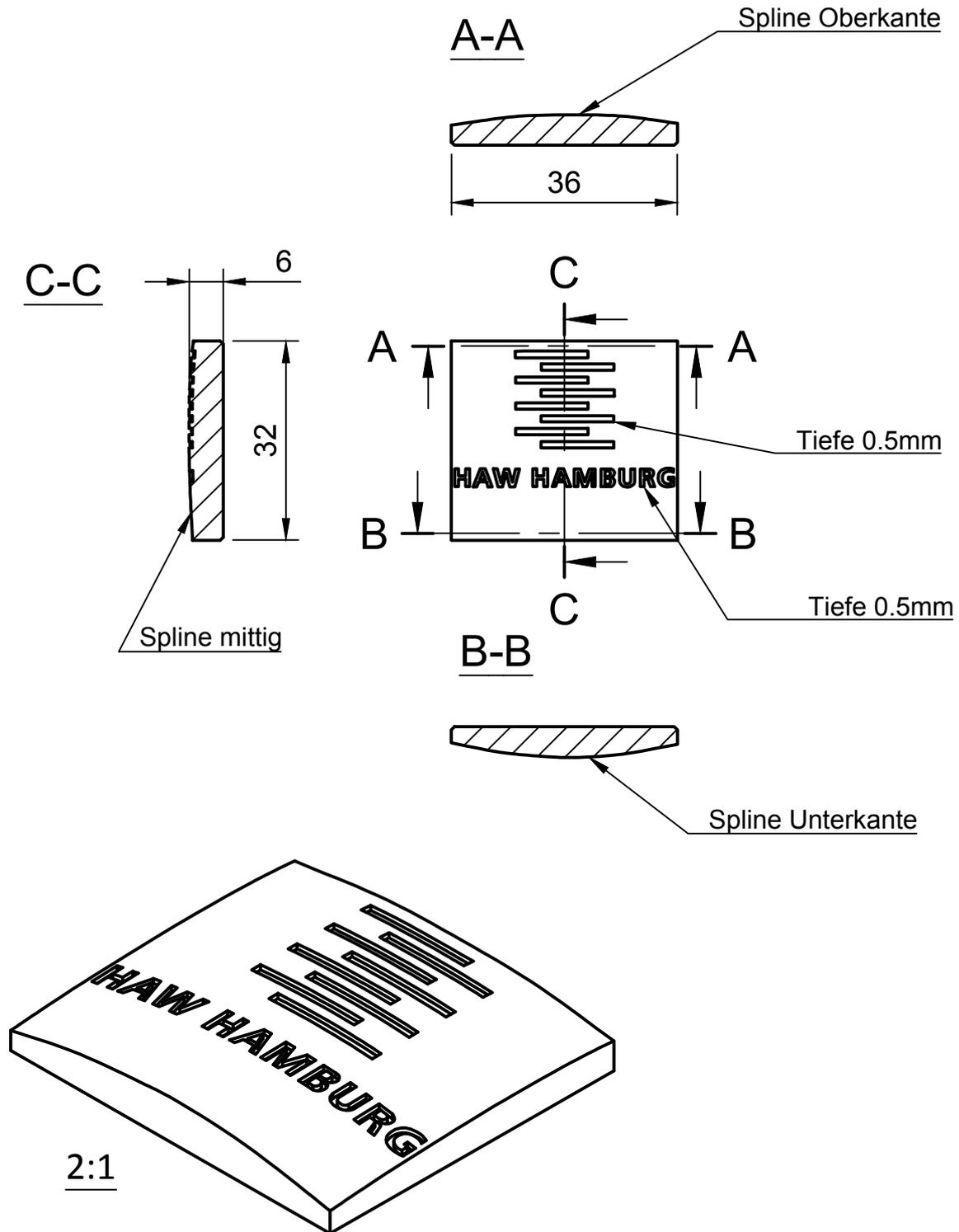


Maßstab 1:1

Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m

Alle nicht bemaßten Fasen 1x45°

Dept.	Technical reference	Created by Maximilian Krug	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Einzelteilzeichnung Gewindeeinsatzschablone Porsche 356	DWG No. 002	
		Rev.	Date of issue 03.01.2017	Sheet 1/1

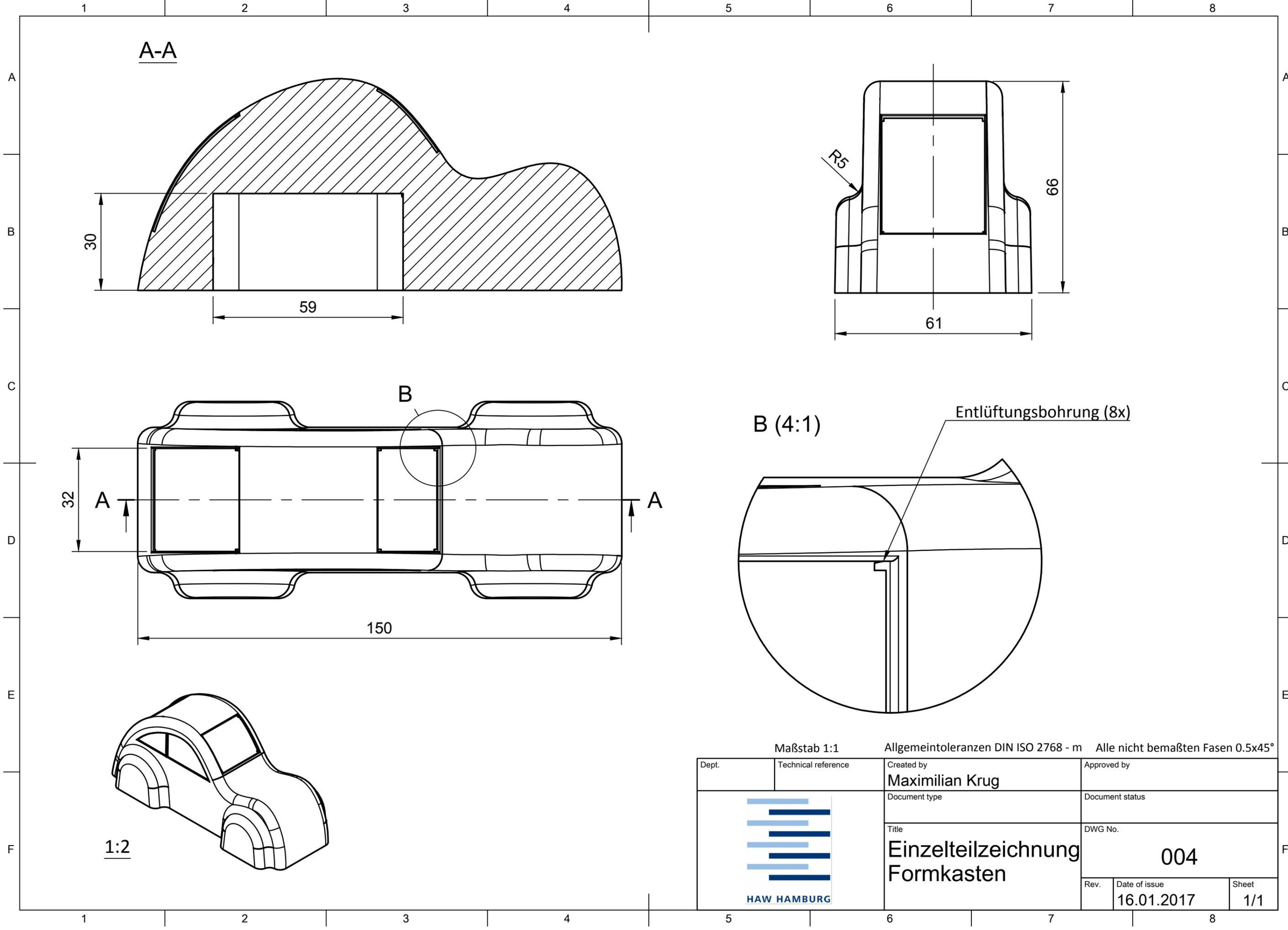


Maßstab 1:1

Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m

Alle nicht bemaßten Fasen 0.5x45°

Dept.	Technical reference	Created by Maximilian Krug	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Einzelteilzeichnung HAW Logo	DWG No. 003	
		Rev.	Date of issue 06.01.2017	Sheet 1/1



A-A

30

59

R5

66

61

B

32

A

A

150

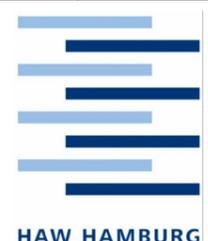
B (4:1)

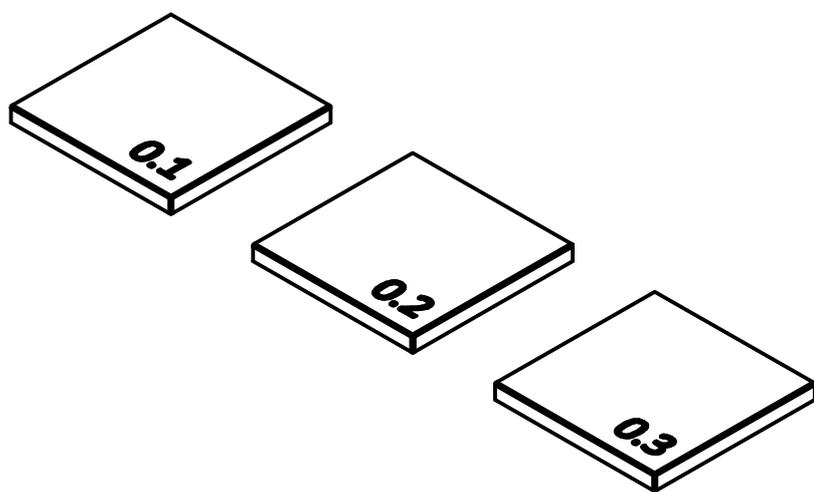
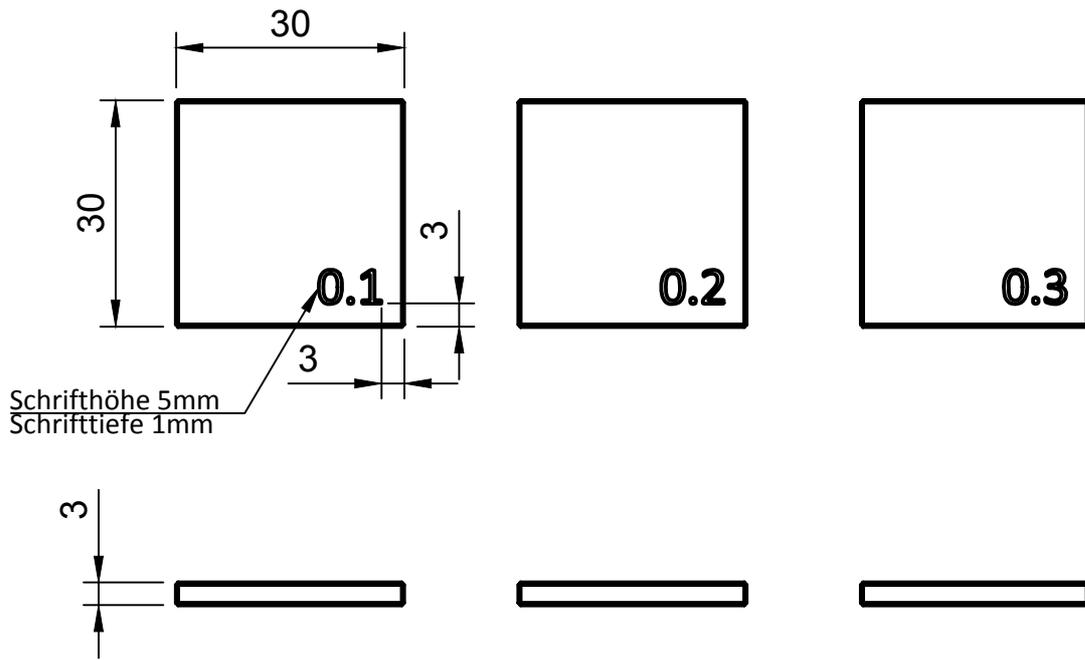
Entlüftungsbohrung (8x)

1:2

Maßstab 1:1

Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m Alle nicht bemaßten Fasen 0.5x45°

Dept.	Technical reference	Created by Maximilian Krug	Approved by
		Document type	Document status
		Title Einzelteilzeichnung Formkasten	DWG No. 004
		Rev.	Date of issue 16.01.2017



Die Maße der 3 Plättchen sind identisch

Maßstab 1:1

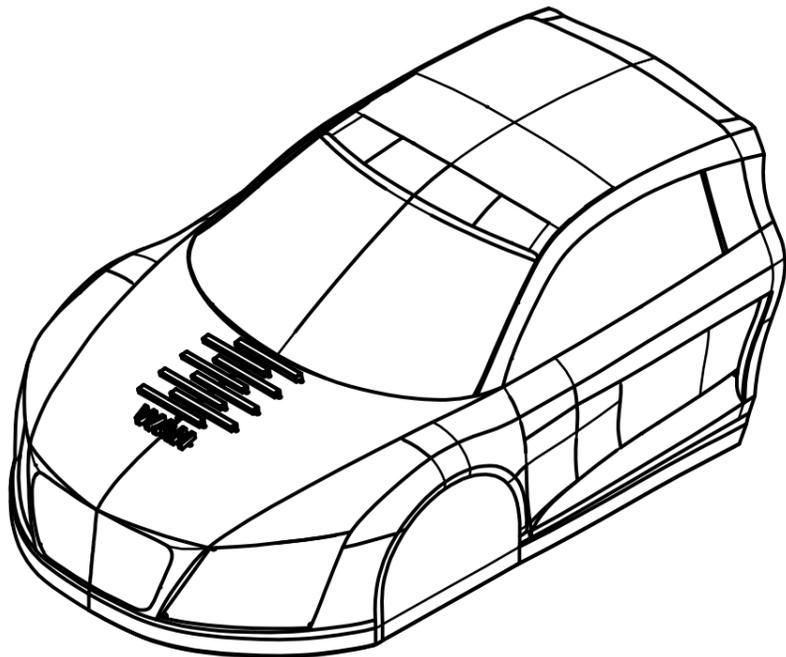
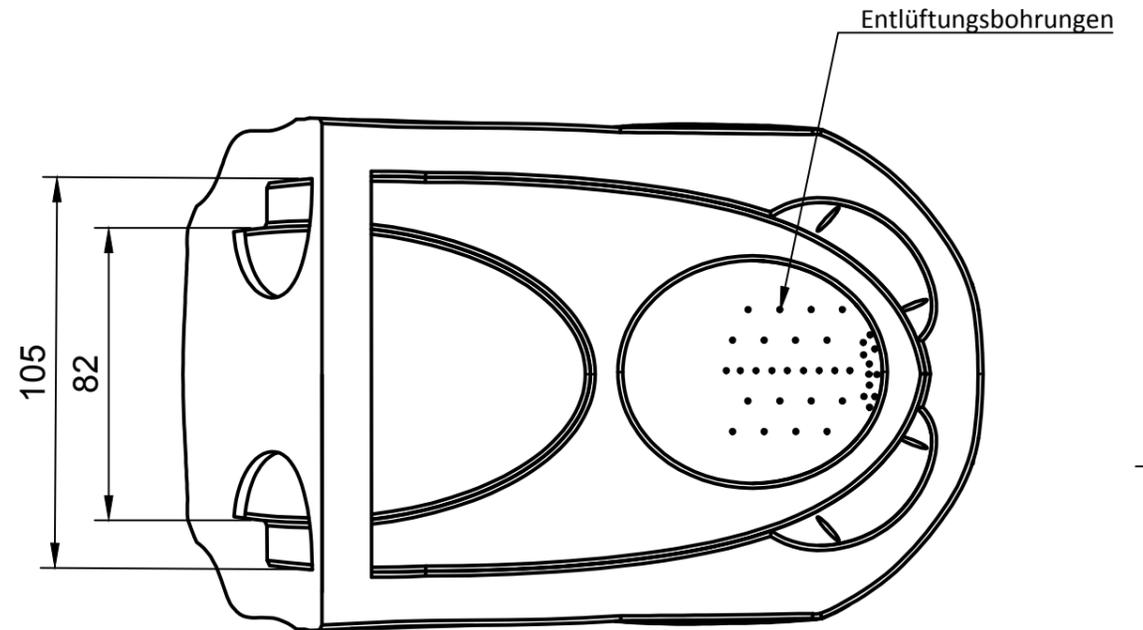
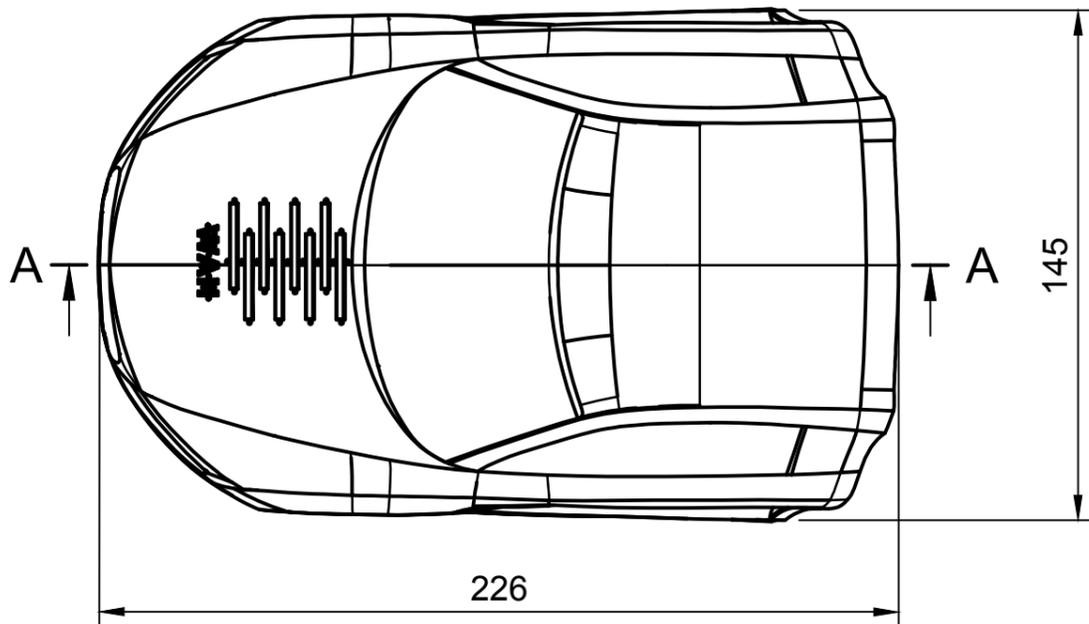
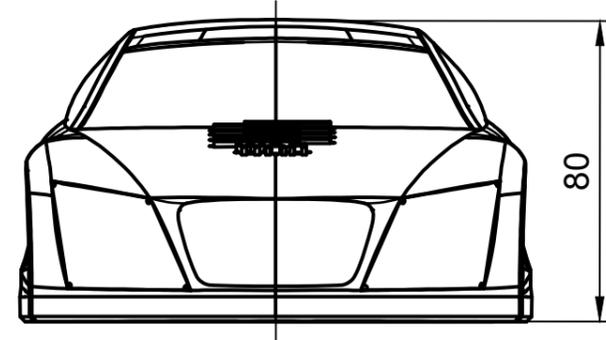
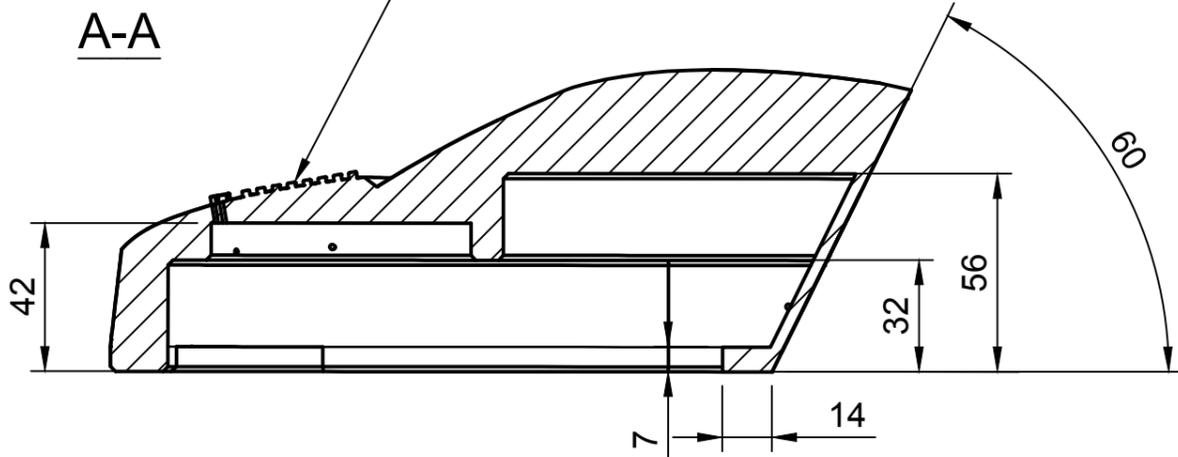
Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m

Alle nicht bemaßten Fasen 0.5x45°

Dept.	Technical reference	Created by Maximilian Krug	Approved by	
 HAW HAMBURG		Document type	Document status	
		Einzelteilzeichnung Plättchen	DWG No. 005	
			Rev.	Date of issue 17.01.2017

HAW Logo

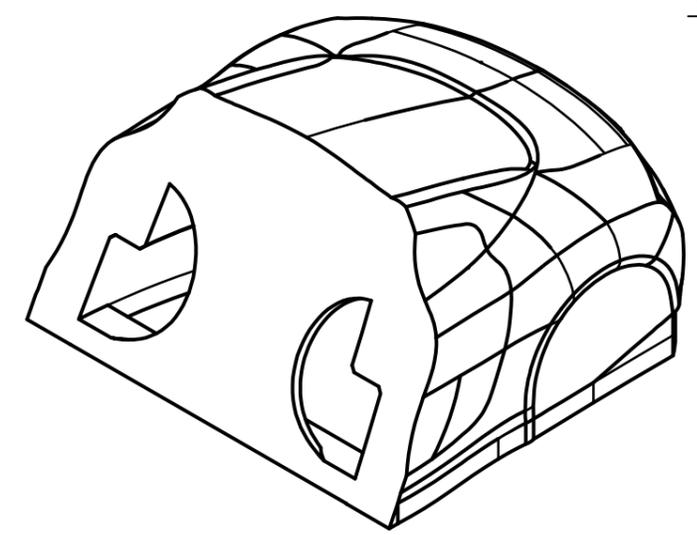
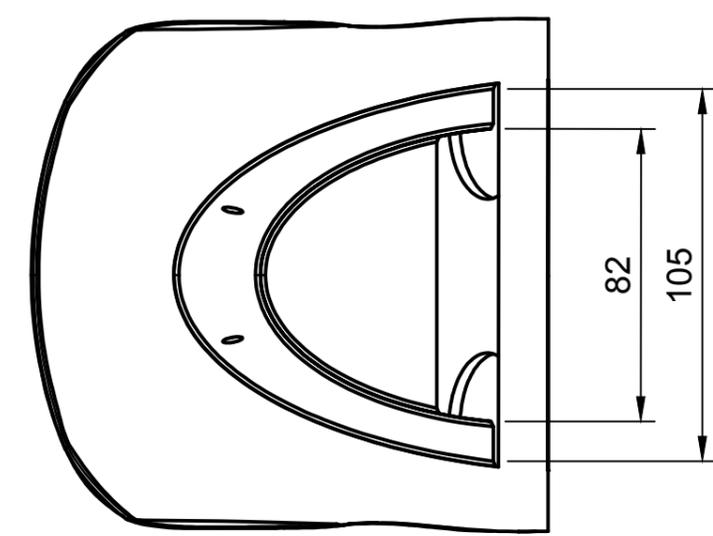
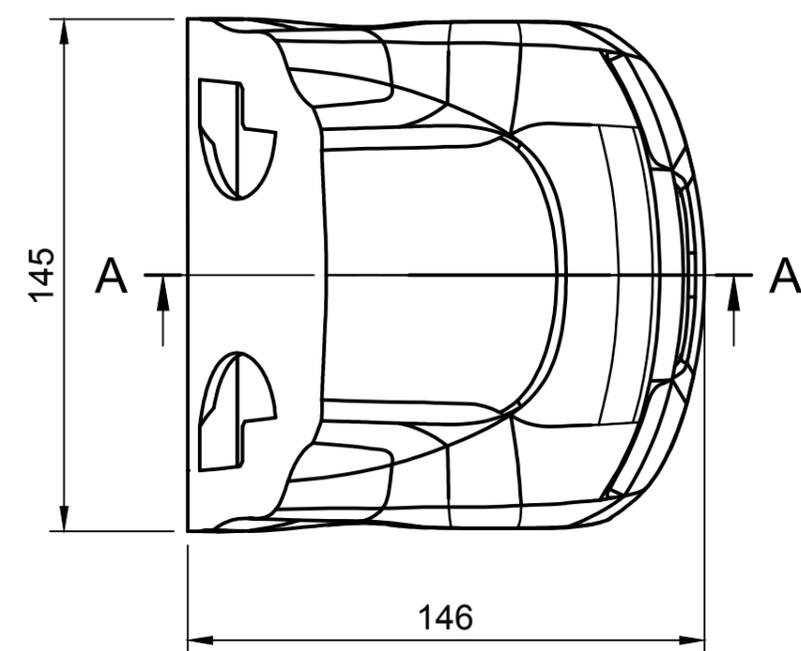
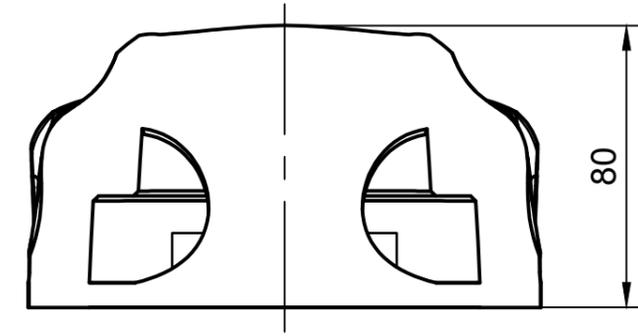
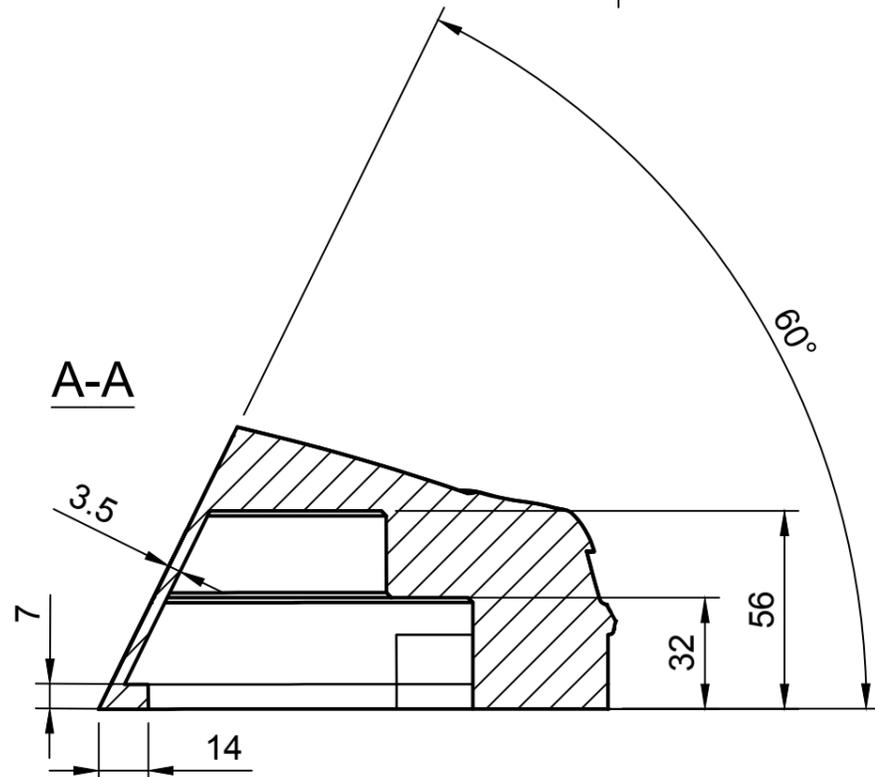
A-A



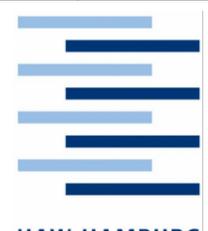
Maßstab 1:2

Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m Alle nicht bemaßten Fasen 0.5x45°

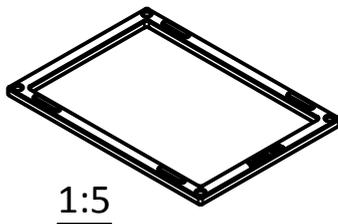
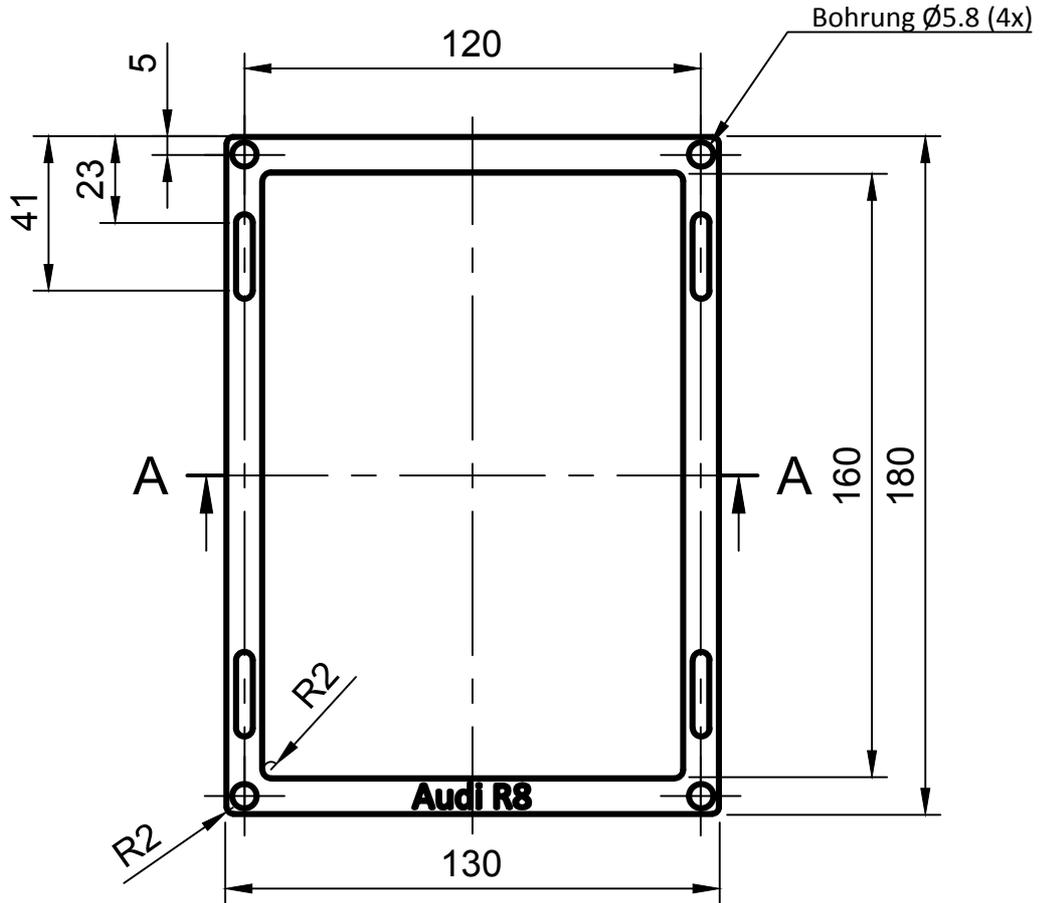
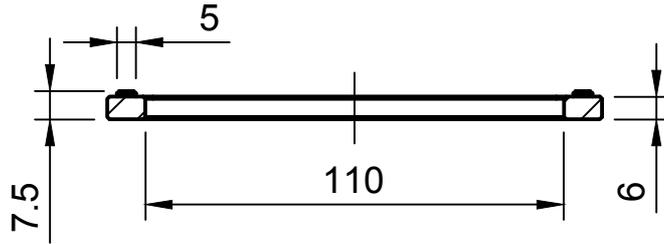
Dept.	Technical reference	Created by Maximilian Krug	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Einzelteilzeichnung Audi R8 Vorderteil	DWG No. 006	
		Rev.	Date of issue 17.01.2017	Sheet 1/1



Maßstab 1:2 Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m Alle nicht bemaßten Fasen 0.5x45°

Dept.	Technical reference	Created by Maximilian Krug	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Einzelteilzeichnung Audi R8 Hinterteil	DWG No. 007	
Rev.	Date of issue 17.01.2017	Sheet 1/1		

A-A



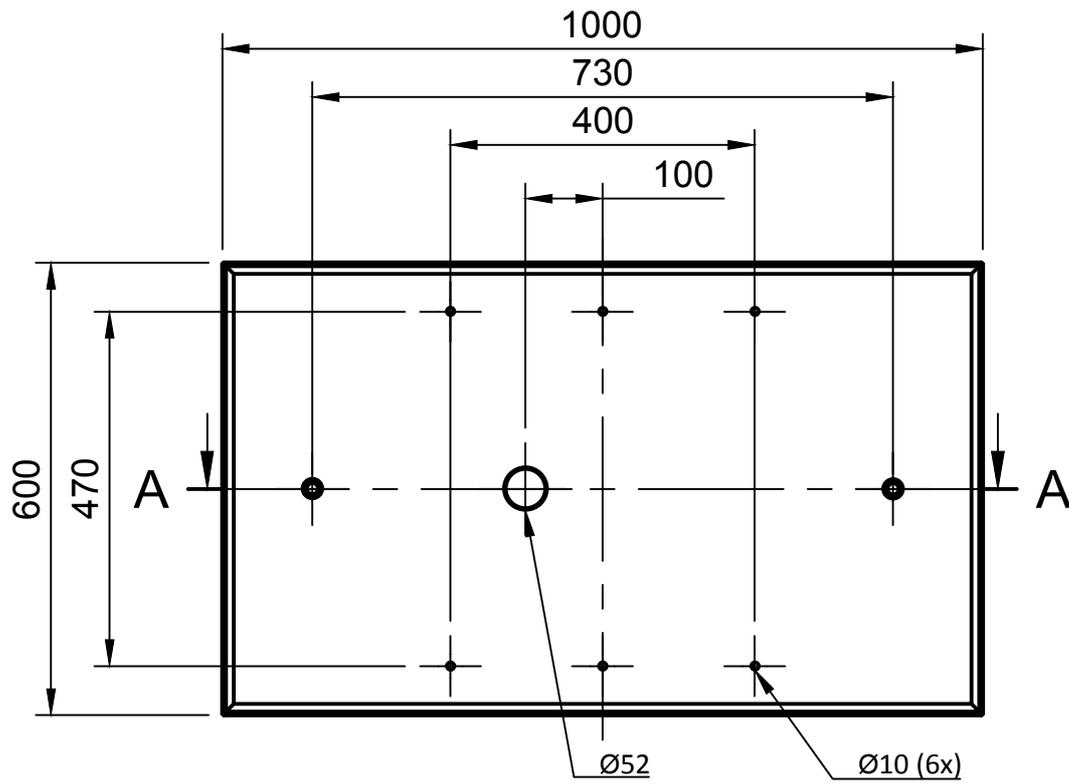
1:5

Maßstab 1:2

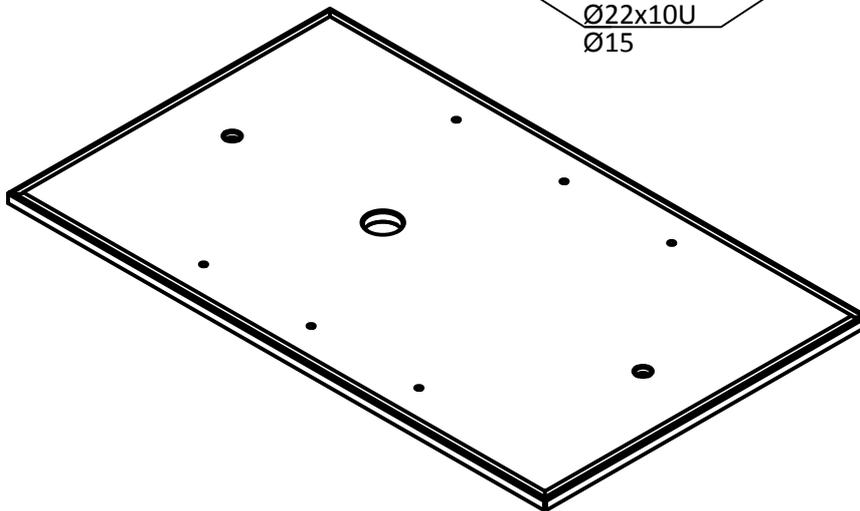
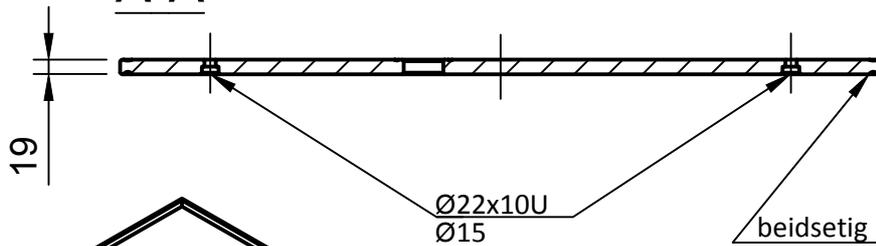
Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m

Alle nicht bemaßten Fasen 1x45°

Dept.	Technical reference	Created by Maximilian Krug	Approved by	
 HAW HAMBURG	Document type	Document status		
	Title Einzelteilzeichnung Gewindeeinsatzschablone Audi R8	DWG No. 008		
	Rev.	Date of issue 06.01.2017	Sheet 1/1	



A-A

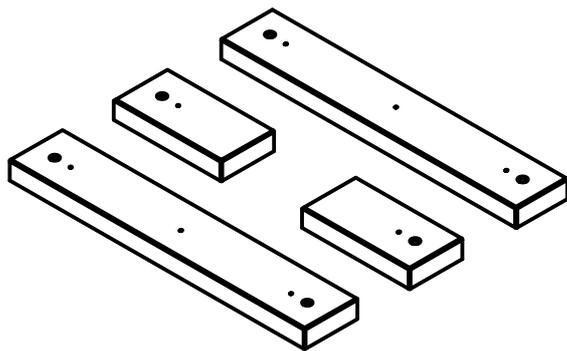
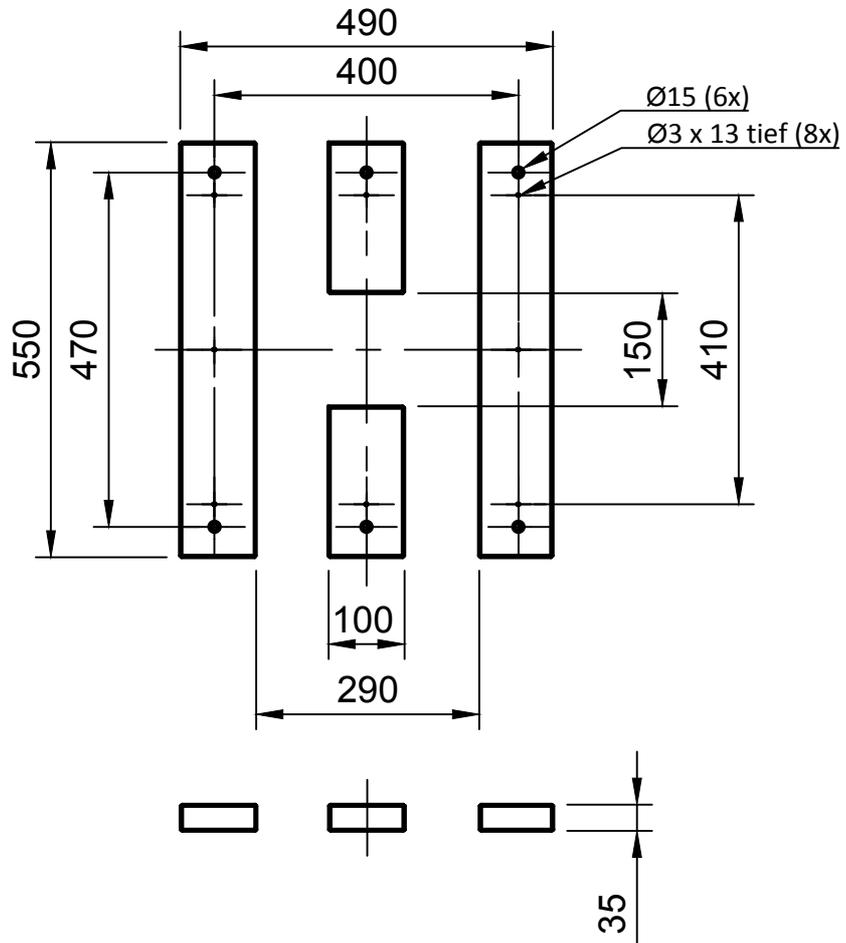


Maßstab 1:10

Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m

Alle nicht bemaßten Fasen 1x45°

Dept.	Technical reference	Created by Maximilian Krug	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Einzelteilzeichnung Unterplatte	DWG No. 009	
		Rev.	Date of issue 19.01.2017	Sheet 1/1

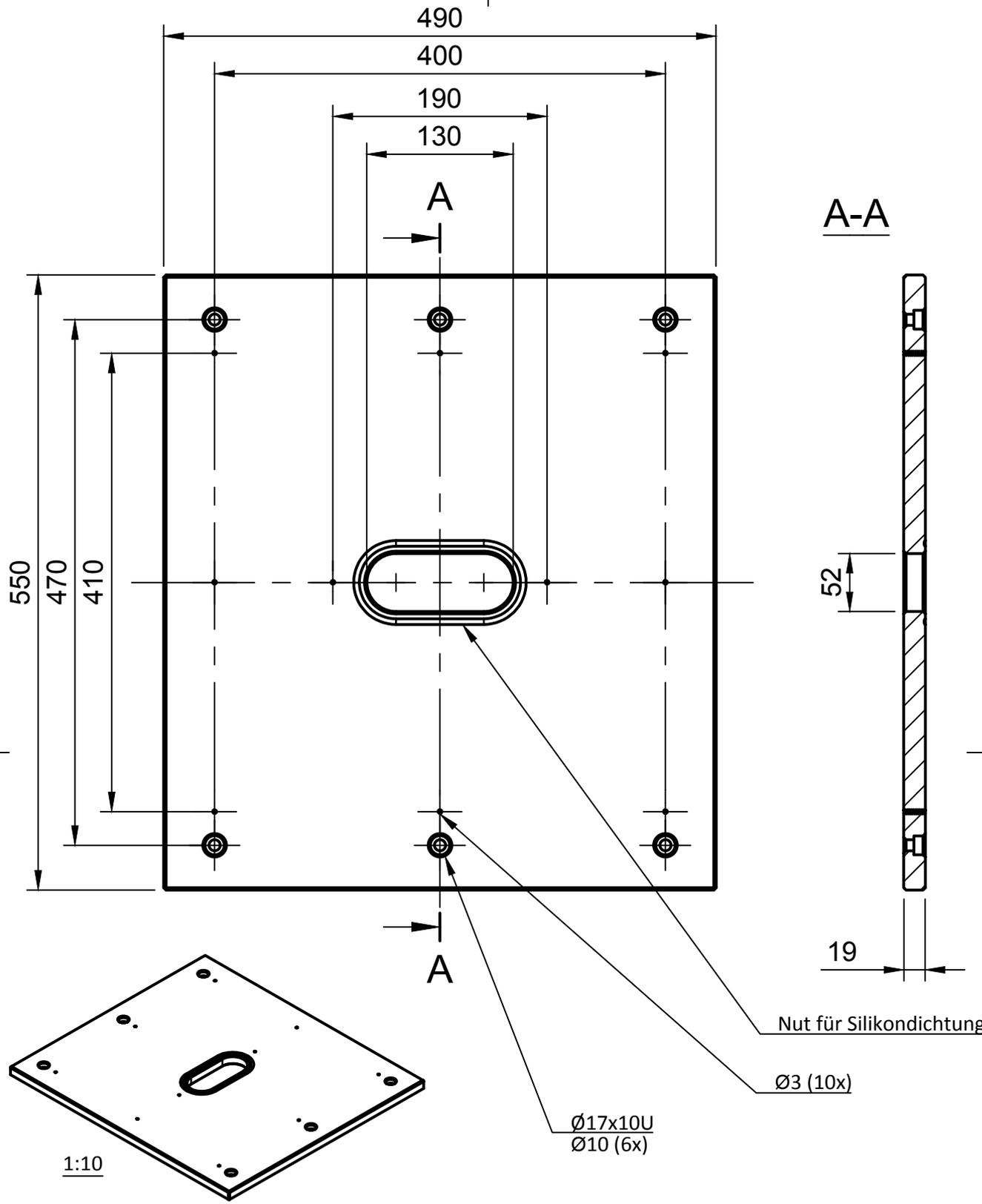


Maßstab 1:10

Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m

Alle nicht bemaßten Fasen 1x45°

Dept.	Technical reference	Created by Maximilian Krug	Approved by	
 HAW HAMBURG		Document type	Document status	
		Title Einzelteilzeichnung Distanzplatten		DWG No. 010
		Rev.	Date of issue 19.01.2017	Sheet 1/1

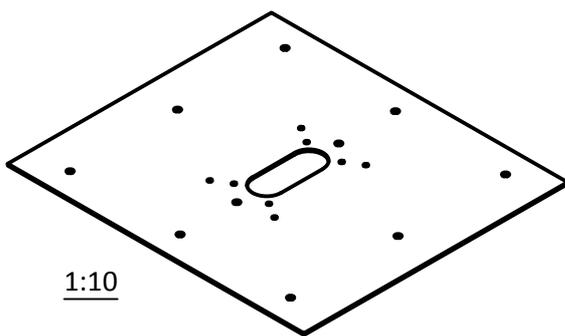
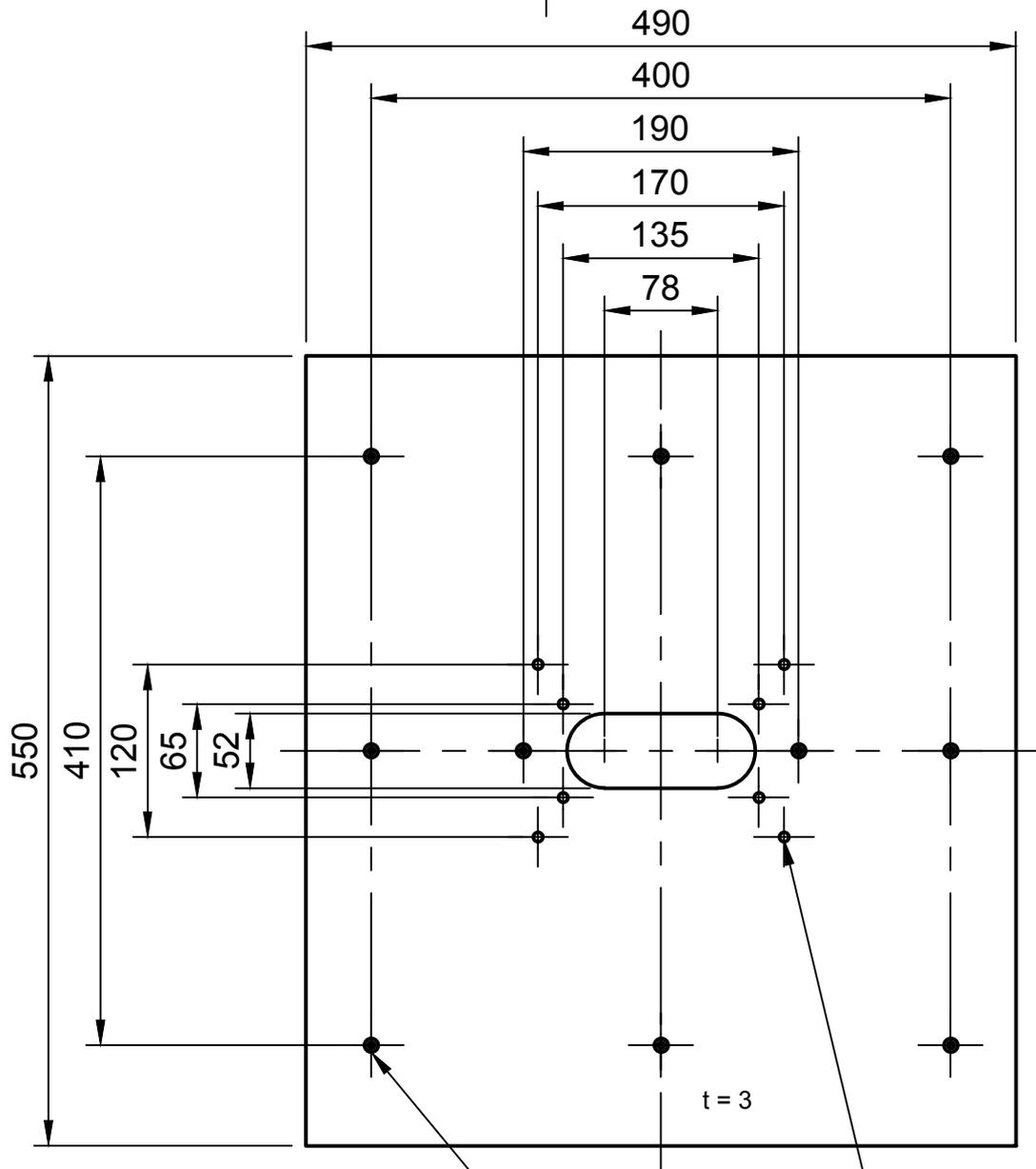


Maßstab 1:5

Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m

Alle nicht bemaßten Fasen 1x45°

Dept.	Technical reference	Created by Maximilian Krug	Approved by	
 HAW HAMBURG		Document type	Document status	
		Title Einzelteilzeichnung Oberplatte	DWG No. 011	
		Rev.	Date of issue 19.01.2017	Sheet 1/1



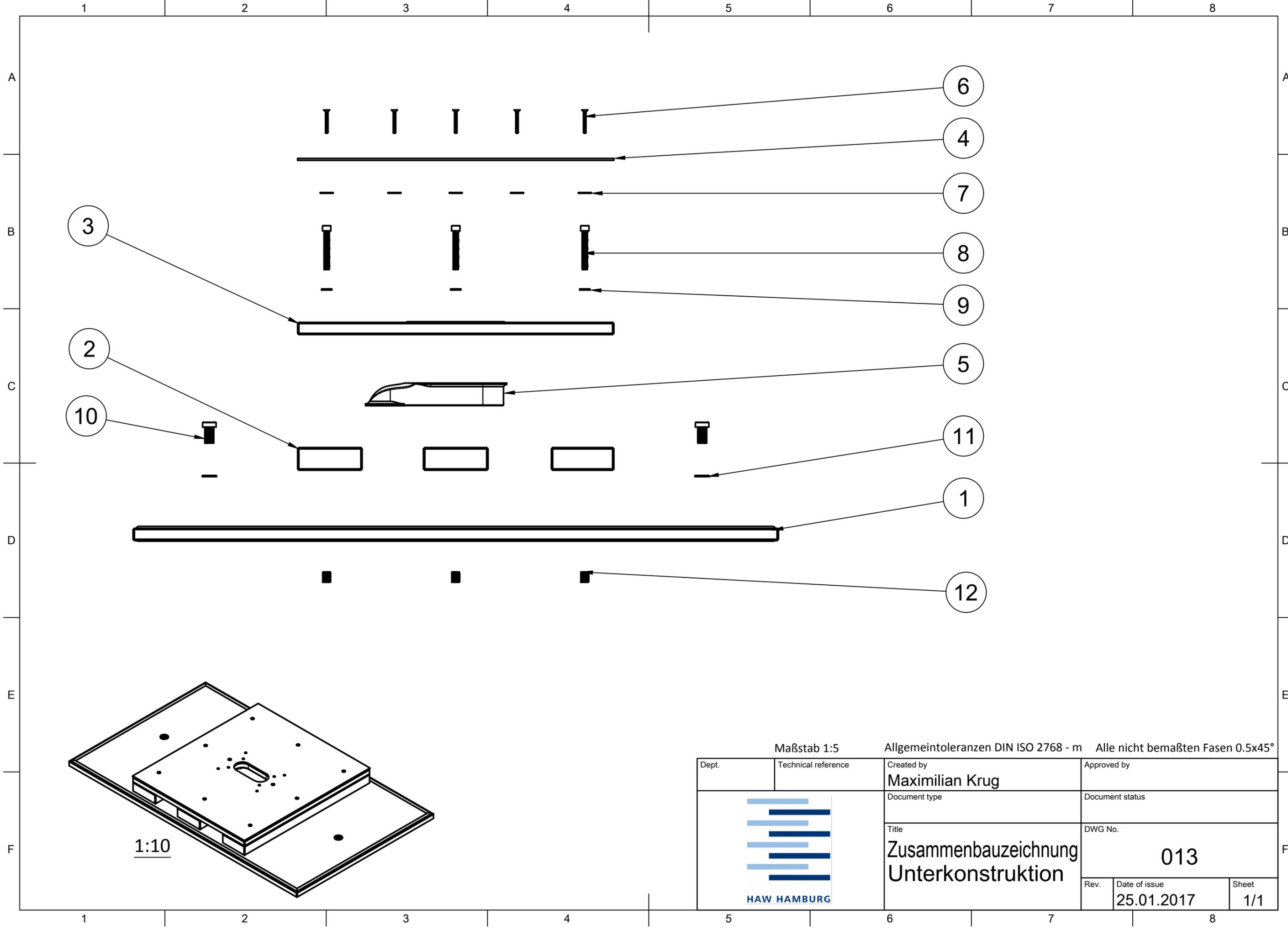
1:10

Maßstab 1:5

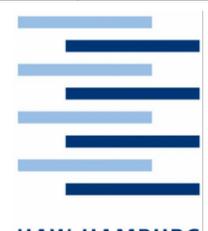
Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m

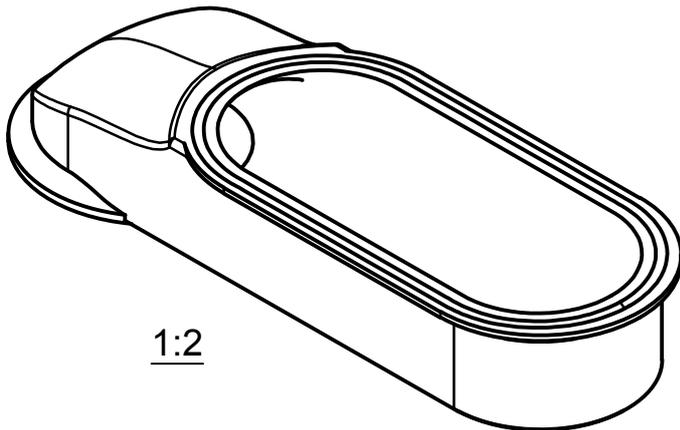
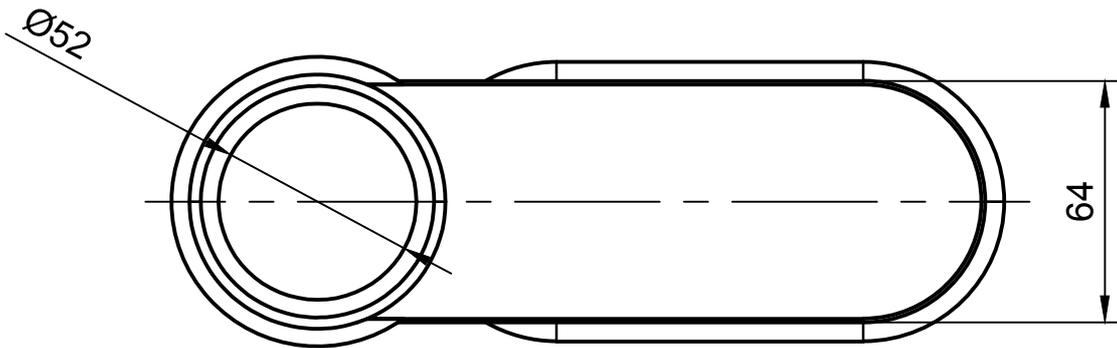
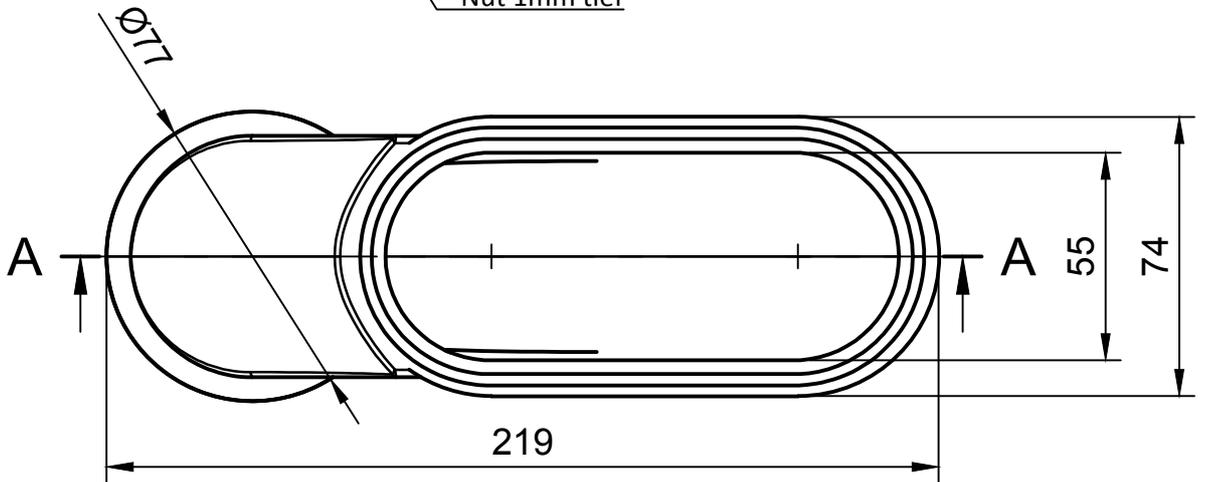
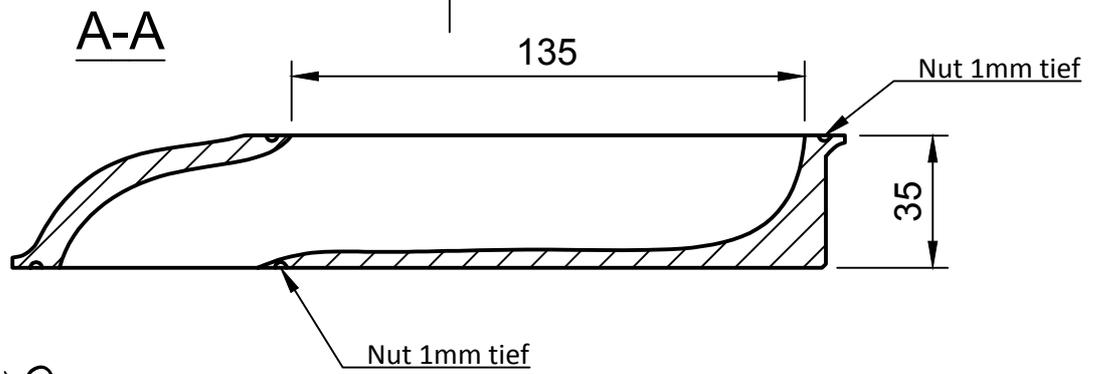
Alle nicht bemaßten Fasen 0.5x45°

Dept.	Technical reference	Created by Maximilian Krug	Approved by	
 HAW HAMBURG		Document type	Document status	
		Title Einzelteilzeichnung Aluminiumplatte	DWG No. 012	
		Rev.	Date of issue 24.01.2017	Sheet 1/1



Maßstab 1:5 Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m Alle nicht bemaßten Fasen 0.5x45°

Dept.	Technical reference	Created by Maximilian Krug	Approved by	
		Document type	Document status	
		Title Zusammenbauzeichnung Unterkonstruktion	DWG No. 013	
	Rev.	Date of issue 25.01.2017	Sheet 1/1	



Maßstab 1:1

Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m Alle nicht bemaßten Fasen 0.5x45°

Dept.	Technical reference	Created by Maximilian Krug	Approved by		
 HAW HAMBURG		Document type	Document status		
		Title Einzelteilzeichnung Vakuumkanal	DWG No. 014		
			Rev.	Date of issue 17.01.2017	Sheet 1/1

Literaturverzeichnis

- [1] ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. KG, http://www.illig.de/uploads/tx_illig/KFG37_5-2010_DE_web.pdf (06.12.2016).
 - [2] HiTherma AG, <https://hitherma.wordpress.com/2012/09/10/vor-und-nachteile-des-thermoformens/> (06.12.2016).
 - [3] Fachgruppe Thermoplastische Platten des Industrieverbandes Halbzeuge und Konsumprodukte aus Kunststoff e.V., <http://www.pro-kunststoff.de/wp-content/uploads/2013/06/tm-spritzgiesen-versus-tiefziehen.pdf> (06.12.2016).
 - [4] Jörg Schuster, Illig Maschinenbau GmbH & Co. KG, <https://www.xing.com/communities/posts/thermoformen-vs-spritzgiessen-konkurrenz-oder-ergaenzung-1002967155> (06.12.2016).
 - [5] Emmanuel Boxus Processing Development Engineer bei Sabic Innovative Plastics, Bergen op Zoom/Niederlande, <http://industrieanzeiger.industrie.de/technik/fertigung/thermoplaste-schmiegen-sich-an/> (06.12.2016).
 - [6] ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. KG, <http://www.illig.de/de/maschinen/prodcat/plattenform-maschinen/prod/plattenformmaschine-ua-100g/tab/3/> (07.12.2016).
 - [7] Elstein-Werk M. Steinmetz GmbH & Co. KG, <http://www.elstein.com/de/elstein-produkte/flaechenstrahler/hts-serie/beschreibung/> (07.12.2016).
 - [8] ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. KG, <http://www.illig.de/de/maschinen/prodcat/skin-und-blisterpackmaschinen/prod/kleinformgeraet-kfg-37/> (08.12.2016).
 - [9] ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. KG, <http://www.illig.de/de/maschinen/prodcat/skin-und-blisterpackmaschinen/prod/kleinformgeraet-kfg-37/tab/3/> (08.12.2016).
 - [10] Original Betriebsanleitung KFG 37 Ausgabe: DE/12.06-2 für Maschine Nr.: 001_1417 Kap. 1 Seite 1 (08.12.2016).
 - [11] Original Betriebsanleitung KFG 37 Ausgabe: DE/12.06-2 für Maschine Nr.: 001_1417 Kap. 2 Seite 1 (08.12.2016).
 - [12] Original Betriebsanleitung KFG 37 Ausgabe: DE/12.06-2 für Maschine Nr.: 001_1417 Kap. 3 Seite 1 (08.12.2016).
-

- [13] Georg Abts, Kunststoff-Wissen für Einsteiger, Carl Hanser Verlag, 04/2014; S. 106-107, <https://www.kunststoffe.de/themen/basics/standardthermoplaste/polypropylen-pp/artikel/polypropylen-pp-644901> (06.12.2016).
 - [14] Georg Abts, Kunststoff-Wissen für Einsteiger, Carl Hanser Verlag, 04/2014; S. 111-112, <https://www.kunststoffe.de/themen/basics/standardthermoplaste/polystyrol-ps/artikel/polystyrol-ps-645042> (06.12.2016).
 - [15] Kern GmbH, http://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/polystyrol-ps?n=2101_1 (06.12.2016).
 - [16] Erwin Baur, Tim A. Osswald, Natalie Rudolph, Hansjürgen Saechtling 10/2013, Saechtling Kunststoff Taschenbuch, <https://www.kunststoffe.de/themen/basics/standardthermoplaste/polystyrol-ps/artikel/styrol-copolymere-abs-asa-819987.html> (06.12.2016).
 - [17] Chemie.de, <http://www.chemie.de/lexikon/Polylactid.html> (06.12.2016).
 - [18] ColorFabb, <http://colorfabb.com/ngen-red> (06.12.2016).
 - [19] Eastman, http://ws.eastman.com/ProductCatalogApps/PageControllers/ProductDatasheet_PC.aspx?Product=71104597&sCategoryName=Generic (06.12.2016).
 - [20] OKS Spezierschmierstoffe GmbH, <https://www.oks-germany.com/ecomaXL/index.php?url=de/produkte/wartungsprodukte/> (29.11.2016).
 - [21] ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. KG, http://www.illig.de/uploads/tx_illig/KFG37_5-2010_DE_web.pdf (07.12.2016).
 - [22] ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. KG, <http://www.illig.de/de/maschinen/prodcat/plattenform-maschinen/prod/plattenformmaschine-ua-100g/tab/3/> (07.12.2016).
 - [23] Prof. Dr. Oskar Nuyken, Dr.-Ing. Heidi Samarian, Dr. Torsten Rathmann, Chemgaroo, http://www.chemgapedia.de/vsengine/vlu/vsc/de/ch/9/mac/werkstoff_polystyren/eigenschaften/thermisch_schmelze.vlu/Page/vsc/de/ch/9/mac/werkstoff_polystyren/eigenschaften/thermisch/form/bestaendigkeit.vscml.html (07.12.2016).
 - [24] Georg Abts, Kunststoff-Wissen für Einsteiger, Carl Hanser Verlag, 04/2014; S. 111-112, <https://www.kunststoffe.de/themen/basics/standardthermoplaste/polystyrol-ps/artikel/polystyrol-ps-645042> (07.12.2016).
 - [25] Peter Schwarzmann, Thermoformen in der Praxis, 3. überarbeitete und erweiterte Auflage. 05/2016, Seite 7 (06.12.2016).
-

- [26] HM-Kunststofftechnik GmbH, <http://www.hm-kunststofftechnik.de/kunststoffteile/kunststoff-formteile/tiefziehtechnik.html> (06.12.2016).
 - [27] Multident, <http://www.multident.de/GC-Pattern-Resin-LS> (14.12.2016).
 - [28] Bacuplast Faserverbundtechnik GmbH, https://www.bacuplast-shop.de/epages/61604045.sf/de_DE/?ObjectPath=/Shops/61604045/Products/%22SK924-1/VN924-1-02%22 (29.11.2016).
 - [29] Mitutoyo Deutschland GmbH, http://dl.mitutoyo.eu/HE/eBook/de_de/index.html?page=180 (14.12.2016).
 - [30] BAUHAUS E-Business GmbH & Co. KG, <https://www.bauhaus.info/zuschnittplatten/spanplatte-/p/22200363> (15.12.2016).
 - [31] BAUHAUS E-Business GmbH & Co. KG, <https://www.bauhaus.info/silikon/pci-silikon-silcoferm-s-/p/13896369> (15.12.2016).
 - [32] Silicone Encapsulants Product Sheet Revision No5, https://www.acc-silicones.de/_assets/pdfs/applicationsheets/application%20de/acc%20silicone%20encapsulants%20product%20de.pdf (29.11.2016).
 - [33] Walter Hellerich, Guenther Harsch, Erwin Baur, Werkstoff-Führer Kunststoffe 10/2010, <https://www.kunststoffe.de/themen/basics/reaktionsharze/ungesaettigtepolyesterharze-up/artikel/ungesaettigte-polyesterharze-up-645345> (30.11.2016).
 - [34] Altropol, <http://www.neukapol.de/lexikon/polyurethan-harze.html> (30.11.2016).
 - [35] Walter Hellerich, Guenther Harsch, Erwin Baur, Werkstoff-Führer Kunststoffe 10/2010, <https://www.kunststoffe.de/themen/basics/reaktionsharze/epoxidharze-ep/artikel/epoxidharze-ep-645106> (30.11.2016).
 - [36] Sika Deutschland GmbH, http://deu.sika.com/de/tooling-and-composites-redirect/tooling_composites/Dokumentendownload_Tooling/document_download/PDB-Biresin-G.html (30.11.2016).
 - [37] MOTIP DUPLI GmbH, <http://www.motipdupli.com/de/INT/produkte/presto/spachtelprodukte/ipg-1095/tm-1095.html> (01.12.2016).
 - [38] Henkel AG & Co. KGaA, <http://www.pattex.de/do-it-yourself-mit-pattex-klebstoffe-produkte-new/pattex-klebstoffe/epoxykleber/stabilit-express.html> (01.12.2016).
 - [39] MOTIP DUPLI GmbH, <http://www.motipdupli.com/de/produkte/presto/spachtelprodukte/ipg-1094.html> (01.12.2016).
-

- [40] GrabCad by Stratasis, <https://grabcad.com/library/audi-r8-surfacing-1> (08.12.2016).
- [41] Tesa SE, <http://www.tesa.com/consumer/tesa-masking-tape-precision-out-door.html> (14.12.2016).
- [42] Ultimaker B.V., <https://ultimaker.com/en/resources/19510-how-to-apply-atomic-method> (14.12.2016).



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 selbstständig 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: Krug

Vorname: Maximilian Rolf Georg-Günther

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

Thermoformwerkzeugherstellung im Gießverfahren vs. Rapid Prototyping

ohne fremde Hilfe selbstständig 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

Datum

Unterschrift im Original