



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

## **Bachelorarbeit**

Dennis Soebagio

# **Optimierung der Wanddicke eines thermogeformten PS-Behälters**

*Fakultät Technik und Informatik  
Department Maschinenbau und Produktion*

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

**Dennis Soebagio**

**Optimierung der Wanddicke eines  
thermogeformten PS-Behälters**

Bachelorarbeit 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 Schäfer

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Niels Eiben

Abgabedatum: 28.02.2018

# **Zusammenfassung**

## **Name des Studierenden**

Dennis Soebagio

## **Thema der Bachelorthesis**

Optimierung der Wanddicke eines thermogeformten PS-Behälters

## **Stichworte**

Thermoformen, Simulation, Polystyrol

## **Kurzzusammenfassung**

Diese Arbeit umfasst die Dokumentation der Simulationsprogramm T-SIM von Simpatec. Ein Thermoformverfahren mit einem Formwerkzeug in Form einer Halbkugel wird mit dem Material Polystyrol simuliert. Dabei wird dokumentiert, über die Optimierung der Wanddicke durch Änderung von unterschiedlichen Parametern. Durch die Ergebnisse der Versuche entstehen Lösungen, die von zukünftigen Projekten profitiert werden kann.

## **Name of Student**

Dennis Soebagio

## **Title of the paper**

Wall thickness optimization of a thermoformed PS-container

## **Keywords**

Thermoforming, Simulation, Polystyrol

## **Abstract**

This Thesis includes the documentation of Simpatec's T-SIM simulation program. A Thermoforming process with a hemispherical mold is simulated with a polystyrene Material. During the optimization of the wall thickness, this thesis records all the different parameters that have been tested. The results of the experiments create solutions that can be benefited for future projects.

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Schäfer für das interessante und spannende Thema bedanken. Zugleich möchte ich mich auch bedanken, dass Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Schäfer und Herrn Dipl.-Ing. Niels Eiben als Betreuer meiner Arbeit bereit waren.

Zusätzlich bedanke ich mich bei meinen Kommilitonen für die gute Zusammenarbeit im Studium wie auch in unterschiedlichen Projekten und für die vielen anregenden Diskussionen bedanken.

Meine Eltern danke ich ebenfalls für die Unterstützung rund um das Studium. Zuletzt auch ein Dank an Alle im Hintergrund, Familie und Freunde, die mich mit Korrekturlesen unterstützt haben.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungverzeichnis</b> .....	I
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	II
<b>Einleitung</b> .....	1
<b>1 Kunststoff</b> .....	2
1.1 Bindungsarten .....	5
1.1.1 Hauptvalenzbindung.....	5
1.1.2 Nebenvalenzbindung.....	5
1.2 Unterteilung der Polymere.....	7
1.2.1 Elastomere.....	7
1.2.2 Duroplaste .....	8
1.2.3 Thermoplaste .....	9
1.3 Thermoplaste für das Thermoformen.....	12
1.3.1 Schlagfestes Polystyrol (PS-HI) .....	12
1.3.2 Polypropylen (PP) .....	13
<b>2 Thermoformen</b> .....	14
2.1 Formwerkzeuge .....	15
2.1.1 Positivformung .....	15
2.1.2 Negativformung.....	16
2.2 Faltenbildung und Schreckmarken.....	17
2.2.1 Faltenbildung.....	17
2.2.2 Schreckmarken .....	18
2.3 Niederhalter .....	18
<b>3 Simulationssoftware T-SIM von SimpaTec</b> .....	19
3.1 T-SIM Bedienelemente .....	20
3.1.1 Halbzeug .....	20
3.1.2 Formwerkzeug.....	21
3.1.3 Prozess.....	21
3.1.4 Material .....	23
3.1.5 Formwerkzeug- und Umgebungstemperatur.....	23
3.1.6 Simulation.....	24
<b>4 Konstruktion des Formwerkzeugs</b> .....	27
4.1 Konstruktion des Formwerkzeugs mit Catia V5R21 .....	27
4.1.1 Formwerkzeug 1 .....	27
4.1.2 Formwerkzeug 2 .....	28
4.1.3 Formwerkzeug 3 .....	29

4.2 Konstruktion des Formwerkzeugs mit Creo .....	29
4.3 Vergleich der CAD-Modelle in T-SIM.....	30
<b>5 Versuchsdurchführung der Simulationen .....</b>	<b>31</b>
5.1 Versuche mit unterschiedliche Folienfaktoren .....	31
5.1.1 Versuche mit unterschiedliche Folientemperatur .....	31
5.1.2 Versuch mit einer kleineren Foliengröße.....	34
5.2 Versuche mit unterschiedliche Formwerkzeugfaktoren .....	35
5.3 Versuche mit unterschiedliche Vakuumfaktoren.....	38
5.3.1 Versuch ohne Vakuum .....	38
5.3.2 Versuch mit höherer Vakuumstärke .....	38
5.3.3 Versuch mit längere Vakuumzeit .....	39
5.4 Versuch mit dem Material Polypropylen .....	40
5.5 Versuch mit einem Niederhalter .....	40
5.6 Versuch Formwerkzeug mit Bohrungen.....	42
<b>6 Optimierungsergebnisse.....</b>	<b>43</b>
6.1 Optimale Parameter .....	43
6.2 Simulationsbeispiele mit unterschiedlichen Formwerkzeugen .....	44
<b>7 Fazit .....</b>	<b>47</b>
<b>Anhang</b>	
<b>Literaturverzeichnis</b>	

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Fraktionierte Destillation von Erdöl .....	2
Abbildung 2: Kettenpolymerisation .....	3
Abbildung 3: Polyaddition .....	4
Abbildung 4: Polykondensation.....	4
Abbildung 5: Haupt- und Nebervalenzbindung .....	6
Abbildung 6: Zustandsdiagramm von Elastomeren .....	8
Abbildung 7: Zustandsdiagramm von Duroplasten.....	9
Abbildung 8: Zustandsdiagramm amorpher Thermoplaste .....	10
Abbildung 9: Zustandsdiagramm teilkristalliner Thermoplaste.....	11
Abbildung 10: Positivformung.....	16
Abbildung 11: Negativformung .....	16
Abbildung 12: Schematische Faltenbildung bei positivem Formwerkzeug.....	17
Abbildung 13: Schreckmarke.....	18
Abbildung 14: Vergleich ohne und mit Niederhalter .....	18
Abbildung 15: T-SIM .....	19
Abbildung 16: New Grid Einstellungen.....	20
Abbildung 17: Zusätzliche Einspannung.....	21
Abbildung 18: Prozesseinstellung in T-SIM .....	22
Abbildung 19: Material in T-SIM .....	23
Abbildung 20: Temperatur und Reibung in T-SIM.....	24
Abbildung 21: Simulation Project in T-SIM.....	24
Abbildung 22: Ergebnis der Simulation .....	25
Abbildung 23: Simulationsergebnis (Menu "Cut") .....	25
Abbildung 24: Simulationsergebnis 3 (Menu "Cooling").....	25
Abbildung 25: Formwerkzeug aus Holz .....	27
Abbildung 26: Formwerkzeug 1 in Catia .....	28
Abbildung 27: Formwerkzeug 2 in Catia .....	28
Abbildung 28: Formwerkzeug 3 in Catia .....	29
Abbildung 29: Formwerkzeug 1 in Creo .....	29
Abbildung 30: Catia und Creo Vergleich in T-SIM .....	30
Abbildung 31: Simulationsergebnis - Folientemperatur 150 °C.....	32
Abbildung 32: Simulationsergebnis - Folientemperatur 125 °C.....	33
Abbildung 33: Simulationsergebnis - Folientemperatur 175 °C.....	33
Abbildung 34: Simulationsergebnis - Folientemperatur 200 °C.....	34
Abbildung 35: Einspannung der Folie (Clamping) .....	34
Abbildung 36: Simulationsergebnis - Zusätzliche Einspannung der Folie .....	35
Abbildung 37: Simulationsergebnis - Formwerkzeug 40 °C .....	36
Abbildung 38: Simulationsergebnis - Formwerkzeug 55 °C .....	37
Abbildung 39: Simulationsergebnis - Formwerkzeug 70 °C .....	37
Abbildung 40: Simulationsergebnis - ohne Vakuum .....	38
Abbildung 41: Simulationsergebnis - Höhere Vakuumstärke .....	39
Abbildung 42: Simulationsergebnis - Längere Vakuumzeit.....	39
Abbildung 43: Simulationsergebnis - Material PP.....	40
Abbildung 44: Einstellung des Niederhalters .....	41
Abbildung 45: Simulationsergebnis – Niederhalter .....	41
Abbildung 46: Simulationsergebnis - Formwerkzeug mit Bohrungen.....	42

Abbildung 47: Folientemperatur-dünnste Wanddicke – Diagramm.....	43
Abbildung 48: Simulationsergebnis - Formwerkzeug 4.....	45
Abbildung 49: Simulationsergebnis - Formwerkzeug 5.....	45
Abbildung 50: Simulationsergebnis - Formwerkzeug 6.....	46

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Polystyrol Daten.....	12
Tabelle 2: Polypropylen Daten .....	13
Tabelle 3: Verfahrensschritte des Thermoformens .....	14
Tabelle 4: Standardwerte für Versuche der Folientemperatur.....	31
Tabelle 5: Standardwerte für den Versuch mit unterschiedlichen Formwerkzeugtemperaturen .....	36

# Einleitung

Immer mehr Kunststoffe finden ihre Anwendung in der Verbraucher- und Industrie. Dafür wird in der Produktion das Thermoformen oder Tiefziehverfahren immer häufiger angewendet.

Bevor es eine Simulationssoftware gab, mussten umständliche Testreihen durchgeführt werden um optimale Einstellungen für die Produktion bestimmen zu können. Dank der Simulationssoftware können Testprozesse erspart bleiben und Optimierungen durch die Softwareanalyse direkt bestimmt werden. Daher ist die Entwicklung durch eine Simulation für die Industrie von großem Vorteil.

Diese Arbeit umfasst die Beschreibung und die Bedienung der Simulationssoftware T-SIM. Das Thermoformen eines Behälters aus Polystyrol soll simuliert werden. Dabei werden mehrere Versuche mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt. Durch die Versuche werden die Simulationsergebnisse verglichen und analysiert. Ziel dieser Versuche ist, eine Optimierung der Wanddicke eines thermogeformten Behälters aus Polystyrol zu erhalten.

# 1 Kunststoff

Kunststoffe sind Werkstoffe, die künstlich (synthetisch) aus Naturmaterialien hergestellt werden. Der Kunststoff wurde entwickelt um eine bessere Nutzung zu erzielen, die man so bei einem Naturprodukt nicht finden konnte. Die Entwicklung von Kunststoff begann früh mit der Nutzung von Naturmaterialien, die eine plastische Eigenschaften besitzen so wie zum Beispiel Kaugummi. Danach entwickelten Wissenschaftler chemisch modifizierte Naturmaterialien immer weiter, bis schließlich im Jahr 1855 unterschiedliche moderne Kunststoffe entstanden, wobei der anschließende Durchbruch von massenproduzierten Kunststoffen erst im Jahr 1907 eintrat.

Das meistgenutzte Rohmaterial für die Kunststoffherstellung ist heute das Erdöl, welches aus einer Mischung tausendverschiedener Kohlenwasserstoffverbindungen besteht. Um die geeigneten Monomere für die Weiterverarbeitung zu gewinnen muss das Erdöl erst aufbereitet werden. Hierbei wird Erdöl durch die fraktionierte Destillation in mehrere Fraktionen getrennt. Durch diesen Vorgang wird zunächst das Schwerbenzin (Naphtha) gewonnen. Das Schwerbenzin ist ein wichtiger Basisstoff, welcher allerdings überwiegend gesättigte Kohlenwasserstoffe enthält und zur Kunststoffherstellung nicht geeignet ist. Im nächsten Verarbeitungsschritt wird die Weiterverarbeitung des Schwerbenzins durch das thermische Cracken durchgeführt. Durch diesen Crackprozess werden dann kleinere ungesättigte Moleküle oder Monomere gewonnen.

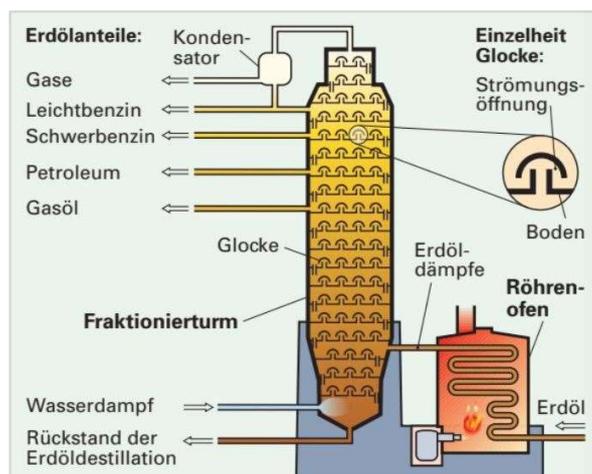


Abbildung 1: Fraktionierte Destillation von Erdöl<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Quelle: (Fritsche, et al., 2016)

„Aus vielen Monomeren werden über Polyreaktionen Großmoleküle oder Polymere (Makromoleküle) aufgebaut“<sup>2</sup>. Für die Herstellung von Polymere gibt es zwei unterschiedliche Verfahren: Kettenpolymerisation und Stufenpolymerisation.

Bei der Kettenpolymerisation werden viele Monomere mit freien Bindungsstellen auf beiden Seiten zu einem linearen Makromolekül zusammengebaut, das meist durch Wärme und Katalysatoren erzeugt wird. Dies setzt voraus, dass die Monomere eine Doppelbindung besitzen.

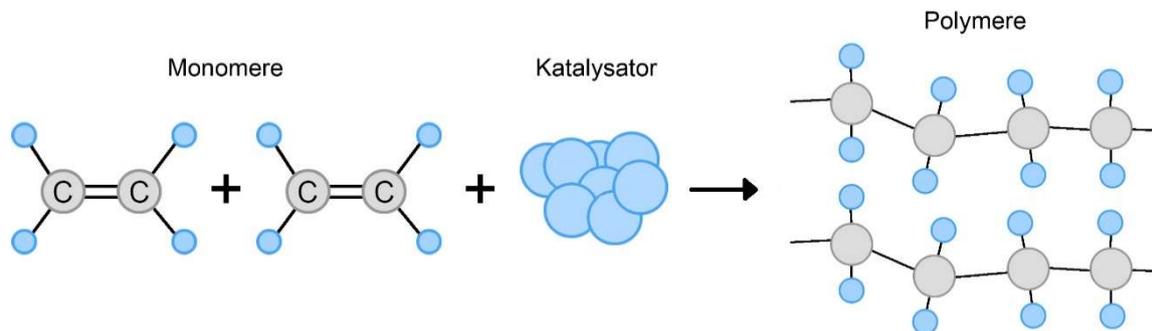


Abbildung 2: Kettenpolymerisation<sup>3</sup>

Die Kettenpolymerisation läuft in drei Schritten ab:

- Startreaktion: Die Aufspaltung der Doppelbindung durch Wärme oder Katalysator
- Wachstumsreaktion: Aneinanderreihen der Monomere (Kettenreaktion)
- Abbruchreaktion: Absättigung der freien Bindungsstelle am Kettenende

Durch die Polymerisation entsteht eine bestimmte Anzahl von Monomere, die im Polymer eingebaut sind. Diese Anzahl bezeichnet man als Polymerisationsgrad, der auch als Maß der Kettenlänge dient. Polymere Beispiele aus dem Polymerisationsverfahren sind Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polystyrol (PS) usw.

Ein weiteres Verfahren zur Herstellung von Polymere ist die Stufenpolymerisation, bei der die Bildung der Polymere nicht durch eine wachsende Kette erfolgt, sondern durch eine gestufte Reaktion. Dieses Verfahren wird Kettenpolymerisation genannt. Durch

<sup>2</sup> (Schwarz, et al., 2016)

<sup>3</sup> Vgl. (Fritsche, et al., 2016)

dieses Verfahren entstehen Zwischenprodukte (Oligomere). Um aus Monomere eine lineare Makromoleküle zu gewinnen werden Monomere benötigt, die über funktionelle Gruppen verfügen. Diese funktionellen Gruppen haben Molekülen, die reaktionsfreudig sind und sich mit anderen Molekülen leicht verbinden lassen. Bei diesem Verfahren unterscheidet man zwischen der Polykondensation und Polyaddition.

Bei der Polyaddition werden in der Regel zwei unterschiedliche Arten von Monomere mit reaktionsfähigen funktionellen Gruppen in einer Stufenreaktion ohne Abspaltung von Nebenprodukten zu Polymere zusammengebaut (Abbildung 3). Beispiele für Polyaddition sind Polyurethan (PUR) und Epoxidharz (EP).

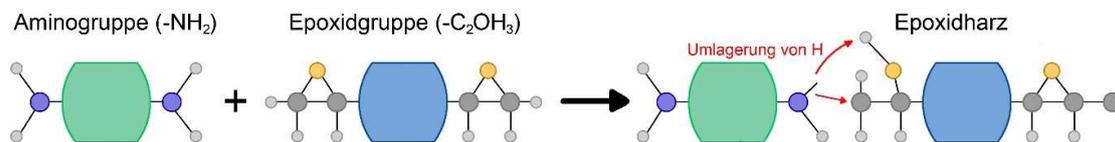


Abbildung 3: Polyaddition<sup>4</sup>

Auch bei der Polykondensation werden zwei verschiedene Arten von Monomere zusammengebaut. Jedes der Monomere besitzt ebenfalls reaktionsfähige funktionelle Gruppen, der Unterschied ist nur, dass bei der Verknüpfung zu Polymere immer ein Nebenprodukt (meist Wasser) entsteht. Polymere, die durch Polykondensation entstehen sind beispielweise Polyamid (PA), Polyester (PET), Polycarbonat (PC) und Silicon (SI).

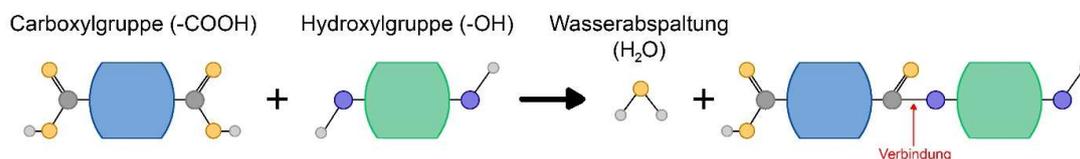


Abbildung 4: Polykondensation<sup>5</sup>

<sup>4</sup> Vgl. (Fritsche, et al., 2016)

<sup>5</sup> Vgl. (Fritsche, et al., 2016)

## 1.1 Bindungsarten

Abhängig von ihren Bindungskräften und -typen, besitzen Kunststoffe Eigenschaften, die sowohl Ihre mechanische als auch ihre thermische Verhalten beeinflussen. Dabei gilt es zwischen den Bindungen entlang der Kette und den Bindungen zwischen der Kette zu differenzieren. Durch diese Differenzierung unterteilen sich die Bindungskräfte in Hauptvalenzbindung und Nebervalenzbindung. Diese Bindungen sind entscheidend für die thermische Stabilität der Kunststoffe.

### 1.1.1 Hauptvalenzbindung

Hauptvalenzbindung oder primäre Bindung ist die Bindung zwischen den Atomen entlang der Kette, die den Zusammenhalt der Atome bewirken und besonders stabil sind. Diese Bindung ist eine Elektronenpaarbindung (chemische Bindung). Die Elektronenpaarbindung wird auch Atombindung oder kovalente Bindung genannt. Ein gemeinsames Elektronenpaar besteht aus zwei benachbarten Atomen, die über eine negative Ladung verfügen. Durch diese negative Ladung werden die Atomkerne zusammengezogen bis der positive Kern die Anziehung abstoßt und die Waage hält. Die entstehenden Hauptvalenzkräfte durch solche primären Bindungen sind Grund für die Eigenschaften von Duroplasten und Elastomeren. Ein Duroplast besteht aus ein sehr engmaschiges Raumnetz molekül, wodurch Duroplast die Eigenschaften hart und spröde hat. Bei Elastomeren ist das Raumnetz molekül weitmaschig. Dadurch lässt es sich durch äußere Kräfte einwirkung strecken und kommt nach Entlastung zurück zum alten Zustand.

### 1.1.2 Nebervalenzbindung

Die Nebervalenzbindung oder auch sekundäre Bindung beschreibt die Bindung zwischen Molekülketten (Polymere), die sie zusammenhalten. Die Nebervalenzbindung ist deutlich schwächer als die Hauptvalenzbindung, da sie elektrostatisch sind (physikalische Bindung). Diese Bindung ist der Grund, weshalb bei einer Temperaturerhöhung der Thermoplaste die Nebervalenzkräfte aufgehoben und die Ketten verschiebbar werden. Beispiele für Nebervalenzkräfte sind Dispersionskräfte, Dipolkräfte und Wasserstoffbrückenkräfte.

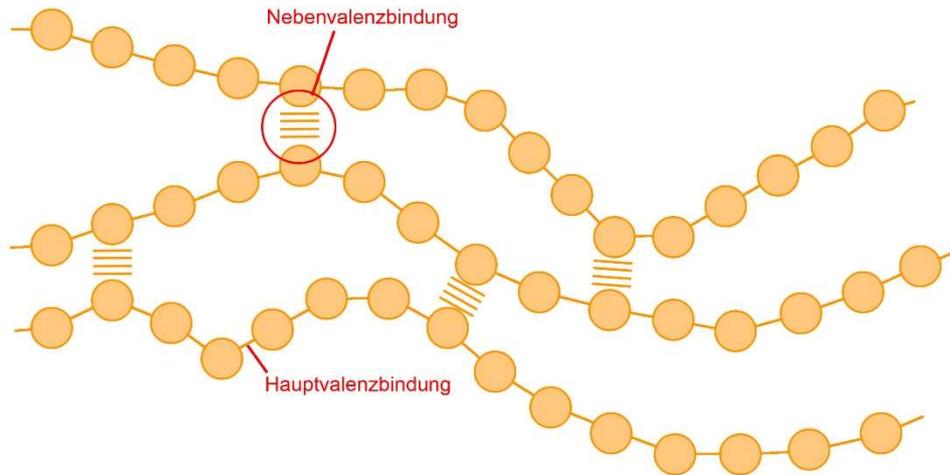


Abbildung 5: Haupt- und Nebenvalenzbindung<sup>6</sup>

### Dispersionskräfte

Bei Dispersionskräfte bilden die Elektronen, die sich um den positiven Kern bewegen wechselnde negative Schwerpunkte. Dies führt dazu, dass bei den Nachbaratomen Gegenpole entstehen und sich gegenseitig anziehen.

### Dipolkräfte

Bei Dipolkräfte besitzen Elemente im Kettenmolekül einen starken elektronegativen Charakter, welche einen Minuspol bilden und als Folge einen Pluspol bei dem Nachbaratom (permanenter Dipol) erzeugen. Durch diese unterschiedlichen Dipole entsteht eine elektrostatische Anziehung zwischen den Ketten die stärker als die der Dispersionskräfte ist.

### Wasserstoffbrückenkräfte

Bei einem Makromolekül werden Wasserstoffatome positiv polarisiert, die dann eine elektrostatische Anziehungskraft mit negativen Elementen der Nachbarkette bewirken. Zwischen allen Nebenvalenzbindungen erzielt die Wasserstoffbrückenkraft die stärkste Bindung, allerdings ist diese aber immer noch deutlich schwächer als die Hauptvalenzbindung.

<sup>6</sup> Vgl. (Fritsche, et al., 2016)

## 1.2 Unterteilung der Polymere

Kunststoffe haben unterschiedliche Eigenschaften wie zum Beispiel Formbarkeit, Temperaturbeständigkeit, chemische Beständigkeit, Bruchfestigkeit, Elastizität und Härte. Die Ausprägung dieser Eigenschaften hängt von der Regelmäßigkeit und Unregelmäßigkeit der Polymere ab, wobei die Abstände zwischen den Polymeren einen direkten Einfluss auf die Nebenvalenzkräfte hat. Durch diese physikalischen Eigenschaften und Anordnungen werden Kunststoffe in drei Klassen eingeteilt: Elastomere, Duroplaste und Thermoplaste.

### 1.2.1 Elastomere

Elastomere werden über Hauptvalenzkräfte zusammengehalten und sind nur leicht vernetzt (weitmaschige Vernetzung). Durch diese Eigenschaften bleiben Elastomere durch eine Erwärmung unwesentlich beeinflusst, und verformen sich auch elastisch (Gummiverhalten). Das heißt, dass sich ein Elastomer bei einer Zug- oder Druckbelastung verformt, und sich nach der Belastung zurück in seine Anfangsform zurück federt. Aufgrund der weitmaschigen Vernetzung sind Elastomere nicht umformbar oder schweißbar, und durch eine Abkühlung unter der Glasübergangstemperatur werden Elastomere spröde. Elastomere werden hauptsächlich als Basismaterial benutzt, wie zum Beispiel Reifen, Gummibänder, oder Dichtungsringe.

Das Zustandsdiagramm von Elastomeren (Abbildung 6) stellt das thermische Verhalten von Elastomeren bildlich dar. So sind beispielweise Elastomere, die sich unterhalb des Erweichungstemperaturbereichs (ET) befinden relativ hart-spröde. In diesem Bereich kommt es zu keiner Verarbeitung da sie eine relativ hohe Reißfestigkeit und niedrige Reißdehnung haben. Wobei im Erweichungstemperaturbereich die Reißfestigkeit deutlich sinkt und gleichzeitig die Reißdehnung stärker wird. Die Fläche zwischen Erweichungstemperaturbereich und Zersetzungstemperaturbereich (ZT) beschreibt man als Einsatztemperaturbereich, da sie in diesem Bereich sehr gering von der Temperatur beeinflusst wird. Bis zum Zersetzungstemperaturbereich ist das Elastomer thermoelastisch und ab dieser Temperatur fangen die Makromoleküle durch die Erwärmung abzubauen.

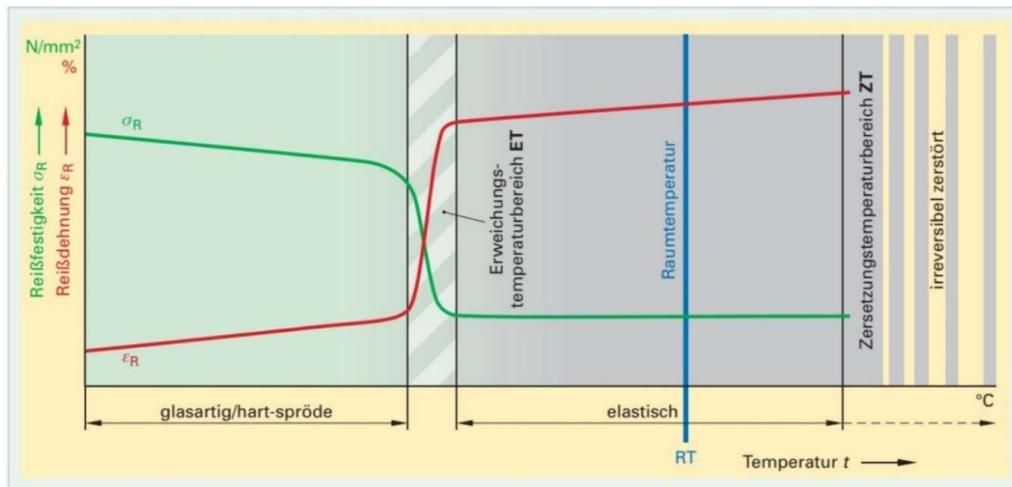


Abbildung 6: Zustandsdiagramm von Elastomeren<sup>7</sup>

### 1.2.2 Duroplaste

Wie bei Elastomeren, werden Duroplaste über Hauptvalenzkräfte zusammengehalten. Der Unterschied ist, dass bei Duroplasten die Makromoleküle engmaschig vernetzt sind. Aufgrund dieser Eigenschaften sind Duroplaste temperaturbeständig, da ihre Struktur selbst bei höheren Temperaturen unverändert und stabil bleibt. Die Vernetzung der Atombindungen zerfällt nur bei sehr hohen Temperaturen, reagiert dann mit dem Sauerstoff und verkohlt. Daher zersetzen sich Duroplaste bei Überhitzung anstatt zu schmelzen oder weich zu werden. Außerdem sind sie durch die engmaschige Vernetzung ebenfalls hart und spröde. Nicht nur die Temperaturbeständigkeit ist die wichtigste Eigenschaft der Duroplaste, sondern auch ihre mechanischen und elektrischen Eigenschaften, wie zum Beispiel bei kohleverstärkten Bauteilen. Diese Bauteile haben hohe Festigkeiten bei gleichzeitig geringem Teilgewicht<sup>8</sup>. Andere Beispiele für solche Kunststoffmaterialien sind Polyester (PES), Formaldehydharze, Epoxidharze und Polyurethane.

Wie bei den Elastomeren, kann man das thermische Verhalten der Duroplaste auch über ihr Zustandsdiagramm beschreiben (Abbildung 7). Duroplaste bleiben von Temperaturerhöhungen unbeeinflusst, somit wird ihre Festigkeit durch die Erwärmung sehr gering schwächer. Sie sind formstabil und bleiben hart-spröde bis sich die Makromoleküle im Zersetzungstemperaturbereich abbauen. Unterhalb dieses Bereichs ist der Einsatztemperaturbereich von Duroplasten.

<sup>7</sup> Quelle: (Fritsche, et al., 2016)

<sup>8</sup> Vgl. (Fritsche, et al., 2016)

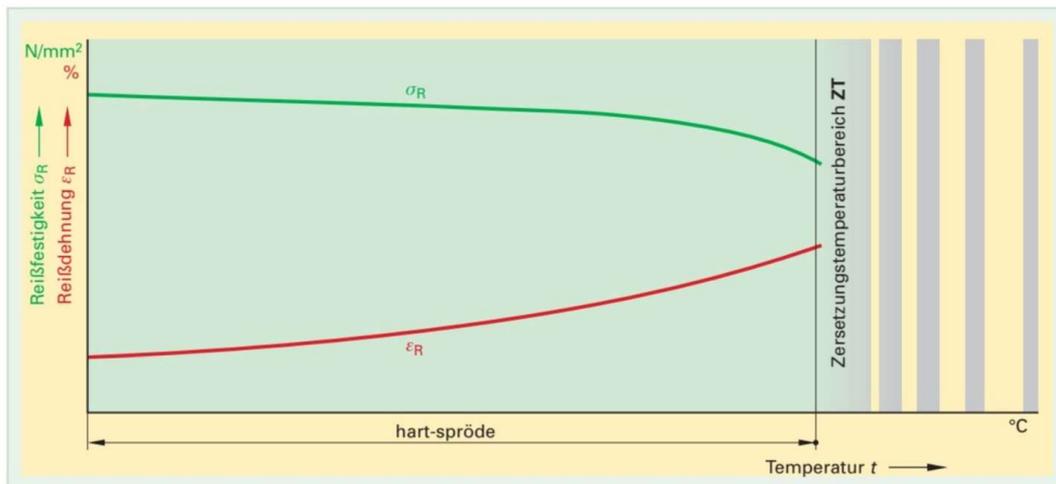


Abbildung 7: Zustandsdiagramm von Duroplasten<sup>9</sup>

### 1.2.3 Thermoplaste

Anders als bei den Elastomeren und Duroplasten, bestehen Thermoplaste aus langkettigen linearen Makromolekülen, die nur über Nebervalenzkräfte zusammengehalten werden. Wobei diese Kräfte wesentlich schwächer sind als die Hauptvalenzkräfte. Bei einer zunehmenden Erwärmung werden einzelne Molekülketten gegeneinander verschoben und die Bindungskräfte verschwinden. Dadurch werden Thermoplaste verformbar und nach der Abkühlung behalten sie ihre Form. Im Gegensatz zu Duroplasten kann es durch ein Überhitzen zum Schmelzen kommen. Ein Thermoplast wirkt also plastisch, das heißt bei einer Zugbeanspruchung ist er schwer zu verformen und das Bauteil bleibt im verformten Zustand. Thermoplaste werden hauptsächlich in der Automobilindustrie, bei Haushaltgegenständen, und in der Verpackungsindustrie eingesetzt. Grundsätzlich werden Thermoplaste in teilkristallinen Thermoplaste und amorphen Thermoplaste unterschiedet.

#### Amorphe Thermoplaste

Man erkennt zunächst eine vollständig regellose Struktur der Polymerketten, die bei einer Wärmeeinwirkung leicht voneinander abgleiten und dazu führt, dass die Thermoplaste weicher werden und bei sehr hohen Temperaturen sogar schmelzen<sup>10</sup>. Im ungefärbten festen Zustand hat der amorphe Thermoplast die Eigenschaften

<sup>9</sup>Quelle: (Fritsche, et al., 2016)

<sup>10</sup>Vgl. (Abts, 2014)

ziemlich spröde und Glasklar zu sein. Beispiele dafür sind Polystyrol (PS), Polycarbonat (PC), Polyvinylchlorid (PVC), etc.

Aus dem Zustandsdiagramm (Abbildung 8) ist erkennbar, dass ein Thermoplast unterhalb des Erweichungstemperaturbereichs einen festen Zustand besitzt (Einsatztemperaturbereich). Anders als bei Elastomeren und Duroplasten besitzen Thermoplaste einen gesonderten Fließtemperaturbereich (FT). Unterhalb dieses Bereiches bis zu Erweichungstemperatur befindet sich ein Thermoplast im thermoelastischen Zustand. Dieser Bereich ist wichtig für das Umformen (Thermoformen), da durch die Erwärmung die Nebervalenzkräfte beweglicher und schwächer werden. Oberhalb des Fließtemperaturbereichs fangen die Nebervalenzkräfte an sich abzubauen, hin bis zum Zersetzungstemperaturbereich wo die Hauptvalenzkräfte zerstört werden und die Zersetzung des Kunststoffes beginnt. In diesem Bereich ist der Zustand des Thermoplastes thermoplastisch und wird hauptsächlich für das Urformen und Schweißen verwendet.

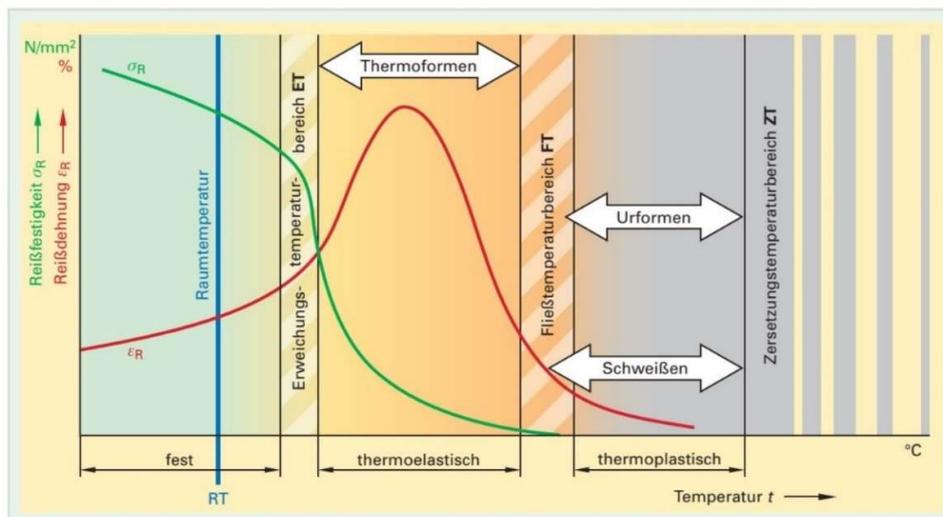


Abbildung 8: Zustandsdiagramm amorpher Thermoplaste<sup>11</sup>

### Teilkristalline Thermoplaste

Im Vergleich zu amorphen Thermoplasten, sind hier die Polymerketten in bestimmten Stellen parallel zueinander ausgerichtet. Dadurch entstehen kristallähnliche Strukturen, die gegenseitig Nebervalenzkräfte auswirken. Durch die Kristallisation wird das Abgleiten der Polymerketten erschwert. Wegen der langen

<sup>11</sup>Quelle: (Fritsche, et al., 2016)

Makromolekülketten ist es jedoch nicht möglich eine vollständige Kristallisation zu erlangen. Sie werden teilkristalline Thermoplaste genannt, da dieser Werkstoff gleichzeitig amorphe und kristalline Eigenschaften besitzt. Um eine Molekülkettenverschiebung zu ermöglichen ist eine Verschmelzung der Kristallite Voraussetzung. Im Vergleich zu amorphen Thermoplasten werden die Dichte, Festigkeit, Steifigkeit und Gebrauchstemperatur erhöht<sup>12</sup>. Beispiele dafür sind Polyethylen (PE), Polypropylen (PP), Polyamid (PA), usw.

Im Vergleich zu amorphen Thermoplasten besitzt ein teilkristalliner Thermoplast ein Kristallschmelztemperaturbereich (KT). Zwischen diesem Bereich und dem Erweichungstemperaturbereich ist ein Thermoplast hart-zäh bis thermoelastisch, wobei unterhalb des Erweichungstemperaturbereiches der Zustand hart-spröde ist und keine Verarbeitung ermöglicht. Ab dem Kristallschmelztemperaturbereich verursacht die Temperaturerhöhung hohe Molekularbewegungen, bei der die Nebervalenzkräfte ganz verschwinden. Der Thermoformenbereich befindet sich kurz vor dem Kristallschmelzbereich bis zu thermoplastischem Zustand. Wobei im thermoplastischen Zustand üblicherweise auch das Urformen und Schweißen durchgeführt wird.

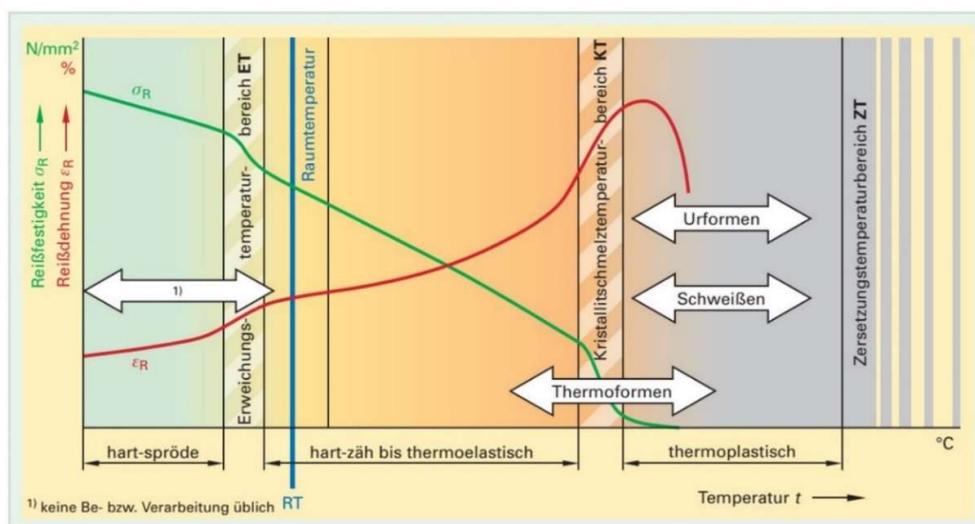


Abbildung 9: Zustandsdiagramm teilkristalliner Thermoplaste<sup>13</sup>

<sup>12</sup> (Abts, 2014)

<sup>13</sup> Quelle: (Fritsche, et al., 2016)

## 1.3 Thermoplaste für das Thermoformen

Für das Thermoformen werden nur Halbzeuge aus Thermoplaste angewendet, da sie ein viskoelastisches Verhalten beim Verstrecken zeigen. Beispiele für Thermoplaste, die üblich für das Thermoformen angewendet werden sind:

- Polystyrol (PS)
- Acrylnitril-Butadien-Styrol-Copolymer (ABS)
- Acrylnitril-Styrol-Acrylester-copolymer (ASA)
- Styrol-Acrylnitril-Copolymer (SAN)
- Polyvinylchlorid (PVC-U)
- Polyethylen hoher Dichte (PE-HD)
- Polypropylen (PP)

Die Simulationen des Thermoformen werden hauptsächlich mit dem Material Polystyrol durchgeführt, wobei zum Vergleich das Thermoformen mit dem Material Polypropylen ebenfalls analysiert wird.

### 1.3.1 Schlagfestes Polystyrol (PS-HI)

Polystyrol gehört zu den amorphen Thermoplasten, dass durch Polymerisation von Styrol hergestellt wird. Polystyrol ist im ungefärbten Zustand glasklar/Transparent. Die Tabelle 1 erfasst die wichtigsten Daten und Eigenschaften von Polystyrol für das Thermoformen.

Dichte	1,05 g/cm <sup>3</sup>
Zugfestigkeit	32 N/mm <sup>2</sup>
E-Modul	2150 N/mm <sup>2</sup>
Lineare Wärmeausdehnung	70 · 10 <sup>-6</sup> °C
Spezifische Wärme	1,3 kJ/(kg · K)
Min. Dauergebrauchstemperatur	-40 °C
Max. Dauergebrauchstemperatur	70 °C

Tabelle 1: Polystyrol Daten

Zusätzlich besitzt schlagfestes Polystyrol folgende Eigenschaften:

- Spröde, steif und hart
- Hoher Oberglanz
- Beständig gegen Wasser
- Beständig gegen Chemikalien wie Salzlösungen, Laugen und nichtoxidierende Säuren
- Nicht Beständig gegen chlorierte Wasserstoffen und Benzin, da das PS löslich wird
- Nicht UV-beständig
- Gutes elektrische Isolierverhalten

### 1.3.2 Polypropylen (PP)

Die Herstellung von Polypropylen erfolgt durch Polymerisation von Propylen. PP gehört zur Gruppe der teilkristallinen Thermoplaste. Ähnlich wie bei Polystyrol, sind die Daten und Eigenschaften (Tabelle 2) des Polypropylens ebenfalls wichtig für das Thermoformen.

Dichte	0,91 g/cm <sup>3</sup>
Zugfestigkeit	30 N/mm <sup>2</sup>
E-Modul	1200 N/mm <sup>2</sup>
Lineare Wärmeausdehnung	150 · 10 <sup>-6</sup> °C
Spezifische Wärme	2,0 kJ/(kg · K)
Min. Dauergebrauchstemperatur	0 °C
Max. Dauergebrauchstemperatur	110 °C

Tabelle 2: Polypropylen Daten

Polypropylen besitzt folgende Eigenschaften:

- Hohe Steifigkeit, Härte und Festigkeit
- Spröde bei tiefen Temperaturen
- Wärmebeständig bis zu 110 °C
- Beständig gegen Chemikalien wie Alkohol, schwache anorganische Säuren und Laugen
- Nicht Beständig gegen starke Oxidationsmittel und Halogenkohlenwasserstoffe
- schlechte UV-beständigkeit
- Gutes elektrisches Isolierverhalten

## 2 Thermoformen

Das Thermoformen oder Warmformen (Umgangssprachlich auch Tiefziehen genannt) ist ein Herstellungsprozess von Formteilen, in dem thermoplastisches Halbzeug mit Hilfe eines Formwerkzeugs umgeformt wird. Dabei unterscheidet man bei den Formwerkzeugen zwischen Positiv- und Negativformung. Um den Prozess besser zu verstehen werden die Verfahrensschritte kurz beschrieben:

Verfahrensschritte des Thermoformens	
1. Auflegen	Halbzeuge (Kunststoffolie) werden in Spannrahmen der Thermoformmaschine eingespannt.
2. Aufwärmen	Die Kunststoffolie wird mit Hilfe eines Flächenstrahlers über seine Erweichungstemperatur aufgewärmt.
3. Umformen	Nach der Erwärmung wird die Kunststoffolie in das Formwerkzeug eingefahren und umgeformt, dabei wird die Vakuumpumpe aktiviert.
4. Abkühlen	Mit Hilfe einer Luftkühlung oder freie Luft wird zunächst die eine Seite abgekühlt während die andere Seite durch den Kontakt mit dem Formwerkzeug abgekühlt wird.
5. Entfernen	Nachdem das Formteil abgekühlt und formstabil ist, kann das Formteil vom Arbeitstisch entfernt werden.
6. Nachbearbeiten	Das Formteil wird meist nachbehandelt, wie zum Beispiel durch Beschneiden, Kleben, Schweißen, usw.

*Tabelle 3: Verfahrensschritte des Thermoformens*

Thermoformen wird meist in der Verpackungsindustrie angewendet und ist so gut wie konkurrenzlos, es sei denn Karton oder Papier wird als Verpackungsalternative eingesetzt. Die wesentlichen Vorteile von Thermoformen<sup>14</sup>:

- Die Formteile können extrem dünnwandig hergestellt werden.
- Die Formteilgröße ist verfahrensbedingt nicht begrenzt.
- Die Verarbeitung mit mehrschichtigen Halbzeugen ist realisierbar.
- Verbesserte mechanische Eigenschaften durch das verfahrensbedingte Verstrecken.

<sup>14</sup> Vgl. (Schwarzmann & ILLIG Maschinenbau gmbH & Co. KG, 2016)

- Mehrere Möglichkeiten von Halbzeugen mit unterschiedlicher Dicke.
- Kostengünstiger als zum Beispiel Spritzgießverfahren (Bei kleineren bis mittlere Stückzahlen).
- Restmaterial oder Abfälle sind durch das Recyclen wieder verwendbar.

Wie auch andere Verfahren hat das Thermoformen aber auch Nachteile:

- Extra Kosten für die Herstellung der Halbzeuge (Folien und Platten), da sie aus Granulaten oder Pulvern hergestellt werden müssen.
- Nur eine Seite des Halbzeugs bildet die genaue Form des Formwerkzeugs ab.
- Ungleichmäßige Wanddickenverteilung.
- Um ein Fertigteil herzustellen wird meist eine Nacharbeit benötigt.

Thermoformen wird selbstverständlich nicht nur für Verpackungen eingesetzt, sondern auch für technische Formteile wie zum Beispiel Maschinenverkleidung, Armaturen, usw. Um eine effiziente Produktion zu erreichen wird die Herstellung heutzutage auch häufig in Verbindung mit Regelungstechnik gebracht, die die Produktion automatisieren.

### 2.1 Formwerkzeuge

Formwerkzeuge dienen dazu, Halbzeuge in eine gewünschte Form umzuformen. Zur Unterstützung wird meist mit Hilfe einer Vakuumaschine die eingefangene Luft zwischen Formwerkzeug und Halbzeug herausgesaugt. Dabei unterscheidet man zwischen Positiv- und Negativformung für die Formwerkzeuge. Wobei jede Formung ihre eigenen Vor- und Nachteile besitzt.

#### 2.1.1 Positivformung

Bei der Positivformung wird die Außenkontur des Formwerkzeugs nachgebildet, dadurch bekommt die Innenseite des Formteils die Formkonturgenauigkeit. Die dickste Stelle des Formteils befindet sich am Boden (grüner Bereich in Abbildung 10: Positivformung) und entlang dem Randbereich wird die Wanddicke immer dünner (gelber Bereich) bis zu dem Übergang (mit c gekennzeichnet), wo die Wanddicke am dünnsten ist. Von dem Übergang bis zu den eingespannten Rändern des Halbzeugs wird die

Wand dicker. Bei Positivformung können an den Ecken (mit c gekennzeichnet) zum Rand eine Faltenbildung und an den Übergängen von Seitenwänden zum Boden Schreckmarken entstehen.

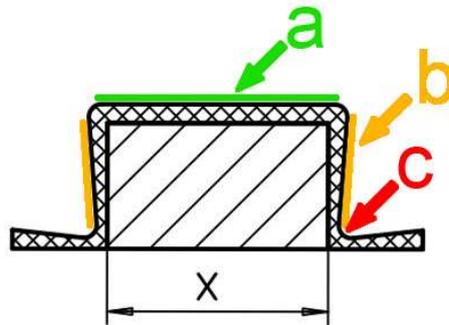


Abbildung 10: Positivformung<sup>15</sup>

### 2.1.2 Negativformung

Anders als bei Positivformung, wird bei Negativformung die Innenkontur des Formwerkzeugs nachgebildet und die Außenseite des Formteils bekommt die Formkonturgenauigkeit. In Abbildung 11: Negativformung ist gut zu erkennen, dass sich die dickste Stelle des Formteils sich am Rand befindet (grüner Bereich). Grund dafür ist, dass das Halbzeug ungestreckt bleibt. Ähnlich wie bei der Positivformung werden die Wanddicke bis zum Übergang zum Boden (mit c gekennzeichnet) immer dünner, wo sich auch die dünnste Stelle befindet. Bei Negativformung entstehen keine Faltenbildung, wobei die Wahrscheinlichkeit einen Materialriss zu bekommen ziemlich hoch liegt.

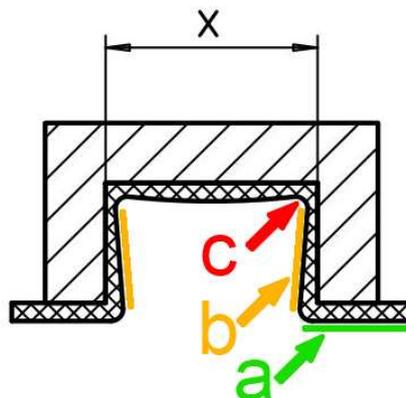


Abbildung 11: Negativformung<sup>16</sup>

<sup>15</sup> Quelle: (Schwarzmann & ILLIG Maschinenbau gmbH & Co. KG, 2016)

<sup>16</sup> Quelle: (Schwarzmann & ILLIG Maschinenbau gmbH & Co. KG, 2016)

## 2.2 Faltenbildung und Schreckmarken

### 2.2.1 Faltenbildung

Faltenbildung ist ein unbeabsichtigtes Stauchen von Grenzflächen, das während dem Umformen entsteht. Mögliche Ursachen dafür sind zum Beispiel zu scharfe vertikale Ecken und überschüssiges Folienmaterial beim Einsatz von kleinem Formwerkzeug. Die schematische Faltenbildung wird in Abbildung 12 dargestellt und im folgenden Abschnitt Schritt per Schritt beschrieben.

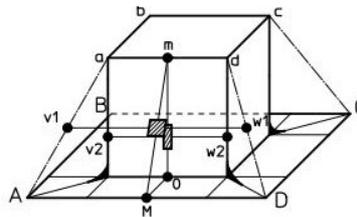


Abbildung 12: Schematische Faltenbildung bei positivem Formwerkzeug<sup>17</sup>

Beim Einfahren des Formwerkzeugs, berührt das heiße Halbzeug die obere Fläche abcd des Formwerkzeugs. Durch die eingespannten Ränder (Entlang ABCD) des Halbzeugs wird es wie ein Zelt gespannt. Durch das Einsetzen des Vakuums verstreckt sich die Mittellinie mM zu mO + OM. Um die Verstreckung besser darzustellen zeigt das abgebildete Rechteck in der Mitte, dass es in der Höhe verstreckt. Während dieses Prozesses wird das Halbzeug nicht nur verstreckt, sondern auch gestaucht. Die Verstauchung wird mit der dargestellte Linie v1w1 dargestellt, die zu einer kürzeren Linie v2w2 gestaucht wird. Die Faltenbildung entsteht somit durch die Verstauchung und nicht durch die Verstreckung. Es ist erkannt worden, dass das Risiko der Faltenbildung an den unteren Eckbereichen sehr hoch ist. Grund dafür ist, dass das Stauchverhältnis dort am größten ist<sup>18</sup>.

Faltenbildung kann man verhindern, indem man das Halbzeug einschränkt. Die Einschränkung erfolgt meist durch Einspannungen. Andere Möglichkeiten wären eine langsame Anwendung des Vakuums und eine dickere Folie. Außerdem besteht noch die Möglichkeit die Materialtemperatur zu korrigieren und im schlimmsten Fall die Form zu modifizieren.

<sup>17</sup> Quelle: (Schwarzmann & ILLIG Maschinenbau gmbH & Co. KG, 2016)

<sup>18</sup> Vgl. (Schwarzmann & ILLIG Maschinenbau gmbH & Co. KG, 2016)

## 2.2.2 Schreckmarken

Schreckmarken sind Dickstellen, die ungewollt bei einem Formteil entstehen. Durch die Schreckmarken wird die Wanddickenverteilung unvorteilhaft, da sie bei der Ansicht gleich erkennbar sind. Schreckmarken entstehen meist durch zu schnelle Abkühlung bei der Umformung des Halbzeuges, die meist durch Berührung mit dem Formwerkzeug erfolgt. Bei positivem Formwerkzeug entstehen Schreckmarken häufig im Bereich der oberen Werkzeugkante (Abbildung 13), wobei bei negativem Formwerkzeug die Schreckmarken wiederum häufig vom Vorstreckstempel verursacht werden. Die Vermeidung der Schreckmarken erfolgt meist durch die Reduzierung der Temperaturdifferenz zwischen Halbzeug und Formwerkzeug. Dies gelingt dadurch, dass das Formwerkzeug vor dem Einsatz erstmal vorgewärmt wird.

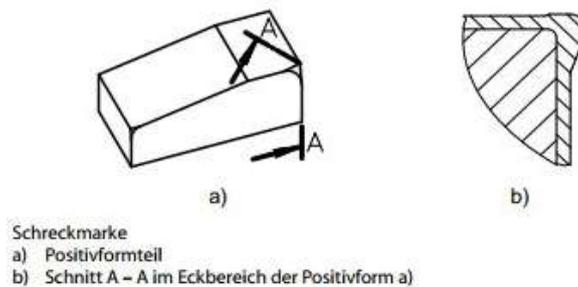


Abbildung 13: Schreckmarke<sup>19</sup>

## 2.3 Niederhalter

Niederhalter werden meist eingesetzt, wenn mehrere Formwerkzeugen für die Umformung benutzt werden. Durch den Einsatz des Niederhalters bekommt jede Einzelform durch das Vorblasen eigene Blase. Auf diese Weise vermeidet man eine Faltenbildung an den Ecken und die Wanddickenverteilung wird optimiert. In Abbildung 14 wird der Unterschied zwischen Thermoformen mit und ohne Niederhalter bildlich dargestellt.

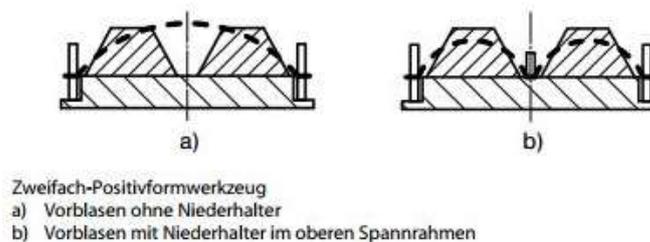


Abbildung 14: Vergleich ohne und mit Niederhalter<sup>19</sup>

<sup>19</sup> Quelle: (Schwarzmann & ILLIG Maschinenbau gmbH & Co. KG, 2016)

## 3 Simulationssoftware T-SIM von SimpaTec

Im Rahmen dieser Arbeit wird die Simulation mit Hilfe einer Simulationssoftware durchgeführt. Die Simulationssoftware T-SIM wurde von der Firma SimpaTec GmbH entwickelt. Die Software wird hauptsächlich in der Kunststoffverarbeitenden Industrie für die Entwicklung und Optimierung der Formteile eingesetzt. SimpaTec entwickelt nicht nur Simulationssoftware für Thermoformen, sondern auch für den Spritzgießprozess und Blasformen. Abbildung 15 stellt die Bedienoberfläche von T-Sim dar.

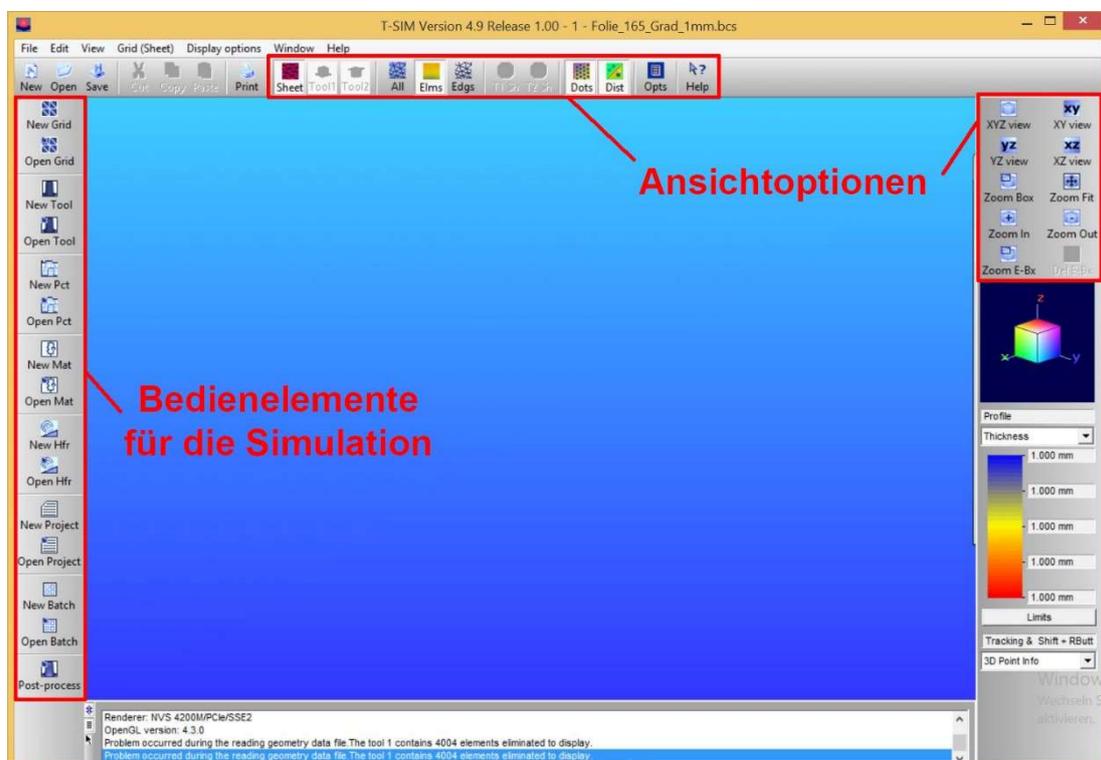


Abbildung 15: T-SIM

Mit Hilfe der T-SIM Software können komplexe Thermoformenprozesse realitätsgetreu simuliert und abgebildet werden. Man bekommt Informationen über das Abkühlverhalten, die Wanddicke, vorhersehbare Verformungen und Verzerrungen. Die Simulation kann mit zusätzlichen Faktoren durchgeführt werden wie zum Beispiel Kombinationen aus Druck und Vakuum. Dank dieser Informationen können Konstrukteure das Formteil optimieren und sparen somit Zeit, da Testprozesse nicht mehr durchgeführt werden müssen. Als nächstes werden die Hauptbedienelemente der Software beschrieben.

## 3.1 T-SIM Bedienelemente

Hier werden die wichtigsten Bedienelemente beschrieben, die im Rahmen dieser Arbeit in richtiger Reihenfolge angewendet werden.

### 3.1.1 Halbzeug

Bevor eine Simulation durchgeführt werden kann, muss als erstes die Kunststoffolie unter „New Grid“ vordefiniert werden. Hier wird die Folie dimensioniert und die Erwärmungstemperatur der Folie vordefiniert. Durch das Anklicken des „New Grid“ Knopfes, öffnet sich ein neues Fenster für die Einstellungen (Abbildung 16):

- Dimensions: Bemaßung von Folien im zwei dimensional Koordinatensystem.
- Symmetry: Die Auswahl „Full“ wird empfohlen. Bei „Half“ und „Quarter“ benötigt die Simulation weniger Rechenleistung.
- Thickness: Foliendicke wird in mm definiert.
- Temperature: Folientemperatur nach der Erwärmung.
- Number of elements: Meist reichen zwischen 5000 – 8000 Dreieckelemente. Um ein besseres Ergebnis zu erzielen werden die Versuche mit 50000 Elemente durchgeführt.

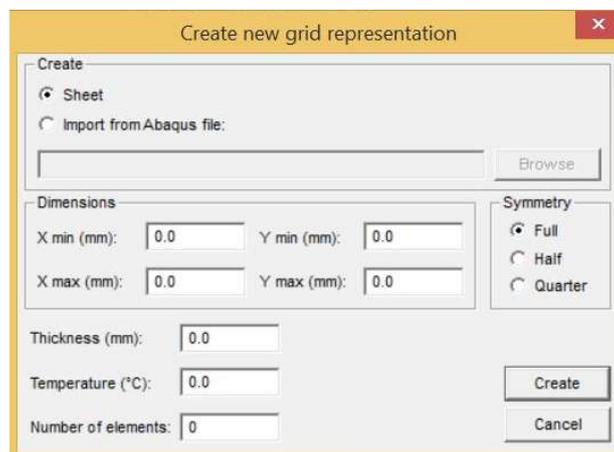


Abbildung 16: New Grid Einstellungen

Nach der Erstellung der Folie, bekommt man die Option eine zusätzliche Einspannung in der Folie zu definieren. Dafür muss das Menu „Grid (Sheet)“ → „Clamping“ ausgewählt werden (Abbildung 17). Um die Einspannung zu definieren gibt es mehrere Möglichkeiten. Die ersten Vier-Optionen definieren die Einspannung in bestimmten Formmarkierungen, die auf die gewünschte Position der Folie markiert wird. „Clamp inside“ bedeutet, dass sich die Einspannung innerhalb der Markierung

befindet und bei „Clamp outside“ das Gegenteil. Die fünfte Option ist die genauere Option, da es die Einspannungen im Koordinatensystem definiert. In T-SIM werden die zusätzlichen Einspannungen mit einer hellen roten Farbe dargestellt. Sollte man die Einspannung löschen wollen, ist die letzte Option „Remove“ auszuwählen. Durch das Markieren werden die Bereiche dann frei von Einspannungen.

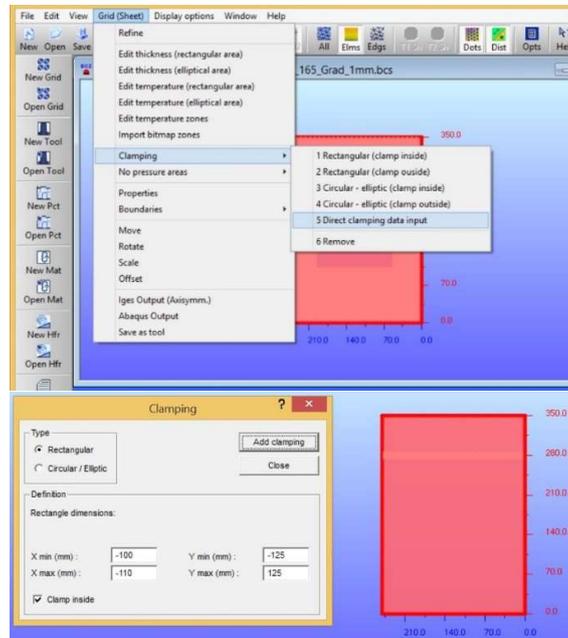


Abbildung 17: Zusätzliche Einspannung

#### 3.1.2 Formwerkzeug

Formwerkzeuge, die man direkt in T-SIM importiert, werden meist mit CAD Software vorkonstruiert. Im Rahmen dieser Arbeit wird das formwerkzeug in Catia und Creo konstruiert. T-SIM unterstützt die dazugehörigen Dateiformate .stl (Catia) und .dxf (Creo). Nachdem das Formwerkzeug als Tool importiert wurde, kann dies dann als Tool in T-SIM gespeichert werden.

#### 3.1.3 Prozess

Für die Simulation muss der Prozessablauf vorher bestimmt werden. In Abbildung 18 wird das Prozesseinstellungsfenster dargestellt, in dem die Bewegungen des Formwerkzeugs und Vakuum im Zeitintervall eingestellt werden. Um die Objekte (Formwerkzeug und Halbzeug) in dem Prozess darzustellen, werden die Dateien im Menu „Project“ eingefügt. Wichtig zu beachten: um das Vorblasen im Prozess zu definieren wird die Vorblasenstärke als positiver Wert eingegeben und bei Vakuum wird die Stärke als negativer Wert eingegeben.

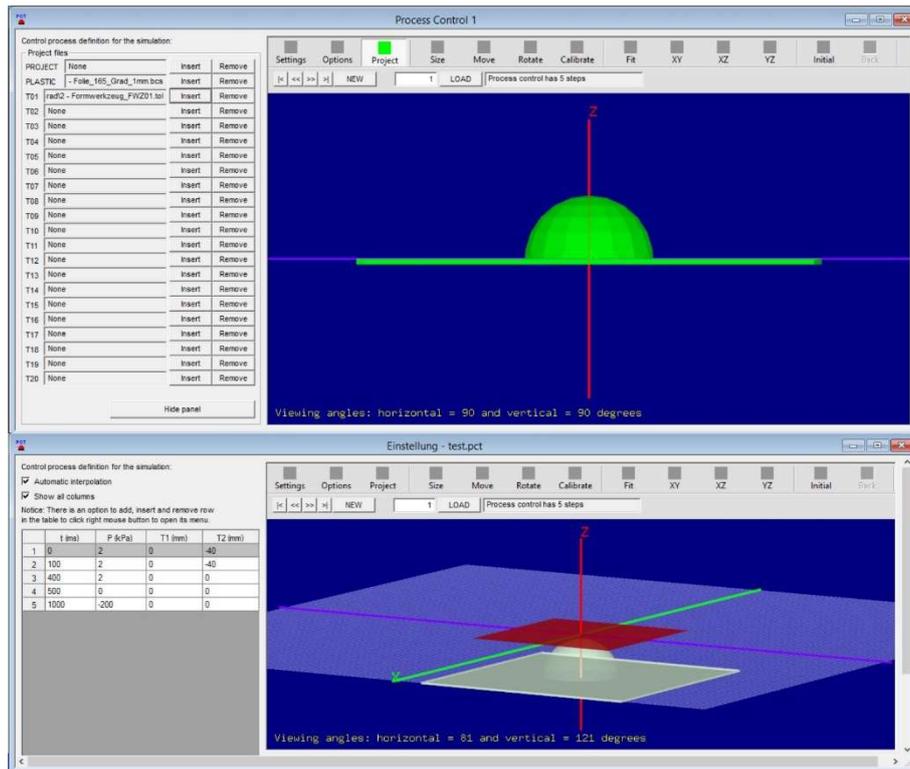


Abbildung 18: Prozesseinstellung in T-SIM

Die Prozessschritte werden in einer Tabelle als Zeile definiert. Jeder dieser Prozessschritte benötigt Information über ihre Zeitpunkte. Als Beispiel wird der Prozessablauf in Abbildung 18 so definiert.

- 0 → 100 ms:
  - Aufgewärmte Folie wird mit einer Stärke von 2 kPa vorgeblasen.
  - Das Formwerkzeug wird 40 mm nach unten gefahren.
- 100 → 400 ms:
  - Aufgewärmte Folie wird weiter mit der einer Stärke von 2 kPa vorgeblasen.
  - Das Formwerkzeug wird 40 mm nach oben eingefahren.
- 400 → 500 ms:
  - Das Vorblasen wird von 2kPa auf 0 kPa reduziert.
  - Formwerkzeug wurde schon in die Folie eingefahren.
- 500 → 1000 ms:
  - In diesem Zeitrahmen wird die Vakuumstärke von 0 auf 200 kPa stetig steigen.

### 3.1.4 Material

Als nächstes muss ein Material für die Folie zugeordnet werden. In T-SIM ist es möglich ein neues Material hinzuzufügen, wobei ein vorg gespeichertes Material von SimpaTec empfohlen wird. Abbildung 19 stellt zum Beispiel Werkstoffdaten von Polystyrol dar, die von SimpaTec zur Verfügung gestellt werden.

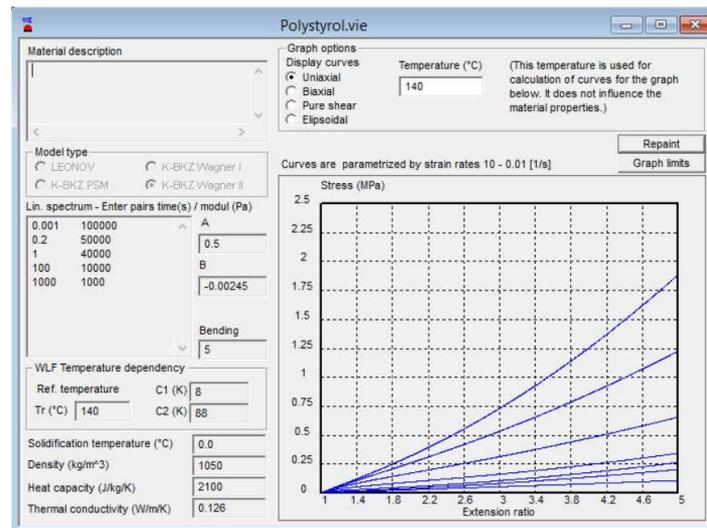


Abbildung 19: Material in T-SIM

### 3.1.5 Formwerkzeug- und Umgebungstemperatur

Bei Thermoformen spielen die Temperatur, der Wärmedurchgangskoeffizient und der Reibungskoeffizient des Formwerkzeugs eine wichtige Rolle. Unter „New Hfr“ werden einzelne Daten eingegeben und die Umgebungstemperatur für die Abkühlung eingestellt. Wichtige Werte aus dem T-SIM-Handbuch:

- Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Formwerkzeug aus Holz und Halbzeug (Heat Transfer Coefficient) beträgt 100 – 500 W/(m²K).
- Wärmedurchgangskoeffizient zwischen Umgebungsluft und Halbzeug beträgt 5,7 W/(m²K).
- Reibungskoeffizient wird mit einer Zahl zwischen 0-1000 skaliert. 0 stellt einen reibungslosen Zustand dar und 1000 steht für ein festklebendes Material an dem Formwerkzeug.

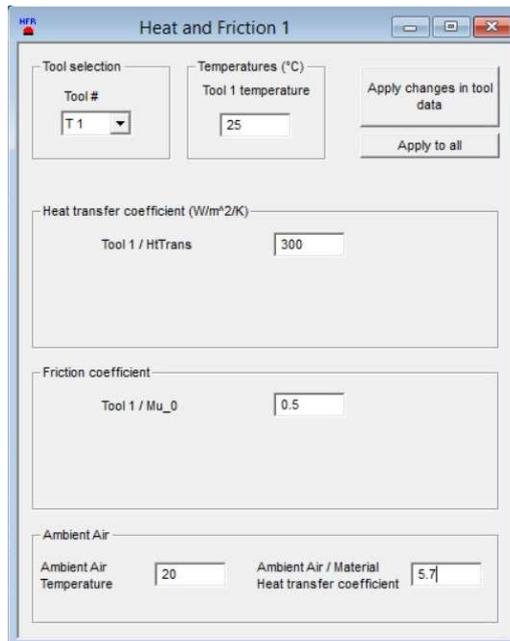


Abbildung 20: Temperatur und Reibung in T-SIM

#### 3.1.6 Simulation

Nachdem alle Informationen für die Simulation gespeichert wurden, werden die einzelnen Dateien in die Simulation unter „New Project“ eingesetzt und die Simulation kann durchgeführt werden. In diesem Einstellungsmenü müssen alle Dateien zu Folie, Formwerkzeug, Material und Prozesse zugeordnet werden. Durch das Klicken des Play-Buttons wird die Simulation anschließend gestartet.

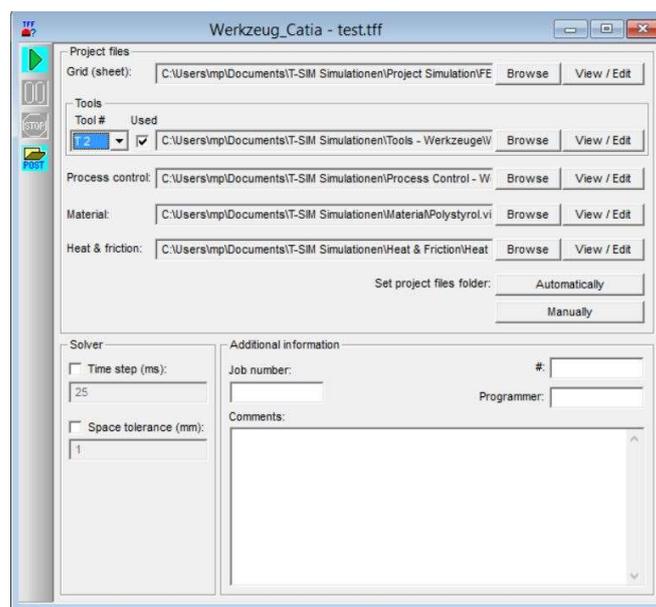


Abbildung 21: Simulation Project in T-SIM

### 3 Simulationssoftware T-SIM von SimpaTec

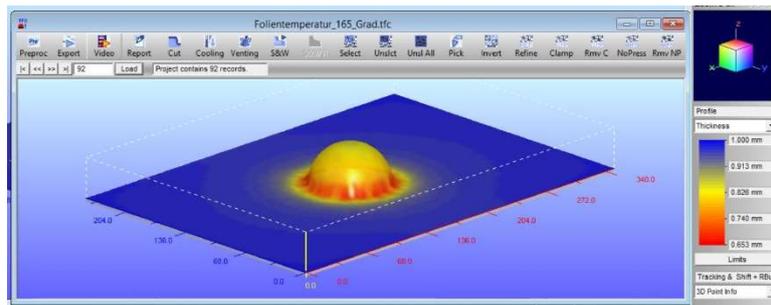


Abbildung 22: Ergebnis der Simulation

Als Ergebnis öffnet sich ein neues Fenster wie in Abbildung 22, in der die Information zur Wanddicke direkt zur Verfügung gestellt wird. Hier werden die unterschiedlichen Wanddicken des Formteils farblich dargestellt, die durch ein zusätzliches Informationsfenster rechts unten in Zahlen definiert werden. Andere Informationen, die man durch die Simulation bekommen kann sind unter anderem:

- Durch das Auswählen des Menus „Cut“, wird ein Schnitt durch das Formteil definiert. Durch diesen Schnitt können genaue Informationen über die Wanddickenverteilung (Abbildung 23) erhalten werden. In diesem „Cut“ Fenster werden nicht nur die Wanddicken, sondern auch zusätzliche Informationen über die Temperaturen und Spannungen der Folie ausgegeben.

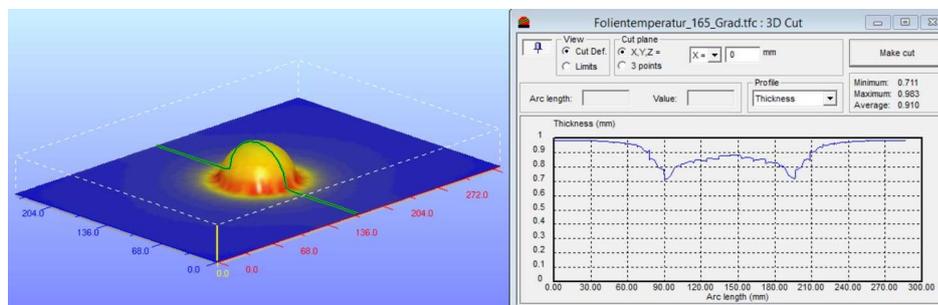


Abbildung 23: Simulationsergebnis (Menu "Cut")

- Mit dem Menu „Cooling“ wird die Temperatur des Formteils nach einer bestimmten Kühlzeit rechnerisch geschätzt.

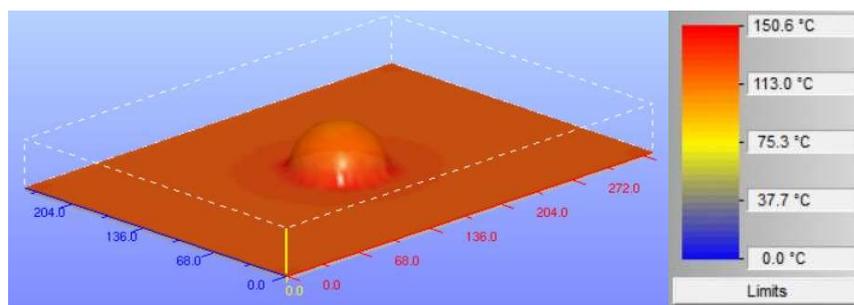


Abbildung 24: Simulationsergebnis 3 (Menu "Cooling")

### 3 Simulationssoftware T-SIM von SimpaTec

- Mit dem Menu „Venting“, wird die Simulation erneut analysiert um zu sehen ob die Folie nach dem Umformen an dem Formwerkzeug anliegt. Hier werden die Informationen in drei unterschiedlichen Farben dargestellt. Rote Farbe bedeutet, dass die Folie das Formwerkzeug nicht berührt. Wenn die Folie das Formwerkzeug nur berührt, wird das in gelber Farbe angezeigt. Die blaue Farbe deutet an, dass die Folie an dem Formwerkzeug anliegt.

# 4 Konstruktion des Formwerkzeugs

Im Rahmen dieser Abschlussarbeit soll ein vorgefertigtes Formwerkzeug im CAD Programm nachkonstruiert werden. Dieses zu erzeugende Formwerkzeug ist eine einfache Form, da sich die Abschlussarbeit hauptsächlich auf die Simulation konzentriert. Das verwendete Formwerkzeug ist eine Halbkugel, die einen Durchmesser von 70 mm besitzt und aus Holz erstellt wurde (Abbildung 25). Die Erstellung des 3D Modells wurde mit Catia V5R21 und Creo durchgeführt. Dies ermöglicht eine spätere Qualitätsbewertung zwischen zweier unterschiedlichen Exportformate.



Abbildung 25: Formwerkzeug aus Holz

## 4.1 Konstruktion des Formwerkzeugs mit Catia V5R21

### 4.1.1 Formwerkzeug 1

Nach dem starten des Catias, wird die Konstruktion in der Workbench „Part Design“ durchgeführt. Es gibt mehrere Möglichkeiten um die Halbkugel zu konstruieren. Hier wurde das Formwerkzeug im Skizzenmodus auf dem YZ-Fläche in einer Form von einem Viertelkreis skizziert. Die angefertigte Skizze wird als nächstes mit dem Menu „Welle“ weiterbearbeitet. Die Funktion „Welle“ dient dazu, dass die Skizze 360° um die z-Achse gedreht und zu einer Halbkugel generiert wird.

Es wurde festgestellt, dass in T-SIM kein Arbeitstisch definiert werden kann. Deshalb musste eine extra Bodenplatte konstruiert werden. Die Bodenplatte soll bei der Simulation später als Arbeitstisch dienen, da sonst die Folie nicht richtig geformt wird. Für die Bodenplatte wurde ein einfaches Rechteck konstruiert und so definiert, dass sich die Halbkugel genau in der Mitte befindet. Die Bodenplatte hat eine Länge von

350 mm und eine Breite von 250 mm. Das entspricht der realen Maße von dem Arbeitstisch der Thermoformmaschine. Die Skizze der Bodenplatte wurde anschließend mit der Menu Funktion „Block“ 3 mm in Gegenrichtung der z-Achse extrudiert, damit sich die Bodenplatte nicht mit der Halbkugel schneidet. Als letztes wurde das fertigkonstruierte Formwerkzeug als .stl Format abgespeichert.

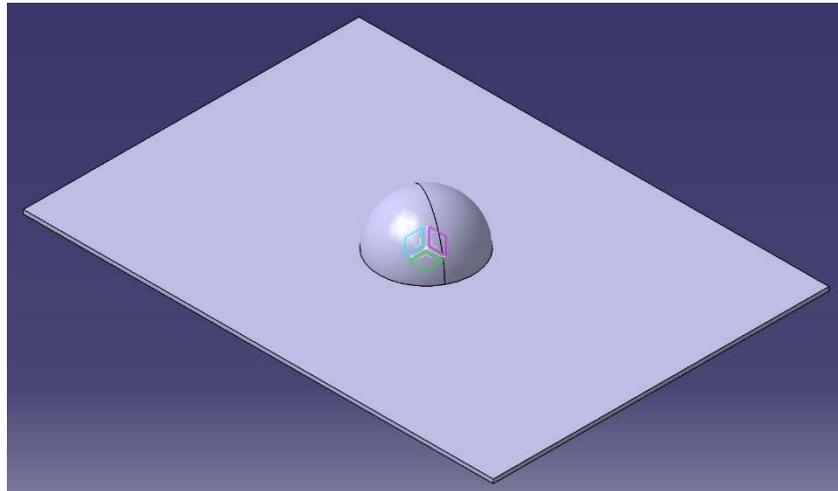


Abbildung 26: Formwerkzeug 1 in Catia

### 4.1.2 Formwerkzeug 2

Da in T-SIM eine zusätzliche Einspannung der Folie definiert werden kann, wurde ein zweites Formwerkzeug konstruiert. Das Formwerkzeug besitzt demnach zwei Halbkugeln, die auf der Bodenplatte symmetrisch platziert sind. Zwischen den beiden Halbkugeln wurde eine zusätzliche Einspannung angebracht.

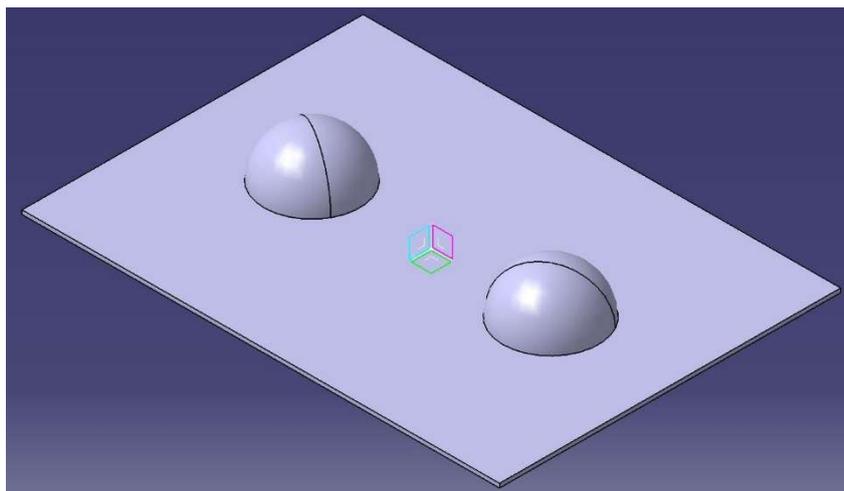


Abbildung 27: Formwerkzeug 2 in Catia

### 4.1.3 Formwerkzeug 3

In der Praxis besitzen der Arbeitstisch und das Formwerkzeug Vakuumanchlüsse damit das Formteil eine gute Qualität erlangt. Deshalb wurden auf dem ersten Formwerkzeug zwölf zusätzliche Bohrungen angebracht, welche gleichmäßig um die Halbkugel herum platziert wurden. Diese Bohrungen haben einen Durchmesser von 1 mm.

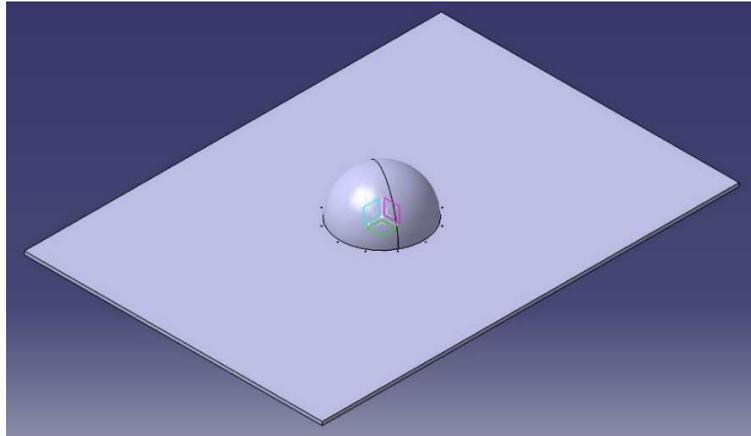


Abbildung 28: Formwerkzeug 3 in Catia

### 4.2 Konstruktion des Formwerkzeugs mit Creo

Genau wie in Catia wird hier als erstes unser erstes Formwerkzeug konstruiert. Anders als bei Catia, wird in Creo als erstes der Befehl „Revolve“ ausgeführt. Nach dem Ausführen des Befehls wird ein Viertelkreis skizziert., der dann zu einer Halbkugel generiert wird. Allerdings musste auch hier der Arbeitstisch oder die Bodenplatte nachkonstruiert werden. Um die Bodenplatte zu konstruieren wurde der Befehl „Extrude“ ausgeführt, der dann die Skizze von einem Rechteck in Gegenrichtung extrudiert. Mit dem fertigen Formwerkzeug, wird das Model als .dxf Format exportiert. Auch in Creo wurden die Formwerkzeuge 2 und 3 nachkonstruiert.

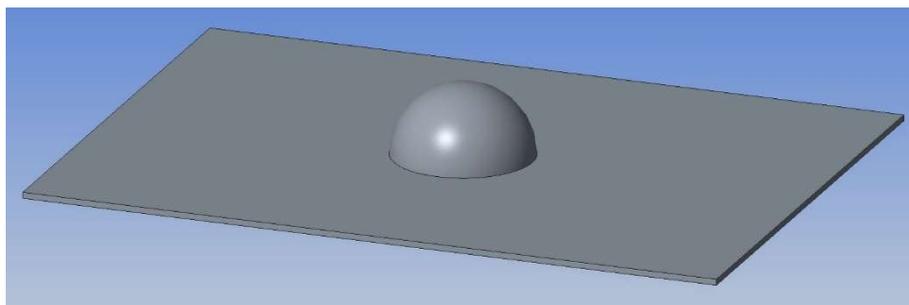


Abbildung 29: Formwerkzeug 1 in Creo

### 4.3 Vergleich der CAD-Modelle in T-SIM

Nach der Konstruktion des Formwerkzeugs, wurden diese in T-SIM als Tool importiert. Aus der Abbildung 30 ist deutlich erkennbar, dass das CAD-Modell von Creo eine bessere Verteilung der Dreieckelemente besitzt. Im Catia-Modell hat die Halbkugel selbst zwar eine gute Verteilung, aber an der Oberfläche der Bodenplatte ist die Verteilung nicht so optimal. Erwähnenswert ist auch das im Fall eines detaillierten Konstruktionsmodells man bei Creo die Möglichkeit hat, die Verteilung der Dreieckelemente zu verfeinern.

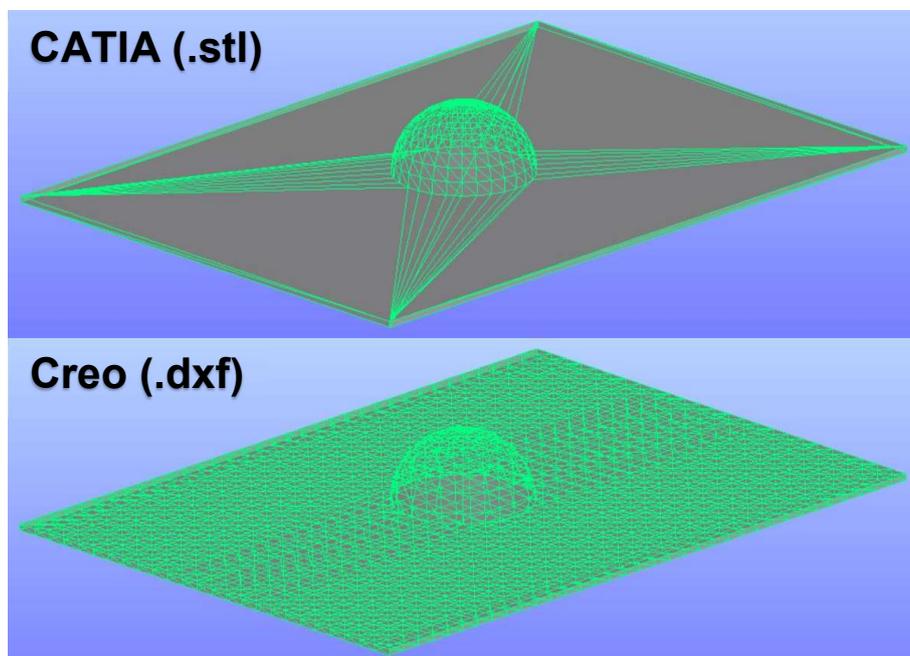


Abbildung 30: Catia und Creo Vergleich in T-SIM

## 5 Versuchsdurchführung der Simulationen

Um optimale Simulationsergebnisse erzielen zu können, wurden mehrere Versuche simuliert. Für die Versuche wurden hauptsächlich unterschiedliche Temperaturen der Kunststofffolien und des Formwerkzeugs getestet. Natürlich hängt eine Optimierung der Ergebnisse nicht nur von diesen beiden Faktoren ab, deshalb werden auch Faktoren wie Foliengröße, die Durchführung ohne Vakuum und ein anderes Material berücksichtigt. Ziel dieser Versuche ist es, ein besseres Verständnis über das die Simulation des Thermoformen in T-SIM zu erlangen, wodurch auch zukünftige Projekte profitieren können.

### 5.1 Versuche mit unterschiedliche Folienfaktoren

Beim Thermoformen spielt die Folientemperatur eine bedeutende Rolle. Aus dem Buch „Thermoformen in der Praxis“ wurde entnommen, dass die ideale Bearbeitungstemperatur der Folie für schlagfestes Polystyrol zwischen 150 – 200°C liegt. Außerdem wurde auch untersucht, ob eine Änderung der Foliengröße wie in Kapitel 2.2.1 beschrieben Auswirkungen haben kann.

#### 5.1.1 Versuche mit unterschiedliche Folientemperatur

Um die optimale Temperatur zu erzielen wurden Versuchsreihen in einem Temperaturbereich zwischen 125 – 200°C in 25°C Schritten durchgeführt. Berücksichtigt wurden hauptsächlich die Foliendicke und die Faltenbildung. Wichtig für die Versuche sind die Standardwerte, die wie folgt vordefiniert wurden:

Foliendicke:	1 mm
Vorblasenstärke:	0,1 kPa
Vakuumstärke:	5 kPa
Formwerkzeugtemperatur:	25 °C
Wärmedurchgangskoeffizient:	300 W/(m <sup>2</sup> K)
Umgebungslufttemperatur:	20 °C
Wärmedurchgangskoeffizient (Luft):	5,7 W/(m <sup>2</sup> K)
Vakuumzeit:	10 s

*Tabelle 4: Standardwerte für Versuche der Folientemperatur*

### Folientemperatur: 150 °C

Als erstes wird die Simulation mit einer Folientemperatur von 150 °C durchgeführt, da diese Temperatur als Mindestbearbeitungstemperatur bestimmt wurde. Das Ergebnis der Simulation wird in Abbildung 31 dargestellt. Dabei ist gut zu erkennen, dass die Folie entlang der scharfen Kante am Boden das Formwerkzeug nicht berührt. Dies kann man bei der Darstellung „Edges“ und „Venting“ erkennen. Grund dafür könnte zum Beispiel ein zu großes Größenverhältnis zwischen Halbzeug und Formwerkzeug sein. Die Folie wird mit unterschiedlichen Farben dargestellt. Diese Farben geben Informationen über die Foliendicke. Wobei sich in diesem Fall die dünnste Stelle der Folie an der scharfen Kante befindet (rot dargestellt). Die dünnste Foliendicke lag bei diesem Versuch bei 0,680 mm.

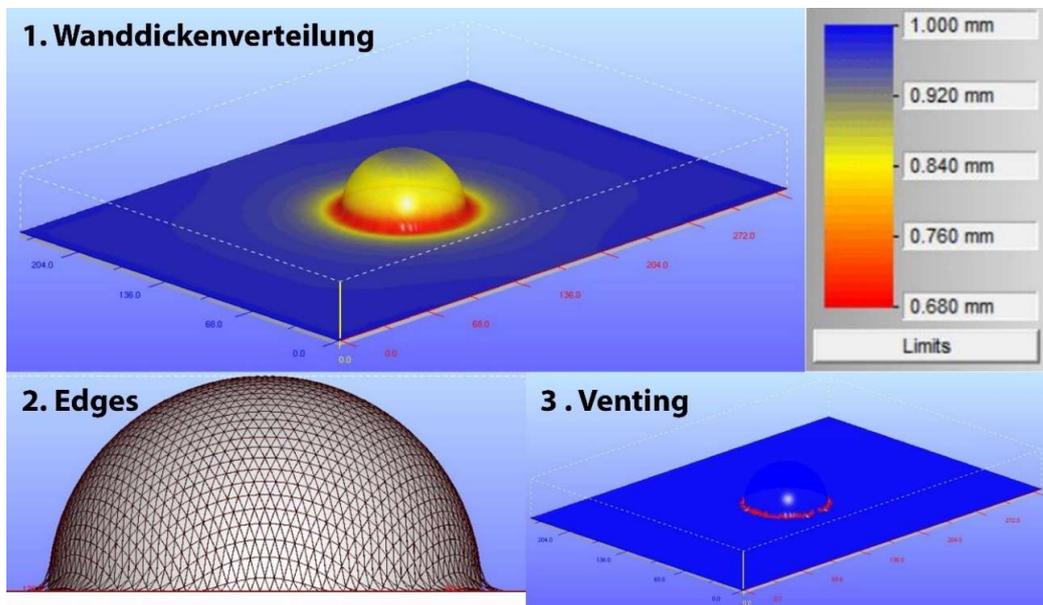


Abbildung 31: Simulationsergebnis - Folientemperatur 150 °C

### Folientemperatur: 125 °C

Als nächstes wurde versucht, mit einer Folientemperatur zu arbeiten, die sich Unterhalb der herkömmlichen Bearbeitungstemperatur befindet. Obwohl die dünnste Foliendicke mit 0,788 mm schon besser als im vorherigen Versuch war, hat sich die Folie an der scharfen Kante leider immer noch nicht richtig geformt. In der Dreieckelemente-Ansicht wird deutlich angezeigt, dass die Folie an der scharfen Kante wie ein Zelt gespannt geformt wurde. Um das zu beweisen wurde mit Hilfe des Menus „Venting“ analysiert und das Ergebnis in Abbildung 32. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt an, wie die Folie die scharfe Kante des Formwerkzeugs nicht berührt. Die Folie war also noch zu steif für die Umformung.

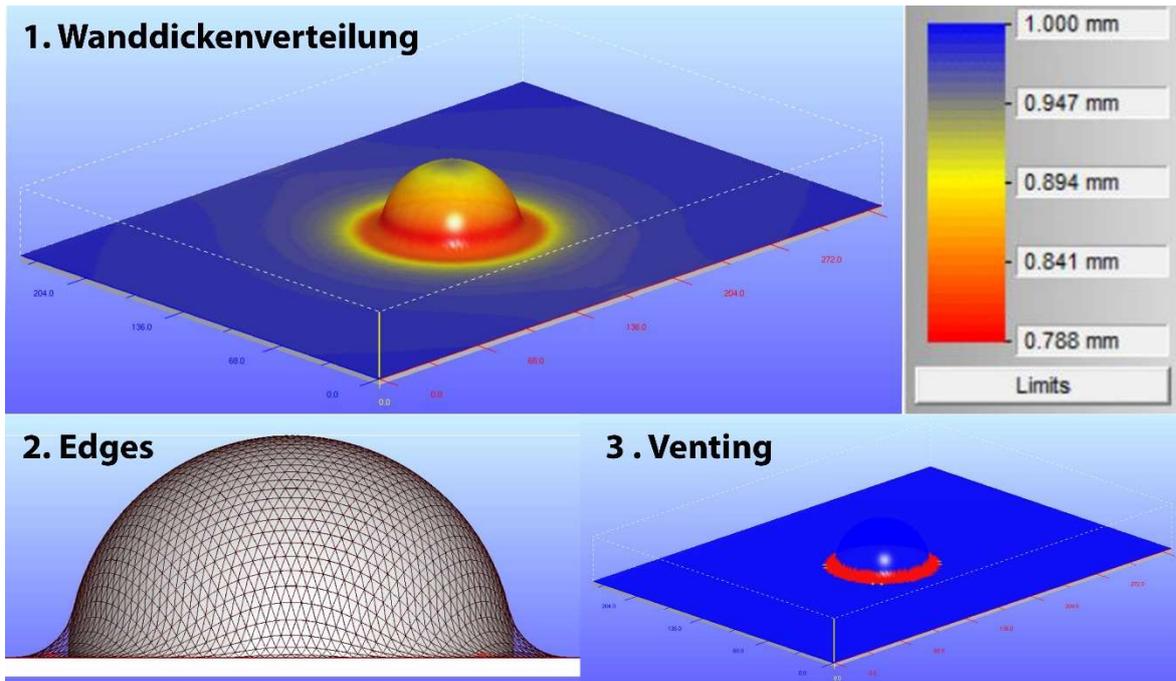


Abbildung 32: Simulationsergebnis - Folientemperatur 125 °C

**Folientemperatur: 175 °C**

Im Vergleich zum ersten Versuch (Folientemperatur 150 °C), lag die dünnste Wanddicke der Folie bei einer Temperatur von 175 °C bei 0,644 mm. Durch die „Venting“ Analyse wurde deutlich, dass die Folie in diesem Fall an der scharfen Kante des Formwerkzeugs besser geformt wurde.

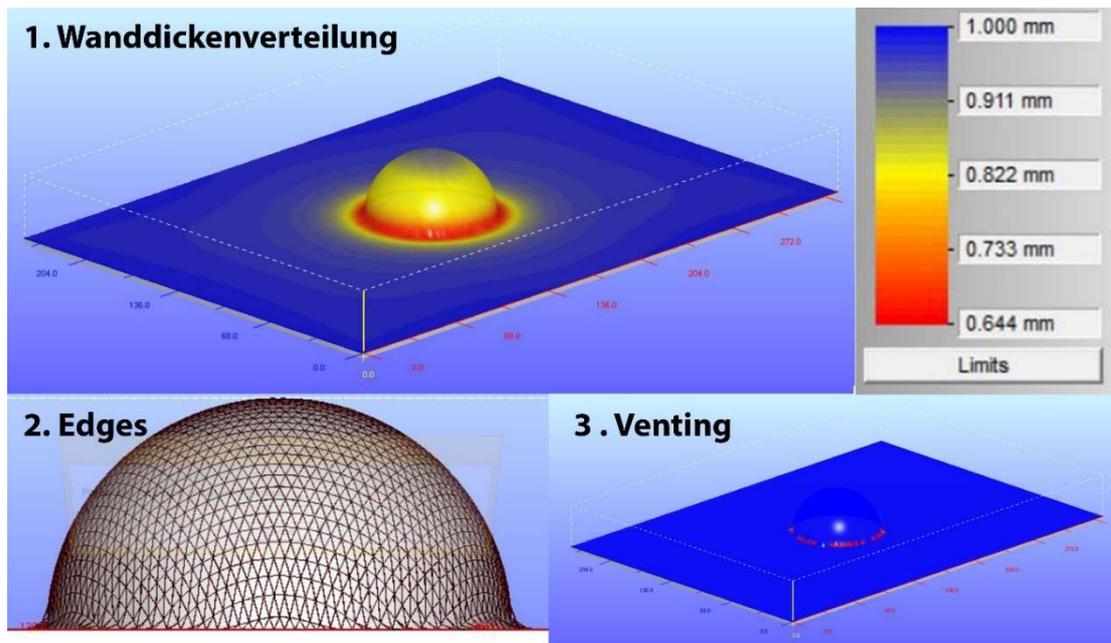


Abbildung 33: Simulationsergebnis - Folientemperatur 175 °C

**Folientemperatur: 200 °C**

Bei einer Folientemperatur von 200 °C lag die dünnste Foliendicke bei 0,638 mm und genau wie bei den vorherigen Versuchen entstand an der scharfen Kante immer noch Luftspalt.

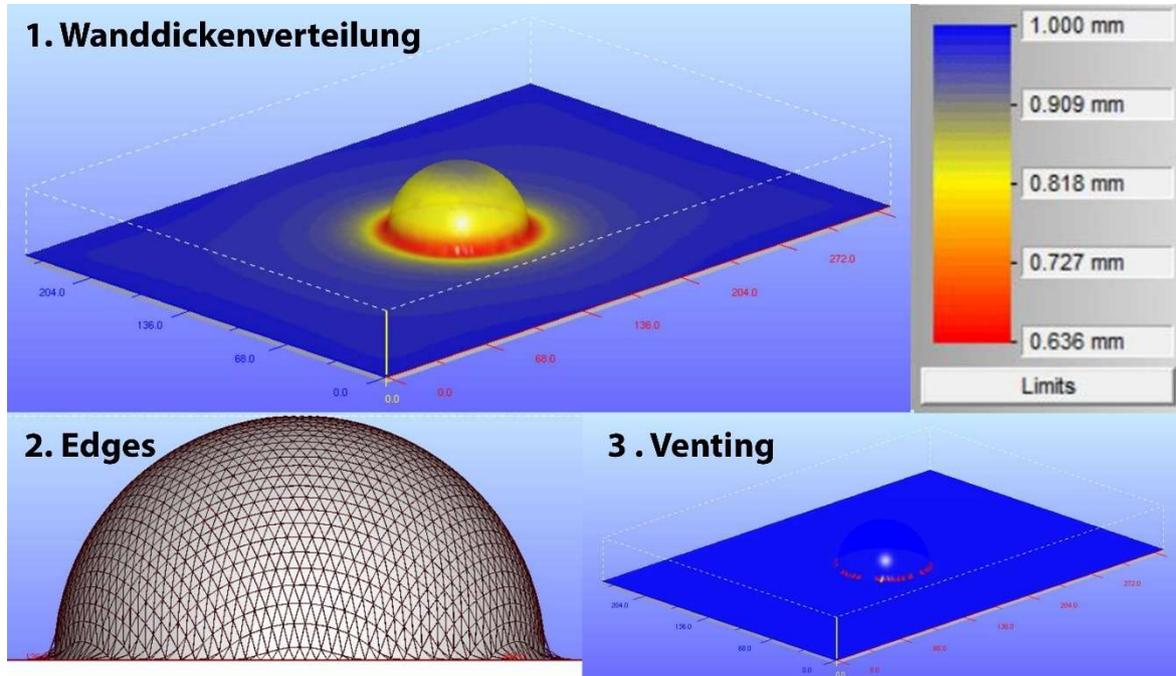


Abbildung 34: Simulationsergebnis - Folientemperatur 200 °C

### 5.1.2 Versuch mit einer kleineren Foliengröße

In Kapitel 2.2.1 wurde beschrieben, dass die Faltenbildung und Luftspalt durch Einschränkung der Folie verringert werden kann. In diesem Versuch wurde die Folie nicht kleiner erstellt, sondern mit einer zusätzlichen Einspannung (Clamping) eingeschränkt (Abbildung 35). Als Folientemperatur wurde bei diesem Versuch 175 °C verwendet.

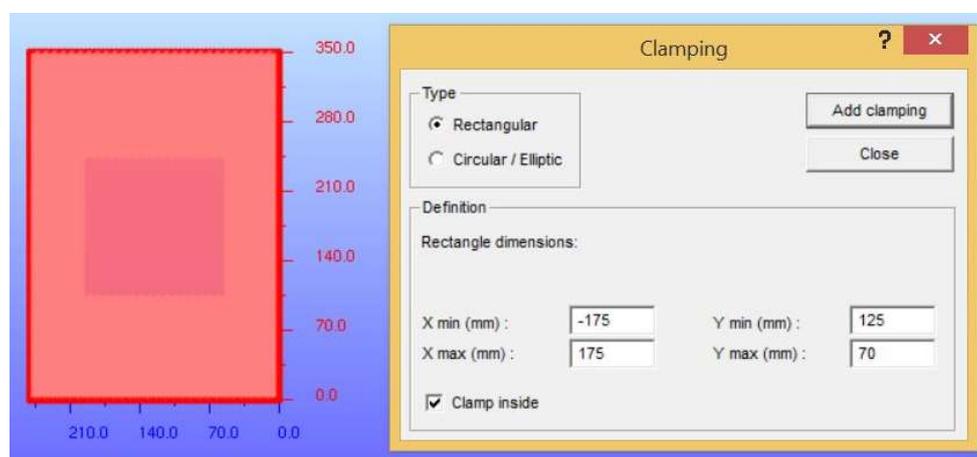


Abbildung 35: Einspannung der Folie (Clamping)

Durch die zusätzliche Einspannung reduzierte sich die dünnste Wanddicke auf 0,582 mm. Ursache dafür könnte die Verstreckung des eingeschränkten Materials sein. Auch hier wurde analysiert und dabei ist herausgekommen, dass der Luftspalt immer noch entstand.

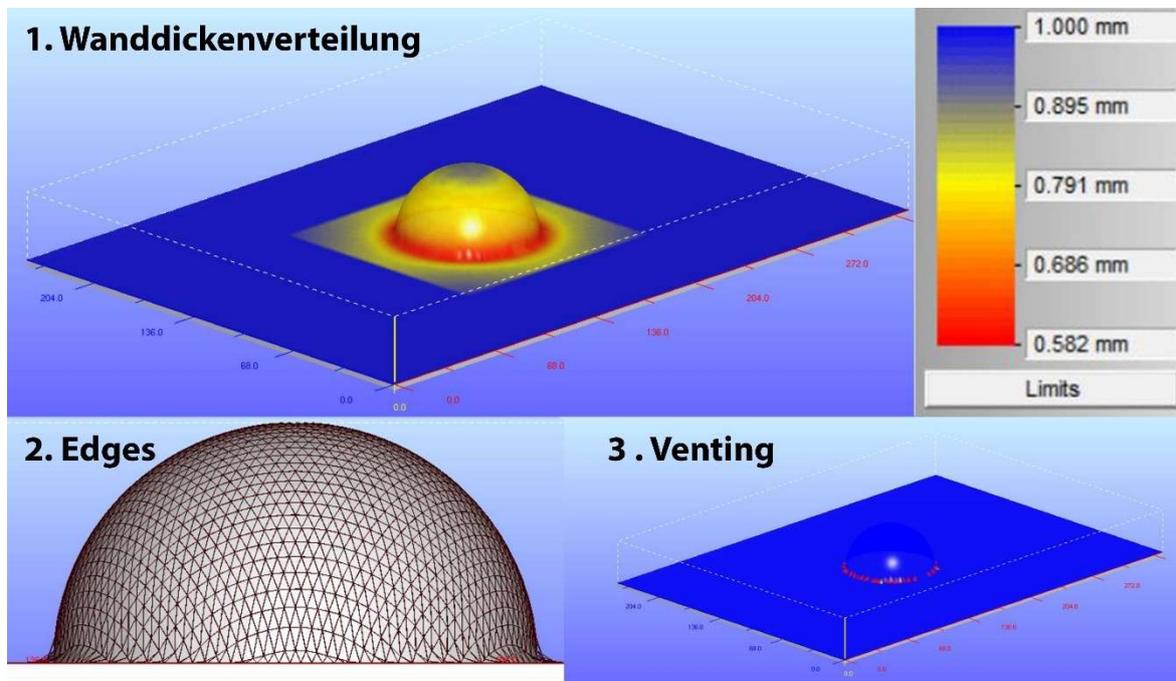


Abbildung 36: Simulationsergebnis - Zusätzliche Einspannung der Folie

## 5.2 Versuche mit unterschiedliche Formwerkzeugfaktoren

In den Versuchen in diesem Kapitel wurden unterschiedliche Formwerkzeugfaktoren getestet. Hauptsächlich wurde der Einfluss von Formwerkzeugtemperatur auf die Folie beim Umformen untersucht. Aus den vorherigen Versuchen wurde eine Folientemperatur von 175 °C als ideale Bearbeitungstemperatur für die Folie bestimmt.

In diesem Kapitel wurden Versuchsreihen in einem Temperaturbereich des Formwerkzeugs zwischen 25 °C - 85 °C in 15 °C Schritten durchgeführt. Da der Versuch mit der Formwerkzeugtemperatur von 25 °C bereits im vorigen Versuch durchgeführt wurde, wurde hier mit Temperaturen ab 40 °C und folgenden, vordefinierten Standardwerte weitergearbeitet:

Foliendicke:	1 mm
Vorblasenstärke:	0,1 kPa
Vakuumstärke:	5 kPa
Folientemperatur:	175 °C
Wärmedurchgangskoeffizient:	300 W/(m <sup>2</sup> K)
Umgebungslufttemperatur:	20 °C
Wärmedurchgangskoeffizient (Luft):	5,7 W/(m <sup>2</sup> K)
Vakuumzeit:	10 s

Tabelle 5: Standardwerte für den Versuch mit unterschiedlichen Formwerkzeugtemperaturen

### Formwerkzeugtemperatur: 40 °C

Im Vergleich zu dem vorigen Versuch (Folientemperatur 175 °C), war das Ergebnis durch ein wärmeres Formwerkzeug optisch nicht zu unterscheiden. Der Luftspalt an der scharfen Kante war immer noch zu erkennen und die dünnste Wanddicke lag bei 0,644 mm.

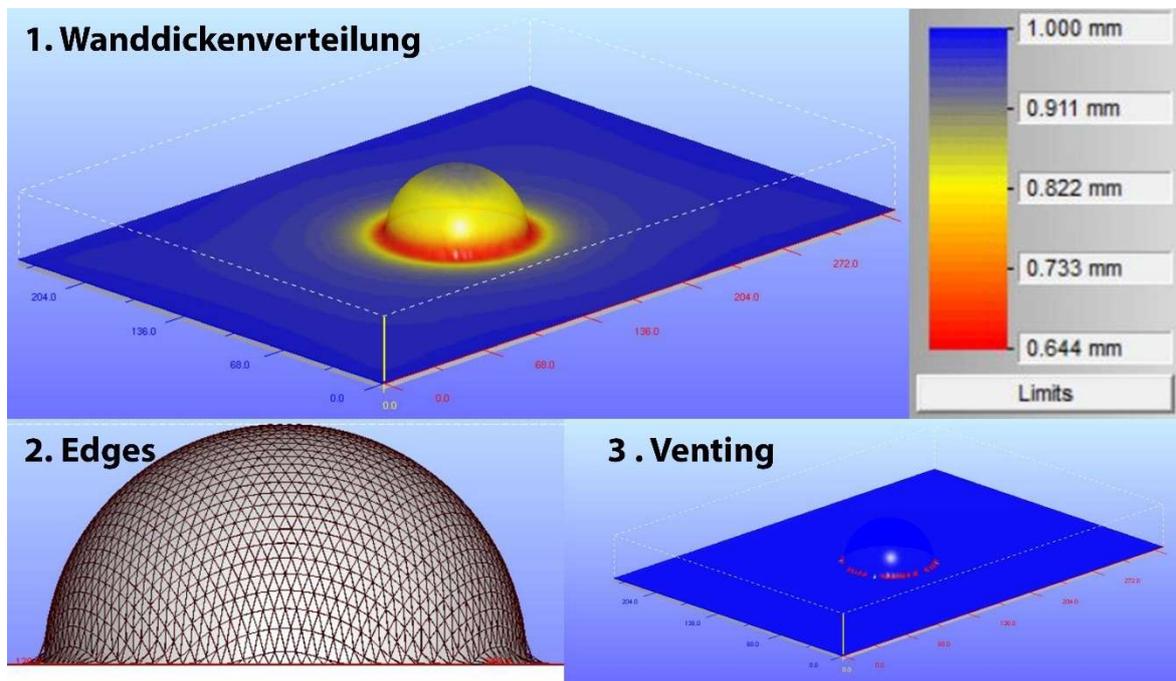


Abbildung 37: Simulationsergebnis - Formwerkzeug 40 °C

**Formwerkzeugtemperatur: 55 °C**

Auch bei einer 50 °C Formwerkzeugtemperatur waren keine Änderungen der Luftspaltbildung und der Wanddicke erkennbar.

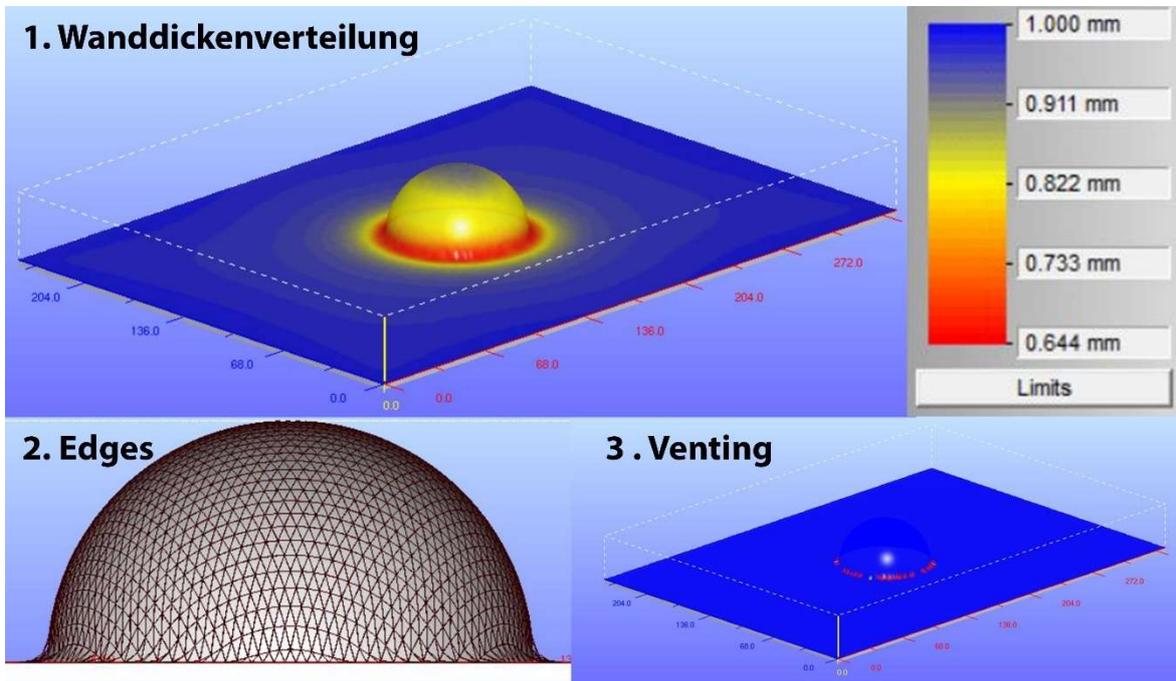


Abbildung 38: Simulationsergebnis - Formwerkzeug 55 °C

**Formwerkzeugtemperatur: 70 °C**

Auch bei einer Formwerkzeugtemperatur von 70 °C waren kaum Veränderungen am Ergebnis sichtbar.

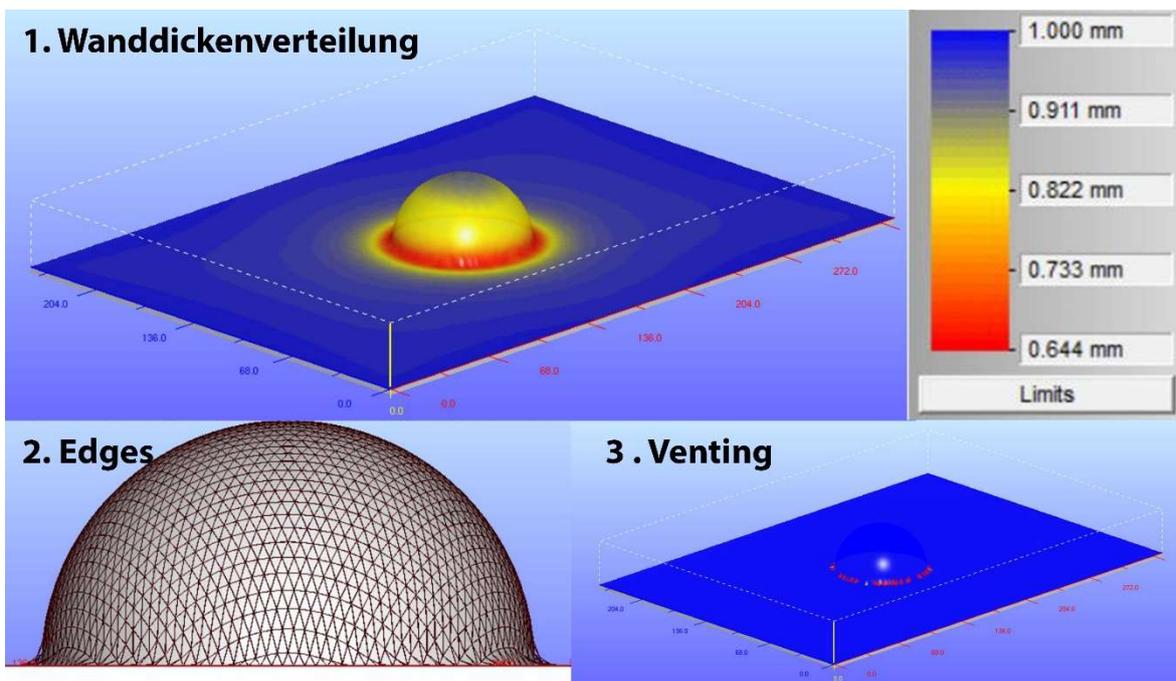


Abbildung 39: Simulationsergebnis - Formwerkzeug 70 °C

## 5.3 Versuche mit unterschiedliche Vakuumfaktoren

Das Vakuum spielt beim Thermoformen eine große Rolle. Deshalb wird in diesem Kapitel der Einfluss von Vakuum getestet. Durch Änderung der Vakuumstärke und der Vakuumzeit wird untersucht, wie die Qualität des Formteils im Endergebnis aussieht.

### 5.3.1 Versuch ohne Vakuum

Als erstes wurde versucht, den Thermoformenprozess ohne Vakuum durchzuführen. Das Ergebnis war eindeutig, die Folie wurde wie ein Zelt gespannt. Ohne Vakuum konnte die Folie nicht auf die gewünschte Form umgeformt werden.

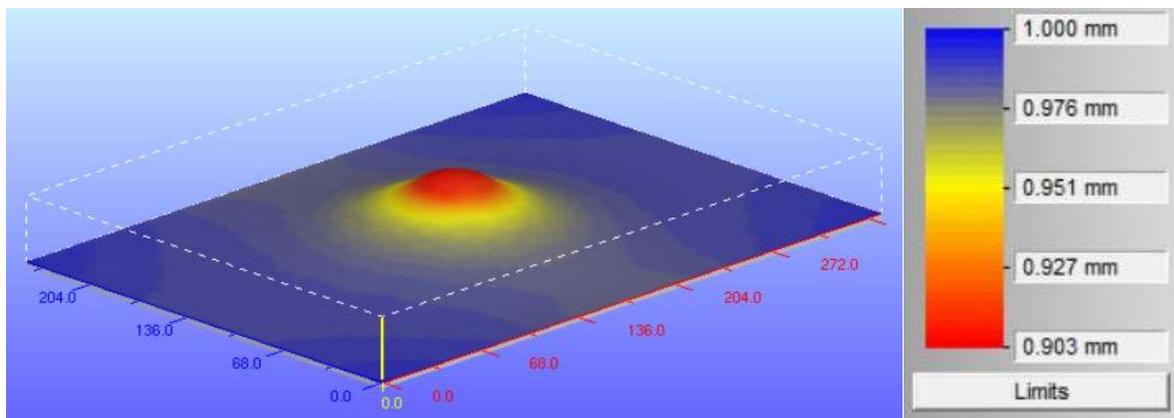


Abbildung 40: Simulationsergebnis - ohne Vakuum

### 5.3.2 Versuch mit höherer Vakuumstärke

Durch ein zu starkes Vakuum wurde der Prozess sehr schnell durchgeführt und die heiße Folie konnte nicht richtig abkühlen. Dadurch entstand ungewünschte Faltenbildung. Wie man in Abbildung 41 erkennen kann, war die Faltenbildung durch eine Vakuumstärke von 50 kPa sichtbar. Vor allem in der Dreieckelemente-Ansicht waren die Faltenbildungen deutlich zu erkennen. Durch die höhere Vakuumstärke entstand kein Luftspalt zwischen Folie und Formwerkzeug. Das heißt, die Folie berührte komplett die scharfe Kante des Formwerkzeugs.

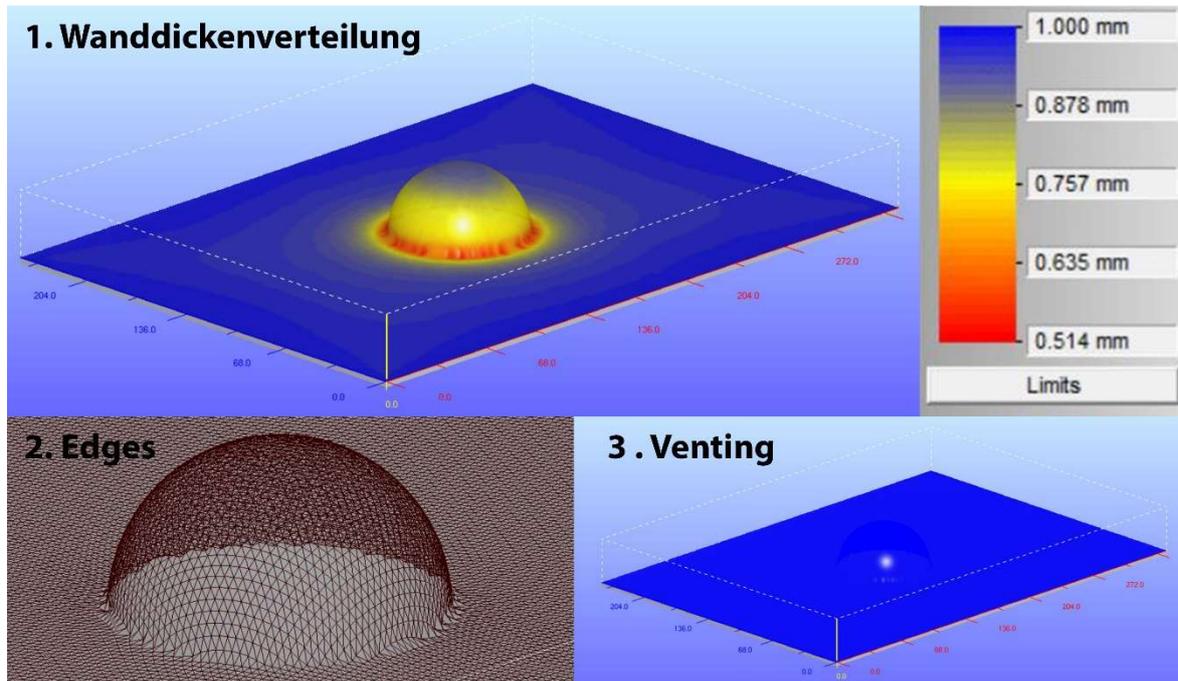


Abbildung 41: Simulationsergebnis - Höhere Vakuumstärke

### 5.3.3 Versuch mit längere Vakuumzeit

In Kapitel 2.2.1 wurde beschrieben, dass eine längere Vakuumzeit die Faltenbildung reduzieren kann. Anstatt 10 s wurde hier mit einer verlängerten Vakuumzeit von 25 s gearbeitet. Dabei ist zu beachten, dass die Vakuumstärke wieder bei 5 kPa liegt. Im Vergleich zu dem Ergebnis aus Kapitel 5.1, konnte durch eine längere Vakuumzeit die dünnste Wanddicke auf 0,553 reduziert werden.

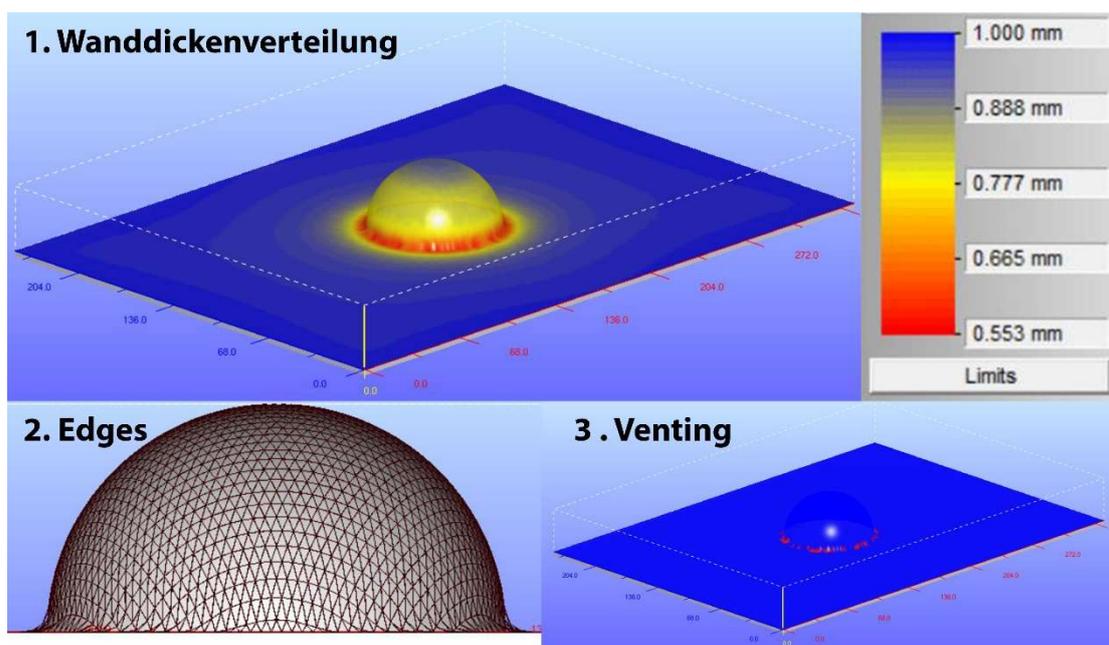


Abbildung 42: Simulationsergebnis - Längere Vakuumzeit

## 5.4 Versuch mit dem Material Polypropylen

Nach dem die Versuche mit dem Material Polystyrol durchgeführt wurden, wurde als Nächstes das Verhalten der Folie aus Polypropylen untersucht. Da Polypropylen steifer als Polystyrol ist, mussten die Einstellungen für das Vorblasen und Vakuum angepasst werden. Die Vorblasenstärke wurde auf 0.2 kPa und die Vakuumstärke auf 10 kPa eingestellt. Bei Polypropylen liegt die übliche Bearbeitungstemperatur zwischen 180 – 200 °C, daher wurde in diesem Versuch eine Temperatur von 180 °C für die Folie ausgewählt. Auch hier konnte die Folie an der scharfen Kante nicht richtig geformt werden. Die Folie konnte die Kante entlang der Halbkugel nicht berühren und verursachte einen Luftspalt.

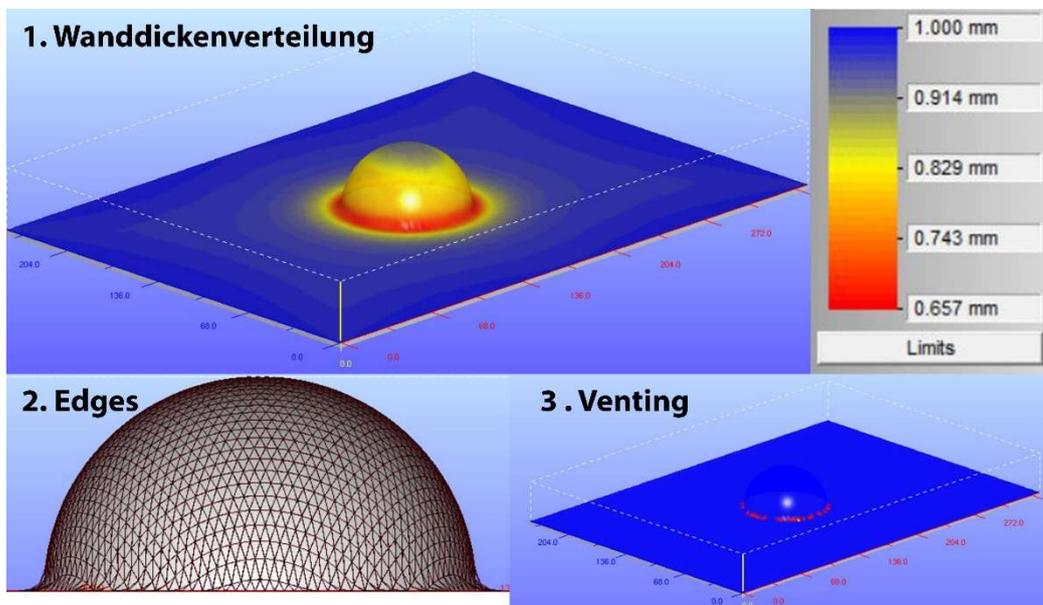


Abbildung 43: Simulationsergebnis - Material PP

## 5.5 Versuch mit einem Niederhalter

Mit einer zusätzlichen Einspannung in der Mitte der Folie wurde ein Niederhalter definiert, da bei diesem Versuch zwei formwerkzeuge zum Einsatz kommen. In Abbildung 44 wird dargestellt, wie die Einspannung definiert wurde. Die zusätzliche Einspannung wurde in der X-Achse von 0 Punkt in negative und positive Richtung um 15 mm definiert, die dann entlang der Y-Achse verlängert wurde.

## 5 Versuchsdurchführung der Simulationen

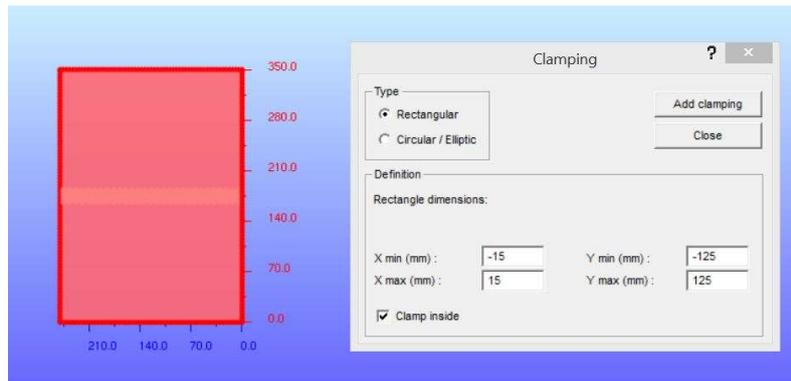


Abbildung 44: Einstellung des Niederhalters

Durch den Niederhalter, musste die Vorblasenstärke angepasst werden. Anstatt 0,1 kPa wurde hier mit einer Vorblasenstärke von 0,2 kPa gearbeitet, damit die Höhe der vorgeblasenen Folie ungefähr der Höhe des Formwerkzeugs entspricht. Das gleiche Problem aus den vorigen Versuchen war leider auch in diesem Versuch noch zu erkennen. Die Folie wurde an der scharfen Kante nicht richtig geformt und zwischen Folie und Formwerkzeug ist noch ein Luftspalt entstanden. Der Niederhalter verursachte bei der Umformung ein begrenztes Material, so dass die dünnste Wanddicke durch die Verstreckung bei 0,635 mm lag.

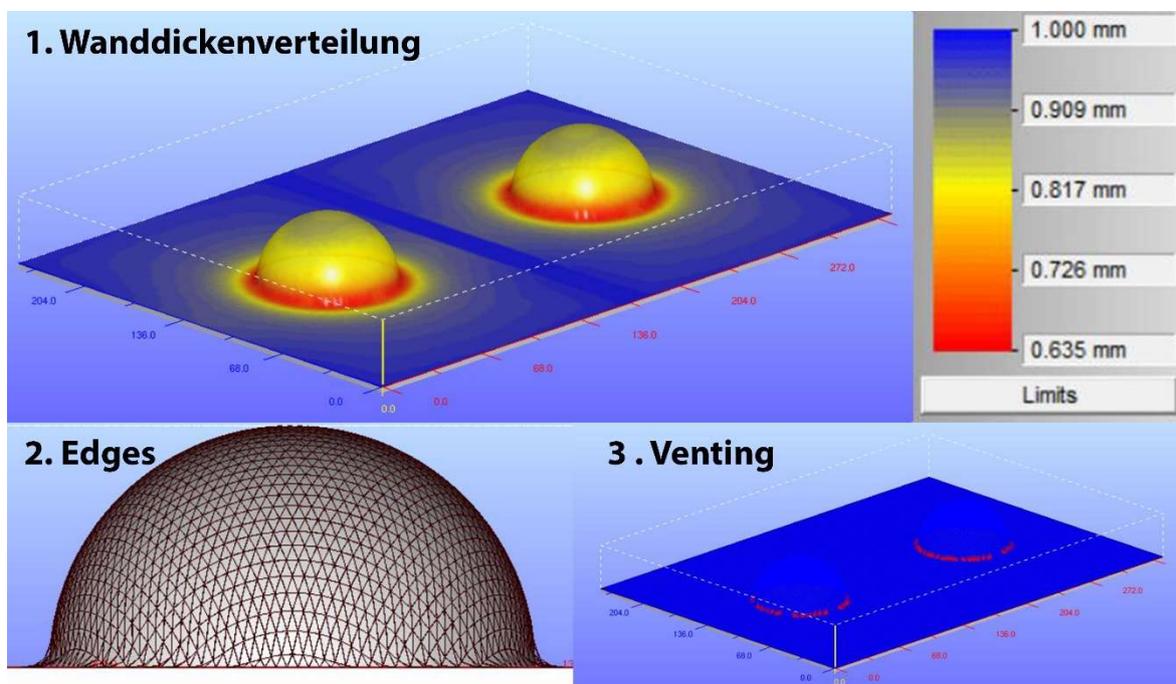


Abbildung 45: Simulationsergebnis – Niederhalter

## 5.6 Versuch Formwerkzeug mit Bohrungen

Als letztes wurde mit dem dritten Formwerkzeug untersucht, ob durch zusätzliche Bohrungen die Umformung an der scharfen Kante verbessert werden kann. Das Ergebnis der Simulation zeigt allerdings an, dass das Problem an der scharfen Kante immer noch entstand. Das heißt in diesem Fall waren die Entlüftungsbohrungen keine Optimierungshilfe für die Simulation.

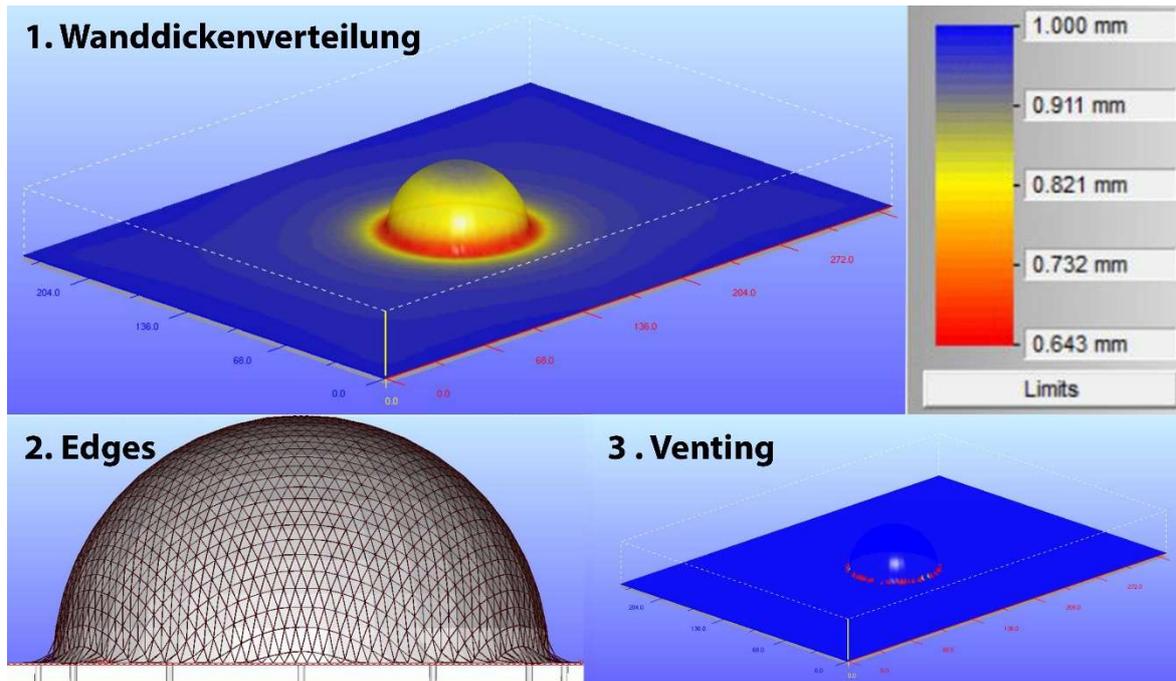


Abbildung 46: Simulationsergebnis - Formwerkzeug mit Bohrungen

## 6 Optimierungsergebnisse

### 6.1 Optimale Parameter

Im vorigen Kapitel wurden Versuche mit unterschiedlichen Parametern durchgeführt. Die wichtigsten Faktoren waren in diesem Fall die Wanddickenverteilung und die Formteilqualität. Aus den Simulationsergebnissen wurden anschließend die optimalen Parametereinstellungen bestimmt:

#### 1. Folientemperatur

Aus den Versuchen wurde der Zusammenhang zwischen Folientemperatur und Wanddicke in einem Diagramm bildlich zusammengefasst. Zwar hat die dünnste Wanddicke unterhalb der Bearbeitungstemperatur den optimaleren Wert, aber die Folie selbst ist dadurch noch zu steif für die Umformung. Oberhalb der Bearbeitungstemperatur wurden keine Versuche durchgeführt, da das Polystyrol in diesem Temperaturbereich anfängt zu zersetzen. Aus den Versuchen wurde eine Folientemperatur von 175 °C als optimale Folientemperatur festgelegt.

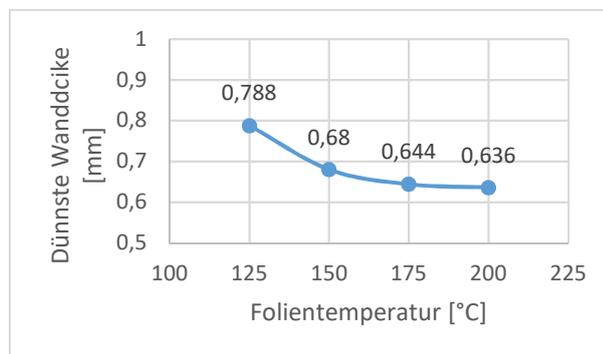


Abbildung 47: Folientemperatur-dünnste Wanddicke – Diagramm

#### 2. Formwerkzeugtemperatur

Die Formwerkzeugtemperatur spielt eine Rolle bei der Abkühlung der heißen Folie. Durch die Versuche mit unterschiedlichen Formwerkzeugtemperaturen wurde festgestellt, dass in der Simulation keine Änderung bemerkbar ist. Bei einer Produktion wird zu Beginn des Thermoformen immer mit etwas kühlerer Temperatur gearbeitet, die dann mit zunehmender Produktion wärmer wird bis letzten Endes eine bestimmte konstante Temperatur erreicht wird. Aus unserer Versuchsreihe hat sich 25 °C als optimale Temperatur für das Formwerkzeug ergeben.

### 3. Vorblasen und Vakuum

Das Vorblasen beim Thermoformen sollte die Wölbungshöhe der Folie ungefähr auf die Höhe des Formwerkzeugs hoch blasen. Bei Polystyrol ergab sich eine Vorblasenstärke von 0,1 kPa als guter Wert. Diese kann je nach Foliengröße natürlich auch unterschiedlich ausfallen. So muss bei einer eingespannten Folie zum Beispiel die Vorblasenstärke auf 0,2 kPa erhöht werden. Deshalb ist die optimale Vorblasenstärke ein Parameter, der immer unter Betrachtung von Material und Größe angepasst werden muss.

Auch die Vakuumstärke und -zeit sind Parameter, die angepasst werden müssen. Bei Polystyrol sollte die Vakuumstärke nicht zu groß und schnell gewählt werden. Die Stärke- und Zeitparameter sind zueinander verknüpft und stehen in Abhängigkeit zu einander. So kann zum Beispiel eine zu schnelle Vakuumzeit mit hoher Vakuumstärke Faltenbildung verursachen, da dem Material keine Zeit verbleibt sich aus der Verstreckung zu stauchen.

## 6.2 Simulationsbeispiele mit unterschiedlichen Formwerkzeugen

Durch die optimalen Parameter können jetzt Simulationen mit unterschiedlichen Formwerkzeugen durchgeführt werden. Als erstes wird das erste Formwerkzeug (Halbkugel) modifiziert, indem die scharfe Kante abgerundet wurde. In diesem Fall blieben die Parameter aus Kapitel 6.1 unverändert. Durch die Abrundung kann die Folie in gewünschtem Form umgeformt werden und es entsteht kein Luftspalt. In Abbildung 48 wird das Ergebnis der Simulation dargestellt und es ist zu erkennen, dass die dünnste Wanddicke bei 0,739 mm liegt.

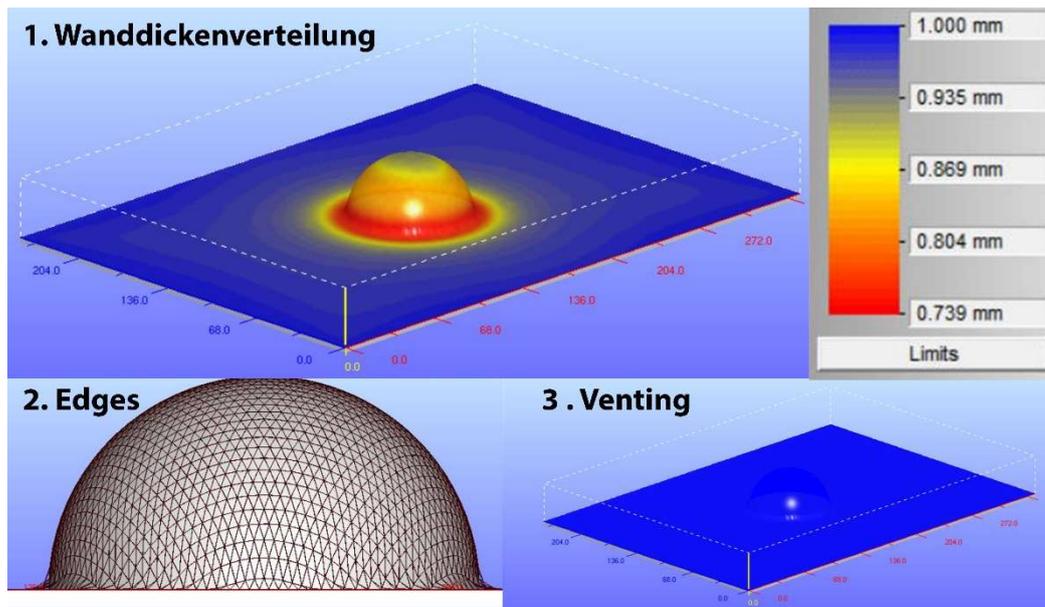


Abbildung 48: Simulationsergebnis - Formwerkzeug 4

Als nächstes werden zwei Formwerkzeuge eingesetzt, die von T-SIM zu Verfügung gestellt worden sind. Das Simulationsergebnis vom Formwerkzeug 5 wird in Abbildung 49 dargestellt. Für dieses Formwerkzeug musste die Vorblasenstärke auf 0,15 kPa und Vakuumstärke auf 10 kPa angepasst werden, damit man ein optimales Ergebnis erreicht werden konnte. Anhand dieses Beispiels ist gut erkennbar, dass auch bei einem komplexen Formwerkzeug die Folie richtig umgeformt wird und kein Luftspalt entsteht. In diesem Fall liegt die dünnste Wanddicke bei 0,249 mm.

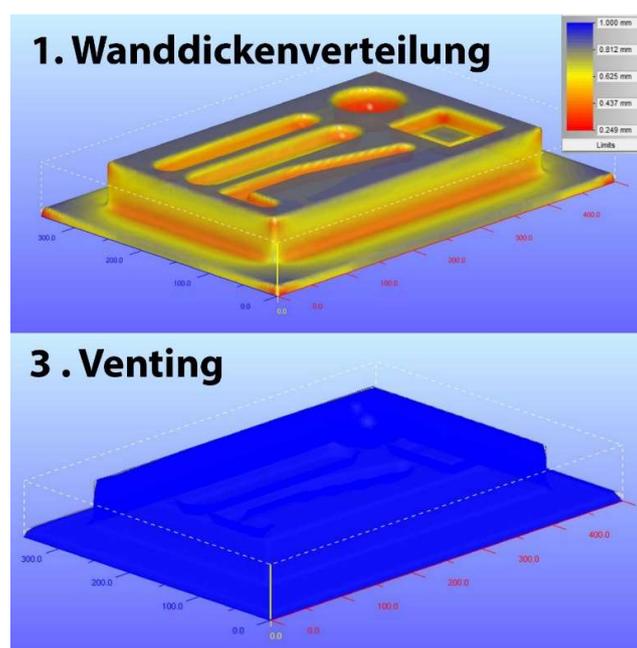


Abbildung 49: Simulationsergebnis - Formwerkzeug 5

Als letztes wurde ein Formwerkzeug eingesetzt, das ebenfalls eine komplexe Konstruktion besitzt. Abbildung 50 zeigt, dass dank unserer Optimierungsparameter der Thermoformenprozess gut durchgeführt werden konnte. Wobei für Formwerkzeug 6 die Vorblasenstärke auf 0,2 kPa angepasst werden musste, damit die Wölbungshöhe der Folie ungefähr die gleiche Höhe des Formwerkzeugs erreicht.

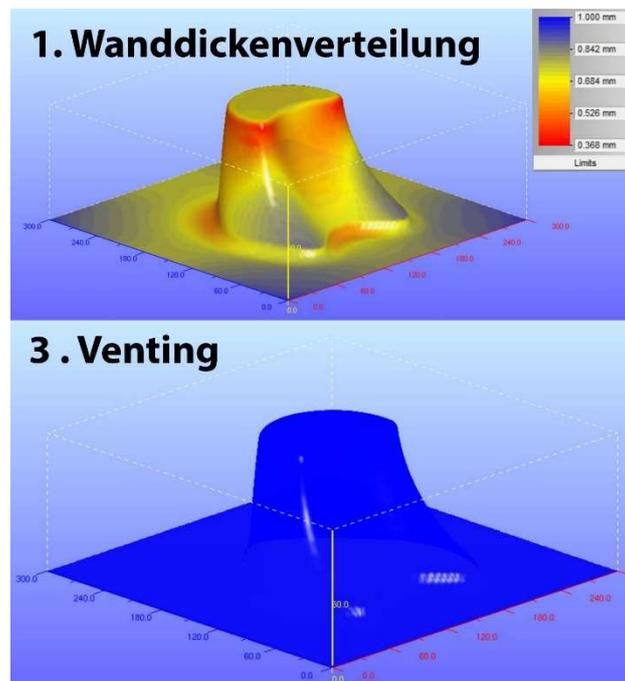


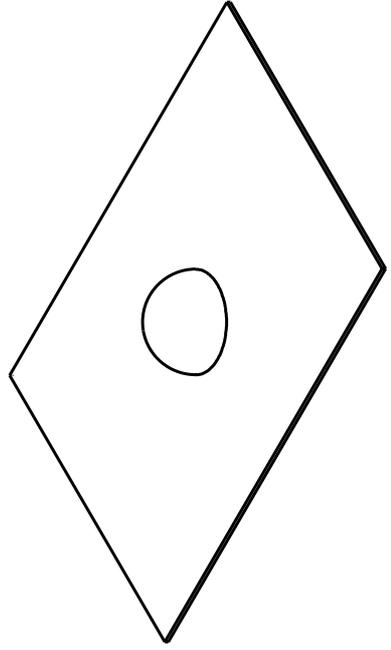
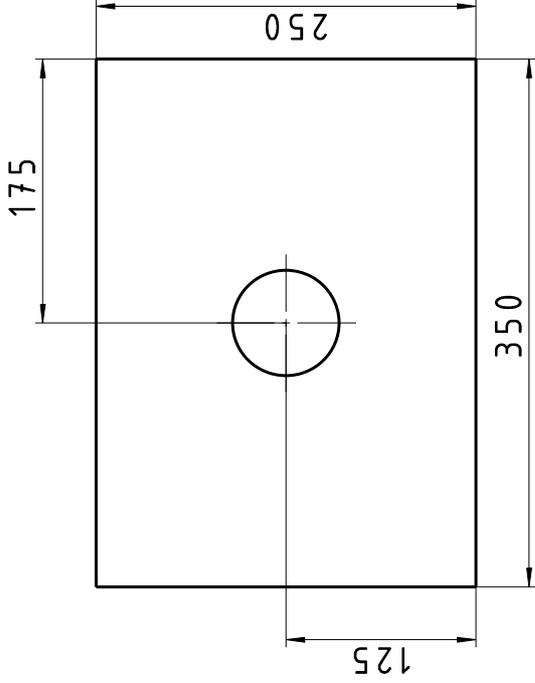
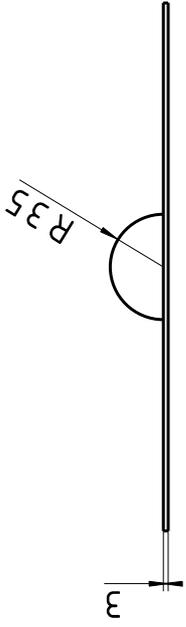
Abbildung 50: Simulationsergebnis - Formwerkzeug 6

## 7 Fazit

Die Simulationssoftware T-SIM von Simpattec hat bewiesen, dass Simulationen realitätsgetreu durchgeführt werden können. Aus den Versuchen wurden die optimalen Parameter für das Thermoformen mit dem vorbestimmten Formwerkzeug abgeleitet. Wie auch aus der Praxis bekannt kann die Folie an der scharfen Kante des Formwerkzeugs nicht richtig geformt werden.

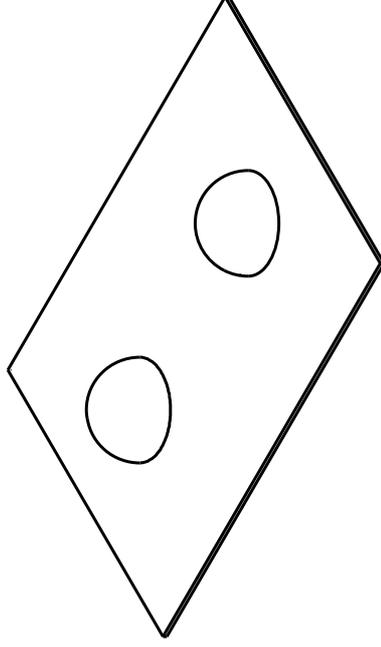
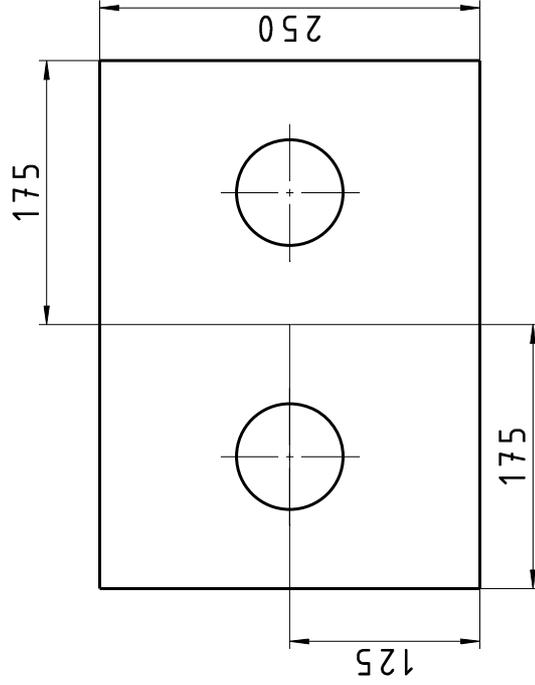
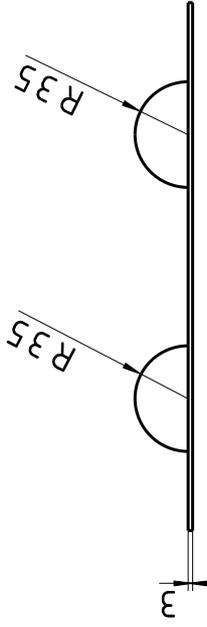
Ein Verbesserungsvorschlag, der sich aus dieser Arbeit ergeben hat wäre die Modifizierung des Formwerkzeugs. Anstatt einer scharfe Kante, wäre zum Beispiel eine Abrundung eine bessere Lösung, um die Folie richtig formen zu können. Dabei ist allerdings wichtig zu beachten, dass bei jeder Modifizierung die Funktion des Formteils weiter bestehen bleibt.

Durch die Simulationen profitieren hauptsächlich Entwickler während der Testphase, da sie keine umständlichen Testreihen durchführen müssen. Ziel dieser Entwicklung sind Optimierungen zu erreichen um ökonomisch produzieren zu können. Mit Hilfe der Analyse durch die Simulationen können so beispielsweise die optimale Wanddickenverteilung des Formteils rechnerisch bestimmt werden. Das Ergebnis der Simulation gibt Informationen ob die erzeugte Wanddicke die minimale Dicke überschreitet oder sogar zerreißt. Mit Hilfe dieser Information haben Konstrukteure die Möglichkeit unterschiedliche Parametereinstellungen auszuprobieren oder sogar das Formwerkzeug selbst zu modifizieren.



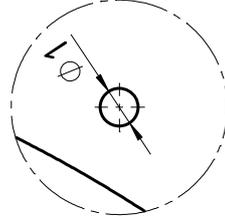
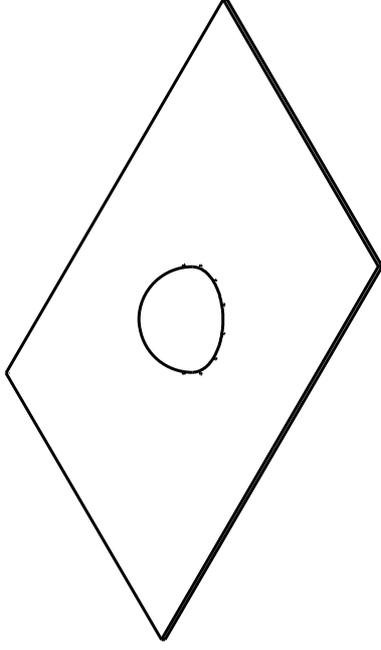
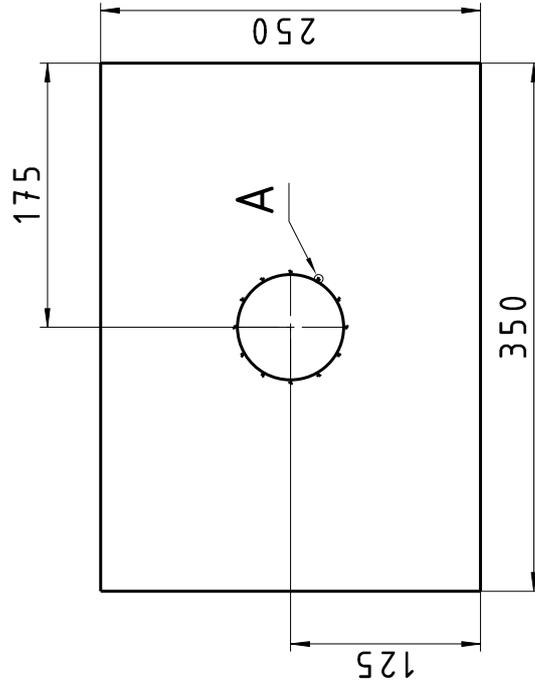
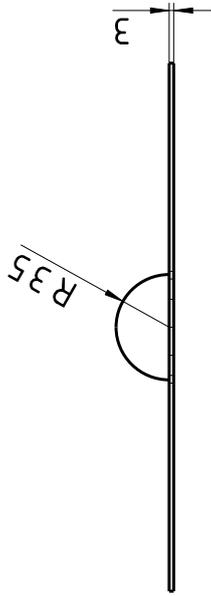
Maßstab 1:5    Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m

Verantwortl. Abt./ig	Technische Referenz	Erstellt durch	Genehmigt von
	Bachelorarbeit	Dennis Soebagio	-
 Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg Hamburg University of Applied Sciences		Dokumentenart	Dokumentenstatus
		Einzelteilzeichnung	freigegeben
		Titel, Zusätzlicher Titel	
		FORMWERKZEUG 1	
		Änd.	Ausgabedatum
		A	01.02.2018
		Spr.	Blatt
		de	01/01



## Maßstab 1:5 Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m

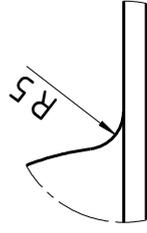
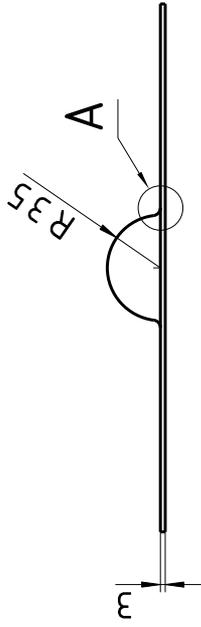
Verantwortl. Abtlg	Technische Referenz	Erstellt durch	Genehmigt von
	Bachelorarbeit	Dennis Soebagio	-
 <b>Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg</b> Hamburg University of Applied Sciences		Dokumentenart	Dokumentenstatus
		Einzelteilzeichnung	freigegeben
		Titel, zusätzlicher Titel	
		<b>FORMWERKZEUG 2</b>	
		FWZ02	
		And.	Ausgabedatum
		A	01.02.2018
		Spr.	de
		Blatt	01/01



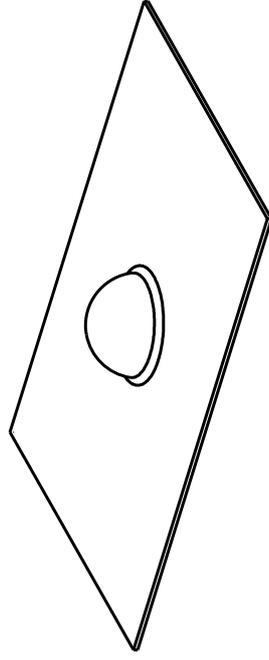
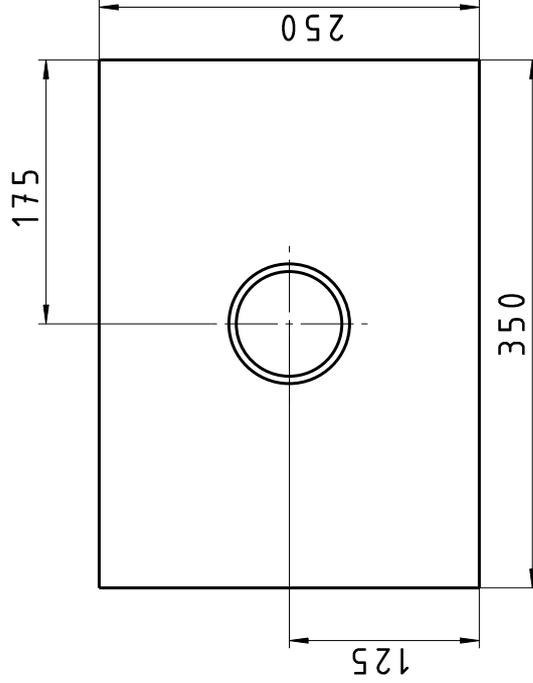
**A**  
Maßstab: 5:1

**Maßstab 1:5 Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m**

Verantwortl. Abt./ig	Technische Referenz	Erstellt durch	Genehmigt von
	Bachelorarbeit	Dennis Soebagio	-
 <b>Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg</b> Hamburg University of Applied Sciences		Dokumentenart	Dokumentenstatus
		Einzelteilzeichnung	freigegeben
		Titel, Zusätzlicher Titel	
		<b>FORMWERKZEUG 3</b>	
		Änd.	Ausgabedatum
		A	01.02.2018
		Spr.	Blatt
		de	01/01



**A**  
Maßstab: 1:1



**Maßstab 1:5 Allgemeintoleranzen DIN ISO 2768 - m**

<b>Verantwortl. Abt./ig</b> Technische Referenz Bachelorarbeit	<b>Erstellt durch</b> Dennis Soebagio	<b>Genehmigt von</b> -
	<b>Dokumentenart</b> Einzelteilzeichnung	
<b>Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg</b> Hamburg University of Applied Sciences		<b>Dokumentenstatus</b> freigegeben
		<b>FWZ04</b>
<b>Titel, Zusätzlicher Titel</b> <b>FORMWERKZEUG 4</b>		<b>Änd. Ausgabedatum</b> A 01.02.2018
		<b>Spr. Blatt</b> de 01/01

## Literaturverzeichnis

- Abts, G. (2014). *Kunststoff-Wissen für Einsteiger* (Bd. 2. Auflage). München: Carl Hanser Verlag.
- Agerer, M. (18. 12 2017). *maschinenbau-wissen*. Abgerufen am 18. 12 2017 von maschinenbau-wissen: <http://www.maschinenbau-wissen.de>
- Bonnet, M. (2016). *Kunststofftechnik* (Bd. 3. Auflage). Köln: Springer Vieweg.
- Carlowitz, D.-I. B. (1995). *Kunststoff Tabellen 4. Auflage*. Carl Hanser Verlag München Wien.
- Formech International Ltd. (n.d.). *The University of Arizona*. Retrieved from The University of Arizona: <https://capla.arizona.edu/forms/shop/fromechvacuumguide.pdf>
- Fritsche, C., Fritsche, H., Gradl, W., Kolbinger, J., Küspert, K.-H., Lindenblatt, G., . . . Schwarze, F. (2016). *Fachkunde Kunststofftechnik* (Bd. 5. Auflage). Verlag Europa-Lehrmittel.
- ILLIG Maschinenbau GmbH & Co. KG. (kein Datum). *www.illig.de*. Von *www.illig.de*: [http://www.illig.de/uploads/tx\\_illig/KFG37\\_5-2010\\_DE\\_web.pdf](http://www.illig.de/uploads/tx_illig/KFG37_5-2010_DE_web.pdf) abgerufen
- Kern GmbH. (kein Datum). *www.kern.de*. Von *www.kern.de*: [https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/polystyrol-ps?n=2101\\_1](https://www.kern.de/de/technisches-datenblatt/polystyrol-ps?n=2101_1) abgerufen
- Müller, M. (2005). *ChemPage.de*. Von *ChemPage.de*: <http://www.chempage.de/theorie/kunststoffe.htm> abgerufen
- Noltewerk GmbH & Co. KG. (1. 7 2015). *Noltewerk*. Abgerufen am 18. 12 2017 von *www.noltewerk.de*: [https://www.noltewerk.de/sites/default/files/downloads/th\\_kunststoffe\\_eigenschaften\\_0715\\_de.pdf](https://www.noltewerk.de/sites/default/files/downloads/th_kunststoffe_eigenschaften_0715_de.pdf)
- Plastics Europe. *Plastics Europe*. Von Plastics Europe: <http://www.plasticseurope.org/> abgerufen
- Schürmann, P. D.-I. (2007). *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden 2. Auflage*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Schwarz, D.-I., Ebeling, D.-I.-W., Huberth, D.-I., Richter, D.-I., Schirber, D.-I., & Schlör, D.-I. (2016). *Kunststoffkunde 10. Auflage*. Vogel Business Media GmbH & co. KG, Würzburg.
- Schwarzmann, P., & ILLIG Maschinenbau gmbH & Co. KG. (2016). *Thermoformen in der Praxis* (Bd. 3. Auflage). Heilbronn: Carl Hanser Verlag München.
- SimpaTec Simulation & Technology Consulting GmbH. (28. 12 2018). *SIMPATEC*. Von SIMPATEC: <http://www.simpatec.com/> abgerufen
- Simpatec. *www.simpatec.com*. Von *www.simpatec.com*: <http://www.simpatec.com/produkte/tsim-bsim/tsim/> abgerufen



## 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: Soebagio

Vorname: Dennis

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

Optimierung der Wanddicke eines thermogeformten PS-Behälters

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

27.02.2018

Datum

Unterschrift im Original