

Minimierung der Orientierungen von Platten in einer Extrusionsanlage mittels eines ausgewogenen Temperatur- und Geschwindigkeitskonzeptes der Glättwalzen und Nachfolgeeinheiten

Diplomarbeit

von

Johannes Haager

erstellt für die

AGRU Kunststofftechnik GmbH, Bad Hall

durchgeführt am

**Institut für Kunststoffverarbeitung
an der Montanuniversität Leoben**



Betreuung: em. O. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Günter R. Langecker

Begutachtung: em. O. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Günter R. Langecker

Leoben, November 2006

Danksagung

Mein Dank gilt zuerst em. O. Univ. Prof. Dr. Ing. Günter R. Langecker Ordinarius für Kunststoffverarbeitung für die Durchsicht, für die Beurteilung und vor allem für die Betreuung meiner Arbeit.

Im Besonderen möchte ich mich bei Herrn Mag. Alois Gruber für die Ermöglichung und Durchführung dieser Arbeit bei der Fa. AGRU Kunststofftechnik bedanken.

Den Mitarbeitern der Fa. AGRU, die mich im Verlauf dieser Arbeit unterstützt haben, danke ich. Zusätzlich möchte ich mich noch bei Hr. Ing. Karl Bohaty für die gute Kooperation und für die fachliche Unterstützung bedanken.

Herr. Dipl. Ing. Dr. mont. Markus Haager, meinem Bruder, danke ich für die vielen aufschlussreichen Diskussionen und für die konstruktive Unterstützung bei der Abfassung meiner Arbeit.

Meiner Familie danke ich für die Unterstützung auf meinem Lebens- und Bildungsweg. Schließlich bedanke ich mich noch bei Frau Christa Grammer für ihren Beistand und für ihre Geduld während dieser Diplomarbeit.

Leoben am 20.11.2006

Johannes Haager

Minimierung der Orientierungen von Platten in einer Extrusionsanlage mittels eines ausgewogenen Temperatur- und Geschwindigkeitskonzeptes der Glättwalzen und Nachfolgeeinheiten

Kurzfassung:

Orthesen und Schienen für den medizinischen bzw. orthopädischen Bereich werden unter anderem aus extrudierten PE-Platten hergestellt. Diese werden in Öfen oder auf Heiztischen erwärmt und anschließend an vorgegebenen Formen abgekühlt. Darüber hinaus werden die Platten auch mittels Tiefziehen weiterverarbeitet. Für beide Umformtechniken ist die Schwindung der Platten unter Wärmeeinwirkung (Schrumpf) von entscheidender Bedeutung. Insbesondere der bei extrudierten Platten auftretende hohe Schrumpf in Längsrichtung von rund 60 % bereitet Probleme.

Im ersten Teil dieser Arbeit wurde ein Temperaturberechnungsprogramm erstellt, welches ausgehend von einem Temperaturprofil beim Düsenaustritt die Temperaturen über die Dicke entlang der gesamten Kühlstrecke berechnet. Temperaturmessungen mit Infrarotthermometern wurden anschließend durchgeführt, um die Berechnungsmethode zu verifizieren bzw. zu verfeinern.

Durch den Vergleich zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen wurde festgestellt, dass die Temperaturen entlang der Anlage zu niedrig berechnet wurden. Durch das Berücksichtigen der Wärmeleitung und der spezifischen Wärmekapazität von der Temperatur konnten die Berechnungsergebnisse verbessert werden. Das erstellte Programm liefert einen schnellen Überblick über die Temperaturverhältnisse des Kunststoffes entlang der Anlage.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wurde die Herstellung von 3 bzw. 4 mm dicken Platten aus PE-HD und PE-LD nach dem Glättwerkverfahren untersucht, mit dem Ziel, den Schrumpf zu verringern. Dazu wurden Platten bei verschiedenen Maschinenparametern hergestellt und der Schrumpf beurteilt.

Der Schrumpf wurde mittels des praxisnahen Warmluftofentests sowie mittels des in EN ISO 14632 genormten Versuchs untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass vor allem die Schmelztemperatur, die Plattendicke, die Temperatur der Glättwalzen, die Verwendung von zusätzlichen Temperierwalzen und die Schmelzevorlage vor den Spalten die Haupteinflussfaktoren sind. Weiters wurde festgestellt, dass die Geschwindigkeiten der verschiedenen Walzen sowie des Abzuges den Schrumpf kaum positiv beeinflussen.

Trotz dieser Erkenntnisse konnte der Längsschrumpf nur bedingt verringert werden. Die Orientierungen, die den Schrumpf verursachen, entstehen vermutlich bereits in der Düse und können von den nachfolgenden Einrichtungen nur mehr geringfügig beeinflusst werden.

Minimization of orientation in plates in a solid sheet extrusion line using well-balanced temperatures and velocity of the smoothening rolls and of the downstream units

Abstract:

Orthoses and splints for the orthopaedic and respectively medical sector are made of extruded plates. These are heated in ovens or on hot stages and then cooled off in molds. Furthermore these plates are also formed using deep drawing. For both thermoforming techniques the shrinkage in the machine direction of the plate due to heat is vitally important. In particular the shrinkage due to heat of extruded PE plates of about 60 % can cause problems while thermo-forming.

One part of this thesis was the development of a program, which computes the temperatures over the thickness of the plates starting from the nozzle till the end of the production line. For the verification and improvement of the calculation the surface temperatures of the extruded plates were measured with infrared thermometers.

The comparison of the measured and calculated temperatures it showed that the temperatures of the program were too low. So the thermal conductivity against temperature and the thermal capacity against temperature were used in the program. Then the temperatures were calculated very well and an actual overview of the temperatures of the plates in the extrusion line was possible.

In the second part of this diploma thesis the production of PE-HD and PE-LD plates with a thickness of 3 and 4 mm was analyzed. Therefore the plates were produced with different settings of a solid sheet extrusion line and then the shrinkage was measured.

The shrinkage due to heat was detected with a practical convection-oven test and with a standardized test (EN ISO 14632). Through these tests was determined that the temperature of the melt, the thickness of the plate, the temperature of the calendar stack, the nip of the tempering rolls and the bead in front of the first nip are the main influence factors for the shrinkage due to heat. The influence of the velocity of the rolls was small.

Despite these results the shrinkage of the plates in the machine direction could not be changed considerably. The orientations in the plates are mostly generated in the nozzle and can not be changed significantly by the downstream units.

1 EINLEITUNG	1
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	3
2.1 BERECHNUNG DER TEMPERATUREN.....	3
2.1.1 Explizites Differenzenverfahren.....	4
2.2.2 Diskretisierung der Bestimmungsgleichung.....	6
2.1.3 Randbedingungen.....	7
2.2 TEMPERATURMESSUNG MIT INFRAROT-STRAHLUNGSTHERMOMETER.....	10
2.2.1 Infrarotstrahlung.....	10
2.2.2 Infrarotstrahlungsthermometer.....	13
2.3 TAFELEXTRUSIONSANLAGEN.....	14
2.3.1 Aufbau.....	14
2.3.2 Vorgänge vor und im Glättwerk.....	15
3 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG	17
3.1 UNTERSUCHTE MATERIALIEN.....	17
3.2 HERSTELLUNG DER PLATTEN.....	18
3.2.1 Verwendete Tafelextrusionsanlage.....	18
3.2.2 Maschineneinstellungen.....	20
3.3 PRÜFUNG DER PLATTEN.....	26
3.3.1 Normtest für Tiefziehenanforderung (EN ISO 14632).....	26
3.3.2 Warmluftofentest.....	28
3.3.3 Zugprüfung.....	29
3.3.4 Kristallinitätsmessung.....	29
3.4 TEMPERATURMESSUNGEN.....	31
3.4.1 Miniatur Infrarot Sensor mit Aufzeichnungsgerät.....	31
3.4.2 Infrarot Handgerät für Temperaturmessungen.....	32
3.4.3 Kontakt-Thermoelement.....	33
4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION	34
4.1 ENTWICKLUNG DES BERECHNUNGSPROGRAMMS.....	34
4.1.1 Grundlegendes.....	34
4.1.2 Ablauf und Bedienung einer Berechnung.....	37
4.2 TEMPERATURMESSUNGEN UND VERGLEICH MIT DER BERECHNUNG.....	42
4.2.1 Temperaturmessungen bei Einstellung Nr. 18.....	44
4.2.2 Vergleich der berechneten mit den gemessenen Temperaturen.....	45
4.3 EINFLUSS DER PROZESSPARAMETER AUF DEN SCHRUMPF.....	48

Inhaltsverzeichnis

4.4 EINFLUSS DER PROZESSPARAMETER AUF DIE ZUGPRÜFUNG UND DEN KRISTALLISATIONSGRAD	57
5 ZUSAMMENFASSUNG	59
6 LITERATUR	61
7 ANHANG.....	62
7.1 EINSTELLUNGEN UND PRÜFERGEBNISSE DER VERSUCHE	62
7.2 BERECHNUNG DER TEMPERATUREN ZU EINSTELLUNG NR. 18.....	68
7.3 FORMELZEICHEN	71

1 Einleitung

In dieser Arbeit wird die Herstellung von Platten auf Extrusionsanlagen nach dem Glättwerkverfahren [1] untersucht. Im speziellen werden Platten mit 3 mm und 4 mm Dicke aus Polyethylen (PE) betrachtet. Diese werden unter anderem im medizinischen und orthopädischen Bereich eingesetzt.

Für die Herstellung von Orthesen und Schienen werden die Platten aus PE nach der Extrusion in Öfen oder auf Heiztischen erwärmt und anschließend an einer vorgegebenen Form abgekühlt und zugeschnitten [2]. Die Platten werden auch mittels Tiefziehen weiterverarbeitet. Für beide Umformtechniken ist die Schwindung der Platten unter Wärmeeinwirkung (Schrumpf) von entscheidender Bedeutung. Je nach Dicke der Tafeln dürfen bestimmte Grenzwerte nicht überschritten werden.

Durch den Produktionsprozess werden Orientierungen und Eigenspannungen im Kunststoff eingefroren, die bei einer späteren großflächigen Wärmeeinwirkung starken Schrumpf und Deformationen verursachen können. Der Schrumpf der Platten in Extrusionsrichtung liegt je nach Dicke, Material und Prüfmethode zwischen 5 % und 60 % und ist ein wichtiges Qualitätskriterium, da insbesondere hohe Schrumpfwerte Probleme bei der Weiterverarbeitung bereiten.

Derzeit erfolgt die Einstellung der Extrusionsanlagen nach den Erfahrungswerten der Mitarbeiter bzw. den Parametern der letzten Produktion. In der Einstell- und Produktionsphase wird die Extrudatbahn nach optischen Kriterien (z. B. Planlage, glänzende Oberfläche) beurteilt und entsprechende Änderungen an der Maschine vorgenommen bis die optische Qualität stimmt. Während der Produktion bzw. Einstellphase können keine Aussagen über den Schrumpf der Platten getroffen werden, da erst nach einer Abkühlzeit und Ruhephase die Platten geprüft werden können.

Ein Ziel dieser Arbeit ist die Erstellung eines Programms zur Temperaturberechnung des Extrudats über die Dicke entlang der Produktionslinie. Während der Produktion von Platten werden mit Infrarotsensoren Messungen der Oberflächentemperaturen durchgeführt, damit ein Vergleich der berechneten mit den gemessenen Temperaturen

durchgeführt werden kann. Damit soll die Berechnungsmethode verfeinert und die Richtigkeit sichergestellt werden.

Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist, mithilfe eines geeigneten Temperatur- und Geschwindigkeitsprofils der Walzen und Nachfolgeeinrichtungen die Orientierungen zu verringern und so die Qualität der Platten zu verbessern. Dazu werden die wesentlichen Einflussfaktoren für den Schrumpf durch verschiedene Maschineneinstellungen identifiziert, wobei hauptsächlich auf die Temperierung und die Geschwindigkeiten der Glättwalzen und Nachfolgeeinheiten eingegangen werden soll. Anschließend werden diese Platten geprüft und der Einfluss der verschiedenen Verarbeitungsparameter auf den Schrumpf bestimmt.

Ausgehend von Formel (2) kann durch folgende Vereinfachungen die Gleichung weiter reduziert werden:

- Keine inneren Wärmequellen
- Keine Reibungswärme
- Isotropes Material
- Konstante Stoffeigenschaften
- Eindimensionale Berechnung in y-Richtung

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad \Rightarrow \quad \frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (3)$$

Daraus resultiert die so genannte Fourier'sche Differentialgleichung (3) für welche je nach Anfangs- und Randbedingungen verschiedene Lösungsmethoden zur Verfügung stehen:

- Analytische Lösung - Fourier Reihe
- Analytische Näherungslösung
- Numerische Lösung

Durch das Lösen der Gleichung und durch die Definition von Randbedingungen kann der Abkühlverlauf der Platte über die Dicke entlang der Kühlstrecke berechnet werden. Im nächsten Kapitel wird das explizite Differenzenverfahren als numerische Lösung beschrieben.

2.1.1 Explizites Differenzenverfahren

Für diese Arbeit wurde das explizite Differenzenverfahren als numerische Lösungsmethode gewählt. Dieses Verfahren liefert befriedigende Ergebnisse mit einem vertretbaren Rechenaufwand und die Umsetzung der notwendigen Rechenschritte in ein Berechnungsprogramm kann ohne besondere Programmierkenntnisse erfolgen.

Der Grundgedanke der numerischen Näherungsverfahren ist, dass die infinitesimalen Differentiale durch Differenzen mit endlichen Werten und Funktionsableitungen durch

Differenzenquotienten ersetzt werden. Dieser Schritt wird als Diskretisierung bezeichnet und dieser kann als der Übergang von einer Tangente zur Sehne veranschaulicht werden (Bild 1). [4]

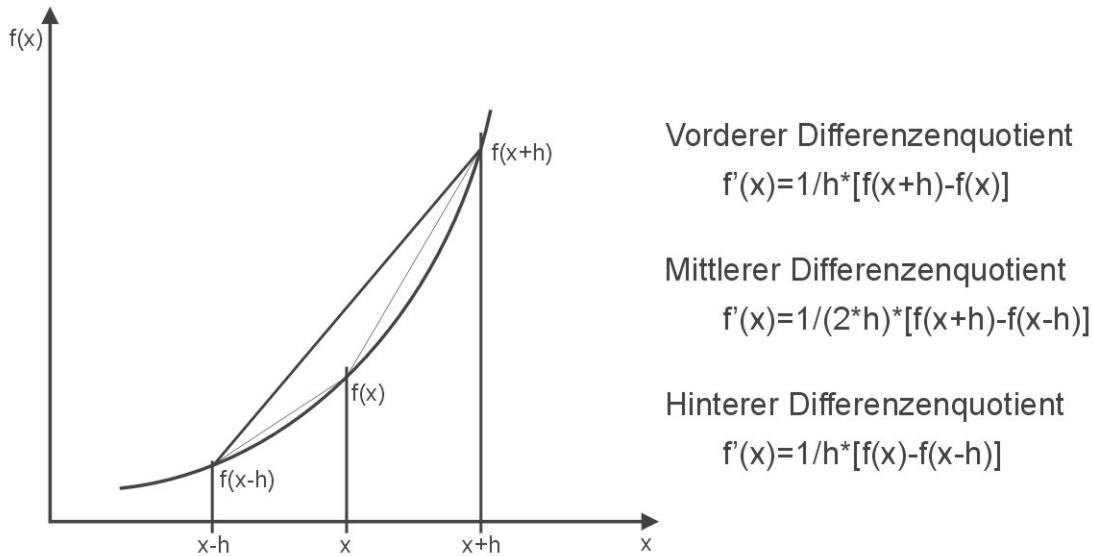


Bild 1: Differenzenapproximation

Zum Bilden der Differenzen muss der gesamte Gültigkeits- und Integrationsbereich der Differentialgleichungen mit gedachten Schichten überspannt werden [2]. Für die Berechnung wird die Platte in Dickenrichtung in n Schichten geteilt. Dadurch entstehen $n+1$ Berechnungspunkte (Bild 2). Wenn die äußeren Punkte mit den Rändern der Platte zusammenfallen, kann es zu einem instabilen Verhalten des Berechnungsprogramms kommen. Aus diesem Grund liegen die Berechnungspunkte 0 und $n+1$ um eine halbe Schicht außerhalb der Platte. Für die Berechnungen im Zuge dieser Arbeit wurden 11 Schichten gewählt. Für die Punkte können einfache Differenzgleichungen aufgeschrieben werden, die einfache arithmetische Gleichungen sind. [4]

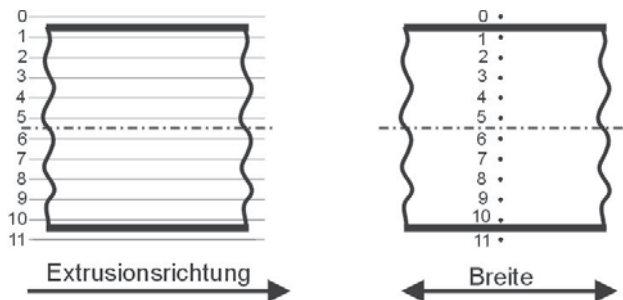


Bild 2: Operationspunkte bzw. Schichtenfestlegung

Beim expliziten Differenzenverfahren ist die Temperaturverteilung eines Zeitschrittes als Funktion der Temperaturverteilung des vorhergehenden Zeitschrittes explizit ausdrückbar. So kann ausgehend von einem Temperaturprofil zur Zeit $t = 0$ und bei Kenntnis aller Randbedingungen die Temperaturverteilung über die Dicke während des Abkühlprozesses berechnet werden.

2.2.2 Diskretisierung der Bestimmungsgleichung

Die Diskretisierung der Bestimmungsgleichung erfolgt über die Approximation der zeitlichen Ableitung der Temperaturverteilung mit dem vorderen Differenzenquotienten [4]. Ausgehend von Formel (4) ergibt sich ein expliziter Ausdruck für die Temperaturverteilung des Zeitschrittes $t+\Delta t$.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \quad (4)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{y,t+\Delta t} - T_{y,t}}{\Delta t}, \quad \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T_{y+\Delta y,t} - 2 \cdot T_{y,t} + T_{y-\Delta y,t}}{(\Delta y)^2} \quad (5)$$

$$T_{y,t+\Delta t} = T_{y,t} + \frac{a \cdot \Delta t}{\Delta y^2} \cdot (T_{y+\Delta y,t} - 2 \cdot T_{y,t} + T_{y-\Delta y,t}) \quad (6)$$

Mit Formel (6) ist es möglich, die Temperaturen für alle inneren Operationspunkte bei Kenntnis der Temperaturverteilung zum Zeitpunkt t für den Zeitpunkt $t+\Delta t$ zu berechnen.

Die Stabilität des Verfahrens ist gegeben, solange der Ausdruck $(a \cdot \Delta t) / \Delta y^2 < 0,5$ ist, da sonst in (6) negative Koeffizienten auftreten und zu einem instabilen Verhalten des Verfahrens führt. Diese Stabilitätsbedingung hat zur Folge, dass bei vorgegebener Δy -Schrittweite (Schichtdicke) für die Länge des Zeitschrittes Δt eine Obergrenze nach Formel (7) berechnet werden kann.

$$\Delta t \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{(\Delta y)^2}{a} \quad (7)$$

2.1.3 Randbedingungen

Vom Düsenaustritt bis zum Abzug durchläuft die Platte verschiedene Bereiche in welchen entweder freie Konvektion und Wärmestrahlung oder Wärmeleitung auftritt. Um den Abkühlprozess berechnen zu können, müssen dafür geeignete Randbedingungen definiert werden.

Kühlt das Extrudat in bestimmten Bereichen der Abkühlstrecke an der Luft ab, kommt es zur freien Konvektion und Wärmestrahlung. Für diesen kombinierten Wärmetransport wird für den Strahlungsteil ein Strahlungswärmeübergangskoeffizient $\alpha_{\text{Strahlung}}$ eingeführt (8). Dadurch kann für die Abkühlung an der Luft ein zusammengesetzter Wärmeübergangskoeffizient α_{Luft} (11) verwendet werden. [5]

$$\alpha_{\text{Strahlung}} = c \cdot \frac{T_{\text{Platte}}^4 - T_{\text{Luft}}^4}{T_{\text{Platte}} - T_{\text{Luft}}} \quad (8)$$

$$\dot{q}_{\text{Strahlung}} = \alpha_{\text{Strahlung}} \cdot (T_{\text{Platte}} - T_{\text{Luft}}) \quad (9)$$

$$\dot{q}_{\text{Konvektion}} = \alpha_{\text{Konvektion}} \cdot (T_{\text{Platte}} - T_{\text{Luft}}) \quad (10)$$

$$\alpha_{\text{Luft}} = \alpha_{\text{Strahlung}} + \alpha_{\text{Konvektion}} \quad (11)$$

Das α_{Luft} kann in der thermischen Randbedingung 3. Art (Bild 3) verwendet werden. Diese beschreibt den konvektiven Wärmeübergang zwischen der Oberfläche eines Körpers (Platte) und einem Fluid (Luft).

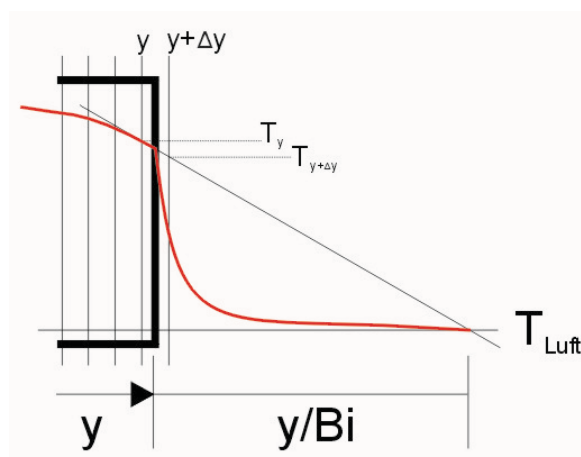


Bild 3: Prinzipische Skizze der Randbedingung 3. Art

Der wandnahe Wärmefluss im Fluid $\dot{q}_{W,Fluid}$ (12) stimmt mit jenem an der Innenseite des Körperendes $\dot{q}_{W,Körper}$ (13) überein.

$$\dot{q}_{W,Fluid} = \alpha_{Luft} \cdot (T_y - T_{Luft}) \quad (12)$$

$$\dot{q}_{W,Körper} = -\lambda \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \quad (13)$$

$$\alpha_{Luft} (T_y - T_u) = \lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \quad (14)$$

Bild 3 zeigt wie der Gradient der Temperatur an der Oberfläche (im Körper) durch eine einfache graphische Konstruktion bestimmt werden kann. Die Tangente des wandnahen Temperaturgradienten im Körper erreicht in der Entfernung „y/Bi“ die Umgebungstemperatur. Die Biotzahl (15) ist das Verhältnis vom äußeren Wärmeübergang, dem Wärmetransport von der Oberfläche zum umgebenden Medium, zum inneren Wärmeübergang, der Wärmeleitung durch den Körper [6]. Durch Umformen von (14) ergibt sich die Lösung für den Temperaturgradienten (16).

$$Bi = \frac{\alpha \cdot y}{\lambda} \quad (15)$$

$$\frac{T_y - T_u}{y/Bi} = \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_W \quad (16)$$

So kann eine Geradengleichung für die Verbindungslinie zwischen T_{Luft} und T_y bzw. $T_{y+\Delta y}$ erstellt werden. Durch Umformen folgt daraus die Formel für den Berechnungsschritt bei Abkühlung an der Luft (17).

$$T_{y,t} = T_{y+\Delta y,t} \cdot \frac{1 - \frac{\alpha \cdot \Delta y}{2 \cdot \lambda}}{1 + \frac{\alpha \cdot \Delta y}{2 \cdot \lambda}} + T_u \cdot \frac{2 \cdot \frac{\alpha \cdot \Delta y}{2 \cdot \lambda}}{1 + \frac{\alpha \cdot \Delta y}{2 \cdot \lambda}} \quad (17)$$

In den Bereichen, in denen der Kunststoff mit den metallischen Walzen in Kontakt ist, tritt Wärmeleitung auf. Da die Bestimmung eines Wärmeübergangskoeffizienten nur experimentell und mit großem Aufwand möglich ist, wird für diese Randbedingung von

einer Berührungstemperatur an den Grenzflächen ausgegangen. Diese hängt von der Wärmeeindringzahl des Kunststoffes b_K und des Metalls b_W ab (18). Die Berührungstemperatur $T_{K,W}$ berechnet sich nach (19).

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_P} \quad (18)$$

$$T_{K,W} = \frac{b_K \cdot T_K + b_W \cdot T_W}{b_K + b_W} \quad (19)$$

Diese Berührungstemperatur ist die Oberflächentemperatur der Platte im folgenden Schritt des Rechenablaufs. Da die Oberfläche der Platte zwischen zwei Gitterpunkten liegt, wird die gesuchte Temperatur $T_{y,t}$ nach (20) berechnet. (Bild 4)

$$T_{y,t} = 2 \cdot T_{K,W} - T_{y+\Delta y,t} \quad (20)$$

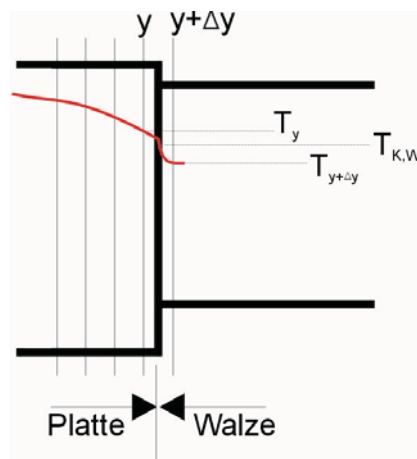


Bild 4: Prinzipskizze der Randbedingung bei der Berührung von Platte und Walze

Mithilfe der oben definierten Bestimmungsgleichung und Randbedingungen sind für die Berechnung alle notwendigen Gleichungen definiert. Diese müssen in das Berechnungsprogramm integriert werden, damit ausgehend von einem Anfangstemperaturprofil die Temperaturen entlang der Kühlstrecke berechnet werden können.

2.2 Temperaturmessung mit Infrarot-Strahlungsthermometer

2.2.1 Infrarotstrahlung

Jeder Körper sendet entsprechend seiner Temperatur eine infrarote Strahlung aus. Die emittierte Strahlung ist abhängig vom Material und von der Oberflächenbeschaffenheit und liegt in einem Wellenlängenbereich von ca. 1 μm bis 20 μm . Der Emissionsgrad gibt an, wie viel ein Körper relativ zu einem schwarzen Körper strahlt. [7]

Für die Emission von Wärmestrahlung gibt es eine obere Grenze. Die von der Oberfläche eines Körpers maximal mögliche Wärmestromdichte \dot{q}_s hängt von dessen Temperatur T ab und ist durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz (21) gegeben.

$$\dot{q}_s = \sigma \cdot T^4 \quad (21)$$

σ Stefan-Boltzmann-Konstante ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$)

Das Plancksche Strahlungsgesetz (Bild 5) stellt den grundlegenden Zusammenhang für die berührungslose Temperaturmessung dar. Es beschreibt die spektrale Ausstrahlung $I_{\lambda S}$ eines schwarzen Körpers in den Halbraum in Abhängigkeit von seiner Temperatur T und der betrachteten Wellenlänge λ (22). [7]

$$I_{\lambda S}(\lambda, T) = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\left(\frac{h \cdot c}{\lambda \cdot k_B \cdot T}\right)} - 1} \quad (22)$$

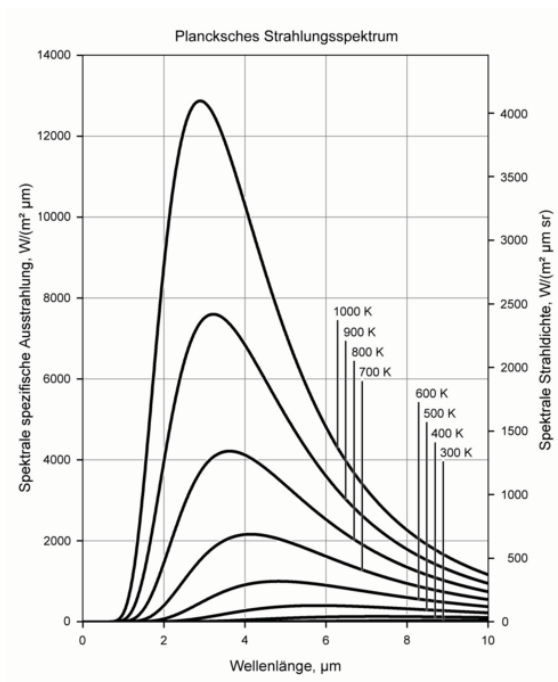


Bild 5: Strahlungsspektrum des schwarzen Strahlers [11]

Trifft eine Strahlung auf einen Körper, so wird ein Teil reflektiert (R), ein Teil absorbiert (A) und ein Teil durchgelassen (T) (Bild 6). Die Summe dieser drei Verhältnisgrößen ergibt 1. Auf den Zusammenhang zwischen Absorptionsgrad und Emissionsgrad wird in Gesetz von G. Kirchhoff eingegangen. Demnach ist ein guter Emitter auch ein guter Absorber. Ein schwarzer Strahler hat einen Emissionsgrad und einen Absorptionsgrad von 1 und das bedeutet, dass bei jeder Wellenlänge die maximal mögliche Energie abgestrahlt wird. Die von einem Körper emittierte Strahlung ist unmittelbar abhängig von der Oberflächentemperatur und steht nicht in Zusammenhang mit der einfallenden Strahlung.

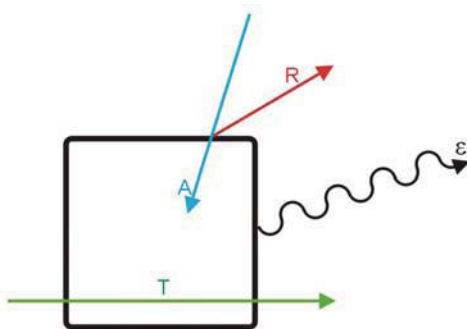


Bild 6: Aufteilung der Strahlungsenergie

Polyolefine haben einen Emissionskoeffizient von ca. 0,95 [8]. Dieser gibt das Verhältnis zwischen dem realen Abstrahlwert des Materials und dem des schwarzen Strahlers an. „Nicht graue Strahler“ (z. B. Metalle) ändern ihren Emissionskoeffizienten mit der Wellenlänge (Bild 7).

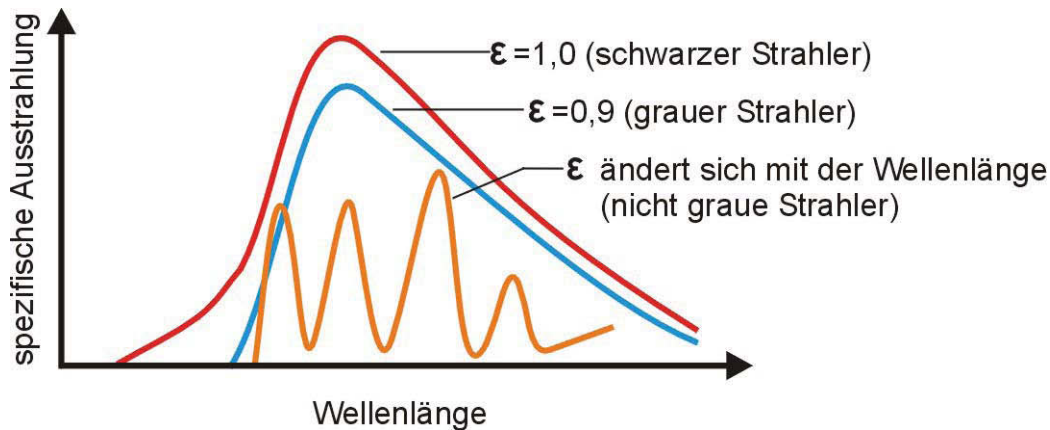


Bild 7: Spezifische Ausstrahlung bei verschiedenen Emissionsgraden [12]

Für eine optimale Temperaturmessung ist es wichtig, eine Wellenlänge auszuwählen, bei welcher der Transmissionsgrad annähernd Null ist. PE und Polypropylen (PP) sind bei $3,43 \mu\text{m}$ undurchlässig (Bild 8) und daher sollten Infrarot-Temperaturmessungen, insbesondere an dünnen Folien, bei dieser Wellenlänge durchgeführt werden. Bei dickeren Folien ($> 0,4 \text{ mm}$) stellt die Transmission kein Problem mehr dar und daher sollte laut Hersteller des Infrarot-Strahlungsthermometer eine Wellenlänge zwischen 8 und $14 \mu\text{m}$ zur Messung gewählt werden. [8]

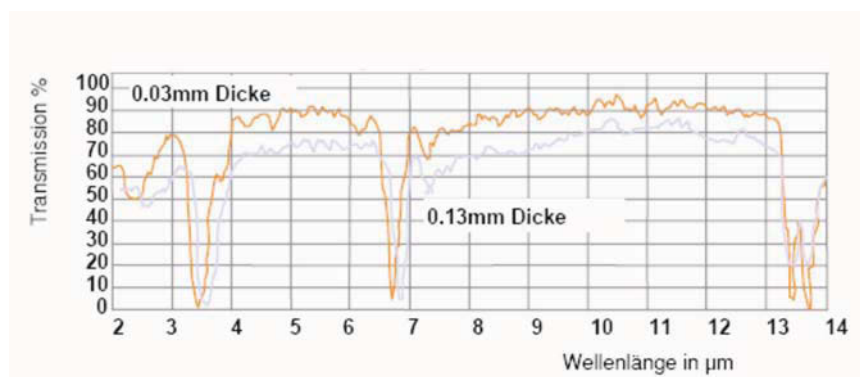


Bild 8: Transmissionsgrad von PE in Abhängigkeit von der Wellenlänge bei $0,03 \text{ mm}$ Dicke [8]

2.2.2 Infrarotstrahlungsthermometer

Infrarot-Thermometer sind optoelektrische Sensoren, die in der Lage sind Infrarotstrahlung zu empfangen und in ein messbares Signal umzuwandeln. Sie bestehen aus einer Linse, einem spektralem Filter, einem Sensor und einer Signalverarbeitungseinheit (Bild 9). Der spektrale Filter hat die Aufgabe nicht brauchbare Wellenlängen für die Temperaturmessung zu filtern, da nur in bestimmten Bereichen gemessen wird.

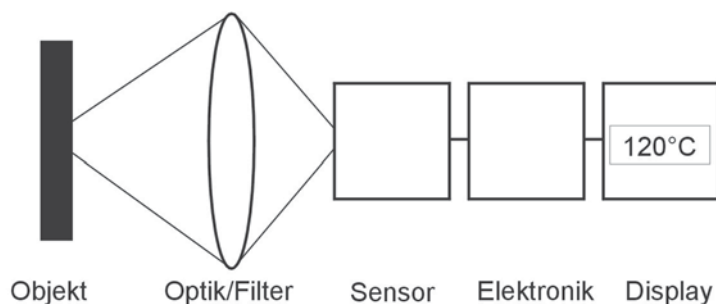


Bild 9: Prinzipskizze eines Infrarotstrahlungsthermometers

Der große Vorteil der Infrarotstrahlungsthermometer liegt in der berührungslosen Temperaturmessung, da kein Reibungseinfluss und keine Beeinflussung des Extrudats erfolgt. Die Messung des schmelzeförmigen Extrudats beim Düsenaustritt ist ebenso möglich.

2.3 Tafelextrusionsanlagen

Auf Tafelextrusionsanlagen werden Platten unterschiedlicher Dicke und Breite aus verschiedenen Kunststoffen hergestellt. Je nach Anlagenhersteller und verarbeitenden Kunststoff sind Dicken von 0,2 mm bis 50 mm möglich. Die maximale Breite liegt bei ca. 4 m.

2.3.1 Aufbau

Die Hauptkomponenten von Tafelextrusionsanlagen (Bild 10) sind Extruder, Breitschlitzdüse und Glättwerk. Letzteres enthält normalerweise 3 Walzen, auf deren Oberflächen die Schmelze abgekühlt wird. In den Walzenspalten wird die Platte kalibriert. Dahinter befinden sich eine Rollenbahn, die als Luftkühlstrecke dient und die Abzugswalzen. Anschließend werden die Platten geschnitten und gestapelt.

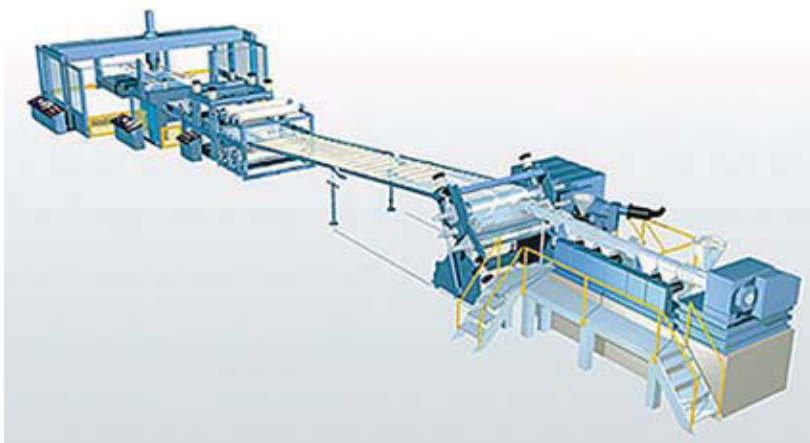


Bild 10: 3D-Ansicht einer Tafelextrusionsanlage [9]

In dieser Arbeit wird hauptsächlich auf die Temperierung und die Geschwindigkeiten im Glättwerk eingegangen sowie der Einfluss dieser Parameter auf den Schrumpf untersucht. Aus diesem Grund wird dieser Teil der Anlage besonders intensiv betrachtet.

2.3.2 Vorgänge vor und im Glättwerk

Das Glättwerk als Bestandteil der Tafelextrusionsanlage wird vom Extruder über die Breitschlitzdüse mit Kunststoffschmelze beschickt. Bedingung für eine einwandfreie Tafelqualität ist die vollkommene Plastifizierung und Homogenisierung der Schmelze im Extruder und die pulsationsfreie und gleichmäßige Verteilung der Schmelze in der Breitschlitzdüse. Die Schmelzebahn wird in den ersten Walzenspalt zwischen Walze 1 und Walze 2 eingezogen (Bild 11). Durch den Spalt gerät die Schmelze unter zunehmenden Druck. [1]

An der Einlaufseite des Walzenspaltess wird ein Wulst erzeugt. Diese Schmelzevorlage hat die Aufgabe, dass sich der Walzenspalt vollständig füllt und so glatte und fehlerfreie Oberflächen produziert werden. Der Wulst überragt die einlaufende Schmelzebahn meist nur einige Millimeter.

Das Glättwerk beeinflusst die Tafelqualität nicht nur im Walzenspalt, sondern auch bei der Walzenumschlingung. Dort werden in Abhängigkeit von der Temperatur, Verweildauer und der Dicke der Warenbahn Orientierungen eingefroren und Spannungen durch ungleichmäßige Abkühlung des Kunststoffes erzeugt. Diese sind für den Schrumpf bzw. die Planlage der Platten von Bedeutung. Bei der Umschlingung der Walzen treten Stauchungen und Dehnungen auf, die mit steigender Dicke der Kunststoffbahn größer werden (Bild 11). [1]

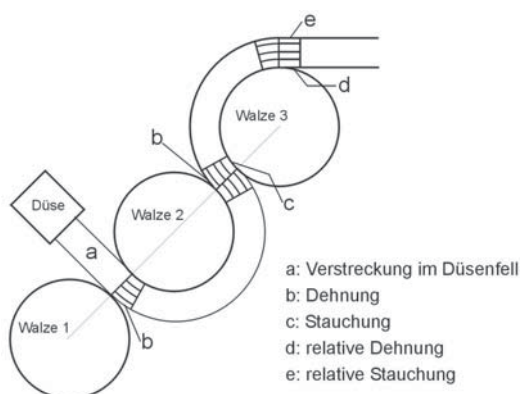


Bild 11: Dehnungen und Stauchungen des Kunststoffes im Glättwerk

Die zwangsläufig beim Abkühlen in der Kunststoffbahn entstehenden unsymmetrischen Temperaturprofile erzeugen über die Plattendicke Dehnungs-

differenzen, dadurch werden in der Tafel Eigenspannungen hervorgerufen. Die Temperierung der Walzen muss so eingestellt werden, dass das unsymmetrische Temperaturprofil der Kunststoffbahn beim Abkühlen möglichst gleichmäßig wird. Besonders bei teilkristallinen Kunststoffen ist das schwierig, da die Walzen stark gekühlt werden müssen, um ein Ankleben des Kunststoffes an den Walzen zu vermeiden.

3 Versuchsdurchführung

3.1 Untersuchte Materialien

Für diese Arbeit wurden 2 verschiedene PE-Typen ausgewählt, die auch in der laufenden Produktion von orthopädischen Platten verwendet werden. Die zwei Typen sind ein Polyethylen Hoher Dichte (PE-HD) und ein Polyethylen Niedriger Dichte (PE-LD). Das PE-HD ist von der Firma Total mit der Bezeichnung „HDPE Si 508“ und hat eine Dichte von $0,95 \text{ g/cm}^3$. Diese Type weist eine hohe Molmasse auf und ist laut Hersteller sehr gut für die Extrusion von Folien und Platten geeignet.

Die zweite PE-Type ist ein Polyethylen Niedriger Dichte (PE-LD). Das verwendete PE-LD ist ein Produkt der Firma Polimeri Europa mit dem Namen „Riblene FL 34“ und einer Dichte von $0,924 \text{ g/cm}^3$. Dem Hersteller zufolge sind damit gute optische Eigenschaften erzielbar und eignet sich besonders für die Verarbeitung zu dünnen Folien.

Beide sind hautverträglich, physiologisch unbedenklich und beständig gegen Schweiß, daher sind diese Kunststoffe für die Verwendung als Schienen und Orthesen geeignet.

Der Unterschied zwischen den beiden PE-Werkstoffen liegt im makromolekularen Aufbau. Das PE-HD hat überwiegend linear aufgebaute Molekülketten. Die wenigen vorhandenen Seitenketten sind kurz, daher ergibt sich eine höhere Kristallinität und somit eine höhere Dichte und Steifigkeit. Hingegen weist das PE-LD mehr kurze und vor allem auch lange Seitenketten auf. Eine geringere Dichte und höhere Flexibilität ist die Folge.

3.2 Herstellung der Platten

3.2.1 Verwendete Tafelextrusionsanlage

Für diese Arbeit wurden die Platten auf einer Tafelextrusionsanlage, wie in Bild 12 dargestellt, hergestellt. Diese ist für die Produktion von Platten mit einer Dicke von 2 mm bis 12 mm und einer Plattenbreite von 1 m bis 2 m geeignet.

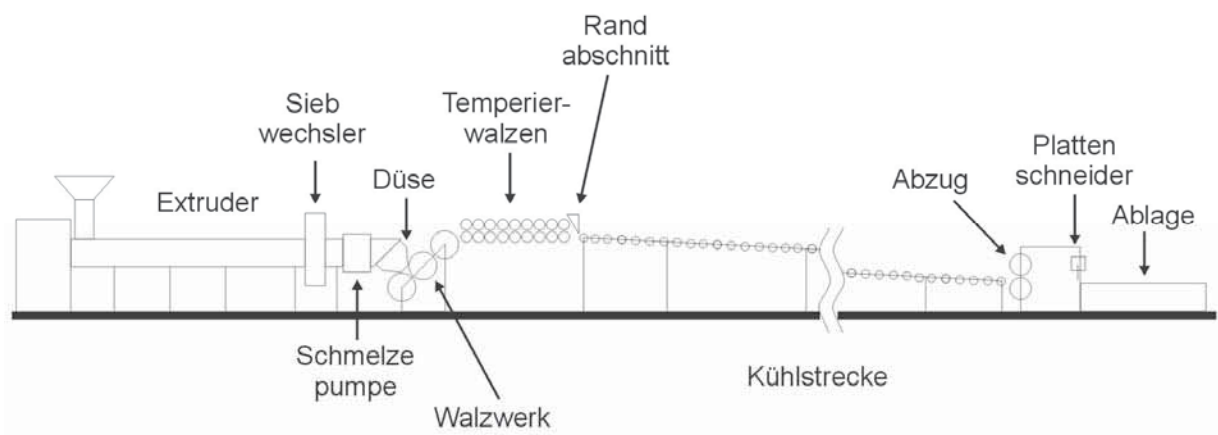


Bild 12: Skizze der verwendeten Anlage

Im Detail besteht die Anlage aus folgenden wichtigen Komponenten:

Extruder: Der Extruder fördert mit der Schnecke die einen Durchmesser von 150 mm hat maximal 600 kg/Stunde. Die Schnecke ist 37 mal so lang wie der Durchmesser (37D).

Siebwechsler: Der Siebwechsler, der unmittelbar nach dem Extruder platziert ist, hat die Aufgabe mit feinen Sieben metallische Fremdkörper aus der Schmelze zu filtern. Dies ist insofern wichtig, da kleinste Metallpartikel die Walzenoberflächen beschädigen sowie die Produktqualität beeinträchtigen können.

Schmelzepumpe: Die Schmelzepumpe sorgt für einen gleich bleibenden Druck vor der Düse und gewährleistet so einen gleichmäßigen Materialausstoß.

Breitschlitzdüse: Die Breitschlitzdüse verteilt den kreisförmigen Schmelzestrang der von der Schmelzepumpe kommt auf eine rechteckige Form mit

einer Breite von 1,36 bis 2,2 m. Über verstellbare Düsenlippen kann die Dicke des austretenden Kunststoffes von 5 mm bis 15 mm eingestellt werden.

Walzwerk: Das Walzwerk, das in Form eines Glättwerks ausgeführt ist, besteht aus 3 Walzen mit einem Durchmesser von 500 mm, die übereinander in einem Winkel von 45° angeordnet sind. Die Walzen sind 2,5 m lang. Die Hauptaufgabe des Walzwerkes besteht darin den Kunststoff auf die richtige Dicke zu walzen und zu glätten. Die Walzen sind einzeln angetrieben und mit Wasser temperiert. Die Walzenspalten können unabhängig voneinander verstellt werden. Der gesamte Umschlingungswinkel des Kunststoffes beträgt ca. 320°.

Temperierwalzen: Dem Walzwerk nachgeschaltet sind 9 kleinere Temperierwalzenpaare mit einem Durchmesser von 200 mm. Diese Walzen können jeweils in Gruppen zu 6 temperiert werden. Die Temperierwalzen werden zentral angetrieben und der Walzenspalt kann ebenfalls für alle Walzenpaare zentral eingestellt werden. Bei Bedarf können die oberen Walzen auch angehoben werden.

Randabschnitt: Der Randabschnitt erfolgt mittels 2 Messer nach den Temperierwalzen. Diese sind in der Breite verstellbar und schneiden die Platte in die gewünschte Breite.

Kühlstrecke: Auf der 15 m langen Restkühlstrecke läuft die Platte über Rollen Richtung Abzug. Die Rollen sind nicht temperiert. Entlang dieser Strecke kann der Kunststoff langsam an der Luft abkühlen.

Abzug: Der Abzug besteht aus 2 Gummiwalzen und zieht mit einer einstellbaren Relativgeschwindigkeit zur Walze 2 ab.

Plattenschneider: Die Kunststoffbahn wird in die gewünschte Länge geschnitten, zur Ablage weitertransportiert und dort gestapelt.

3.2.2 Maschineneinstellungen

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden Platten aus PE-HD mit einer Dicke von 3 mm untersucht, da bei diesen Platten ein unverhältnismäßig hoher Schrumpf auftritt. Zusätzlich wurden auch noch Versuche mit 4 mm dicken Platten aus PE-HD sowie 3 mm dicken Platten aus PE-LD, die geringere Schrumpfwerte zeigen, durchgeführt. Die Breite der produzierten Platte betrug 100 cm; dies ist eine Standardbreite für orthopädische Platten. Die untersuchten Tafeln wurden sowohl in eigenen Versuchsreihen hergestellt als auch von der regulären Produktion entnommen.

In der Startphase wurden wie bisher üblich die Einstellungen der letzten Produktion übernommen und die Feineinstellung erfolgte nach den Erfahrungswerten des Einstellers. Ein wichtiges Qualitätskriterium während der Produktion war eine glänzende Oberfläche der Platten. Diese wird durch ein geeignetes Temperaturprofil der Walzen erreicht. Alle hergestellten Tafeln wurden mit einer glänzenden Ober- als auch Unterseite produziert. Sobald die optischen Kriterien erfüllt waren, startete die jeweilige Versuchsreihe bzw. die reguläre Produktion.

Der Extruder fördert den plastifizierten Kunststoff zur Schmelzepumpe die sich bei den meisten Einstellungen mit 15 Umdrehungen pro Minute gedreht hat, was einem Ausstoß von ca. 150 kg Kunststoff pro Stunde entspricht. Eine niedrigere Leistung war nicht möglich, da der Extruder und die Pumpe dabei nicht harmonierten und keine Produktion möglich war. Ein höherer Wert der Schmelzepumpe wäre möglich und wird bei dickeren Platten auch eingestellt, jedoch haben Einstellungen vor dieser Arbeit gezeigt, dass bei 3 mm dicken Platten eine Erhöhung der Schmelzepumpenleistung über 20 Umdrehungen pro Minute zu schlechten Qualitäten führt.

Der Materialaustritt bei der Düse ist bei größtmöglicher Absperrung 136 cm breit. Der minimal mögliche Düsenspalt beträgt 5 mm und wurde sowohl für die 3 mm als auch für die 4 mm dicken Platten verwendet.

Das Glättwerk wurde mit den Nachfolgeeinheiten an die Düse herangefahren bis die Fahnenlänge 17 cm betrug. Ein niedrigerer Wert kann aufgrund der baulichen Gegebenheiten nicht erreicht werden. Für den Versuch Nr. 26 wurde dieser Abstand auf 29 cm vergrößert um den Einfluss auf den Schrumpf zu untersuchen. Beim

Glättwerk wurden die Temperaturen und die Geschwindigkeiten für jede Walze individuell eingestellt. Der erste Spalt (zwischen Walze 1 und Walze 2) und der 2. Spalt (zwischen Walze 2 und Walze 3) wurden ebenfalls unabhängig voneinander variiert. Mit der Spaltweite und der Geschwindigkeit der Walzen wurde die Größe des Wulstes vor den Spalten gesteuert.

Die Spaltgröße und die Geschwindigkeit der Temperierwalzen wurden zentral geändert, während die Temperierung in Gruppen zu je 6 Walzen erfolgte. Für einige Produktionen und Versuche wurden die oberen Walzen angehoben, so dass die unteren Temperierwalzen als verlängerte Rollenbahn fungierten.

Die Eingabe der Geschwindigkeiten der Glättwalzen 1 und 3, der Temperierwalzen und des Abzuges erfolgte in Prozentangaben zur Leitwalze. Diese ist die mittlere Walze des Glättwerks (Walze 2) und dafür wird ein absoluter Wert in Millimeter pro Minute eingegeben. Wird beispielsweise für die Leitwalze ein Wert von 800 mm/min angenommen und für die Temperierwalzen 98 % gewählt, entspricht das einer absoluten Geschwindigkeit der Temperierwalzen von 784 mm/min.

Bei den durchgeführten Versuchen wurden folgende Parameter verändert um den Einfluss der verschiedenen Einstellungen auf den Schrumpf zu ermitteln:

- Extrudattemperatur
- Walzengeschwindigkeiten (Glättwerk, Temperierwalzen, Abzug)
- Walztemperaturen (Glättwerk)
- Walzenspalte (Glättwerk, Temperierwalzen)
- Fahnenlänge

In Tabelle 1 bis Tabelle 4 sind die verschiedenen Produktionseinstellungen für die Platten dargestellt, die von 12.07.2006 bis 25.09.2006 für diese Arbeit hergestellt wurden. Da besonders die Platten aus PE-HD einen hohen Schrumpf aufweisen, wurden mit diesem Material viele Einstellungen ausprobiert. Im Gegensatz dazu hatten die Platten aus PE-LD keine hohen Schrumpfwerte, dementsprechend wurden mit diesem Material nur wenige Versuche durchgeführt.

Tabelle 1: Maschineneinstellungen Nr. 1 bis Nr. 10

Nummer	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Material	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD
Dicke [mm]	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Pumpe [U/min]	15	15	15	15	15	15	15	15	15	20
Geschwindigkeiten										
Walze 1 [%]	105	105	105	105	105	105	105	105	105	102
Walze 2 [mm/min]	800	800	800	770	770	770	770	800	800	980
Walze 3 [%]	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98
Temperierwalzen [%]	98	98	98	98	98	98	98	98	98	98
Abzug [%]	98	94	102	102	94	94	102	102	94	93
Temperaturen										
Massetemperatur [°C]	200	200	200	200	200	200	200	200	200	200
Walze 1 [°C]	92	92	92	96	96	96	92	92	92	93
Walze 2 [°C]	99	99	99	99	99	99	99	99	99	95
Walze 3 [°C]	110	110	110	113	113	113	113	113	113	103
Temperierwalzen 1/2/3 [°C]	60/60/60	60/60/60	60/60/60	60/60/60	60/60/60	60/60/60	60/60/60	60/60/60	60/60/60	60/60/60
Spalt 1 / Spalt 2 [mm]	3,4/3,4	3,4/3,4	3,4/3,4	3,4/3,4	3,05/3,4	3,05/3,4	3,05/3,3	3,4/3,4	3,4/3,4	3,4/3,4
Temperierwalzenspalt [mm]	offen	offen	offen	offen	offen	3,55	3,45	3,55	3,55	offen
Stau	klein	klein	klein	mittel	mittel	mittel	mittel	klein	klein	klein
Abstand Düse-Spalt1 [cm]	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0

Tabelle 2: Maschineneinstellungen Nr. 11 bis Nr. 19

Nummer		11	12	13	14	15	16	17	18	19
Material		PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD
Dicke	[mm]	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Pumpe	[U/min]	20	15	15	15	15	15	15	15	15
Geschwindigkeiten										
Walze 1	[%]	102	105	105	105	105	105	105	100	95
Walze 2	[mm/min]	980	800	800	800	800	800	800	800	800
Walze 3	[%]	98	98	98	97	98	98	97	98	98
Temperierwalzen	[%]	98	98	98	96,5	98	98	97	98	98
Abzug	[%]	93	96	96	95	96	96	95	96	96
Temperaturen										
Massetemperatur	[°C]	200	180	180	180	200	200	200	200	200
Walze 1	[°C]	93	92	92	92	92	92	92	92	92
Walze 2	[°C]	95	99	99	99	99	99	99	99	99
Walze 3	[°C]	107	108	108	108	108	109	110	108	108
Temperierwalzen 1/2/3	[°C]	60/60/60	80/80/65	90/90/66	90/90/67	90/90/67	80/80/67	80/80/67	90/90/67	90/90/67
Spalt 1 / Spalt 2	[mm]	3,2/3,2	3,4/3,5	3,4/3,5	3,4/3,5	3,4/3,5	3,4/3,5	3,4/3,5	3,4/3,5	3,4/3,5
Temperierwalzenspalt	[mm]	offen	3,60	3,60	3,60	3,60	3,75	3,75	3,60	3,60
Stau		mittel	klein	klein	klein	klein	klein	klein	klein	klein
Abstand Düse-Spalt1	[cm]	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0

Tabelle 3: Maschineneinstellungen Nr. 20 bis Nr. 28

Nummer		20	21	22	23	24	25	26	27	28
Material		PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-LD	PE-LD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD
Dicke	[mm]	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Pumpe	[U/min]	15	15	15	15	15	15	15	15	15
Geschwindigkeiten										
Walze 1	[%]	101	101	101	99,5	99,5	101	101	100	100
Walze 2	[mm/min]	825	835	840	863	863	835	835	835	835
Walze 3	[%]	98	98	98	99,6	99,6	98	98	98	98
Temperierwalzen	[%]	98	98	98	100	100	98	98	96	96
Abzug	[%]	96	96	98	99	99	96	96	94	94
Temperaturen										
Massetemperatur	[°C]	200	200	200	172	172	200	200	200	200
Walze 1	[°C]	92	92	94	85	32	92	92	92	92
Walze 2	[°C]	99	99	99	82	32	99	99	99	99
Walze 3	[°C]	108	108	113	102	32	108	108	108	108
Temperierwalzen 1/2/3	[°C]	90/90/62	90/90/60	0	0	0	0	0	0	0
Spalt 1 / Spalt 2	[mm]	3,3/3,3	3,3/3,3	3,3/3,3	3/3,2	3/3,2	3,3/3,3	3,3/3,3	3,3/3,3	3,3/3,0
Temperierwalzenspalt	[mm]	3,60	3,55	3,98	4,48	4,48	3,55	3,55	3,55	3,55
Stau		klein	klein	klein	klein	klein	klein	klein	klein	klein
Abstand Düse-Spalt1	[cm]	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	29,0	17,0	17,0

Tabelle 4: Maschineneinstellungen von Nr. 29 bis Nr. 37

Nummer	29	30	31	32	33	34	35	36	37
Material	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD
Dicke [mm]	3	3	3	3	4	4	4	4	4
Pumpe [U/min]	15	20	15	15	15	15	15	15	15
Geschwindigkeiten									
Walze 1 [%]	100	100	100	100	101	101	101	101	101
Walze 2 [mm/min]	835	970	835	835	650	630	610	607	607
Walze 3 [%]	98	98	98	98	98	98	98	98	98
Temperierwalzen [%]	96	96	96	96	99	100	98	98	98
Abzug [%]	94	94	94	94	98	98	98	98	98
Temperaturen									
Massetemperatur [°C]	200	200	200	200	200	200	200	200	197
Walze 1 [°C]	92	92	97	80	92	97	94	94	94
Walze 2 [°C]	99	99	104	87	98	97	98	100	100
Walze 3 [°C]	108	108	113	96	104	108	114	110	110
Temperierwalzen 1/2/3 [°C]	0	0	0	0	60/60/60	60/60/60	0	0	0
Spalt 1 / Spalt 2 [mm]	3,3/3,7	3,3/3,3	3,3/3,3	3,3/3,3	4,2/4,4	4,25/4,0	4,3/4,3	4,3/4,3	4,3/4,35
Temperierwalzenspalt [mm]	3,55	3,55	3,55	3,55	5,00	5,00	4,98	4,98	4,98
Stau	klein	klein	klein	klein	klein	klein	klein	klein	klein
Abstand Düse-Spalt1 [cm]	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17	17	17	17

3.3 Prüfung der Platten

Nach der Produktion wurden die Platten verschiedenen Prüfungen unterzogen, um den Einfluss der Verarbeitungsbedingungen untersuchen zu können. Das Hauptanliegen der Prüfungen bestand in der Messung des Schrumpfes, der als Längenänderung unter Wärmeeinwirkung bezeichnet wird. Dazu wurde einerseits der nach EN ISO 14632 genormte Versuch für Tiefziehenanforderungen und andererseits der so genannte Warmluftofentest angewandt. Unterstützend zu diesen Prüfungen wurden Zugprüfungen nach ISO 527-3 sowie Kristallinitätsmessungen mittels DSC durchgeführt.

3.3.1 Normtest für Tiefziehenanforderung (EN ISO 14632)

Von der zu prüfenden Platte wurde ein 10 cm breiter Streifen quer zur Extrusionsrichtung geschnitten. Aus diesem Stück wurden insgesamt 9 Prüflinge mit 10 cm mal 10 cm, jeweils 3 Prüflinge aus den Randbereichen (links bzw. rechts) und der Mitte entnommen. Anschließend wurden diese von links nach rechts nummeriert, wobei mit links der linke Teil der Platte in Extrusionsrichtung gemeint ist.

Für die Versuchsdurchführung wurden die Probekörper auf ein Blech mit Kaolinpulver gelegt. Dieses Pulver hat sehr gute Gleiteigenschaften und deshalb tritt kein Haften zwischen Kunststoff und Blech auf. Der Kunststoff kann sich somit ungehindert von äußeren Einflüssen verformen. Die Platten kamen für eine Stunde in den Warmluftofen (Bild 13). Die Temperatur betrug für das PE-HD 170 °C und für das PE-LD 150 °C. In der Norm wird nur das PE-HD berücksichtigt, deshalb wurde für das PE-LD eine nach den Materialdaten passende Temperatur ausgewählt.

Für die Berechnung des relativen Schrumpfes wurde Formel (23) verwendet. Die Differenz zwischen der Endlänge l_1 und der Ausgangslänge l_0 wurde durch die Ausgangslänge dividiert.

$$S = \frac{l_1 - l_0}{l_0} \cdot 100\% \quad (23)$$



Bild 13: Warmluftofen mit ausgekühlten Prüflingen des Normtests

Nach der Ofenlagerung erfolgte das Auskühlen der Platten an der Luft. Dazu wurde das Blech mit den Prüfstücken aus dem Ofen entnommen. Vor und nach der Ofenlagerung wurden die einzelnen Stücke vermessen und aus der Differenz der Schrumpfung berechnet. Aus den 9 Prüfplättchen wurde ein Mittelwert in Längs- und Querrichtung berechnet. In Bild 14 sind die geschrumpften Prüflinge nach dem Test abgebildet.



Bild 14: Geschrumpfte Platten nach dem Normtest

3.3.2 Warmluftofentest

Der Warmluftofentest wird teilweise als Eingangskontrolle bei Firmen die orthopädische Platten umformen, verwendet. Diese Prüfung ist wichtig im Hinblick auf die Weiterverarbeitung, da nach dem gleichen Prinzip die Platten umgeformt werden. Aus diesem Grund wurde diese Prüfung ausgewählt um einen zweiten praxisgerechten Schrumpfwert zu erhalten.

Für die Versuchsdurchführung wurde ein 1 m breiter Streifen der Platte in zwei 50 cm mal 50 cm große Stücke geschnitten und vermessen. Anschließend wurden die Prüfstücke auf eine Teflonfolie gelegt und bei 180 °C für ca. 10 Minuten auf einem Blech im Warmluftofen erhitzt. Sobald der Kunststoff auf der gesamten Fläche glasig war, wurde dieser mitsamt der Teflonfolie aus dem Ofen genommen und auf eine Holztafel zum Auskühlen gelegt. Holz wurde als Unterlage gewählt, weil darauf die Platten gleichmäßig abkühlen und relativ eben blieben. Dadurch war eine genaue Vermessung der Platten möglich. Nach dem Auskühlen wurden die Platten vermessen und aus der Differenz zu den Anfangsabmessungen der Schrumpf berechnet.

In Bild 15 sind die ausgekühlten Prüflinge nach dem durchgeführten Warmluftofentest zu sehen. Die Buchstaben L,M und R stehen für Links, Mitte und Rechts. Bei diesem Bild sind die Abmessungen noch ca. 40 cm in Längs- bzw. Extrusionsrichtung und ca. 45 cm in Querrichtung je Platte.

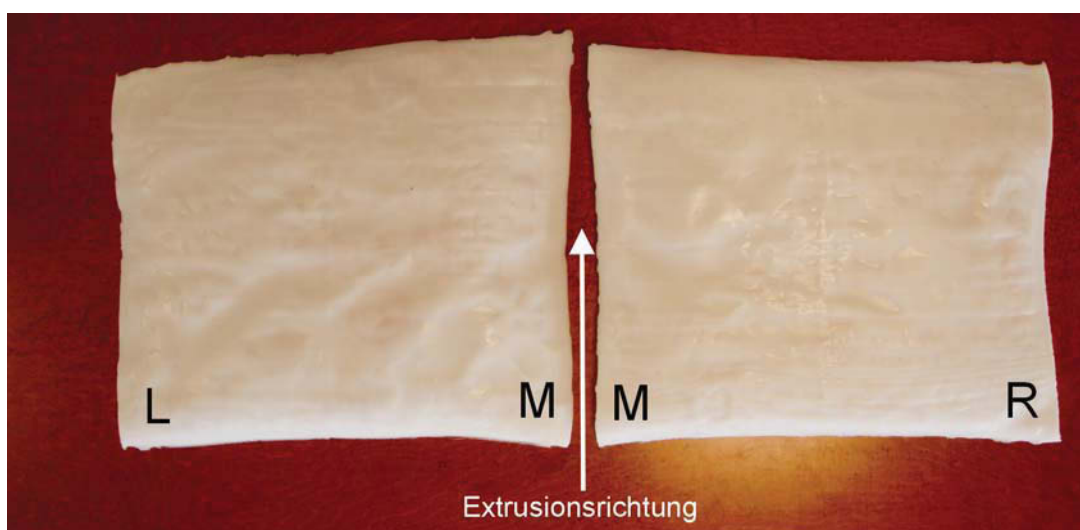


Bild 15: Prüfstücke nach dem Warmluftofentest

3.3.3 Zugprüfung

Für die Durchführung von Zugversuchen nach ISO 527-3 wurden aus dem Mittelteil der Platte in Längs- sowie in Querrichtung Prüfkörper mit der Bezeichnung „1b“ ausgestanzt. Der Zugversuch erfolgte auf einer Prüfmaschine der Fa. Zwick/Roell mit der Bezeichnung ZMARTPRO (Bild 16).



Bild 16: Zugprüfmaschine

Von jedem Versuch wurde die Streckspannung und die Streckdehnung unter Normklima (23 °C, 50 % r. F.) ermittelt. Die Prüfgeschwindigkeit betrug 20 mm/min.

3.3.4 Kristallinitätsmessung

Die Messung der Kristallinität erfolgte mittels Dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC). Das Messprinzip ist in [10] ausführlich erklärt. Die verwendete DSC ist von der Fa. Mettler Toledo mit der Typenbezeichnung DSC 820.

Für die Messung des Kristallisationsgrades wurden Proben an der Ober- und Unterseite der Plattenmitte entnommen (Bild 17). Die Proben wurden gewogen und danach in den Tiegel gelegt. Ein Deckel, in den zuvor 2 kleine Löcher gebohrt wurden, wurde aufgespresst. Für die Messung der Kristallinität wurde ein Aufheizen bis 190°C ausgewählt.

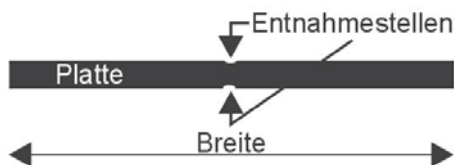


Bild 17: Entnahmestellen für die DSC-Proben

Die Auswertung der DSC-Kurve (Bild 18) erfolgte mit dem Programm eStar 6.10. Für die Messung des Kristallisationsgrades wird über einen bestimmten Temperaturbereich der Kurve integriert und die Wärmemenge berechnet, um die Probe aufzuschmelzen. Daraus kann das Programm den Kristallisationsgrad berechnen.

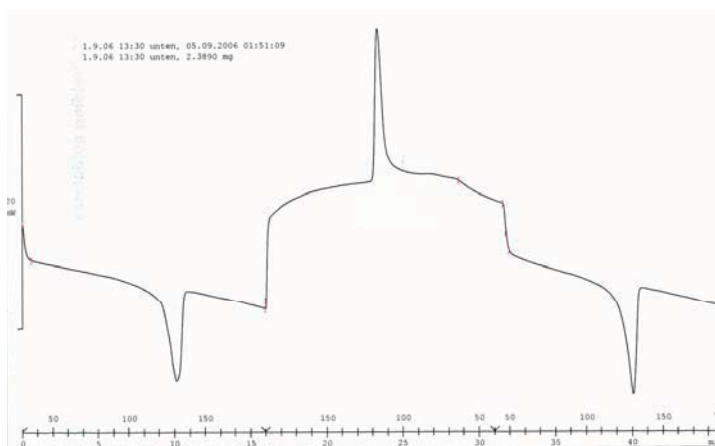


Bild 18: Beispiel einer DSC-Kurve

In Bild 18 ist eine DSC-Kurve mit zweimaligem Aufheizen dargestellt. Der für die Messung interessante Bereich ist der linke Teil (1. Aufheizen), wohingegen der rechte Teil die thermische Vorgeschichte des Materials durch das 2. Aufheizen vernachlässigt.

3.4 Temperaturmessungen

Während der Produktion der Platten wurden die Temperaturen des Kunststoffes an bestimmten Stellen zwischen Düsenaustritt und Abzug gemessen. Dafür wurden Infrarotthermometer verwendet. Zur Verifizierung der Infrarotmessungen wurde die Temperatur des Kunststoffs teilweise mit einem Kontaktthermoelement nachgemessen.

3.4.1 Miniatur Infrarot Sensor mit Aufzeichnungsgerät

Zur Messung der Temperaturen über einen längeren Zeitraum wurden 5 Miniatur Infrarot Sensoren (IR-Fühler) an bestimmten Punkten der Anlage montiert (Bild 19). An jeder Messstelle wurde die Temperatur im Abstand von jeweils einer Sekunde bestimmt. Diese Sensoren werden von der Fa. Raytek mit der Bezeichnung MID hergestellt und wurden an ein Aufzeichnungsgerät mit Monitor angeschlossen. Von diesem wurden die Daten in einen Computer eingespielt und nach Umwandlung in ein Excel-Format wurden die Temperaturwerte verarbeitet und graphisch dargestellt.

Der Messbereich der Sensoren liegt zwischen -40 °C bis 600 °C , wobei der Emissionsgrad ε eingestellt werden kann. Für die Messungen wurde $\varepsilon = 0,95$ gewählt. Die Systemgenauigkeit wird mit $\pm 1\text{ °C}$ bzw. $\pm 1\%$ vom Messwert angegeben, wobei der größere Wert der Gültige ist. Der Spektralbereich der Fühler liegt zwischen $8\text{ }\mu\text{m}$ und $14\text{ }\mu\text{m}$.

Der Vorteil dieser IR-Fühler liegt in den kompakten Abmessungen, die auch an schwer zugänglichen Stellen (Bild 19) Messungen möglich machten. Beispielsweise wurde ein Gestell konstruiert, um im Bereich der Walze 3 des Glättwerks sowie unmittelbar nach dem Düsenaustritt Temperaturmessungen durchführen zu können, ohne die Qualität der produzierten Platten zu beeinträchtigen. Die restlichen Fühler konnten entlang der Anlage ohne ein zusätzliches Gestell platziert werden. Die Punkte der Temperaturmessung entlang der Extrusionslinie befinden sich nach dem Düsenaustritt, nach dem 2. Spalt im Glättwerk, vor den Temperierwalzen, nach den Temperierwalzen und nach dem Abzug (Bild 21).

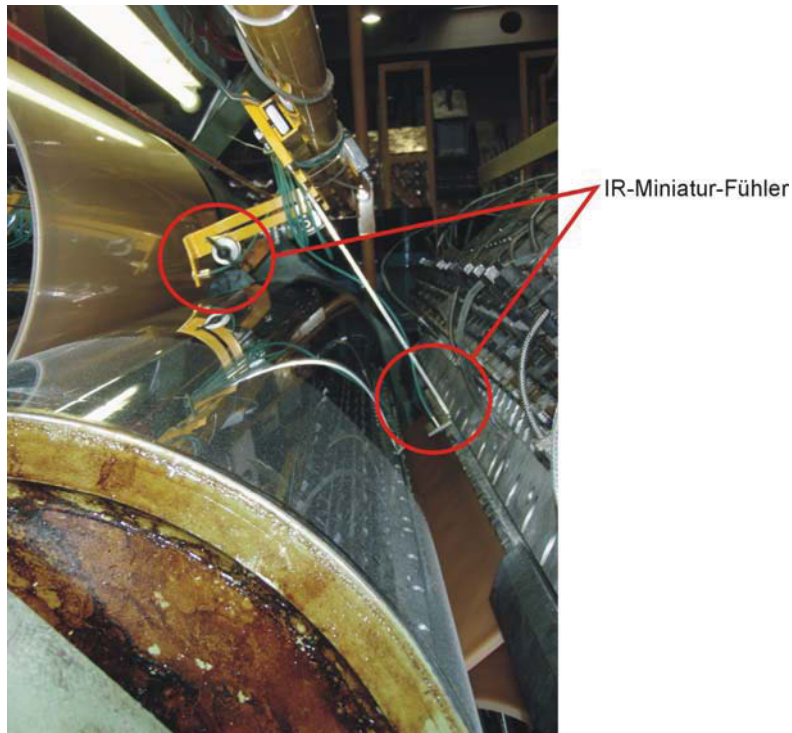


Bild 19: Temperaturmessung mittels IR-Fühler beim Düsenaustritt und nach Spalt 2

3.4.2 Infrarot Handgerät für Temperaturmessungen

Während die IR-Fühler stationäre Messungen über einen längeren Zeitraum ermöglichen, war mithilfe des Infrarot-Handmessgerätes die Messung an zusätzlichen Stellen der Anlage möglich. Dieses Gerät mit der Bezeichnung „Raynger ST4I“ ist ebenfalls von der Fa. Raytek (Bild 20). Das Infrarot-Handgerät (IR-Handgerät) weist eine Genauigkeit von $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ bzw. $\pm 2 \%$ vom Messwert auf und der Emissionsgrad wurde passend für PE auf 0,95 eingestellt.



Bild 20: IR-Handgerät

Die Stellen an denen Temperaturmessungen durchgeführt wurden, sind in Bild 21 eingezeichnet. Diese Stellen zur Temperaturmessung wurden aufgrund der Gegebenheiten der Anlage bzw. zur Erfassung eines Abkühlprofils ausgewählt.

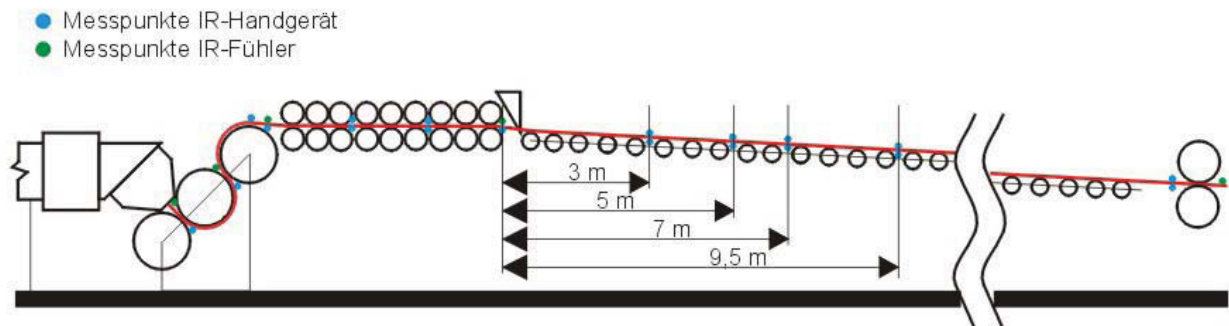


Bild 21: Messpunkte der IR-Fühler und des IR-Handgerätes

3.4.3 Kontakt-Thermoelement

Zur Kontrolle der mit den Infrarot Thermometer gemessenen Temperaturen wurde an manchen Stellen Vergleichsmessungen mit einem Kontakt-Thermoelement der Fa. Ebro mit der Bezeichnung „TFN 520“ und dem Messfühler „TPN 700“ (Bild 22) gemessen. Das besondere an dem Messgerät ist der Messkopf, der für bewegte und auch rotierende Oberflächen geeignet ist.



Bild 22: Kontaktthermoelement mit speziellem Messfühler für bewegte Oberflächen

4 Ergebnisse und Diskussion

Dieses Kapitel teilt sich in 3 Bereiche auf. Das Berechnungsprogramm bzw. die Ergebnisse der Berechnungen, die ein wesentlicher Teil dieser Arbeit waren, werden zuerst vorgestellt. Der 2. Teil befasst sich mit den durchgeführten Temperaturmessungen und dem Vergleich der gemessenen mit den berechneten Temperaturen. Damit soll das Berechnungsprogramm verifiziert werden. Im 3. Abschnitt wird der Einfluss der Prozessparameter auf den Schrumpf diskutiert.

4.1 Entwicklung des Berechnungsprogramms

Die Messung der Oberflächentemperaturen gibt keinen Aufschluss über die Temperaturen im Inneren der Platte. Zur Ermittlung dieser Innentemperaturen wurde in Microsoft Visual Basic (Visual Basic) ein Programm erstellt. Dieses basiert auf dem Prinzip der instationären Wärmeleitung in ruhenden Körpern. Die dabei verwendete Fourier'sche Differentialgleichung und numerische Lösung wurden bereits in Kapitel 2 vorgestellt.

4.1.1 Grundlegendes

Ausgehend von einer Temperaturverteilung in der Platte zur Zeit $t=0$ können durch die Randbedingungen und Bestimmungsgleichungen die Temperaturen entlang der Kühlstrecke berechnet werden.

Die Tafelextrusionsanlage wurde zunächst zwischen der Bereitschlitzdüse und dem Abzug in bestimmte Bereiche aufgeteilt (Bild 23), in denen verschiedene Abkühlbedingungen bzw. Randbedingungen auftraten. Bei Kontakt der Platte mit einer Walze herrschte auf der betreffenden Seite Wärmeleitung (Kontakttemperatur) während bei Abkühlung an der Luft eine Kombination von freier Konvektion und Wärmestrahlung vorlag. Diese Randbedingungen wurden für jeden der 24 Bereiche im entwickelten Programm entsprechend berücksichtigt.

Da die Aufteilung der Bereiche und die zugehörigen Randbedingungen spezifisch für die verwendete Anlage war, konnte das Programm nur für diese bzw. baugleiche Maschinen verwendet werden. Durch eine Änderung des Programmiercodes wäre allerdings eine Adaptierung für andere Anlagen jederzeit möglich.

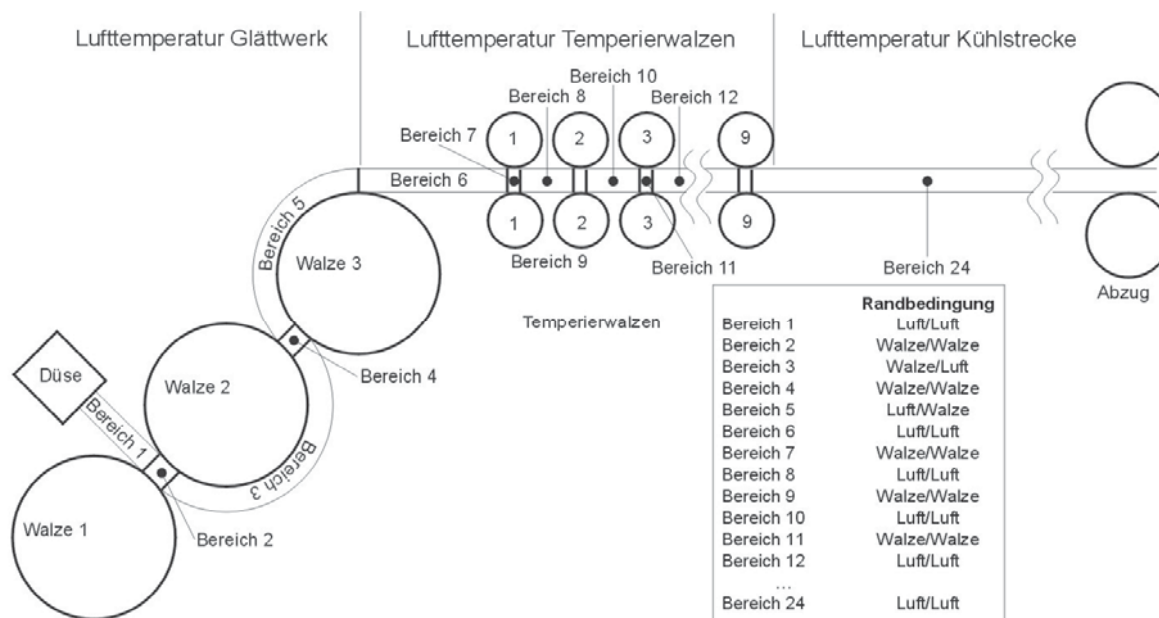


Bild 23: Aufteilung der Anlage in verschiedene Bereiche

Für die Berechnung wurden folgende Vereinfachungen getroffen:

- Die Breite des Extrudats blieb konstant
- Die Bahn wurde nicht verstreckt
- Eine Wärmeleitung in Abzugsrichtung wurde vernachlässigt
- Die Erhöhung der inneren Energie durch Friktion wurde vernachlässigt
- Die Schwindung in Abzugsrichtung wurde verhindert
- Der Außendruck blieb konstant
- Keine Wärmeleitung in Breitenrichtung
- Konstante Stoffeigenschaften (Ausnahme Wärmeleitung)

Die Wärmeleitung von Kunststoff ist von der Temperatur abhängig und beeinflusst daher die Berechnung wesentlich. In der ersten Version der Berechnung wurde die Wärmeleitfähigkeit λ mittels zwei konstanten Werten berücksichtigt. Aus dem Datenblatt des Rohstoffherstellers wurde jeweils ein Wert für λ bei 150 °C und bei 20 °C entnommen und in die Berechnung so integriert, dass der Bereich vom Düsenaustritt bis zu den Temperierwalzen mit dem λ bei 150 °C berechnet wurde und die restliche Kühlstrecke mit der Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C. Mit dieser Vorgangsweise konnten allerdings keine brauchbaren Temperaturen berechnet werden und so

wurde die Wärmeleitfähigkeit als Funktion der Temperatur in die Berechnung aufgenommen. Die Berechnung der Wärmeleitung erfolgte über ein Polynom 4. Ordnung (Bild 24).

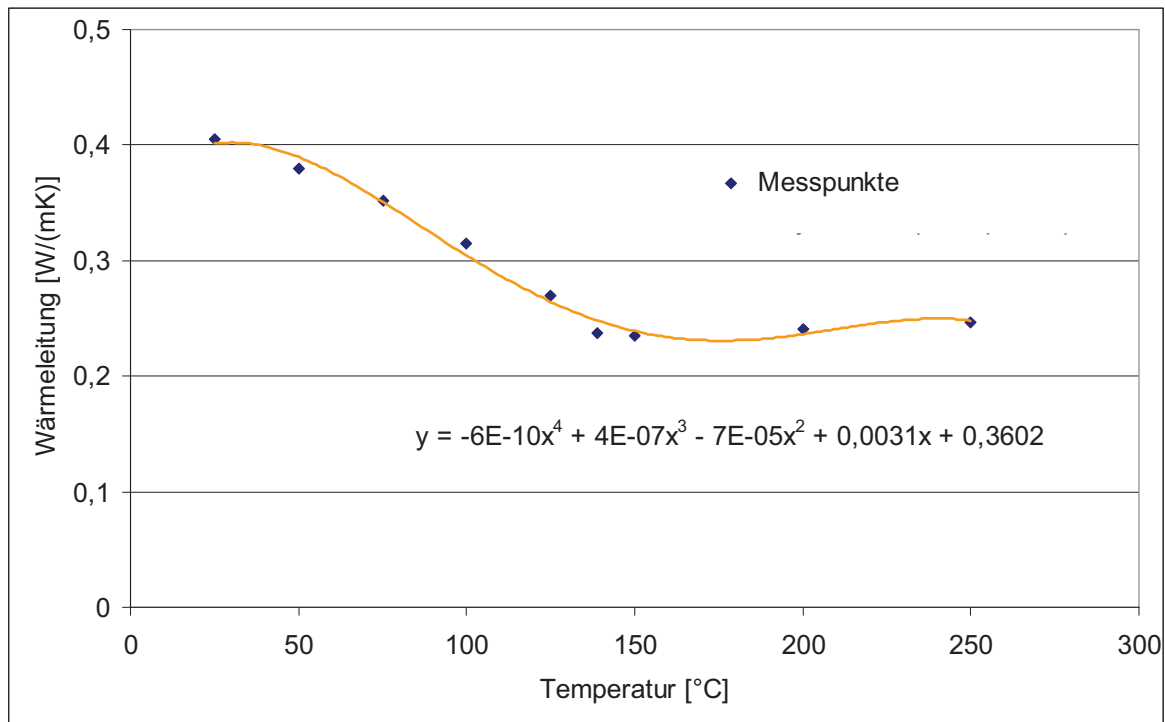


Bild 24: Messpunkte und Funktion der Wärmeleitfähigkeit des PE-HD

Ein weiteres Problem bei der Berechnung stellten die Temperierwalzen dar. Das Programm berechnete eine Kontakttemperatur, doch wegen der kurzen Kontaktzeit zwischen Walze und Kunststoff wurde vermutlich die Temperatur über diesen Weg zu niedrig berechnet. Zusätzlich war der Spalt zwischen den Temperierwalzen größer als die Dicke der Kunststoffbahn, was zu einem schlechten Kontakt zwischen Walzen und Kunststoff führte.

Zur Verbesserung des Programms wurde ein Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_{\text{Walze,Kunststoff}}$ zwischen Temperierwalzen und Kunststoff eingeführt, dadurch konnte die kurze Kontaktzeit und der schlechtere Kontakt besser berücksichtigt werden. Dieses $\alpha_{\text{Walze,Kunststoff}}$ wurde in der Berechnung mit $60 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ angenommen. Dadurch verbesserten sich die berechneten Temperaturen nach den Temperierwalzen.

4.1.2 Ablauf und Bedienung einer Berechnung

Die Eingabe der Prozessparameter bzw. der Berechnungseinstellungen erfolgte in Excel (s. Beispiel in Tabelle 5). Danach wurde die Berechnung der Ergebnisse mit dem in Visual Basic geschriebenen Programm durchgeführt und die Temperaturen werden mittels Diagrammen und Tabellen in Excel dargestellt. Die Werte für diese exemplarische Berechnung entsprechen der Einstellung Nr. 18.

Tabelle 5: Eingabemaske des Berechnungsprogramms – Einstellung Nr. 18

Kunststoff	Abkürzung	Werte	Einheiten
Plattendicke	d	0,003	m
Dichte	ρ	950	kg/m ³
Wärmekapazität	c_p	2300	J/(kg*K)
Extrudattemperatur	Ta	210	°C
Glättwerk			
Walzentemperatur 1	Tw1	92	°C
Walzentemperatur 2	Tw2	99	°C
Walzentemperatur 3	Tw3	108	°C
Lufttemperatur Kalander	Tu	70	°C
Fahnenlänge (Düse-1.Spalt)	fz1	17	cm
Spalt 1 (Walze 1-2/Kunststoff)	sz1	3	cm
Kontakt 1 (Walze 2/Kunststoff)	kz1	78,5	cm
Spalt 2 (Walze 2-3/Kunststoff)	sz2	3	cm
Kontakt 2 (Walze 3/Kunststoff)	kz2	58,9	cm
Kühlstrecke bis Temperierwalzen	kuz	35	cm
Walzen			
Dichte	ρ_{Walze}	7800	kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit	λ_{Walze}	60	W/(m*K)
Wärmekapazität	c_{pWalze}	480	J/(kg*K)
Abzugsgeschwindigkeit	v	784	mm/min
9 Temperierwalzen			
Kontaktlänge	Tempkz	0,5	cm
Zwischenlänge	Tempzz	18,0	cm
Temperatur Walzengruppe 1 unten	TTW1	90	°C
Temperatur Walzengruppe 2 oben	TTW2	90	°C
Temperatur Walzengruppe 3	TTW3	70	°C
Umgebungstemperatur Temperierw.	Tut1	70	°C
Wärmeübergangskoeff. Temperierw.	$\alpha_{Walze,Kunststoff}$	60	W/m ² *K
Restkühlstrecke			
Restkühlstrecke bis Abzug	azz	1500	cm
Lufttemperatur Kühlstrecke Beginn	Tu1	35	°C
Lufttemperatur Kühlstrecke Ende	Tu2	30	°C
Wärmeübergangskoeffizient Luft	α_{Luft}	7	W/(m ² *K)
Zeitschritt			
Zeitschritt	Δt	0,1	s

Bevor die Berechnung durchgeführt werden konnte, mussten alle Felder in der Eingabemaske mit den entsprechenden Werten ausgefüllt werden. Ein besonders wichtiger Eingabeparameter war die Zeitschrittlänge, da diese unter Berücksichtigung der Stabilitätsbedingung (25) gewählt werden musste.

$$\Delta t \leq \frac{1}{2} \cdot \frac{(\Delta y)^2}{a} \quad (24)$$

Δy Schichtdicke ist bei 3 mm Plattendicke und 10 Schichten: 0,0003 m

a Temperaturleitfähigkeit: $1,11 \cdot 10^{-7}$ W/(mK)

Daraus ergab sich für den betrachteten Fall eine maximale Zeitschrittweite von ca. 0,4 s. Für alle Berechnungen wurde der Zeitschritt auf 0,1 s festgelegt, um auch bei Änderungen der eingegebenen Parameter auf der sicheren Seite zu liegen. Bei einer Zeitschrittlänge von 0,1 s wurde die gesamte Berechnung in ca. 14000 Zeitschritte aufgeteilt, jedoch hingte dieser Wert von der Abzugsgeschwindigkeit ab.

Bei der Eingabe der Längen (Fahnenlänge, Spalt 1, Kontakt 1, ...) wurden Längenangaben in cm verwendet. Die Längenangabe bei Spalt 1 beschrieb, über welchen Weg das Extrudat mit beiden Walzen in Berührung war. Für die Berechnung wurde davon ausgegangen, dass sich die Extrudatbahn in allen Bereichen der Anlage mit der Abzugsgeschwindigkeit bewegte und das Programm berechnete dann aus den Längenangaben in Abhängigkeit von der Abzugsgeschwindigkeit die entsprechenden Zeiten.

Die beheizten Walzen bzw. die Düse in den genannten Abschnitten der Maschine trugen zur lokalen Erhöhung der Lufttemperatur bei. Aus diesem Grund wurden im Berechnungsprogramm diese Temperaturunterschiede, die die Abkühlung der extrudierten Bahn an der Luft beeinflussten, berücksichtigt. Die Anlage wurde daher in die drei Bereiche „Lufttemperatur Glättwerk“, „Lufttemperatur Temperierwalzen“ und „Lufttemperatur Kühlstrecke“ aufgeteilt. Auf Grund von Messungen wurden die Lufttemperaturen für die Berechnung beim Walzwerk mit 70 °C und bei den Temperierwalzen ebenfalls mit 70 °C angenommen. Entlang der restlichen Kühlstrecke wurde eine abfallende Lufttemperatur von 35 °C auf 30 °C gewählt, um den Verhältnissen in der Produktionshalle gerecht zu werden. In der Berechnung musste der Wert für den Wärmeübergangskoeffizient für Luft angenommen werden. In

der Literatur wird dieser Wert mit ca. 7-12 W/m²*K angegeben [6]. In der Berechnung wurde für das $\alpha_{\text{Luft}}=7 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ verwendet.

Nachdem alle Werte eingegeben wurden, konnte die Berechnung gestartet werden. Der Rechengvorgang dauerte ca. eine halbe Minute auf einem Pentium 4 mit 1700Mhz.

Anschließend erfolgte die automatische Ausgabe der Ergebnisse in Diagrammen und Tabellen. In Tabelle 6 sind die berechneten Temperaturen über die Dicke an bestimmten Positionen für die hier beschriebene beispielhafte Berechnung aufgelistet.

Tabelle 6: Ausgabe der berechneten Temperaturen in Tabellenform

	Austritt	Spalt 1		Spalt 2		Ende	Temperierwalze 1		Kühlstrecke	
	Düse	Beginn	Ende	Beginn	Ende	Kalander	Beginn	Ende	Beginn	Ende
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
Oben 0	210	205,3	109,3	109,3	109,3	107,6	103,8	103,3	95,2	37,2
1	210	206,0	137,5	110,3	110,8	107,8	104,1	103,9	96,3	37,3
2	210	206,6	162,1	112,6	112,2	108,0	104,4	104,3	96,9	37,3
3	210	207,0	180,5	114,1	113,6	108,1	104,7	104,6	97,1	37,3
4	210	207,3	192,1	115,5	114,8	108,2	104,8	104,8	97,2	37,3
5	210	207,5	197,6	116,8	115,7	108,3	104,9	104,8	97,2	37,4
6	210	207,5	197,3	117,9	116,3	108,3	104,9	104,8	97,2	37,4
7	210	207,3	191,3	118,7	116,2	108,3	104,8	104,8	97,2	37,3
8	210	207,0	178,9	119,3	115,5	108,3	104,7	104,6	97,1	37,3
9	210	206,6	159,2	119,6	113,9	108,2	104,4	104,3	96,9	37,3
10	210	206,0	133,0	119,6	111,7	108,2	104,1	103,9	96,3	37,3
Unten 11	210	205,3	102,9	119,4	109,1	108,1	103,8	103,3	95,2	37,2

Für einen leichteren Überblick wird Tabelle 6 auch grafisch in Form eines Diagramms (Bild 25) angezeigt. Die Linien zwischen den Schichten 1-2 und 11-12 zeigen die Position der Plattenoberfläche an. Wie schon in Kapitel 2 erwähnt, lagen 2 Berechnungspunkte um jeweils eine halbe Schichtdicke außerhalb der Platte.

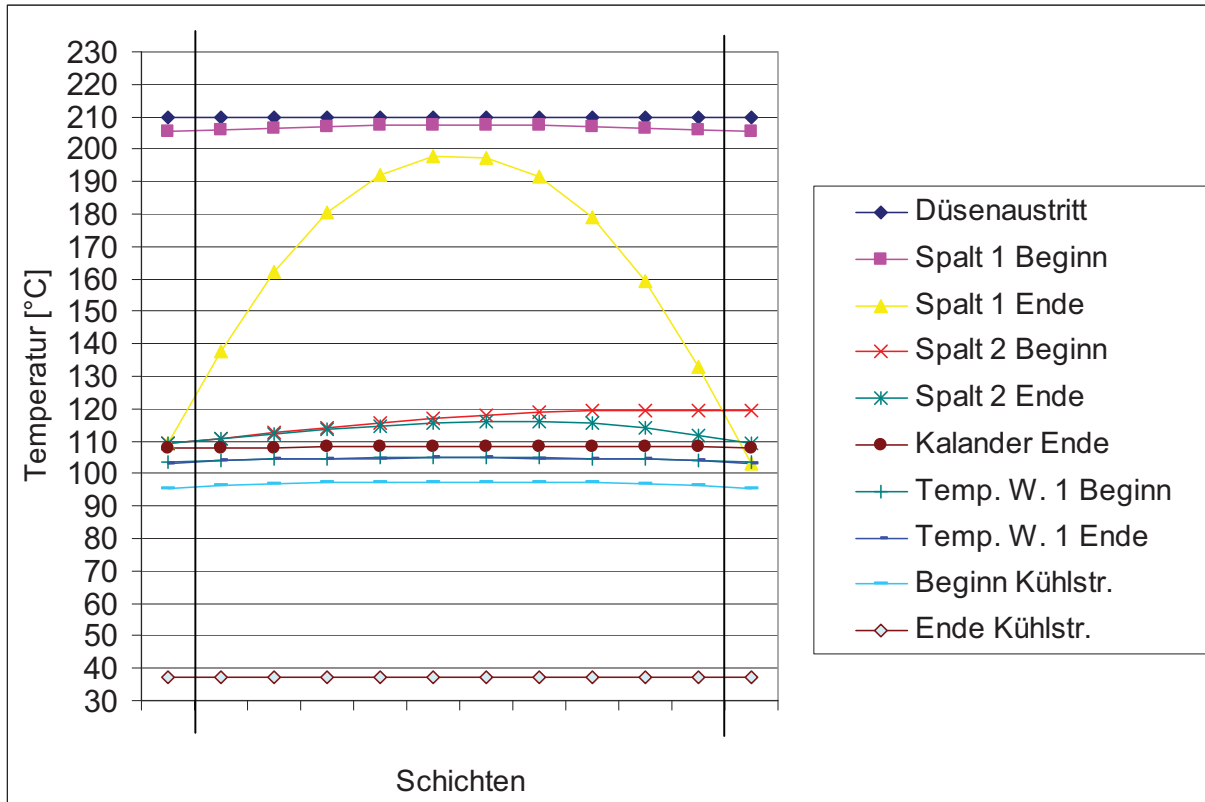


Bild 25: Temperaturverlauf über die Dicke an bestimmten Positionen

Die Stellen bzw. Zeitpunkte an der Maschine, an denen die in Bild 25 und Tabelle 6 dargestellten Temperaturen berechnet wurden, sind in Bild 25 dargestellt. Durch eine kleine Änderung des Programms könnten die Temperaturprofile über die Dicke an weiteren bzw. anderen Stellen angezeigt werden.

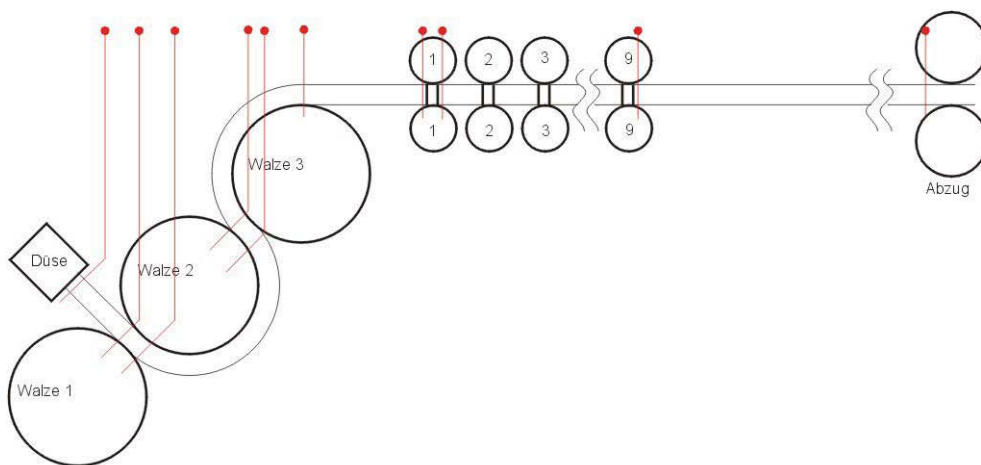


Bild 26: Berechnungspunkte entlang der Anlage entsprechend Tabelle 6 und Bild 25

Der Temperaturverlauf der Ränder und der Mitte entlang der Kühlstrecke ist in Bild 27 dargestellt. So kann der unterschiedliche Abkühlverlauf zwischen oberen und unteren Rand der Platte nachvollzogen werden. Außerdem ist leicht zu erkennen wie sich die Temperatur in der Mitte der Extrudatbahn verhielt. Die Temperaturkurven sind in diesem Fall nur bis zum 5000. Zeitschritt angezeigt, da besonders dieser Anfangsbereich interessant ist. Bei dieser Darstellung wurden die Oberflächentemperaturen der Ränder über den Mittelwert der 2 umliegenden Berechnungspunkte berechnet.

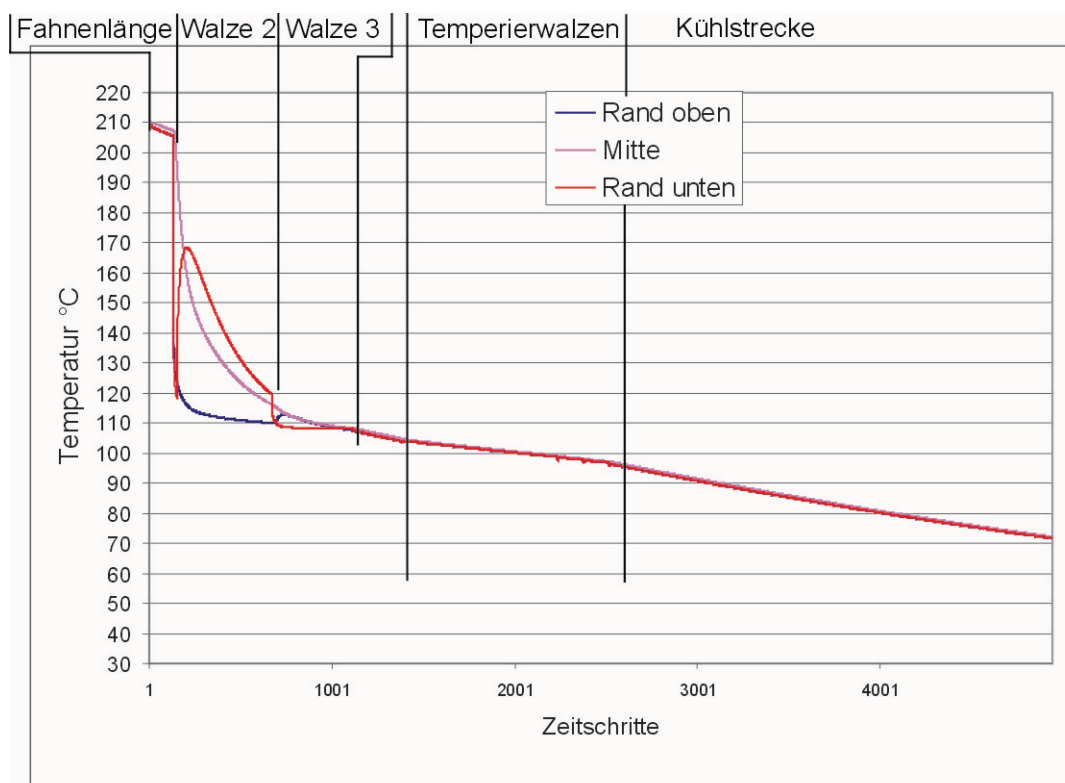


Bild 27: Temperaturverlauf der Plattenoberflächen und der Plattenmitte entlang der Kühlstrecke

Mithilfe dieser Berechnung wurde das Abkühlverhalten des Kunststoffes entlang der Anlage ersichtlich. Während der Fahnenzeit kühlte das Extrudat an der Oberseite, an der Unterseite und in der Mitte leicht ab, doch im 1. Walzenspalt sanken die Temperaturen dann dramatisch. Nach dem Spalt stieg die Temperatur der Plattenunterseite wieder an, während der obere Teil der Platte weiter an der Walze gekühlt wurde. Beim 2. Walzenspalt sank die Temperatur der Unterseite ab und danach wurde die Oberseite etwas wärmer, da in der Mitte der Platte noch höhere Temperaturen vorherrschten. Bis zum Ende des Glättwerks hatten Oberseite,

Unterseite und Mitte fast die gleichen Temperaturen erreicht. In den 9 Paaren der Temperierwalzen wurde der Kunststoff periodisch immer wieder leicht abgekühlt. Entlang der restlichen Kühlstrecke erfolgte dann langsames Abkühlen an der Luft.

Dieses Berechnungsprogramm ist sehr einfach zu bedienen und erfordert nur wenige Kenntnisse in Excel. Durch die kurze Berechnungszeit sind schnelle Aussagen über das Abkühlverhalten des Kunststoffes möglich.

4.2 Temperaturmessungen und Vergleich mit der Berechnung

Im Zuge dieser Arbeit wurden während der Produktion von Platten die Temperaturen an bestimmten Stellen mit den in Kapitel 2 vorgestellten Sensoren gemessen. Diese Werte wurden den berechneten Temperaturen gegenübergestellt, um das Berechnungsprogramm zu verifizieren.

Durch die Temperaturmessung wurde zunächst die Zeit, bis stationäre Verhältnisse nach dem Anfahren vorherrschen, eruiert. In Bild 27 ist eine Temperaturmessung der IR-Fühler über einen Zeitraum dargestellt und daraus konnte geschlossen werden, dass nach etwas weniger als zwei Stunden stationäre Verhältnisse vorlagen.

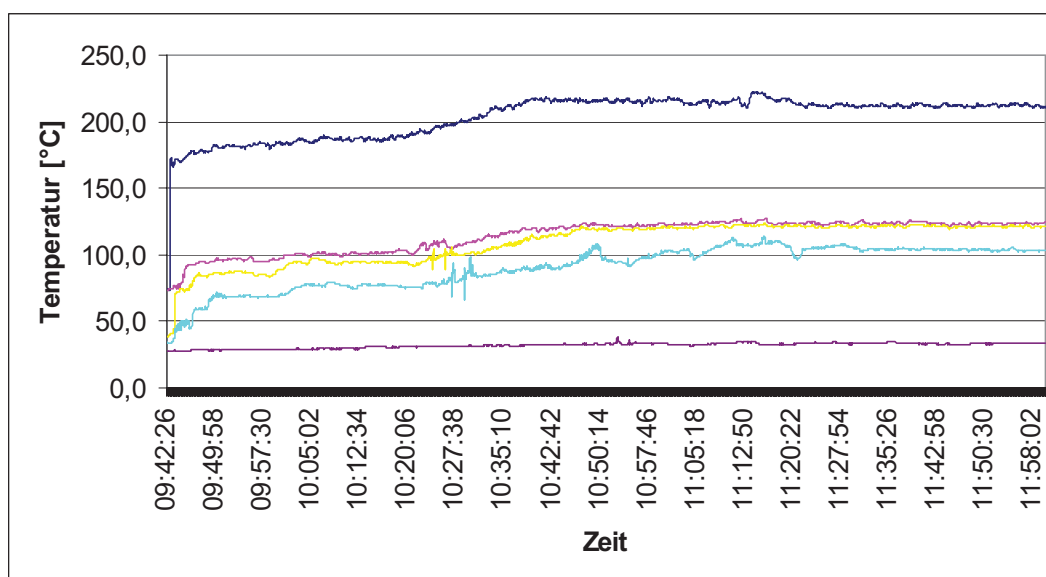


Bild 28: Temperaturmessung während des Anfahrens

Ein weiterer Vorteil einer Überwachung mit Temperatursensoren lag darin, dass Produktionsfehler durch defekte Maschinenteile schneller erkannt wurden. In Bild 8 ist ein Beispiel zu sehen, bei dem es zu einem relativ raschen Abfall der Düsenaustrittstemperatur kam. Dieser Temperaturabfall hatte sich dann nach und nach auch bei den anderen Messstellen bemerkbar gemacht (Bild 29).

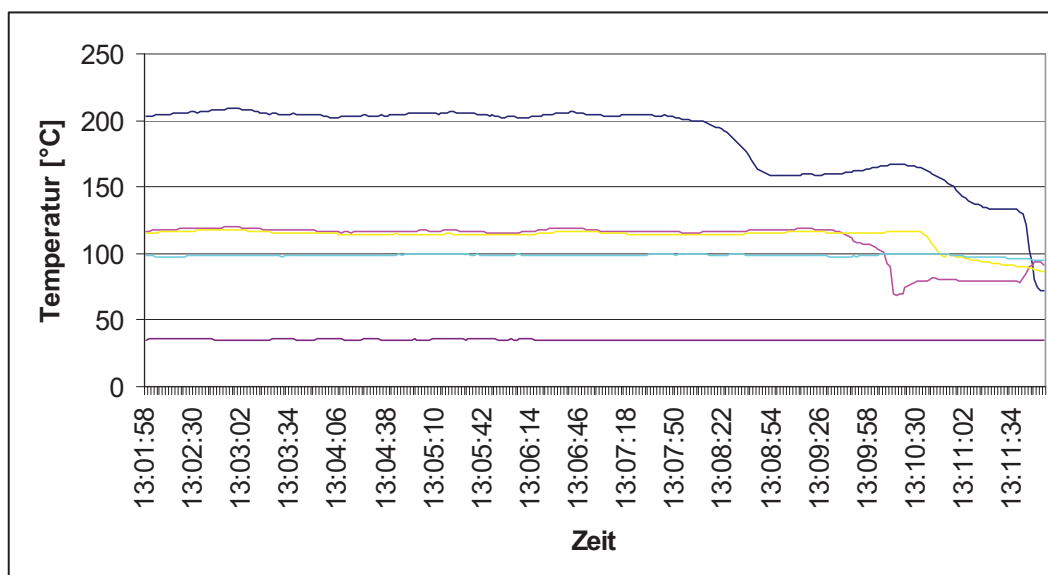


Bild 29: Temperaturmessung und Fehlererkennung

Obwohl eine deutliche Änderung der Temperaturen gemessen wurde, konnte anfangs über die optische Kontrolle der Platten noch kein Fehler entdeckt werden. Letztlich wurde der Produktionsprozess angehalten, bevor Platten mit schlechter Qualität produziert wurden.

4.2.1 Temperaturmessungen bei Einstellung Nr. 18

In Tabelle 7 sind die gemessenen Temperaturen an verschiedenen Positionen der Anlage bei der Einstellung Nr. 18 aufgelistet.

Tabelle 7: Gemessene Temperaturen der Einstellung Nr. 18

Einstellung 18	T
Position	[°C]
1: Düsenaustritt ca. 5 cm nach Düse	210,0
nach 1. Spalt Unterseite	160,0
2: Nach 2. Spalt Oberseite	117,0
bei Verlassen der 3. Walze Oberseite	110,0
3: vor Temperierwalzen Oberseite	112,0
vor Temperierwalzen Unterseite	115,0
nach 3. Temperierwalze Oberseite	109,0
nach 3. Temperierwalze Unterseite	113,0
nach 6. Temperierwalze Oberseite	108,0
nach 6. Temperierwalze Unterseite	109,0
4: Nach Temperierwalzen Oberseite	100,0
nach Temperierwalzen Unterseite	101,0
3 m nach Temperierwalzen Oberseite	74,0
7 m nach Temperierwalze Oberseite	53,0
9,5 m nach Temperierwalze Oberseite	45,0
5: Abzug	35,0

Mit dem Aufzeichnungsgerät wurden Temperaturmessungen an 5 Stellen der Anlage über einen längeren Zeitraum durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass die Temperaturen während des Prozesses um einen Wert von ± 3 °C schwankten. In Bild 30 ist ein Zeitraum von ca. 30 Minuten dargestellt. Die Reihen bezeichnen die Aufnehmer 1 bis 5 der Miniatur-Infrarot-Messfühler entlang der Anlage. Die Positionen der Messungen können aus Bild 21 entnommen werden.

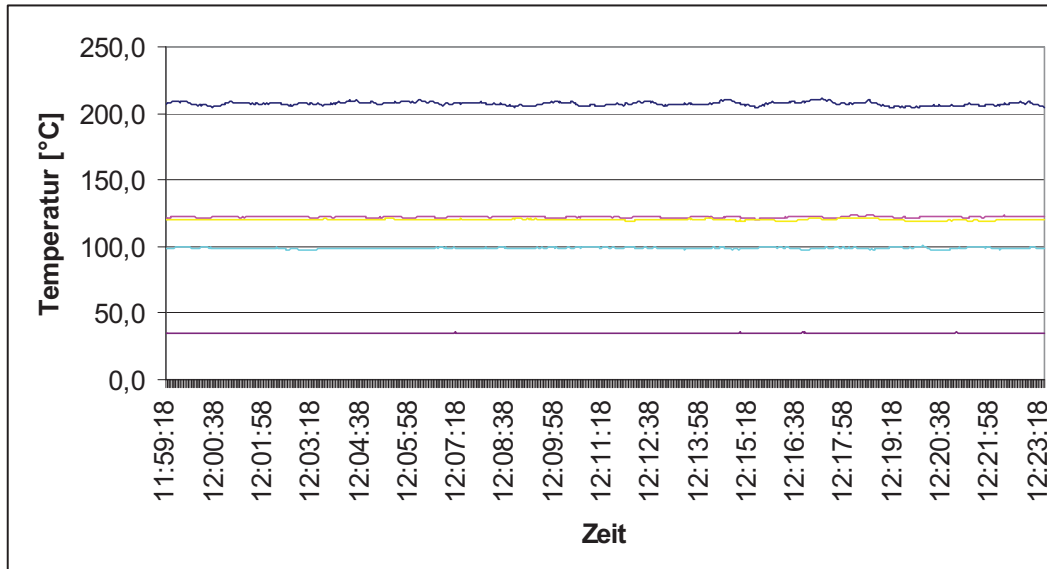


Bild 30: Temperaturmessung über einen Zeitraum von ca. 30 Minuten

Nach der Auswertung der Temperaturmessungen zeigten sich nur geringe Unterschiede der Temperaturen an den Messstellen zwischen den verschiedenen Produktionseinstellungen.

4.2.2 Vergleich der berechneten mit den gemessenen Temperaturen

Für den Vergleich der Berechnung mit den gemessenen Temperaturen wurden bestimmte Stellen entlang der Anlage festgelegt. Diese Punkte entsprechen einigen Temperaturmesspunkten (Bild 21) aus Kapitel 3.

- a) Temperatur ca. 17 cm nach dem 1. Walzenspalt
- b) Temperatur ca. 17 cm nach dem 2. Walzenspalt
- c) Temperatur beim Verlassen der 3. Walze
- d) Temperatur ca. 16 cm vor den Temperierwalzen
- e) Temperatur ca. 21 cm nach den Temperierwalzen
- f) Temperatur ca. 300 cm nach den Temperierwalzen
- g) Temperatur ca. 950 cm nach den Temperierwalzen
- h) Temperatur beim Abzug

Für die Gegenüberstellung (Tabelle 8) der gemessenen mit den berechneten Temperaturen wurde die Einstellung Nr. 18 ausgewählt. Die vollständige Berechnung ist in Kapitel 4.1.2 zu finden.

Tabelle 8: Vergleich der gemessenen mit den berechneten Temperaturen

Punkt	Berechnet	Gemessen	Differenz
	T_B [°C]	T_G [°C]	$T_G - T_B$ [°C]
a)	159,1	160,0	0,9
b)	111,4	117,0	5,6
c)	107,5	110,0	2,5
d)	106,8	112,0	5,2
e)	95,6	100,0	4,4
f)	64,4	74,0	9,6
g)	41,4	45,0	3,6
h)	37,3	35,0	-2,3

Die berechneten Temperaturen waren bei fast allen Vergleichspunkten zu niedrig. Nur die Temperatur beim Abzug wurde zu hoch berechnet. Bei diesen Ergebnissen wurde die spezifische Wärmekapazität c_p des Kunststoffes als ein konstanter Wert berücksichtigt, doch bei teilkristallinen Kunststoffen (z.B. PE-HD) ist diese von der Temperatur abhängig. Im Temperaturbereich der Kristallisation steigt c_p stark an. Aus diesem Grund wurde das Programm um eine temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität (Bild 31) erweitert.

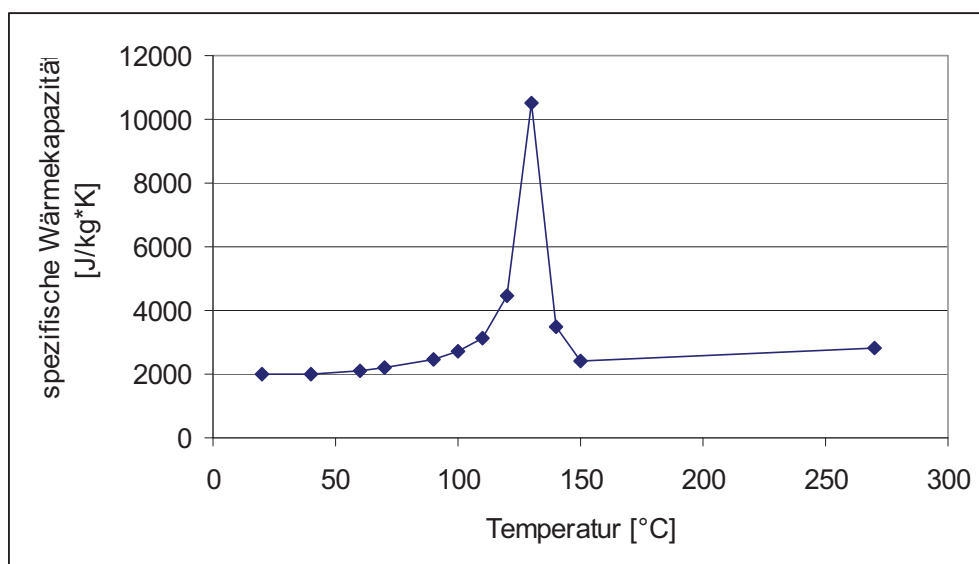


Bild 31: Spezifische Wärmekapazität von PE-HD

Die Berechnung der Temperaturen mit der temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazität ist im Anhang zu finden. Mit dieser Modifizierung des Rechenprogramms wurde der Unterschied zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen kleiner (Tabelle 9). Durch die Berücksichtigung einer temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazität wurden die Temperaturen im Bereich des Glättwerks zu hoch berechnet, doch im Bereich der Temperierwalzen und der Kühlstrecke zu niedrig berechnet. Trotzdem war die Summe der Abweichungen mit der modifizierten Berechnung kleiner als bei Verwendung einer konstanten spezifischen Wärmekapazität.

Tabelle 9: Vergleich der gemessenen mit den modifiziert berechneten Temperaturen

	Berechnet	Gemessen	Differenz
	T_B [°C]	T_G [°C]	$T_G - T_B$ [°C]
a)	163,1	160,0	-3,1
b)	119,5	117,0	-2,5
c)	113,5	110,0	-3,5
d)	112,4	112,0	-0,4
e)	101,5	100,0	-1,5
f)	69,0	74,0	5,0
g)	41,2	45,0	3,8
h)	36,7	35,0	-1,7

Der Vergleich zeigte, dass das Programm die Temperaturen bis zu den Temperierwalzen zu hoch berechnete, doch die maximale Differenz war mit -3,5 relativ klein. Im Bereich der Kühlstrecke wurden die Temperaturen zu niedrig berechnet und beim Abzug zu hoch.

Die Werte im Bereich der Kühlstrecke (Punkte f und g) wurden zu niedrig berechnet. Das lag vermutlich an der Nachkristallisation des Kunststoffes. Dadurch wurde Wärme abgegeben, was zu einer Erhöhung der Oberflächentemperatur sorgte, die durch das Programm nicht berücksichtigt werden konnte.

Auf Grund der getroffenen Vereinfachungen bzw. der Tatsache, dass nicht alle Einflüsse der Anlage und des Kunststoffes berücksichtigt werden können, muss mit Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen gerechnet werden.

Vor allem der Wärmeübergangskoeffizient α_{Luft} stellte einen Durchschnittswert entlang der gesamten Anlage dar. Wenn von einer konstanten Nusselt-Zahl (24) ausgegangen

wird und die Wärmeleitfähigkeit der Luft λ_{Luft} mit der Temperatur zunimmt, so muss auch der Wärmeübergangskoeffizient α_{Luft} größer werden. Nur dann bleibt die Nusselt-Zahl konstant. Die Überströmlänge L ändert sich nicht.

$$\text{Nu} = \frac{\alpha_{\text{Luft}} \cdot L}{\lambda_{\text{Luft}}} \quad (25)$$

Für eine aussagekräftige Berechnung ist die Berücksichtigung von temperaturabhängigen Stoffwerten (c_p , λ) unerlässlich. Nur dann können mit dem Programm Aussagen über die zu erwartenden Temperaturen getroffen werden.

4.3 Einfluss der Prozessparameter auf den Schrumpf

Die Auswertung der Daten aus den Prüfungen wird in diesem Kapitel behandelt, wobei besonders der Einfluss der Verarbeitungsparameter auf den Schrumpf hervorgehoben wird. Dafür wurden jeweils geeignete Versuche ausgewählt und die Prüfergebnisse dargestellt und diskutiert. Sämtliche untersuchten Maschineneinstellungen und die dazugehörigen Prüfergebnisse sind im Anhang zu finden.

Allgemein wurde bei den durchgeführten Untersuchungen festgestellt, dass der Schrumpf in Längsrichtung um ein vielfaches größer war als der Schrumpf in Querrichtung. Der Grund dafür lag an der verarbeitungsbedingten stärkeren Orientierung der Platten in Extrusionsrichtung. Aufgefallen war im Rahmen der Schrumpfuntersuchungen weiters, dass mit dem Normtest wesentlich größere Schrumpfwerte festgestellt wurden als beim Warmluftofentest. Dies lag daran, dass beim Warmluftofentest die Platten nur für einen kurzen Zeitraum wärmebehandelt wurden, während beim Normtest für 1 Stunde erhitzt wurde.

Zu Beginn der Vergleiche von verschiedenen Verarbeitungsparametern wurde der Schrumpf der beiden untersuchten Materialien (PE-HD vs. PE-LD) anhand von 3 mm dicken Platten miteinander verglichen. In Tabelle 10 sind die Ergebnisse der Versuche 20 und 23 gegenübergestellt. Sowohl beim Normtest als auch beim Warmluftofentest zeigte PE-LD im Vergleich zu PE-HD geringere Schrumpfwerte in Längs- und in

Querrichtung. Dieser Trend wurde allgemein für die zwei betrachteten Materialien beobachtet. Exemplarisch sind in Tabelle 10 die Ergebnisse der Versuche 20 und 23 dargestellt.

Tabelle 10: Schrumpfwerte für PE-HD und PE-LD

Versuch Nummer		20	23
Material		PE-HD	PE-LD
Normtest Quer	[%]	-20,2	-4,9
Normtest Längs	[%]	-60,4	-19,8
Warmluftofen Quer	[%]	-4,8	0,0
Warmluftofen Längs	[%]	-19,7	-4,0

Der Schrumpfwert beim Normtest für Platten mit 3 mm Dicke für PE-LD betrug -19,8 % in Längsrichtung, während beim PE-HD dieser Wert ca. -60 % ausmachte. In Querrichtung war der Schrumpfung wesentlich geringer, allerdings verhielt sich die Relation der beiden Werkstoffe zueinander ähnlich.

Beim Untersuchen des Schrumpfes mittels Normtest und Warmluftofentest wurde der Kunststoff weit über die Glasübergangstemperatur erhitzt. Dadurch wurden die im Kunststoff eingefrorenen Orientierungen und Eigenspannungen abgebaut, wodurch es zur Deformation der Platten kam. Beim PE-HD war dieser Effekt groß, während beim PE-LD nur geringer Schrumpfung und Verzug auftrat.

Der Grund für diesen markanten Unterschied lag wahrscheinlich in der besseren Fließfähigkeit des PE-LD bei der Verarbeitung. Durch die geringere Viskosität waren die Scherkräfte in der Düse kleiner und in weiterer Folge waren die Orientierungen schwächer ausgeprägt als beim PE-HD. Darüber hinaus konnte das PE-LD vermutlich während der Fahrenzeit auf Grund der höheren Beweglichkeit besser relaxieren und letztlich wurden weniger Orientierungen eingefroren.

Der Vergleich zwischen Platten aus PE-HD mit einer Dicke von 3 mm und 4 mm zeigte, dass bei den dünneren Tafeln sowohl beim Normtest als auch beim Warmluftofentest stärkerer Schrumpfung auftrat. In Tabelle 11 sind exemplarisch die Ergebnisse von zwei Versuchen mit unterschiedlich dicken Platten dargestellt. In dem Beispiel betrug der Längsschrumpfung für den Normtest bei der dickeren Platte ca. -49 % während bei den 3 mm Platten -60 % gemessen wurden. Das entspricht einem Verhältnis von 0,82. Beim Warmluftofentest betrug das Verhältnis zwischen den verschiedenen dicken Platten 0,87. Beim Warmluftofentest waren die

Längenänderungen nicht so stark ausgeprägt als beim Normtest, daher wirkten sich die Unterschiede auch nicht gleich aus.

Tabelle 11: Einfluss der Plattendicke auf den Schrumpf

Versuch Nummer		20	35
Dicke		3	4
Normtest Quer	[%]	-20,2	-22,6
Normtest Längs	[%]	-60,4	-49,5
Warmluftofen Quer	[%]	-4,8	-6,9
Warmluftofen Längs	[%]	-19,7	-17,3

Der Effekt, dass bei dünneren Wandstärken der Schrumpf stark zunimmt, wird in [10] beschrieben. Mit den durchgeführten Versuchen konnte dieser Trend bestätigt werden.

Der Einfluss der Walzentemperaturen auf den Schrumpf von Platten aus PE-HD konnte durch Vergleich der Versuche 27, 31 und 32 untersucht werden. Die Einstellungen unterschieden sich nur in den Walzentemperaturen. Die Einstellung Nr. 27 war eine übliche Produktionseinstellung zur Herstellung von Platten mit 3 mm Dicke. Für Versuch Nr. 31 wurden die Walzentemperaturen soweit als möglich erhöht, jedoch wurde die maximale Temperatur sowohl durch die Temperieranlage als auch durch ein Ankleben des Kunststoffes an den heißen Walzen begrenzt. Bei Versuch Nr. 32 wurden die Temperaturen soweit gesenkt, dass die Produktion von optisch guten Platten noch möglich war.

Tabelle 12: Einfluss unterschiedlicher Walzentemperaturen auf den Schrumpf

Nummer		32	27	31
Temperaturen		kalt	mittel	warm
Massetemperatur	[°C]	200	200	200
Walze 1	[°C]	80	92	97
Walze 2	[°C]	87	99	104
Walze 3	[°C]	96	108	113
Normtest Quer	[%]	-14,8	-15,2	-14,8
Normtest Längs	[%]	-66,3	-61,0	-62,6
Warmluftofen Quer	[%]	-5,2	-4,8	-4,3
Warmluftofen Längs	[%]	-32,5	-25,5	k.a.

Die Ergebnisse des Normtests in Längsrichtung zeigten, dass bei geringeren Temperaturen der Längsschrumpf größer wurde. Eine Erhöhung der Walzentemperaturen über die üblichen Einstellungen verursachte einen leicht größeren Schrumpf in Längsrichtung, der eventuell durch das Ankleben des Kunststoffes an den Walzen

verursacht wurde. Dadurch musste der Kunststoff von der 3. Walze abgezogen werden, wodurch zusätzliche Orientierungen entstanden sind.

Bei kühleren Walzen wurde der Kunststoff bzw. die Schmelze abgeschreckt, während bei den üblichen Betriebstemperaturen (Nr. 27) der Kunststoff noch entlang des Walzwerkes bzw. der Kühlstrecke Orientierungen und Spannungen teilweise abbauen konnte. Diese Möglichkeit, den Schrumpf zu verringern, wurde durch die kälteren Walzen reduziert.

Der Einfluss der Temperierwalzen die dem Walzwerk nachgeschaltet sind lässt sich durch den exemplarischen Vergleich der Einstellungen Nr. 3 und Nr. 8 zeigen (Tabelle 13). Während bei Versuch Nr. 3 die oberen Temperierwalzen angehoben wurden, wurde bei Versuch Nr. 8 ein Spalt von 3,55 mm eingestellt.

Dabei wurde festgestellt, dass die Schrumpfwerte bei offenen Temperierwalzen kleiner als bei einer eingestellten Spaltweite waren. Ein Grund für dieses Verhalten könnte sein, dass die Temperierwalzen zentral angetrieben wurden und sich gleich schnell drehten. Die Längenänderung wurde behindert und dadurch könnten die Orientierungen verstärkt werden, was sich wiederum negativ auf das Schrumpfverhalten auswirkte.

Tabelle 13: Einfluss der Temperierwalzen auf den Schrumpf

Nummer		3	8
Material		PE-HD	PE-HD
Temperierwalzen 1/2/3	[°C]	60/60/60	60/60/60
Temperierwalzenspalt	[mm]	offen	3,55
Normtest Quer	[%]	-20,2	-24,0
Normtest Längs	[%]	-55,8	-59,9
Warmluftofen Quer	[%]	-2,7	-3,6
Warmluftofen Längs	[%]	-16,0	-21,4

Die Temperatur der Schmelze vor der Breitschlitzdüse konnte gemessen und gezielt verändert werden. Insgesamt wurden 3 Einstellungen mit einer Massetemperatur von 180°C gefahren, wohingegen alle anderen Versuche bei 200°C durchgeführt wurden. Der Einfluss der Massetemperatur auf das Schrumpfverhalten wurde durch den Vergleich der Versuche Nr. 13 und Nr. 15 ersichtlich (Tabelle 14).

Tabelle 14: Einfluss der Massetemperatur auf den Schrumpf

Nummer		13	15
Material		PE-HD	PE-HD
Dicke	[mm]	3	3
Temperaturen			
Massetemperatur	[°C]	180	200
Walze 1	[°C]	92	92
Walze 2	[°C]	99	99
Walze 3	[°C]	108	108
Normtest Quer	[%]	-21,0	-21,1
Normtest Längs	[%]	-59,7	-58,7
Warmluftofen Quer	[%]	-4,8	-3,7
Warmluftofen Längs	[%]	-21,3	-17,6

Die Werte des Schrumpfes unterschieden sich besonders beim Warmluftofentest, während beim Normtest die Differenz nur ca. 1 % ausmachte. Der Grund für die besseren Schrumpfwerte bei höherer Massetemperatur könnte daran liegen, dass die eingebrachten Orientierungen vor dem Erstarren besser relaxieren konnten. Zudem wies das Material bei niedrigerer Temperatur eine höhere Viskosität auf, wodurch die Scherkräfte in der Düse größer wurden und eventuell stärkere Orientierungen hervorgerufen wurden.

Grundsätzlich wäre es somit für den Schrumpf besser, die Schmelzetemperatur zu erhöhen, allerdings war in der Praxis eine Steigerung der Temperatur über 200 °C nicht möglich, da sonst das Material geschädigt werden könnte.

Der Wulst bezeichnet die Schmelzevorlage vor den Walzenspalten. Die Größe des Wulstes konnte durch die Spaltweiten und die Anlagengeschwindigkeit verändert werden. Für die Produktion war zumindest ein kleiner Wulst notwendig, da nur dann der Spalt vollständig mit Material gefüllt war. Ohne der Schmelzevorlage konnte es passieren, dass zuwenig Material im Spalt vorhanden war und Oberflächenfehler auf der Kunststoffbahn entstanden.

Bei den Versuchspaaren Nr. 2 und Nr. 5 wurden die Walzenspalte bzw. die Anlagengeschwindigkeit verändert (Tabelle 15). Der sich dadurch verändernde Wulst vor den Walzenspalten hatte großen Einfluss auf das Schrumpfverhalten der Kunststoffplatten. Während in Querrichtung der Schrumpf abnahm, stieg dieser in

Extrusionsrichtung mit der Größe des Wulstes an. Das konnte sogar dazu führen, dass der Schrumpf in Querrichtung positiv wurde (Versuch Nr. 5 beim Normtest).

Tabelle 15: Einfluss der Schmelzevorlage (Wulst) auf den Schrumpf

Nummer		2	5
Material		PE-HD	PE-HD
Pumpe	[U/min]	15	15
Geschwindigkeiten			
Walze 1	[%]	105	105
Walze 2	[mm/min]	800	770
Walze 3	[%]	98	98
Temperierwalzen	[%]	98	98
Abzug	[%]	94	94
Spalt 1 / Spalt 2	[mm]	3,4/3,4	3,05/3,4
Wulst		klein	groß
Normtest Quer	[%]	-24,7	1,4
Normtest Längs	[%]	-55,2	-68,4
Warmluftofen Quer	[%]	-6,6	-2,1
Warmluftofen Längs	[%]	-15,7	-24,7

Für die Produktion wurde in den meisten Fällen der 1. Walzenspalt gleich oder kleiner als der 2. Walzenspalt gewählt. In Versuch Nr. 28 wurde jedoch der 1. Walzenspalt größer als der 2. Spalt eingestellt. Durch diese Einstellung entstand ein Wulst vor dem zweiten Spalt zwischen Walze 2 und Walze 3, anstatt wie bei allen anderen Einstellungen üblich vor dem 1. Walzenspalt. Als Gegenüberstellung wurde in Tabelle 16 die Einstellung Nr. 27 verwendet, da sich die Maschinenparameter nur durch die Spaltweiten unterschieden.

Tabelle 16: Einfluss unterschiedlicher Spalteinstellungen auf den Schrumpf

Nummer		27	28
Material		PE-HD	PE-HD
Pumpe	[U/min]	15	15
Geschwindigkeiten			
Walze 1	[%]	100	100
Walze 2	[mm/min]	835	835
Walze 3	[%]	98	98
Kalibrierwalzen	[%]	96	96
Abzug	[%]	94	94
Spalt 1 / Spalt 2	[mm]	3,3/3,3	3,3/3,0
Wulst		klein	mittel
Normtest Quer	[%]	-15,2	-5,3
Normtest Längs	[%]	-61,0	-65,1
Warmluftofen Quer	[%]	-4,8	-4,2
Warmluftofen Längs	[%]	-25,5	-30,0

In Bild 32 sind die Prüflinge nach dem Normtest der Einstellungen (oben Nr. 27, unten Nr. 28) dargestellt, wobei die Prüfstücke mit der Beschriftung „5“ die Mitte der ursprünglichen Platte sind und der linke Randteil die „1“ trägt.



Bild 32: Plattestücke nach dem Normtest (oben Nr. 27, unten Nr. 28)

Der Wulst vor dem 2. Walzenspalt wirkte sich auf den Schrumpf dahingehend aus, dass dieser in Längsrichtung größer und in Querrichtung kleiner wurde. Zusätzlich bewirkte dieser Wulst noch eine gebogene Form der Prüfstücke nach dem Normtest, was sich negativ auf die Weiterverarbeitbarkeit der produzierten Platten auswirken könnte.

Ebenfalls untersucht wurde der Einfluss der relativen Geschwindigkeiten der Walzen und des Abzuges auf das Schrumpfverhalten der Platten. Dafür sind in Tabelle 17 ausgewählte Einstellungen mit den entsprechenden Ergebnissen des Schrumpfes dargestellt.

Tabelle 17: Einfluss der Walzengeschwindigkeiten auf den Schrumpf

Nummer		2	3	25	27
Material		PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD
Geschwindigkeiten					
Walze 1	[%]	105	105	101	100
Walze 2	[mm/min]	800	800	835	835
Walze 3	[%]	98	98	98	98
Kalibrierwalzen	[%]	98	98	98	96
Abzug	[%]	94	102	96	94
Normtest Quer	[%]	-24,7	-20,2	-14,1	-15,2
Normtest Längs	[%]	-55,2	-55,8	-61,2	-61,0
Warmluftofen Quer	[%]	-6,6	-2,7	-3,7	-4,8
Warmluftofen Längs	[%]	-15,7	-16,0	-24,5	-25,5

Zwischen Einstellung Nr. 2 und Nr. 3 wurde nur die Geschwindigkeit des Abzuges verändert. Der Einfluss der Abzugsgeschwindigkeit auf das Schrumpfverhalten in Längsrichtung war dabei nicht zu erkennen, da die Messwerte fast gleich waren. Bei den Einstellungen Nr. 27 wurde gegenüber der Nr. 25 ein stärker abfallendes Geschwindigkeitsprofil entlang der Maschine eingestellt, doch auch in diesem Fall waren die Schrumpfwerte fast gleich. Auch bei anderen Einstellungen konnte kein signifikanter Einfluss der Relativgeschwindigkeiten auf den Schrumpf festgestellt werden. Das erste Paar (Nr. 2, Nr. 3) und das zweite Paar (Nr. 25, Nr. 27) unterschieden sich in mehreren Einstellungen und konnten daher nicht miteinander verglichen werden.

Beim Versuch Nr. 26 wurde der Abstand zwischen Düse und 1. Walzenspalt vergrößert. Somit sollte die Schmelze mehr Zeit zum Relaxieren haben. Erst danach durchlief die Kunststoffbahn das Glättwerk. Die Einstellungen in Tabelle 18 unterschieden sich nur in der Fahnenlänge.

Tabelle 18: Einfluss der Fahnenlänge auf den Schrumpf

Nummer		25	26
Geschwindigkeiten			
Walze 1	[%]	101	101
Walze 2	[mm/min]	835	835
Walze 3	[%]	98	98
Kalibrierwalzen	[%]	98	98
Abzug	[%]	96	96
Spalt 1 / Spalt 2	[mm]	3,3/3,3	3,3/3,3
Abstand Düse-Spalt1	[cm]	17,0	29,0
Normtest Quer	[%]	-14,1	-16,5
Normtest Längs	[%]	-61,2	-61,7
Warmluftofen Quer	[%]	-3,7	-3,8
Warmluftofen Längs	[%]	-24,5	-24,3

Beim Normtest und beim Warmluftofentest unterschieden sich die Schrumpfwerte nur in Querrichtung. Ein Einfluss der Fahnenlänge auf das Schrumpfverhalten in Längsrichtung wurde durch diese Messergebnisse nicht bestätigt. Das lag vermutlich daran, dass der Kunststoff in Walzenspalt gezogen wurde und daher kein ausreichendes Relaxieren der Schmelze entlang der Fahnenlänge möglich war.

Im Zuge dieser Arbeit konnten folgende anlagenspezifische Einflussfaktoren zur Verringerung des Schrumpfes identifiziert werden:

- Größere Plattendicke
- Walzentemperaturen
- Offene Temperierwalzen
- Hohe Schmelztemperatur
- Kleine Schmelzevorlage

Trotz der vielen Versuche konnte das Schrumpfverhalten in Längsrichtung nur bedingt beeinflusst werden. Aus diesem Grund kann vermutet werden, dass die Einstellungen des Glättwerks, der Temperierwalzen und des Abzugs nur geringen Einfluss auf den Schrumpf hatten und dieser vor allem durch die Breitschlitzdüse und das Material festgelegt wurde. Laut Normtest darf der Schrumpf für Platten mit einer Dicke von 3 mm 60 % betragen. Durch die in dieser Arbeit gewonnen Einstellungserkenntnisse konnte für die weitere Produktion diese Grenze geringfügig unterschritten werden.

4.4 Einfluss der Prozessparameter auf die Zugprüfung und den Kristallisationsgrad

Bei der Auswertung der Daten aus den Zugversuchen fiel auf, dass der Wulst einen Einfluss auf die Streckspannung in Querrichtung hatte. Bei Einstellungen mit größerem Wulst wurde dieser Wert größer. Bei der Streckdehnung war keine Änderung feststellbar. Bei den 4 mm dicken Platten wurde die Streckspannung in Längsrichtung geringfügig höher als bei den dünneren Platten.

Tabelle 19: Zugprüfungen

Nummer		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Streckspannung L	[N/mm ²]	23,2	22,8	23,0	23,3	22,6	22,5	22,7	23,1	k.a.	21,7
Streckspannung Q	[N/mm ²]	23,4	24,5	23,5	25,8	25,3	24,1	25,4	23,6	k.a.	24,1
Streckdehnung L	[%]	7,6	8,0	7,6	7,8	7,9	7,7	7,8	7,6	k.a.	8,1
Streckdehnung Q	[%]	7,9	7,4	7,6	6,8	7,3	7,5	7,1	7,9	k.a.	7,6

Nummer		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Streckspannung L	[N/mm ²]	23,1	23,2	22,8	23,1	23,4	23,0	23,0	23,1	23,2	23,2
Streckspannung Q	[N/mm ²]	23,6	23,4	22,9	23,7	23,5	23,8	23,6	23,8	23,3	23,1
Streckdehnung L	[%]	7,8	7,7	7,7	7,9	7,5	7,9	7,8	7,7	7,5	7,9
Streckdehnung Q	[%]	8,0	7,5	7,9	7,9	7,9	7,8	7,7	7,9	8,0	8,0

Nummer		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Streckspannung L	[N/mm ²]	k.a.	23,1	9,5	8,8	22,4	22,6	22,3	22,6	22,7	22,9
Streckspannung Q	[N/mm ²]	k.a.	22,7	9,6	9,0	22,4	23,0	24,4	26,1	23,1	23,1
Streckdehnung L	[%]	k.a.	7,8	11,3	14,1	10,9	11,0	10,8	11,2	10,9	10,8
Streckdehnung Q	[%]	k.a.	8,2	11,3	13,75	10,9	10,3	10,6	7,8	10,8	10,8

Nummer		31	32	33	34	35	36	37
Streckspannung L	[N/mm ²]	22,8	21,7	23,7	23,7	23,9	22,9	23,2
Streckspannung Q	[N/mm ²]	23,7	22,2	24,0	23,1	22,9	24,2	22,1
Streckdehnung L	[%]	10,8	10,6	8,8	8,8	8,0	7,8	7,8
Streckdehnung Q	[%]	10,5	10,6	8,9	8,9	7,8	8,2	8,3

Auffallend war, dass bei den meisten Zugprüfungen in Querrichtung eine höhere Streckspannung als in Längsrichtung gemessen wurde. Diesen Effekt würde man umgekehrt erwarten, da normalerweise bei höherer Orientierung die Streckspannung höher ist.

Unterschiedliche Walzentemperaturen wirkten sich beim PE-HD scheinbar nicht auf die Streckspannung und Streckdehnung aus. Das kann durch Vergleich der Einstellungen Nr. 29, Nr. 30 und Nr. 31 geschlossen werden. Beim PE-LD wurde ein

Versuch (Nr. 24) mit kalten Walzen (32 °C) gefahren und dabei war die Streckdehnung höher als bei einer Einstellung mit normal temperierten Walzen (Nr. 23). Der niedrigere Kristallisationsgrad der Nr. 24 könnte dafür der Grund sein.

Der Kristallisationsgrad war bei den 4 mm dicken Platten höher als bei den 3 mm Tafeln, was sich durch das langsamere Abkühlen des Kunststoffes erklärt. Beim PE-LD wurde, wie schon weiter oben erwähnt, ein Versuch mit kalten Walzen durchgeführt. Bei dieser Einstellung war der Kristallisationsgrad geringer als bei normaler Betriebstemperatur der Walzen, welche für PE-LD bei ca. 80 °C liegt. Dieser Trend konnte mit den durchgeführten Versuchen für PE-HD nicht nachvollzogen werden, da für dieses Material die Temperaturen nicht in den gleichen Maßen verändert werden konnten. Aus diesem Grund konnte geschlossen werden, dass beim Kristallisationsgrad kaum Abhängigkeiten erkennbar waren. Die Kristallisationsgrade sind in Tabelle 20 bis

Tabelle 25 im Anhang ersichtlich.

5 Zusammenfassung

Im ersten Teil dieser Arbeit standen die Messung von Oberflächentemperaturen und die Erstellung eines Programms zur Berechnung der Temperaturen über die Plattendicke im Vordergrund. Die Temperaturmessungen mit Infrarotthermometer entlang der Anlage sollten helfen, die Berechnungsmethode zu verifizieren und zu verfeinern.

Das Programm benutzt ein explizites Differenzenverfahren zur numerischen Lösung der Fourier'schen Differentialgleichung. Durch Definieren von Randbedingungen und Bestimmungsgleichungen ist es möglich, ausgehend von einem Temperaturprofil beim Düsenaustritt und nach der Eingabe der Maschineneinstellungen, die Temperaturen der Kunststoffbahn entlang der Anlage zu berechnen. Die Wärmeleitung des Kunststoffes wurde als eine temperaturabhängige Größe im Programm verwendet.

Der Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen zeigte, dass die Temperaturen zu niedrig berechnet wurden. Nach den Temperierwalzen war die Abweichung besonders groß. Aus diesem Grund wurde das Programm um eine von der Temperatur abhängige spezifische Wärmekapazität erweitert. Dadurch konnten die Unterschiede in Summe verringert werden.

Auf Grund der getroffenen Vereinfachungen bzw. der Tatsache, dass nicht alle Einflüsse der Anlage und des Kunststoffes (Kristallisation, Dissipation, ...) berücksichtigt werden können, muss mit Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen gerechnet werden. Das erstellte Berechnungsprogramm liefert einen schnellen Überblick über die Temperaturverhältnisse des Kunststoffes entlang der Anlage.

Im zweiten Teil dieser Arbeit wurden Platten sowohl aus PE-HD (HDPE Si508, Fa. Total) als auch aus PE-LD (Riblene FL34, Fa. Polimeri) bei verschiedenen Einstellungen der Anlage hergestellt und anschließend der Schrumpf bestimmt, um den Einfluss der Herstellparameter auf den Schrumpf der Platten zu untersuchen.

Zur Messung des Schrumpfes wurde der Normtest nach EN ISO 14632 und zusätzlich noch der so genannte Warmluftofentest verwendet. Dieser Test wird teilweise als

Eingangskontrolle bei Firmen, die orthopädische Platten umformen, verwendet, da der Ablauf des Tests der Herstellung von Schienen und Orthesen ähnlich ist.

Dabei stellte sich heraus, dass der hohe Schrumpf nur bei Platten aus PE-HD auftrat. Aus diesem Grund wurden die meisten Versuche mit diesem Material durchgeführt und folgende Herstellparameter konnten als Einflussfaktoren auf den Schrumpf identifiziert werden.

- Größere Plattendicke
- Walzentemperaturen
- Offene Temperierwalzen
- Hohe Schmelzetemperatur
- Kleine Schmelzevorlage

Allerdings konnte trotz der vielen Versuche und Einstellungsvarianten der Schrumpf nur bedingt verringert werden. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Orientierungen, die den Schrumpf verursachen, hauptsächlich in der Düse entstehen und durch nachfolgende Einheiten wie Glättwerk, Temperierwalzen und Abzug nur mehr geringfügig positiv beeinflusst werden. Der auftretende Längsschrumpf der orthopädischen Platten konnte durch die Ergebnisse dieser Arbeit unter das geforderte Maximum des Normtests und des Warmluftofentests verringert werden.

6 Literatur

- [1] Breuer.: Herstellung von Folien und Tafeln nach dem Walzwerkverfahren, Handbuch der Kunststoff-Extrusionstechnik II, Hanser Verlag, 1986
- [2] Griebel F.: Eigenschaften und Verarbeitung von thermoplastischen Kunststoffen für die Orthopädie-Technik, Orthopädie Technik 3/02 (S. 172-181)
- [3] Langecker G.: Vorlesungsunterlagen aus Kunststoffverarbeitung 1, Montanuniversität Leoben, 2001
- [4] Michaeli W.: Berechnen von Kühlprozessen bei der Extrusion, Kühlen von Extrudaten, VDI-Verlag, 1978
- [5] Polifke W., Kopitz J.: Wärmeübertragung: Grundlagen, analytische und numerische Methoden, Pearson Studium, 2005
- [6] www.wikipedia.de, 2006
- [7] N. N.: Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung, Firmenschrift Fa. Optris, 2006
- [8] Gruner K.: Grundlagen der berührungslosen Temperaturmessung, Firmenschrift Fa. Raytek, 2004
- [9] www.plastics.bayer.com, 2006
- [10] Hemminger W.: Methoden der thermischen Analyse, Springer Verlag, 2001
- [11] VDI-Wärmeatlas Neunte Auflage, Springer Verlag, 2002
- [12] Miethlinger J.: Extrusion von Castfolien – Anlagentechnik und Beeinflussung der Endprodukteigenschaften, Dissertation am Institut für Kunststoffverarbeitung, Montanuniversität Leoben, 2001
- [13] Grigull U., Sandner H.: Wärmeleitung Zweite Auflage, Springer Verlag 1990
- [14] Haberstroh E.: Analyse von Kühlstrecken in Extrusionsanlagen, Dissertation an der Fakultät der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 1981
- [15] Auinger P.: Nachschwindung von Polypropylen-Flachfolien, Diplomarbeit am Institut für Chemische und Physikalische Technologie der Kunststoffe, Montanuniversität Leoben, 1978
- [16] Grigull U.: Temperatenausgleich in einfachen Körpern, Springer Verlag, 1965
- [17] Böckh P.v.: Wärmeübertragung – Grundlagen und Praxis, Springer Verlag, 2006

7 Anhang

7.1 Einstellungen und Prüfergebnisse der Versuche

Tabelle 20: Einstellungen Nr. 1 bis Nr. 7 und Ergebnisse der Prüfungen

Nummer		1	2	3	4	5	6	7
Material		PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD
Dicke	[mm]	3	3	3	3	3	3	3
Pumpe	[U/min]	15	15	15	15	15	15	15
Geschwindigkeiten								
Walze 1	[%]	105	105	105	105	105	105	105
Walze 2	[mm/min]	800	800	800	770	770	770	770
Walze 3	[%]	98	98	98	98	98	98	98
Kalibrierwalzen	[%]	98	98	98	98	98	98	98
Abzug	[%]	98	94	102	102	94	94	102
Temperaturen								
Massetemperatur	[°C]	200	200	200	200	200	200	200
Walze 1	[°C]	92	92	92	96	96	96	92
Walze 2	[°C]	99	99	99	99	99	99	99
Walze 3	[°C]	110	110	110	113	113	113	113
Temperierwalzen 1/2/3	[°C]	60/60/60	60/60/60	60/60/60	60/60/60	60/60/60	60/60/60	60/60/60
Spalt 1 / Spalt 2	[mm]	3,4/3,4	3,4/3,4	3,4/3,4	3,4/3,4	3,05/3,4	3,05/3,4	3,05/3,3
Temperierwalzenspalt	[mm]	offen	offen	offen	offen	offen	3,55	3,45
Wulst		klein	klein	klein	mittel	mittel	mittel	mittel
Abstand Düse-Spalt 1	[cm]	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
Normtest Quer	[%]	-9,2	-24,7	-20,2	-8,2	1,4	1,0	1,9
Normtest Längs	[%]	-56,8	-55,2	-55,8	-66,0	,68,4	-67,8	-68,9
Warmluftofen Längs	[%]	-19,2	-15,7	-16,0	-24,6	-24,7	-27,0	-27,1
Warmluftofen Quer	[%]	-4,2	-6,6	-2,7	-1,8	-2,1	-2,5	-0,6
Kristallinität oben	[%]	76,0	76,1	73,9	77,6	77,8	75,0	74,2
Kristallinität unten	[%]	77,4	76,3	74,6	76,4	79,4	77,5	77,2
Streckspannung L	[N/mm ²]	23,2	22,8	23,0	23,3	22,6	22,5	22,7
Streckspannung Q	[N/mm ²]	23,4	24,5	23,5	25,8	25,3	24,1	25,4
Streckdehnung L	[%]	7,6	8,0	7,6	7,8	7,9	7,7	7,8
Streckdehnung Q	[%]	7,9	7,4	7,6	6,8	7,3	7,5	7,1

Tabelle 21: Einstellungen Nr. 8 bis Nr. 14 und Ergebnisse der Prüfungen

Nummer		8	9	10	11	12	13	14
Material		PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD
Dicke	[mm]	3	3	3	3	3	3	3
Pumpe	[U/min]	15	15	20	20	15	15	15
Geschwindigkeiten								
Walze 1	[%]	105	105	102	102	105	105	105
Walze 2	[mm/min]	800	800	980	980	800	800	800
Walze 3	[%]	98	98	98	98	98	98	97
Kalibrierwalzen	[%]	98	98	98	98	98	98	96,5
Abzug	[%]	102	94	93	93	96	96	95
Temperaturen								
Massetemperatur	[°C]	200	200	200	200	180	180	180
Walze 1	[°C]	92	92	93	93	92	92	92
Walze 2	[°C]	99	99	95	95	99	99	99
Walze 3	[°C]	113	113	103	107	108	108	108
Temperierwalzen 1/2/3	[°C]	60/60/60	60/60/60	60/60/60	60/60/60	80/80/65	90/90/66	90/90/67
Spalt 1 / Spalt 2	[mm]	3,4/3,4	3,4/3,4	3,4/3,4	3,2/3,2	3,4/3,5	3,4/3,5	3,4/3,5
Temperierwalzenspalt	[mm]	3,55	3,55	offen	offen	3,60	3,60	3,60
Wulst		klein	klein	klein	mittel	klein	klein	klein
Abstand Düse-Spalt 1	[cm]	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
Normtest Quer	[%]	-24,0	-23,1	-24,8	-22,6	-22,4	-21,0	-19,6
Normtest Längs	[%]	-59,9	-60,6	-57,1	-60,0	-58,6	-59,7	-59,4
Warmluftofen Längs	[%]	-21,4	0,0	-18,0	-15,5	-19,3	-21,3	-19,7
Warmluftofen Quer	[%]	-3,6	0,0	-5,0	-5,5	-4,8	-4,8	-4,3
Kristallinität oben	[%]	78,0	k.a.	71,8	77,6	81,5	75,8	76,9
Kristallinität unten	[%]	73,1	k.a.	74,8	75,1	78,1	74,2	77,5
Streckspannung L	[N/mm ²]	23,1	k.a.	21,7	23,1	23,2	22,8	23,1
Streckspannung Q	[N/mm ²]	23,6	k.a.	24,1	23,6	23,4	22,9	23,7
Streckdehnung L	[%]	7,6	k.a.	8,1	7,8	7,7	7,7	7,9
Streckdehnung Q	[%]	7,9	k.a.	7,6	8,0	7,5	7,9	7,9

Tabelle 22: Einstellungen Nr. 15 bis Nr. 21 und Ergebnisse der Prüfungen

Nummer		15	16	17	18	19	20	21
Material		PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD
Dicke	[mm]	3	3	3	3	3	3	3
Pumpe	[U/min]	15	15	15	15	15	15	15
Geschwindigkeiten								
Walze 1	[%]	105	105	105	100	95	101	101
Walze 2	[mm/min]	800	800	800	800	800	825	835
Walze 3	[%]	98	98	97	98	98	98	98
Kalibrierwalzen	[%]	98	98	97	98	98	98	98
Abzug	[%]	96	96	95	96	96	96	96
Temperaturen								
Massetemperatur	[°C]	200	200	200	200	200	200	200
Walze 1	[°C]	92	92	92	92	92	92	92
Walze 2	[°C]	99	99	99	99	99	99	99
Walze 3	[°C]	108	109	110	108	108	108	108
Temperierwalzen 1/2/3	[°C]	90/90/67	80/80/67	80/80/67	90/90/67	90/90/67	90/90/62	90/90/60
Spalt 1 / Spalt 2	[mm]	3,4/3,5	3,4/3,5	3,4/3,5	3,4/3,5	3,4/3,5	3,3/3,3	3,3/3,3
Temperierwalzenspalt	[mm]	3,60	3,75	3,75	3,60	3,60	3,60	3,55
Wulst		klein	klein	klein	klein	klein	klein	klein
Abstand Düse-Spalt 1	[cm]	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0
Normtest Quer	[%]	-21,1	-20,3	-20,9	-21,7	-20,6	-20,2	-20,4
Normtest Längs	[%]	-58,7	-58,6	-58,0	-58,2	-59,2	-60,4	-59,2
Warmluftofen Längs	[%]	-17,6	-18,8	-19,0	-19,1	-15,8	-19,7	-20,5
Warmluftofen Quer	[%]	-3,7	-5,0	-5,3	-4,8	-3,2	-4,8	-4,7
Kristallinität oben	[%]	79,8	78,9	73,1	76,9	77,1	83,8	78,6
Kristallinität unten	[%]	78,9	79,3	74,2	74,2	76,4	76,6	73,3
Streckspannung L	[N/mm ²]	23,4	23,0	23,0	23,1	23,2	23,2	k.a.
Streckspannung Q	[N/mm ²]	23,5	23,8	23,6	23,8	23,3	23,1	k.a.
Streckdehnung L	[%]	7,5	7,9	7,8	7,7	7,5	7,9	k.a.
Streckdehnung Q	[%]	7,9	7,8	7,7	7,9	8,0	8,0	k.a.

Tabelle 23: Einstellungen Nr. 22 bis Nr. 28 und Ergebnisse der Prüfungen

Nummer		22	23	24	25	26	27	28
Material		PE-HD	PE-LD	PE-LD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD
Dicke	[mm]	3	3	3	3	3	3	3
Pumpe	[U/min]	15	15	15	15	15	15	15
Geschwindigkeiten								
Walze 1	[%]	101	99,5	99,5	101	101	100	100
Walze 2	[mm/min]	840	863	863	835	835	835	835
Walze 3	[%]	98	99,6	99,6	98	98	98	98
Kalibrierwalzen	[%]	98	100	100	98	98	96	96
Abzug	[%]	98	99	99	96	96	94	94
Temperaturen								
Massetemperatur	[°C]	200	172	172	200	200	200	200
Walze 1	[°C]	94	85	32	92	92	92	92
Walze 2	[°C]	99	82	32	99	99	99	99
Walze 3	[°C]	113	102	32	108	108	108	108
Temperierwalzen 1/2/3	[°C]	0	0	0	0	0	0	0
Spalt 1 / Spalt 2	[mm]	3,3/3,3	3/3,2	3/3,2	3,3/3,3	3,3/3,3	3,3/3,3	3,3/3,0
Temperierwalzenspalt	[mm]	3,98	4,48	4,48	3,55	3,55	3,55	3,55
Wulst		klein	klein	klein	klein	klein	klein	mittel
Abstand Düse-Spalt1	[cm]	17,0	17,0	17,0	17,0	29,0	17,0	17,0
Normtest Quer	[%]	-10,9	-4,9	k.a.	-14,1	-16,5	-15,2	-5,3
Normtest Längs	[%]	-58,6	-19,8	k.a.	-61,2	-61,7	-61,0	-65,1
Warmluftofen Längs	[%]	-17,7	-4,0	-3,8	-24,5	-24,3	-25,5	-30,0
Warmluftofen Quer	[%]	-2,6	0,0	-3,0	-3,7	-3,8	-4,8	-4,2
Kristallinität oben	[%]	73,0	37,6	35,0				
Kristallinität unten	[%]	71,6	37,2	34,5				
Streckspannung L	[N/mm ²]	23,1	9,5	8,8	22,4	22,6	22,3	22,6
Streckspannung Q	[N/mm ²]	22,7	9,6	9,2	22,4	23,0	24,4	26,1
Streckdehnung L	[%]	7,8	11,3	14,1	10,9	11,0	10,8	11,2
Streckdehnung Q	[%]	8,2	11,3	13,1	10,9	10,3	10,6	7,8

Tabelle 24: Einstellungen Nr. 29 bis Nr. 35 und Ergebnisse der Prüfungen

Nummer		29	30	31	32	33	34	35
Material		PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD	PE-HD
Dicke	[mm]	3	3	3	3	4	4	4
Pumpe	[U/min]	15	20	15	15	15	15	15
Geschwindigkeiten								
Walze 1	[%]	100	100	100	100	101	101	101
Walze 2	[mm/min]	835	970	835	835	650	630	610
Walze 3	[%]	98	98	98	98	98	98	98
Kalibrierwalzen	[%]	96	96	96	96	99	100	98
Abzug	[%]	94	94	94	94	98	98	98
Temperaturen								
Massetemperatur	[°C]	200	200	200	200	200	200	200
Walze 1	[°C]	92	92	97	80	92	97	94
Walze 2	[°C]	99	99	104	87	98	97	98
Walze 3	[°C]	108	108	113	96	104	108	114
Temperierwalzen 1/2/3	[°C]	0	0	0	0	60/60/60	60/60/60	0
Spalt 1 / Spalt 2	[mm]	3,3/3,7	3,3/3,3	3,3/3,3	3,3/3,3	4,2/4,4	4,25/4	4,3/4,3
Temperierwalzenspalt	[mm]	3,55	3,55	3,55	3,55	5,00	5,00	4,98
Wulst		klein	klein	klein	klein	klein	klein	klein
Abstand Düse-Spalt1	[cm]	17,0	17,0	17,0	17,0	17,0	17	17
Normtest Quer	[%]	-16,0	-15,3	-14,8	-14,8	k.a.	k.a.	-22,6
Normtest Längs	[%]	-62,0	-62,1	-62,6	-66,3	k.a.	k.a.	-49,5
Warmluftofen Längs	[%]	-19,8	-22,3	-20,0	-32,5	k.a.	k.a.	-17,3
Warmluftofen Quer	[%]	-4,9	-2,9	-4,3	-5,2	k.a.	k.a.	-6,9
Kristallinität oben	[%]							78,4
Kristallinität unten	[%]							78,1
Streckspannung L	[N/mm ²]	22,7	22,9	22,8	21,7	23,7	23,7	23,9
Streckspannung Q	[N/mm ²]	23,1	23,1	23,7	22,2	24,0	23,1	22,9
Streckdehnung L	[%]	10,9	10,8	10,8	10,6	8,8	8,8	8,0
Streckdehnung Q	[%]	10,8	10,8	10,5	10,6	8,9	8,9	7,8

Tabelle 25: Einstellungen Nr. 36 bis Nr. 37 und Ergebnisse der Prüfungen

Nummer		36	37
Material		PE-HD	PE-HD
Dicke	[mm]	4	4
Pumpe	[U/min]	15	15
Geschwindigkeiten			
Walze 1	[%]	101	101
Walze 2	[mm/min]	607	607
Walze 3	[%]	98	98
Kalibrierwalzen	[%]	98	98
Abzug	[%]	98	98
Temperaturen			
Massetemperatur	[°C]	200	197
Walze 1	[°C]	94	94
Walze 2	[°C]	100	100
Walze 3	[°C]	110	110
Temperierwalzen 1/2/3	[°C]	0	0
Spalt 1 / Spalt 2	[mm]	4,3/4,3	4,3/4,35
Temperierwalzenspalt	[mm]	4,98	4,98
Wulst		klein	klein
Abstand Düse-Spalt1	[cm]	17	17
Normtest Quer	[%]	-21,63	-17,91
Normtest Längs	[%]	-48,95	-49,58
Warmluftofen Längs	[%]	-16,4	-11,2
Warmluftofen Quer	[%]	-4,9	-5,1
Kristallinität oben	[%]	79,6	81,8
Kristallinität unten	[%]	80,2	78,5
Streckspannung L	[N/mm ²]	22,9	23,2
Streckspannung Q	[N/mm ²]	24,2	22,1
Streckdehnung L	[%]	7,8	7,8
Streckdehnung Q	[%]	8,2	8,3

7.2 Berechnung der Temperaturen zu Einstellung Nr. 18

Tabelle 26: Berechnungsparameter für Einstellung Nr. 18

Kunststoff	Abkürzung	Werte	Einheiten
Plattendicke	d	0,003	m
Dichte	ρ	950	kg/m ³
Wärmekapazität temperaturabhängig	c_p		J/(kg*K)
Extrudattemperatur	Ta	210	°C
Glättwerk			
Walzentemperatur 1	Tw1	92	°C
Walzentemperatur 2	Tw2	99	°C
Walzentemperatur 3	Tw3	108	°C
Lufttemperatur Kalander	Tu	70	°C
Fahnenlänge (Düse-1.Spalt)	fz1	17	cm
Spalt 1 (Walze 1-2/Kunststoff)	sz1	3	cm
Kontakt 1 (Walze 2/Kunststoff)	kz1	78,5	cm
Spalt 2 (Walze 2-3/Kunststoff)	sz2	3	cm
Kontakt 2 (Walze 3/Kunststoff)	kz2	58,9	cm
Kühlstrecke bis Temperierwalzen	kuz	35	cm
Walzen			
Dichte	ρ_{Walze}	7800	Kg/m ³
Wärmeleitfähigkeit	λ_{Walze}	60	W/(m*K)
Wärmekapazität	c_{pWalze}	480	J/(kg*K)
Abzugsgeschwindigkeit	v	784	mm/min
9 Temperierwalzen			
Kontaktlänge	Tempkz	0,5	cm
Zwischenlänge	Tempzz	18,0	cm
Temperatur Walzengruppe 1 unten	TTW1	90	°C
Temperatur Walzengruppe 2 oben	TTW2	90	°C
Temperatur Walzengruppe 3	TTW3	70	°C
Umgebungstemperatur Temperierw.	Tut1	70	°C
Wärmeübergangskoeffizient	$\alpha_{Temperierwalze}$	60	W/(m ² *K)
Restkühlstrecke			
Restkühlstrecke bis Abzug	azz	1500	cm
Lufttemperatur Kühlstrecke Beginn	Tu1	35	°C
Lufttemperatur Kühlstrecke Ende	Tu2	30	°C
Wärmeübergangskoeffizient Luft	α_{Luft}	7	W/(m ² *K)
Zeitschritt			
Zeitschritt	Δt	0,1	s

Tabelle 27: Berechnete Temperaturen zu Einstellung Nr. 18

	Austritt [°C]	Spalt 1		Spalt 2		Ende Kalander [°C]	Temperierwalze 1		Kühlstrecke	
		Beginn [°C]	Ende [°C]	Beginn [°C]	Ende [°C]		Beginn [°C]	Ende [°C]	Beginn [°C]	Ende [°C]
Oben 0	210	205,7	109,9	109,9	109,9	113,7	109,0	108,3	100,7	36,7
1	210	206,4	140,0	113,3	113,2	113,9	109,4	109,1	102,1	36,7
2	210	207,0	164,9	116,7	116,4	114,0	109,7	109,6	102,8	36,7
3	210	207,4	183,4	119,9	119,5	113,8	109,9	109,9	103,0	36,8
4	210	207,7	194,8	123,0	122,4	113,6	110,0	110,0	103,1	36,8
5	210	207,8	200,1	125,6	125,0	113,1	110,1	110,1	103,1	36,8
6	210	207,8	199,9	127,9	127,1	112,6	110,1	110,0	103,1	36,8
7	210	207,7	194,2	129,7	128,4	111,9	110,0	109,9	103,1	36,8
8	210	207,4	182,0	130,9	128,3	111,1	109,8	109,7	103,0	36,8
9	210	207,0	162,5	131,6	125,6	110,3	109,5	109,5	102,8	36,7
10	210	206,4	136,3	131,8	119,5	109,4	109,2	108,9	102,1	36,7
Unten 11	210	205,7	103,6	131,5	111,4	108,5	108,8	108,1	100,7	36,7

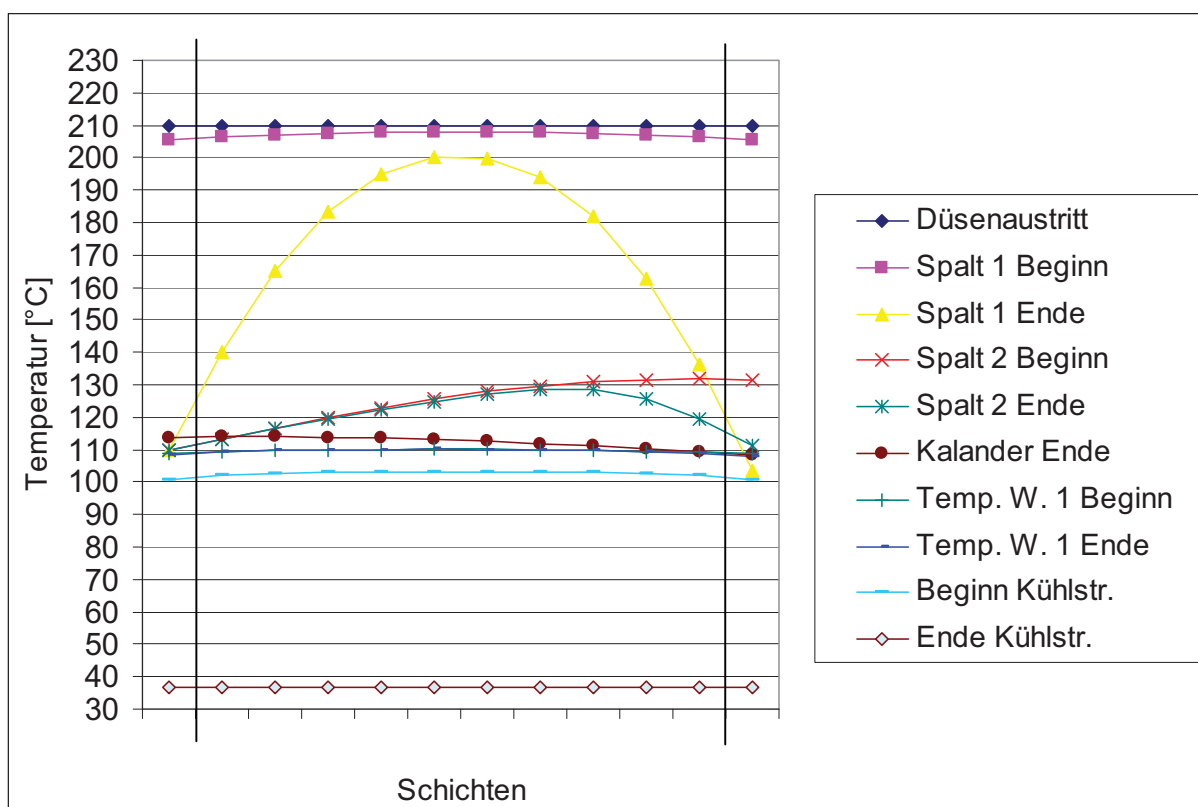


Bild 33: Berechnete Temperaturen zu Tabelle 27

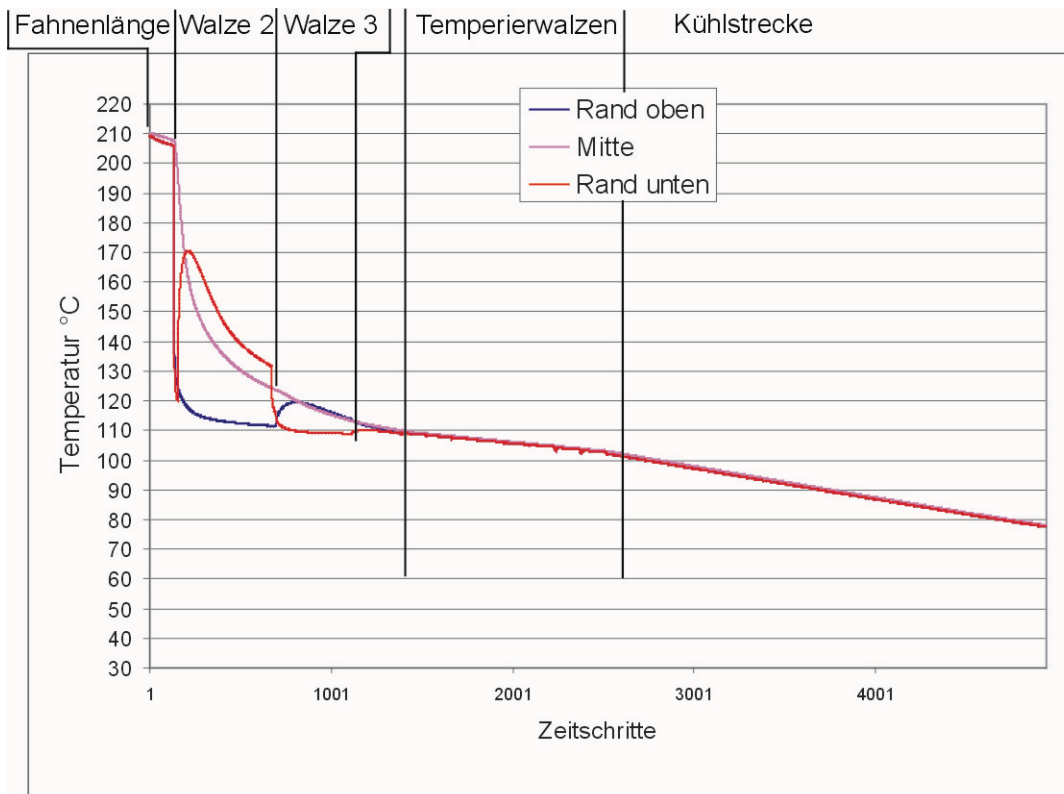


Bild 34: Berechneter Temperaturverlauf entlang der Kühlstrecke

7.3 Formelzeichen

λ	Wärmeleitfähigkeit
ρ	Dichte
c_p	spezifische Wärmekapazität
T	Temperatur
t	Zeit
a	Temperaturleitfähigkeit
Δy	Schritt in Dickenrichtung
Δt	Zeitschritt
α	Wärmeübergangskoeffizient
\dot{q}	Wärmestrom
b	Wärmeeindringzahl
ε	Emissionskoeffizient Strahlung