

Herstellung von FV-Thermoplast- Profilen mit geometrisch komplexen Querschnitten

Master Thesis

Author(s):

Stampfli, Joel

Publication date:

2006

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005183484>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

Herstellung von FV-Thermoplast-Profilen mit geometrisch komplexen Querschnitten

Diplomarbeit

Joel Stampfli

WS 2005/06

Ref-Nr.: 06-011

Prof. Dr. Paolo Ermanni

Betreuung: Niccolò Pini

Zentrum für Strukturtechnologien
Institut für mechanische Systeme
ETH Zürich

Zusammenfassung

Das Ziel dieser Diplomarbeit war die Entwicklung eines Prozesses zur kontinuierlichen Herstellung von faserverstärkten Profilen basierend auf Thermoplastbandhalbzeug.

Die heute bekannten Herstellverfahren wurden analysiert und verglichen. Es wurden unterschiedliche neue Lösungsansätze entworfen und vorgestellt. In einem Bewertungsprozess ist die am besten geeignete Technik ausgewählt und in Form einer Prototypanlage realisiert worden.

Die Prototypanlage konnte in einer Testphase in unterschiedlichen Konfigurationen, mit und ohne Verwendung von Hilfsmaterialien, geprüft werden. Die Tests zeigten, dass das gewählte Konzept funktioniert. Die hergestellten Profile weisen eine gute Oberflächenqualität auf. Die Formtreue, besonders an den Endflanken, ist noch zu verbessern. Die Qualität der Konsolidierung wurden untersucht und stellte sich als höchst zufriedenstellend heraus.

Ein weiterer vielversprechender Ansatz wurde bis zur Fertigungsreife entwickelt.

Abstract

The objective of this diploma thesis was the development of a continuous manufacturing process for fiber-reinforced profiles based on thermoplastic prepreg-tapes.

State-of-the-art manufacturing technologies have been analyzed and compared. New approaches have been proposed and discussed. The best suited technology has been evaluated in a benchmark process and implemented in a prototype plant.

The prototype plant has been checked during a test stage in different configurations, with and without the usage of auxiliary material. Tests demonstrated the functionality of the chosen concept. The produced profiles surfaces are of good quality. The dimensional accuracy at the profile sides has to be further improved. Consolidation quality was examined and found to be highly satisfactory.

An other promising approach was developed to production readiness.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Abstract.....	II
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abkürzungen.....	V
1 Projektierung.....	1
1.1 Ausschreibung.....	1
1.2 Aufgabenstellung.....	2
1.3 Vision.....	2
1.4 Zeitplan.....	3
1.5 Budgetplan.....	5
1.6 Literaturrecherche.....	5
2 Grundlagen Polymerwerkstoffe.....	6
2.2 Umformmechanismen.....	8
2.3 Konsolidierungsmechanismen.....	10
2.4 Oxidative Degradation.....	15
2.5 Thermoplast Halbzeug.....	16
3 Verarbeitung faserverstärkter Thermoplaste.....	19
3.1 Pressverfahren.....	20
3.2 Ablegeverfahren.....	23
3.3 Autoklavtechnik.....	23
3.4 Pultrusion.....	23
3.5 Rollforming.....	24
4 Lösungsansätze.....	25
4.1 Profilwahl.....	25
4.2 Modularisierung der Anlage.....	25
4.3 Heizung.....	26
4.4 Kühlung.....	29
4.5 Umformmechanismus.....	30
4.6 Antrieb.....	39
4.7 Temperaturüberwachung.....	42
4.8 Vorschubkontrolle.....	43
4.9 Anlagengerüst.....	45
5 Bewertung.....	46
5.1 Kriterien.....	46
5.2 Gewichtungen und Skala.....	47
5.3 Auswahl.....	48
5.4 Patentrecherche.....	46
6 Realisierung.....	51
6.1 Grundlegender Anlagenaufbau.....	51
6.2 Anlagengerüst.....	51
6.3 Antrieb.....	52

6.4	Heizung.....	53
6.5	Umformmechanismus.....	55
6.6	Kühlung.....	57
6.7	Temperaturkontrolle.....	59
7	Pultrusionstool.....	60
7.1	Prinzip.....	60
7.2	Realisierung.....	60
8	Experimentelle Bestimmung des Bulkmoduls B_y	63
9	Testläufe.....	67
9.1	Versuchsplan.....	67
9.2	Parameter.....	68
9.3	Durchführung.....	68
10	Ergebnisse der Testläufe.....	72
10.1	Ohne Trennfolien.....	72
10.2	PET-Trennfolie.....	72
10.3	Kaptonfolie.....	73
10.4	Aluminiumband.....	74
10.5	Schliffbildanalyse.....	75
10.6	Weitere Testmöglichkeiten.....	78
11	Diskussion und Ausblick.....	79
11.1	Ziele.....	79
11.2	Ergebnisse.....	79
11.3	Potential.....	79
11.4	Ausblick.....	80
	Dank.....	81
	Literaturverzeichnis.....	82
	Links.....	82
	Anhang A: Partner.....	86
	Anhang B: Sicherheitskonzept.....	103
	Anhang C: Zeitplan.....	104
	Anhang D: Kosten der Prototypanlage.....	105
	Anhang E: Bewertung Umformmechanismus.....	106
	Anhang F: Bauteilekontrolle.....	86
	Anhang G: Konstruktionszeichnungen.....	109

Abkürzungen

BC	Bulk Consolidation
DP	Duroplast
FV	Faserverstärkt
FVK	Faserverstärkter Kunststoff
GMT	Glasmattenverstärkter Thermoplast
IR	Infrarot
PP	Polypropylen
PET	Polyethylenterephthalat
PEEK	Polyetheretherketon
SMC	Sheet moulding compound
TP	Thermoplast
UD	unidirektional

1 Projektierung

1.1 Ausschreibung

Abbildung 1-1 zeigt die offizielle Ausschreibung der Diplomarbeit am Zentrum für Strukturtechnologien.

DA
Wintersemester
05/06

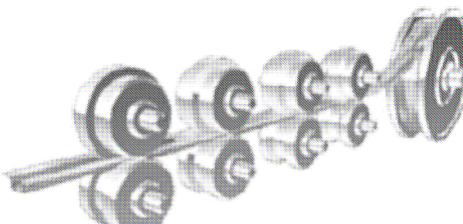
Herstellung von FV-Thermoplast- Profilen mit geometrisch komplexen Querschnitten

Stand der Technik

Hochleistungs-FV-Thermoplasten zeichnen sich gegenüber FV-Duromeren durch viele Vorteile aus, nicht zuletzt durch ihre gute Schadenstoleranz und ihre gute Temperaturbeständigkeit. Die Herstellung von Profilen mit komplizierten Querschnitten wird entweder kontinuierlich durch Pultrusionsanlagen und im Rollforming-Verfahren oder durch diskontinuierliche Pressprozesse realisiert.

Ziel der Arbeit

Die Arbeit soll die verschiedene Stand-der-Technik Herstellmethoden vergleichen und – entsprechend einer separaten Anforderungsliste – die am meisten geeignete auswählen, so dass eine Prototypanlage gebaut werden kann.



Aufgabenstellung

Die Erarbeitung folgender Punkte ist notwendig:

- Einarbeiten in das Thema / Literaturrecherche
- Aufstellung eines Versuchs- und Budgetplans
- Konstruktion der Anlage
- Fertigung (extern) bzw. Kauf der benötigten Teile
- Prototypenherstellung und ev. Parameterstudie
- Berichterfassung

Die Arbeit wird hauptsächlich experimentell sein und sollte Maschinenbau-StudentInnen ansprechen, die eine Schwäche für Hochleistungs-Faserverbundwerkstoffe haben.

Kontakt

Niccolò Pini Tel. 044 633 61 66
Zentrum für Strukturtechnologien
LEO B3
npini@ethz.ch
www.structures.ethz.ch

Ausgehängt:
Oktober 2005



Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich



Abbildung 1-1: Ausschreibung der Diplomarbeit

1.2 Aufgabenstellung

Diese Diplomarbeit umfasst folgende Aufgaben:

- Einarbeitung in das Thema /Literaturrecherche
- Aufstellen eines Versuchs-/Budgetplans
- Konstruktion der Prototypanlage
- Fertigung (extern) bzw. Kauf der benötigten Teile
- Prototypenherstellung und ev. Parameterstudie
- Berichtverfassung

Beginn: 24. Oktober 2005

Abgabe: 10. Februar 2006

Betreuung: Niccolò Pini

1.3 Vision

Die Autohersteller versuchen seit Jahrzehnten das Leistungsvermögen ihrer Fahrzeuge zu steigern und den Kraftstoffverbrauch zu senken. Gleichzeitig werden die aktuellen Modelle tendenziell schwerer. Ein Widerspruch?

Gerade im Bereich des Fahrwerks ist durch die grossen Rotationsgeschwindigkeiten und Vertikalbeschleunigungen viel Optimierungspotential vorhanden. Bis weilen wurde vor allem an der Form, aber wenig am verwendeten Material geändert. Felgen für Personenwagen werden hauptsächlich aus Stahl oder Leichtmetalllegierungen hergestellt.



Abbildung 1-2: Hochwertige Aluminiumfelge (Quelle: www.oz-japan.com)

Durch den Einsatz von faserverstärktem Kunststoff könnten leichtere und steifere Felgen entwickelt werden.

Leichtere Räder wirken sich durch die geringere Beschleunigungsmasse positiv auf die Fahrdynamik aus. Durch die Reduktion der ungefederten Masse kann der Komfort gesteigert werden, gleichzeitig wird die Belastung der Federung und Radaufhängung verringert.

Durch die Gewichtsreduktion kann der Treibstoffverbrauch verbessert werden.

Die Felgenbettherstellungen wird in drei Teilprozesse unterteilt:

- Profilherstellung
- Krümmung
- Fügen

Je eine Diplomarbeit am Zentrum für Strukturtechnologien widmet sich im Wintersemester 05/06 sich einem dieser Teilprozesse.

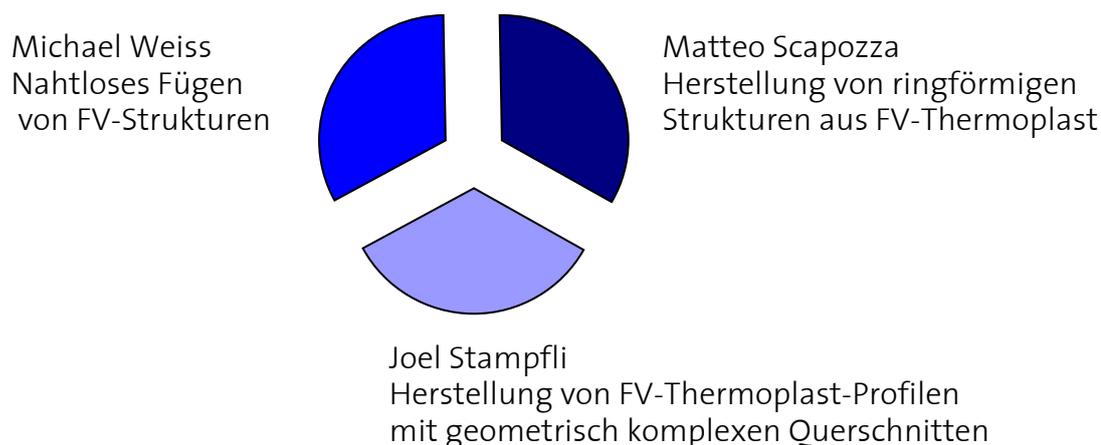


Abbildung 1-3: Drei Diplomarbeiten am Zentrum für Strukturtechnologien befassen sich mit den Grundlagen der Felgenherstellungsteilprozesse.

1.4 Zeitplan

Die hochgesteckten Ziele der Aufgabenstellung führten zu einem entsprechend engen Zeitplan. Trotzdem wurde versucht Reserven und Pufferzeit einzuplanen. Dies vor allem hinsichtlich der Fertigung von Bauteilen, bei welcher erfahrungsgemäss immer unvorhergesehene Probleme und Zeitverzögerungen entstehen können.

Die Diplomarbeit wurde grob in die folgenden Phasen unterteilt:

- Literatur-, Patent- und Industrierecherche
- Generieren von Lösungsansätzen
- Konstruktion Prototyp
- Bauteilherstellung und Beschaffung
- Prototypaufbau
- Testphase
- Abgabearbeiten

Innerhalb dieser Phasen wurden Arbeitspakete generiert welche ein strukturiertes Vorgehen ermöglichten.

Abbildung 1-4 zeigt den vereinfachten Zeitplan. Der detaillierte Zeitplan ist im Anhang C enthalten.

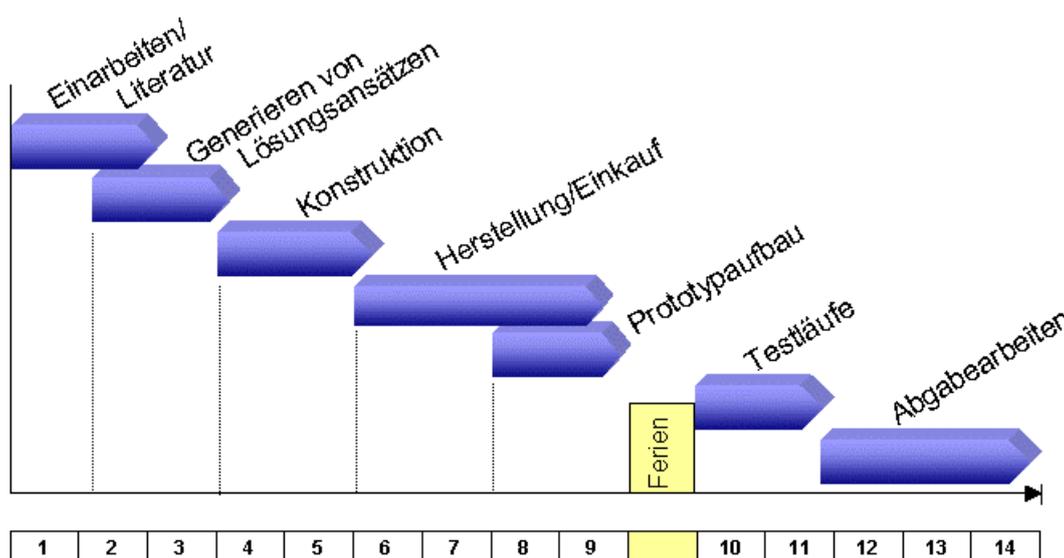


Abbildung 1-4: Grober Zeitplan

1.4.1 Meilensteine

Für die Arbeit wurden vier Meilensteine festgelegt die in Tabelle 1-1 aufgelistet sind.

Nr.	Meilenstein	Datum
1	Prototyp-Prinzip ausgewählt	11. November 2005
2	Konstruktion abgeschlossen/Start Produktion	25. November 2005
3	Start Testphase	11. Januar 2006
4	Schlussbericht verfasst	27. Januar 2006

Tabelle 1-1: Meilensteinliste

1.4.2 Status-Meetings

Zum optimalen Informationsaustausch und Fortschrittskontrolle wurde zu Beginn der Arbeit ein wöchentlich repetierender Termin für das Status-Meeting festgelegt.

Während diesem Treffen mit Niccolò Pini wurden die Tätigkeiten der vergangenen Woche rekapituliert, die Zielerreichung besprochen und die Arbeitspakete und Ziele für die nächste Woche fixiert.

1.5 Budgetplan

Um die entstehenden Kosten stets unter Kontrolle zu haben wurde schon in einer frühen Phase der Arbeit ein Budgetplan aufgestellt. Anfangs bestand dieser nur aus Grobschätzungen, wurde jedoch fortlaufend mit Offertenangaben verfeinert und schliesslich mit den tatsächlichen Kosten ergänzt.

Das Ziel die Kosten vor dem Projektstart zu kennen wurde nicht ganz erreicht. Dies ist jedoch auch nicht in jedem Fall möglich. So entstanden gewisse Kosten erst im Verlauf der Arbeit und der Budgetplan musste überarbeitet werden. Eine detaillierte Auflistung der Kosten ist im Anhang D enthalten.

1.6 Literaturrecherche

Die Literaturrecherche wurde basierend auf den Suchergebnissen der Semesterarbeit von M. Grass und M. Geisshüssler [1] durchgeführt. Sie kann in zwei Teile aufgeteilt werden. In den ersten zwei Wochen der Diplomarbeit wurden die Grundkenntnisse der Thermoplastverarbeitung vertieft und die vorhandenen Publikationen zum Thema Thermoplastrollforming studiert. Eine zweite Literaturrecherche wurde in der 7. und 8. Woche durchgeführt. Der Entscheid zur Ausarbeitung eines zweiten Konzepts bedingte vertiefte Kenntnisse im Bereich der Thermoplastpultrusion.

Für die Suche der im Literaturverzeichnis aufgeführten Publikationen wurde hauptsächlich das „Web of Science“ [34] verwendet.

2 Grundlagen Polymerwerkstoffe

In diesem Kapitel soll ein Überblick über die Faserverbund-Thermoplaste im Allgemeinen und Polypropylen im speziellen gegeben werden.

Matrixsysteme für Faserverbundwerkstoffe können generell unterteilt werden in duroplastische und thermoplastische Werkstoffe (siehe Abbildung 2-1). Die thermoplastischen Materialien lassen sich anhand der Mikrostruktur weiter unterteilen in amorphe und teilkristalline Thermoplaste.

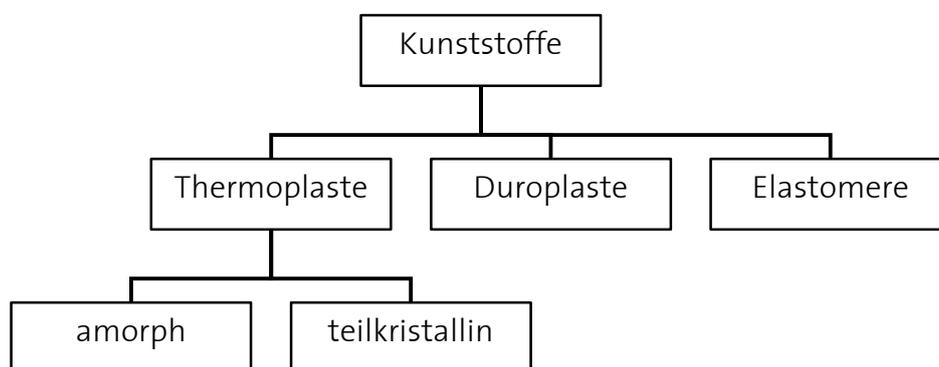


Abbildung 2-1: Einteilung der Kunststoffwerkstoffe

Elastomere sind schwach vernetzte Polymerwerkstoffe. Sie sind durch ihre mechanischen Eigenschaften nicht als Matrixwerkstoffe für faserverstärkte Kunststoffe geeignet und werden nicht weiter beschrieben.

2.1.1 Duroplasten

Duroplastische Materialien weisen, im Gegensatz zu den Thermoplasten, eine stark vernetzte Polymerstruktur auf. Die Moleküle bilden damit ein Netzwerk und werden zu einem einzigen Riesenmolekül (Makromolekül). Sie sind nach dem Aushärten weder quell-, lös- noch schweisbar. Duroplastische Matrixsysteme sind unter den Faserverbundwerkstoffen weit verbreitet, die bekanntesten Vertreter sind Epoxidharze und Polyester.

Da ausgehärtete Duroplasten nicht mehr plastisch verformbar sind, werden sie vor der Aushärtung in die gewünschte Form gebracht. Die folgenden Verfahren sind weit verbreitet und werden industriell angewendet:

- *Handlaminierten*: Ablegen und Benetzen der Fasern wird manuell ausgeführt, Aushärtung erfolgt oft in einer einseitigen Form.
- *Liquid Composite Moulding (LCM)*: Imprägnierung von trockenen Fasern in einer Kavität mit Hilfe von Druck und/oder Vakuum

- *Prepreg-Technik*: Verwendung von vorimprägniertem (preimpregnated) Faserhalbzeug welches im Autoklav ausgehärtet wird
- *Wickeln*: Imprägnierte Rovings oder Bänder werden auf einen rotierenden Dorn abgelegt
- *Tapeablegen*: Imprägniertes Bandhalbzeug wird (meist) von Robotern in eine Form abgelegt.
- *Pultrusion*: Herstellung von Endlosprofilen mit konstantem Querschnitt. Harzgetränkte Fasern werden durch eine beheizte Form gezogen.

Die gängigsten duroplastischen Matrixwerkstoffe sind:

- Epoxydharze (EP)
- Polyester (UP)
- Vinylester (VE)
- Polyimide (PI)

2.1.2 Thermoplaste

Die Thermoplaste lassen sich anhand ihrer Molekülstruktur in zwei Gruppen unterteilen. Amorphe Thermoplaste weisen keine Ordnung über mehrere Molekülketten auf. Der Molekülabstand ist entlang der Molekülketten nicht konstant, die Ketten sind wirr angeordnet.

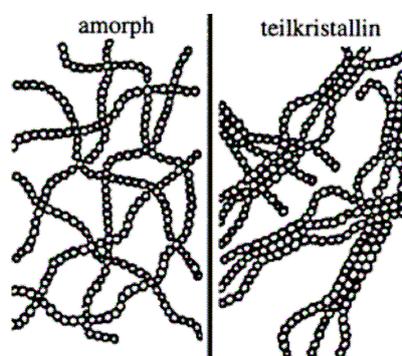


Abbildung 2-2: Mikrostruktur von amorphen und teilkristallinen Thermoplasten (Quelle: [2])

Teilkristalline Thermoplaste besitzen gebietsweise parallel ausgerichtete Polymerketten. Der ausgerichtete Zustand ist für die Moleküle energetisch günstiger und wird dadurch bevorzugt. Die Kristallbildung führt zu zusätzlicher Vernetzung der Moleküle und wirkt somit verstärkend. Ist der Kristallinitätsgrad zu tief ($< 5\%$), so wirken sich die Kristalle nicht auf das Verhalten des Kunststoffes aus. Ist er zu hoch ($> 50\%$), so reduzieren die Kristalle das Energieaufnahmevermögen, der Kunststoff wird spröd.

Typischerweise sind teilkristalline Kunststoffe undurchsichtig (Ausnahme: PET für Flaschen). Dieser Effekt wird durch die unterschiedlichen Lichtbrechungen der amorphen und teilkristallinen Phase erzeugt.

Der Anteil kristalliner Gebiete (Kristallinitätsgrad) hängt von den Bedingungen während der Abkühlung aus dem geschmolzenen Zustand ab. So behindern grosse Abkühlraten die Bildung von Kristallen während kleine Abkühlraten den Kristallen Zeit lassen um zu wachsen. Durch mechanische Beanspruchung (Verstreckung) können die Kristallbereiche ausgerichtet werden was zu erhöhter Festigkeit führt.

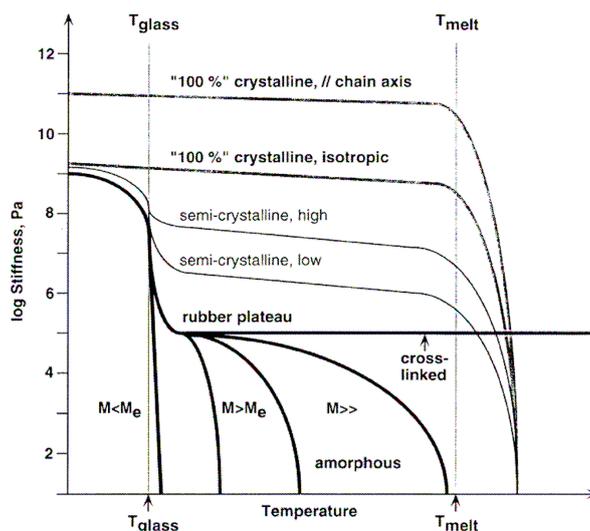


Abbildung 2-3: Temperatur-StEIFIGKEITS-DIAGRAMM: Gut erkennbar ist der StEIFIGKEITSABFALL bei der Glasübergangstemperatur durch das Schmelzen der amorphen Gebiete.

Abbildung 2-3 zeigt deutlich wieso teilkristalline TP hauptsächlich oberhalb, amorphe TP jedoch nur unterhalb ihrer Glasübergangstemperatur (T_{glass}) verwendet werden. Das Schmelzen der amorphen Phase führt, abhängig vom Kristallinitätsgrad, zu einem Abfall der StEIFIGKEIT.

Die bekanntesten Vertreter der thermoplastischen Werkstoffe sind:

- Polypropylen (PP)
- Polyethylenterephthalat (PET)
- Polyamid (PA)
- Polyetheretherketon (PEEK)

2.2 Umformmechanismen

Unverstärkte Thermoplaste lassen sich beinahe beliebig umformen. Bei kontinuierlich verstärkten Thermoplasten behindern die Fasern, welche in diesem Fall als nicht dehnbar angesehen werden können, die Verformung in Faserlängsrichtung. Das Deformationsverhalten wird nun von der Faserarchitektur dominiert.

Die Umformung der imprägnierten textilen Verstärkung ist demnach nur durch die Neuordnung der Faserverbunden mit Matrixfluss möglich.

Es werden folgende fünf Umformmechanismen unterschieden:

- Zwischenschichtgleiten
- Gewebescherung
- Faserstreckung
- Faserdehnung
- Faserfliessen

2.2.1 Zwischenschichtgleiten

Der Faserverbund kann als Stapel von matrixreichen und faserreichen Schichten angesehen werden. Wird das Laminat nun bebogen, so gleiten die faserreichen und damit starren Schichten auf den matrixreichen Schichten

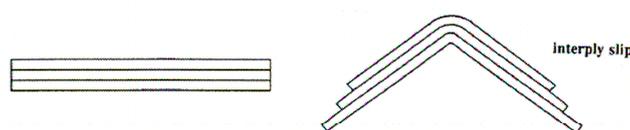


Abbildung 2-4: Zwischenschichtgleiten ermöglicht die Biegung von kontinuierlich FV-Kunststoffen
(Quelle: [2])

Dieser Mechanismus spielt eine wichtige Rolle bei der Herstellung von gekrümmten Bauteilen. Der Deformationswiderstand wird hauptsächlich durch die Matrixviskosität bestimmt. Ist diese zu hoch zu hoch, so kommt es zu Faserknicken und -bruch. Wenn die Viskosität zu tief ist bilden sich durch Faserfluss Bereiche mit zu geringerem Faservolumengehalt (Abbildung 2-5).

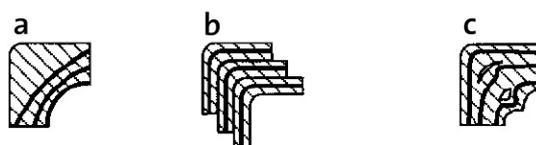


Abbildung 2-5: Laminate deformation: a) zu geringe Viskosität verursacht Matrixmigration, b) Zwischenschichtgleiten c) zu grosse Viskosität, Fasern stauchen und brechen (Quelle: [3])

2.2.2 Gewebescherung

Gewebe lassen sich, obwohl in zwei Richtungen verstärkt, unter Schubbeanspruchung verformen. Die Faserbündel verhalten sich dabei wie kleine Parallelogramme.

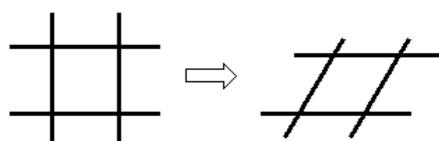


Abbildung 2-6: Prinzip der Gewebescherung (links: unverformt, rechts: verformt)

2.2.3 Faserstreckung

Unter Zugbeanspruchung werden sich die noch gekrümmten Faserbündel geradlinig ausrichten. Dieser Effekt wird Faserstreckung genannt. Es genügen bereits kleine Kräfte um diesen Mechanismus auszulösen.

2.2.4 Faserdehnung

Sobald die Fasern ganz gestreckt sind beginnen sie sich elastisch zu verformen. Da aber Verstärkungsfasern sehr steif sind, ist diese Deformation vernachlässigbar klein.

2.2.5 Faserfliessen

Matrixfluss innerhalb der Laminatenebene kann die Fasern zwingen in Faserrichtung oder quer dazu zu fließen. Die zweite Form ist dabei die häufigere. Findet dieser Prozess kontrolliert statt, kann er sich positiv auf die Qualität auswirken. Unkontrolliertes Faserfliessen führt zu Zonen mit geringem Faservolumengehalt und unerwünschter Faserorientierung.

2.2.6 Matrixfluss

Die Verstärkungsfasern erzeugen im Faserverbund eine starke Anisotropie der Permeabilität. Der Fließwiderstand entlang der Fasern ist deutlich grösser als quer dazu. Abbildung 2-7 zeigt die möglichen Matrixflusstypen.

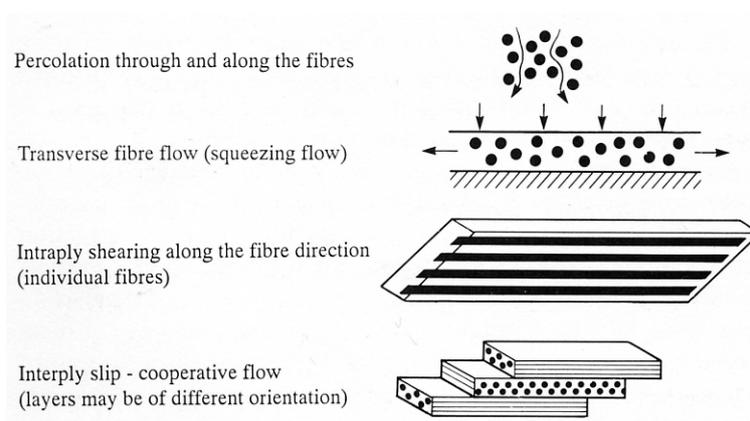


Abbildung 2-7: Flussmechanismen in vorimprägnierten Produkten (Quelle: [3])

2.3 Konsolidierungsmechanismen

Die Herstellung von FV-Thermoplaste kann in drei Hauptprozesse unterteilt werden:

1. Schmelzen
2. Konsolidierung
3. Erstarrung

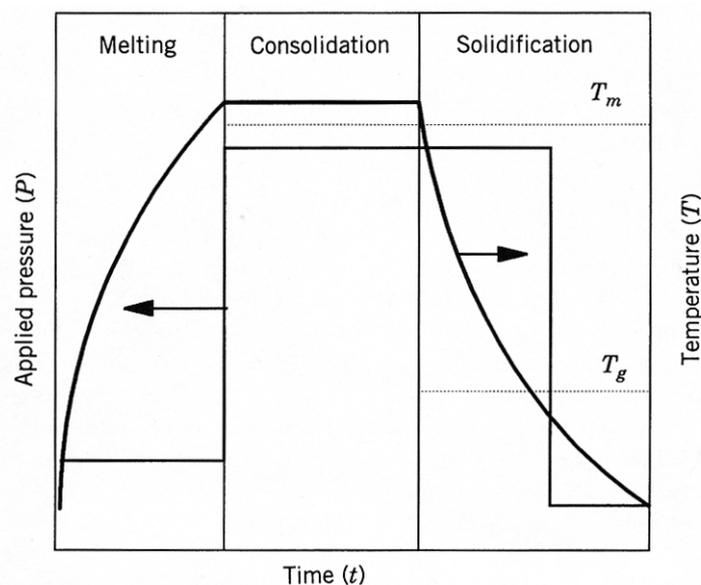


Abbildung 2-8: Typisches Temperatur- und Druckprofil während der Thermoplastverarbeitung (Quelle: [4])

Die Abbildung 2-8 zeigt wie ein typisches Temperatur- und Druckprofil während des Herstellvorgangs aussehen kann.

Die Konsolidierung ist der Schlüsselprozess in der Herstellung von FV-Thermoplaste. Der Begriff Konsolidierung umfasst die Benetzung der Faser mit dem Matrixmaterial als auch die Kompression des Laminats.

Der Konsolidierung lässt sich in die drei folgenden Teilprozesse unterteilen:

- Imprägnierung der Fasern
- Verdichtung des Laminats
- Autohesion

Wie U. I. Thomann in seiner Dissertation [5] beschrieben hat, benötigen die Verdichtung und die Autohesion nur etwa 1 % der gesamten Konsolidierungszeit. Somit kann der Konsolidierungsprozess auch als Imprägnierungsprozess gesehen werden. Der Weg zu schnellen Zykluszeiten führt damit unweigerlich über kurze Fließwege während der Imprägnierung bzw. über bereits vorimprägniertes Halbzeug.

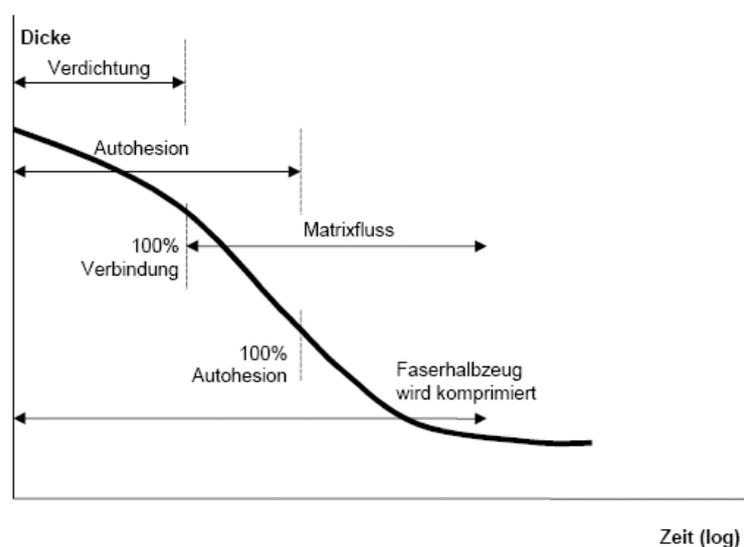


Abbildung 2-9: Dickenänderung während des Konsolidierungsprozesses (Quelle [4])

2.3.1 Faserimprägnierung

Thermoplasten weisen im geschmolzenen Zustand typischerweise eine deutlich grössere Viskosität auf als Duroplasten (ca. Faktor 300). Das Gesetz von Darcy (Gl. 1), welches die Fließgeschwindigkeit mit dem Druckgradienten verknüpft, zeigt wie die Fließgeschwindigkeit umgekehrt proportional von der Viskosität abhängt.

$$\text{Gl. 1:} \quad v = -\frac{K}{\eta}(\nabla p + \rho \cdot g)$$

- v : Fließgeschwindigkeit
- K : Permeabilität
- p : Druck
- ρ : Dichte
- η : Viskosität
- g : Erdbeschleunigung

Die Faserimprägnierung als zeitbestimmende Komponente im Konsolidierungsprozess muss, um kurze Taktzeiten in der Serienproduktion zu erreichen, so schnell wie möglich ablaufen. Aus Gl.1 ist leicht erkennbar dass dies durch die Vergrößerung des Druckgradienten erreicht werden kann. Dies erfordert jedoch wesentlich stabilere Werkzeuge und leistungsfähigere Pressanlagen was die wirtschaftliche Produktion einschränkt. Die Permeabilität wird durch die verwendete Faser-Matrix-Kombination vorgegeben und kann daher nur bedingt angepasst werden. Es bleibt also noch die Viskosität um die Fließgeschwindigkeit zu beeinflussen. Die Viskosität ist stark temperaturabhängig. Hohe Temperaturen bedeuten jedoch längere Aufheizzeiten und erschweren die Auslegung von Presswerkzeugen.

Die aussichtsreichste Methode bleibt die Minimierung der Fließdistanzen durch geeignete Halbzeugwahl. Abbildung 2-10 zeigt schematisch die zur Faserimprägnierung nötigen Fließdistanz.

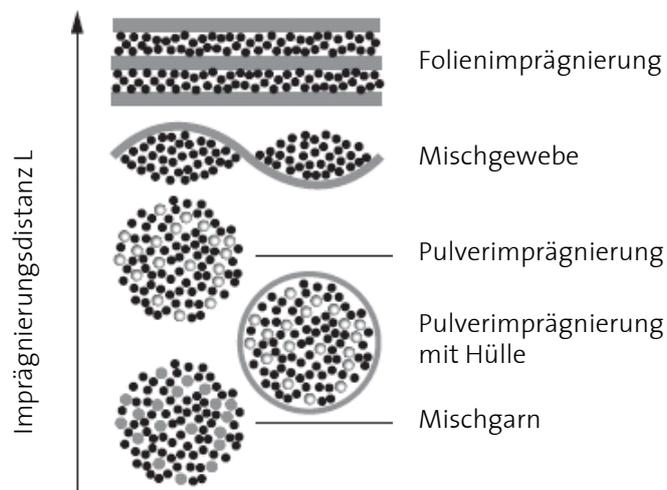


Abbildung 2-10: Imprägnierungsdistanzen verschiedener Halbzeugformen (Quelle: [5])

Die in Abbildung 2-10 dargestellten Halbzeugformen werden in 2.5 Thermoplast Halbzeug beschrieben.

Der einfachste Weg die Konsolidierungszeit zu verkürzen ist die Verwendung von vorimprägniertem Halbzeug. Damit entfällt der gesamte zeitaufwändige Imprägnierungsschritt (2.5.3 Verwendetes Halbzeug).

2.3.2 Bulk Consolidation

Bulk Consolidation (BC) ist der Prozess während dem die vorimprägnierten verdichtet werden und zu einem Laminat verschmelzen. Die ursprünglichen Halbzeugschichten sind nun nicht mehr unterscheidbar. Für vorimprägniertes Bandhalbzeug besteht der BC-Prozess nur noch aus der Elimination von Lufteinschlüssen, welche durch die unebene Halbzeugoberfläche entstanden sind. Dara und Loos [6] haben für den BC-Prozess von Bandhalbzeug ein mathematisches Modell entwickelt indem sie die Oberflächenrauheit durch kleine Quader mit unterschiedlichen Abmessungen approximiert haben. Die Oberflächenrauheit wurde mit einer Weibull-Verteilung charakterisiert. Unter Druck und Temperatureinwirkung werden diese Quader flach gedrückt bis eine Ebene entsteht. Dieses Modell wurde von Lee und Springer [3] vereinfacht indem von Quadern mit identischer Grundfläche ausgegangen ist, nur die Quaderhöhe ist variabel. Das Modell von Dara und Loos benötigt aber die Messung der Viskosität des geschmolzenen Faser-Matrix-Gemisches. Die Oberflächenrauheit des Halbzeugs ist zudem schwierig messbar und abhängig vom Halbzeuglieferanten. Muzzy et al. [3] entwickelte ein einfaches Modell das direkt von der Halbzeughöhe ausgeht. Er modelliert den BC-Prozess mit einer modifizierten Gleichung (Gl. 2) für viskosen Fluss durch ein poröses Medium.

$$\text{Gl. 2} \quad p = C\eta \frac{a^2}{r_f^2} \frac{v_f}{(1-v_f)^3} \frac{\dot{V}}{V_c}$$

a : eine charakteristische Länge

r_f : Faserradius

\dot{V} : Volumenänderungsrate

V_c : Volumen

C : Empirische Konstante

v_f : Faservolumengehalt

Die Druckänderung im Laminat während der Bulk Consolidation kann mit Gl. 3 modelliert werden.

$$\text{Gl. 3} \quad \frac{dp}{dt} = B_y \left(\frac{dV_c}{dt} \right) \frac{1}{V_c}$$

B_y : Bulkmodul

Da sich lediglich die Laminatdicke ändert kann die Volumenänderungsrate auch geschrieben werden als Gl. 4.

$$\text{Gl. 4} \quad \frac{dV}{dt} = A \left(\frac{dh}{dt} \right)$$

A : Laminatgrundfläche

h : Laminathöhe

Integration von Gl. 3 unter Verwendung von Gl. 4 ergibt Gl. 5.

$$\text{Gl. 5} \quad p = B_y \ln \left(\frac{h_0}{h_{start}} \right)$$

h_0 : Enddicke

h_{start} : Anfangsdicke

Gl. 5 kann nun verwendet werden um die Bulk Consolidation zu modellieren.

2.3.3 Autohesion

Nachdem Kontakt zwischen den Einzelnen Lagen hergestellt worden ist, beginnen die Molekülketten in die benachbarten Lagen zu diffundieren und verhaken sich dort mit anderen Molekülen. Dieser Prozess wird Autohesion genannt. Es bildet sich eine starke

Bindung zwischen den zwei Lagen. Wool [4] zeigte, dass die mech. Eigenschaften der Verbindung, wie Zugmodul und Schlagzähigkeit, von der Temperatur, Zeit, Molekulargewicht und Zusammensetzung des Material abhängen. Er entwickelte die folgenden Beziehungen ([4]):

$$\text{Gl. 6} \quad \frac{S}{S_{\infty}} = \sqrt[4]{\left(\frac{t}{T_r}\right)}$$

S : Zugfestigkeit
 t : Kontaktzeit
 T_r : Zeit bis eine zusammenhängende Oberfläche entstanden ist

$$\text{Gl. 7} \quad \frac{G_c}{G_{\infty}} = \sqrt[2]{\left(\frac{t}{T_r}\right)}$$

G_c : Bruchenergie

Die Beziehungen Gl. 6 und Gl. 7 gelten nur unter isothermen Bedingungen und für $t < T_r$. Dara und Loos [6] formulierten aus Gl. 6 und 7 eine Definition (Gl. 8) für den Autohesionsgrad über die Messung der Zugfestigkeit.

$$\text{Gl. 8} \quad D_{AU} = \frac{S}{S_{\infty}}$$

D_{AU} : Autohesionsgrad

Für das tiefere Studium dieses Themas wird das Buch „Advanced Composites Manufacturing“ von T.G. Gutowski [4] empfohlen.

2.4 Oxidative Degradation

Der Schmelzvorgang von thermoplastischen Polymeren ist ein rein physikalischer Prozess und theoretisch reversibel und beliebig oft wiederholbar. Praktisch sind jedoch auch irreversible chemische Prozesse beteiligt. Das Molekulargewicht der Polymerketten nimmt bei jedem Schmelzvorgang ab, dadurch verringert sich die Qualität des Kunststoffes. Die Kettenverkürzung wird durch Oxidation mit Luftsauerstoff ausgelöst. Schmelzen unter Schutzatmosphäre entschärft die Problematik auch nicht, da auch der im Polymer gelöste Sauerstoff zu Autooxidation führt.

Dieses Materialverhalten steht im Konflikt mit dem Wunsch nach möglichst tiefer Matrixviskosität, was wiederum mit hohen Prozesstemperaturen verknüpft ist. Es ist also ein schneller Aufheizprozess mit kurzer Verweilzeit bei hoher Temperatur anzustreben.

2.5 Thermoplast Halbzeug

Wie bei der Verarbeitung von FV-Duroplasten gibt es bei den Thermoplasten zwei unterschiedliche Ansätze die Fasern zu imprägnieren.

- Imprägnierung der Fasern vor dem eigentlichen Herstellprozess (Prepregs)
- Imprägnierung während dem Herstellprozess (Duroplast: z.B. RTM-Verfahren)

2.5.1 Vorimprägnierte Halbzeuge

In Analogie zu den Duroplasten werden vorimprägnierte thermoplastische Halbzeuge Prepregs genannt. Sie sind bereits mit dem Thermoplast imprägniert aber nicht zwingend konsolidiert. Halbzeuge die im Lösungsmittel- oder Schmelzverfahren imprägniert werden sind bereits vorkonsolidiert. Bei pulverimprägniertem Halbzeug haftet die Thermoplastmatrix tropfenförmig an der Faser. Hier muss zwingend ein Konsolidierungsschritt folgen um die Benetzung der Fasern zu vervollständigen. Organobleche sind Platten welche in beheizten Pressen aus einzelnen Prepreglagen hergestellt werden. Sie sind bereits vollständig konsolidiert und benötigen keine weiteren Arbeitsschritte.

Für vertiefte Kenntnisse der Vorimprägnierten Halbzeuge sei auf das Skript der Vorlesung „Composites Technologien“ (Kap.9.3) von Prof. Ermanni an der ETH Zürich verwiesen [2].

2.5.2 Nicht vorkonsolidierte Halbzeuge

Mischgarne bestehen aus verzwirnten, umsponnenen (comingled yarn) oder nur gemischten (intermingled yarn) Verstärkungs- und Matrixfilamenten (Abbildung 2-11).

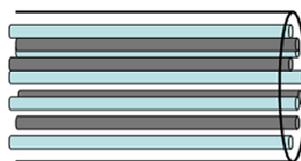


Abbildung 2-11: Mischgarn bestehend aus Matrix- und Verstärkungsfilamenten. Die Filamente können von einem dünnen Matrixmantel umschlossen sein.

Die weniger homogene Polymerverteilung bedingt grössere Konsolidierungsdrücke und -zeiten.

Im Fall der Folienimprägnierung wird ein Laminat aus Faser- und Matrixschichten aufgebaut und in einem nachfolgenden Konsolidierungsschritt vereinigt. Da die

Fliessdistanzen relativ gross sind ist auch hier mit längeren Konsolidierungszeiten und/oder grösseren Konsolidierungsdrücken zu rechnen.

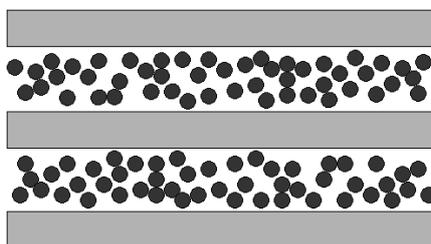


Abbildung 2-12: Folienimprägnierung: Schichten aus trockene Fasern und Matrixfolie wechseln sich ab

Gewebe die aus Verstärkungsgarn und Matrixgarn bestehen werden Hybridgewebe genannt. Die Matrixanteile werden bei der Bauteilherstellung geschmolzen und benetzen die Fasern.

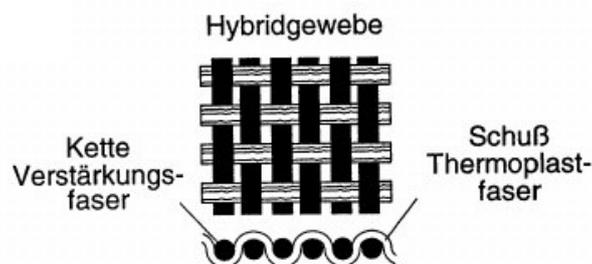


Abbildung 2-13: Hybridgewebe bestehend aus Verstärkungsfasern (Kette) und Thermoplastfaser (Schuss) (Quelle: [2])

Der Begriff Hybridgewebe wird auch für Mischgewebe aus z.B. Kohle- und Aramidfaser verwendet und kann leicht zu Verwechslungen führen.

2.5.3 Verwendetes Halbzeug

Das für diese Arbeit verwendete Halbzeug besteht aus einer mit Glasfaser unidirektional verstärkten Polypropylen (PP) – Matrix. Es wird von der Firma Gurit [30] in Bandform unter dem Markennamen Plytron vertrieben. Das verwendete Material misst 50 mm in der Breite und 0.5 mm in der Dicke. Eine Rolle fasst ca. 110 m Plytron-Band. Durch das Aufwickeln auf die Kernspule ist das Band leicht vorgekrümmt, diese Krümmung ist jedoch nicht relevant und verschwindet beim Schmelzen sofort.

Tabelle 2-1: Halbzeugeigenschaften „Plytron“ (Quelle: [7])

Eigenschaft	Wert
Breite [mm]	50
Dicke [mm]	0.5
Länge [m]	Aufgerollt (bis 400m /Rolle)
Dichte [g/cm ³]	1.48
Faservolumengehalt [%]	35
Zugfestigkeit [GPa]	28.5
E-Modul [GPa]	22
Bruchdehnung [%]	2.1
Konsolidierungsdruck (Empfehlung) [bar]	10 bis 50

Polypropylen (PP) ist ein teilkristalliner Thermoplast mit einer Glas temperatur von -18°C und einer Schmelztemperatur von 164°C.

Tabelle 2-2: Eigenschaften von Polypropylen (Quelle: [2])

Eigenschaft	Wert
Dichte [g/cm ³]	0.90-0.91
Zug-E-Modul [GPa]	1.1-1.3
Bruchdehnung [%]	20-800
Zugfestigkeit [MPa]	21-37
Einsatztemperatur [°C]	100-140
Glas temperatur [°C]	-18
Chem. Beständigkeit	gut
Brandverhalten	entflammbar bei 345°C

PP ist ein typischer Werkstoff für Alltagsanwendungen. Er eignet sich mit Glasfasermatten verstärkt (GMT) auch sehr gut für die Verarbeitung in Pressverfahren.

Es sind drei verschiedene Molekülstrukturen von PP bekannt (Abbildung 2-14). Für technische Anwendungen wird hauptsächlich isotaktisches teilkristallines PP verwendet. Der Anteil der kristallinen Phase beträgt beim verwendeten Plytron typischerweise ca. 40%.

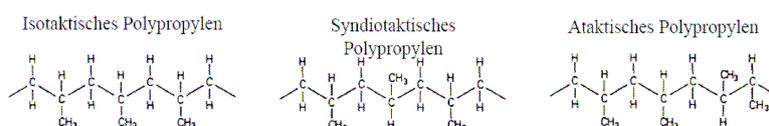


Abbildung 2-14: Die drei bekannten Molekülstrukturen von Polypropylen (Quelle: [2])

3 Verarbeitung faserverstärkter Thermoplaste

Der Verarbeitungsprozess vom Halbzeug zum fertigen Bauteil lässt sich bei den faserverstärkten Thermoplaste, unabhängig von der gewählten Verarbeitungsmethode, in drei Schritte (Abbildung 3-1) unterteilen.

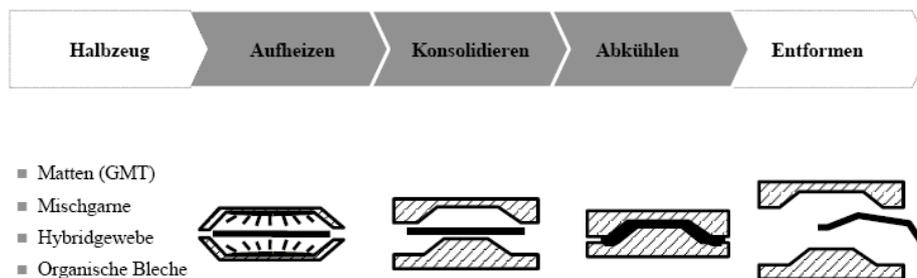


Abbildung 3-1: Prozessschritte während der Thermoplastverarbeitung (Quelle: [2])

Das Halbzeug wird zuerst über den Matrix-Schmelzpunkt erhitzt um die plastische Verformung zu ermöglichen. Die Verweildauer über oder nahe dem Schmelzpunkt sollte so kurz wie möglich gehalten werden, um die oxidative Degradation zu verhindern/minimieren. Der Konsolidierungsschritt beinhaltet mehrere Mechanismen welche in 2.3 Konsolidierungsmechanismen genauer behandelt werden. Nach der Konsolidierungsphase wird das Bauteil noch in der Form abgekühlt und das Matrixmaterial erstarrt wieder. Das Bauteil kann entnommen werden sobald es formstabil ist. Für amorphe Thermoplaste entspricht diese Temperatur der Glastemperatur. Teilkristalline Thermoplaste zeigen ein anderes Verhalten. Die Temperatur, ab welcher entformt werden kann, liegt hier zwischen der Schmelztemperatur und der Kristallisationstemperatur. Diese können, bei Mangel an Erstarrungskeimen, über 20°C auseinander liegen (Abbildung 3-2).

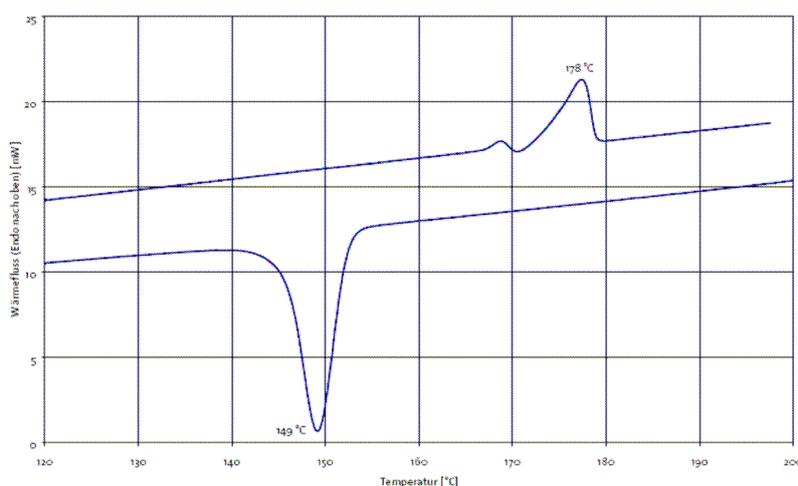


Abbildung 3-2: DSC-Messung einer CF/PA 12 Probe. Deutlich erkennbar ist die Abweichung des Kristallschmelzwärmepeaks (obere Kurve, links) von Rekrystallisationspeak (untere Kurve) (Quelle: [2]).

3.1 Pressverfahren

Die Pressverfahren nehmen durch die sehr kurzen Zykluszeiten in der Thermoplastverarbeitung eine besondere Rolle ein.

3.1.1 Pressformtechnik

Die Pressform-Technik bildet die Grundlage aller Pressverfahren. Alle Prozessschritte erfolgen im geschlossenen Werkzeug, dieses durchläuft damit den gleichen Temperaturzyklus wie das Laminat. Die relativ lange Verweilzeit des Laminats im warmen Werkzeug ermöglicht den Fasern die Spannungen der Umformung abzubauen. So entstehen Bauteile mit sehr geringem Verzug und hoher Masshaltigkeit.

Dieses Verfahren ist auf weiches Textilhalbzeug angewiesen und somit besonders für die Verwendung von Hybridsystemen mit Matrix in Faserform geeignet. Damit entfällt auch die Herstellung von vorkonsolidierten Laminatplatten und die entsprechenden Investitionen.

Es sind einige Varianten des Standardpressverfahrens bekannt. Diese versuchen meist die Zykluszeit zu minimieren um eine wirtschaftliche Grossserienproduktion zu ermöglichen. Die Zykluszeit wird hauptsächlich durch die Aufheiz- und Abkühldauer bestimmt. Ein Ansatz ist die Verwendung von getrennten Kühl- und Heizpressen. Andere Methoden, wie z.B. das QUICKTEMP-Verfahren, versuchen den Temperaturzyklus zu beschleunigen indem mit grossen, externen Energiespeichern und geringer Werkzeugmasse gearbeitet wird.

Eine weitere Variante des Pressformens ist das Schlauchblasverfahren. Diese Methode ermöglicht auch die Herstellung von komplexen Hohlkörpern.

3.1.2 Stempelumformen

Der Unterschied des Stempelumformens zum bekannten Pressformen ist die Aufheizung des textilen Halbzeugs ausserhalb der Presse. Das Halbzeug wird nach dem Aufheizen von einem Transportsystem in die Presse gelegt. Die Presse wird auf einer konstanten Temperatur unterhalb der Erstarrungstemperatur gehalten. Das Laminat wird in der Presse umgeformt und abgekühlt.

Durch die Auslagerung des Aufheizprozesses sind Taktzeiten unter 30s realisierbar.

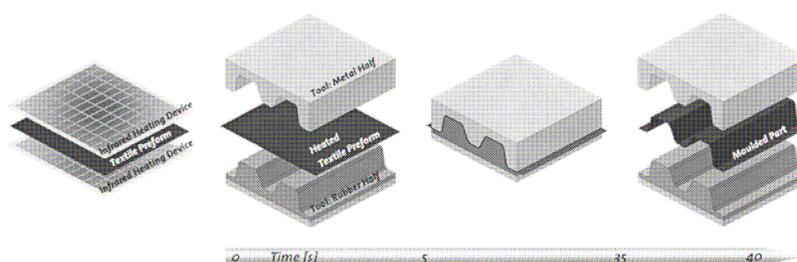


Abbildung 3-3: Zyklusablauf des Stempelumformens: 1. Aufheizen, 2. Transport und einlegen in die Form, 3. Umformen und Abkühlen unter Druck, 4. Entformen (Quelle: [2])

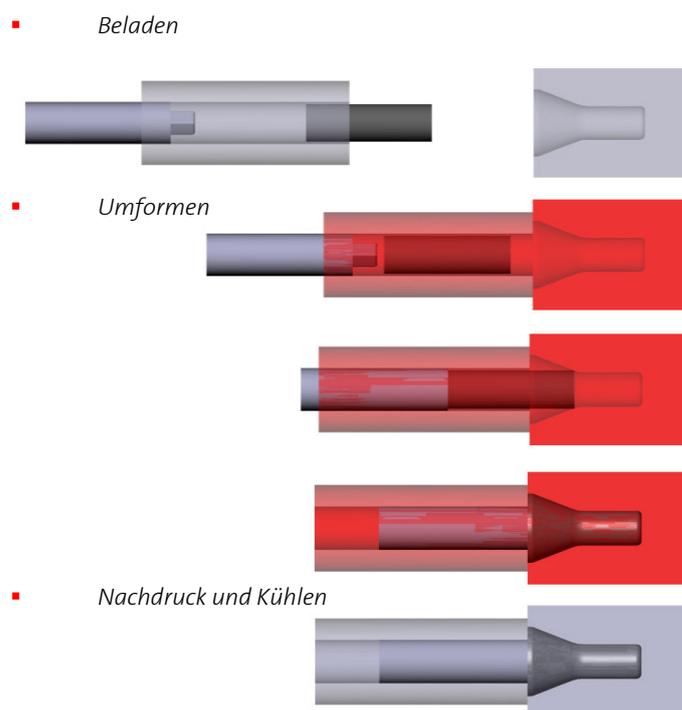


Abbildung 3-5: Composite Flow Moulding-Prozess: Der Rohling aus Matrix und Fasern wird in die beheizte Kavität eingespritzt. Unter Druck wird die Form abgekühlt. (Quelle: [8])

3.1.5 Intervallheisspress-Technik

Dieses Verfahren ermöglicht die Herstellung von gekrümmten Profilen. Die Technologie wird von der Firma ACM Friedrichshafen [31] industriell eingesetzt. ACM hält die Patentrechte an dieser Technologie.

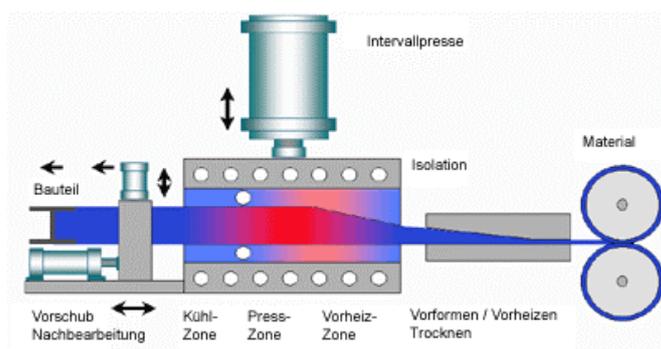


Abbildung 3-6: Schematisches Bild des Intervallheisspress-Prozesses (Quelle : [31])

Das Verfahren der Intervallheisspresse läuft diskontinuierlich ab. Eine Presse formt eine Längeneinheit eines Profils. Während die Pressform offen ist, wird das Profil um diese Längeneinheit vorgeschoben, ein neuer Pressschritt beginnt. Durch die Verwendung von gekrümmten Pressformen lassen sich auch gebogene Profile realisieren.

3.2 Ablegeverfahren

Das thermoplastische Ablegeverfahren ist vom Prinzip her verwandt mit der duroplastischen Tapeablege-Methode. Das Halbzeug wird von einer beheizten Rolle kontinuierlich auf eine Form abgelegt. Der Anpressdruck der Rolle verursacht einen Matrixfluss und sorgt für die nötige Konsolidierung des Laminats. Durch das nachfolgende Kühlelement wird das Laminat unter Druck auf eine formstabile Temperatur abgekühlt. Verschiedene Stufen der Vorheizung des Halbzeugs sowie der bereits abgelegten Schicht sorgen für optimale Prozesstemperaturen.

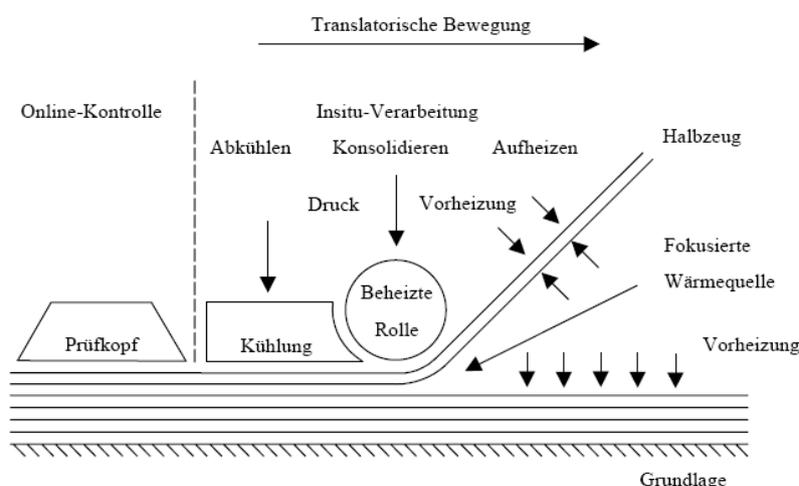


Abbildung 3-7: Schematische Zeichnung des Tapeablegeverfahrens (Quelle: [2])

3.3 Autoklavtechnik

Die Autoklavtechnik bietet auch für die Thermoplastverarbeitung optimale Prozessbedingungen wie kontrolliertes Aufheizen und Abkühlen oder die isostatische Druckabsetzung. Jedoch geht durch den Einsatz der Autoklavtechnik auch einer der Hauptvorteile der TP-FV-Kunststoffe, die Realisierbarkeit sehr kurzer Prozesszeiten, verloren. Die hohen Prozesstemperaturen machen zudem Mühe bei der Werkzeugauslegung und Wahl geeigneter Hilfsstoffe. Die Verarbeitung in inerter Atmosphäre ist unumgänglich.

Aufgrund der oben genannten Nachteile wird die Autoklavtechnik nicht zur industriellen Verarbeitung von FV-Thermoplaste verwendet.

3.4 Pultrusion

Die Pultrusionstechnik ist eine effizientes Verfahren zum kontinuierlichen Herstellen von endlosverstärkten Profilen mit konstantem Querschnitt. Die TP-Pultrusion unterscheidet sich in zwei Punkten von der Duroplast-Pultrusion. Zum einen werden

bei der thermoplastischen Variante meist vorimprägnierte Halbzeug verwendet. Durch die hohe Matrixviskosität ist die Online-Imprägnierung nicht oder nur schwierig realisierbar. Die Matrize macht den zweiten Unterschied. Für die Duroplastpultrusion wird lediglich eine beheizte Form, ev. mit einer vorgeschalteten Vorform, verwendet. Für die TP-Pultrusion wird eine beheizte gefolgt von einer gekühlten Matrize verwendet. Es ist auch möglich nur eine Form mit beheizten und gekühlten Abschnitten einzusetzen. Abbildung 3-8 zeigt eine typische Pultrusionsstrasse.

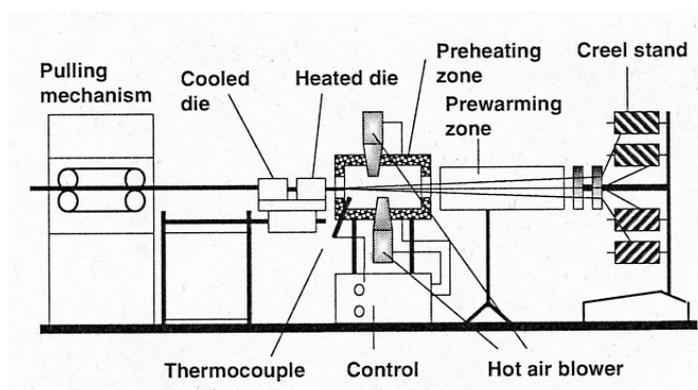


Abbildung 3-8: Schematische Darstellung einer Pultrusionsanlage (Quelle: [9])

3.5 Rollforming

Die Technologie des Rollformens wurde abgeleitet aus der Metallindustrie, wo Rohre und Profile grossindustriell mit diesem Verfahren hergestellt werden.

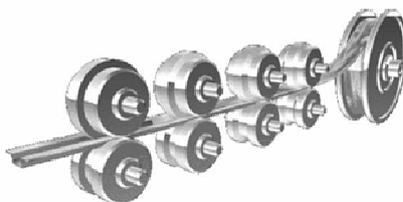


Abbildung 3-9: Herstellung eines Hutprofils im Rollforming-Verfahren (Quelle: [10])

Das TP-Halbzeug wird erwärmt und zwischen Rollen stufenweise Richtung Endquerschnitt umgeformt. Typischerweise folgen auf die Umformrollen sogenannte Dummyrollen. Diese tragen nicht zur Umformung bei sondern stabilisieren das Profil während es abkühlt und verbessern so die Masshaltigkeit und verringern den Porengehalt. Die Technologie ist im Composite-Bereich noch im Entwicklungsstadium und wird noch nicht industriell eingesetzt.

4 Lösungsansätze

Im Kapitel 3 wurden die heute angewendeten Verfahren zur Verarbeitung von FV-Thermoplaste vorgestellt. Es ist jedoch kein Verfahren bekannt, das in der Lage ist endlosfaserverstärkte , gekrümmte Profile **kontinuierlich** herzustellen. Im folgenden Kapitel werden Lösungsprinzipien für diese herausfordernde Aufgabe vorgestellt.

4.1 Profilwahl

Damit die Lösungsansätze ausgearbeitet und bewertet werden können, muss das herzustellende Profil bekannt sein, denn die Profilwahl beeinflusst die Eignung der verschiedenen Ansätze wesentlich.

Folgende Eigenschaften wurden an das Testprofil gestellt:

- Technisch sinnvoll
- Masshaltigkeit (Winkel- und Längengenauigkeit, Verzug) messbar
- Herausfordernd



Abbildung 4-1: Mögliche Profilquerschnitte, das Hutprofil wurde ausgewählt.

Aus den vorgeschlagenen Profilen (Abbildung 4-1.) wurde das Hutprofil als am geeignetsten befunden.

4.2 Modularisierung der Anlage

Eine Anlage zur Herstellung von faserverstärkten Thermoplastprofilen kann in 6 Module aufgeteilt werden (Abbildung 4-2). Diese Modularisierung ermöglicht die komplexe Aufgabe der Profilherstellung auf relativ simple Einzelprobleme herunterzubrechen. Für jedes Modul werden mehrere Lösungsprinzipien vorgeschlagen und anhand von selbst definierten Kriterien bewertet und die Beste ausgewählt. Durch sinnvolle Kombination der Teillösungen lassen sich verschiedene Gesamtlösungen bilden.

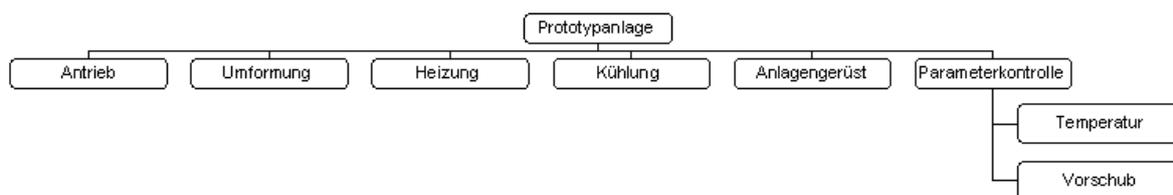


Abbildung 4-2: Moduleinteilung

Bei der Entwicklung einer Prototypanlage scheint es sinnvoll, diese möglichst differentiell aufzubauen. Diese bringt zwei wichtige Vorteile mit sich. Die Module lassen sich einzeln anpassen und optimieren. Es ist dadurch auch möglich Lösungen, die sich als ungeeignet erweisen, zu ersetzen ohne die gesamte Anlage erneuern zu müssen. Der zweite Vorteil liegt in der gemeinsamen Nutzung von Ressourcen mit M. Scapozza [11], was einen effizienteren Einsatz der finanziellen Mittel ermöglicht.

4.3 Heizung

Zur Temperaturerhöhung in einem Körper braucht es, abgesehen von inneren Quellen wie z.B. chemische Prozesse, eine Möglichkeit der Wärmeübertragung. Die aus der Thermodynamik bekannten Wärmetransportvorgänge sind:

- Wärmeleitung
- Wärmekonvektion
- Wärmestrahlung

Es ist möglich das ganze Halbzeug zu erhitzen und in den geschmolzenen Zustand zu führen. Dabei werden jedoch auch Zonen erwärmt, die gar nicht umgeformt werden. Falls nicht mehrere Lagen Halbzeug verwendet werden, können auch nur die tatsächlich zu verformenden Zonen beheizt werden.

Tabelle 4-1: Vor-/Nachteile des Partiellen Erwärmens

Vorteile	Nachteile
Kein unnötiges Aufheizen (oxidative Degradation)	Aufwändiger
Energieverbrauch geringer	Schwieriger kontrollierbar (Wärmeverteilung im Band)

In Abbildung 4-3 wird eine mögliche Realisation anhand des Beispiels Infrarotstrahler dargestellt. Da hier die Wärmeübertragung auf Strahlung basiert, kann das UD-Band relativ einfach mit Spiegeln partiell abgeschirmt werden.

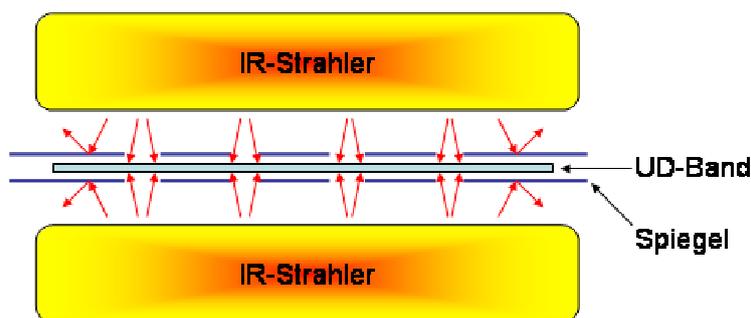


Abbildung 4-3: Selektives Erwärmen der Umformpositionen

Der Ansatz „partielle Heizung“ ist bei den meisten im Folgend vorgestellten Heizstrategien anwendbar.

4.3.1 Kontaktheizung

Das Halbzeug steht in direktem Kontakt mit einer Heizfläche, leichter Anpressdruck erhöht dabei den Wärmefluss.

Tabelle 4-2: Vor-/Nachteile der Kontaktheizung

Vorteile	Nachteile
einfach realisierbar	Matrixhaften
Genauere Temperaturregelung möglich	

4.3.2 Heissgas

Der Thermoplast wird durch aufgeheizte Gase (z.B. Luft oder Stickstoff) erwärmt. Die Aufheizgeschwindigkeit bei dieser erzwungenen Konvektion ist unter anderem abhängig von der Wärmeübergangszahl und der Wärmeleitfähigkeit des Halbzeugs.

Tabelle 4-3: Vor-/Nachteile der Heissgas-Methode

Vorteile	Nachteile
uniforme Wärmequelle	langsame Aufheizgeschwindigkeit
inerte Umgebung (z.B. Stickstoff) möglich	geringe Wärmekapazität des Heizgases
	Schädigung der Fasern bei sehr hohen Gasgeschwindigkeiten
	Nicht für grosse Flächen geeignet

4.3.3 Infrarotstrahler

Infrarotstrahler senden Energie in Form von Strahlung mit einer Wellenlänge von 0.78 μm bis 400 μm aus, davon ist der Bereich von 0.9 μm bis 4 μm technisch nutzbar. Die Strahlen dringen je nach Material bis einige Zehntel in das Halbzeug ein, wonach sich die Energie durch Wärmeleitung verteilt. Die Strahler sind als punkt-, linien- und flächeförmige Elemente erhältlich.

Tabelle 4-4: Vor-/Nachteile der Infrarotstrahler

Vorteile	Nachteile
Kontaktfrei	homogene Aufheizung von dicken Laminaten schwierig
Leicht anpassbar	
Kostengünstig	

4.3.4 Offene Flamme

Die Wärmeübertragung erfolgt durch erzwungene Konvektion sowie Strahlung auf eine stark konzentrierte Fläche. Durch die Flamme entsteht eine relativ sauerstoffarme Umgebung.

Tabelle 4-5: Vor-/Nachteile der offenen Flamme

Vorteile	Nachteile
Sauerstoffarmut kann thermische Zersetzung des Polymers hemmen	Schwierige Regelung der Flammen- und Halbzeugtemperatur
	Zündquelle

4.3.5 Laser

Der Laserstrahl überträgt eine grosse Energiemenge auf eine nahezu punktförmige Fläche.

Tabelle 4-6: Vor-/Nachteile der Laserheizung

Vorteile	Nachteile
punktförmige Erwärmung möglich	Bedingt konstante geometrische Verhältnisse
	nur oberflächliche Erwärmung

4.3.6 Mikrowellen

Mikrowellen sind elektromagnetische Strahlen mit einer Wellenlänge von 1mm bis 1m. Die Erwärmung erfolgt über den dielektrischen Verlust des Materials. Sie sind ausschliesslich für die Erwärmung von nicht leitendem Material geeignet.

Tabelle 4-7: Vor-/Nachteile der Mikrowellenheizung

Vorteile	Nachteile
Schnelle Erwärmung	nur nicht leitende Materialien
	Hoher Energiebedarf

4.3.7 Radiowellen

Die Nützung von Radiowellen (Wellenlänge von 3 bis 300m) zur dielektrischen Erwärmung ist möglich.

4.3.8 Ultraschall

Zur Erwärmung mittels Ultraschall wird dem Halbzeug ein statischer Druck beaufschlagt und mit einer dynamischen Vibration überlagert. Die hochfrequenten mechanischen Wellen erzeugen Reibung zwischen den Molekülen und führen so zur Erwärmung.

Tabelle 4-8: Vor-/Nachteile der Ultraschallheizung

Vorteile	Nachteile
schnell	kontinuierliches Aufheizen schwierig
	Mechanische Störung der Fasern und Matrix

4.3.9 Induktion

Ein hochfrequent wechselndes Magnetfeld induziert in elektrisch leitenden Materialien Wirbelströme welche zur Aufheizung des Materials führen.

Tabelle 4-9: Vor-/Nachteile der Induktionsheizung

Vorteile	Nachteile
kontaktfrei	nur für elektrisch leitende Materialien

4.3.10 Direkter elektrischer Widerstand

Bei dieser Methode wird über zwei Elektroden direkt eine Spannung am Halbzeug angelegt. Die Kohlefasern ermöglichen einen Stromfluss welcher zur Erwärmung des Materials führt.

Tabelle 4-10: Vor-/Nachteile „Direkter elektrischer Widerstand“

Vorteile	Nachteile
gleichmässige Erwärmung von innen	nur für elektrisch leitende Materialien
	Faserkontaktierung mit Elektroden kritisch
	Kontinuierliche Erwärmung schwierig

4.4 Kühlung

Um eine hohe Massgenauigkeit und tiefe Porengehalte zu erreichen, muss das Profil beim bzw. vor dem Verlassen des Umformmechanismus aktiv gekühlt werden. Die Auswirkungen verschiedener Endtemperaturen wurden von Friedrich und Henninger in [Querverweis Friedrich/Henninger] diskutiert.

Die Kühlmethode beeinflusst auch die Kristallinität der Matrix. So führen grosse Abkühlraten zu geringerem Kristallanteil und umgekehrt. Dieser Effekt ist jedoch nicht Bestandteil der Arbeit und wird im Folgenden vernachlässigt.

4.4.1 Luftkühlung

Die Luftkühlung kann einfach durch einen Pressluftstrahl realisiert werden. Dieses Prinzip wurde auch von M. Grass und M. Geisshüssler in ihrer Semesterarbeit [1] erfolgreich eingesetzt.

Tabelle 4-11: Vor-/Nachteile der Luftkühlung

Vorteile	Nachteile
simpel	geringe Kühlleistung

4.4.2 Wasserkühlung

Eine Wasserkühlung kann durch verschiedene Bauweisen realisiert werden, z.B.:

- Wasserstrahl
- Wasservorhang
- Wassernebel

Bei der Wasserstrahlmethode wird das Wasser gezielt und beinahe punktförmig auf das Profil gespritzt und verteilt sich anschliessend. Im Gegensatz zur Strahlmethode durchschreitet das Profil beim Wasservorhang eine Wand aus Wasser. Dies führt zur gleichzeitigen Kühlung des ganzen Querschnitts. Die Wassernebel-Methode zerstäubt das Wasser mittels Düsen in Richtung Profil. Die sehr feinen Wassertropfen kühlen das Profil grossflächig und gleichmässig.

Tabelle 4-12: Vor-/Nachteile einer Wasserkühlung

Vorteile	Nachteile
Grosse Kühlleistung	Aufwändiger als Luft (Auffangbecken/Abfluss nötig)
	Ev. Beeinflussung der Oberfläche durch verdampfendes Wasser

4.5 Umformmechanismus

Der Umformmechanismus stellt das zentrale Element des Profilerstellprozesses dar. In diesem Prozess erhält das flache Halbzeug den gewünschten Querschnitt. Während der Lösungssuche wurde immer die Kombinierbarkeit der Ansätze mit einem Biegemechanismus berücksichtigt. Dies stellt eine zentrale Anforderung dar und hat so die Anzahl möglicher Lösungen von Anfang an reduziert.

4.5.1 Trennschicht

Von M. Grass und M. Geisshüssler wurde in [1] oft über das Haften der Matrix an den Walzen sowie das Aufwickeln einzelner absteigender Fasern an den Walzen berichtet. Um dieses Problem zu umgehen wird versucht eine Trennschicht auf der Ober- und

Unterseite des Halbzeugs zu verwenden. Diese Schicht kann aus einer Folie oder auch dünnen Aluminiumblechen bestehen. Die Verwendung einer Trennschicht ist mit allen Ansätzen kompatibel und wird nicht jedes Mal erwähnt.

Tabelle 4-13: Vor-/Nachteile bei der Verwendung eines Trennmediums

Vorteile	Nachteile
Kein Matrixhaften	Aufwändiger (muss ev. nach dem Erhitzen aufgebracht und vor dem Antrieb entfernt werden)
Besseres Gleitverhalten	Materialaufwand (Kosten)
Bessere Oberflächenqualität	

Kombinierbarkeit mit Biegung

Da die Trennschicht eine geringe Dicke aufweist, ist die Kombination mit einem Biegemechanismus möglich. Bei der Verwendung von Blechen ist zu beachten, dass die Profilierung das Flächenträgheitsmoment stark vergrössert und somit die Biegesteifigkeit erhöht.

4.5.2 Profilierte Rollen

Diese Idee beruht auf der Anwendung in der Rollformung von Metallprofilen. Von K. Friedrich und F. Henninger [10] wurde gezeigt, dass diese Methode für gewebeverstärkte Thermoplaste funktioniert. Durch das vollständig unterschiedliche mechanische Verhalten von geschmolzenem Thermoplast gegenüber Metallprofilen/-bänder kann die Technologie nicht direkt aus der Metallindustrie übernommen werden.



Abbildung 4-4: Foto einer Rollformung-Anlage (jedoch für Metall). Gut erkennbar ist die Änderung der Rollenprofilierung von einer Rollenstation zur nächsten (Quelle: <http://www.kolev.com>).

Das Bandhalbzeug wird im erhitzten Zustand zwischen 4 bis 6 Rollenpaaren durchgeführt. Jedes Rollenpaar formt das Profil etwas mehr in Richtung des gewünschten Endquerschnitts. In [10] werden am Ende des Umformmechanismus so genannte Dummy-Rollen verwendet. Diese tragen nicht direkt zur weiteren Umformung bei, sondern sollen den Querschnitt während dem Abkühlen stützen und

so die Formgenauigkeit erhöhen. Der Druck der Dummy-Rollen während dem Abkühlvorgang hat zudem positiven Einfluss auf den Porengehalt.

Geschwindigkeitsdifferenz

Durch die unterschiedlichen Radien an den „profilierten“ Rollen ergeben sich bei gleicher Winkelgeschwindigkeit an der gleichen Rolle lokal unterschiedliche Geschwindigkeiten. Dieser Effekt wird umso grösser, je kleiner der Radius der Rollen ist und je grösser die Flankenhöhe des Profils. Von F. Henninger und K. Friedrich [10] wird dieser Effekt nicht erwähnt und scheint keine störende Wirkung zu haben. In der Metallrollformung können solche Geschwindigkeitsdifferenzen dank der grösseren Steifigkeit des Blechs von Beginn weg vernachlässigt werden.

Folgende Variationen der Grundidee sind denkbar:

- Kombination mit Antrieb: das Modul Antrieb wird mit dem Umformmechanismus kombiniert, die Umformrollen dienen gleichzeitig auch als Antriebsrollen.
- Kühlung / Heizung integriert: Durch die Kühlung oder Beheizung von Rollen kann eine Kontaktheizung bzw. -kühlung realisiert werden.
- Geteilte Rollen für variable Profilabmessungen: Durch das Einsetzen von unterschiedlichen Rollenmittelstücken können verschiedene Profilbreiten realisiert werden.

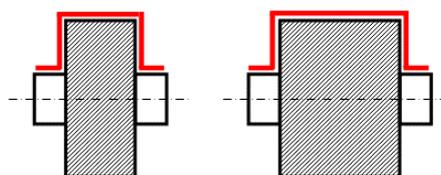


Abbildung 4-5: Durch einsetzen von verschiedenen Mittelstücken können unterschiedliche Profilbreiten hergestellt werden.

Tabelle 4-14: Vor-/Nachteile des Lösungsansatzes „Profilierte Rollen“

Vorteile	Nachteile
Bereits erprobt (Henninger/Friedrich, [10])	Wandstärke ist fix
Definierte Form	Geschwindigkeitsdifferenz

Kombinierbarkeit mit Biegung

Die Kombination des Rollforming-Ansatzes mit einem Biegemechanismus ist prinzipiell möglich. Der Biegeradius wird gegen unten jedoch durch den Rollendurchmesser limitiert.

4.5.3 Form und Rollen

Dieses Prinzip lehnt sich an die Idee „Rollen beidseitig“ an. Die unteren Rollen werden hier jedoch durch eine Positiv- oder Negativform ersetzt. Diese Form ändert ihren

Querschnitt in Längsrichtung kontinuierlich und gibt so dem Halbzeug die gewünschte Form. Gleichzeitig wirkt die Form während dem ganzen Umformprozess stützend.

Tabelle 4-15: Vor-/Nachteile der Methode „Form und Rollen“

Vorteile	Nachteile
Stützwirkung	Erfordert gutes Gleiten des Halbzeugs und somit den Einsatz von Trennfolie
Nur 1 Bauteil (ersetzt 4 bis 6 Rollen)	Aufwändige Form
	Nur bedingt anpassbar da nicht modular aufgebaut
	Erhöhte Wärmeabfuhr durch lange Kontaktzeit
	Geschwindigkeitsdifferenz
	Kombiniert mit Biegung wird Formfertigung sehr aufwändig

Kombinierbarkeit mit Biegung

Auch bei diesem Ansatz ist die Kombination mit Biegung möglich. Der Biegeradius ist wie beim Ansatz „Profilierte Rollen“ nicht beliebig klein wählbar. Die Biegung führt zu komplexen 3D-Formen, welche jedoch bei Verwendung von CAD/CAM kein Problem darstellen wird.

4.5.4 Form und Luftdruck

Die Grundidee ist die gleiche wie bei „Form und Rollen“. Die starren Rollen werden aber durch eine luftgefüllte Gummiwalze ersetzt.

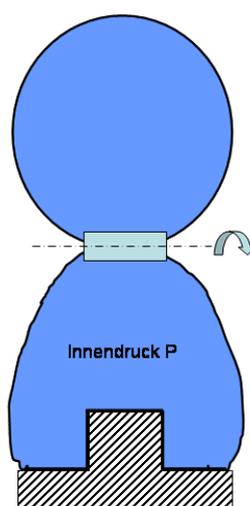


Abbildung 4-6: Querschnitt durch den Mechanismus „Form und Luftdruck“

Tabelle 4-16: Vor-/Nachteile des Ansatzes „Form und Luftdruck“

Vorteile	Nachteile
Grosse Anpressfläche	Materialwahl schwierig (Temperaturbeständiger Gummi)
Regulierbare, gleichmässige Druckabsetzung	Anpressung in Ecken kritisch (je nach Wandstärke und Steifigkeit des Schlauchmaterials)
Formadaptiv	Erfordert gutes Gleiten des Halbzeugs und somit wahrscheinlich den Einsatz von Trennfolie
	Profilwandstärke nicht exakt definiert
	Oberflächenqualität ungenügend (wurde von Dr. Thomann in [5] gezeigt)
	Kombiniert mit Biegung wird Formfertigung aufwändig

Kombinierbarkeit mit Biegung

Die Grösse der Rolle(n) beeinträchtigt auch hier den Biegeradius. Biegung ist aber prinzipiell möglich. Wie beim Ansatz „Form und Rollen“ entstehen auch hier, durch die dem Profilformprozess überlagerte Biegung, komplexe dreidimensionale Formen.

4.5.5 Flexible Rollen

Ähnlich zum Ansatz Form und Luftdruck werden hier auf einer Seite verformbare Rollen verwendet. Das Gegenstück besteht aus einer starren Form.

Tabelle 4-17: Vor-/Nachteile bei der Verwendung von flexiblen Rollen

Vorteile	Nachteile
Grosse Anpressfläche	Abnützung der flexiblen Rollen
Geringere Kosten	Nicht genau definierte Masse
	Anpressdruck abhängig vom Verformungsgrad der Rollen
	Temperaturbeständigkeit eingeschränkt

Kombinierbarkeit mit Biegung

Analog zum Ansatz „Form und Rollen“ ist die Kombination mit Biegung bedingt möglich. Auch hier führt die Biegung zu komplexen 3D-Formen. Der Biegeradius wird durch die Grösse der Rollen gegen unten limitiert.

4.5.6 Prinzip Doppelbandpresse

Für diesen Ansatz wird das Prinzip der Doppelbandpresse verwendet. Die Pressflächen sind jedoch nicht eben, sondern verändern ihre Form in Prozessrichtung kontinuierlich bis zur gewünschten Profilform. Das Band kann plastisch oder elastisch verformt werden. Bei plastischer Deformation ist eine Vorrichtung erforderlich, welche die flache Bandform wieder herstellt.

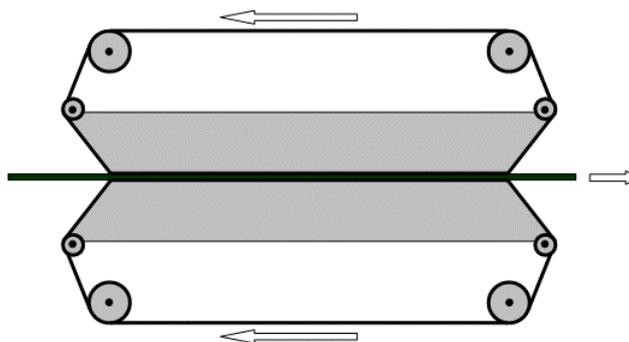


Abbildung 4-7: Prinzip Doppelbandpresse

Tabelle 4-18: Vor-/Nachteile des Prinzips „Doppelbandpresse“

Vorteile	Nachteile
Antrieb integrierbar	Band muss Profilform annehmen können
Druckabsetzung flächenförmig	Temperaturkontrolle: Band transportiert Wärme
Seitliche Führung während dem gesamten Umformprozess gewährleistet	Herstellung aufwändig
Keine Reibungseffekte am Halbzeug	Biegung des profilierten Bandes schwierig
Gute Oberflächenqualität	

Kombinierbarkeit mit Biegung

Die Kombination mit Biegung ist möglich, jedoch müssen dafür gekrümmte Anpressstücke aufwändig gefertigt werden.

4.5.7 Band und Rollen

Dieser Ansatz kombiniert das Prinzip der Bandpresse [Querverweis] mit dem Rollenansatz.

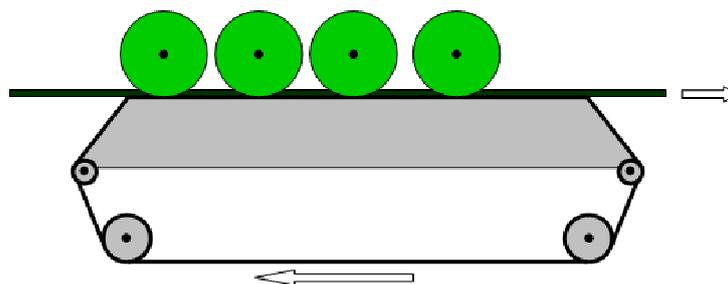


Abbildung 4-8: Prinzip Band mit Rollen

Tabelle 4-19: Vor-/Nachteile der Kombination des Band- und Rollenmechanismus

Vorteile	Nachteile
Antrieb integrierbar	Band muss Profilform annehmen
Druckabsetzung flächenförmig	Temperaturkontrolle: Band transportiert Wärme
Seitliche Führung während dem gesamten Umformprozess gewährleistet	Biegung des profilierten Bandes schwierig
Gute Oberflächenqualität	Herstellung aufwändig

Kombinierbarkeit mit Biegung

Die Kombination mit Biegung ist möglich, jedoch muss dafür ein gekrümmtes Anpressstück aufwändig gefertigt werden.

4.5.8 Multiwalzen

Dieser Ansatz lehnt sich an die Resultate der Semesterarbeit von M. Grass und M. Geisshüssler [1] an. Anstelle grosser, formenden Walzen werden viele kleine, zylindrische Walzen verwendet.

Variante:

Es ist möglich das Multiwalzenkonzept mit „Rollen beidseitig“ zu kombinieren, z. B. mit einer grossen, formgebenden Rolle unten und zylindrischen Walzen oben. Je nach Walzengeometrie kann eine Walze zwei Profilflächen stützen.

Tabelle 4-20: Vor-/Nachteile des Multiwalzen-Ansatzes

Vorteile	Nachteile
Ist nicht auf Trennfolie angewiesen	Sehr aufwändige Lagerung
Anpassbar (bedingt)	Anpressen in Ecken schwierig

Kombinierbarkeit mit Biegung

Wie von M. Grass und M. Geisshüssler [1] gezeigt wurde, ist mit dieser Methode auch eine Biegung des Profils erreichbar.

4.5.9 Raupe

Der Raupen-Ansatz besteht im Prinzip aus vielen kleinen Pressformen die mit dem Profil mitwandern. Der Querschnitt ändert sich während dem Umformprozess nicht, die Formen schliessen nur kontinuierlich und geben dem Profil damit die Form.

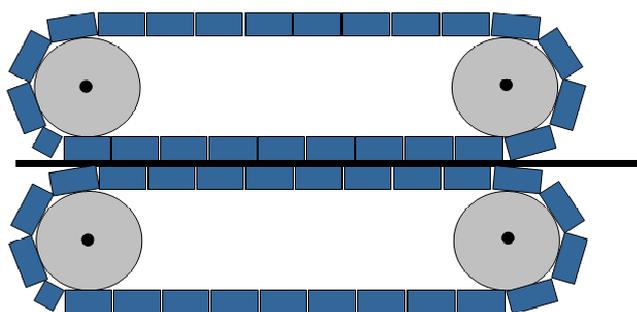


Abbildung 4-9: Prinzip Raupen

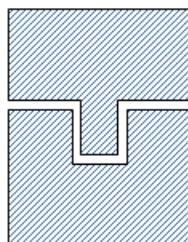


Abbildung 4-10: Raupenelementquerschnitt

Tabelle 4-21: Vor-/Nachteile des Raupen-Prinzips

Vorteile	Nachteile
Druck flächenförmig	Sehr aufwändig
Masshaltigkeit gewährleistet	Viele teure Formen
	Qualität an Fügstellen
	Umformung abrupt und wenig materialschonend
	Temperaturkontrolle kritisch

Kombinierbarkeit mit Biegung

Durch die Verwendung von gekrümmten Raupengliedern ist ein Biegemechanismus integrierbar. Der Biegeradius ist begrenzt durch die Abmessungen der Raupenglieder. Kleine Raupenglieder ermöglichen kleinere Biegeradien, grössere Raupenglieder sind in der Fertigung/Montage weniger aufwändig und erzeugen weniger Fügstellen.

4.5.10 Mitlaufende Formen

Dieser Ansatz ist der Intervallpresstechnik sehr ähnlich. Anstatt jeweils das Profil zu stoppen, fahren die Formen im geschlossenen Zustand mit dem Profil mit. Nach einer gewissen Strecke öffnen sich und fahren geöffnet wieder an ihre Startorte zurück. Der Zyklus beginnt von neuem. Damit die Umformung nicht in einem Schritt stattfindet werden mehrere Pressformen verwendet (z.B. drei Stück).

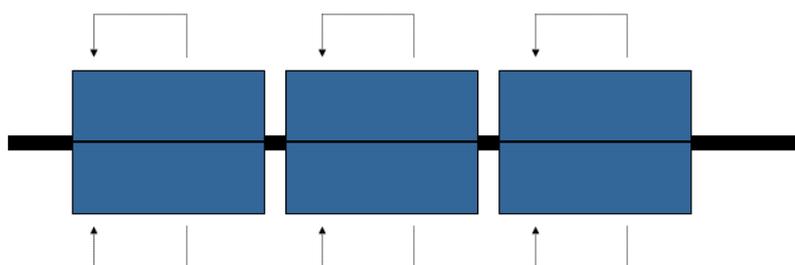


Abbildung 4-11: Prinzip mitlaufende Formen

Tabelle 4-22: Vor-/Nachteile bei der Verwendung von mitlaufenden Formen

Vorteile	Nachteile
Druck flächenförmig	Sehr aufwändig
Masshaltigkeit gewährleistet	Nicht anpassbar
Oberflächenqualität	Langsam
	Kompliziert

Kombinierbarkeit mit Biegung

Die Möglichkeit der Kombination mit einem Biegemechanismus ist prinzipiell gegeben. Die Fertigung der Formen sowie der Bewegungsmechanismus werden durch die Biegung deutlich komplexer. Die Abmessungen der Formen verhindern beliebig kleine Biegeradien.

4.5.11 Pultrusion

Dieser Ansatz ist ähnlich der bestehenden Pultrusionstechnologie. Das Band wird zuerst durch eine beheizte Matrize gezogen. In dieser findet eine kontinuierliche Umformung vom Band zum Profil statt. Am Ende der beheizten Form ist diese Umformung abgeschlossen. Um die Formstabilität zu gewährleisten folgt nach der beheizten Matrize eine gekühlte, in welcher das Profil unter die Kristallisationstemperatur abgekühlt wird.

Es ist möglich, wie von Bechtold in [9] gezeigt, die beiden Matrizen zu einer Form zu kombinieren. Diese Methode ist weniger ökologisch (Temperaturausgleich durch Wärmeleitung ist gross) und die Temperatur ist schwieriger zu kontrollieren. Als Vorteil bietet sie dafür einen kontinuierlichen Temperaturverlauf ohne Temperaturschocks welche störend wirken könnten.

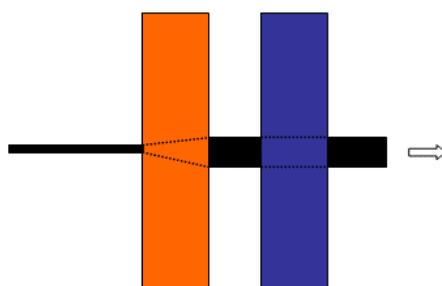


Abbildung 4-12: Heisse Profilform: Das Halbzeug tritt bandförmig in die beheizte Form (orange) ein und wird in dieser zum Profil geformt. Die Kühlform (blau) entzieht dem Profil Wärme damit es fest wird, hier findet keine weitere Umformung statt.

Tabelle 4-23: Vor-/Nachteile der Pultrusionsmethode

Vorteile	Nachteile
Immer gestützt	Gefahr des Matrixabstreifens
	Nicht anpassbar
	Gleiten innerhalb der Form

Kombinierbarkeit mit Biegung

Durch die Auslegung der Form als gekrümmte Kavität können die Biegung und die Profilformung sehr gut vereint werden. Natürlich entstehen auch hier komplexe 3D-Geometrien welche ohne den Einsatz von CAD/CAM nicht herstellbar sind.

4.6 Antrieb

4.6.1 Rollenmechanismus

Der Rollenantrieb stellt, zumindest prinzipiell, eine simple Lösung dar.

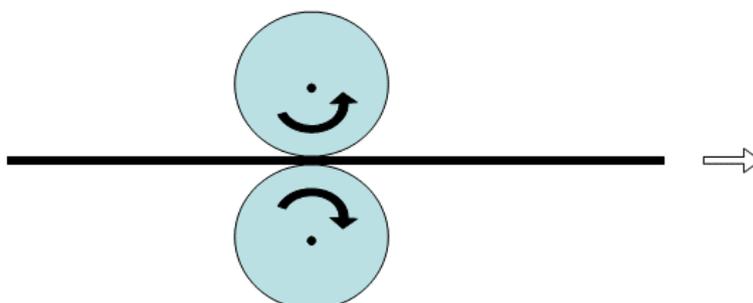


Abbildung 4-13: Prinzipskizze Rollenantrieb: Die gegensinnig drehenden Rollen schieben das Band vorwärts, der Anpressdruck der Rollen verhindert ein Durchrutschen.

Mögliche Varianten:

- Einseitig/beidseitig angetriebenen Rollen
- Rolle(n) federgelagert (Anpressdruck garantiert)

- Kombination von Antrieb und Umformmechanismus (z.B. Rollumformen)
- Rollen beheizt / gekühlt
- Geschwindigkeitsgesteuert / Leistungsgesteuert

Tabelle 4-24: Vor-/Nachteile des Rollenanstriebs

Vorteile	Nachteile
simpel	Schubspannungen im Profil
Einfaches Anpassen an Profilwandstärke	Schädigung der Oberfläche

Kombinierbarkeit mit Biegung

Die Kombination des Rollenanstriebs mit einem Biegemechanismus ist möglich. Durch den punktuellen Kontakt zwischen Rollen und Profil können auch gebogene Profile angetrieben werden. Der Radius der Antriebsrollen beschränkt den minimalen Biegeradius.

4.6.2 Bandmechanismus

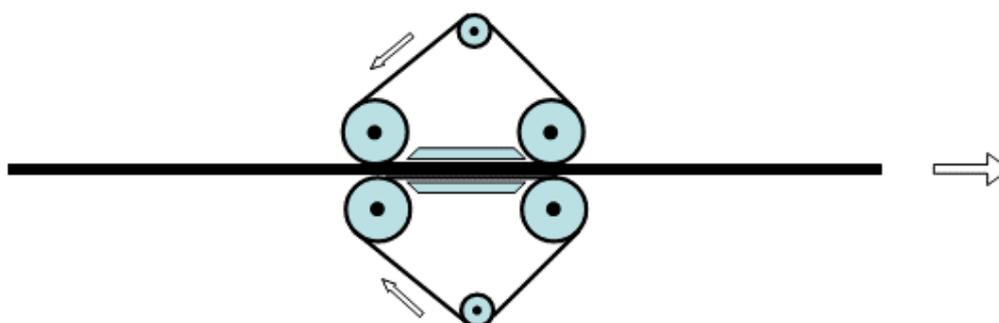


Abbildung 4-14: Prinzipskizze Bandantrieb

Mögliche Varianten:

- Beide Bänder angetrieben / nur ein Band angetrieben
- federgelagert (Anpressdruck garantiert)
- Kühlung integriert

Tabelle 4-25: Vor-/Nachteile des Bandantriebs

Vorteile	Nachteile
Grössere Kontaktfläche	Aufwändiger
	Benötigter Bauraum

Kombinierbarkeit mit Biegung

Die Kombination des Bandmechanismus mit einer Biegeumformung ist denkbar aber nur mit deutlichem Mehraufwand realisierbar. Die Kombinierbarkeit ist zudem abhängig von der gewünschten Kontaktlänge, kurze Kontaktlängen sind einfacher realisierbar als längere.

4.6.3 Greifer

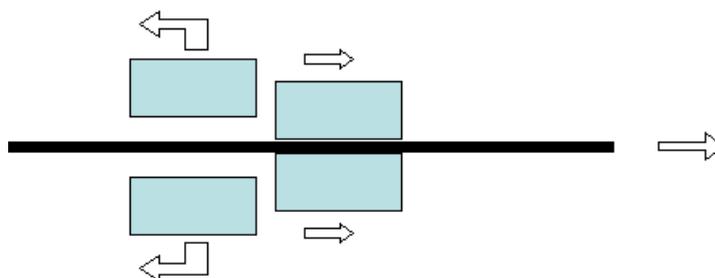


Abbildung 4-15: Greifmechanismus: Immer ein Greifer ist im Eingriff während der andere zurück fährt um neu zu fassen

Mögliche Varianten:

- mehr als zwei Greifer

Tabelle 4-26: Vor-/Nachteile des Greifer-Konzept

Vorteile	Nachteile
grosse Kräfte übertragbar	Aufwändige Mechanik und Steuerung
	Greifer müssen ans Profil angepasst werden

Kombinierbarkeit mit Biegung

Die Möglichkeit den Greifmechanismus an gebogenen Profilen einzusetzen ist grundsätzlich vorhanden. Die Mechanik wird aber sehr komplex da die Greifer auch gekrümmte Bahnen zurücklegen müssten.

4.6.4 Schwerkraft

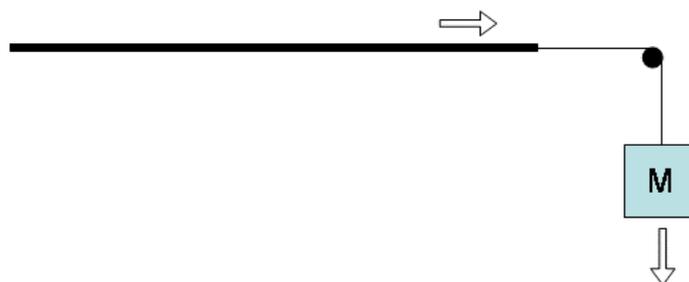


Abbildung 4-16: Prinzipskizze Schwerkraftantrieb

Tabelle 4-27: Vor-/Nachteile des Schwerkraftmechanismus

Vorteile	Nachteile
Sehr simpel	Kraftgesteuert
Zugkraft einfach und relativ genau einstellbar	nicht kontinuierlich

Kombinierbarkeit mit Biegung

Die Kombination mit einem Biegemechanismus nur sehr bedingt möglich da diese Methode das Profil geradlinig nach unten zieht. Die Biegung verlangt jedoch nach einem schraubenförmigen Auslauf des Profils.

4.7 Temperaturüberwachung

Die Kontrolle der Prozesstemperaturen ist ein wichtiger Erfolgsfaktor, da die Endqualität sehr stark von den Bedingungen des Herstellungsprozesses abhängt. Für die Durchführung von reproduzierbaren Testläufen ist eine gezielte Temperaturüberwachung unerlässlich.

Messungen an der geschmolzenen Matrix müssen kontaktlos erfolgen um Matrixhaften zu vermeiden.

4.7.1 Pyrometer (Infrarot-Thermometer)

Das Pyrometer ist das Standard-Messinstrument für berührungslose Temperaturmessungen. Es misst die vom Objekt abgestrahlte IR-Energie und kann so auf dessen Temperatur schliessen.

Tabelle 4-28: Vor-/Nachteile Pyrometer

Vorteile	Nachteile
Kurze Ansprechzeit	Beeinflussung durch Umgebungsstrahlung (hier nicht relevant)

Kontaktlos	
Mobil	

4.7.2 Thermoelement

Die Temperaturmessung mittels Thermoelement ist weit verbreitet. Für die meisten Anwendungsformen gibt es speziell abgestimmte Elemente.

Ein Thermoelement besteht im Prinzip aus einem kleinen Messkörper mit temperatursensitivem Widerstandsverhalten. Die Temperatur wird indirekt über eine Widerstandsmessung bestimmt. Es ist zu berücksichtigen dass nicht die Temperatur des Objekts, sondern die Temperatur des Thermoelements gemessen wird. Der Abgleich dieser Temperaturunterschiede führt zu einer zeitlichen Verzögerung (Tiefpasscharakter), welche berücksichtigt werden muss. Dieser Temperaturabgleich bedingt auch den direkten Kontakt mit dem Messobjekt.

Tabelle 4-29: Vor-/Nachteile Thermoelement

Vorteile	Nachteile
Geringe Kosten	Zeitverzögerung
	Direkter Kontakt nötig

4.8 Vorschubkontrolle

Die Vorschubgeschwindigkeit ist neben der Temperatur der wichtigste Prozessparameter.

4.8.1 Sensorrad

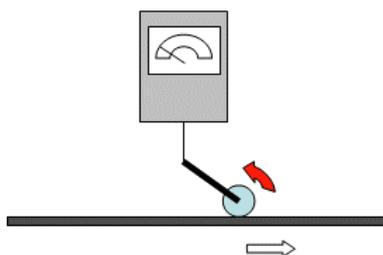


Abbildung 4-17: Prinzipskizze Sensorrad: Das Rad wird vom Profil angetrieben und gibt die Vorschubgeschwindigkeit über Sensor als elektrisches Signal aus.

Tabelle 4-30: Vor-/Nachteile Thermoelement

Vorteile	Nachteile
Sehr genau	Steuerungselektronik nötig
Echte Regelung möglich	

4.8.2 Motorfrequenz

Über den so genannten „Digital Operator“ kann am Frequenzumrichter numerisch eine Drehfrequenz eingegeben werden. Über das Übersetzungsverhältnis des

Getriebes und den Durchmesser der Antriebsrollen kann so die Vorschubgeschwindigkeit vorgegeben werden. Da Drehstrommotoren unter Last einen gewissen Schlupf aufweisen, ist diese Methode nur für den kontinuierlichen Betrieb geeignet.

Diese Methode stellt keine Kontrolle oder Regelung, sondern nur eine Steuerung dar. Das bedeutet die Sollwerte werden vorgegeben, es erfolgt aber keine Rückmeldung ob diese korrekt umgesetzt werden und somit auch keine Korrektur (Regelung).

Tabelle 4-31: Vor-/Nachteile Thermoelement

Vorteile	Nachteile
Keine zusätzlichen Kosten	Keine Regelung
	Nur für kontinuierlichen Betrieb geeignet

4.9 Anlagengerüst

Die gesamte Anlage soll möglichst flexibel und modular aufgebaut sein um schnell Änderungen anzubringen und die gemeinsame Nutzung von Elementen (z.B. Antrieb, Temperaturmessung, Heizstrahler) zu ermöglichen. Die Installation von neuen Komponenten oder die Neuordnung von bestehenden Baugruppen sollte möglichst einfach sein.

Diese Anforderungen werden von Profilsystemen hervorragend erfüllt.

5 Bewertung

Bei der Auswahl geeigneter Lösungen können Gesamtlösungen oder einzelne Teillösungen bewertet werden. Für die zweite Variante, welche für diese Arbeit verwendet wurde, ist sicherzustellen, dass die Ansätze für die verschiedenen Module kombinierbar sind. Denn die Kombination aus den besten Einzellösungen bietet nicht zwingend die optimale Gesamtlösung.

In der vorliegenden Arbeit wurde dieses Problem umgangen indem den Modulen Prioritäten gemäss ihrer Komplexität erteilt wurden. So wurden die Probleme nicht synchron gelöst. Als erstes wurde der Umformmechanismus, das komplexeste Modul, angegangen. Die einfacheren Module lassen sich später ohne Probleme an die Komplexeren anpassen.

Die Durchführung der Bewertung wird exemplarisch am Umformmechanismus gezeigt.

5.1 Kriterien

Bevor mit der eigentlichen Bewertung begonnen wird, müssen die Kriterien festgelegt werden. Bei der Aufstellung der Kriterien kann es hilfreich sein, diese mit anderen Personen zu diskutieren. Oft werden einfache Kriterien als „gegeben“ angesehen und nicht in die Bewertung einbezogen was das Resultat verzerren kann. Die folgenden Kriterien wurden für den Umformmechanismus gewählt:

<i>Realisierbarkeit:</i>	Abschätzung ob und mit welchem Aufwand ein Ansatz realisiert werden kann.
<i>Herstellkosten:</i>	Bewertet die Kosten einer einmaligen Herstellung des Werkzeugs.
<i>Masse variabel:</i>	Beinhaltet die Möglichkeit die Abmessungen des Profils zu ändern sowie den dafür benötigte Aufwand.
<i>Wandstärke variabel:</i>	Bewertet ob und in welchem Mass die Profilwandstärke mit demselben Werkzeug geändert werden kann.
<i>Zusatzmaterial:</i>	Bewertet die Kosten und denn Aufwand welche durch die Verwendung von Hilfsmaterial (z.B. Trennfolie) entstehen.
<i>Druckabsetzung:</i>	Bewertet die Art (flächig, linienförmig etc.) und Dauer der Druckabsetzung.
<i>Masshaltigkeit:</i>	Abschätzung der erreichbaren Masshaltigkeit und des dafür benötigten Aufwands.

- Verschmutzungsanfälligkeit:* Dieses Kriterium bewertet wie sensibel der Mechanismus auf Verschmutzung (z.B. Faserstücke, haftende Matrix, etc.) reagiert aber auch die Möglichkeit der Reinigung.
- Temperatursteuerbarkeit/-kontrollierbarkeit:* Bewertet ob, mit welchem Aufwand und wie genau die Prozesstemperatur gesteuert werden kann.
- Oberflächenqualität:* Abschätzung der erreichbaren Oberflächenqualität.
- Reproduzierbarkeit:* Bewertet ob gleich bleibende Resultate zu erwarten sind.

5.2 Gewichtungen und Skala

Nicht alle Merkmale einer Lösung sind für die optimale Zielerfüllung gleich ausschlaggebend. Mit dem Einführen von Gewichtungen ist es möglich, wichtigen Kriterien mehr Einfluss zukommen zu lassen. Andere Kriterien, die eher als „Nice-to-have“ eingestuft werden können, werden schwächer gewichtet und beeinflussen das Resultat weniger. Bei der Bewertung der Umformmechanismen wurden die Gewichtungen gemäss Tabelle 5-1 verwendet.

Tabelle 5-1: Bewertung des Umformprozesses: Kriterien und Gewichtungen

Kriterium	Gewichtung
Realisierbarkeit	5
Kosten Herstellung	2
Wandstärken variabel	2
Abmessungen variabel	2
Kombinierbarkeit mit Biegung	5
Zusatzmaterial	1
Druckabsetzung	3
Masshaltigkeit	3
Verschmutzungsanfälligkeit	2
Temperatursteuerbarkeit/-kontrollierbarkeit	3
Oberflächenqualität	2
Reproduzierbarkeit	3

Die Realisierbarkeit und Kombinierbarkeit mit einem Biegemechanismus gelten als Hauptanforderungen und wurden entsprechend stark gewichtet.

Als Bewertungsskala wurde auf die Notenskala der Schule zurückgegriffen (6=sehr gut, 4= genügend)

5.3 Auswahl

Die gesamte Bewertungstabelle des Umformmechanismus ist im Anhang E enthalten.

Tabelle 5-2: Rangfolge gemäss der Lösungsbewertung für den Umformmechanismus

Rang	Lösung	Punktzahl
1	Profilierte Rollen	4.76
2	Pultrusion	4.62
3	Multiwalzen und Rollen	4.52

Der Ansatz „Profilierte Rollen“ erreichte mit der Note 4.76 den 1. Rang. Dieses Resultat wurde durch die guten Noten für die „Realisierbarkeit“ und die „Kombinierbarkeit mit Biegung“ sowie die „Temperatursteuerbarkeit/-kontrollierbarkeit“ erreicht. Weniger gute Noten wurden in den Kategorien „Druckabsetzung“, „Verschmutzungsanfälligkeit“ und „Abmessungen variabel“ erteilt.

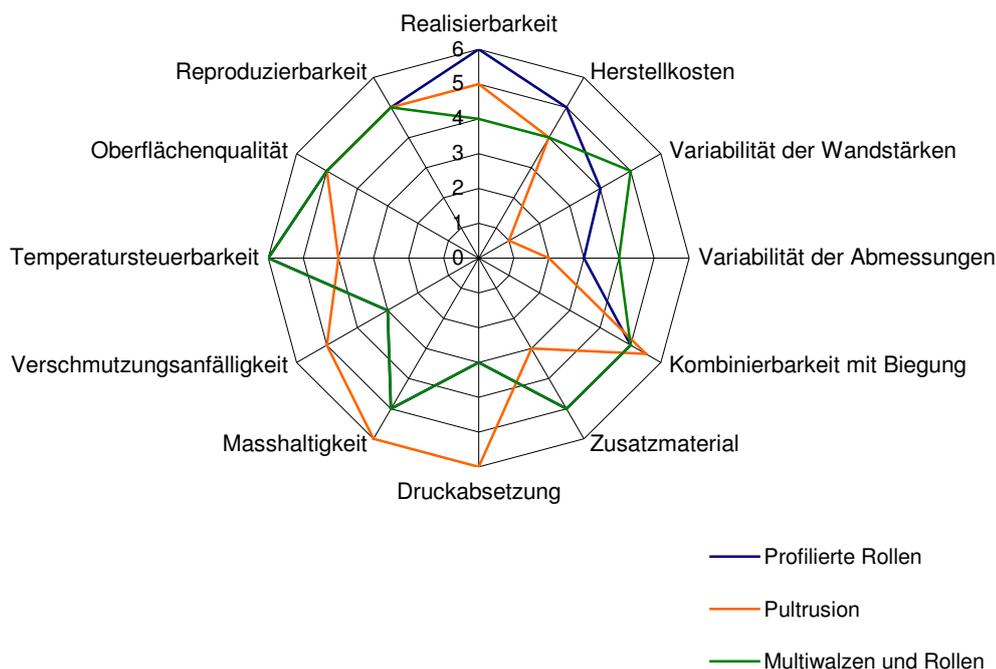


Abbildung 5-1: Vergleich der drei besten Lösungen

Den 2. Rang der Bewertung erreichte der Pultrusionsansatz mit der Note 4.62. Ausschlaggebend waren die guten Noten für „Masshaltigkeit“ und „Druckabsetzung“ sowie für die „Kombinierbarkeit mit Biegung“. Schwächen zeigt dieser Ansatz bei der Variabilität der Abmessungen sowie durch die Notwendigkeit von Zusatzmaterial.

Diese Ansätze scheinen beide viel versprechend zu sein, somit wurde entschieden in erster Priorität den Rollenansatz zu realisieren. Während dieser in der Fertigungsphase ist, soll in Zusammenarbeit mit M. Scapozza als 2. Variante der Pultrusionsansatz mit integrierter Biegung verwirklicht werden.

5.4 Patentrecherche

Um nicht an bereits geschützten Technologien zu forschen wurde für den Rollenansatz eine Patentrecherche durchgeführt. Dafür wurde das Internetportal des Eidgenössischen Instituts für geistiges Eigentum [32] und des Europäischen Patentamts [33] genutzt. Mit verschiedenen Kombinationen der Suchbegriffe „rollforming“, „roll“, „forming“, „composite“, „thermoplastic“, „profile“, „reinforced“ und „fibre“ wurde versucht, Patente mit Technologien ähnlich der hier angestrebten, zu finden.

Es wurde kein Patent gefunden, welches die vorgesehene Technologie direkt schützt. Es existiert jedoch ein Patent, das eine spezielle Technik im Zusammenhang mit dem Rollforming von Thermoplasten schützt.

5.4.1 Roll forming of thermoplastics

Veröffentlichungsnummer: WO 96/24479
Veröffentlichungsdatum: 15.08.1996
Erfinder: Bhattacharyya Debes (NZ);
Manders Simon John (NZ)

Anmelder: Auckland Uniservices Ltd (NZ);
Bhattacharyya Debes (NZ);
Manders Simon John (NZ)

Der patentierte Prozess besteht aus einer Heizung (H in Abbildung 5-2) welche das FV-Thermoplastbandhalbzeug (10) über die Schmelztemperatur der Matrix erhitzt. Die Bänder werden in einen Rollenmechanismus (2) eingeführt der sie in das gewünschte Profil umformt. **Zwischen der Heizung (H) und dem ersten Rollenpaar kühlt das Band ab auf eine Temperatur unterhalb der Schmelztemperatur, aber über der Rekristallisationstemperatur.** Der Rollenmechanismus besteht aus mindestens einem Rollenpaar. Die Rollen können zusätzlich beheizt sein.

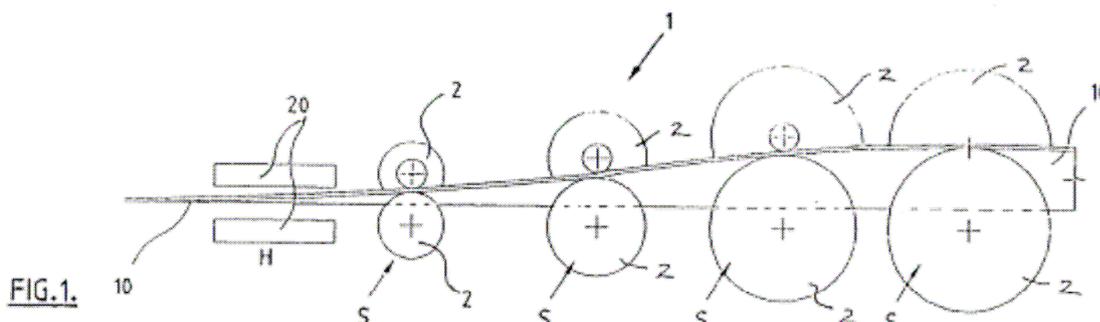


Abbildung 5-2: Zeichnung der Heizung und des Rollenmechanismus.

Der beschriebene Prozess entspricht der realisierten Prototypanlage bis auf einen Punkt: Das Band tritt in der Prototypanlage mit einer Temperatur deutlich oberhalb der Schmelztemperatur in den Rollenmechanismus ein. Das Patent beschränkt sich auf eine Eintrittstemperatur zwischen Schmelz- und Rekristallisationstemperatur. Eine aktive Kühlung mit Dummyrollen wird nicht erwähnt. Durch diesen Unterschied betrifft das Patent den realisierten Prozess nicht.

Die Motivation dieser Patentierung liegt in der Schwierigkeit den geschmolzenen Thermoplast ($T > T_m$) in die Rollen einzuführen. Weiter können mit dem beschriebenen Prozess angeblich bessere Formtreue und Oberflächenqualitäten erzielt werden.

5.4.2 Continuous production of fiber-reinforced plastic profile

Veröffentlichungsnummer: NL1008421C
Veröffentlichungsdatum: 22.09.1998
Erfinder und Anmelder: Osse Timotheus Arnoldus (NL)

Diese Technologie ist dem Ansatz „Mitlaufende Formen“ sehr ähnlich. Der Unterschied besteht im verwendeten Ausgangsmaterial. Die beschriebene Methode verwendet kein vorkonsolidiertes Halbzeug, sondern führt Fasern (10) und Thermoplastmatrix (6) separat dem Prozess zu. An der Position (12) und (13) werden die Ausgangsstoffe erwärmt und den vorgeheizten (20) Formen (18) zugeführt.

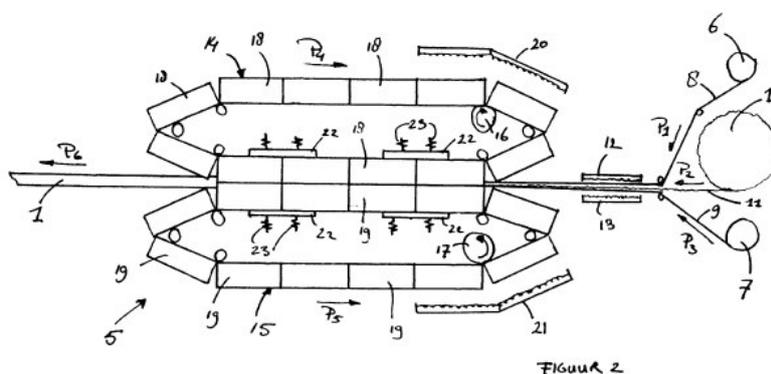


Abbildung 5-3: Abbildung des Umformmechanismus

Die Nummern in Klammern beziehen sich jeweils auf die Nummern in Abbildung 5-3.

6 Realisierung

Nachdem für alle Module die entsprechenden Lösungsansätze bekannt sind, kann die detaillierte Ausarbeitung und Konstruktion beginnen. Ein grosser Teil der Zeit während dieser Projektphase benötigte die Suche nach geeigneten Anbietern, das Einholen von Offerten und die Ausarbeitung verschiedener Versionen. Im Anhang A sind die Kontaktadressen aller Lieferanten und angefragten Firmen aufgelistet.

6.1 Grundlegender Anlagenaufbau

Die ganze Prototypanlage musste von Beginn weg so modular wie möglich aufgebaut werden. Dies ermöglicht schnelle Anpassungen bei unvorhersehbaren Schwierigkeiten oder veränderten Anforderungen. Es ist sinnvoll wenn Anlagenteile auch für weitere Projekte genutzt werden können. Die Elemente Anlagengerüst, Antrieb und Heizung wurden zusammen mit M. Scapozza ausgelegt und beschafft. Die gemeinsame Nutzung dieser Module verhindert gleichzeitige Testläufe, ermöglicht dafür eine effizientere Budgetnutzung.

6.2 Anlagengerüst

Die Prototypanlage wird auf einem Grundgerüst bestehend aus Kanya-Profilen aufgebaut. Diese Profile aus Aluminium sind, v.a. im Prototypenbau, sehr beliebt und bieten grosse Flexibilität in der Anordnung der Module.

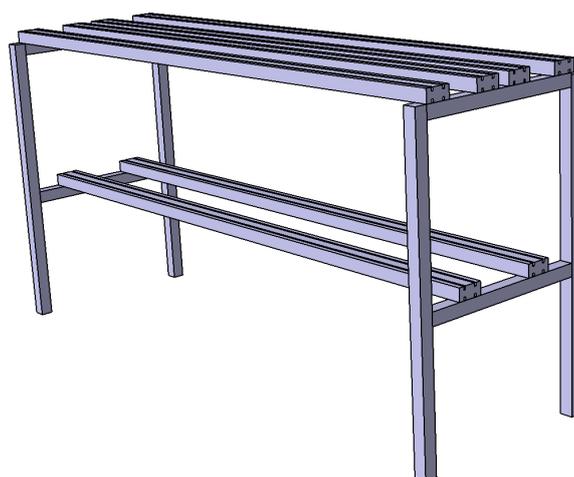


Abbildung 6-1: CAD-Bild des Anlagengerüsts

Die Querträger sind aus 40x80mm Profilen, die vertikalen Profile haben 40x40mm-Querschnitte. Das Gerüst ist zugunsten der Mobilität mit Rollen ausgestattet (in Abbildung 6-1 nicht abgebildet).

6.3 Antrieb

Das Antriebsprinzip basiert auf zwei gegenläufigen Rollen die mit Gummi beschichtet sind (Abbildung 6-2). Ein 90 Watt Drehstrommotor treibt über ein Schneckengetriebe (Übersetzung $i=30$) die obere Antriebsrolle an. Die Wellen lassen den nachträglichen Umbau auf den Antrieb beider Rollen zu. Gesteuert wird der Motor über einen Frequenzumrichter (Typ KEB Combivert F5 Basic). Die gewünschte Vorschubgeschwindigkeit lässt über den Digital Operator einstellen.

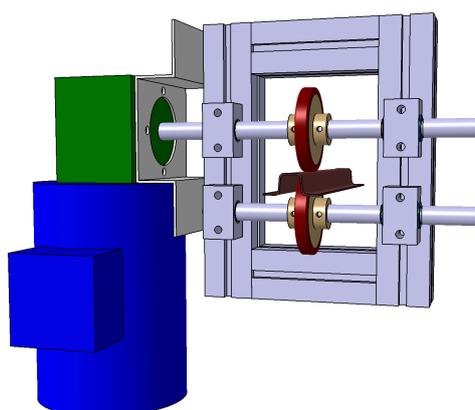


Abbildung 6-2: CAD-Bild des Antriebsmoduls (blau: Motor, grün: Getriebe)

Die beiden Wellen sind in teflonbeschichteten Gleitbuchsen gelagert. Dies garantiert reibungsarmen und spielfreien Betrieb. Die Anpresskraft, welche zur Reibungserzeugung notwendig ist, wird über die Elastizität der Gummibeschichtung erreicht. Der Wellenabstand bestimmt somit die max. übertragbare Kraft.

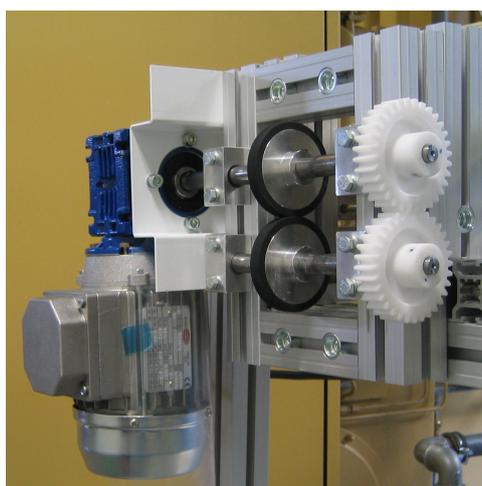


Abbildung 6-3: Antriebsmodul mit nachgerüsteten Stirnrädern zum Antrieb der oberen und unteren Welle

Erste Versuche zeigten, dass die Antriebsrollen unter Belastung bei nassem Band teilweise zu rutschen beginnen. Der gleichmässige Vorschub ist nicht mehr garantiert. Es wurde beschlossen auf die Möglichkeit des Antriebs beider Rollen zurückzugreifen. Mit zwei seitlich montierten Kunststoffzahnradern konnte diese Nachrüstung einfach realisiert werden.

6.4 Heizung

Die Heizung wurde zusammen mit M. Scapozza beschafft. Es handelt sich um vier Kurzwellen-Infrarotstrahler mit 40.5 cm Gesamtlänge und einer Leistung von je max. 1200 Watt. Sie werden über zwei Steuergeräte kontrolliert. Die Leistung kann pro Strahlerpaar von 0 bis 100% stufenlos eingestellt werden.

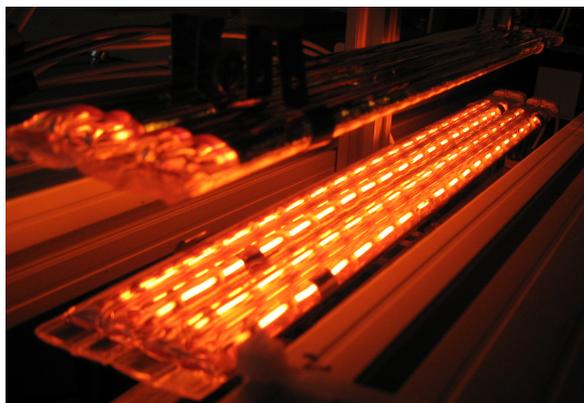


Abbildung 6-4: Infrarot-Heizstrahler in Betrieb

Tabelle 6-1: Eckdaten der Infrarot-Strahler

Gesamtlänge/Beheizte Länge [mm]	450/340
Leistungsdichte [W/cm]	60
Wellenlänge [μ m]	Max. 1.2-1.4
Temperatur [°C]	1800-2200
Eingangsspannung Regler [V]	230

Die Aufhängung der Strahler an Kanya-Profilen ermöglicht die einzelne Anpassung der Position und Neigung. Um den Kontakt des Plytronbands mit den heissen Strahler zu vermeiden wurde eine Bandstraffungs- und Führungsmechanismus vorgeschaltet. Dieser bremst das Band über die Reibung. Da der ganze Antrieb auf Zug ausgelegt ist wird das Band somit immer gestrafft.

6.4.1 Abschätzung der benötigten Heizleistung

Für die Dimensionierung der Heizstrahler wurde die benötigte Heizleistung abgeschätzt. Das verwendete Modell ist sehr simpel und berücksichtigt weder nichtideale Absorption noch konvektive Kühlung durch die Umgebungsluft. Das Ergebnis wird als geringer ausfallen als in der Praxis, die Berechnung ist zu optimistisch.

Tabelle 6-2: Daten des Heizprozesses

Anfangstemperatur Band [°C]	T_{B1}	20
Endtemperatur Band [°C]	T_{B2}	200
Wärmekapazität Polypropylen [kJ/kgK]	c_{pp}	1.8
Wärmekapazität Glasfaser [kJ/kgK]	c_{GF}	0.8
Schmelzenthalpie Polypropylen [kJ/Kg]	H_{pp}	209
Bandbreite [m]	b	0.05
Banddicke [m]	d	$5 \cdot 10^{-4}$
Dichte Plytronband [kg/m ³]	ρ_p	1481
Fasermassengehalt [-]	wt	0.6
Vorschubgeschwindigkeit [m/min]	v	2

Mit Gl. 9 kann die Wärmekapazität des Plytronbands abgeschätzt werden:

$$\text{Gl. 9} \quad c_p = wt \cdot c_{GF} + (1 - wt) \cdot c_{pp}$$

Die Benötigte Wärmemenge zum Erhitzen des Bandes und Schmelzen der Matrix lässt sich mit Gl. 10 berechnen.

$$\text{Gl. 10} \quad Q = m_B \cdot (c_p \cdot \Delta T + (1 - wt) \cdot H_{pp})$$

$$\text{Gl. 11} \quad m_B = \rho_p \cdot b \cdot l \cdot d$$

Die zur Wärmeübertragung zur Verfügung stehende Zeit ergibt sich aus Gl. 12, sie hängt von der Strahlerlänge und der Geschwindigkeit ab.

$$\text{Gl. 12} \quad t = \frac{l}{v}$$

Für stationäre Prozesse kann die Heizleistung durch dividieren der Wärmemenge mit der Aufheizzeit berechnet werden (Gl.13).

$$\text{Gl. 13} \quad \dot{Q} = \frac{Q}{t} = v \cdot \rho_p \cdot b \cdot d (c_p \cdot \Delta T + (1 - wt) \cdot H_{pp})$$

Die Heizleistung wird nun zur besseren Vergleichbarkeit auf die Länge bezogen (Gl. 14)

$$\text{Gl. 14} \quad \frac{\dot{Q}}{l} = \frac{v \cdot \rho_p \cdot b \cdot d (c_p \cdot \Delta T + (1 - wt) \cdot H_{pp})}{l}$$

Die Heizstrahlerlänge beträgt $l=0.34$ m, für beidseitige Heizung wird die Länge verdoppelt. Dies ergibt eine minimal benötigte Heizleistung pro Längeneinheit von

$$\boxed{\frac{\dot{Q}}{l} = 0.54 \frac{KW}{m} = 5.4 \frac{W}{cm}}$$

Somit sind die Strahler von WISAG AG mit einer maximalen Heizleistung von 60 W/cm völlig ausreichend.

6.5 Umformmechanismus

Der Umformmechanismus bildet das Herzstück der Anlage. Es werden insgesamt 8 Rollenpaare eingesetzt.

6.5.1 Rollengeometrie

Die Rollen haben die Aufgabe das Halbzeugband umzuformen und den nötigen Konsolidierungsdruck abzusetzen. Die Umformung läuft über 5 Stufen ab. Der Verformungsgrad ist zuerst sehr gering (Rollenpaar 1 und 2), dies soll das Zerschneiden des Bands durch die Rollen verhindern. Ab Rollenpaar 3 wird der Verformungsgrad kleiner. Die 2 letzten Rollenpaare sind „Dummyrollen“, sie haben die gleiche Geometrie wie das 3.letzte Rollenpaar und tragen damit nicht mehr zur Verformung bei. Zur Stabilisierung des Profils werden die „Dummyrollen“ von Wassernebel gekühlt.

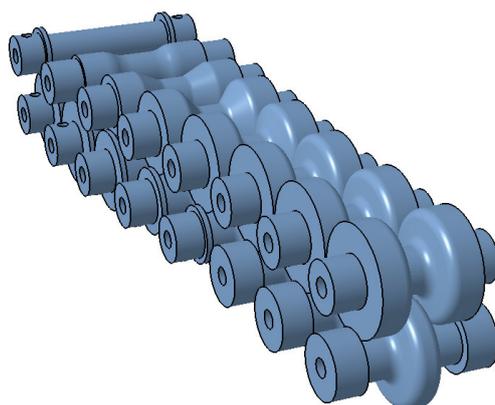


Abbildung 6-5: Umformrollen: gut zu sehen ist der Übergang von der flachen zur profilierten Geometrie. Die Kanten sind gerundet um das UD-Band nicht zu zerstören.

Der Endquerschnitt ist in Abbildung 6-6 dargestellt. Die Flanken sind nicht 90° , da dies zu unerwünschten Reibungseffekten beim Abrollen führen würde und die Druckabsetzung nicht garantiert werden könnte. Die Profilecken wurden alle rund gestaltet um das in Querrichtung sensible UD-Band nicht zu zerstören.

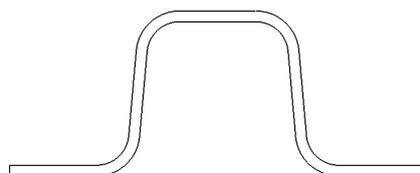


Abbildung 6-6: Profilquerschnitt, Eckradius 3 mm, Flankenwinkel 85°

Die Rollen dichten zur Seite hin den Querschnitt über Flanken ab.

6.5.2 Zielkonflikt: Rollenabstand vs. Geschwindigkeitsdifferenz

Die Anforderungen welche an das Werkzeug gestellt werden erzeugen einen typischen Zielkonflikt. Der Rollenabstand sollte so kurz wie möglich gewählt werden um dies verkleinert die drucklosen, ungeführten Strecken zwischen zwei Rollenpaaren und lässt eine kürzere Umformdistanz zu. Andererseits sollten die Rollen möglichst gross sein da sich grosse Radien positiv auf die Geschwindigkeitsdifferenz auswirken. Diese entsteht durch die unterschiedlichen Radien der Rollenoberfläche. Diese Differenzen können Schereffekte auslösen und zu schlechter Oberflächenqualität führen.

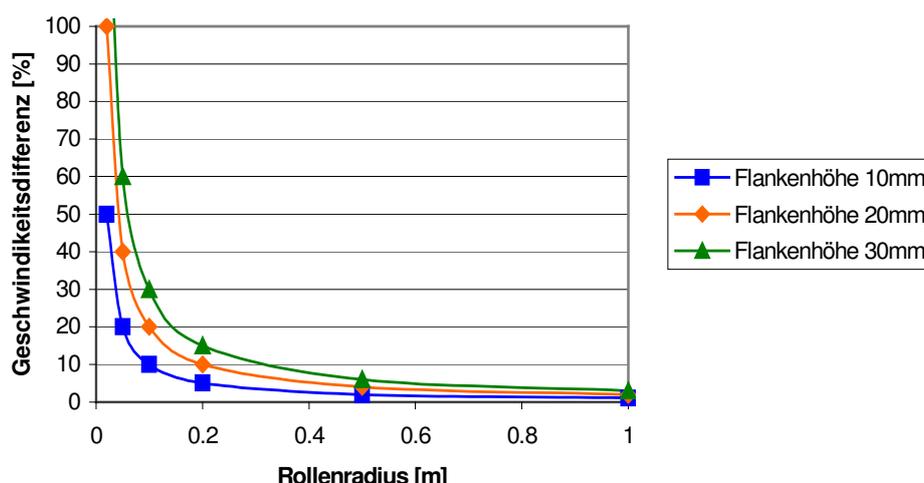


Abbildung 6-7: Das Diagramm stellt die Geschwindigkeitsdifferenz in Prozent der Vorschubgeschwindigkeit dem Rollenradius gegenüber.

Abbildung 6-7 zeigt den Zusammenhang zwischen Umformrollenradius und der Geschwindigkeitsdifferenz für verschiedene Profilflankenhöhen. Der Einfluss der Flankenhöhe ist eher gering. Anders sieht es beim Rollenradius aus. Bei einem Rollenradius von $r=2,0\text{cm}$ ergibt sich bei Flankenhöhe $10,0\text{mm}$ eine Geschwindigkeitsdifferenz von 50%.

Der Anforderung kleiner Rollenabstände wurde grössere Bedeutung zugesprochen, die Rollen wurden möglichst klein realisiert.

6.5.3 Lagerung

Für die Lagerung der Umformrollen musste auf die speziellen Umgebungsbedingungen geachtet werden. Kugellager lassen sich nur in Spezialausführungen bei 200°C einsetzen. Deshalb werden teflonbeschichtete Gleitlagerbuchsen von INA (Vertrieb: Hydrel AG) verbaut. Die hohen Temperaturen verlangen zudem nach einer anderen Passung als bei Raumtemperatur. Die Wellen wurden dafür bei der P. Wyss spitzenlos geschliffen. Um der axialen Temperaturexpansion der Welle gerecht zu werden, wird pro Welle ein Fest- und ein Loslager verwendet (Abbildung 6-8). Die Welle wird mit Sicherungsringen im Festlager fixiert.

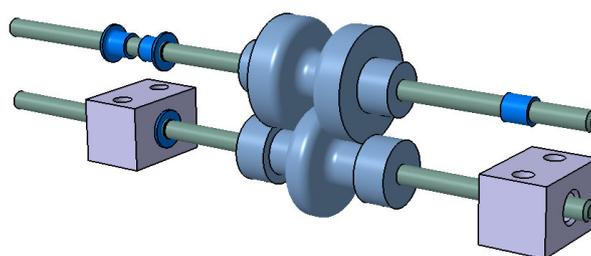


Abbildung 6-8: Lagerung der Umformrollen. Die Gleitbuchsen sind blau gefärbt, links wird ein Festlager, rechts ein Loslager verbaut. Die obere Welle ist ohne Lagerfüsse dargestellt.

Um einen weiteren Ausbau der Anlage zu ermöglichen, wurden die Wellen einseitig mit Überlänge konstruiert. So lässt sich ein Antrieb der Umformrollen nachrüsten.

6.5.4 Rollenheizung

Obwohl von Friedrich und Henninger in [10] anders beschrieben, wird davon ausgegangen, dass die Stahlrollen ohne Beheizung den Thermoplasten vor dem Ende der Umformung unter die Kristallisationstemperatur abkühlen würden. Um diese zu vermeiden werden die Rollenpaare 1 bis 6 (anpassbar) über ein Heissluftgebläse¹ auf rund 155°C erwärmt. Diese Temperaturen können nur unter Verwendung eines Isolationskastens erreicht werden. Dieser besteht aus 4mm-Sperrholz und wird innen zum Schutz des Holzes mit Alufolie ausgekleidet.

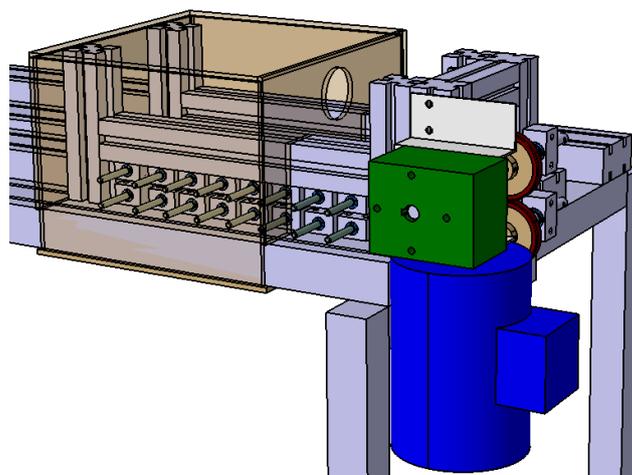


Abbildung 6-9: CAD-Bild des montierten Isolationskastens (halbtransparent). Dieser ermöglicht die effiziente Beheizung der Rollen mit dem Warmluftgebläse.

6.6 Kühlung

Das Kühlsystem wurde sehr simpel gehalten. Ein offenes Kühlsystem aufgebaut aus Verbinder, Schläuche und Düsen aus dem Gartenbedarf wird eingesetzt. Das Kühlwasser wird von einer Stahlblechwanne unterhalb des Umformmechanismus aufgefangen.

¹ Leister Electron, 3.4 kW

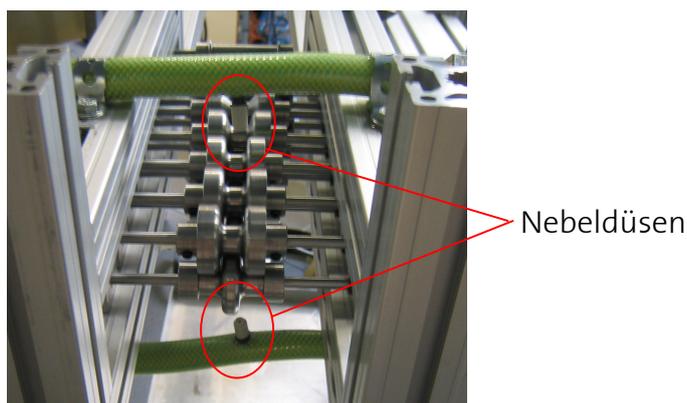


Abbildung 6-10: Kühlsystem bestehend aus Nebeldüsen aus dem Gartenbedarf

6.6.1 Berechnung der Kühlleistung

Die benötigte Wassermenge zum Kühlen des Profils wurde vor der Realisierung abgeschätzt. Dazu wurde der Kühlprozess stark vereinfacht, die folgende Annahmen wurden getroffen:

Das Profil verlässt den Umformmechanismus mit 180°C und wird anschliessend auf 100°C abgekühlt. Bei dieser Temperatur ist es garantiert formstabil. Das Wasser verdampfe während dem Kühlprozess vollständig. Die konvektive Kühlung durch die Umgebungsluft wird nicht in die Berechnung mit einbezogen.

Tabelle 6-3: Thermodynamische Daten des Kühlprozesses

Anfangstemperatur Profil [°C]	T_{p1}	180
Endtemperatur Profil [°C]	T_{p2}	100
Wärmekapazität Polypropylen [kJ/kgK]	c_{pp}	1.8
Wärmekapazität Glasfaser [kJ/kgK]	c_{GF}	0.8
Schmelzenthalpie Polypropylen [kJ/kg]	H_{pp}	209
Profilquerschnittsfläche [m ²]	A	$5 \cdot 10^{-5}$
Dichte Profil [kg/m ³]	ρ_P	1481
Fasermassengehalt [-]	wt	0.6
Vorschubgeschwindigkeit [m/min]	v	2
Anfangstemperatur Wasser [°C]	T_{w1}	18
Endtemperatur Wasser [°C]	T_{w1}	100
Wärmekapazität [kJ/kgK]	c_w	4.18
Dichte Wasser [kg/m ³]	ρ_w	1000
Verdampfungswärme Wasser [kJ/kg]	H_w	2257

Mit Gl. 15 kann die Wärmekapazität des Plytronbands abgeschätzt werden:

$$\text{Gl. 15} \quad c_p = wt \cdot c_{GF} + (1 - wt) \cdot c_{pp}$$

Aus der Energieerhaltung (Gl. 16) kann mit Verwendung von Gl. 17 der nötige Massenfluss Wasser (Gl. 18) berechnet werden:

$$\text{Gl. 16} \quad \dot{m}_w \cdot (c_w \cdot \Delta T_w + H_w) = \dot{m}_p \cdot (c_p \cdot \Delta T + (1 - wt) \cdot H_{pp})$$

$$\text{G. 17} \quad \dot{m}_p = v \cdot \rho_p \cdot A$$

$$\text{Gl. 18} \quad \dot{m}_w = v \cdot \rho_p \cdot A \cdot \frac{((wt \cdot c_{GF} + (1 - wt) \cdot c_{pp}) \cdot \Delta T_p + (1 - wt) \cdot H_{pp})}{(c_w \cdot \Delta T_w + H_w)}$$

$$\boxed{\dot{m}_w = 0.17 \text{ g/s}}$$

Die Berechnung ergibt einen Kühlwasserbedarf von $\dot{m}_w = 0.17 \text{ g/s}$, was mit dem geplanten Kühlsystem problemlos erreichbar ist.

6.7 Temperaturkontrolle

Die Temperaturmessung sollte nicht an einem Ort fixiert sein. Das Infrarot-Thermometer Fluke 62 ist batteriebetrieben und dadurch sehr handlich. Es ermöglicht schnelle Messungen an mehreren Punkten.



Abbildung 6-11: Foto des Pyrometers Fluke 62

Die Messung der Rolltemperatur ist durch die Verwendung des Isolationskastens mit dem Pyrometer nicht möglich. Es wird daher ein Thermoelement Typ-K² verwendet. Dieses wird zwischen den Lagerfüssen platziert um die Messungen nicht durch den warmen Luftstrom des Heissluftgebläses zu verfälschen.

² Messdatenerfassung: Agilent 34970A

7 Pultrusionstool

Obwohl die Variante „Pultrusion“ in der Bewertung auf dem 2. Platz zuliegen kam, überzeugte die Idee sehr. Deshalb wurde, während die Rollenvariante in Produktion war, mit M. Scapozza zusammen das Pultrusionstool entwickelt. Um sich ins Thema Pultrusion einzuarbeiten wurde eine weitere kleine Literaturstudie durchgeführt.

7.1 Prinzip

Das Prinzip des Pultrusionstool lehnt sich stark an die herkömmliche Pultrusionstechnik an. Es wird jedoch die Profilformung mit einer Biegung kombiniert. Heute eingesetzte Anlagen beschränken sich auf die Herstellung von geradlinigen Profilen mit konstanten Querschnitten.

Das Werkzeug besteht aus zwei Segmenten (Abbildung 7-1). Ein Segment ist geheizt. In diesem wird das Halbzeug umgeformt. Sowohl die Profilierung wie auch die Biegung erfolgen in diesem Werkzeugteil. Im zweiten Segment findet die Kühlung statt. Das Profil hat beim Eintritt in diesen Teil bereits die endgültige Form und wird hier unter Druck auf eine Temperatur abgekühlt bei der es formstabil ist. Die beiden Segmente sind voneinander getrennt um den Wärmeaustausch so gering wie möglich zu halten.

Um die Matrixhaftung im Werkzeug zu vermeiden und die Oberflächenqualität zu verbessern wird das Bandhalbzeug zwischen zwei dünne Aluminiumblechen geführt. Diese Bleche durchlaufen den gesamten Umformprozess und werden anschliessend recycelt.

7.2 Realisierung

Die Werkzeugsegmente bestehen aus je einer inneren und äusseren Form welche miteinander verschraubt sind.

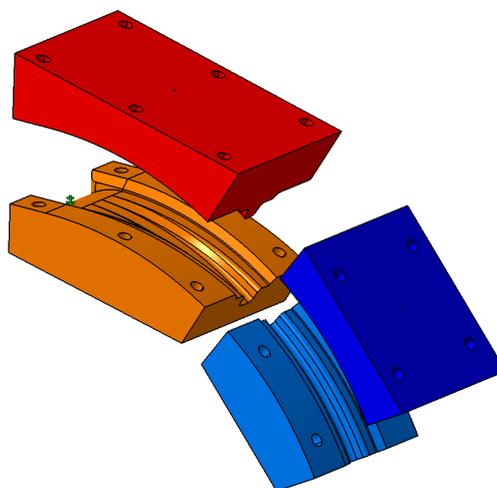


Abbildung 7-1: CAD-Bild des Pultrusionstools

7.2.1 Heizung

Heizpatronen werden in der Spritzgiesstechnik oft zum Beheizen der Spritzformen eingesetzt. Es bietet sich an auf diese bewährte Technologie zurückzugreifen. Heizpatronen werden von diversen Herstellern in verschiedenen Leistungsklassen und Abmessungen angeboten.



Abbildung 7-2: Hochleistungsheizpatronen (Quelle: www.probag.ch)

Heizleistungsabschätzung

Die benötigte Heizleistung kann abgeschätzt werden indem eine maximale Aufheizzeit festgelegt wird und die Heizleistung im stationären Betrieb berechnet wird. Eine dieser Anforderungen wird dominieren und so die minimal erforderliche Heizpatronenleistung bestimmen.

Es wird angenommen dass die Bänder, vorgewärmt durch die IR-Strahler, bereits mit Prozesstemperatur ins Werkzeug eintreten. Somit entfällt kein Heizleistungsanteil auf die Bändererwärmung. Es müssen im stationären Betrieb lediglich die Verluste durch Konvektion der Umgebungsluft, Abstrahlung und Wärmeleitung berücksichtigt werden.

Es wird eine maximale Aufheizzeit von 5 Minuten angenommen.

Tabelle 7-1: Daten zur Heizleistungsabschätzung

Anfangstemperatur Werkzeug [°C]	T_{T1}	18
Endtemperatur Werkzeug [°C]	T_{T2}	200
Wärmekapazität Stahl [kJ/kgK]	c_{ST}	0.4
Werkzeugvolumen warmer Teil [m ³]	V_T	$9.43 \cdot 10^{-4}$
Dichte Stahl [kg/ m ³]	ρ_{ST}	7840
Aufheizzeit [s]	t	300

Berechnung der Werkzeugmasse (Gl. 19)

$$\text{Gl. 19} \quad m_T = V_T \cdot \rho_{ST}$$

Gl. 20
$$P = \frac{Q}{t} = \frac{m_T \cdot c_{ST} \cdot (T_{T2} - T_{T1})}{t} = \frac{V_T \cdot \rho_{ST} \cdot c_{ST} \cdot (T_{T2} - T_{T1})}{t}$$

$$P = 1.79 \text{ kW}$$

Werden alle Verluste ignoriert, reichen rund 1.8 kW aus um das Werkzeug in 5 Minuten auf Prozesstemperatur aufzuheizen.

Diese Leistung könnte z.B. von 4 Hochleistungsheizpatronen mit 10mm Durchmesser und 100mm Länge mit je 560 W Leistung erbracht werden.

Die Verluste werden an dieser Stelle nicht weiter berechnet. Sie lassen sich durch die Verwendung eines Isolationskastens, welcher die freie Konvektion unterbindet, auf einfache Weise minimieren.

7.2.2 Kühlung

Das Ziel des zweiten Werkzeugsegments ist die Abkühlung des Profils auf ein Temperaturniveau bei dem es formstabil ist. Eine relativ simple und gleichzeitig leistungsfähige Technik ist die Wasserkühlung durch Querbohrungen. Das Werkzeug wird mit sich kreuzenden Bohrungen versehen. Die Öffnungen werden bis auf zwei mit Stopfen verschlossen (Abbildung 7-3). Das Wasser kann durch die entstandenen Kanäle fließen und die Wärme abtransportieren.

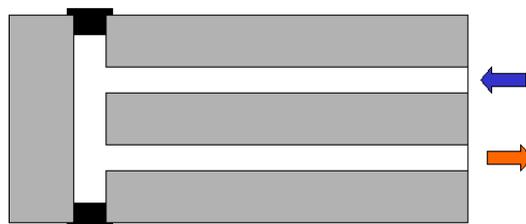


Abbildung 7-3: Prinzip der Querbohrungskühlung

8 Experimentelle Bestimmung des Bulkmoduls B_y

Die erwähnten Konsolidierungsmodelle (Dara und Loos, Muzzy et al., [3]) haben keinen universellen Charakter. Für jedes Halbzeug sind experimentelle Daten zu generieren um das Konsolidierungsverhalten zu beschreiben. Der Bulkmodul B_y ist abhängig von der Anzahl Lagen, der Temperatur und dem Druck und muss für jeden Fall neu bestimmt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zusammen mit M. Scapozza der Bulkmodul bestimmt. Die Kenntnis von B_y ermöglicht die Bestimmung des nötigen Rollenabstands um einen gewünschten Konsolidierungsdruck zu erreichen.

M. Scapozza verwendet in seiner Prototypanlage vier Lagen Plytron-Band. Da die Anpassung des Rollenabstands in der hier beschriebenen Anlage einfacher und weniger zeitaufwändig ist, wurde entschieden die Versuche mit 4 Lagen durchzuführen.

8.1.1 Versuchsaufbau

Die Probenfläche wurde 50x50 mm gewählt. Dies ermöglicht die Verwendung einer handlichen Form bei geringem Halbzeugverbrauch. Ob Randeffekte, begünstigt durch die relativ kleine Probenfläche, einen Einfluss auf die Resultate haben können wurde nicht weiter abgeklärt.

Die ersten Versuche wurden mit einer Silikonform in der Presse³ des Zentrums für Strukturtechnologien durchgeführt. Es zeigte sich, dass die Silikon⁴ dem Druck nicht Standhalten kann. Die Form konnte nicht genügend abgedichtet werden.

Eine gefräste Stahlkavität mit 5 mm tiefe und einem Stahlstempel wurde hergestellt. Die Abdichtung der Form wird über einen Silikonstempel erreicht, der zwischen der Probe und dem Stahlstempel liegt. Unter Druck weicht das Silikon zur Seite hin aus und Dichtet den Rand ab. Des weiteren wurde die Probe mit Trennfolie⁵ umhüllt womit die Reinigung der Form entfällt.

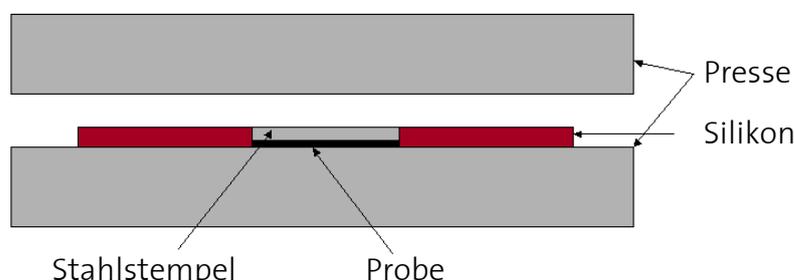


Abbildung 8-1: Schnittbild des ersten Versuchsaufbaus: Die Silikonform hält dem Druck nicht Stand und bricht

³ Fontjine TP-400

⁴ Neukasil RTV 1701/1701-B (Härter)

⁵ WL-5200 B001-48-600 SHT 22

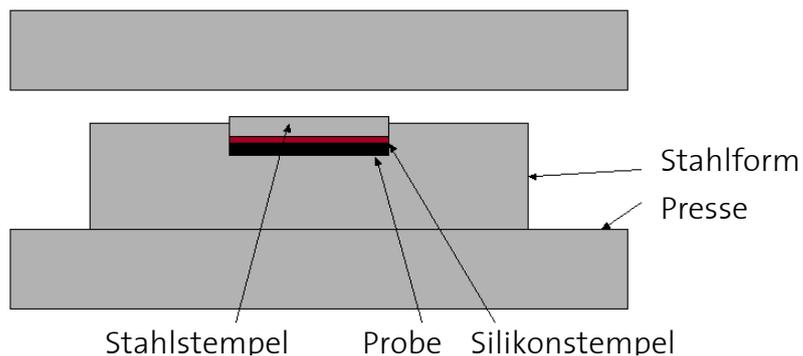


Abbildung 8-2:Schnittbild des zweiten Versuchsaufbaus: Der Silikonstempel dichtet die Form zur Seite hin ab sobald Druck abgesetzt wird (Trennfolie nicht dargestellt)



Abbildung 8-3: Pressform mit eingelegerter Probe und Stahlstempel

Durch die relativ kleine Probenfläche ist die benötigte Kraft zum Erreichen des Zieldrucks sehr gering. Die Kraftanzeigeskala und die Druckregelung der verwendeten Presse sind dadurch zu grob. Dank Dr. Stephan Busato konnte auf die kleineren, handbetriebenen Pressen der Polymertechnologie mit ausreichend feiner Druckskala ausgewichen werden.



Abbildung 8-4: Die verwendete Presse vom Typ Carver

8.1.2 Messungen

Analog zu den Versuchen von J. Colton, J. Muzzy, S. Birger, H. Yang und L. Norpoth [12] wurde mit Drücken zwischen 1.4 und 17.5 bar gepresst (Colton et al.: 0.7 bis 10.3 bar). Es wurden insgesamt 9 Messungen durchgeführt. Auch bei den kleineren Drücken sind die einzelnen Halbzeuglagen nicht mehr unterscheidbar, was auf ausreichende Konsolidierung hinweist.

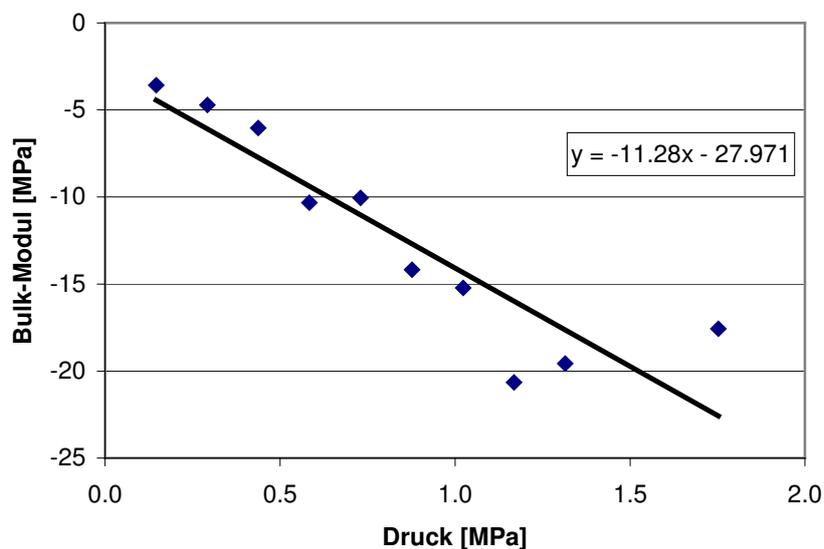


Abbildung 8-5: Berechnete Bulkmoduli für verschiedene Drücke. Die Gleichung der linearen Trendlinie ist oben rechts angegeben.

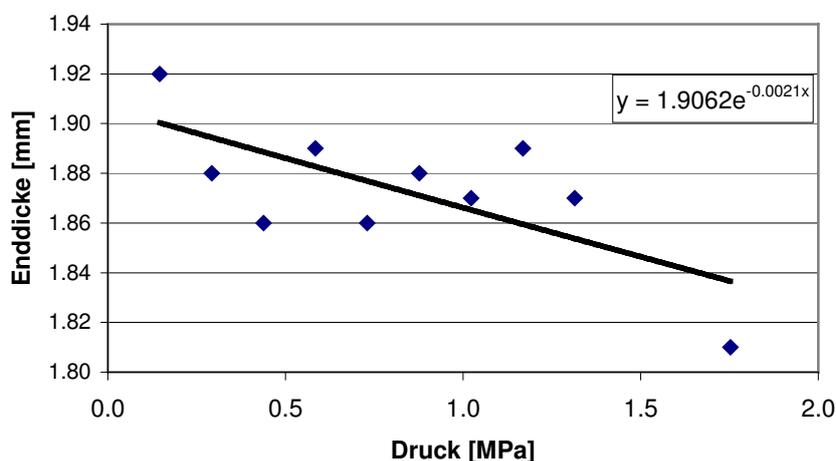


Abbildung 8-6: Vergleich der gemessenen Enddicken bei verschiedenen Pressdrücken. In diesem Diagramm ist gut erkennbar dass die Dickenwerte stark streuen. Die Gleichung der exponentiellen Trendlinie ist oben rechts angegeben.

Tabelle 8-1: Eckdaten der Messungen

Anzahl Messungen [-]	9
Anzahl Lagen [-]	4
Temperatur [°C]	180
Abkühlrate[°C/min]	15
Gemittelter Bulkmodul [MPa]	13.1

Abbildung 8-6 zeigt, dass die Werte stark streuen und der exponentielle Trend nicht, wie aus [12] erwartet, stark ausgeprägt ist.

Die grosse Streuung ist auf mehrere Ursachen zurückzuführen. Die Pressform müsste für exaktere Ergebnisse sauber dichtend gefräst werden. Dies würde den Silikonstempel, der zwar eine beinahe isostatische Druckabsetzung gewährleistet, überflüssig machen. Der Silikonstempel hat den Nachteil, dass ungleichmässige Probendicken möglich sind. So musste jede Probe an 5 Positionen vermessen werden, um einen Mittelungseffekt zu erzielen.

8.1.3 Schlussfolgerungen

Die Messungen haben gezeigt, dass der Bulkmodul keine universelle Konstante ist sondern für jede Konfiguration (Material, Anzahl Lagen, Druck, Temperatur) experimentell bestimmt werden muss. Wichtiger als der numerische Wert des berechneten Bulkmoduls erscheint die Tatsache, dass die Proben auch mit den kleinsten Drücken sauber konsolidierten. Als Faustregel könnte gelten, dass die Enddicke bei genügender Konsolidation etwa 90% bis 95% der Anfangsdicke entspricht.

9 Testläufe

9.1 Versuchsplan

Schon in einer frühen Phase dieser Arbeit wurde ein möglich Versuchsplan aufgestellt. Darin ist festgehalten was während der Testphase untersucht, beobachtet und gegebenenfalls widerlegt werden soll. Diese Definitionen wurde so früh vorgenommen, um in der Entwicklungs- und Konstruktionsphase möglichst zielgerichtet zu arbeiten.

Ziele:

- an einem ausgewählten Profil zeigen, dass Profilherstellung aus UD-Thermoplast-Band-Halbzeug funktioniert
- Testen ob das gewählte Prinzip anwendbar ist
- Parameterfenster definieren
- Stärken und Schwächen dokumentieren
- Ev. kleinere Anpassungen an der Anlage vornehmen
- Erfahrung für weiterführende Arbeiten gewinnen

Allgemeiner Ablauf:

- Erste Testläufe mit den optimalen Parametern aus der Semesterarbeit von M. Grass/M. Geisshüssler [1].
- Anpassung der Parameter:
 - Jeweils nur ein Parameter auf einmal ändern (Nachvollziehbarkeit)
 - Mit einem Parametersatz sollen immer min. 3 Testläufe durchgeführt werden
 - Erkenntnisse aus vorgängigen Testläufen nutzen um optimale Parameter zu finden
 - Wenn optimale Parameter gefunden sind, sollen deren Grenzen ausgelotet werden (Definition eines Parameterfensters)

Geplante Tests:

Dauer	Was	Ziel
4 Tage	Parametertuning (ausgehend von 170°C, 2m/min, 45% Heizleistung)	Brauchbaren Parametersatz finden, ev. kleine Änderungen am Prototyp vornehmen
1 Tag	Variation Heizung (Leistung, Distanz) sowie Vorschub	Parametergrenzen ausloten
1 Tag	2 oder mehr Bänder verwenden	Testen ob Anpassungen für die Verwendung von mehreren Lagen notwendig ist
1 Tag	Kühlart ändern (z.B. Pressluft/Wasserdampf)	Auswirkung auf Formtreue erkennen

Sicherheit:

Im Anhang B werden die wichtigsten Regeln im Umgang mit der Prototypanlage beschrieben.

9.2 Parameter

Bei der Entwicklung der Prototypanlage wurde Wert darauf gelegt, möglichst wenige Einflussgrößen zu fixieren. Dies ergibt eine grosse Freiheit bei der Auslotung möglicher Parameterkonstellationen während der Testphase. Tabelle 9-1 beschreibt die veränderbaren Parameter.

Tabelle 9-1: Liste der einstellbaren Parameter

Parameter	Wertebereich	Sinnvoller Ausgangswert
Vorschubgeschwindigkeit [mm/s]	[0,230]	30
Heizstrahlerleistung [W/Strahler]	[0,1200]	400
Heizstrahlerabstand [mm]]0, ∞]	40
Anzahl Heizstrahler [-]	[1,2,3,4]	4
Anzahl Kühlrollen [-]	[0,1,2]	2
Achsabstand horizontal [mm]	[34,44]	38
Kühlung [-]	Luft/Wasser/keine	Wasser

9.3 Durchführung

Für die Testphase stand, bedingt durch Verspätungen im Herstellprozess, weit weniger Zeit zur Verfügung als ursprünglich eingeplant. So musste das Testprogramm auf wenige Versuche beschränkt werden. Es konnten dadurch auch nicht alle Parameterkombinationen ausprobiert werden.

9.3.1 Rollenabstand

Der für einen vorgegebenen Konsolidierungsdruck benötigte Rollenabstand kann mit Hilfe des experimentell bestimmten Bulkmoduls berechnet werden. Für das verwendete Halbzeug wird vom Hersteller ein Konsolidierungsdruck zwischen 10 und 50 bar empfohlen [13]. Mit Gl. 5 und den Daten aus dem Experiment kann der maximale Rollenabstand berechnet werden.

$$\text{Gl. 5} \quad p = B_y \ln\left(\frac{h_0}{h_{start}}\right)$$

Der maximale Rollenabstand beträgt 1.87 mm. Mit Hilfe von Unterlegestreifen wurde der Rollenabstand auf ca. 1.80 mm eingestellt.

9.3.2 Startprozedur

Die Prototypanlage wurde mit dem Ziel der kontinuierlichen Profilmontage entwickelt. Dadurch wurde dem Startvorgang nur wenig Beachtung geschenkt. Während der Testphase erwies sich gerade der Start als besonders kritisch. Das Untermaß des Rollenabstands gegenüber der Halbzeugdicke und die Profilkontur der Rollen verunmöglichen die Einführung von Halbzeug im festen Zustand in den Umformmechanismus. Im geschmolzenen Zustand verliert das Band seine Steifigkeit und lässt sich nur noch ziehend bewegen.

Als Lösung wurde jeweils in den Bandanfang eine Zunge geschnitten. Diese ist so schmal dass sie von den Rollen nicht umgeformt wird. Der zu für das feste Band zu kleine Rollenabstand kann durch die Elastizität der Wellen übergangen werden.

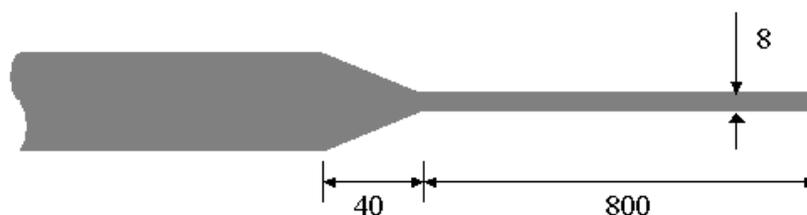


Abbildung 9-1: Schematische Abbildung der Startzunge

Mit Hilfe der Startzunge kann das Band eingeführt werden. Im Übergangsbereich Band/Zunge sollten die unidirektionalen Fasern durch Klebeband⁶ gestützt werden, damit sie sich nicht auf die Rollen aufwickeln.

Ein Schnellverschlussystem für den Umformmechanismus würde dieses umständliche Verfahren umgehen. Ein solches System konnte jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht entwickelt und hergestellt werden.

9.3.3 Geschwindigkeit

Während der ganzen Testphase wurde die Geschwindigkeit nicht variiert. Alle Versuche wurden mit 2 m/min Vorschub durchgeführt. Da der Antrieb teilweise Schlupf aufwies, konnte dieser Wert nicht immer exakt eingehalten werden. Die

⁶ AIRTECH Airkap 1

Einfluss dieser Abweichungen auf die Ergebnisse wird als vernachlässigbar eingeschätzt.

9.3.4 Heizleistung

Die Heizleistung konnte während der Tests nur geringfügig variiert werden. Für beide Heizstrahleranordnungen reicht ca. 30 % der Leistung um das Bandhalbzeug zu schmelzen. Die Heizstrahler sind etwas schmaler als das Band was zu ungleichmässiger Erwärmung über die Bandbreite führt. Die diagonale Anordnung der Strahler (Abbildung 9-2) erwies sich als vorteilhaft, die Heizleistung wird so besser über die ganze Breite verteilt.

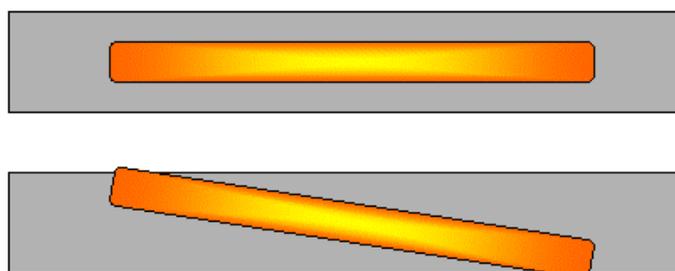


Abbildung 9-2: Horizontale Anordnung der IR-Strahler. Oben: nicht ideal, Randbereiche werden weniger beheizt als Mittelteil, unten: uniforme Erwärmung des Bands

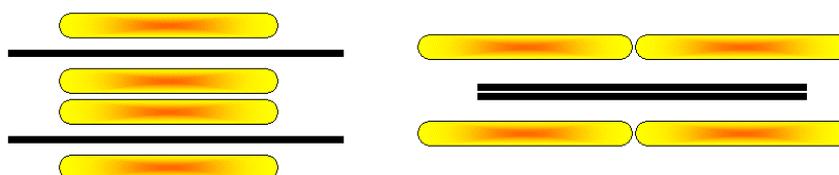


Abbildung 9-3: Vertikale Anordnung der IR-Strahler und Bänder (schwarz). Links: Einzelführung und Beheizung der Bänder. Rechts: Bänder werden gemeinsam beheizt.

9.3.5 Getestete Konfigurationen

Konfiguration 1:

Die ersten Testläufe wurden wie ursprünglich geplant ohne Trennfolie oder Hilfsmittel durchgeführt. Die Bänder werden einzeln erwärmt und kommen erst an der ersten Umformrolle in Kontakt.

Konfiguration 2:

Das Halbzeug wurde einseitig mit Trennfolie⁷ belegt. Die Folie wurde mit Hochtemperaturklebband⁸ am Plytron-Band befestigt. Die Bänder werden einzeln geführt und erwärmt und treten erst an der ersten Umformrolle in Kontakt.

Konfiguration 3:

Konfiguration 3 ist identisch mit Konfiguration 2 bis auf das verwendete Folienmaterial. Bei diesem Test wurde die höherschmelzende Kaptonfolie⁹ eingesetzt.

⁷ WL 5200 B001-48-600 SHT 22

⁸ AIRTECH Airkap 1

⁹ UPILEX Grande 50 R

Konfiguration 4:

Konfiguration 4 verwendet wieder Kaptonfolie, die beiden Bänder werden jedoch vorgängig vereint und oben und unten mit Folie belegt. Es wurde darauf geachtet die beiden Lagen möglichst gut mit Klebband gegen seitliches verrutschen zu sichern.

Konfiguration 5:

Für diese Variante werden Aluminiumbleche¹⁰ als Trennlagen verwendet. Die Bleche werden mitverformt und nach gebrauch recycelt. Die Erwärmung erfolgt auch im Gesamtverbund. Durch die Materialstärke von 0.25 mm kann nur noch eine anstatt zwei Lagen Bandhalbzeug eingesetzt werden.

¹⁰ Breite: 50mm, Stärke: 0.25 mm, Qualität: glatt, weich

10 Ergebnisse der Testläufe

Im folgenden Kapitel werden die Resultate der Testläufe, unterteilt nach Konfiguration, beschrieben und diskutiert.

10.1 Ohne Trennfolien

Der erste Testlauf wurde ohne Trennfolie durchgeführt. Es zeigte sich dass die Matrix an den Rollen klebt, die Menge der haftenden Matrix war jeweils gering. Trotzdem kommt es am Endprofil zu Stellen mit ausgetrockneten Fasern. Die Oberflächenqualität wird dadurch natürlich stark negativ beeinflusst. Durch das Festkleben der Matrix an den Rollen wurden vereinzelt auch Fasern aufgewickelt. Falls dies geschieht muss der Versuch meist abgebrochen werden da sich die Situation nicht von alleine verbessert.

Das Hauptproblem liegt jedoch in der seitlichen Führung des Bandes. Die Bänder können sich in dieser Konfiguration seitlich gegeneinander verschieben, dadurch ist die seitliche Führung der Rollenflanken zu gering. Das Band beginnt sich seitlich zu verschieben und läuft teilweise ausserhalb der Umformrollen, die vorgegebene Profilform wird entsprechend nicht mehr erreicht.



Abbildung 10-1: Foto des Profils des ersten Testlaufs: deutlich erkennbar die ungenügende Oberflächenqualität durch das Matrixhaften

10.2 PET-Trennfolie

Die Verwendung von Trennfolie hat das Matrixhaft-Problem gelöst. Die Folie wurde in Streifen von 50mm Breite geschnitten und beidseitig aufgelegt und im Abstand von ca. 40cm mit Klebband fixiert.

Die Oberflächenqualität ist durch die sehr geringe Materialstärke und die Neigung zum Faltenwurf der Folie noch nicht überzeugend. Es zeigte sich, dass die Folie unter mechanischer und thermischer Belastung sehr schnell versagt.



Abbildung 10-2: Foto eines Profils das mit PET-Trennfolie hergestellt wurde. Die schlechte Oberflächenqualität ist gut erkennbar, vereinzelt haften noch Folienreste am Profil. Rechts oben ist das Resultat der Bandverschiebung sichtbar, die Rollenflanken haben das Material abgetrennt.

Weiterhin besteht das Problem der seitlichen Führung im Umformmechanismus.

10.3 Kaptonfolie

Mit Kaptonfolie wurden am meisten Tests durchgeführt. Sie eignet sich besser als die PET-Folie weil sie temperaturbeständiger ist und dadurch weniger versagt. Die grössere Foliendicke ergibt eine deutlich grössere Steifigkeit was die Bandführung zwischen den Rollen offenbar verbessert hat.

Zuerst wurden Testläufe mit getrennt beheizten Bändern (Abbildung 9-3, links) durchgeführt. Diese Konfiguration erlaubt es jedoch den Bändern sich seitlich zu verschieben und so aus der Führung der Rollen zu geraten. Aus diesem Grund wurde auf die gemeinsame Beheizung der Bändern inklusive Trennfolien gewechselt. Die Bänder lassen sich mit Klebband zu einem Paket verbinden dass innerhalb der Rollen seitlich deutlich besser geführt wird.



Abbildung 10-3: Foto eines Profils hergestellt mit Kapton-Trennfolie. Die glänzende, gut Verschlussene Oberfläche zeugt von guter Qualität.

10.4 Aluminiumband

Die Resultate mit Kaptonfolie liessen vermuten dass noch steifere Trennlagen die Druckabsetzung sowie seitliche Führung verbessern würde.



Abbildung 10-4: Aluminiumtrennlagen mit Plytronband

Das Einlegen der Aluminiumstreifen in den Umformmechanismus stellte sich bereits als sehr schwierig heraus. Einige Zugversuche ohne Plytron-Band liessen diesen Ansatz scheitern. Die grössere Steifigkeit der Aluminiumlagen verhindert die Umformung zwischen den Rollenstationen, dadurch werden die Bleche an der nächsten Rolle seitlich abgeschert oder verklemmen sich.

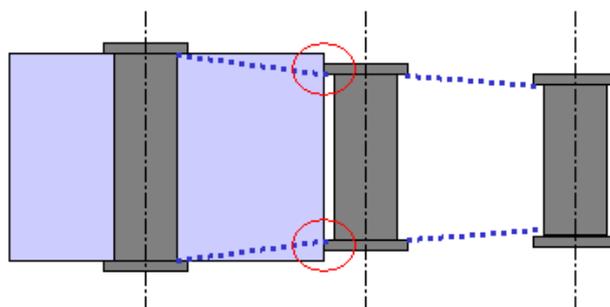


Abbildung 10-5: Al-Band-Problematik: Das Al-Band (hellgrau) verformt sich nach der 1. Rollenstation nicht und trifft auf die Flanken der zweiten Station. Der benötigte Verlauf des Al-Bands ist blau gestrichelt eingezeichnet. Die Profilierung der Rollen wurde nicht eingezeichnet.

Das Problem kann gelöst werden wenn zwischen den Rollen seitliche Führungen installiert werden, welche das Band auf die nächste Rollenbreite zwingen. Diese Idee wurde nicht weiter verfolgt da Versuche von Matteo Scapoza zeigten, dass Polypropylen sehr gut auf Aluminium haftet.

10.5 Schliffbildanalyse

Um die Konsolidierung und den Porengehalt zu beurteilen wurden vom qualitativ hochwertigsten Profil (Konfiguration: Kapton/gemeinsam beheizt) zwei Schliffproben hergestellt und unter dem Mikroskop¹¹ untersucht.

Abbildung 10-6 zeigt die Positionen an denen Schliffbildaufnahmen erstellt wurden.

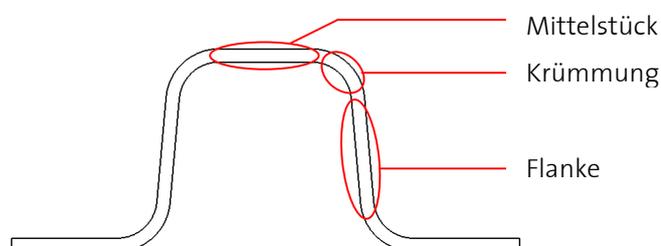


Abbildung 10-6: Position der Schliffbildaufnahmen im Profilquerschnitt

Die Schliffbilder sind als Stichprobe zu betrachten. Die Ergebnisse lassen nur Spekulationen auf das gesamte Profil zu, für genauere Aussagen müssten deutlich mehr Querschnitte untersucht werden um der Stochastik gerecht zu werden.

10.5.1 Qualität der Konsolidierung

Die Qualität der Konsolidierung lässt sich an der Trennlinie der beiden Bandlagen abschätzen. Ungenügende Konsolidierung ist daran erkennbar, dass die Lagen nicht verbunden sind und die Trennebene deutlich, unter Umständen sogar als Spalt, sichtbar ist. Lässt sich keine Trennlinie erkennen, kann davon ausgegangen werden, dass die Konsolidierung qualitativ hochwertig ist.

¹¹ Leica Microsystems DM RXA

Abbildung 10-7 zeigt einen Ausschnitt aus der Krümmung, Abbildung 10-8 zeigt einen Ausschnitt des Mittelstücks. Beide Bilder wurden mit 10-facher Vergrößerung aufgenommen. Im gesamten untersuchten Querschnitt ist keine Trennlinie vorhanden. Es wird davon ausgegangen, dass die Konsolidierung trotz des eher tiefen Drucks qualitativ hochwertig ist. Auf den Aufnahmen ist auch der geringe Faservolumengehalt von ca. 35 % gut erkennbar.

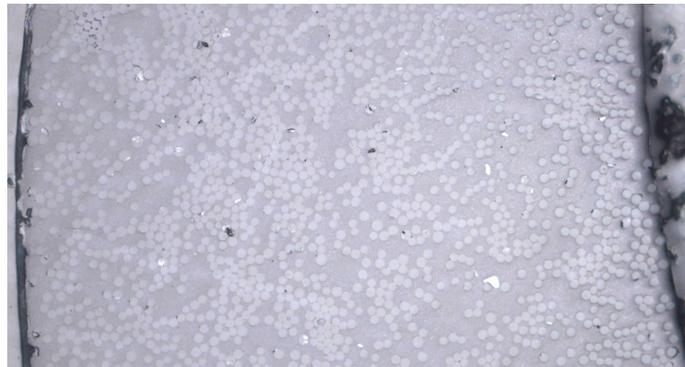


Abbildung 10-7: Schliffbildaufnahme des Bogens ,10-fache Vergrößerung. Der Durchmesser einer Faser beträgt typischerweise zwischen 12 und 15 μm .

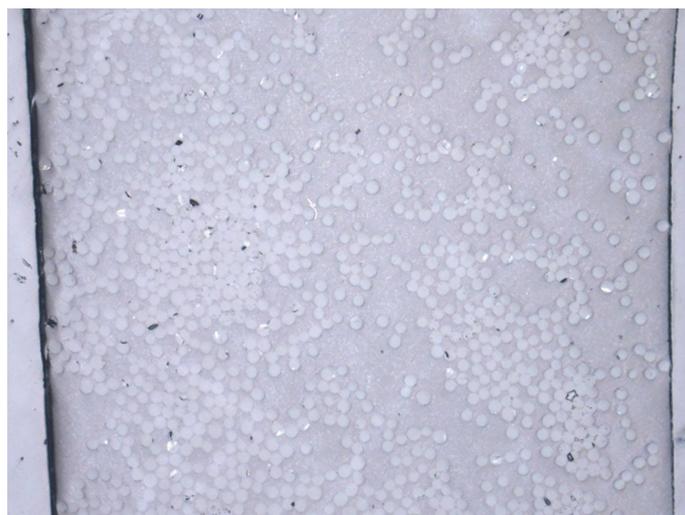


Abbildung 10-8: Schliffbildaufnahme der Flanke, 10-fache Vergrößerung. Die rechte Seite entspricht der Profillinienfläche.

10.5.2 Faserverteilung

Die Fasern sind auf den verschiedenen Aufnahmen unterschiedlich gut verteilt. Es zeigt sich jedoch die Tendenz (gut erkennbar in Abbildung 10-9) zur Faserkumulierung („Inselbildung“) und zu erhöhtem Faservolumengehalt in der äusseren Profilschicht. In einigen Aufnahmen (auch in Abbildung 10-9) ist die ehemalige Trennebene noch als matrixreicher Streifen erkennbar. Würden die lokal unterschiedlichen Faservolumengehalte durch Fasermigration entstehen, wäre eine Trennebene in dieser Art nicht mehr erkennbar. Es wird vermutet, dass dieser Effekt auf Unregelmässigkeiten im Halbzeug zurückgeführt werden kann.

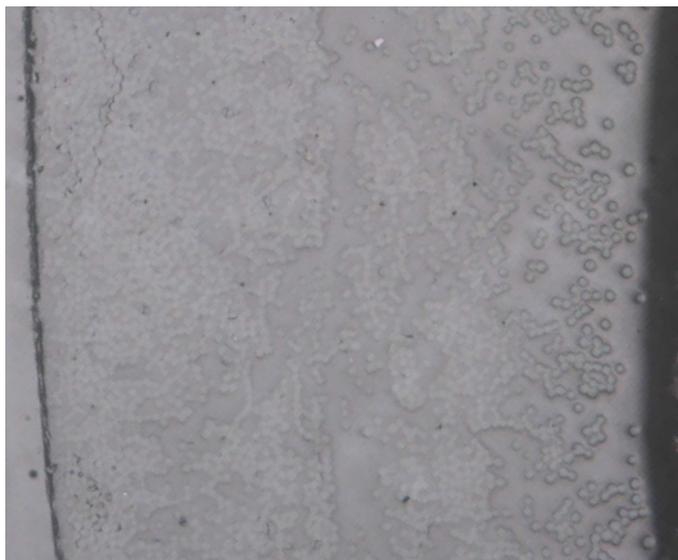


Abbildung 10-9: Schliffbildaufnahme des Mittelstücks, aufgenommen mit 5-facher Vergrößerung. Die Trennebene ist noch schwach als matrixreicherer Streifen erkennbar. Die rechte Seite entspricht der Profilinnenfläche, die Wandstärke beträgt ca. 1 mm.

10.5.3 Porengehalt

Der Porengehalt des Profils lässt sich anhand von Schliffbildern gut bestimmen. Allgemein kann der Porengehalt der Probe als sehr klein bezeichnet werden (Abbildung 10-10). Abbildung 10-11 zeigt eine Aufnahme einer Ansammlung von kleinen Poren.

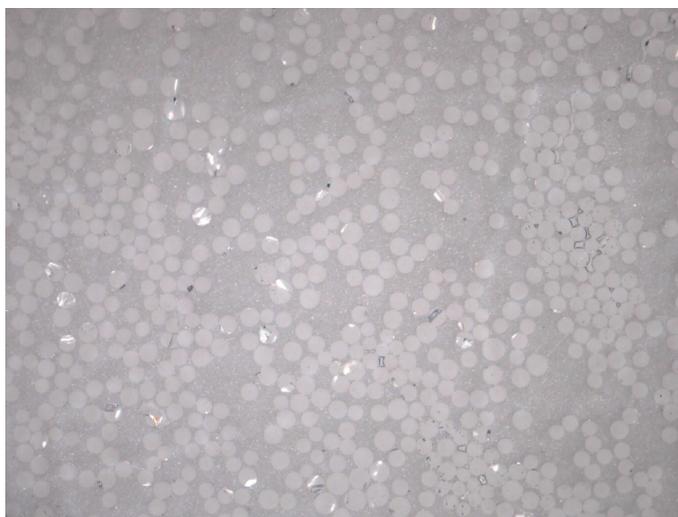


Abbildung 10-10: Schliffbildaufnahme des Mittelstücks, 20-fache Vergrößerung. Die weissen Flecken werden durch Fasern verursacht, die beim Schleifen abgebrochen sind. Der Durchmesser einer Faser beträgt typischerweise zwischen 12 und 15 μm .

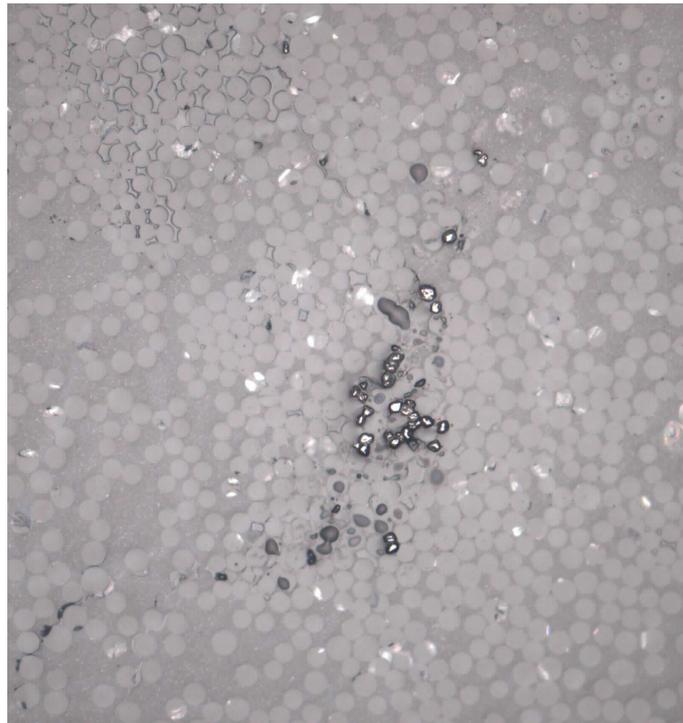


Abbildung 10-11: Schlibfbildaufnahme des Mittelstücks , 10-fache Vergrößerung. Im Zentrum sind einige sehr kleine Poren sichtbar.

10.6 Weitere Testmöglichkeiten

Die Einstellmöglichkeiten der Parameter wurden in der Testphase bei weitem nicht ausgenutzt. Trotzdem scheint es am sinnvollsten in erster Linie nach geeigneteren Trennfolien zu suchen. Ideal wären selbstklebende Folien, damit würden keine Materialverdickungen durch die Klebbänder entstehen und somit die Druckabsetzung und die Auszugkraft gleichmässiger. Die Verkleinerung des Rollenabstands scheint eher kritisch da die Auszugskräfte bereits so teilweise sehr gross wurden.

Sehr interessant wäre auch die Auswirkungen von verschiedenen Prozess-temperaturen zu beobachten. Der Begriff Prozesstemperaturen umfasst hier die Eingangstemperatur des Halbzeugs ins Werkzeug, die Temperatur der Rollen sowie das Temperaturprofil der Abkühlung. Untersuchungen von M. Scapozza [11] haben ergeben, dass sein Prozess weitaus sensitiver auf den gewählten Konsolidierungsdruck als auf Veränderungen der Temperatur reagiert. Ob diese Erkenntnis direkt auch auf die hier verwendete Methode übertragbar ist, müsste erst abgeklärt werden.

11 Diskussion und Ausblick

11.1 Ziele

Das in der Aufgabenstellung formulierte Ziel dieser Diplomarbeit wurde erreicht. Die bekannten Herstellmethoden wurden diskutiert und verglichen. Die Lösungsansätze wurden beschrieben und anhand eigener Kriterien bewertet. Die am besten geeignete Technik wurde in Form einer Prototypanlage realisiert und getestet.

Die geplante Parameterstudie konnte durch die Verspätungen aufgrund von Verzögerungen im Herstellprozess nicht umfassend durchgeführt werden. Es wurden lediglich einige Testläufe mit einem als geeignet eingeschätzten Parametersatz ausgeführt.

11.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Arbeit können auf zwei Bereiche aufgeteilt werden. Ein Bereich bildet die Entwicklung und Realisierung der Prototypanlage, der andere Bereich besteht aus den mit der Anlage produzierten Profilen.

Die Prototypanlage wurde gemäss dem gewählten Konzept aufgebaut. Die Anlage weist einige Kinderkrankheiten auf die in einem weiteren Prototyp behoben werden könnten. Dazu zählt z.B. der zu schwach gewählte Antrieb und die zu kleinen Rollenflanken. Diese beiden Schwachpunkte konnten jedoch nicht vorhergesehen werden und sind dadurch akzeptierbar.

Die Qualität der Profile ist noch nicht ausreichend gut. Besonders die Formtreue an den Aussenflanken ist kritisch. Die Oberflächenqualität hingegen ist als gut einzustufen.

11.3 Potential

Das Potential der realisierten Technik wird als mässig eingestuft. Dies beruht hauptsächlich auf der nicht optimalen Druckabsetzung durch den verwendeten Rollenansatz. Durch die Lücken zwischen den Rollen bietet sich dem Band immer wieder die Möglichkeit seitlich auszuweichen was zu Problemen an der nächsten Rollenstation führt.

Durch die verkürzte Testphase war kein iterativer Verbesserungsprozess möglich. Es wird angenommen dass die Prototypanlage noch viel Verbesserungspotential enthält. Es scheint jedoch sinnvoller diesen Aufwand an einem geeigneteren Konzept, z.B. dem Pultrusionsansatz, zu betreiben.

11.4 Ausblick

Die Realisierung der Prototypanlage hat gezeigt, dass die Profilherstellung basierend auf dem Rollenansatz grundsätzlich möglich ist. Es wurden jedoch auch die Nachteile des gewählten Konzepts sichtbar.

Obwohl die Profilqualität durch weitere Parametertuning und einen iterativen Verbesserungsprozess noch deutlich gesteigert werden könnte, wird die Forschung an diesem Konzept nicht weitergeführt. Der Schwerpunkt wird in Richtung Pultrusionsansatz verschoben. Basierend auf diesem Konzept wird für das Sommersemester 2006 eine Semesterarbeit am Zentrum für Strukturtechnologien ausgeschrieben.

Die Diplomarbeiten von Michael Weiss und Matteo Scapozza und diese Arbeit zeigen, dass die Vision der Felgenherstellung mit gekrümmten Profilen noch viel Potential enthält. Die erworbenen Kenntnisse sind auch gut auf andere Anwendungen übertragbar.

Dank

Ich möchte mich bei Herr Prof. Dr. Ermanni für die Möglichkeit bedanken, an seinem Institut eine praxisnahe und experimentelle Arbeit durchzuführen.

Niccolò Pini danke ich sehr für sein persönliches Engagement bei der Betreuung während der gesamten Arbeit.

Weiterer Dank geht an Herr Ruegg von Esoro AG für die grosszügige Plytronspende, an die Firma Stebler+Co für die kostenlose Fertigung des Motorenträgers sowie an Dr. Stephan Busato und das Polymerinstitut für die Benützung ihrer Heisspressen.

Ich bedanke mich bei Hansruedi Nef für die rasche Fertigung diverser kleiner „Eilaufträge“.

Mein Dank geht auch an meine Studienkollegen Matteo Scapozza und Michael Weiss welche mir mit Rat und Tat geholfen haben.

Literaturverzeichnis

- [1] M. Grass und M. Geisshüssler, Konzepte zur Herstellung von ringförmigen Strukturen aus Faserverbund-Thermoplast, Semesterarbeit SS 2005, Zentrum für Strukturtechnologien, ETH Zürich
- [2] P. Ermanni, Composites Technologien, Vorlesungsskript, Zentrum für Strukturtechnologien, ETH Zürich (2004)
- [3] F.N. Cogswell, Thermoplastic Aromatic Polymer Composites, Butterworth-Heinemann Ltd, 1992
- [4] Gutowski, T.G. (Editor), Advanced Composites Manufacturing, John Wiley&Sons, Inc. New York ,1997
- [5] U. I. Thomann, Direct Stamp Forming of Non-Consolidated Carbon/ Thermoplastic Fibre Commingled Yarns, Dissertation, Zentrum für Strukturtechnologien, ETH Zürich, 2003
- [6] P.H. Dara, A.C. Loos, Thermoplastic Matrix Composite Processing Model, Reports CCMS-85-10 and VPI-E-85-21, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 1985
- [7] Plytron: Unidirectional reinforcement, Technical Data Sheet, Gurit Suprem, 2005
- [8] R. Tognini, G. Turlach, Neuartige, höchstfeste Befestigungstechnik aus endlos-faserverstärktem Verbundwerkstoff, Dresden, 2003
- [9] G. Bechtold, S. Wiedmer, K. Friedrich, Pultrusion of thermoplastic composites – New developments and modelling studies, Thermoplastic Composite Materials, Vol. 15, 2002
- [10] F. Henninger, K. Friedrich, Production of textile reinforced thermoplastic profiles by rollforming, Composites: Part A 35 (2004)
- [11] M. Scapozza, Herstellung von ringförmigen Strukturen aus FV-Thermoplasten, Diplomarbeit, WS 05/06, Zentrum für Strukturtechnologien, ETH Zürich
- [12] J. Colton, J. Muzzy, S. Birger, H. Yang, L. Norpoth, Processing Parameters for Consolidating PEEK/Carbon Fiber (APC-2) Composites, Polymer Composites, Vol. 13 (6),421-426 (1992)
- [13] Proposal to process Plytron Prepreg Tapes, Gurit Suprem, 2005

- [14] Plytron: Product Description, Properties and Application, Gurit Suprem, 2005
- [15] D.C. Leach, Continuous Fibre Reinforced Thermoplastic Matrix Composites, Advanced Composites, ed. I.K. Patridge, Elsevier Applied Science, 1989, pp. 43-109
- [16] G.J. Sweeney, P.F. Monaghan, M.T. Brogan, S.F. Cassidy, Reduction of infra-red heating cycle time in processing of thermoplastic composites using computer modelling, (S. 255-265), Composites Manufacturing 6 (1995)
- [17] B.C. Chern, T.J. Moon, J.R. Howell, On-Line processing of unidirectional fibre composites using radiative heating, Journal of Composite Materials, Vol. 36, 16/2002
- [18] J. P. Luongo, Infrared study of polypropylene, Journal of Applied Polymer Science, Vol. III, Issue No. 9, 302-309 (1960)
- [19] J. Ozaki, K. Manabe, Development of roll bending process for braided thermoplastic composite tubes, SAMPE Journal, Vol. 36, 3/2000
- [20] R. Dykes et al., Roll forming continuous fibre-reinforced thermoplastic sheets : experimental analysis, Composites: Part A 31 (2000)
- [21] T. Hirai, Rollforming of SMC and TMC, considering the resin-fibre interface, Composite Structures 32 (1995)
- [22] G. Bechtold, Pultrusion von geflochtenen und axial verstärkten Thermoplast-Halbzeugen und deren zerstörungsfreie Porengehaltsbestimmung, Dissertation, Institut für Verbundwerkstoffe GmbH, Universität Kaiserslautern (2000)
- [23] K. Van de Velde, P. Kiekens, Thermoplastic pultrusion of natural fibre reinforced composites (S. 355-360), Composite Structures 54 (2001)
- [24] A. Carlsson, B. T. Åström, Modeling of heat transfer and crystallization kinetics in thermoplastic composites manufacturing: Pultrusion
- [25] M. L. Wilson, J. D. Buckley, The potential for low cost thermoplastic pultrusion, Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 13-October 1994
- [26] V. Kerbiriou, Imprägnierung und Pultrusion von thermoplastischen Verbundprofilen, Fortschrittsbericht VDI Reihe 5 nr. 496, VDI Verlag 1997
- [27] K. Van de Velde, P. Kiekens, Thermoplastic polymers: overview of several properties and their consequences in flax fibre reinforced composites, Polymer Testing 20 (2001) 885-893
- [28] S. Vajna, R. Ledderbogen, CATIA V5 - kurz und bündig : Grundlagen für Einsteiger, Vieweg 2003

- [29] I. Braun, Erstellen eines Basisschulungskonzeptes für CATIA V5 R12, Diplomarbeit, Institut für Flugzeugbau der Universität Stuttgart, 2004

Links

- [30] Gurit Suprem, Halbzeughersteller
<http://www.guritsuprem.com>
- [31] ACM Friedrichshafen GmbH (Advanced Composites and Machines)
<http://www.acm-fn.de>
- [32] Eidg. Institut für Geistiges Eigentum IGE
<http://www.ige.ch>
- [33] Europäisches Patentamt
<http://ep.espacenet.com>
- [34] Internetportal für wissenschaftliche Literatur
<http://wos.consortium.ch>
- [35] Dymag, Hersteller von Felgen und Zubehörteilen aus Composites und Leichtmetall für Motorrad und Auto
<http://www.dymag.com>
- [35] Fulcrum composites, Hersteller von pultrudierten Thermoplastprofilen
<http://www.fulcrumcomposites.com>

Anhang A: Partner

Plytron

	ESORO AG
	Telefon: 044 887 04 40
	Telefax: 044 887 04 50
	Homepage: www.esoro.ch
	Kontaktperson: Herr A. Ruegg
	Adresse: Tämperlistrasse 10, 8117 Fällanden
	Grosszügiger Spender der Plytron-Bänder

Mechanische Bearbeitung

	Institutswerkstatt
	Telefon: 044 633 63 20
	Telefax: -
	Homepage: www.imes.ethz.ch
	Kontaktperson: Herr H. Nef
	Adresse: CLA D 24, Tannenstr. 3, 8092 Zürich
	Fertigung der Antriebsrollen, Lagerfüsse und Wellen

	CNC-Technik Süssli AG
	Telefon: 055 640 30 93
	Telefax: 055 640 76 64
	Homepage: www.cnc-suessli.ch
	Kontaktperson: Herr E. Süssli
	Adresse: Buchholzstrasse 40, 8750 Glarus
	Fertigung der Umformrollen

	Stebler + Co AG
	Telefon: 061 795 98 88
	Telefax: 061 795 98 89
	Homepage: www.stebler-co.ch
	Kontaktperson: Herr K. Stampfli
	Adresse: Brügglistrasse 4, 4208 Nunningen
	Herstellung und Pulverbeschichtung des Motorenträgers

	Paul Wyss
	Telefon: 044 932 21 84
	Telefax: 044 932 25 76
	Homepage: -
	Kontaktperson: Herr R. Wyss
	Adresse: Hofstrasse 101, 8620 Wetzikon
	Centerless-Schleifen der Umform-Wellen

Gummibeschichtung

	TYP AG
	Telefon: 032 625 58 58
	Telefax: 032 622 72 40
	Homepage: www.typ-gummi-tgw.ch
	Kontaktperson: Herr Galantino
	Adresse: Ritterquai 27, 4502 Solothurn
	Beschichtete die Antriebsrollen mit Gummi

	ALROL AG
	Telefon: 071 383 44 80
	Telefax: 071 383 44 85
	Homepage: www.alrol.com
	Kontaktperson: Herr Stohler
	Adresse: Quellenhofstrasse 18, 9200 Gossau
	Offerte zum Beschichten der Antriebsrollen eingeholt.

	Plastigum AG
	Telefon: 052 646 08 00
	Telefax: 052 646 08 09
	Homepage: -
	Kontaktperson: Herr K. Kunz
	Adresse: Grossholzstr. 20, 8253 Diessenhofen
	Offerte zum Beschichten der Antriebsrollen eingeholt, verarbeiten jedoch nur Grossserien

	GTK Timek Group SA
	Telefon: 091 946 43 13
	Telefax: 091 946 43 14
	Homepage: www.gtk.ch
	Kontaktperson: Herr L. Domeniconi
	Adresse: Postfach, 6802 Rivera
	Offerte zum Beschichten der Antriebsrollen eingeholt

	MAPO AG
	Telefon: 044 874 48 48
	Telefax: 044 874 48 18
	Homepage: www.mapo.ch
	Kontaktperson: Herr M. Kuttelwascher
	Adresse: Europa-Strasse 12, 8152 Glattbrugg
	Offerte zum Beschichten der Antriebsrollen eingeholt, min. Rollenbreite ist jedoch 13mm

	Urs Rattin
	Telefon: 044 462 11 11
	Telefax: 044 462 11 12
	Homepage: -
	Kontaktperson: Herr U. Rattin
	Adresse: Binzstrasse 15, 8045 Zürich
	Offerte zum Beschichten der Antriebsrollen eingeholt

Lager

	Hydrel GmbH
	Telefon: 071 466 66 66
	Telefax: 071 466 63 33
	Homepage: www.hydrel.ch
	Kontaktperson: -
	Adresse: Badstrasse 14, 8590 Romanshorn
	Lieferant der Gleitlager

	Georg Rutz AG Industriebedarf
	Telefon: 044 733 73 06
	Telefax: 044 733 58 21
	Homepage: www.georg-rutz.ch
	Kontaktperson: Frau S. Franconi
	Adresse: Wagistrasse 10, 8952 Schlieren
	Offerte für Rillenkugellager eingeholt (SKF-Vertragshändler)

Antriebsmotor und Getriebe

	Stamm Industrieprodukte AG
	Telefon: 043 288 60 60
	Telefax: 043 288 60 88
	Homepage: www.stammweb.ch
	Kontaktperson: Herr A. Wohlgemuth
	Adresse: Witzbergstrasse 24, 8330 Pfäffikon
	Lieferant des Antriebsmotors und Steuerung

	M+A Motoren und Antriebe AG
	Telefon: 043 311 10 85
	Telefax: 043 311 10 90
	Homepage: www.ma-ag.ch
	Kontaktperson: Herr B. Kolb
	Adresse: Flurstrasse 56, 8048 Zürich
	Offerte für Antrieb eingeholt

	Maxon Motor AG
	Telefon: 041 666 16 43
	Telefax: 041 666 16 16
	Homepage: www.maxonmotor.com
	Kontaktperson: Herr R. Leitner
	Adresse: Brännigstrasse 220, 6072 Sachseln
	Offerte für Antrieb eingeholt

	LEAG Antriebstechnik AG
	Telefon: 052 620 24 00
	Telefax: 052 620 24 11
	Homepage: www.leag.com
	Kontaktperson: Frau T. Verrilli
	Adresse: Grubenstrasse 92, 8200 Schaffhausen
	Offerte für Antrieb eingeholt

Pyrometer

	Sintrel Electronic AG
	Telefon: 056 416 20 00
	Telefax: 056 416 20 05
	Homepage: www.sintrel.ch
	Kontaktperson: Frau D. Schmid
	Adresse: Ringstrasse 18, 5432 Neuenhof
	Lieferant des Pyrometers

	Gruba AG
	Telefon: 044 730 55 61
	Telefax: 044 730 55 68
	Homepage: www.gruba-ag.ch
	Kontaktperson: Frau V. Benz
	Adresse: Harissenbucht, 6362 Stansstad
	Offerte für Pyrometer eingeholt

	KOTTONAU Messtechnik
	Telefon: 044 790 15 10
	Telefax: 044 790 15 11
	Homepage: www.kottonau.ch
	Kontaktperson: Herr F. Kottonau
	Adresse: Kleindorfstr. 90, 8707 Uetikon am See
	Offerte für Pyrometer eingeholt

	Cosmos Data AG
	Telefon: 044 463 75 45
	Telefax: 044 463 75 44
	Homepage: www.cosmosdata.ch
	Kontaktperson: Herr H. Vogel
	Adresse: Binzstrasse 15, 8045 Zürich
	Offerte für Pyrometer eingeholt

Heizstrahler

 8057 Zürich/Schweiz	Wisag AG
	Telefon: 044 317 57 57
	Telefax: 044 317 57 77
	Homepage: www.wisag.ch
	Kontaktperson: Herr U. Gabriel
	Adresse: Oerlikonerstrasse 88, 8057 Zürich
	Lieferant der Heizstrahler

	Abecon AG Zürich
	Telefon: 044 451 14 00
	Telefax: 044 451 20 22
	Homepage: www.abecon.ch
	Kontaktperson: Herr W. Stadler
	Adresse: Friesenbergstrasse 108, 8055 Zürich
	Offerte für Heizstrahler eingeholt

Heizpatronen

	Probag Wärmetechnik
	Telefon: 062 389 70 60
	Telefax: 062 389 70 66
	Homepage: www.probag.ch
	Kontaktperson: -
	Adresse: Industriestrasse 592, 4625 Oberbuchsitzen
	Offerte für Heizpatronen eingeholt

	Eisenhart AG
	Telefon: 044 945 42 51
	Telefax: 044 945 43 54
	Homepage: www.eisenhart.ch
	Kontaktperson: Herr T. Eisenhart
	Adresse: Brunnenstrasse 5, 8604 Volketswil
	Offerte für Heizpatronen eingeholt

	Electrolux Professional AG
	Telefon: 062 837 61 61
	Telefax: 062 837 62 33
	Homepage: www.electroluxprofessional.ch
	Kontaktperson: Frau S. Mauch
	Adresse: Postfach, 5001 Aarau
	Offerte für Heizpatronen eingeholt

Profilsysteme

	Kanya AG/SA/Ltd
	Telefon: 055 251 58 58
	Telefax: 055 251 58 68
	Homepage: www.kanya.ch
	Kontaktperson: Frau E. Hässig
	Adresse: Neuhofstrasse 9, 8630 Rüti
	Profilrahmen für Tisch und Aufbau bestellt

Aluminium-Bänder

	Korff AG
	Telefon: 032 636 33 32
	Telefax: 032 636 23 09
	Homepage: www.korff.ch
	Kontaktperson: Herr O. Sprenger
	Adresse: Niedermattstrasse 35, 4538 Oberbipp
	Offerte für Aluminiumfolie eingeholt

	Alu Menziken Gruppe
	Telefon: 062 765 21 21
	Telefax: 062 765 21 04
	Homepage: www.alu-menziken.ch
	Kontaktperson: Herr Bühler
	Adresse: Hauptstrasse 35, 5737 Menziken
	Offerte für Aluminiumfolie eingeholt

Wasserdüsen

	Jato-Düsenbau AG
	Telefon: 041 269 88 30
	Telefax: 041 269 88 31
	Homepage: www.jato.ch
	Kontaktperson: -
	Adresse: Täschmattstrasse 23, 6015 Reussbühl
	Offerte für Flachstrahldüsen eingeholt

Zahnräder

GÜDEL	Güdel AG
	Telefon: 062 916 91 91
	Telefax: 062 916 91 50
	Homepage: www.gudel.ch
	Kontaktperson: -
	Adresse: Industrie Nord, 4900 Langenthal
	Lieferant der Antriebszahnräder

Anhang B: Sicherheitskonzept

Dieses Dokument soll die Sicherheit aller beteiligten im Umgang mit der Prototypanlage und ihrem Zubehör gewährleisten. Es werden einige grundlegenden Verhaltensweisen festgelegt.

Elektrizität

Die Prototypanlage enthält mehrere Elemente die an das 230V-Stromnetz angehängt sind. Gleichzeitig wird ein offenes Wasserkühlsystem eingesetzt. Die gesamte Anlage ist über den Frequenzumformer geerdet. Es muss daher **immer zuerst die Stromversorgung für den Antrieb**, und dann erst die restlichen Komponenten eingesteckt werden um die Erdung sicherzustellen.

Zum Schutz gegen Stromschläge ist die ganze Anlage durch einen FI-Schalter geschützt. Es ist trotzdem darauf zu achten, dass die elektrischen Elemente nicht mit Wasser in Berührung kommen. Sollte dies dennoch der Fall sein, ist sofort von der Anlage Abstand zu nehmen. Anschliessend kann die Stromverbindung über den Sicherungskasten unterbrochen werden, um die Bauteile trocknen zu lassen.

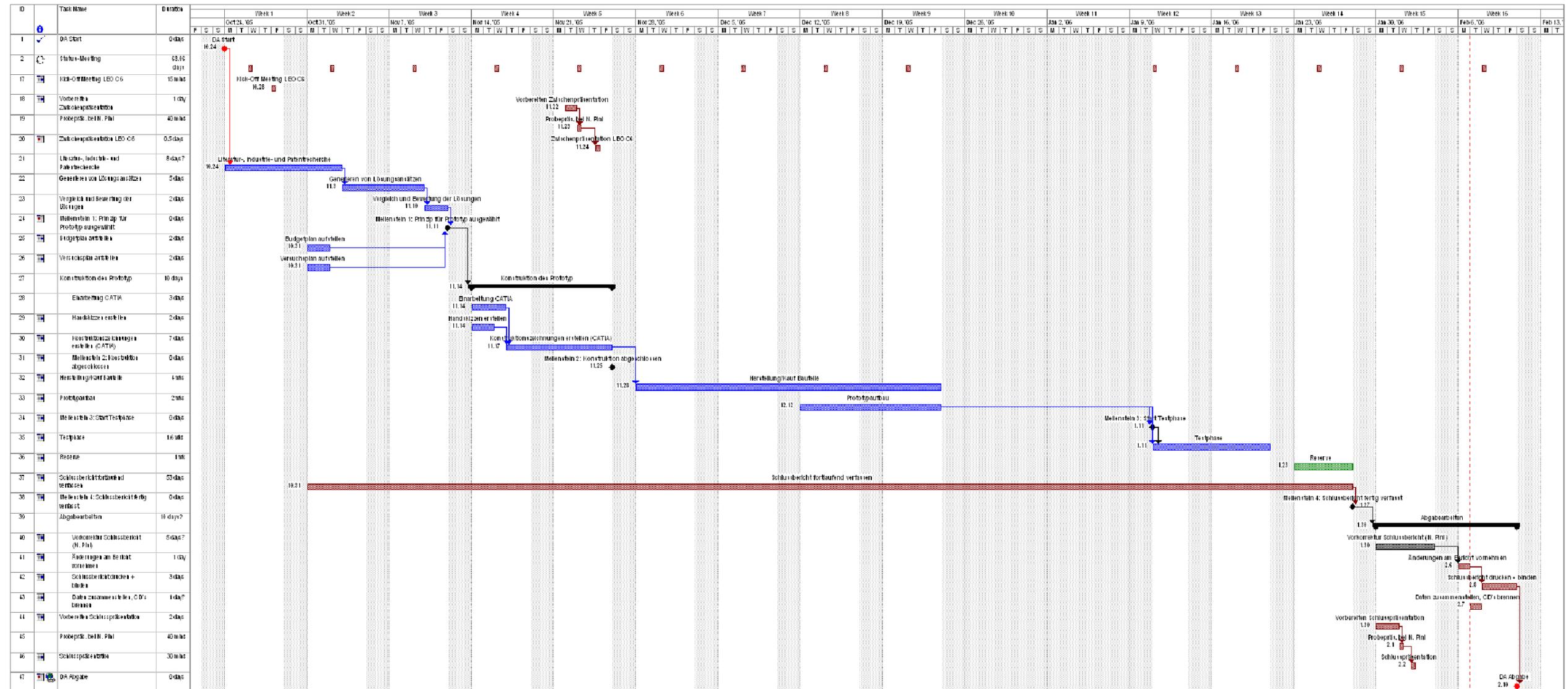
Verbrennungsgefahr

Die Arbeit mit Thermoplasten birgt immer die Gefahr von Verbrennungen. Die geschmolzene Matrix wird auf bis zu 200°C erhitzt und kann, besonders durch die Klebrigkeit, zu schweren Verbrennungen führen. Es ist empfohlen wann immer möglich mit hitzebeständigen Handschuhen zu arbeiten.

Verhalten bei Unfällen

Stromschlag	Anwesende: <ol style="list-style-type: none">1. Abstand von der Anlage nehmen2. Strom am Sicherungskasten unterbrechen3. Erste Hilfe leisten4. Notruf Tel.-Nr. 888 wählen
Verbrennung	<ol style="list-style-type: none">1. Sofort für mindestens 10 min unter kaltem, fliessendem Wasser kühlen2. Falls nötig Notruf Tel.-Nr. 888 rufen

Anhang C: Zeitplan



aufklappbar ⇨

Anhang D: Kosten der Prototypanlage

			Stückpreis	Stück	Gesamtpreis	Bemerkungen
Antrieb	Rollen	Rollengrundkörper	SFr. 6.00	2	SFr. 12.00	H. Nef
		Wellen	SFr. 3.00	2	SFr. 6.00	H. Nef
		Gummibeschichtung	SFr. 127.50	2	SFr. 255.00	TYP AG
	Lager	Gleitlagerbuchsen	SFr. 2.00	6	SFr. 12.00	Hydrel AG (mit Matteo bestellt)
		Lagerfuss	SFr. 2.00	4	SFr. 8.00	H. Nef
	Motor	Motor inkl. Getriebe	SFr. 396.00	1	SFr. 396.00	Stamm Industrieprodukte AG
	Frequenzumrichter	SFr. 486.00	1	SFr. 486.00	Stamm Industrieprodukte AG	
	Digital-Operator	SFr. 100.80	1	SFr. 100.80	Stamm Industrieprodukte AG	
Support	Tisch	Profilsystem	SFr. 981.00	1	SFr. 981.00	Kanya
	Zusatzelemente	Profile, Verbindungselemente	pauschal		SFr. 143.00	Kanya
Umformung	Rollen		pauschal	16	SFr. 1'000.00	Süssli CNC
	Lagerung	Gleitlagerbuchsen	SFr. 1.50	48	SFr. 72.00	Hydrel AG
	Lagerfuss	pauschal	32	SFr. 10.00	H. Nef	
Heizung	IR-Strahler		SFr. 3'804.00	1	SFr. 3'804.00	Wisag
Kühlung	Wasserkühlung		SFr. 103.00	1	SFr. 103.00	Migros Gartenzubehör
Temperaturmessung	Pyrometer		SFr. 151.00	1	SFr. 151.00	Fluke 61
Diverse Schrauben			pauschal	-	SFr. 80.00	
Hilfsmaterial	Al-Band			200m	SFr. 190.00	
Total Kosten					SFr. 7'809.80	
Anteil der mit M. Scapozza gemeinsam genutzt wird					SFr. 6'727.80	

Anhang E: Bewertung Umformmechanismus

Kriterien	Gewichtung	Profilierte Rollen		Rollen + Form		Luftrollen+Form		Multiwalzen, zweiseitig		Multiwalzen und Rollen		Flexible Rollen	
		gewichtet		gewichtet		gewichtet		gewichtet		gewichtet		gewichtet	
Realisierbarkeit	5	6	30	5	25	2	10	4	20	4	20	3	15
Kosten Herstellung	2	5	10	3	6	2	4	4	8	4	8	4	8
Wandstärken variabel (ohne Probleme =6, gar nicht = 1)	2	4	8	4	8	6	12	5	10	5	10	5	10
Abmessungen variabel	2	3	6	3	6	4	8	4	8	4	8	5	10
Kombinierbarkeit mit Biegung	5	5	25	4	20	4	20	5	25	5	25	5	25
Zusatzmaterial (unbedingt noetig=1, ohne = 6)	1	5	5	1	1	1	1	5	5	5	5	3	3
Druckabsetzung (Linie=3, Flaeche=6)	3	3	9	3	9	5	15	3	9	3	9	4	12
Masshaltigkeit	3	5	15	5	15	3	9	5	15	5	15	3	9
Verschmutzungsanfälligkeit	2	3	6	4	8	5	10	2	4	3	6	4	8
Temperatursteuerbarkeit/-kontrollierbarkeit	3	6	18	5	15	5	15	6	18	6	18	5	15
Oberflächenqualität (Hypothese)	2	5	10	5	10	3	6	5	10	5	10	4	8
Reproduzierbarkeit	3	5	15	5	15	3	9	5	15	5	15	4	12
Summen	33		157		138		119		147		149		135
Note			4.76		4.18		3.61		4.45		4.52		4.09
RANG			1		6		10		4		3		7

Kriterien	Gewichtung	Doppelbandpresse		Band + Rollen		Raupe		Mitlaufende Formen		Pultrusion	
		gewichtet		gewichtet		gewichtet		gewichtet		gewichtet	
Realisierbarkeit	5	4	20	4	20	3	15	1	5	5	25
Kosten Herstellung	2	3	6	3	6	2	4	2	4	4	8
Wandstärken variabel (ohne Probleme =6, gar nicht = 1)	2	3	6	3	6	1	2	1	2	1	2
Abmessungen variabel	2	3	6	3	6	2	4	2	4	2	4
Kombinierbarkeit mit Biegung	5	4	20	5	25	5	25	3	15	5.5	27.5
Zusatzmaterial (unbedingt noetig=1, ohne = 6)	1	6	6	6	6	6	6	6	6	3	3
Druckabsetzung (Linie=3, Flaeche=6)	3	6	18	4	12	5	15	6	18	6	18
Masshaltigkeit	3	4	12	4	12	6	18	6	18	6	18
Verschmutzungsanfälligkeit	2	5	10	4	8	2	4	4	8	5	10
Temperatursteuerbarkeit/-kontrollierbarkeit	3	3	9	3	9	3	9	3	9	4	12
Oberflächenqualität (Hypothese)	2	6	12	5	10	3	6	5	10	5	10
Reproduzierbarkeit	3	5	15	5	15	5	15	5	15	5	15
Summen	33		140		135		123		114		152.5
Note			4.24		4.09		3.73		3.45		4.62
RANG			5		7		9		11		2

Bewertung: 1 bis 6, 6 = sehr gut, 1 = miserabel

aufklappbar ⇨

Anhang F: Bauteilekontrolle

	Anzahl	Prinzip	Masse bekannt	2D-Zeichnungen	Offerten angefragt	Auftrag erteilt am/an	in Arbeit	Liefertermin	geliefert	vorhanden	Bemerkungen
Antrieb											
Antriebswelle	1	ok	ok	ok	ja	7.12.05 / H. Nef		Mitte Jan	03. Jan	ja	
Welle 2	2	ok	ok	ok	ja	7.12.05 / H. Nef		Mitte Jan	03. Jan	ja	
Antriebsrollen	2	ok	ok	ok	ja	7.12.05 / H. Nef		Mitte Jan	16. Jan	ja	
Lagerfuss	4	ok	ok	ok	ja	7.12.05 / H. Nef		Mitte Jan	03. Jan	ja	
Motorhalterung	1	ok	ok	ja	ja	Stebler-Co AG		20.12	19. Dez	ja	
Gleitbuchsen lose	2	-	ok		ja	29. Nov/Hydrel AG			08. Dez	ja	
Gleitbuchsen fest	4	-	ok		ja	29. Nov/Hydrel AG			08. Dez	ja	
Innensechskant, M6x35	8	-	ok			Baumgartner Eisenwaren	-	-	-	ja	
Innensechskant, M6x12	8		ok			Baumgartner Eisenwaren				ja	
U-Scheiben M6	16	-	ok			Baumgartner Eisenwaren				ja	
Sicherungsscheibe, d=10mm	4	-	ok			Baumgartner Eisenwaren				ja	
Madenschrauben, M5x5	4	-	ok			Baumgartner Eisenwaren				ja	
Passfeder, 5x20	1	-	ok			7.12.05 / H. Nef				ja	
Stirnrad d=64 mm	2				ja	27.1.06/ Güdel AG		-	31. Jan	ja	
Motor	1	-	ok		ja	25. Nov/Stamm AG		02. Dez	30. Dez	ja	Retour geschickt, neuer Motor bekommen
Steuerung	1	-	ok		ja	25. Nov/Stamm AG		02. Dez	30. Dez	ja	
Umformmechanismus											
Rolle 1 negativ	1	ok	ok	ok	ja	6. Jan / Süssli CNC		KW 03	27. Jan	ja	
Rolle 1 positiv	1	ok	ok	ok	ja	6. Jan / Süssli CNC		KW 03	27. Jan	ja	
Rolle 2 negativ	1	ok	ok	ok	ja	6. Jan / Süssli CNC		KW 03	27. Jan	ja	
Rolle 2 positiv	1	ok	ok	ok	ja	6. Jan / Süssli CNC		KW 03	27. Jan	ja	
Rolle 3 negativ	1	ok	ok	ok	ja	6. Jan / Süssli CNC		KW 03	27. Jan	ja	
Rolle 3 positiv	1	ok	ok	ok	ja	6. Jan / Süssli CNC		KW 03	27. Jan	ja	
Rolle 4 negativ	3	ok	ok	ok	ja	6. Jan / Süssli CNC		KW 03	27. Jan	ja	
Rolle 4 positiv	3	ok	ok	ok	ja	6. Jan / Süssli CNC		KW 03	27. Jan	ja	
Rolle A negativ	1	ok	ok	ok	ja	6. Jan / Süssli CNC		KW 03	27. Jan	ja	
Rolle A positiv	1	ok	ok	ok	ja	6. Jan / Süssli CNC		KW 03	27. Jan	ja	
Rolle B negativ	1	ok	ok	ok	ja	6. Jan / Süssli CNC		KW 03	27. Jan	ja	
Rolle B positiv	1	ok	ok	ok	ja	6. Jan / Süssli CNC		KW 03	27. Jan	ja	

	Anzahl	Prinzip	Masse bekannt	2D-Zeichnungen	Offerten angefragt	Auftrag erteilt am/an	in Arbeit	Liefertermin	geliefert	vorhanden	Bemerkungen
Welle 1	2	ok	ok	ok	ja	7.12.05 / H. Nef		Mitte Jan	13. Jan	ja	CI-Schleifen bei P. Wyss, gesendet 5.1.06
Welle 2	2	ok	ok	ok	ja	7.12.05 / H. Nef		Mitte Jan	13. Jan	ja	CI-Schleifen bei P. Wyss, gesendet 5.1.06
Welle 3	2	ok	ok	ok	ja	7.12.05 / H. Nef		Mitte Jan	13. Jan	ja	CI-Schleifen bei P. Wyss, gesendet 5.1.06
Welle 4	6	ok	ok	ok	ja	7.12.05 / H. Nef		Mitte Jan	13. Jan	ja	CI-Schleifen bei P. Wyss, gesendet 5.1.06
Welle A	2	ok	ok	ok	ja	7.12.05 / H. Nef		Mitte Jan	13. Jan	ja	CI-Schleifen bei P. Wyss, gesendet 5.1.06
Welle B	2	ok	ok	ok	ja	7.12.05 / H. Nef		Mitte Jan	13. Jan	ja	CI-Schleifen bei P. Wyss, gesendet 5.1.06
Lagerfuss	32	ok	ok	ok	ja	7.12.05 / H. Nef		Mitte Jan	03. Jan	ja	
Gleitbuchsen, lose	16	-	ok			29. Nov/Hydrel AG			08. Dez	ja	
Gleitbuchsen, fest	32	-	ok			29. Nov/Hydrel AG			08. Dez	ja	
Innensechskant, M6x30	64	-	ok			Baumgartner Eisenwaren				ja	
U-Scheiben M6	64	-	ok			Baumgartner Eisenwaren				ja	
Madenschrauben, M5x5	32	-	ok			Baumgartner Eisenwaren				ja	
Sicherungsscheibe, d=5mm	32	-	ok			Baumgartner Eisenwaren				ja	
Kanya-Teile											
Tisch	1	ok	ok		ja					ja	
Support+Zubehör	1					2.12.2005/Kanya		6. Dez.		ja	

Legende:

	Aktueller Prozess
	abgeschlossen
	knapp/Problem
	Alarm!

aufklappbar ⇨

Anhang G: Konstruktionszeichnungen

Die folgenden Seiten zeigen sämtliche Konstruktionszeichnungen der gefertigten Bauteile im Massstab 1:1.

Modul Antrieb

Antriebsrolle
Antriebswelle
Welle 2
Lagerfuss
Motorhalterung

Modul Umformmechanismus

Rolle A positiv
Rolle A negativ
Rolle B positiv
Rolle B negativ
Rolle 1 positiv
Rolle 1 negativ
Rolle 2 positiv
Rolle 2 negativ
Rolle 3 positiv
Rolle 3 negativ
Rolle 4 positiv
Rolle 4 negativ
Welle A
Welle B
Welle 1
Welle 2
Welle 3
Welle 4
Lagerfuss