

# Entwurf und Konstruktion eines Thermoplast-Tapelegekopfes

## Masterarbeit

verfasst von

**Patrick Pazour, BSc**

erstellt am

**Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen  
Department Kunststofftechnik  
Montanuniversität Leoben**



---

VERARBEITUNG VON  
VERBUNDWERKSTOFFEN

Betreuung: Dipl.-Ing. Dr.mont. Ewald Fauster  
Begutachtung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ralf Schledjewski

Leoben, im Mai 2012

## Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

---

Datum

---

Unterschrift

## Danksagung

Für ihr Engagement und die unermüdliche Unterstützung, ohne die meine Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen wäre, möchte ich folgenden Personen und Institutionen herzlich danken:

Meinem Betreuer Ewald Fauster, der meinen schier unaufhaltsamen Ansturm an Fragen in jeder Situation freudig beantwortete und immer wieder neue Denkanstöße für die gesamte Umsetzung der Arbeit einbrachte. Meinem Begutachter Ralf Schledjewski für die Unterstützung und Förderung sowie für die gewährten Freiräume.

Dem Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen, im speziellen Stephanie Schindlegger, Harald Grössing, Alexander Maier und Matthias Narnhofer für die vielen Hilfestellungen sowie dem kritischen Beleuchten jeder einzelnen Komponente. Den Mitarbeitern des Departments Kunststofftechnik, namentlich Martin Burgsteiner, Florian Müller, Stephan Schuschnigg, Markus Battisti, Peter Zaucher, Peter Guttmann und Eduard Leitner, die mir besonders in der Anfangsphase der Arbeit durch ihre Erfahrungen viele Ideen und Anregungen mit auf den Weg geben konnten.

Dem Prototypenbauer Peter Moharitsch, der mir mit fertigungstechnischem Rat zur Seite stand. Burhan Osmani, Christopher Rothschedl und Wolfgang Schick, die meine Berechnungen und Annahmen auf Herz und Nieren überprüften sowie wertvolle Beiträge zur statischen und konstruktiven Auslegung lieferten.

Meinen Studienkollegen Michael Kessler, Andreas Kaufmann, Hans-Jürgen Luger und Philipp Pühringer sowie meinen Freunden Wolfgang und Günter für die immer wieder aufmunternden Worte und die Verschaffung der nötigen Ablenkung.

Meiner Freundin Anita, die mich seit vielen Jahren begleitet, einen mehr als innigen Dank für die alltäglichen Kleinigkeiten. Ohne sie wäre meiner Studienzeit ein großes Maß an Qualität und Herz abhanden gekommen.

Meiner Familie, welche mir auf meinem Weg stets mental und materiell zur Seite stand.

*Die Genialität einer Konstruktion liegt in ihrer Einfachheit –  
kompliziert bauen kann jeder.*

Sergei Pawlowitsch Koroljow

## Kurzfassung

Das Ziel dieser Arbeit war die konstruktive und fertigungstechnische Auslegung eines automatisierten Tapelegekopfes (TLK) zum Ablegen endlosfaserverstärkter, vorimprägnierter thermoplastischer Bändchen/Tapes (Prepregs). Unter dem Ablege- oder auch Tapelegeverfahren versteht man das automatisierte richtungs- und positionsvariable Ablegen eines Prepregs auf komplexen Oberflächenstrukturen. Die wesentlichen Funktionsgruppen des TLK sind die Materialbevorratung, die Vorschubeinheit, der Schneidemechanismus, die Aufheizvorrichtung und das Konsolidierungssystem.

Die vier Hauptphasen der Konstruktionsmethodik (Aufgabe klären, Konzeptionieren, Entwerfen und Ausarbeiten) dienen als Grundlage für die Vorgehensweise während des gesamten Entwicklungsprozesses. Aufbauend auf einer Analyse von bestehenden Systemen sowie der vorgegebenen Rahmenbedingungen wurde das Anforderungsprofil an den TLK abgeleitet. Anschließend folgte die Konzeption der einzelnen Funktionsgruppen sowie des gesamten Aufbaus des TLK. Mithilfe von Entscheidungsmatrizen wurden die einzelnen Konzeptvarianten beurteilt und verglichen. Die sich daraus ergebenden Ausführungsempfehlungen wurden im ersten Schritt grob über Flächenmodelle im 3D-CAD System umgesetzt. Darauf aufbauend – unter Berücksichtigung der Fertigungsmöglichkeiten – wurde der TLK samt Funktionsgruppen im Detail konstruiert.

Das Resultat, der LS-I, ist ein modularer und besonders leichter Tapelegekopf. Dadurch konnte unter anderem die Prozessdynamik wie auch die Wartungsfreundlichkeit positiv beeinflusst werden. Zusätzlich wird aufgrund von Aufbau und implementierter Funktionalität eine weitestgehend gleichbleibende Ablegebewegung ermöglicht.

## Abstract

The aim of this work was the structural and production-orientated design of an automated tape placement head (TPH) for thermoplastic materials. The main function includes the placement of preimpregnated, continuous fiber reinforced tapes (prepregs). The tape placement process is defined as the automated placement of prepregs on complex surface structures at specific positions and directions. The main functional groups are the material loading unit, the feeding unit, the cutting mechanism, the heating device and the consolidation system.

The four main phases of design methodology (clarify the task, conceptual design, mechanical design and finishing) have served as a basis throughout the development process. Due to the analysis of existing TPH and the given conditions, the requirement profile has been derived. Subsequently, the concept design of individual functional groups and the entire structure of the TPH have been accomplished. By means of decision matrices, the concepts have been evaluated and compared to one another. The resulting design recommendations have been roughly implemented as surface models in a 3D-CAD system in a first step. Based on these surface models the detailed design of the TPH has been carried out. The manufacturing possibilities have been considered during this phase as well.

The result, the LS-I, is a modular and very light weight tape placement head. The process dynamics as well as the ease of maintenance have been influenced positively. Additionally, a uniform placement motion can be achieved due to the structural setup together with the implemented functionality of the TPH.

## Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung und Zielsetzung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Einleitung .....	1
1.2	Zielsetzung und Aufbau der Arbeit .....	3
<b>2</b>	<b>Theoretische Grundlagen.....</b>	<b>4</b>
2.1	Faserverbundwerkstoffe.....	4
2.2	Tapelegeverfahren .....	7
2.2.1	Historische Entwicklung .....	7
2.2.2	Technologien .....	8
2.2.3	Thermoplast-Tapelegen.....	9
2.3	Funktionsgruppen .....	11
2.3.1	Materialbevorratung und Vorschubeinheit .....	11
2.3.2	Schneidemechanismus.....	12
2.3.3	Aufheizvorrichtung .....	12
2.3.4	Konsolidierungssystem .....	13
2.4	Bestehende thermoplastische Tapelegesysteme .....	16
2.4.1	Kommerzielle Systeme .....	16
2.4.2	Forschungseinrichtungen .....	20
2.4.3	Gegenüberstellung der Zielsetzungen .....	29
2.5	Konstruktionsmethodik .....	30
2.5.1	Arbeitsfluss beim Entwickeln .....	31
2.5.2	Detaillierte Betrachtung der Hauptphasen .....	33
<b>3</b>	<b>Anforderungsprofil.....</b>	<b>37</b>
3.1	Allgemeine Anforderungen .....	37
3.2	Spezielle Anforderungen .....	38
3.2.1	Materialbevorratung und Vorschubeinheit .....	39

3.2.2	Schneidemechanismus.....	39
3.2.3	Aufheizvorrichtung .....	39
3.2.4	Konsolidierungssystem.....	40
<b>4</b>	<b>Konzeptionierung.....</b>	<b>41</b>
4.1	Aufnahmesystem .....	41
4.1.1	Tapeführung .....	46
4.1.2	Befestigung der einzelnen Funktionsgruppen.....	48
4.2	Materialzuführung .....	53
4.3	Vorschubeinheit .....	54
4.4	Schneidemechanismus .....	55
4.5	Bandpuffer.....	58
4.6	Aufheizvorrichtung.....	61
4.7	Konsolidierungssystem .....	63
<b>5</b>	<b>Konstruktive Ausführung .....</b>	<b>67</b>
5.1	Aufnahmesystem .....	70
5.1.1	Beschreibung der Funktionsgruppe.....	70
5.1.2	Mechanische Berechnungen .....	73
5.2	Materialzuführung .....	74
5.3	Vorschubeinheit .....	76
5.4	Schneidemechanismus .....	78
5.4.1	Beschreibung der Funktionsgruppe.....	78
5.4.2	Mechanische Berechnungen .....	82
5.4.3	Experimentelles .....	83
5.5	Bandpuffer.....	84
5.5.1	Beschreibung der Funktionsgruppe.....	84
5.5.2	Mechanische Berechnungen .....	87
5.6	Endführung.....	88



5.7	Aufheizvorrichtung.....	89
5.8	Konsolidierungssystem .....	89
5.8.1	Beschreibung der Funktionsgruppe .....	89
5.8.2	Mechanische Berechnungen .....	91
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>93</b>
6.1	Zusammenfassung.....	93
6.2	Schlussfolgerung.....	93
6.3	Ausblick.....	94
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>95</b>
<b>8</b>	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>98</b>
<b>9</b>	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>103</b>
<b>10</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>104</b>
10.1	Tabellen .....	104
10.2	Abbildungen .....	104
10.3	Berechnungen.....	107
10.3.1	Herleitung der Materialindizes .....	107
10.3.2	Stabilitätsberechnung des Aufnahmesystems .....	111
10.3.3	Berechnung der Sperrriegel.....	112
10.3.4	Mechanische Analyse des Schneidemechanismus .....	114
10.3.5	Bestimmung der Bandpufferlänge .....	116
10.3.6	Auslegung des Kompaktzylinders für den Bandpuffer .....	118
10.3.7	Lebensdauerberechnung der Gleitlager .....	119
10.4	Experimentelle Bestimmung der Schnittkraft.....	121

# 1 Einleitung und Zielsetzung

## 1.1 Einleitung

Ausgehend von der rasanten Entwicklung in der Luft- und Raumfahrt werden heute Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffe (FKV) mit stetig wachsendem Anteil in nahezu allen industriellen Bereichen eingesetzt, in denen die Gewichtsoptimierung von primärem Interesse ist. Dabei ist die Faserverbundbauweise keine Erfindung neuzeitlicher Technik, sondern eine Evolutionslösung der Natur. Über Jahrmillionen hinweg hat sie das am besten geeignete Leichtbauprinzip ausgebildet – die Aufnahme von Kräften durch hochfeste Fasern [1, 2].

Die durch den Verbund aus endlosen Verstärkungsfasern und polymerer Matrix hergestellten FKV zeichnen sich durch besonders hohe spezifische Steifigkeiten und Festigkeiten aus. Gegenüber den konventionellen isotropen metallischen Konstruktionswerkstoffen wie Stahl und Aluminium liegen die spezifischen Festigkeiten typischer endlosfaserverstärkter FKV um 300 % bis 2000 % und die spezifischen Steifigkeiten um bis zu 500 % höher [2, 3]. Abbildung 1.1 stellt diese beiden spezifischen Eigenschaften der verschiedenen Werkstoffe gegenüber.

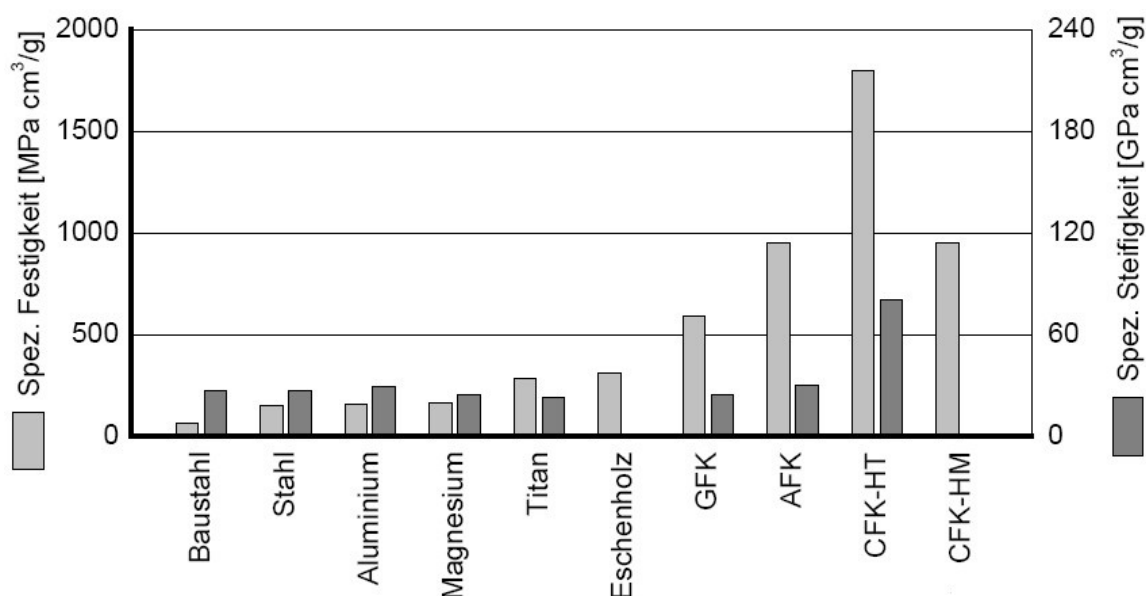


Abbildung 1.1: Spezifische Eigenschaften verschiedener Werkstoffe [3].

Ergänzend können bei Verbundwerkstoffen durch belastungsgerechte Ausrichtung der lastaufnehmenden Verstärkungsfasern zusätzliche Optimierungen beim Gewicht eines Bauteils erzielt werden. Aus diesen Punkten geht das hervorragende Leichtbaupotential dieser Werkstoffklasse hervor. Die FKV werden anhand der verwendeten Matrix in *duroplastische*, *thermoplastische* und *elastomere* Verbundwerkstoffe unterteilt [2].

Die Verfahren zur Verarbeitung von thermoplastischen FKV leiten sich in der Regel von den etablierten duroplastischen Herstellungsverfahren ab. Durch die hohen Schmelzviskositäten der Thermoplaste sind vor allem deutlich höhere Prozesstemperaturen und -drücke notwendig. Unabhängig von verwendeter Fertigungstechnologie gliedert sich die Verarbeitung endlosfaserverstärkter Thermoplaste in drei Schritte [2]: Aufheizen, Konsolidieren und Abkühlen (Erstarren).

Die wichtigsten Prozesse, die hierbei eingesetzt werden sind der Autoklav, das Thermoformen, das Pultrudieren, das Wickeln und das Ablegen. Das Ablege- bzw. Tapelegeverfahren ermöglicht die Herstellung sehr großer, funktions- und beanspruchungsgerechter Bauteile mit definierten Laminatdicken, unabhängig von eingesetzter Matrix [2, 4]. Abbildung 1.2 zeigt exemplarisch ein komplettes Tapelegesystem von Airbus.



Abbildung 1.2: Komplettes Tapelegesystem des Harbin Hafei Airbus Composite Manufacturing Centre mit Portalanlage und Ablegekopf (Quelle: [www.airbus.com](http://www.airbus.com)).

Das Verfahren bietet vor allem bei der Herstellung von komplex geformten flächigen Bauteilstrukturen in der kleinen bis mittleren Seriengröße die Möglichkeit hinsichtlich einer vollautomatisierten Produktfertigung. Die automatisierten Tapelegesysteme mit duroplastischen Matrizen sind Stand der Technik und werden fortlaufend weiterentwickelt. Es wird jedoch weiterhin ein Autoklav benötigt, in dem das Halbzeug nach dem Ablegeprozess aushärtet. Dadurch ist die Anschaffung des Tapelegesystems oftmals unwirtschaftlich. Das größte Potential hinsichtlich einer weiteren Automatisierung dieses Fertigungsprozesses liegt somit beim Thermoplast-Tapelegen. Dieser bietet die Möglichkeit zur In-Situ-Konsolidierung, hierbei entfällt der Autoklavprozess [2, 4].

## 1.2 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die konstruktive Realisierung und fertigungstechnische Auslegung eines automatisierten Tapelegekopfes (TLK) zum Ablegen von faserverstärkten thermoplastischen Tapes. Aufbauend auf einer Analyse von bestehenden Systemen sowie der vorgegebenen Rahmenbedingungen sollen die Anforderungen an den TLK abgeleitet werden. Anschließend folgt die Konzeption der konstruktiven Auslegung des TLK unter Berücksichtigung der erforderlichen Sensorik und Aktuatorik. Dieser folgend wird die Fertigung des TLK vorbereitet und begleitet um abschließend die Inbetriebnahme und erste Versuche mit dem TLK durchzuführen.

Die Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel, die sich von der Abfolge her an die systematische Konstruktionsmethodik anlehnen. Die folgende Auflistung zeigt eine kurze Beschreibung der einzelnen Kapitel auf:

- Kapitel 2 bringt die theoretischen Grundlagen näher,
- Kapitel 3 stellt das Anforderungsprofil vor,
- Kapitel 4 beschreibt die einzelnen entworfenen Konzepte,
- Kapitel 5 ermöglicht einen Einblick in die konstruktive Ausführung und
- Kapitel 6 fasst die Arbeit zusammen.

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Faserverbundwerkstoffe

Bei den Faserverbundwerkstoffen entsteht der eigentliche Werkstoff durch das Zusammenführen der gewählten Komponenten. Damit entstehen die Werkstoffeigenschaften erst bei der Verarbeitung aus den stark unterschiedlichen Eigenschaften der eingesetzten Materialien [1].

Die Eigenschaften von Faserverbundwerkstoffen (FVW) resultieren aus der Kombination von Verstärkungsfasern und des sie umschließenden Matrixmaterials, wobei die Leistungsfähigkeit des Materialverbundes die Summe der Eigenschaften der Ausgangsmaterialien übersteigt [2]. Abbildung 2.1 zeigt beispielhaft zwei FVW mit unterschiedlichem Einzelschichtaufbau. Links ist ein quasiisotroper Aufbau dargestellt, dieser verhält sich bezüglich spezifischer Eigenschaften wie ein isotroper Werkstoff. Rechts ist ein Sandwichaufbau (dünne, sehr *steife Deckschicht* und dicke, „*weiche*“ *Mittelschicht*) illustriert. Verwendung findet der Sandwichaufbau z. B. in der Ski- und Snowboardindustrie.

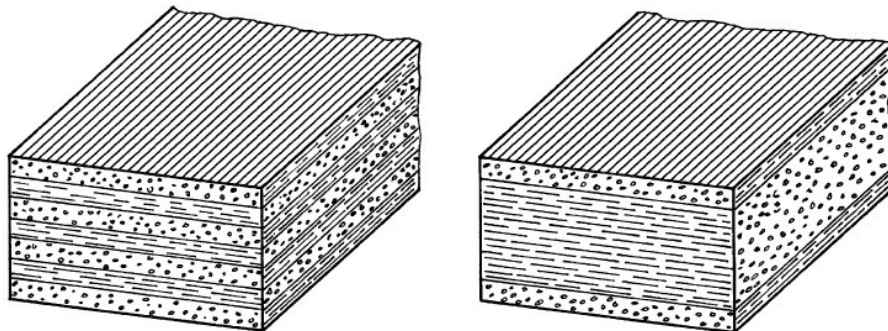


Abbildung 2.1: FVW mit unterschiedlichem Einzelschichtaufbau, links: quasiisotroper Aufbau, rechts: Sandwichaufbau [1].

Hierbei kommt bei Verstärkungsfasern die besondere Eigenschaft zu tragen, dass die Zugfestigkeiten und E-Moduli von Feststoffen mit abnehmendem Durchmesser zunehmen. Erklärt wird dieses Paradoxon mit der geringer werdenden Fehlstellenwahrscheinlichkeit bei abnehmendem Volumen [2].

Das Matrixmaterial hat die Aufgabe, die Fasern in der gewünschten geometrischen Anordnung zu fixieren, Kräfte auf die Fasern zu übertragen, die Fasern bei Druckbelastung zu stützen sowie die Fasern vor schädlichen Umgebungseinflüssen zu schützen. Aufgrund des breiten Eigenschaftsspektrums eignen sich vor allem Kunststoffe als Matrixmaterial, wobei als Matrix in FKV *Duroplaste*, *Thermoplaste* und *Elastomere* Verwendung finden [2, 3]:

Die Makromoleküle der Duroplaste bestehen aus tri- oder multifunktionellen Monomeren. Der endgültige, feste Formstoff entsteht durch eine chemische Vernetzungsreaktion, die sogenannte *Härtung*. Diese Art der Duroplaste wird demzufolge als Reaktionsharz, kurz Harz (engl.: resin), bezeichnet. Um die Reaktion in Gang zu setzen, muss vor der Verarbeitung eine weitere Komponente, der sogenannte Härter zugemischt werden. Harz und Härter vernetzen irreversibel *räumlich engmaschig* zu hochmolekularen Polymeren (Abbildung 2.2b). Die Anordnung der Molekülketten ist ungeordnet, d. h. Duroplaste sind *amorph*. Die Formgebung erfolgt vor der Aushärtung. Die positiven Auswirkungen der engen, dreidimensionalen Vernetzung stellen für ein kostengünstiges Recycling der Duroplaste ein erhebliches Hindernis dar. Ein einfaches Aufschmelzen mit anschließender neuer Formgebung, wie bei den Thermoplasten, ist nicht möglich. Zusätzlich ist bei Verwendung duroplastische Matrixsysteme der erhöhte Sicherheitsaspekt bzw. -aufwand für die Verarbeitung der verwendeten Stoffe (Harze, Härter, Lösungsmittel) zu beachten. Bei duroplastischen Matrices unterliegt der Verarbeitungsprozess, unabhängig von seinem Automatisierungsgrad, immer einem zeitintensiven Aushärtezyklus im Stundenbereich (Autoklav), was einer erfolgreichen Produktivitätssteigerung im Wege steht [1, 2].

Die Thermoplaste bestehen aus linearen oder verzweigten Makromolekülen, sind *amorph* (Abbildung 2.2a) oder *teilkristallin* (Abbildung 2.2c) und sind *räumlich nicht vernetzt*. Aufgrund von Verfilzungen, Verhakungen und Verschlaufungen sowie Kristallitbildung existieren aber *Nebervalenzbindungen*. Sie bewirken den Zusammenhalt der untereinander chemisch *nicht gebundenen Makromoleküle* und verhindern deren Abgleiten bei Einwirkung von Kräften [1, 2].

Erst bei Temperaturzunahme vergrößert sich aufgrund der zunehmenden Mikrobrownschen Molekularbewegung der Kettenabstand. Die Thermoplaste können dann plastisch verformt werden. Bei noch höheren Temperaturen werden schließlich die physikalischen Bindungen überwunden und die Ketten können von einander abgleiten. Der Thermoplast befindet sich damit im Bereich einer hochviskosen Flüssigkeit, d. h. er ist geschmolzen. Dieser Vorgang ist *reversibel* und kann, soweit die Moleküle chemisch nicht geändert werden, beliebig oft wiederholt werden. Der Einsatzbereich von thermoplastischen Matrices in FKV wird jedoch durch ihre ausgeprägte Kriechneigung eingeschränkt, die den Einsatztemperaturbereich begrenzt. Der Prozess der thermoplastischen Faserverbundherstellung verläuft im Vergleich zu duroplastischen Systemen deutlich schneller, da das Polymer über den physikalischen Effekt des Abkühlens erstarrt. Hierdurch ist eine In-Situ-Konsolidierung möglich. Dies entspricht einer Konsolidierung parallel zum Verarbeitungsprozess [1, 2].

Die Elastomere sind, ähnlich wie die Duroplaste, nach ihrer Aushärtung nicht mehr schmelzbar. Sie bilden während ihrer Aushärtung weitmaschige Querverbindungen (Abbildung 2.2d) zwischen den einzelnen Molekülketten aus, die zäh-harte bis weich-elastische Eigenschaften zur Folge haben. Die weitere Verarbeitung erfolgt mit niedrigviskosen Gießelastomeren, Elastomerlösungen oder Dispersionen und anschließender Aushärtung [3].

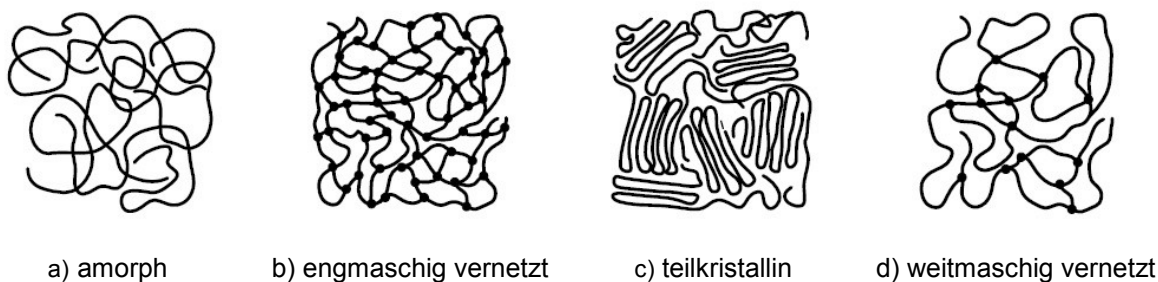


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Kettenstruktur verschiedener Polymere [1].

## 2.2 Tapelegeverfahren

Unter dem Ablege- oder auch Tapelegeverfahren versteht man das automatisierte richtungs- und positionsvariable Ablegen eines Prepregs auf komplexen Oberflächenstrukturen. Das sogenannte Prepreg (engl.: **preimpregnated**) bzw. Tape ist ein vorimprägniertes bändchenförmiges, unidirektional verstärktes Halbzeug [2].

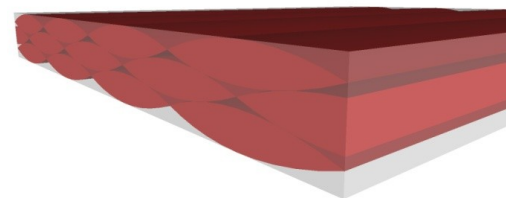
### 2.2.1 Historische Entwicklung

Das Tapelegeverfahren entstand um 1960 aus dem Bedürfnis, automatisiert große Flugzeugrumpfstrukturen herzustellen. Ziel war es einen geringen Treibstoffverbrauch bei gleichzeitig großer Lastaufnahme mit Hilfe eines extrem steifen Leichtbaus zu realisieren [4].

Durch die in den frühen 1960ern erfundenen unidirektionalen Tapes (UD-Tape, siehe Abbildung 2.3) konnte das Material beanspruchungsgerechter und sparer eingesetzt werden. Die Entwicklungsstufen des Tapelegens beginnen mit dem Handlaminieren gehen zum maschinengestützte Handlaminieren (Flintstone-Maschinen) über und Enden beim NC-Tapelegen [4, 5].



a) Beispiel eines UD-Tapes der Fa. Oxeon (Quelle: [www.oxeon.se](http://www.oxeon.se)).



b) Schematischer Tapequerschnitt, der aus mehreren kompaktierten Einzelrovings besteht.

Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau und Lieferform eines UD-Tapes.

Seit 1965 wird das Tapelegen für duroplastische Werkstoffe im industriellen Maßstab eingesetzt. 1978 wurde die erste kommerzielle Duroplast-Tapelegeanlage von Ingersoll Milling an General Dynamics ausgeliefert [4].

Das Duroplast-Tapelegen war der erste automatisierte Prozess für Primärstrukturen von Flugzeugen (wie z. B. B-2 „Spirit“, F-117 „Nighthawk“ oder B-1 „Lancer“)



und wurde vor allem in der militärischen Luftfahrt eingesetzt, Abbildung 2.4 zeigt beispielhaft zwei Projekte [5].



a) F-117 „Nighthawk“

(Quelle: [www.airforce-technology.com](http://www.airforce-technology.com))



b) B-2 „Spirit“

(Quelle: <http://www.defenseindustrydaily.com>)

Abbildung 2.4: Exemplarische Projekte für automatisiertes Tapelegen von Primärstrukturen bei Kampfflugzeugen.

Anfangs wurden Anlagen entwickelt, die ähnlich dem Handablegen ein einzelnes breites Band auf ebenen oder leichtgekrümmten Oberflächen ablegen. Aus dem Bedürfnis, komplexere Bauteilformen herzustellen wurde das Multi-Tapelegeverfahren zur Verarbeitung faserverstärkter Duroplaste entwickelt (engl.: Fiber Placement). Als Halbzeuge kommen mehrere schmale Tapes gleichzeitig zum Einsatz. Erst nach 1980 wurden die ersten Anlagen zur Verarbeitung von Thermoplast-Tapes aufgebaut [4, 6].

### 2.2.2 Technologien

Es wird zwischen zwei verschiedenen Technologien unterschieden: Die erste, für diese Arbeit relevante, ist das *Contour Tape Laying*, bei dem ein Tape auf einer gewölbten (konturierten) Oberfläche abgelegt wird. Die zweite Variante ist das *Flat Tape Laying*, hierbei werden flächige Lamine verarbeitet [5].

Die Technologien für die Materialzuführung werden wie folgt unterteilt: Beim *Ein-Stufen* Prozess wird das Tape durch einen TLK gefördert und je abgelegter Bahn auf die erforderliche Form und Länge zurechtgeschnitten. Dieses Verfahren ist Standard in der Industrie und wird auch in dieser Arbeit weiter verfolgt. Der *Zwei-Stufen* Prozess zeichnet sich dadurch aus, dass die Tapebahnen offline zuge-schnitten, auf Spulen aufgewickelt und wiederum dem TLK zugeführt werden [4].

Das Verfahren weist gegenüber dem Ein-Stufen Prozess einige Vorteile auf. Dazu zählen z. B. die geringere Baugröße des TLK und die nahezu beliebige Kontur des abzulegenden Tapes. Der abschließende *kombinierte Stufen-Prozess* vereint den Ein- mit dem Zwei-Stufen Prozess auf einem TLK und stellt die effektivste Variante der Materialzuführung dar [4, 5].

### 2.2.3 Thermoplast-Tapelegen

Beim Thermoplast-Tapelegen sind die Verstärkungsfasern vollständig mit der thermoplastischen Matrix imprägniert und konsolidiert und werden als im Querschnitt rechteckig kalibriertes Tape zugeführt. Der Faservolumenanteil des finalen Bauteils wird durch den Faservolumenanteil des Prepregmaterials definiert [2].

Die Anlagentechnik und der Prozess des Tapelegens sind in Abbildung 2.5 schematisch dargestellt. Zur Positionierung und Orientierung des Tapelegekopfes auf großflächigen Strukturen dient in der Regel ein Mehrachsportalsystem. Auf diesem sind sowohl die Tape-Spule als auch der TLK montiert [4].

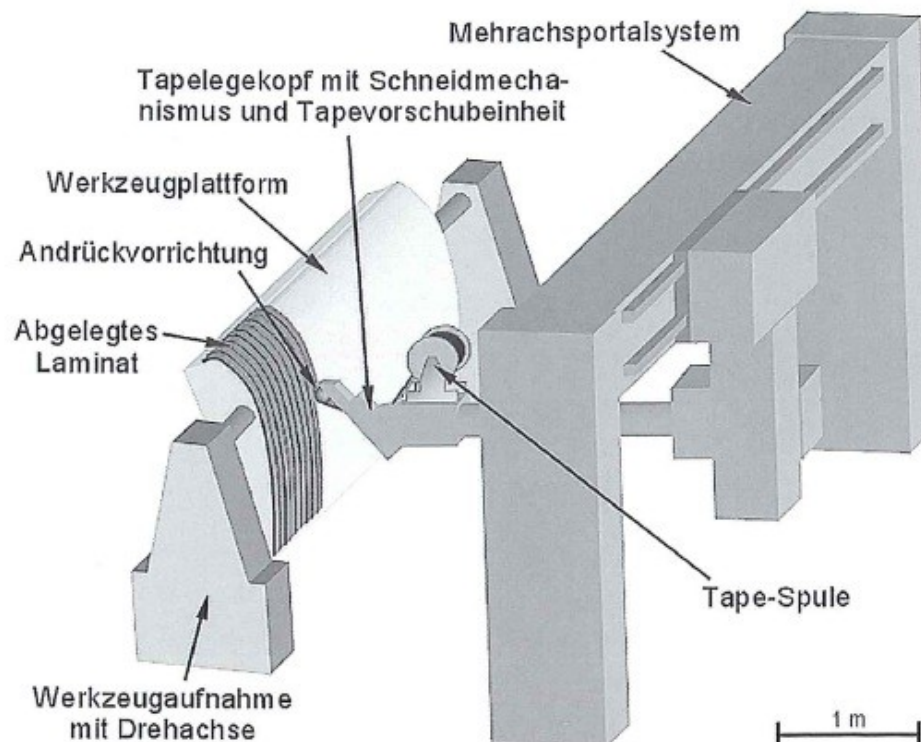


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der maßgeblichen Funktionsgruppen für das Tapelegen [4].

Die wesentlichen Funktionsgruppen des TLK sind die *Materialbevorratung*, die *Vorschubeinheit* und der *Schneidemechanismus*. Zum Aufschmelzen des thermoplastischen Tapes ist eine *Aufheizvorrichtung* installiert. Die abschließende Einheit ist das *Konsolidierungssystem* und dient zum Kompaktieren und Konsolidieren des Tapes. Beim thermoplastischen Tapelegen wird das Prepregmaterial zu Beginn einer neuen Ablegelinie (Bahn) durch die Vorschubeinheit bis zur Konsolidierungsrolle vorgeschoben [6].

Nach Absenken der Konsolidierungsrolle zum Aufbringen des zur Konsolidierung erforderlichen Drucks wird durch Energieeintrag der Aufheizvorrichtung in den Bereich zwischen Werkzeug und Tape (Zwickelbereich) das neue Prepreg mit den bereits abgelegten Lagen verschmolzen [2]. Abbildung 2.6 stellt den Ablauf schematisch dar.

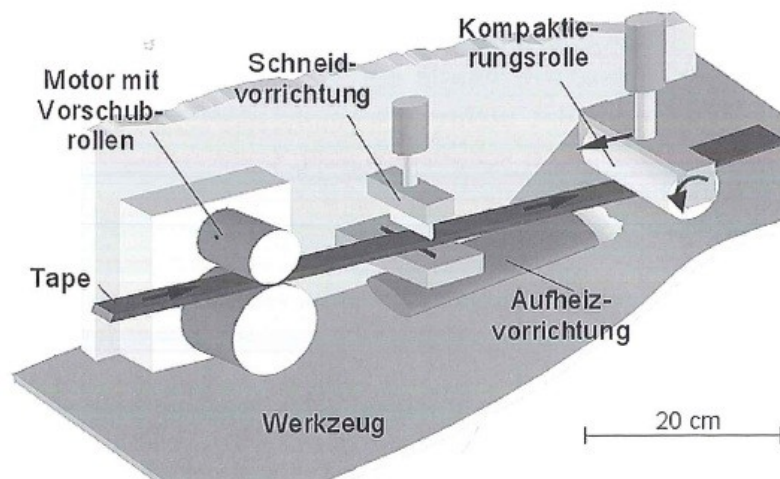


Abbildung 2.6: Aufsetzen und Ablegen des Tapes [4].

Als besondere Eigenschaft lässt sich festhalten, dass es wenige Einschränkungen hinsichtlich der herstellbaren Bauteilgrößen gibt. Ebenso lassen sich, in Abhängigkeit von der Verfügbarkeit, quasi alle am Markt verfügbaren Materialkombinationen prinzipiell mit diesem Verfahren verarbeiten [2, 6].

Lediglich die minimale Bauteilgröße und die Bauteilkomplexität sind begrenzt. Die minimale Bauteilgröße ergibt sich aus der minimalen Schnittlänge eines Tapes, diese resultiert wiederum aus dem Abstand von Konsolidierungsvorrichtung zu Schneidemechanismus [2, 6].

Die Bauteilkomplexität ist aufgrund der konstruktiven Eigenart des TLK sowie der Prozessführung eingeschränkt. Als entscheidender Prozessparameter ist neben der Konsolidierungskraft und der Ablegegeschwindigkeit die Temperatur zu nennen [2, 6].

Die nachkommende Auflistung und Abbildung 2.7 zeigen einige entscheidende Vorteile gegenüber den herkömmlichen Metall- und FKV-verarbeitenden Verfahren [6]:

- Autoklav-freie Fertigung durch In-Situ-Konsolidierung,
- Vermeidung von Harzresten bzw. Ablagerung von überschüssigem Harz,
- Vermeidung von Emissionen (wie etwa bei offenen Harzbädern).



Abbildung 2.7: Einige Vorteile des automatisierten Tapelegeverfahrens [4].

Aus den angeführten Vorteilen lässt sich das große Potential der weiteren Automatisierung des Fertigungsprozesses für Tapelegeverfahren von thermoplastischen Matrizen ableiten, da hierbei der langwierige Autoklav- bzw. Aushärteprozess entfallen kann. Gleichzeitig erlaubt das schnelle Abkühlen beim thermoplastischen FKV das Legen von konkaven und nicht geodätischen Bahnen [2].

## 2.3 Funktionsgruppen

### 2.3.1 Materialbevorratung und Vorschubeinheit

Die *Materialbevorratung* und die Materialzuführung haben die Aufgabe, das zur Bauteilherstellung benötigte Prepregmaterial für ein spalt- und überlappungsfreies

Ablegen bereitzustellen. Aufgrund der Anforderung hinsichtlich der Herstellung flächiger Strukturen mit multiaxialen Laminataufbau ist es von Vorteil, das Halbzeugmaterial mit dem TLK mitzuführen.

Die *Vorschubeinheit* hat die Aufgabe, bei Beginn einer neuen Bahn das mitgeführte Prepreg bis zum Werkzeug bzw. bis zur Konsolidierungsrolle zu fördern [2].

### 2.3.2 Schneidemechanismus

Der Schneidemechanismus trennt das Material am Ende einer Bahn auf und wird zur Herstellung eines Bauteils mehrere hundert- oder tausendmal aktiviert. Daher muss er nicht nur eine hohe Standzeit sondern auch hinsichtlich der erzeugten Materialtrennung eine hinreichende Genauigkeit bzw. Reproduzierbarkeit aufweisen. Der Schneidemechanismus muss an Prozessanforderungen wie Material, Tapequerschnitt, Schnittgeometrie und Prozessgeschwindigkeit angepasst werden, damit ein Bauteil konturgenau hergestellt werden kann [6].

### 2.3.3 Aufheizvorrichtung

Die Aufheizvorrichtung erbringt den definierten Eintrag der erforderlichen Energiemenge zum Aufschmelzen der Prepregs. Um qualitativ hochwertige thermoplastische Verbundbauteile herzustellen, sollte die Prozesstemperatur (Ist-Temperatur) von der optimalen Verarbeitungstemperatur (Soll-Temperatur) nur minimal abweichen. Die maßgeblichen physikalischen Faktoren für die Auswahl einer geeigneten Aufheizvorrichtung – in Abhängigkeit des zu verarbeitenden Prepregs – sind wie folgt [2, 4, 6]:

- Eine *hohe Wärmestromdichte* und die *Volumenabsorption* (Absorption über das gesamte Volumen) sind aus Effizienzgründen anzustreben.
- *Geringe Ansprechzeiten* helfen die Regelung zu optimieren.
- Eine *berührungslose Energieeinkopplung* vermindert die Gefahr einer Schädigung der Oberfläche (Thermischer Abbau bzw. Oxidation) und ist regelungstechnisch besser erfassbar.

Ergänzend zu den physikalischen Punkten, sind auch einige wirtschaftliche Aspekte zu berücksichtigen [4, 6]:

- Dazu zählen *geringe Anschaffungskosten*,
- ein möglichst kleiner Bauraum bzw. *kompakte Bauweise* und
- eine *einfache Handhabung*.

Dafür stehen diverse Systeme zur Verfügung, ein ausführlicher Vergleich ist in den Arbeiten von Neitzel [4] und Beresheim [6] zu finden. Ein beispielhaftes System für eine Aufheizvorrichtung mit Heißgasdüse ist in Abbildung 2.8 dargestellt.

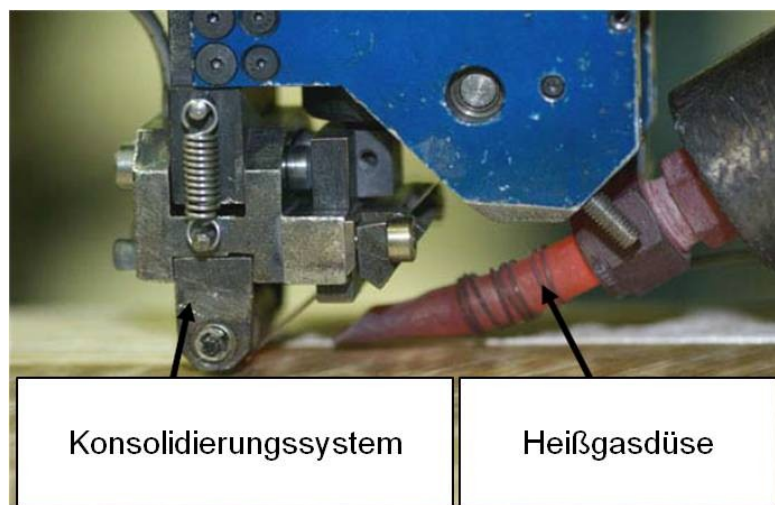


Abbildung 2.8: TLK mit Heißgasdüse, Konsolidierungssystem und Tafelführung [7].

### 2.3.4 Konsolidierungssystem

Die Aufgabe des Konsolidierungssystems ist es, die durch die Aufheizvorrichtung aufgeschmolzenen und schichtweise auf einem Kern oder einer Form abgelegten Prepregs unter Druck zu kompaktieren. Das Konsolidierungssystem bewirkt eine Annäherung der aufgeschmolzenen Matrix-Oberflächen sowie die Ausbildung einer gemeinsamen Oberfläche. Dadurch können Polymerdiffusion und schließlich Konsolidierung unter Wärmeabfuhr erfolgen [2, 6].

Neben dem Anpressdruck hat die Temperaturführung des Konsolidierungssystems eine große Bedeutung für die zu erreichende Qualität. Es wird primär zwischen drei verschiedene Konfigurationen des Konsolidierungssystems unterschieden [6, 7]:



Der Aufbau mit einer *einzelnen Konsolidierungsrolle* (siehe Abbildung 2.9) resultiert in einer kompakten Bauweise des TLK und wird in den Systemen von mehreren kommerziellen Herstellern (Automated Dynamics, Coriolis, etc.) bevorzugt eingesetzt. In dieser Ausführung werden alle benötigten Komponenten im TLK mitgeführt. Das Ablegen auf geometrisch komplexen Strukturen ist durch die Flexibilität des Roboterarms und die Einsetzbarkeit unterschiedlicher Rollengrößen relativ einfach durchzuführen [7].

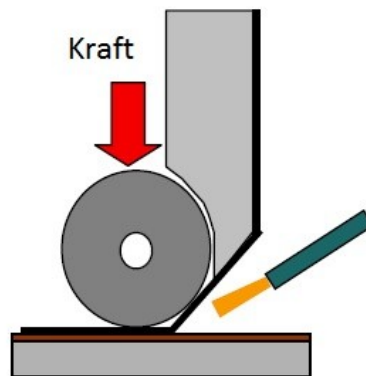


Abbildung 2.9: Schema einer TLK Konfiguration mit einer einzelnen Konsolidierungsrolle und Aufheizvorrichtung [7].

Um dem Bedarf einer verbesserten Konsolidierung gerecht zu werden, wurden Systeme mit *mehreren Aufheizvorrichtungen und Konsolidierungsrollen* realisiert. Die erste Energiequelle erhitzt entweder das Substrat (Werkzeug bzw. zuvor abgelegtes Tape) selbst oder die Grenzfläche zwischen dem zugeführten Tape und dem Substrat. Dadurch wird der Bindungsprozess initiiert, die Konsolidierung beginnt mit einer Krafteinbringung durch die erste Rolle. Das abgelegte Tape und das partiell konsolidierte Laminat werden durch die zweite Energiequelle erneut aufgeschmolzen und nochmalig durch eine Konsolidierungsrolle kompaktiert um die interlaminare Bindung zu verbessern. Abbildung 2.10 stellt das eben vorgestellte Konzept grafisch dar [7].

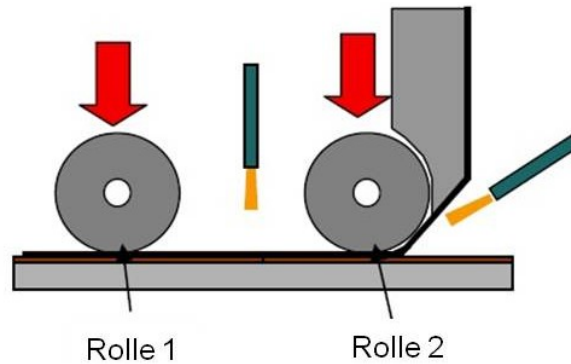


Abbildung 2.10: Schema einer TLK Konfiguration mit jeweils zwei Konsolidierungsrollen und Aufheizvorrichtungen [7].

Um Laminat nicht nur mit höheren mechanischen Eigenschaften sondern auch mit überragender struktureller Qualität herzustellen, ist es notwendig, Vakuumeinschlüsse im Tape zu minimieren. Dazu wird das Konzept der Rollen um die Komponenten des *Konsolidierungsschuhs* (Schema siehe Abbildung 2.11) erweitert. Die erste Aufheizvorrichtung erwärmt das Substrat während die zweite das zugeführte Tape erhitzt. Die beiden Rollen erwärmen bzw. kühlen das Laminat. Die erste Rolle verwirklicht den Kontakt zwischen Substrat und zugeführtem Tape. Der darauffolgende temperierte Schuh hält die erforderliche Temperatur ausreichend lange aufrecht um den längeren Molekülketten die Polymerdiffusion zu ermöglichen. Die zweite Rolle konsolidiert, kühlt das Material unterhalb der Schmelztemperatur und verkleinert die Poren. Ein gekühlter Schuh verlängert den Abkühlungsprozess bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung des Konsolidierungsdruckes um der Dekonsolidierung der Poren entgegenzuwirken [7].

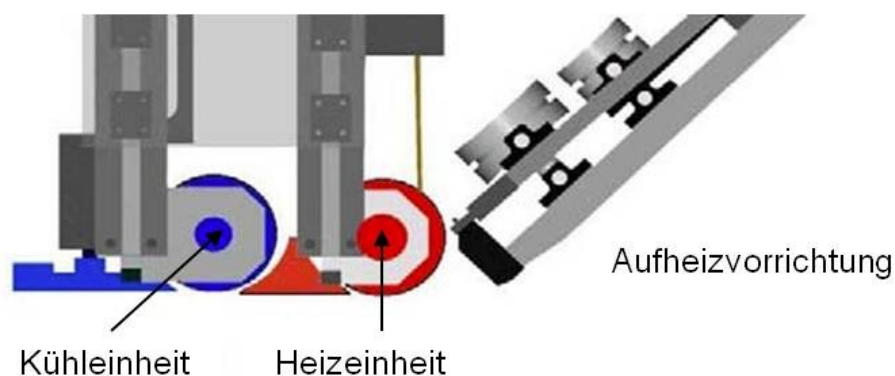


Abbildung 2.11: Schema einer TLK Konfiguration mit unterschiedlich temperierten Konsolidierungsschuhen [7].



## 2.4 Bestehende thermoplastische Tapelegesysteme

Die Angaben von Kölzer [2] und Beresheim [6] zu den bestehenden thermoplastischen Tapelegesystemen sind aufgrund der fortwährenden Entwicklung nicht mehr aktuell. Die Daten werden dennoch genannt um einen grundlegenden Überblick zu ermöglichen.

### 2.4.1 Kommerzielle Systeme

In alphabetischer Reihenfolge:

#### **Accudyne Systems, Inc.**

Das Unternehmen Accudyne Systems hat unter anderem komplette Tapelegesysteme in seinem Produktportfolio. Es können max. 3“ breite Tapes auf einer Fläche von 1 x 1 m<sup>2</sup> abgelegt und via Elektronenstrahl, Ultraschall oder Flamme verarbeitet werden [8]. Abbildung 2.12 zeigt einen exemplarischen Aufbau.

Für den Kooperationspartner Boeing wurde ein thermoplastischer TLK ausgelegt, hergestellt, installiert und bedient. Dieser stellt erfolgreich thermoplastische Strukturen her, eine Härtung im Autoklav, wie sie bei duroplastischen Halbzeugen notwendig ist, entfällt. Die Prepregs werden im TLK zugeschnitten, auf etwa 400 °C erwärmt und durch eine temperierte Konsolidierungsrolle unter Druck kompaktiert [8]. Die verwendeten Materialien sind nicht bekannt, aufgrund der verwendeten Temperatur kann jedoch auf PEEK als Matrixmaterial geschlossen werden.



Abbildung 2.12: Komplettes Tapelegesystem von Accudyne Systems [8].

In einem NASA Projekt wurde von Accudyne ein Konzept für ein flexibles Konsolidierungssystem (siehe Abbildung 2.13) entwickelt, welches momentan nur für Testzwecke in Forschungseinrichtungen gefertigt wird [8].



Abbildung 2.13: Flexibles Konsolidierungssystem von Accudyne Systems, das die Kontur eines Hammers nachbildet [8].

### **Automated Dynamics Ltd.**

Die thermoplastischen Tapelegesysteme der Firma Automated Dynamics sind in der Lage Tapes von 1“ bis 12“ Breite entweder einzeln oder gleichzeitig abzulegen. Bei der Mehrfachablage werden Tapes bis 3“ Breite verwendet [9].

Die Vorschubeinheit wurde mittels Elektromotor umgesetzt und der Schneidemechanismus wurde pneumatisch betätigt. Die Aufheizung des Tapes erfolgte mittels patentiertem Stickstoff-Heißgas-Brenner mit 1,5 kW Leistung bei ca. 1000 °C und einem Volumenstrom von 47 l/min [2, 6].

Des Weiteren wurde der TLK mit einem Infrarot Pyrometer und einem Sensor für die Konsolidierungskraft ausgestattet. Zusätzlich erfolgte eine Temperaturmessung mit einem berührenden Sensor im Heißgasstrom. Die Steuerung erfolgte mittels einer Windows-basierten Software [2, 6]. Abbildung 2.14 zeigt eine Aufbauvariante des TLK.

Neuere Entwicklungen beschäftigen sich mit der Implementierung von Laseraufheizsystemen. Diese versprechen eine hohe Energiedichte, Effizienz und schnelle Ansprechzeiten. Die dafür benötigten Hochenergielaser sind aufgrund der modernen Festkörperlaserdioden ökonomisch realisierbar [10].

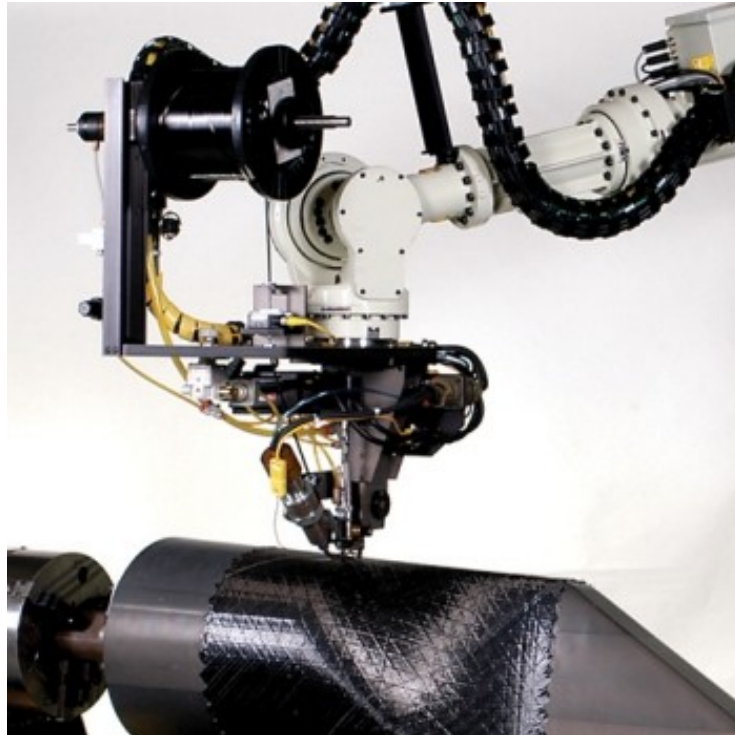


Abbildung 2.14: Variante des TLK von ADC mit einer am Kopf mitgeführten Spulenbevorratung [9].

### **Coriolis Composites**

Die Technologie des Unternehmens Coriolis Composites beruht auf Standard-Industriekomponenten wie etwa einem 6-Achsen-Knickarmroboter. Erweitert wird das Konzept durch eine 8-Achsen-Roboterzelle mit  $3 \times 3 \times 8 \text{ m}^3$  Arbeitsvolumen samt Positionierer mit bis zu 5 Tonnen Tragfähigkeit [11].

Der TLK resultiert aus einer intensiven zehnjährigen Entwicklung, wiegt unter 50 kg und ist patentrechtlich geschützt. Bei diesem TLK ist es gelungen, Achsen und Aktuatoren räumlich sehr kompakt aufzubauen, daraus resultiert eine hohe Prozessdynamik, selbst bei komplexen Oberflächenkonturen [11].

Es kommen ausschließlich elektrische oder elektropneumatische Aktuatoren zum Einsatz. Der Kopf besteht aus drei Einheiten [11]:

- Der Aufheizvorrichtung,
- der Führungseinheit sowie
- der beweglichen Einheit mit Schneiden und Restart-Rollen, Führungsrinnen und elektropneumatischen Aktuatoren.

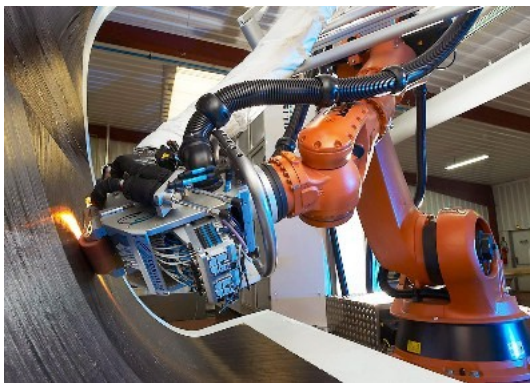
Die Hauptdaten ergeben sich wie folgt [11]:

- Rollenbreite: 8 x ¼“ (50 mm) bis 32 x ¼“ (150 mm),
- Gewicht: 50 kg bis 70 kg für den gesamten Kopf,
- Minimale Faserlänge auf einer ebene Fläche: 80 mm,
- Höchstgeschwindigkeit während der Faserablage: 1 m/s
- Höchstgeschwindigkeit zwischen zwei Bahnen: 2 m/s,
- Konsolidierungskraft von 100 N bis 1500 N für Waben, Inserts und komplexe Formen variabel einstellbar.
- Eine regelbare Infrarot Lampe erwärmt die Formoberfläche von 30 °C bis 200 °C.

Es können folgende Genauigkeiten erreicht werden [11]:

- Schneid- und Restart Genauigkeiten:  $\pm 0,5$  mm,
- Schneid- und Restart Genauigkeiten on the fly:  $\pm 2$  mm,
- Schneid- und Restart Genauigkeiten on-the fly mit 0,3 m/s:  $\pm 2$  mm.

Die Faserführung erfolgt durch speziell entwickelte Röhren zur reibungsreduzierten Führung der Fasern vom Spulengatter zum Roboterkopf. Hinzu kommt ein System zur Spannungsreduzierung direkt am Spulengatter. Abbildung 2.15 zeigt die gesamte Roboterzelle [11].



a) Detailansicht auf den TLK während des Ablegeprozesses.



b) Sicht auf die gesamte Roboterzelle (Positionierer, Knickarmroboter samt TLK und Spulengatter).

Abbildung 2.15: Systemlösung von Coriolis Composites mit eigens entwickelten TLK [11].

## MAG

Die Firma MAG (vormals Cincinnati Machine) bietet serienreife kommerzielle Anlagen zur Verarbeitung von duroplastischen Tapes an. Mitte der 80er Jahre wurde auch ein Thermoplast-Tapelegekopf entwickelt [2, 6].

Der thermoplastische TLK wurde hängend an einer Portalachsenanlage mit einer rotatorischen und drei translatorischen Achsen montiert. Die Aufschmelzung erfolgte durch drei Heizschuhe, die Konsolidierung über zwei nachfolgende Kühlschuhe. Die Prepregs wurden durch ein umlaufendes Stahlband geschützt [2, 6].

Nachteilig zu erwähnen ist, dass aufgrund des extrem großen Bauraums nur ebene bzw. leicht gekrümmte Bauteile herstellbar sind. Hinzu kommt die aufwändige Reinigung des Stahlbandes [2, 6].

Neuere Entwicklungen auf diesem Gebiet entstanden in Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR). Abbildung 2.16 stellt zwei Robotereinheiten (links: Fiber Placement, rechts: Tapelegen) für simultane und hochdynamische Ablegeprozesse dar [12, 13].



Abbildung 2.16: Kooperative Robotereinheiten für simultanen und hochdynamischen Ablegeprozess [12].

### 2.4.2 Forschungseinrichtungen

In alphabetischer Reihenfolge:

### **ABB Corporate Research**

Zum Einsatz kam der TLK des Unternehmens Automated Dynamics, der auf dem hauseigenen IRB 6400 6-Achsen-Knickarmroboter montiert wurde. Der eingesetzte Knickarmroboter hatte eine Wiederholgenauigkeit von 0,1 mm bei einer Nutzlast von 200 kg. Es waren maximale Ablegegeschwindigkeiten von 5 m/min möglich und die Anlage kam vornehmlich beim Wickeln zum Einsatz. Die Aufheizung des Tapes erfolgte wahlweise über einen Stickstoff-Heißgas-Brenner, über Infrarot oder einen Nd:YAG-Laser. Die Steuerung der Laserleistung übernahm ein neuronales Netzwerk-Modell [6].

Des Weiteren wurden der Gasmengenstrom, die Konsolidierungskraft, die Tapespannung und die Position des TLK geregelt. Die Temperatur wurde gleichzeitig an vier Stellen über Infrarot Pyrometer erfasst. Die softwareseitige Ansteuerung und Überwachung des Prozesses erfolgte über eine LabView-Benutzeroberfläche [6]. Neuere Entwicklungen sind nicht bekannt.

### **Advanced Manufacturing Research Centre – Universität Sheffield**

Das Advanced Manufacturing Research Centre (AMRC) der Universität Sheffield beschäftigt sich im Forschungsbereich Composites mit folgenden drei Kernthemen [14]:

- *Automatisierte Herstellprozesse* für höhere Durchsätze,
- *Bearbeitung* von FKV und FVW,
- *Erwärmung bzw. Aushärtung mittels Mikrowellen* für thermoplastische und duroplastische Matrixmaterialien.

Dem AMRC stehen drei TLK des Unternehmens ADC zur Verfügung. Einer davon ist für die Verarbeitung von thermoplastischen Tapes in Verwendung. Die neueste Anschaffung ist in Abbildung 2.17 dargestellt. Bei diesem TLK werden 4 Bahnen von duroplastischen ¼“-Tapes gleichzeitig abgelegt [9, 14].





Abbildung 2.17: TLK von ADC mit Multispulenbevorratung im Einsatz beim AMRC an der Universität Sheffield [9].

### **Center for Composite Materials – Universität Delaware**

Bisher wurden zwei TLK am Center for Composite Materials (CCM) entwickelt, in der zweiten Generation sind die wesentlichen Elemente beibehalten und bestehende Systeme optimiert worden. Der eingesetzte 6-Achsen-Knickarmroboter hatte einen Arbeitsradius von 1,25 m bei einer Wiederholgenauigkeit von 0,2 mm. Der TLK hatte eine Masse von 21 kg und führte eine 380 m Tapespule mit. Dieses System konnte CF/PEEK-Prepregs mit Geschwindigkeiten bis zu 1,2 m/min verarbeiten [2, 6].

Die elektromagnetische Bremse stellte Zugkräfte von 5 N bis 200 N ein. Zur Aufheizung des Tapes wurden zwei Stickstoff-Heißgasdüsen (max. 1000 °C) von ADC mit je 1,1 kW und ca. 50 l/min Durchfluss verwendet. Der TLK führte zwei Rollen mit: eine zur Vor- und eine für die Hauptkonsolidierung. Die Konsolidierungskraft konnte zwischen 0 N und 350 N variiert werden. Ein Brenner wurde als Vorheizdüse genutzt, der den Zwickelbereich vor der Vorkonsolidierungsrolle erwärmt [2, 6].

Der zweite Brenner erhitzte das bereits abgelegte Band. Zusätzlich ergab sich ein Schneidpuffer durch die Verwendung eines Schwenkarmes [2, 6]. Abbildung 2.18 zeigt diesen TLK des CCM im Detail.

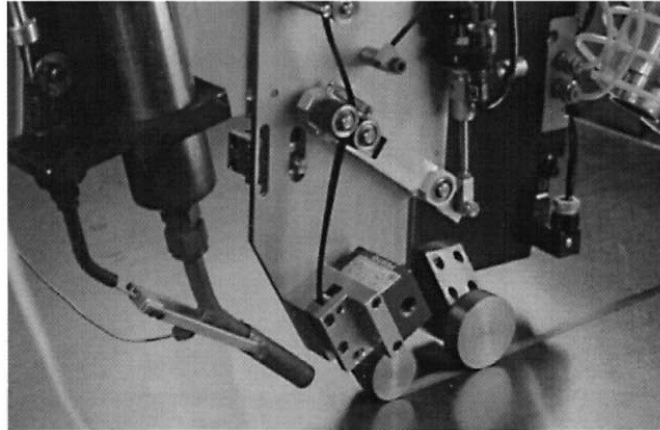


Abbildung 2.18: TLK des CCM mit Vorkompaktierungs- und Konsolidierungsrolle sowie positionsgesteuerter Heißgasdüse [15].

An jeweils vier Stellen wurden im Prozess die Temperaturen über luftgekühlte Infrarot-Sensoren erfasst. Die Steuerung der Aufheiztemperatur erfolgte aufgrund der hohen Reaktionszeiten der Heißgasdüse über die Höhenverstellung der Düsen mit einer speziell entwickelten Steuerungssoftware auf Basis eines neuronalen Netzwerkes [2, 6].

Neuere Entwicklungen beschäftigen sich mit einem vollkommen modularen Aufbau des TLK. Die Konsolidierung erfolgt über ein zweigeteiltes Modul, das ineinander beweglich gelagert ist. Die Krafterbringung erfolgt über zwei Pneumatikaktuatoren. Die Konsolidierungsrolle ist einfach austauschbar, aus Edelstahl und 165 mm lang [12].

Zur variablen Einstellung der Konsolidierungsdrücke können Konsolidierungsrollen unterschiedlicher Länge eingesetzt werden. Des Weiteren ist die Verwendung eines Konsolidierungsschuhs bzw. einer keramischen Rolle möglich. Das gesamte Konsolidierungsmodul ist 75 mm breit und erlaubt somit eine räumlich enge Anordnung zu den Heiz- und Kühlmodulen. Die Aufheizung kann über Infrarot (IR) bzw. über Induktion erfolgen, wobei die IR-Einheit translatorisch wie auch rotatorisch verstellbar ist [12].



Die gesamte Materialführung erfolgt über ein elektrisch geregeltes Rollensystem. Die Schneideeinheit ist mit einem Ultraschallmesser ausgestattet [12]. Abbildung 2.19 stellt den Aufbau im CAD Design (links) und im realen Umfeld (rechts) dar.

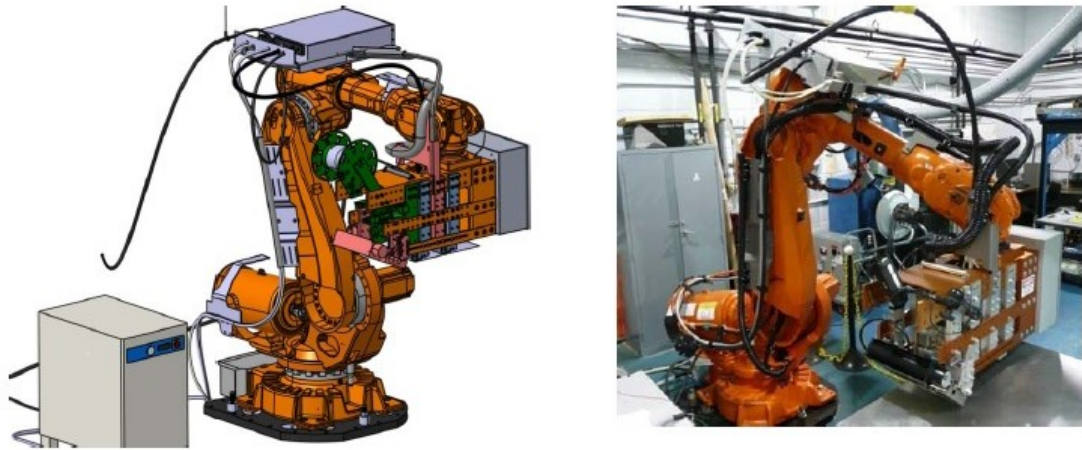


Abbildung 2.19: Modularer TLK des CCM, links: Darstellung im CAD System, rechts: Aufbau im realen Umfeld [12].

### **Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie**

Am Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie (IPT) wurden bereits verschiedene Tapelege- und Tapewickelanlagen mit unterschiedlichen Heizquellen wie Infrarot, Mikrowelle und Laser umgesetzt. Der in Abbildung 2.20 gezeigte laserunterstützte Multitapelegekopf nutzt einen Diodenlaser als Heizquelle. Dieser ist in der Lage, mehrere Prepregbänder bis zu einer Gesamtbreite von 40 mm zu verarbeiten.

Diese können durch eine Vorschubeinheit nach dem automatisierten Schneiden am Ende eines Ablegepfades gefördert werden. In einem Vierfachmagazin sind vier unterschiedlich profilierte Rollen integriert, die mittels Schwenkantrieb angepasst werden können [2].

Der von Kölzer [2] beschriebene TLK führte bis zu 6 Materialspulen mit einem maximalen Spulendurchmesser von 630 mm mit, wobei unterschiedlich breite Spulen eingesetzt werden konnten. Das Gehäuse des TLK unterteilte sich primär in zwei Baugruppen: eine obere starr am Roboter montierte Komponente und eine untere Komponente, die im oberen Gehäuse geführt wurde.

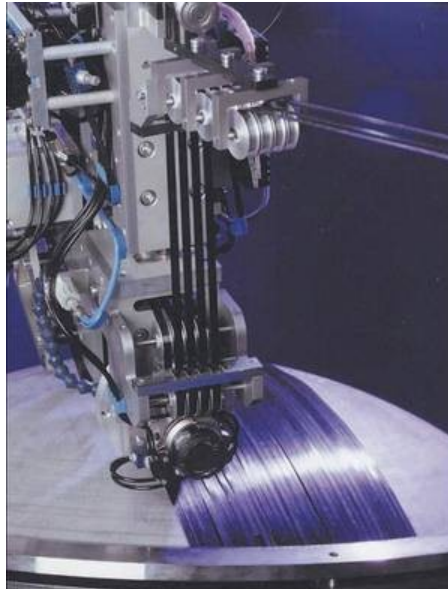


Abbildung 2.20: Laserunterstützter TLK des Fraunhofer IPT  
(Quelle: <http://www.institut-wv.de>).

Die Einstellung der Fadenkraft erfolgte über das Bremsmoment einer Hysteresbremse. Diese erzeugte bei einer Drehzahl von 2000 U/min ein Moment von 3,50 Nm bzw. 2,30 Nm bei Stillstand. Die Messung der Fadenkraft wurde über eine Biegestabwägezelle umgesetzt [2].

Die Vorschubeinheit bestand aus einer gummierten Umlenkwalze und einer schwenkbar gelagerten Walze, die von einem Gleichstrommotor angetrieben wurde. Daraus resultierte eine Vorschubkraft von 130 N. Das pneumatisch betätigte Schneidmesser wurde unmittelbar nach der Führungseinheit angeordnet. Die Bänder konnten mit einem Niederhalter mittels Pneumatik geklemmt und anschließend geschnitten werden.

Die maximal aufzubringende Kraft von 754 N wurde bei einem Kolbendurchmesser von 40 mm und einem maximalen Druck von 0,6 MPa erreicht. Die minimale Bauteillänge von 140 mm ergab sich durch den Abstand zwischen Schneidmesser und Ablegepunkt [2].

Die Konsolidierungskraft wurde über einen Pneumatikzylinder aufgebracht. Die Ermittlung der aufgetragenen Konsolidierungskraft erfolgte über einen Drucksensor [2]. Neuere Entwicklungen sind nicht bekannt.

## **Institut für Verbundwerkstoffe GmbH**

Die Institut für Verbundwerkstoffe GmbH (IVW) in Kaiserslautern nutzte bei ihrem Tapelegekopf Evo I (siehe Abbildung 2.21) eine 6-Achsen-Portalanlage mit einer Arbeitsfläche von 1,5 m x 4 m. Alle Funktionseinheiten wurden linear angeordnet um die Umlenkung des Tapes zu minimieren. Der gesamte Aufbau wurde modular ausgeführt [2, 6].

Zum damaligen Entwicklungsstand war es möglich, Lamine mit mehreren Millimetern Dicke automatisiert abzulegen und es konnten kohlenstofffaserverstärkte PPS- und PEEK-Tapes mit bis zu 10 m/min verarbeitet werden. Die Halbzeugspule befand sich direkt am TLK, der Transport des Prepregmaterials erfolgte über Schrittmotoren, die auch zur Erzeugung einer definierten Bandspannung eingesetzt werden. Die verwendeten Schrittmotoren waren mit 0 – 30 m/min für diesen Verarbeitungsprozess ausreichend schnell und genau. Die Zuführung des Tapes erfolgte über einen in der Breite passgenauen Kanal. Das letzte Stück des Zuführungskanals wurde über mehrere Bohrungen mit einem Unterdruck versehen [2, 6].

Der pneumatische Schneidemechanismus wurde drehbar ausgeführt, um beliebige Abschneidewinkel am Bahnanfang und -ende zu ermöglichen. Aufgeheizt wurde das Prepregmaterial mit einer offenen Flamme ( $H_2O_2$ ). Der Brenner wurde translatorisch und rotatorisch verstellbar gelagert, um Einfluss auf die Flamme (im Zwickelbereich) nehmen zu können. Die Konsolidierungsrolle wurde ebenfalls pneumatisch betätigt, hatte eine variable Konsolidierungskraft von 90 – 300 N und konnte auf eine Temperatur zw. 20 °C und 90 °C eingestellt werden. Zur Messung der Laminat- und Rollentemperatur wurden IR-Pyrometer verwendet [2, 6].

Des Weiteren gab es Messeinrichtungen für die Geschwindigkeit und die Spannung des Tapes [2, 6]. Neuere Entwicklungen sind nicht bekannt.

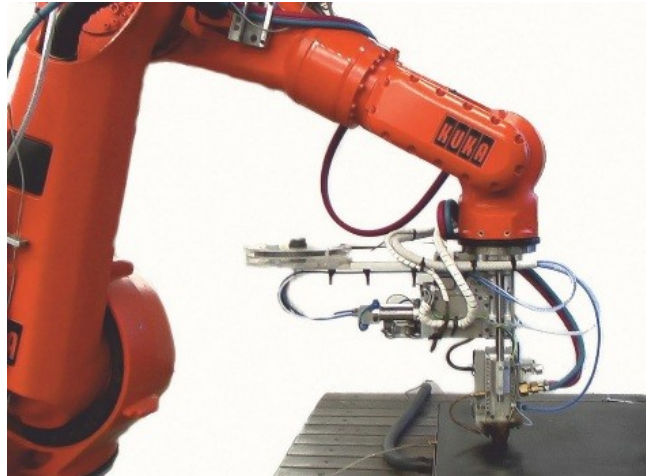


Abbildung 2.21: TLK Evo I mit Tapeführung am Kopf samt Roboter des IVW [4].

### **EADS-CRC**

Die Firma EADS-CRC (vormals Dassault Aviation/Aerospace) nutzte ebenfalls einen TLK von ADS zur Verarbeitung von CF/PEEK und CF/PEI [6].

Der TLK wurde hängend an ein Portalsystem montiert und es wurden Demonstrationsbauteile im Hybridverfahren hergestellt. Die Forschungsprojekte beschäftigten sich mit der Herstellung einer Flügelnause mit 1" breiten Tapes [6].

Ein neueres Projekt aus dem Jahr 2010 ist in Abbildung 2.22 illustriert, es zeigt den eigens entwickelten TLK des AUTOW EU Projektes. Bei diesem Projekt der KU Leuven, stellte EADS-CRC-F seine Expertise dem Konsortium zur Verfügung. Die Aufgabenstellung war die Entwicklung einer neuen und flexiblen Herstellungsmethode für die automatisierte Verarbeitung von Carbonfaserpreforms [16].

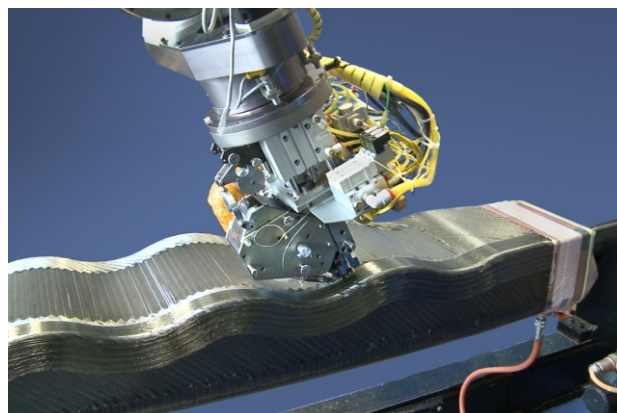


Abbildung 2.22: TLK des AUTOW EU Projektes [16].

## NASA – Langley Research Center

Das NASA-LARC Forschungszentrum in Langley arbeitete, wie viele andere Forschungsinstitutionen auch, an der Weiterentwicklung des TLK von ADC. Eigene Arbeiten beschäftigten sich mit folgenden Themen [2, 6]:

- Ansetzen von Tapes auf dem Bauteil („start-on-the-part“) bzw. Anfangslagenproblematik,
- Modellierung der Thermodynamik,
- Grenzablegeradius,
- Anforderung der Autohäsion (= proportionale Haftung der pro Volumeneinheit diffundierten Moleküle),
- Entwicklung von Sensoren zur on-line Messung von Qualitätsparametern,
- Kostenreduktion.

Es konnten sowohl rotationssymmetrische Bauteile auf einer Spindel oder Platten auf einem beheizbaren, ebenen Unterwerkzeug gefertigt werden. Das komplette System einschließlich Steuerung und Software wurde von ADC entwickelt. Abbildung 2.23 zeigt einen älteren Aufbau des Tapelegesystems. Als Startlage diente ein 300 mm breites Tape, welches mit Unterdruck auf das Werkzeug gesaugt wurde [2, 6].



Abbildung 2.23: Gesamtes Tapelegesystem (Roboter, TLK, Unterwerkzeug) der NASA-LARC [17]

Der in Abbildung 2.24 dargestellte TLK ist eine Spezialanfertigung, der für die Aushärtung des duroplastischen Prepregs via Elektronenstrahl konzipiert wurde.

Der 200 W, 225 keV Elektronenstrahl ist ausgelegt um eine Äquivalentdosis von 5 MR in 30 ms aufzubringen. Die Penetrationstiefe beträgt 100  $\mu\text{m}$  in einem Graphit/Epoxy Prepreg bei einer Dichte von 1,7  $\text{g/cm}^3$  [17]. Neuere Entwicklungen sind nicht bekannt.

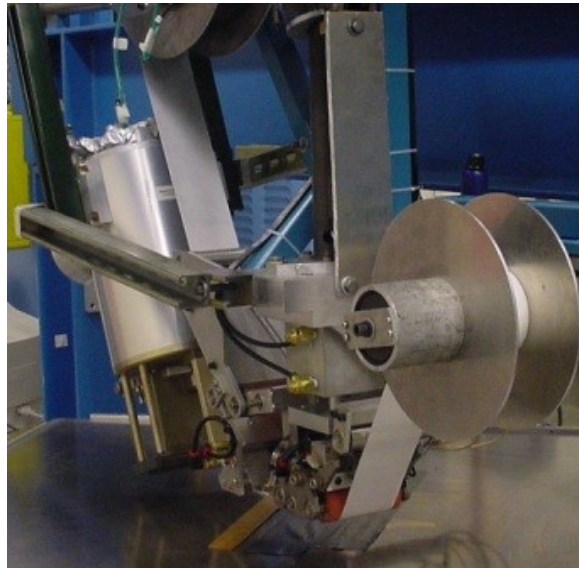


Abbildung 2.24: TLK Variante des NASA-LARC mit Elektronenstrahl [17]

### 2.4.3 Gegenüberstellung der Zielsetzungen

Wie aus den Abschnitten 2.4.1 und 2.4.2 hervorgeht, lassen sich zwei Anwendungsgruppen klassifizieren: der *kommerzielle* und der *wissenschaftliche* Bereich.

Die kommerziellen Systeme zielen auf einen hohen Durchsatz, Effektivität und entsprechende Prozesssicherheit ab. Des Weiteren sind hohe Genauigkeiten gefordert, selbst bei erheblichen Ablegegeschwindigkeiten. Hinzu kommt die Notwendigkeit einer kompakten Bauweise für komplexe Werkzeugformen bzw. für hohe Prozessdynamik.

Die Arbeiten im wissenschaftlichen Bereich zielen vor allem auf den Zugewinn des physikalischen Verständnisses während des Ablegeprozesses ab. Mehrere Forschungseinrichtungen verwenden kommerzielle Systeme und modifizieren diese für ihre eigenen Anwendungen. Es werden unter anderem Faktoren wie die Thermodynamik und deren Modellierung sowie die Prozessführung untersucht.

## 2.5 Konstruktionsmethodik

Im folgenden Abschnitt soll ein kurzer Einblick in die systematische Vorgehensweise beim Konstruieren und Entwickeln gegeben werden. Der branchenübergreifende Vorgehensplan (Abbildung 2.25) sieht im Zuge der Produktentwicklung sieben grundlegende Arbeitsabschnitte vor, die in Übereinstimmung mit den Grundlagen technischer Systeme und dem eigenen Vorgehensplan stehen [18, 19].

Bedingt durch die angestrebte allgemeine Anwendbarkeit ist der Ablauf des Konstruktionsprozesses nur grob strukturiert, aus diesem Grund wird eine Vielzahl von produkt- und unternehmensspezifischen Vorgehensvarianten zugelassen [18, 19]. Abbildung 2.25 stellt also eine Leitlinie dar, zu der sich detaillierte Arbeitsabläufe zuordnen lassen.

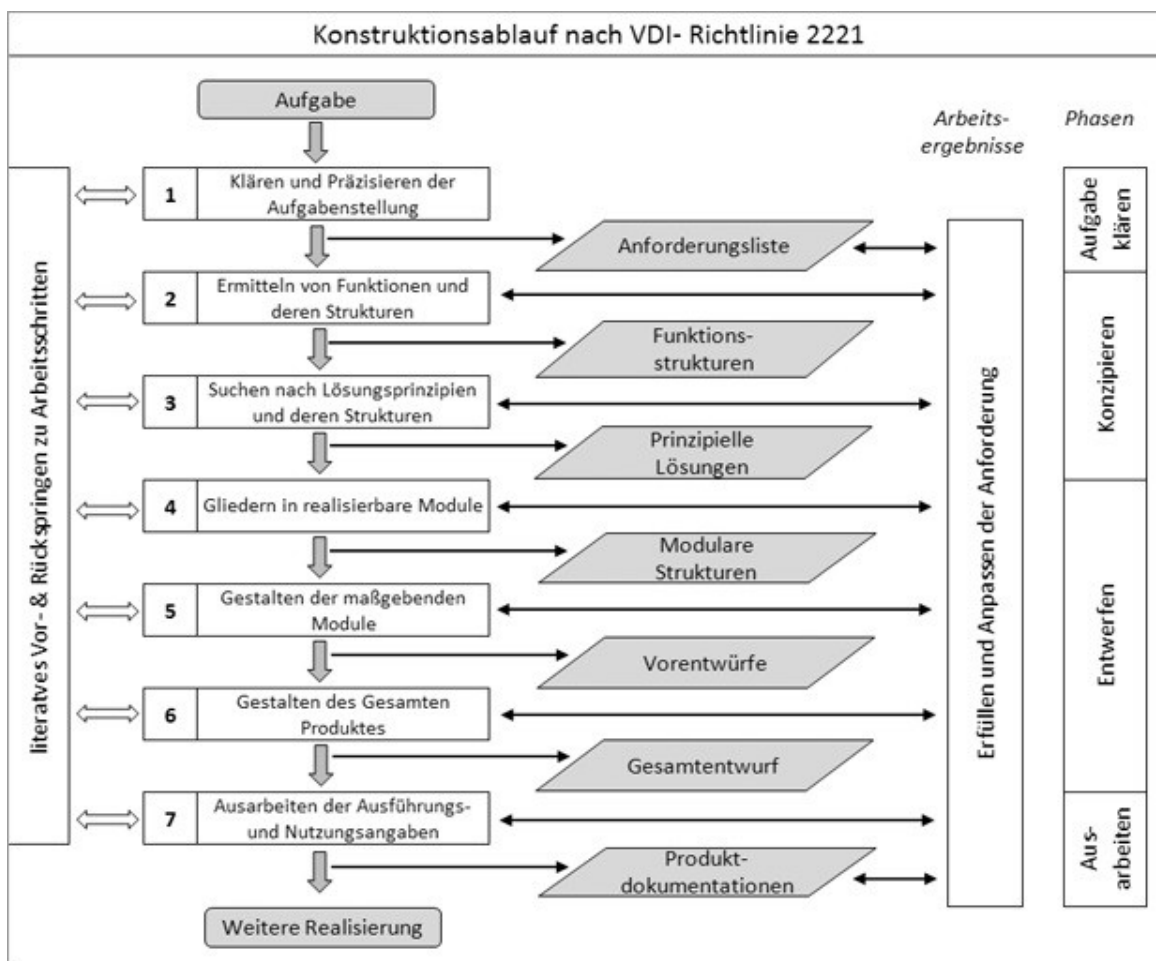


Abbildung 2.25: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren lt. VDI-Richtlinie 2221 (Quelle: <http://www.retrag-engineering.de>).

Besonders prägnant ist der iterative Charakter des Vorgehens, d. h. die Phasen werden nicht starr nacheinander abgearbeitet, sondern es erfolgt in der Regel ein Überspringen einzelner Schritte und/oder Zurückspringen zu den vorhergehenden Phasen. Diese Flexibilität entspricht der Konstruktionserfahrung und ist für das Anwenden solcher Vorgehenspläne von großer Bedeutung [18, 19].

Die sieben grundlegenden Arbeitsschritte lassen sich wie folgt definieren [19]:

- 1) Nach dem Klären und Präzisieren der Aufgabenstellung stehen die möglichst vollständigen und konkreten Spezifikationen in Form eines Anforderungsprofils zur Verfügung.
- 2) Daraus lassen sich abstrakte (Teil-)Funktionen ableiten, die zu einer Funktionsstruktur zusammengefasst werden.
- 3) Für die Funktionen werden Lösungsprinzipien gesucht und zu einem prinzipiellen Konzept kombiniert.
- 4) Dieses wird in realisierbare Module gegliedert,
- 5) die im nächsten Schritt gestaltet, also konkretisiert werden.
- 6) Die so entstandenen Vorentwürfe werden in einen Gesamtentwurf integriert,
- 7) der die Grundlage für die weitere Ausarbeitung bildet.

### **2.5.1 Arbeitsfluss beim Entwickeln**

Der Arbeitsfluss des Entwicklungs- und Konstruktionsprozesses wurde in allgemeiner Form sowie branchen- und produktunabhängig in den VDI-Richtlinien 2221 und 2222 (vgl. Abbildung 2.25) erarbeitet. Prinzipiell verläuft der Planungs- und Konstruktionsprozess von der Planung der Aufgabe und Klärung der Aufgabenstellung über das Erkennen der erforderlichen Funktionen, das Erarbeiten prinzipieller Lösungen, den Aufbau modularer Baustrukturen mit Baugruppen und Bauteilen bis hin zur Dokumentation des gesamten Produkts [18].

Neben der inhaltlichen und funktionalen Prozessplanung, wie sie in den oben genannten Richtlinien beschrieben werden, ist es zweckmäßig und auch allgemein üblich, den Entwicklungs- und Konstruktionsprozess in folgende *Hauptphasen* zu unterteilen [18]:



- Planen und Klären der Aufgabe (informative Festlegung),
- Konzipieren (prinzipielle Festlegung),
- Entwerfen (gestalterische Festlegung) und
- Ausarbeiten (herstellungstechnische Festlegung).

In manchen Fällen ist eine genaue Trennung der Hauptphasen nicht möglich, weil z. B. bereits im Vorfeld Gestaltungsuntersuchungen beim Konzipieren notwendig sind oder beim Entwerfen bereits sehr detaillierte, fertigungstechnische Festlegungen getroffen werden müssen. Ein Rückgriff ist ebenfalls nicht immer vermeidbar, wenn z. B. beim Entwerfen Nebenfunktionen ersichtlich werden, für die erst prinzipielle Lösungen gesucht werden müssen [18].

In den Hauptphasen werden Arbeitsschritte vorgeschlagen, die als *Hauptarbeitsschritte* aufzufassen sind. Diese Hauptarbeitsschritte führen zu einem jeweils bedeutenden Arbeitsergebnis, welches die Grundlage weiterer Hauptarbeitsschritte ist [18].

Zum Erreichen des betreffenden Arbeitsergebnisses sind in der Regel viele untergeordnete Arbeitsschritte, wie Informieren, Suchen, Berechnen, Darstellen und Kontrollieren erforderlich, diese sind von indirekten Tätigkeiten wie Besprechen, Besichtigen, Ordnen, Vorbereiten usw. begleitet [18].

Nach den Hauptphasen und einigen wichtigen Hauptarbeitsschritten sind *Entscheidungsschritte* erforderlich. Diese sind wiederum *Hauptentscheidungsschritte*, die ein bedeutsames Arbeitsergebnis nach einer entsprechenden Beurteilung definitiv abschließen und weiter erforderliche Hauptphasen oder -arbeitsschritte freigeben (Frontloading). Aber auch ein erneutes Durchlaufen einer jeweils möglichst engen Iterationsschleife kann das Ergebnis eines Entscheidungsschrittes sein, wenn das vorliegende Arbeitsergebnis nicht zufriedenstellend ist [18].

## 2.5.2 Detaillierte Betrachtung der Hauptphasen

### Planung und Klärung der Aufgabenstellung

Die Planung und Klärung der Aufgabenstellung dient zur Informationsbeschaffung über die Anforderungen, die an das Produkt im Einzelnen gestellt werden, sowie über die bestehenden Bedingungen und deren Bedeutung. Das Ergebnis ist die *informative Festlegung* in einem *Anforderungsprofil*. Die Aussagen und Festlegungen des Anforderungsprofils sind auf die Belange der konstruktiven Entwicklung und der weiteren Arbeitsschritte zugeschnitten und abgestimmt. Das Anforderungsprofil muss stets auf dem neuesten Stand gehalten werden, da hiervon ausgehend die Freigabe zum Konzipieren und der weiteren Arbeit erfolgt [18, 19].

### Konzipieren

Das Konzipieren ist der Teil des Konstruierens, der nach der Klärung der Aufgabenstellung durch Abstrahieren auf die wesentlichen Probleme, Aufstellen von Funktionsstrukturen und durch Suche nach geeigneten Wirkprinzipien und deren Kombination in einer Wirkstruktur die prinzipielle Lösung festlegt. Es ist die *prinzipielle Festlegung* einer Lösung [18, 19].

In vielen Fällen wird eine Wirkstruktur aber auch erst beurteilbar, wenn sie konkretere Gestalt annimmt. Diese Konkretisierung umfasst eine bestimmtere Vorstellung über die einzusetzenden Werkstoffe, meistens eine überschlägige Auslegung (Bemessung) sowie die Rücksichtnahme auf technologische Möglichkeiten. In der Regel erhält der Konstrukteur erst danach ein beurteilungsfähiges Lösungsprinzip, das die Zielsetzung und bestehende Bedingungen im Wesentlichen berücksichtigt. Unter Umständen sind in dieser Phase ebenfalls mehrere prinzipielle Lösungsvarianten denkbar [18, 19].

Die Darstellungsform einer prinzipiellen Lösung (Lösungsprinzip) kann sehr unterschiedlich sein. Bei einem festliegenden Bauelement genügt vielleicht schon die Blockdarstellung einer Funktionsstruktur, ein Schaltplan oder ein Flussdiagramm. In anderen Fällen reicht eine Handskizze aus oder es muss zu einer grobmaßstäblichen Zeichnung gegriffen werden. Die Konzeptphase wird in mehrere Arbeitsschritte unterteilt [18, 19].

Diese Schritte sollten durchlaufen werden, damit von vornherein die Erarbeitung der bestmöglich erscheinenden prinzipiellen Lösung sichergestellt ist, denn die nachfolgende Arbeit des Entwerfens und Ausarbeitens kann grundlegende Mängel des Lösungsprinzips nicht oder nur schwer ausgleichen [18, 19].

In diesem Sinne kann auch von der Nachhaltigkeit eines Konzepts gesprochen werden. Eine Konstruktion, die auf einem nachhaltigen Konzept beruht, ist z. B. unempfindlich gegen große Fertigungstoleranzen. Eine dauerhafte und erfolgreiche konstruktive Lösung entsteht durch die Wahl des zweckmäßigsten Prinzips und nicht durch die Überbetonung konstruktiver Feinheiten. Diese Feststellung widerspricht nicht der Tatsache, dass auch bei zweckmäßig erscheinenden Prinzipien oder ihrer Kombinationen auftretende Schwierigkeiten immer noch im Detail stecken können [18, 19].

Die erarbeiteten Lösungsvarianten werden beurteilt, erfüllen Varianten die Forderungen des Anforderungsprofils nicht, werden sie gestrichen. Die übrigen werden nach Kriterien in einem festgelegten Verfahren bewertet. In dieser Phase wird vornehmlich nach technischen Gesichtspunkten beurteilt, wobei die wirtschaftlichen ebenfalls grob berücksichtigt werden. Aufgrund der Bewertung fällt die Entscheidung auf das weiterzuverfolgende Konzept [18, 19].

Oft kann es vorkommen, dass mehrere Varianten nahezu gleichwertig erscheinen und eine endgültige Entscheidung erst nach weitergehender Konkretisierung möglich ist. Auch können sich zu einem Lösungsprinzip mehrere Gestaltungsvarianten anbieten. Der Konstruktionsprozess wird auf der konkreteren Ebene des Entwerfens fortgesetzt [18, 19].

## **Entwerfen**

Das Entwerfen ist der Teil des Konstruierens, der für ein technisches Gebilde von der Wirkstruktur bzw. prinzipiellen Lösung ausgehend die Baustruktur nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten eindeutig und vollständig erarbeitet. Das Entwerfen ist, ausgehend von den qualitativen Vorstellungen, die quantitative gestalterische Festlegung der Lösung [18, 19].

In vielen Fällen werden mehrere maßstäbliche Entwürfe neben- oder hintereinander im Sinne von vorläufigen Entwürfen angefertigt, um zu einem besseren Informationsstand über Vor- und Nachteile der Varianten zu gelangen. Dazu dient diese Phase, die nach entsprechender Durcharbeitung wiederum mit einer technisch-wirtschaftlichen Bewertung abgeschlossen werden muss. Dabei werden neue Erkenntnisse auf höherer Informationsebene gewonnen [18, 19].

Ein häufiger und typischer Vorgang besteht darin, dass nach dem Bewerten der einzelnen Varianten eine besonders favorisiert erscheint, jedoch durch Teillösungen der anderen, in der Gesamtheit nicht so günstig erscheinenden Vorschläge inspiriert und verbessert werden kann. Durch entsprechende Kombination und Übernahme solcher Teillösungen sowie durch Beseitigen von Schwachstellen, die durch die Bewertung auch offenbar werden, kann dann die endgültige Lösung gewonnen werden und die Entscheidung für die abschließende Gestaltung des endgültigen Gesamtentwurfs fallen [18, 19].

Der endgültige Gesamtentwurf stellt eine Kontrolle der Funktion, der Haltbarkeit, der räumlichen Verträglichkeit usw. dar, wobei sich die Anforderungen bezüglich der Kostendeckung nun spätestens hier als erfüllbar darstellen müssen. Erst dann ist die Freigabe zur Ausarbeitung zulässig [18, 19].

### **Ausarbeiten**

Das Ausarbeiten ist der Teil des Konstruierens, der die Baustruktur eines technischen Gebildes durch endgültige Vorschriften für Form, Bemessung und Oberflächenbeschaffenheit aller Einzelteile, Festlegen aller Werkstoffe, Überprüfung der Herstellmöglichkeit sowie der endgültigen Kosten ergänzt und die verbindlichen zeichnerischen und sonstigen Unterlagen für seine stoffliche Verwirklichung schafft [18, 19].

In den vorangegangenen Phasen wurden die fertigungstechnischen Möglichkeiten weitläufig berücksichtigt, das Ergebnis des Ausarbeitens ist die detaillierte herstellungstechnische Festlegung der Lösung. In dieser Phase wird die Gestaltung des Produkts mit der endgültigen Festlegung der Mikrogeometrie durchgeführt. Es werden also die genauen erforderlichen Fertigungsoperationen bestimmt.

Deshalb ist an dieser Stelle große Sorgfalt erforderlich. Die Funktionssicherheit und die Produktkosten werden in dieser Phase stark beeinflusst [18, 19].

Aus den in Pahl [18] vorgestellten Hauptarbeitsschritten beim Planen und Konstruieren gehen drei Schwerpunkte hervor:

- Optimieren des Prinzips,
- Optimieren der Gestaltung und
- Optimieren der Herstellung.

In der Praxis ist eine klare Trennung der Arbeitsschritte und ihrer Ergebnisse nicht immer erkennbar und auch nicht erforderlich. Im Sinne eines „roten Fadens“ ist es aber auch für den Ingenieur in der Praxis sinnvoll, sich die geschilderten Abläufe und Arbeiten bewusst zu machen, um zum Einen nichts zu vergessen und zum Anderen seine Arbeit besser planen zu können [18, 19].

## 3 Anforderungsprofil

### 3.1 Allgemeine Anforderungen

Die allgemeinen Anforderungen resultieren aus den grundsätzlichen Funktionen die der TLK erfüllen muss: dazu zählen die *Materialbevorratung*, die *Zuführung*, die *Konfektionierung*, die *Aufschmelzung* und die *Konsolidierung* des abzulegenden Tapes. Zusätzlich sind alle relevanten Prozessparameter zu erfassen und zu regeln [2].

Der TLK ist am Endeffektor eines 6-Achsen-Knickarmroboters als auch an einem Tapelegeprüfstand montierbar auszuführen. Die Flanschgeometrie richtet sich nach der Roboterspezifikation (siehe [20] bzw. Abbildung 10.1). Eine kompakte, weitestgehend lineare, steife und modulare Bauweise ist anzustreben. Der Aufbau der Funktionsgruppen soll in Trichterform erfolgen, d. h. von oben nach unten:

- Materialbevorratung,
- Vorschubeinheit,
- Schneidemechanismus,
- Aufheizvorrichtung und
- Konsolidierungssystem.

Für die Schnittstelle zum Knickarmroboter sind folgende Daten zu berücksichtigen:

- Die Masse des TLK ist abhängig von der zulässigen Traglast des Roboters und beträgt maximal 150 kg.
- Die maximal zulässige Temperatur für die Schnittstelle zum Roboter beträgt 40 °C.

Der TLK soll folgende Elemente aufnehmen:

- Alle notwendigen Funktionsgruppen sowie Elemente zur Führung und Pufferung des Tapes,
- Komponenten für Sensorik und Temperierung,
- sämtliche Versorgungs-, Druckluft- und Signalleitungen,
- Transportelemente und Sicherheitseinrichtungen.

Die Zuführung der Versorgungs- und Signalleitungen hat über das Schlauchpaket am 6-Achs-Roboter mit einem Durchmesser von 70 mm bzw. wenn erforderlich, über eine Abhängung von der Decke zu erfolgen.

Es sind drei verschiedene Betriebsmodi für den Verarbeitungskopf zu berücksichtigen. Die geforderten Verarbeitungsaspekte, wie z. B. Tapebreite oder minimale Bauteillänge, sind in Tabelle 3.1 dargestellt:

- Roboter mit Heißgasdüse,
- Prüfstand mit Heißgasdüse,
- Prüfstand mit Laser.

Tabelle 3.1: Geforderte Verarbeitungsaspekte des TLK.

Tapebreite	Standard: $\leq \frac{1}{2}$ " , Maximal: 1"
Tapedicke	$\leq 0,35$ mm
Max. Tapetemperatur beim Ablegen	$\leq 450$ °C (CF/PEEK)
Max. Verarbeitungsgeschwindigkeit	$\leq 20$ m/min
Min. Bauteillänge	$\leq 200$ mm

### 3.2 Spezielle Anforderungen

Es ist ein flexibles erweiterbares Kupplungssystem zum einfachen An- und Abschließen des Verarbeitungskopfes am Roboter bzw. am Prüfstand auszuwählen. Die einzelnen Funktionsgruppen (wie z. B. Vorschubeinheit oder Schneidemechanismus) sind weitestgehend in sich geschlossen auszulegen, optional sind die Funktionsgruppen mit einem Schnellspannsystem auszustatten.

Der Führungskanal des Tapes soll auswechselbar ausgeführt werden, um verschiedene Tapebreiten realisieren zu können. Des Weiteren sollen zwei flexible Druckluft-Schlauchsysteme implementiert werden, die im Zwickelbereich der Konsolidierungsrolle positioniert werden können. Optional soll ein Montagerahmen für den Transport zw. den einzelnen Stationen/Betriebsmodi entwickelt werden.

### **3.2.1 Materialbevorratung und Vorschubeinheit**

Die *Materialbevorratung* soll manuell erfolgen und als in sich geschlossene Funktionsgruppe einfach montierbar sein. Der Einsatz einer automatisierten Bevorratung zu einem späteren Zeitpunkt ist zu berücksichtigen. Die Bevorratung soll je abgelegter Bahn ein einzelnes Tape aufnehmen können, die Länge dieses Tapes beträgt ca. 50 mm.

Die Rahmenkonstruktion der *Vorschubeinheit* soll eine pneumatische Anpresskraft von ca. 130 N aufnehmen. Die Rollen der Vorschubeinheit sollen eine ausreichende Haftung zum Tape gewährleisten. Des Weiteren soll die durch die Anpressung entstehende Kraft bei einer Fördergeschwindigkeit von 0,1 m/s in Taperichtung berücksichtigt werden. Optional soll die Einheit neben seiner ursprünglichen Aufgabe – die Förderung des Tapes am Bahnanfang – die Tapespannung erzeugen.

### **3.2.2 Schneidemechanismus**

Die Konstruktion des Schneidemechanismus soll auf die pneumatische Schnittkraft von ca. 750 N ausgelegt sein. Dieser Wert dient als Richtwert und sollte über Versuche verifiziert werden. Je nach Möglichkeit bzw. Notwendigkeit ist die Konstruktion mit einem Niederhalter zu ergänzen, der das Tape beim Schneidvorgang fixiert.

Optional soll eine Schrägstellung von  $\pm 45^\circ$  der Klinge implementiert werden. Die Form der Klinge ist dem zu verarbeitenden Material anzupassen. Im Betriebsmodus (Ablegevorgang) soll die konstruktive Ausführung des Schneidemechanismus einen unerlaubten Zugriff auf die Klinge verhindern. Im Gegenzug soll sie im Wartungsmodus (d. h. der gesamte Schneidemechanismus als Funktionsgruppe ist ausgebaut) einfach zugänglich und auswechselbar ausgeführt sein.

### **3.2.3 Aufheizvorrichtung**

Die Aufheizvorrichtung soll in der ersten Version des TLK über eine Heißgasdüse realisiert werden. Der TLK soll die Aufheizvorrichtung samt Schlauchführung für Zuführung von  $N_2$ -Gas inkl. Sperr- und Regelventil aufnehmen. Bei der Konstruktion der Halterung ist die spätere Verwendung einer Laseroptik zu berücksichtigen.



Die Regelung des Energieeintrages soll über den Volumenstrom der Heißgasdüse erfolgen. Für zukünftige Einsatzvarianten ist eine rotatorisch und translatorisch Einstellung der Heißgasdüseposition außerhalb des Betriebes zu berücksichtigen. Die Heißgasdüse ist gegenüber der Kopfmechanik thermisch zu isolieren.

### **3.2.4 Konsolidierungssystem**

Das Konsolidierungssystem soll in dieser Arbeit als einzelne Rolle ausgeführt werden, ergänzend ist ein System für eine einfache Demontage der Rolle zu realisieren. Zusätzlich ist eine automatische Wechseleinheit mit verschiedenen bereits inkludierten Rollengeometrien anzudenken und dem Schnellmontagesystem gegenüber zu stellen. Des Weiteren ist die spätere Verwendung von mehreren Rollen bzw. eines Konsolidierungsschuhes zu berücksichtigen.

Für die Materialauswahl und die Aufnahme der Rolle sind die max. Konsolidierungskraft von 1000 N (ca. 200 N bei ½"-Tape und ca. 500 N bei 1"-Tape) und die Temperierbarkeit von max. 200 °C (Standard: 80 – 90 °C) zu berücksichtigen. Die Konsolidierungsvorrichtung soll zudem die Sensorik zur Drehwinkelbestimmung aufnehmen können. Des Weiteren ist die Rolle gegenüber der Kopfmechanik thermisch zu isolieren.

## 4 Konzeptionierung

In diesem Kapitel werden Ideen und Konzepte zur Ausführung der einzelnen Funktionsgruppen wie auch zum Aufnahmesystem vorgestellt. Im Anschluss wird mit Hilfe von Entscheidungsmatrizen die jeweils optimale Ausführungsvariante bestimmt.

Für jede Funktionsgruppe werden im Vorfeld mehrere Kriterien festgelegt, die für die Erfüllung der jeweiligen Aufgabe von Bedeutung sind. Je nach festgelegter Relevanz werden diese Kriterien unterschiedlich gewichtet (zw. 0 % und 100 %). Die Gesamtsumme der zugeteilten Gewichtungen beträgt 100 %. Anschließend wird jedes Kriterium bewertet. Dafür werden Punkte in einem Bereich von 0 (unbefriedigend) bis 4 (sehr gut) vergeben. Werden nun die Gewichtung und die Bewertung miteinander multipliziert, folgt daraus die gewichtete Bewertung des jeweiligen Kriteriums. Dem folgt eine spezifische Gesamtpunkteanzahl (Summe aller gewichteten Bewertungen) für jede Ausführungs- bzw. Auswahlvariante in der zu betrachtenden Funktionsgruppe. Die Variante mit der höchsten Punkteanzahl kann die geforderten Anforderungen – vergleichsweise – am besten erfüllen.

Bei der Anwendung von Entscheidungsmatrizen ist es wichtig anzumerken, dass die Gewichtungen und Bewertungen dem subjektiven Empfinden und den Erfahrungen eines Einzelnen entsprechen.

### 4.1 Aufnahmesystem

Die grundsätzliche Aufgabe des Aufnahmesystems ist die Übertragung einer Druckkraft von max. 1000 N für die Konsolidierung. Des Weiteren werden darin die einzelnen Funktionsgruppen montiert. Zunächst ist eine allgemeine Materialentscheidung zu treffen.

Das Aufnahmesystem soll aus einem rostfreien Material gefertigt werden, das so leicht, günstig und steif wie möglich ist. Um die Materialien objektiv miteinander vergleichen zu können, werden vier Materialindizes nach Ashby [21] herangezogen. Die detaillierten Herleitungen zu diesen Verhältniszahlen befinden sich im Abschnitt 10.3.1.

Die für die Entscheidung in Frage kommenden Materialien sind Aluminium (EN AW 5083) und Edelstahl (1.4305). Da der Verarbeitungspreis als Kriterium in dieser Phase noch nicht abgeschätzt werden kann, berücksichtigen zwei der vier Indizes den Preis je Gewichtseinheit des jeweiligen Materials. Eine detaillierte Beschreibung der Auswahlkriterien (bzw. Materialindizes) ist in den folgenden Absätzen angeführt.

Die ersten beiden Materialindizes betrachten die Druckbeanspruchung durch die Konsolidierungskraft. Dieser Belastung wird allgemein weniger Relevanz als der Knickung zugesprochen.

Der erste Wert  $V_{D1}$  ermittelt ein Preisoptimum für ein möglichst steifes und zugleich leichtes Material. Er ist das Verhältnis zwischen *E-Modul*, *Preis je Kilogramm* und *Dichte*. Als Richtwert für den Preis je Gewichtseinheit dienen zwei in den Abmessungen identische Platten ( $2000 \times 1000 \times 3 \text{ mm}^3$ ) aus den beiden Materialien. Da der Preis für Edelstahl mit der Werkstoffnummer (WNR.) 1.4305 nicht zur Verfügung stand, wurde stattdessen der Preis je Gewichtseinheit der WNR. 1.4301 herangezogen. Gleichung (4.1) erläutert den Zusammenhang:

$$V_{D1} = \frac{E}{C_m \cdot \rho}. \quad (4.1)$$

Hierbei ist  $E$  der E-Modul des Werkstoffes,  $C_m$  ist der Preis je Gewichtseinheit und  $\rho$  ist die Dichte des Werkstoffes. Der zweite Index  $V_{D2}$  optimiert das Gewicht, er berücksichtigt *E-Modul* und *Dichte* bei Druckbelastung, Gleichung (4.2) stellt die Beziehung dieser Parameter dar:

$$V_{D2} = \frac{E}{\rho}. \quad (4.2)$$

Die nun folgenden Indizes betrachten das Knicken als Stabilitätsproblem. Da die Verhältniszahlen geometrie- und belastungsabhängig sind, geht bei dieser Beanspruchung und der zu erwartenden Geometrie nur noch die Kubikwurzel des E-Moduls in die Berechnung mit ein. Der erste Index  $V_{K1}$ , siehe Gleichung (4.3), ist – ähnlich wie bei der Druckbeanspruchung – ein Verhältnis zwischen *E-Modul*, *Preis je Kilogramm* und *Dichte*. Dieser hat das Ziel die Kosten zu minimieren:

$$V_{K1} = \frac{E^{1/3}}{C_m \cdot \rho}. \quad (4.3)$$

Die letzte Verhältniszahl  $V_{K2}$ , dient wiederum einer Optimierung des Gewichts. Sie ist dargestellt in Gleichung (4.4) und betrachtet *E-Modul* und *Dichte*:

$$V_{K2} = \frac{E^{1/3}}{\rho}. \quad (4.4)$$

Werden die Kennwerte beider Metalle (siehe Tabelle 10.1) in die Gleichungen (4.1) bis (4.4) eingesetzt, ergeben sich die in Tabelle 4.1 dargestellten Werte. Prinzipiell gilt es, diese Werte zu maximieren.

Der erste Index  $V_{D1}$  (Preisoptimum bei Druckbeanspruchung) reiht Edelstahl klar vor Aluminium. Der zweite Index  $V_{D2}$  (Gewichtsoptimierung bei Druckbeanspruchung) zeigt keinen klaren Favoriten. Die dritte Verhältniszahl  $V_{K1}$  (Preisoptimum bei Knickung) weist ebenfalls keine klare Tendenz aus. Beim letzten Index  $V_{K2}$  (Gewichtsoptimierung bei Knickung) weist Aluminium den höheren Wert auf.

Tabelle 4.1: Vergleich der verschiedenen Materialindizes.

	$V_{D1}$	$V_{D2}$	$V_{K1}$	$V_{K2}$
Aluminium (EN AW 5083)	2,66	25,93	0,16	1,53
Edelstahl (1.4301)	5,62	25,13	0,17	0,74

Die *allgemeine Optik* dient als geringer Einflussfaktor, da es sich hierbei um subjektives Empfinden handelt. Da das Erscheinungsbild selbst bei technischen Anlagen keine untergeordnete Rolle mehr spielt (Stichwort Industriedesign), geht dieser Aspekt als drittes Kriterium mit in die Beurteilung ein.

Die *Verarbeitung* (wie z. B. Schweißen oder spanabhebende Tätigkeiten) zeigt sich als wesentliches Kriterium in Bezug auf zusätzliche Kosten und erreichbare Genauigkeiten. Beide Materialien sind schweißbar, wobei Aluminium hier höhere Anforderungen aufweist. Edelstahl erfordert bei spanabhebenden Tätigkeiten einen höheren Aufwand im Vergleich zu Aluminium.

Eine Ausführung vollständig aus Aluminium ist nicht möglich, da die Verbindungselemente und einzelne Komponenten der Funktionsgruppen jedenfalls aus Edelstahl ausgeführt werden müssen (siehe z. B. Abschnitt 4.7). Die hier entstehende Kontaktkorrosion ist vernachlässigbar bzw. kann über Dichtmaterialien unterbunden werden [22, 23].

Alle Kriterien, zugeordneten Gewichtungen  $R$ , Bewertungen  $P$  und gewichteten Bewertungen  $P^*$  sind in Tabelle 4.2 dargestellt. Daraus ist die Materialempfehlung für Aluminium ersichtlich.

Tabelle 4.2: Entscheidungsmatrix zur Materialauswahl des Aufnahmesystems.

	$R$	Edelstahl		Aluminium	
		$P$	$P^*$	$P$	$P^*$
$V_{D1}$	10%	4	0,4	3	0,3
$V_{D2}$	7,5%	4	0,3	4	0,3
$V_{K1}$	15%	4	0,6	4	0,6
$V_{K2}$	12,5%	2	0,3	4	0,5
Optik	5%	4	0,2	3	0,15
Verarbeitung	50%	2	1	3	1,5
Ergebnis		2,75		3,35	

Für das Aufnahmesystem des TLK wurden zwei Konzepte entwickelt. Für beide Konzepte gibt es jeweils zwei Ausführungsvarianten, die von der Auswahl des Konsolidierungssystems abhängen:

Die in Abbildung 4.1a vorgestellte Variante *Wangensystem* umschließt alle Funktionsgruppen von zwei Seiten und ermöglicht somit eine gekapselte Ausführung. Gleichzeitig wird in dieser Abbildung eines von zwei möglichen Systemen für die Aufbringung des Konsolidierungsdruckes vorgestellt. Der Aufbau unterteilt sich hierbei in einen fixen Oberteil und in einen beweglichen Unterteil, der alle Funktionsgruppen aufnimmt (detaillierte Beschreibung im Abschnitt 4.7).

Das zweite Konzept *Formrohraufbau* ist in Abbildung 4.1b dargestellt. Die Grundkonstruktion ist ein Formrohr, welches über Führungsprofile die einzelnen Funktionsgruppen aufnimmt. Vorteile sind die relativ einfache Ausführung und Zugänglichkeit. Als Nachteile sind die weniger steife Konstruktion und die offene Bauweise zu nennen. Zusätzlich ist die zweite Ausführungsvariante des Konsolidierungssystems (Stand-Alone) eingebaut. Die Vor- und Nachteile sind im Abschnitt 4.7 angeführt.

Es sei an dieser Stelle nochmals betont, dass für beide Konzepte des Aufnahmesystems (Wangensystem und Formrohraufbau) die Ausführung als Ober-Unterteil wie auch die Stand-Alone-Lösung des Konsolidierungssystems ausführbar sind.

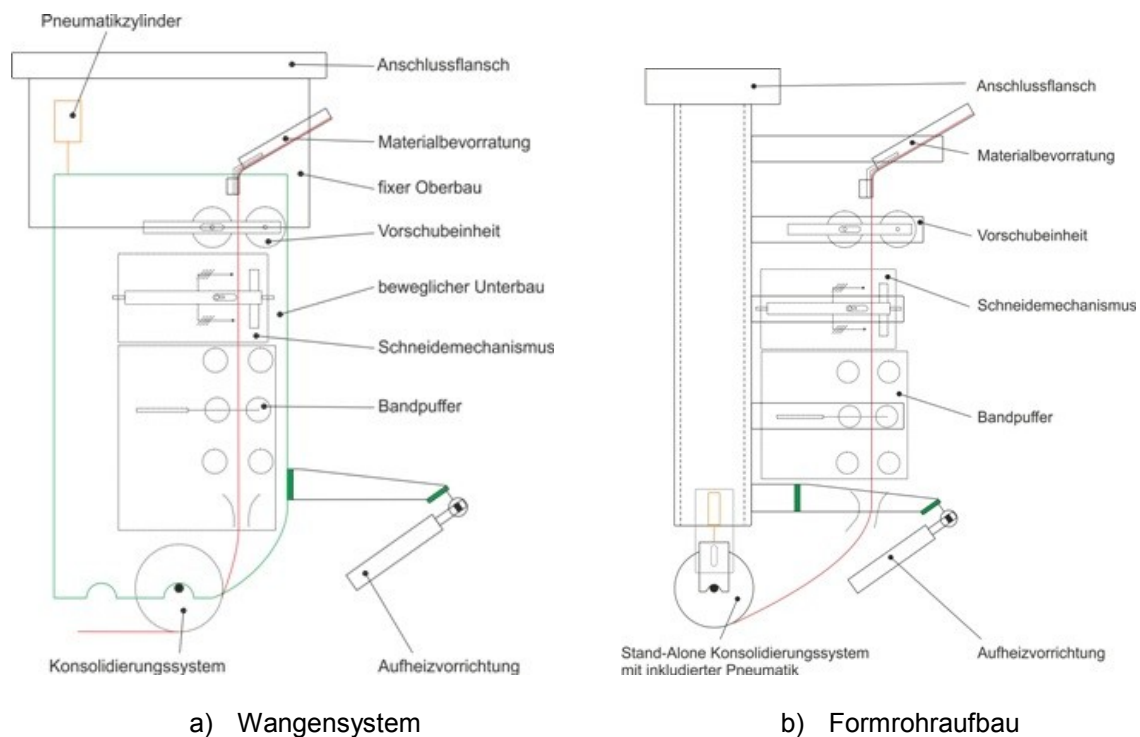


Abbildung 4.1: Konzeptvarianten für das Aufnahmesystem.

Beide Konzepte sind im Anhang detaillierter dargestellt (siehe Abbildung 10.2 und 10.3). In der nachstehenden Aufzählung erfolgt eine nähere Beschreibung der Auswahlkriterien für das Aufnahmesystem, Tabelle 4.3 zeigt anschließend die Entscheidungsmatrix, die das Wangensystem präferiert.

- Eine *steife Konstruktion* wird angestrebt, um Verformungen und damit einhergehende Ungenauigkeiten beim Ablegen des Tapes zu minimieren.
- Ein *einfacher Aufbau* soll erreicht werden.
- Gefordert wird ein *geringer Raumbedarf*, da dies die Flexibilität bei der Herstellung geometrisch komplexer Bauteile direkt beeinflusst,
- die Maximierung der *Wartungsfreundlichkeit*,
- den ökonomischen Aspekt der *minimalen Herstellkosten* zu berücksichtigen.
- Als signifikantes Kriterium gilt es, die *Kapselung* der einzelnen Funktionsgruppen zu realisieren um nicht bestimmbare oder unbekannte äußere Parameter bzw. Einflüsse bereits im Vorfeld zu minimieren.

Tabelle 4.3: Entscheidungsmatrix zur Auswahl des Aufnahmesystems.

	R	Wangen		Formrohr	
		P	P*	P	P*
Steifigkeit	25%	4	1	3	0,75
Einfachheit	10%	2	0,2	4	0,4
Raubedarf	15%	4	0,6	3	0,45
Wartungsfreundlichkeit	10%	2	0,2	4	0,4
Herstellkosten	10%	3	0,3	4	0,4
Kapselung	30%	4	1,2	1	0,3
	Ergebnis	3,5		2,7	

#### 4.1.1 Tapeführung

Die Elemente zur Tapeführung können einerseits zur präzisen Führung der Tapes und andererseits auch zur Kompensierung von Freibereichen im TLK, z. B. nach dem Ausbau von eventuell anderen, nicht benötigten Funktionsgruppen verwendet werden.

Es werden zwei Konzepte vorgestellt, die beide auf demselben Prinzip basieren: Ein äußeres Profil dient als Aufnahme für einen innenliegenden, austauschbaren

Einsatz. Durch diesen austauschbaren Einsatz können verschiedene Tapebreiten bedient und präzise geführt werden (vgl. mit Abbildung 4.2).

Das zweite Konzept ist gegenüber dem ersten, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, um mehrere Druckluftbohrungen erweitert. Durch die Druckluft soll ein beidseitiger Luftpolster aufgebaut werden, der eine schonende Führung der Tapes ermöglicht.

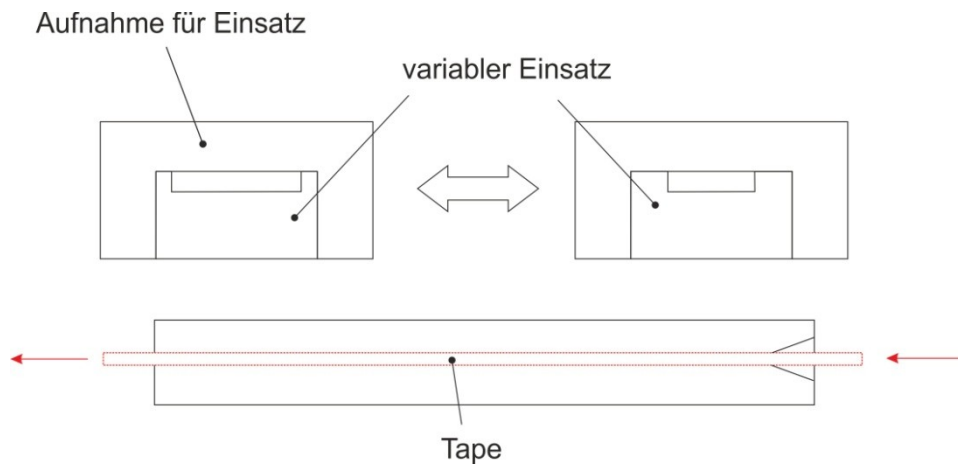


Abbildung 4.2: Konzept für die Tapeführung mit außenliegendem Profil und innenliegendem, austauschbarem Einsatz.

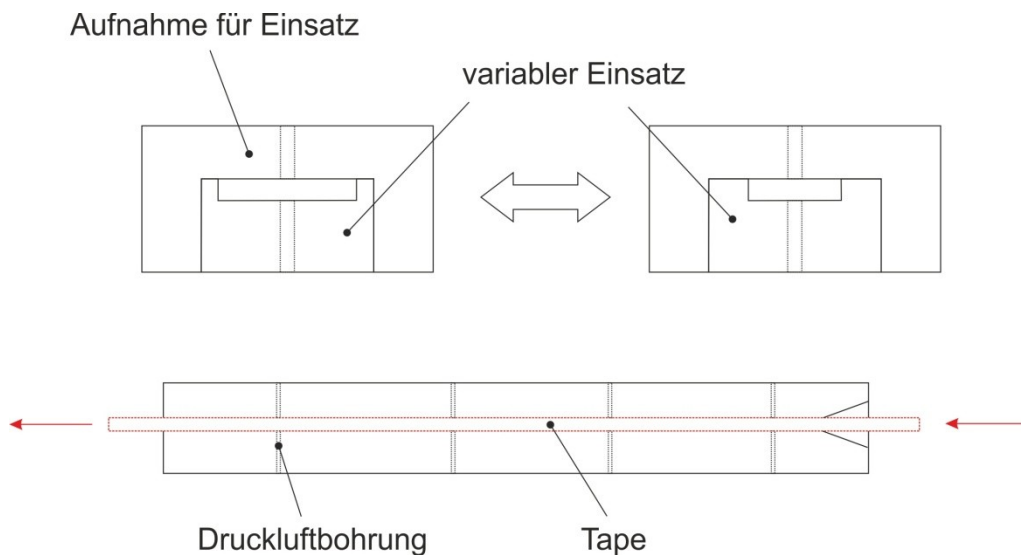


Abbildung 4.3: Konzept für die Tapeführung mit Druckluftbohrungen zur material-schonenden Führung der Tapes.



Tabelle 4.4 zeigt die Bewertung der beiden Konzepte. Dieser ist die Empfehlung für die Tapeführung mit Druckluftbohrungen zu entnehmen. Die Kriterien für die Bewertung sind wie folgt:

- *Einfachheit* der Konstruktion,
- *minimale Herstellkosten*,
- *schonende Tapeführung*.

Tabelle 4.4: Entscheidungsmatrix zur Auswahl einer Tapeführung.

	<i>R</i>	Konzept 1		Konzept 2	
		<i>P</i>	<i>P*</i>	<i>P</i>	<i>P*</i>
Einfachheit	20%	4	0,8	4	0,8
Herstellkosten	40%	4	1,6	3	1,2
Tapeführung	40%	2	0,8	4	1,6
Ergebnis		3,2		3,6	

#### 4.1.2 Befestigung der einzelnen Funktionsgruppen

Für die Befestigung der einzelnen Funktionsgruppen im Aufnahmesystem wurden sechs Ausführungsvarianten analysiert. Es wird prinzipiell zwischen einer starren Befestigung und einem Schnellwechselsystem unterschieden. Unter dem letztgenannten wird ein System verstanden, bei dem eine Montage bzw. Demontage ohne Einsatz von Werkzeug möglich ist.

Beim ersten Konzept, illustriert in Abbildung 4.4, wird die zu befestigende Komponente starr mit dem Aufnahmesystem verschraubt. Die Vorteile liegen in der Stabilität, den geringen Kosten und der einfachen Bauweise. Nachteilig ist die vergleichsweise ressourcenaufwändige (benötigtes Werkzeug, Zeit, usw.) Montage der Schrauben bei jedem Ein- bzw. Ausbau anzumerken.

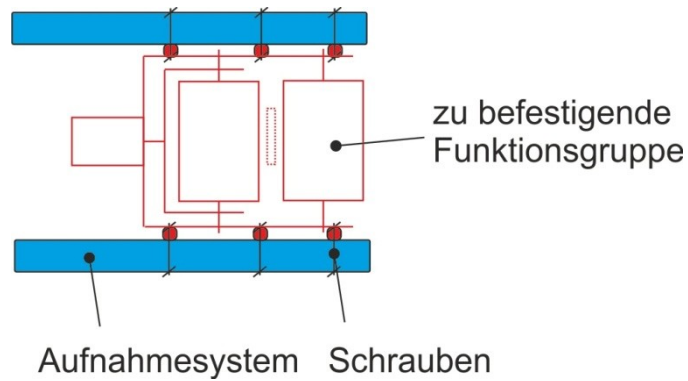


Abbildung 4.4: Schema zur Befestigung von Funktionsgruppen im Aufnahmesystem mittels Schraubverbindungen.

Alle nachfolgenden Konzepte folgen dem Prinzip der Schnellwechselsysteme. Bei dem in Abbildung 4.5 dargestellten Konzept werden Führungsschienen (im Aufnahmesystem) sowie Führungsrollen bzw. -klötze (an der zu fixierenden Funktionsgruppe) genutzt. Um ein horizontales Verschieben zu verhindern wird ein Spannelement (Spannhebel, Gewindestange, etc.) eingesetzt. Dadurch ist es möglich die Funktionsgruppe als gesamte Einheit effizient zu positionieren. Bei dieser Variante muss beachtet werden, dass zusätzliche Anschaffungskosten für die Spannelemente anfallen. Hinzu kommt der zur starren Befestigung vergleichsweise größere Platzbedarf im Bereich der Spannelemente.

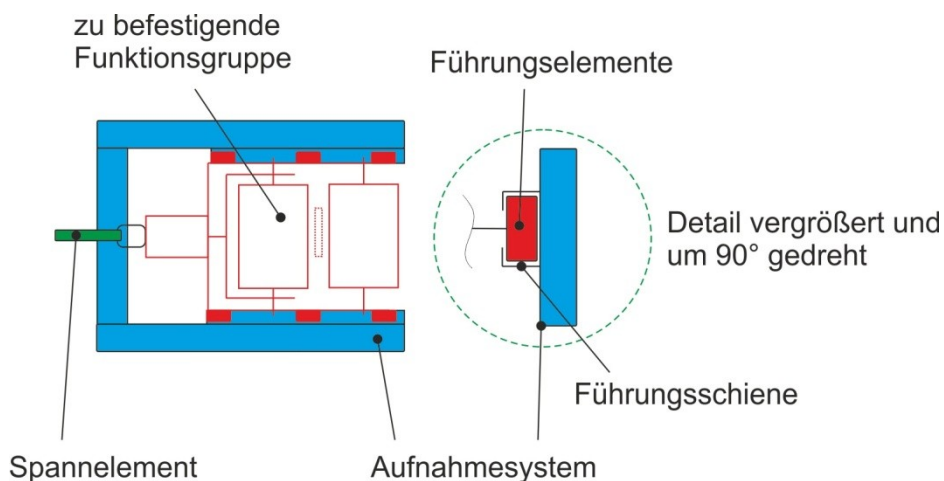


Abbildung 4.5: Schema zur Befestigung von Funktionsgruppen im Aufnahmesystem mittels Führungselementen in der Funktionsgruppe.

Bei dem in Abbildung 4.6 vorgestellten Konzept werden die Führungsschienen – im Gegensatz zur vorherigen Variante – an der Funktionsgruppe angebracht. Die Führungselemente sind im Aufnahmesystem befestigt. Die Abspannung erfolgt über die Führungselemente (siehe Abbildung 4.6, Pfeilrichtung in Detailansicht). In die Führungsschiene darf jedoch keine andere Komponente der Funktionsgruppe hineinragen, da diese mit den Führungselementen im Aufnahmesystem beim Ein- bzw. Ausbau kollidieren würden. Diese notwendige Freistellung muss bei jeder Funktionsgruppe berücksichtigt werden. Des Weiteren ist die Abspannung des Systems umständlicher, da mehrere Führungseinheiten gespannt werden müssen.

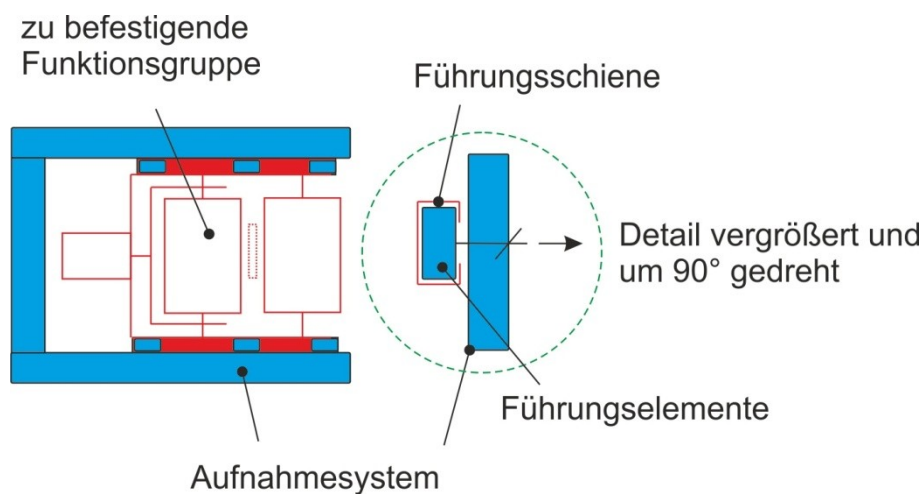


Abbildung 4.6: Schema zur Befestigung von Funktionsgruppen im Aufnahmesystem mittels Führungsschienen in der Funktionsgruppe.

Eine weitere Variante, dargestellt in Abbildung 4.7, ist die Befestigung über Positionsbolzen. Dazu werden im Aufnahmesystem mehrere senkrecht stehende Bolzen angebracht. Das den Bolzenpositionen angepasste Lochbild in der Funktionsgruppe erlaubt eine leichte Positionierung über die Bolzen im Aufnahmesystem. Für die notwendige Stabilität können mehrere Sicherungsstifte in den Positionsbolzen sorgen. Bei dieser Ausführung ist kein Spannsystem oder Werkzeug notwendig. Die Zugänglichkeit einiger Bolzen ist jedoch umständlich, es muss damit gerechnet werden, dass nicht alle Sicherungsstifte der Bolzen bedient werden können. Dieser Umstand verringert die Stabilität.

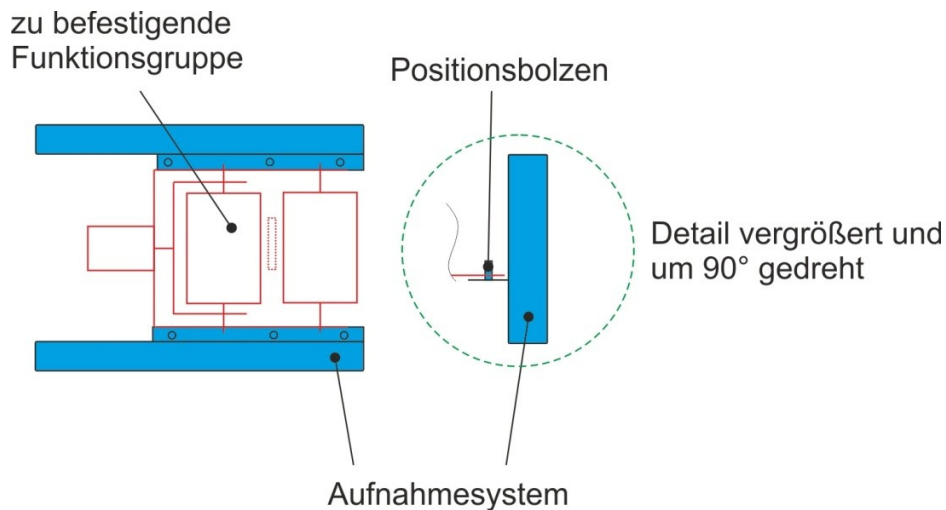


Abbildung 4.7: Schema zur Befestigung von Funktionsgruppen im Aufnahmesystem mittels Positionsbolzen.

Beim fünften Konzept (Abbildung 4.8) beherbergt das Aufnahmesystem Positionsbolzen und ein Spannsystem. Dadurch kann die schlechte Zugänglichkeit der hinteren Bolzen (vgl. mit Abbildung 4.7) kompensiert werden. Das Spannsystem kann z. B. über zwei Keile realisiert werden. Die Funktionsgruppe muss, neben dem passenden Lochbild für die Positionsbolzen, die Gegenstücke zum Spannsystem aufnehmen. Die gesamte Ausführung ist aufgrund des Spannsystems komplexer, verschafft den Funktionsgruppen jedoch im Gegenzug eine erhöhte Stabilität.

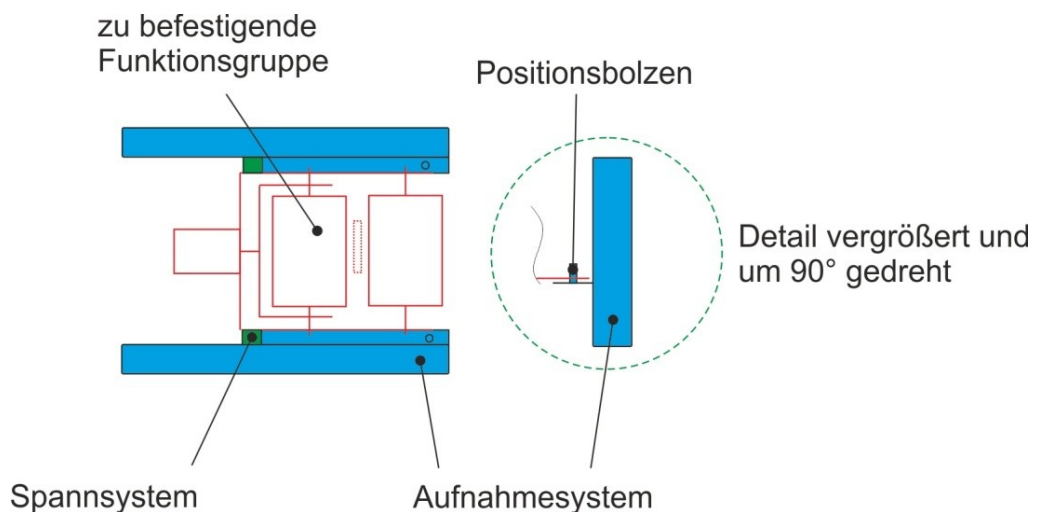


Abbildung 4.8: Schema zur Befestigung von Funktionsgruppen im Aufnahmesystem mittels Positionsbolzen und einem Spannsystem.

Das letzte Konzept, dargestellt in Abbildung 4.9, bietet einen besonders einfachen Ein- und Ausbau der zu befestigenden Komponente. Im Aufnahmesystem sind mehrere Rollen montiert, auf denen die Funktionsgruppen horizontal verschoben werden können. Die Funktionsgruppen müssen eine entsprechende Laufleiste aufnehmen, die im Kontakt mit den Rollen steht. Die Fixierung der Funktionsgruppen kann über mechanische Anschläge erfolgen. Die Ausführung ist hinsichtlich der beweglichen Einzelteile (Rollen) aufwendiger und weist bei der Stabilität leichte Defizite auf.

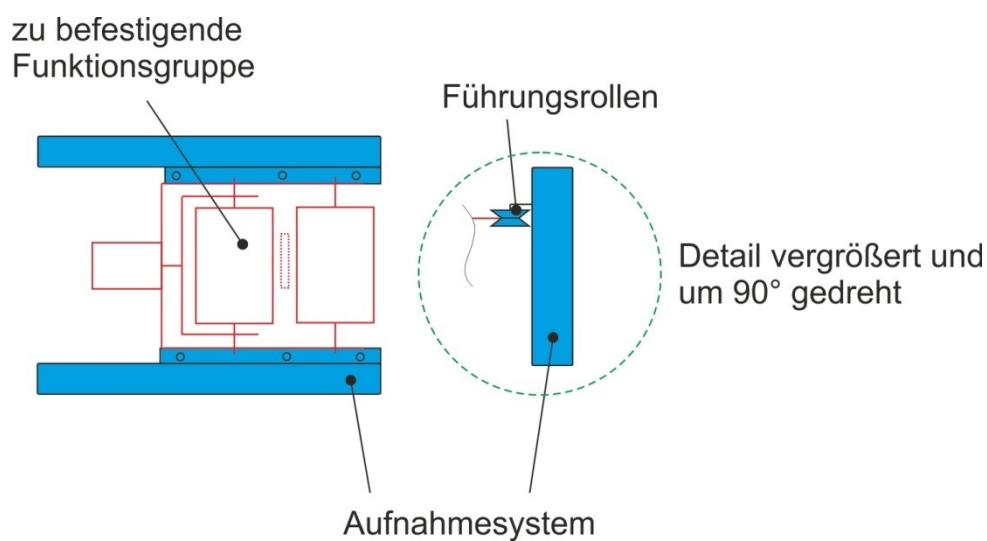


Abbildung 4.9: Schema zur Befestigung von Funktionsgruppen im Aufnahmesystem mittels Führungsrollen.

Tabelle 4.5 und 4.6 zeigen die Bewertung der vorgestellten Konzepte. Die Matrizen weisen eine gleich hohe Bewertung der Varianten 2 (Führungselemente in der Funktionsgruppe), 5 (Positionsbolzen und Spannsystem) und 6 (Führungsrollen) auf. Die finale Entscheidung wird somit in der Konstruktionsphase getroffen. Die Bewertung erfolgt anhand der aufgelisteten Kriterien:

- *Minimale Herstellkosten*,
- leichte und reproduzierbare *Positionierung* der Funktionsgruppen,
- *Wartungsfreundlichkeit* bzw. Zugänglichkeit,
- *Stabilität* bzw. der Widerstand gegen ungewollte Bewegung während des Betriebes.

Tabelle 4.5: Entscheidungsmatrix für die Auswahl eines Befestigungssystems der Konzepte 1 bis 3.

	<i>R</i>	Konzept					
		1		2		3	
		<i>P</i>	<i>P*</i>	<i>P</i>	<i>P*</i>	<i>P</i>	<i>P*</i>
Herstellkosten	10%	4	0,4	3	0,3	3	0,3
Positionierung	20%	3	0,6	4	0,8	1	0,2
Wartungsfreundlichkeit	30%	2	0,6	4	1,2	3	0,9
Stabilität	40%	4	1,6	3	1,2	3	1,2
Ergebnis		3,2		3,5		2,6	

Tabelle 4.6: Entscheidungsmatrix für die Auswahl eines Befestigungssystems der Konzepte 4 bis 6.

	<i>R</i>	Konzept					
		4		5		6	
		<i>P</i>	<i>P*</i>	<i>P</i>	<i>P*</i>	<i>P</i>	<i>P*</i>
Herstellkosten	10%	4	0,4	3	0,3	3	0,3
Positionierung	20%	4	0,8	4	0,8	4	0,8
Wartungsfreundlichkeit	30%	3	0,9	4	1,2	4	1,2
Stabilität	40%	2	0,8	3	1,2	3	1,2
Ergebnis		2,9		3,5		3,5	

## 4.2 Materialzuführung

Die manuelle Materialzuführung (siehe Abbildung 4.10) kann als aufhängbare bzw. verschraubbare Konstruktion ausgeführt werden. Das Tape wird am Anfang des Führungsprofils eingelegt und durch das an die Tapegröße angeglichene Umlenkprofil am Ende (bzw. vor der Vorschubeinheit) präzise positioniert. Die Materialzuführung besteht aus zwei Teilen: dem *Führungsprofil*, welches einen U-förmigen Querschnitt besitzt und dem austauschbaren *Umlenkprofil*, das im Führungsprofil montiert ist.

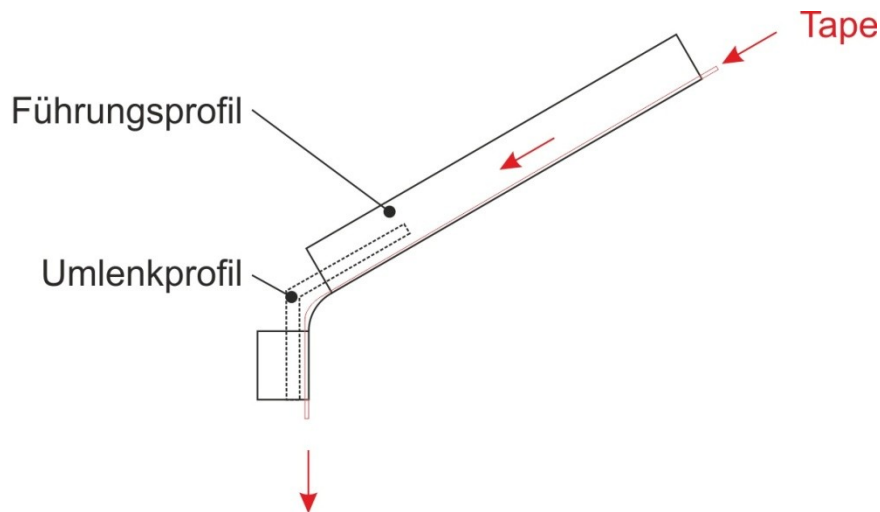


Abbildung 4.10: Konzept für die Materialzuführung mittels Führungs- und Umlenkprofil.

### 4.3 Vorschubeinheit

Die Vorschubeinheit als in sich geschlossene Funktionsgruppe ist zwischen der Materialzuführung und dem Schneidemechanismus positioniert. Abbildung 4.11 zeigt das entwickelte Konzept.

Die Einheit besteht aus zwei Rahmenteilen: Der äußere Rahmen nimmt sowohl eine drehbar gelagerte Rolle als auch einen zweiten (inneren) Rahmen auf. Dieser ist mittels Langlöcher im äußeren geführt, dadurch ergibt sich ein Freiheitsgrad des inneren Rahmens in horizontaler Richtung. Der innere Rahmen nimmt eine weitere drehbar gelagerte Rolle auf. Zur Betätigung des inneren Rahmens kommt ein Pneumatikzylinder zum Einsatz. Das Gehäuse des Pneumatikzylinders wird am äußeren Rahmen, die Kolbenstange am inneren Rahmen befestigt. Die Rolle im inneren Rahmen wird über einen Servomotor angetrieben.

Abbildung 4.11 veranschaulicht die beiden möglichen Betriebsmodi: Beim *Ablegevorgang* – links dargestellt – wird kein Tape gefördert, der Pneumatikzylinder ist eingefahren, die Rollen werden nicht angetrieben, das Tape läuft frei zwischen den Rollen. Am *Bahnanfang* bzw. am Ende des Ablegevorganges (rechts illustriert) wird das Tape zwischen den Rollen geklemmt und definiert gefördert.

Der Pneumatikzylinder ist ausgefahren, der Motor der Vorschubeinheit treibt die im inneren Rahmen gelagerte Rolle an, das Tape wird in Richtung Schneidemechanismus und in weiterer Folge zum Konsolidierungssystem bewegt.

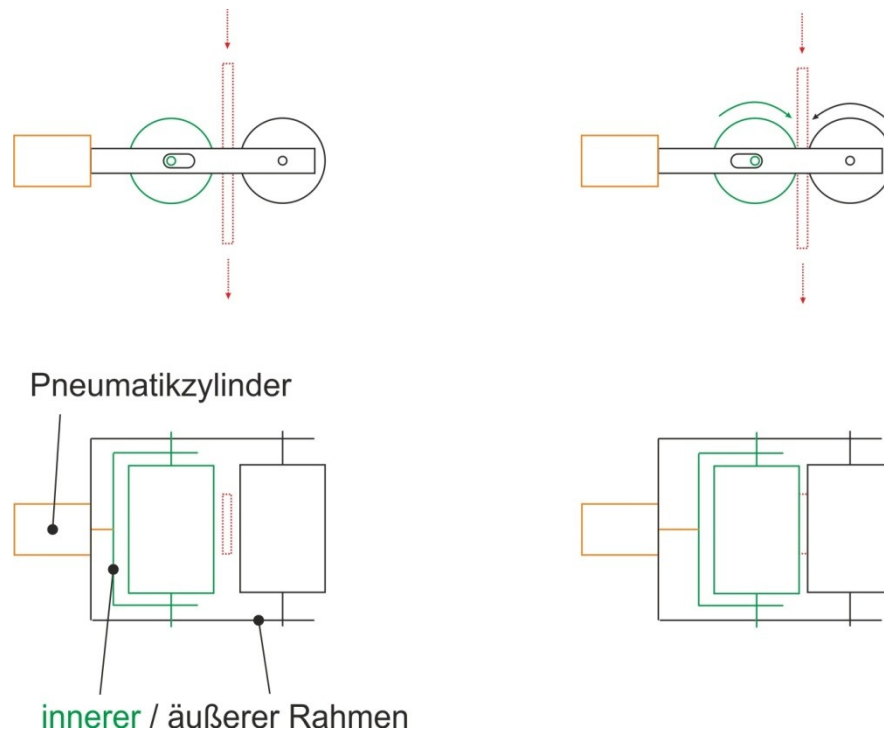


Abbildung 4.11: Konzept für die Vorschubeinheit, links: Tape läuft frei zwischen den Rollen, rechts: Tape wird zwischen den Rollen geklemmt und definiert gefördert.

Für die Vorschubeinheit wurde keine Alternative ausgearbeitet, da keine zusätzlichen Ressourcen zur Verfügung standen.

#### 4.4 Schneidemechanismus

Der Schneidemechanismus (Abbildung 4.12) beherbergt eine Klinge und einen gefederten, C-förmigen Niederhalter. Beide Komponenten werden gleichzeitig durch einen Pneumatikzylinder betätigt. Die zwei Schenkel des Niederhalters, jeweils angeordnet ober- und unterhalb wie auch vor der Schneide der Klinge, haben die Aufgabe das Schnittergebnis zu optimieren. Zu diesem Zweck wird das Tape an die Blende gepresst, eine Relativbewegung zur Klinge wird unterbunden. Die Schnittzeit wird mit etwa 0,1 – 0,2 s eingeschätzt.



Optional kann die Klinge um  $\pm 45^\circ$  gedreht werden, dazu kann der innere, drehbar gelagerte Rahmen genutzt werden, der im äußeren Rahmen geführt ist. Die Niederhalter sind im äußeren Rahmen geführt – hier ist keine Schrägstellung erwünscht. Die Klinge ist im drehbaren Rahmen geführt. Der Schnittwinkel kann über einen Motor angesteuert werden, alternativ ist eine manuelle Einstellung über einen Drehhebel möglich (siehe Abbildung 4.12 und 4.13).

Abbildung 4.12 zeigt die beiden Betriebsmodi: Beim *Ablegevorgang* (links) läuft das Tape frei durch den Schneidemechanismus hindurch. Am *Ende des Ablegevorganges* wird der Pneumatikzylinder aktiviert. Zuerst pressen die Niederhalter das Tape gegen die Blende. Dadurch wird gewährleistet, dass keine Tapebewegung beim Schnitt auftritt. Anschließend erfolgt der Schnitt durch die Klinge.

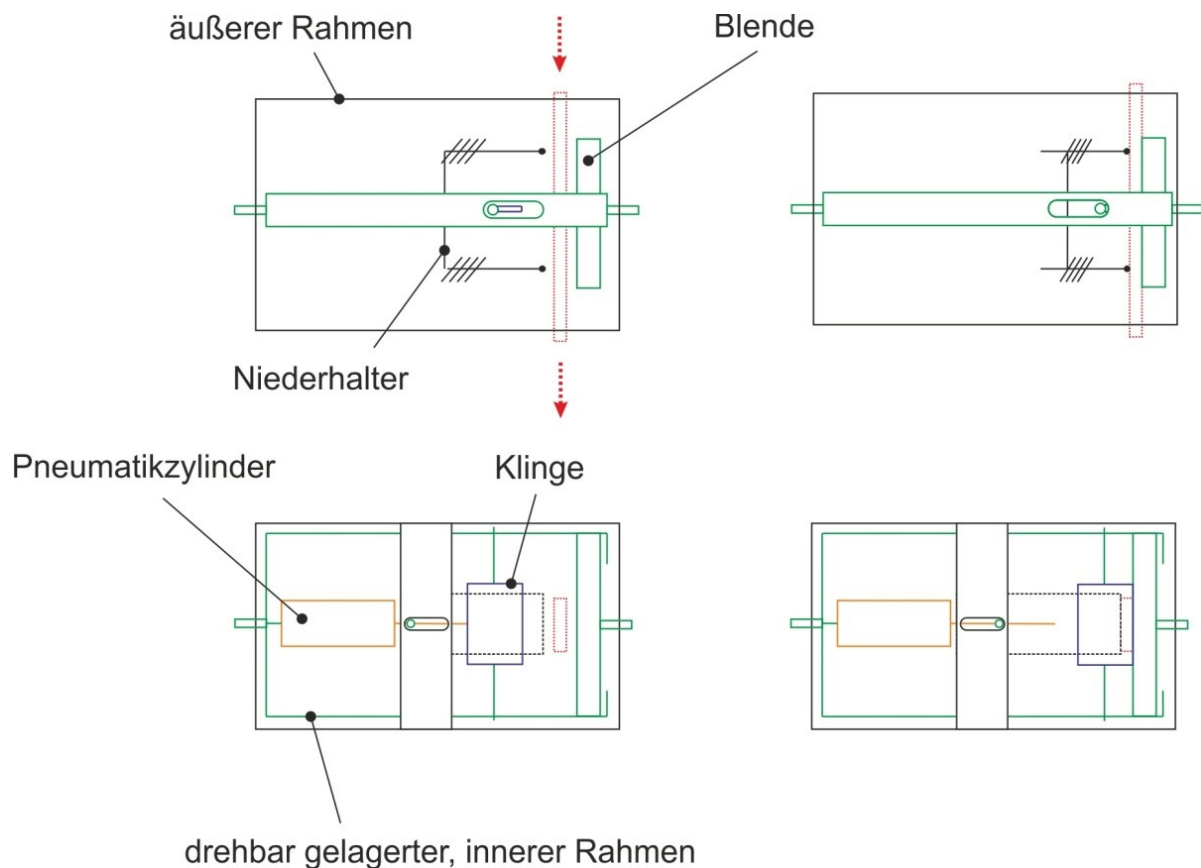


Abbildung 4.12: Konzept für die Ausführung des Schneidemechanismus, links: Tape läuft frei zwischen den Niederhaltern, rechts: Tape wird durch Niederhalter geklemmt und anschließend geschnitten.

Die Form der Klinge hat gravierende Auswirkungen auf das Schnittergebnis. Die möglichen Klingenformen mitsamt deren Effekten auf den Schnitt sind in der nachfolgenden Auflistung angeführt:

- Eine *gerade Klinge* garantiert eine gleichmäßige Belastung des Tapes,
- beim Einsatz einer *schrägen Klinge* wird das Tape seitlich verschoben,
- bei Verwendung einer *pfeilförmige Klinge* wird das Tape gespreizt,
- die *keilförmige Klinge* staucht das Tape beim Schnitt.

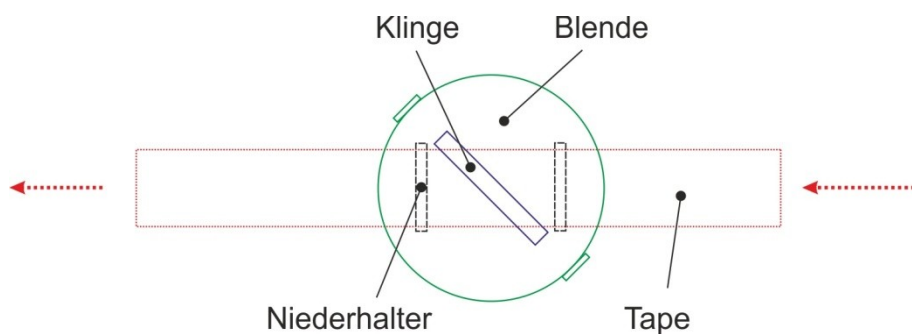


Abbildung 4.13: Schematische Darstellung der optionalen Schrägstellung der Klinge für den Schneidemechanismus.

Die Ausführung mittels einer Ultraschallklinge ist ebenfalls möglich. Die Vorteile sind die geringere Schnittkraft und die präzisere Schnittfläche. Nachteilig zu erwähnen sind die erhöhten Anschaffungskosten sowie der erhöhte konstruktive Aufwand.

Tabelle 4.7 listet die Bewertung der beiden Klingenausführungen auf. Daraus ist die Empfehlung für die Standard-Klinge ersichtlich. Die Kriterien für die Bewertung sind wie folgt:

- Die *Einfachheit* der Konstruktion,
- *minimale Herstellungskosten* bzw. Anschaffungskosten,
- eine *niedrige Schnittkraft*, daraus resultiert ein geringerer Platzbedarf und
- eine saubere *Schnittfläche*.

Tabelle 4.7: Entscheidungsmatrix zur Auswahl der Klingenausführung.

	<i>R</i>	Standard		Ultraschall	
		<i>P</i>	<i>P*</i>	<i>P</i>	<i>P*</i>
Einfachheit	30%	4	1,2	2	0,6
Kosten	40%	4	1,6	1	0,4
Schnittkraft	20%	2	0,4	4	0,8
Schnittfläche	10%	1	0,1	4	0,4
Ergebnis		3,3		2,2	

Für den Schneidemechanismus wurde keine Alternative ausgearbeitet, da keine zusätzlichen Ressourcen zur Verfügung standen.

#### 4.5 Bandpuffer

Da während des Schneidvorganges die Niederhalter das Tape fixieren (vgl. mit Abschnitt 4.4) ist ein Einbau eines definierten Materialüberschusses (Bandpuffer) für einen kontinuierlichen Ablegeprozess unumgänglich. Der Bandpuffer kann zu Beginn einer neuen Bahn oder kurz vor dem Schneidvorgang gefüllt werden.

Diese Aufgabe kann entweder von der Vorschubeinheit übernommen werden, indem mehr Tape gefördert wird als benötigt, oder von einem zusätzlichen Aktuator im Bandpuffer, der das zusätzlich benötigte Tape eigenständig fördert.

Wird der Schneidprozess mit vollem Bandpuffer betrachtet, ergibt sich folgender Ablauf: Der Schneidemechanismus trennt kurz vor Bahnende das durch die Niederhalter eingeklemmte, stillstehende Band bei fortlaufendem Ablegeprozess ab. Der Bandpuffer wird hierbei aufgebraucht. Die Größe des Bandpuffers ist abhängig von der Schnittzeit und einem Reservefaktor. Es werden drei Konzepte vorgestellt, sie unterscheiden sich durch die Art des Eingriffs bei der Bildung des Bandpuffers.

Bei der *aktiven* Steuerung, siehe Abbildung 4.14, wird das mittlere, drehbare Rollenpaar durch einen separaten Motor horizontal verschoben. Die beiden äußeren Rollenpaare sind an deren Position drehbar gelagert. Bei Aktivierung des Motors wird der Bandpuffer auf- oder abgebaut.

Es kann eine präzise Fadenkraft eingestellt und gemessen werden und das Tape ist in jedem Moment geführt. Für diese Ausführung ist jedoch ein sehr schneller Aktuator notwendig und die Programmierung ist aufwendig. Bei dieser Ausführungsvariante wird das Tape zusätzlich drapiert. In dieser Konstruktion ist es ebenfalls möglich, den Bandpuffer nicht über die Vorschubeinheit oder den Aktuator aufzubauen sondern über verschieden geregelte Umlaufgeschwindigkeiten beim ersten und letzten Rollenpaar. Nachteilig in diesem Falle ist die Notwendigkeit zusätzlicher Aktuatorik bei den äußeren Rollenpaaren.

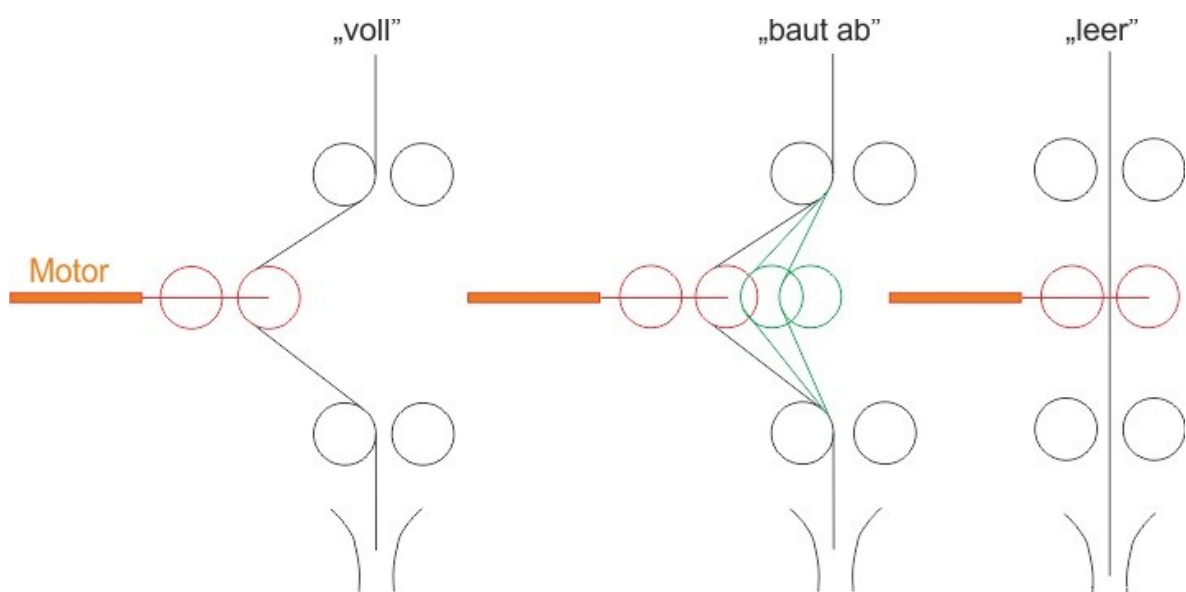


Abbildung 4.14: Konzeptvorstellung des aktiven Bandpuffers, von links nach rechts: Bandpuffer ist aufgebaut, wird abgebaut und ist leer.

Das in Abbildung 4.15 vorgestellte *passive* Konzept erlaubt dem Band eine weitestgehend freie Ausbildung des Bandpuffers, die äußeren, drehbaren Rollenpaare stützen hierbei die Biegelinie.

Im mittleren Bereich wird das Tape durch ein schwach gefedertes Rollenpaar geführt. Der gesamte Aufbau ist weniger komplex, es ist keine definierte Fadenform bzw. genaue Einstellung einer Fadenkraft möglich. Der Bandpuffer kann nur durch die Vorschubeinheit erzeugt werden.

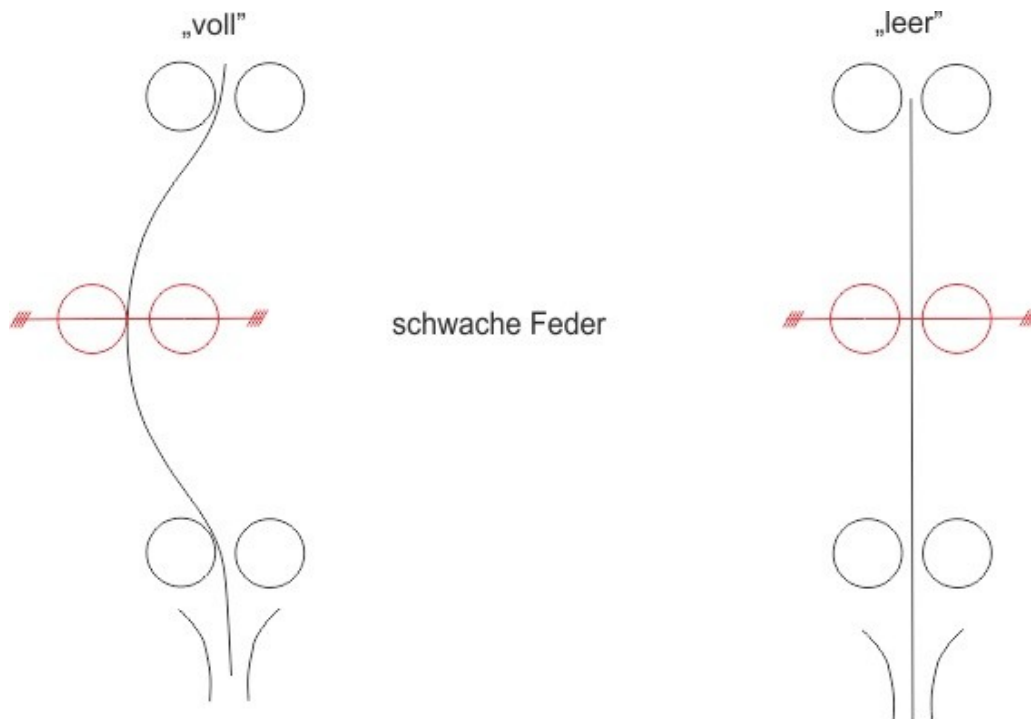


Abbildung 4.15: Konzeptvorstellung des passiven Bandpuffers, links: Der Bandpuffer ist aufgebaut, rechts: Der Bandpuffer ist leer.

Das letzte Konzept, welches nur grob umrissen wird, verbindet über ein mechanisches und gefedertes Hebelsystem den unteren Schenkel des Niederhalters mit dem mittleren Rollenpaar. Wenn der Niederhalter beim Schneidvorgang durch den Pneumatikzylinder bewegt wird, setzt sich das mittlere Rollenpaar ebenfalls in Bewegung, der Bandpuffer baut sich auf. In der Endposition des Niederhalters hat der Bandpuffer sein Maximum erreicht. Der kontinuierliche Abzug des Tapes bewegt das mit einer Feder versehene mittlere Rollenpaar nahe seiner Ausgangsposition zurück, der Bandpuffer baut sich ab. Beim Zurückkehren des Niederhalters in seine Ausgangsstellung wird die Feder entspannt und das mittlere Rollenpaar bewegt sich zur Gänze in seine Ausgangsposition zurück.

Der Vorteil an diesem Aufbau wäre, dass keine Synchronisation zwischen den Aktuatoren der Funktionsgruppen notwendig ist. Nachteilig sind die hohe Anzahl an bewegten Teilen, der konstruktive wie auch fertigungstechnischer Aufwand sowie die mechanische Kopplung zweier Funktionsgruppen.

Tabelle 4.8 zeigt die Bewertung und Empfehlung für die Auswahl eines Konzeptes. Aufgrund des Punktegleichstandes zwischen aktiver und passiver Umsetzung wird die Entscheidung daher erst in der Entwurfsphase finalisiert. Die für die Bewertung verwendeten Kriterien sind in der nachkommenden Auflistung beschrieben:

- Soweit möglich sind die *Herstellkosten* zu minimieren und
- die direkten *Einstellmöglichkeiten* bzw. Einflussgrößen zu maximieren.
- Ein *einfacher mechanische Aufbau* ist zu realisieren.
- Ein *geringer regelungstechnischer Aufwand* ist anzustreben.

Tabelle 4.8: Entscheidungsmatrix zur Auswahl eines Bandpufferkonzeptes.

	<i>R</i>	Konzept 1		Konzept 2		Konzept 3	
		<i>P</i>	<i>P*</i>	<i>P</i>	<i>P*</i>	<i>P</i>	<i>P*</i>
Herstellkosten	30%	2	0,6	4	1,2	1	0,3
Einstellmöglichkeiten	40%	4	1,6	1	0,4	1	0,4
Einfachheit	20%	2	0,4	4	0,8	1	0,2
Regelaufwand	10%	1	0,1	3	0,3	4	0,4
Ergebnis		2,7		2,7		1,3	

#### 4.6 Aufheizvorrichtung

Die ausgearbeiteten Konzepte berücksichtigen zwei Arten zur Positionsverstellung der Aufheizvorrichtung: eine manuelle und eine automatisierte Variante.

Die *manuelle Positionsverstellung* (Abbildung 4.16) erlaubt nur einen geringen In-line Regeleinfluss der eingebrachten Wärmemenge über den Volumenstrom. Die Einstellung der Position außerhalb des Betriebes erfolgt über in Langlöchern geführte Klemmelemente. Es ist eine Veränderung der Einstellung in Längsrichtung wie auch des Einstrahlwinkels möglich.

Die *automatisierte Variante*, dargestellt in Abbildung 4.17, ermöglicht durch den Einsatz von Servomotoren eine bessere Regelbarkeit der einzubringenden Wärmemenge. Die rotatorische Einstellung kann z. B. über ein Zahnrad erfolgen und die translatorische über eine Zahnstange.

Jedoch ist die gesamte Konstruktion aufgrund der Motoren, Getriebe und notwendigen Isolation der gesamten Aktuatorik deutlich komplexer.

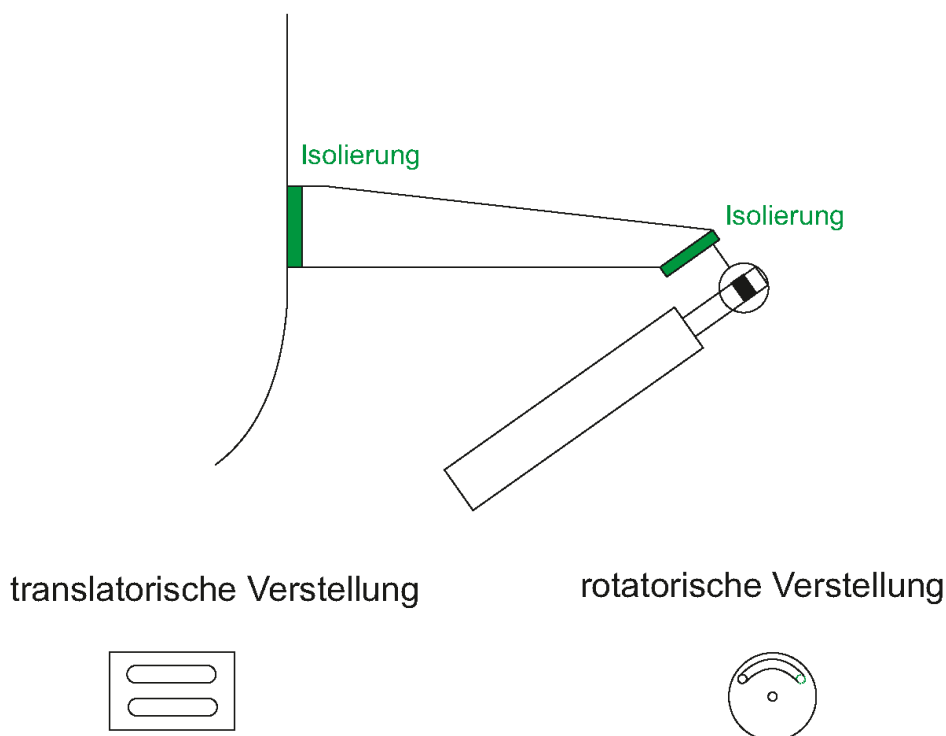


Abbildung 4.16: Konzeptaufbau der manuellen Verstellmöglichkeiten der Aufheizvorrichtung.

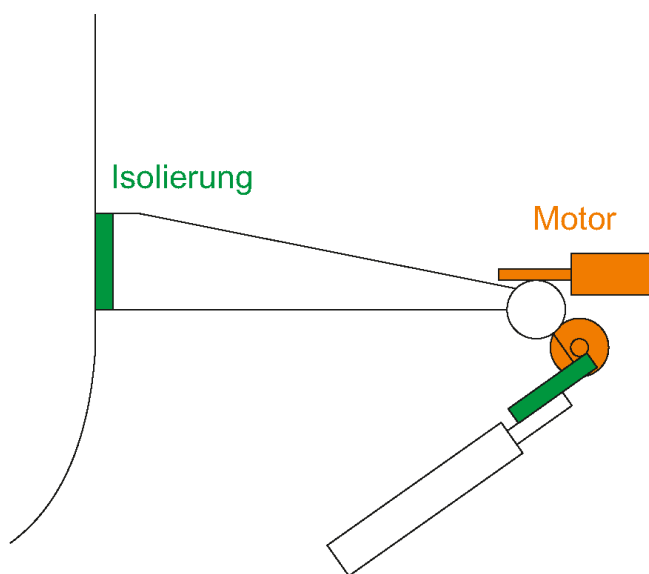


Abbildung 4.17: Konzeptaufbau der automatisierten Positionierung der Aufheizvorrichtung.

Für den ersten Prototypen wird die manuelle Verstellung unter Berücksichtigung einer späteren Umrüstung auf die automatisierte Variante bzw. den Einsatz einer Laseroptik gefertigt. Die Halterung bzw. der Träger der Aufheizvorrichtung wird aus thermischen Gründen aus Edelstahl gefertigt, und an zwei Stellen isoliert.

#### 4.7 Konsolidierungssystem

Das Konsolidierungssystem ist die abschließende Einheit des TLK. Abbildung 4.18 zeigt das erste von zwei Konzepten für die verwendete Ein-Rollen-Konsolidierung. Bei dieser Ausführung wird die Konsolidierungsrolle drehbar im vertikal beweglichen Unterteil befestigt (links in Abbildung 4.18). Dieser Unterbau beinhaltet alle Funktionsgruppen des TLK. Das Gehäuse des Pneumatikzylinders, der für die Aufbringung des Konsolidierungsdruckes verantwortlich ist, wird im fixen Oberteil befestigt. Die Kolbenstange betätigt den Unterteil, der im Oberteil geführt wird (vgl. mit Abschnitt 4.1). Eine spätere Aufnahme einer zweiten Rolle bzw. eines Konsolidierungsschuhes ist durch eine zusätzliche Aufnahmeöffnung realisiert (rechts in Abbildung 4.18). Die Vorteile sind die steifere Ausführung und die Berücksichtigung der Positionsungenauigkeit des Roboters, da alle Funktionsgruppen zueinander immer dieselbe Distanz besitzen. Nachteilig zu erwähnen ist die komplexere und massivere Konstruktion im Vergleich zweiten Variante.

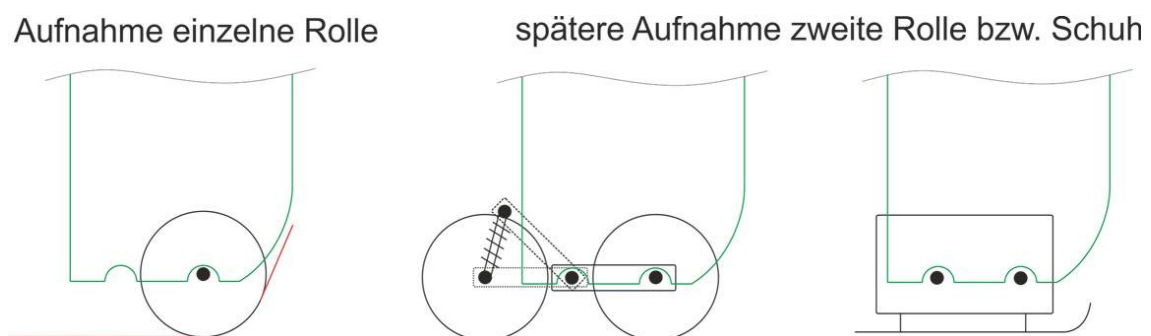


Abbildung 4.18: Konzeptvariante „Ober-/Unterteil“ für die Ausführung des Konsolidierungssystems, links: Aufnahme einer einzelnen Rolle, rechts: spätere Aufnahme einer zweiten Rolle bzw. eines Schuhs.

Die zweite Konzeptvariante, dargestellt in Abbildung 4.19, strebt einen in sich geschlossenen Aufbau an. Alle notwendigen Komponenten sind in einer kompakten Baugruppe vereint.



Ähnlich wie bei der Vorschubeinheit gibt es einen vertikal beweglichen Rahmen, der in einem starren Rahmen geführt wird. Der bewegliche Rahmen wird über Pneumatikzylinder, dessen Gehäuse am fixen Rahmen befestigt wird, betätigt. Im inneren (beweglichen) Rahmen wird die Konsolidierungsrolle drehbar gelagert (links in Abbildung 4.19). Ein mögliches System für die spätere Ausführung mittels Schuh oder zweiter Rolle ist rechts in Abbildung 4.19 illustriert. Die gesamte Baugruppe der Konsolidierung wird im Aufnahmesystem befestigt. Die Vorteile sind die kompaktere und einfachere Konstruktion, höhere Wartungsfreundlichkeit durch die leichtere Zugänglichkeit der Komponenten. Im Gegensatz dazu stehen die Positionsungenauigkeit und die geringere Systemsteifigkeit.

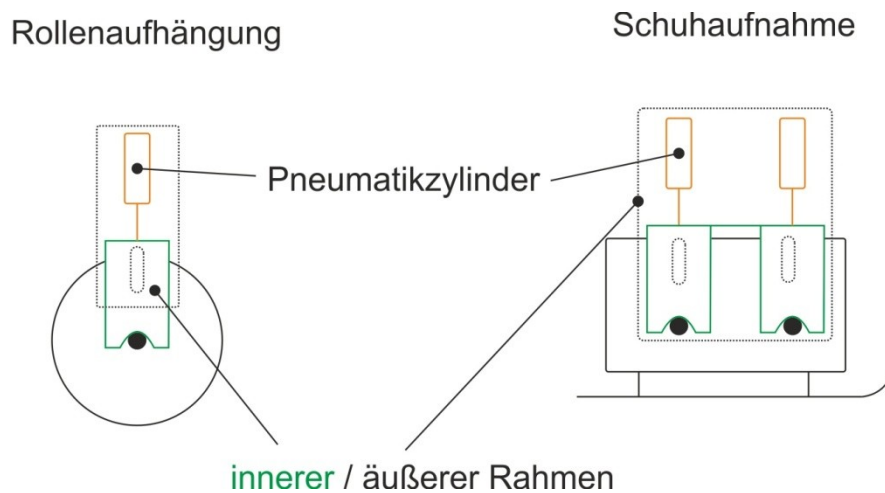


Abbildung 4.19: Konzeptvariante „Modul“ für die Ausführung des Konsolidierungssystems, links: Ein-Rollen Aufhängung, rechts: Zwei-Rollen bzw. Schuhaufhängung.

Es wird bewusst kein Mehrrollen-Schnellwechselsystem in die Konzeptionierung aufgenommen. Dieses macht zwar einen in-line Wechsel der Rollen(geometrie) möglich, ist jedoch für die momentane Anwendung nicht relevant.

Die Temperierung der Rolle kann entweder über ein Temperiermedium oder über eine induktiv beheizte Konstruktion erfolgen. Beide Varianten sind als Eigen- bzw. Sonderkonstruktionen zu sehen. Die induktiv beheizte Rolle kann jedoch keine Wärme aktiv abführen.

Bei der Eigenkonstruktion, schematisch dargestellt in Abbildung 4.20, wird das Temperiermedium über den Vorlauf in die starr gelagerte Welle eingebracht. Darauf folgend fließt das Medium entlang der inneren Bohrungen und trifft den rotierenden, äußeren Rollenkörper zentral an jenem Punkt, an dem das Tape die Rolle tangiert. Hier teilt sich der Volumenstrom auf, ein Teil fließt umgehend Richtung Rücklauf. Der andere Teil bewegt sich in Richtung Vorlauf und kann durch mehrere Bohrungen, die in der starren Welle einbracht sind, anschließend ebenfalls in den Rücklauf abfließen.

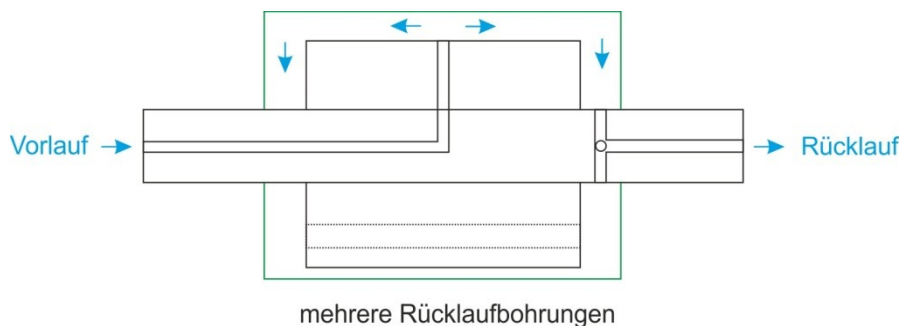


Abbildung 4.20: Konzept für die Eigenkonstruktion der temperierten Konsolidierungsrolle.

Tabelle 4.9 zeigt die Entscheidungsmatrix zur Auswahl des Konsolidierungssystems, die erste Konzeptvariante (Ober-/Unterteil) liegt deutlich vor der Modulausführung. Die folgende Auflistung geht näher auf die Kriterien ein:

- Eine hohe bzw. ausreichend *hohe Steifigkeit* und
- eine *einfache und sichere Ausführung* ist anzustreben.
- Die Prinzipien der *minimalen Herstellkosten* sowie
- des *geringen Raum- bzw. Platzbedarfs* sind zu beachten.
- Eine weitestgehend *hohe Wartungsfreundlichkeit* bzw. Zugänglichkeit um Stillstandszeiten zu minimieren.
- Die *Positionstreue* der einzelnen Funktionsgruppen zueinander, damit am Bahnanfang eine präzise Platzierung des Tapes im Zwickelbereich möglich ist.

Tabelle 4.9: Entscheidungsmatrix zur Auswahl eines Konsolidierungssystems.

	<i>R</i>	Konzept 1		Konzept 2	
		<i>P</i>	<i>P</i> *	<i>P</i>	<i>P</i> *
Steifigkeit	20%	3	0,6	2,	0,4
Einfachheit	10%	1	0,1	2	0,2
Herstellkosten	15%	1	0,15	2	0,3
Raumbedarf	10%	2	0,2	2	0,2
Wartungsfreundlichkeit	5%	1	0,05	3	0,15
Positionstreue	40%	4	1,6	0	0
	Ergebnis	2,7		1,25	

## 5 Konstruktive Ausführung

Bevor näher auf die konstruktive Ausführung des TLK eingegangen wird, ist es unerlässlich sich mit den drei Gestaltungsgrundregeln „eindeutig“, „einfach“ und „sicher“ auseinanderzusetzen. Unter *eindeutigem Gestalten* kann unter anderem folgendes verstanden werden [24]:

- Erzwingen der richtigen Bedienung,
- klar definierte Zeitpunkte für Wartung und Inspektion,
- eindeutige Zuordnung der Teilfunktionen mit zugehörigen Eingangs- und Ausgangsgrößen.

Diese Auflistung kann mit der Erläuterung des Prinzips des *einfachen Gestaltens* erweitert werden [24]:

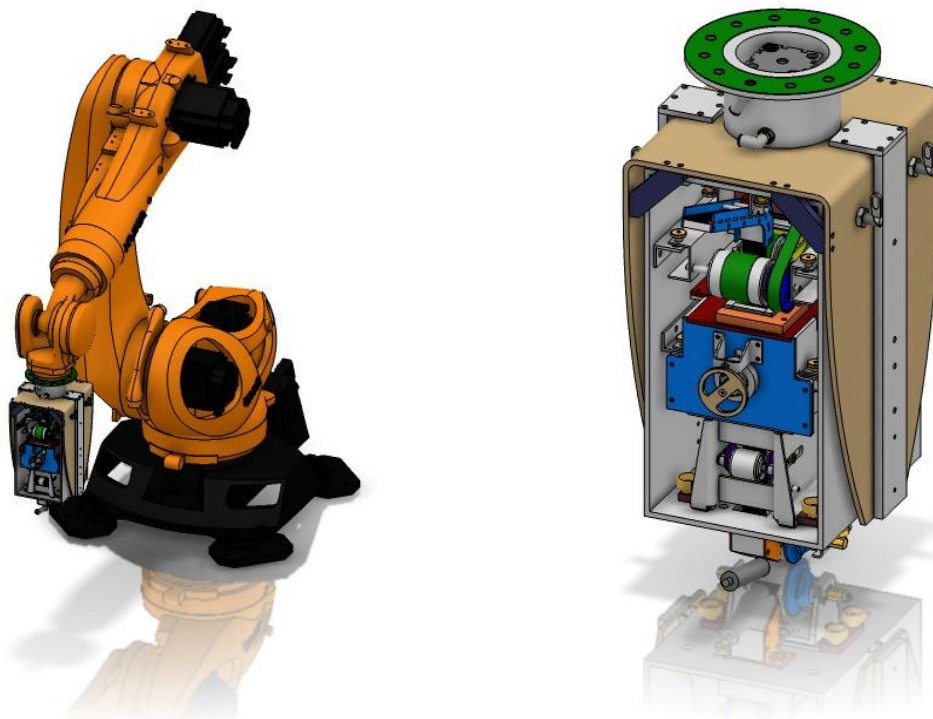
- Geringe Anzahl von Vorgängen und Komponenten zur Funktionsrealisierung,
- (mathematisch) einfache geometrische Formen,
- wenige Fertigungsverfahren.

Abschließend soll der Aspekt des *sicheren Gestaltens* näher betrachtet werden, der sich in drei Stufen unterteilt: Bei der unmittelbaren Sicherheitstechnik ist eine Gefährdung von vornherein und aus sich heraus ausgeschlossen. Bei der mittelbaren Sicherheitstechnik werden Schutzsysteme erstellt und durch die Anordnung der Schutzeinrichtung wird die Gefahr isoliert. Die hinweisende Sicherheitstechnik weist auf die Gefahrenquellen hin macht diese kenntlich [24].

Für die Konstruktion des TLK mit der Bezeichnung „LS-I“ wurde die 3D-CAD Software CATIA V6R2012x verwendet. Ausgehend von den Empfehlungen der Konzeptphase (vgl. mit Kapitel 4) wurden im ersten Schritt die präferierten Varianten mit 3D-Flächenmodellen umgesetzt. Dadurch konnte eine erste Abschätzung der Dimensionen und notwendigen Bauräume gewonnen werden. Zusätzlich dienten die Modelle der einzelnen Funktionsgruppen als Grundgerüst (Skelettmodell) für die Erstellung der benötigten fertigungsrelevanten Einzelteile.

Die Skelettmodelle der Funktionsgruppen wurden mit den Einzelteilen parametrisch und assoziativ verknüpft. Bei einer Dimensionsänderung im Skelettmodell kommt es dadurch zu einer entsprechenden Anpassung der Abmessungen bei den gekoppelten Einzelteilen. Dadurch können Revisionen effektiv bearbeitet werden, da es nicht mehr notwendig ist jede einzelne Komponente anzupassen. Neben diesem parametrischen, assoziativen Aufbau wurde bei jeder Funktionsgruppe eine Kinematikuntersuchung verwirklicht um etwaige ungewollte Kollisionen zu unterbinden sowie den Raumbedarf zu optimieren.

Der LS-I ist primär aus Blech-, Standard- und Normteilen aufgebaut. Die primär eingesetzten Materialien sind Aluminium (EN AW 5083) und rostfreier Stahl (1.4303 und 1.4305). Aus dem entwickelten Aufbau resultiert das sehr geringe Gesamtgewicht von ca. 21 kg. Er hat eine Gesamthöhe von ca. 570 mm und die minimale Bauteillänge beträgt ca. 300 mm. Abbildung 5.1 zeigt den virtuellen Einsatz am 6-Achs-Knickarmroboter und eine isometrische Ansicht des TLK.



a) Isometrische Darstellung des auf dem Roboter montierten LS-I.

b) Isometrische Darstellung vom LS-I.

Abbildung 5.1: CAD-Gesamtdarstellung vom konstruierten TLK mit der Bezeichnung „LS-I“.

Die einzelnen modularen Funktionsgruppen sind linear im Aufnahmesystem angeordnet. Aufgrund des Einsatzes eines Schnellwechselsystems können je nach Bedarf die Funktionsgruppen rasch und werkzeuglos ausgetauscht werden. Die Verwendung unterschiedlicher Faser-Matrix-Kombinationen wie auch verschiedenster Querschnittsabmessungen der Tapes wird dadurch begünstigt. Ein weiterer Aspekt ist die unkomplizierte Implementierung zukünftiger Weiterentwicklungen der Funktionsgruppen. Durch die Verwendung eines Bandpuffersystems und dem Umstand dass keine Tapespannung appliziert wird, kann eine weitestgehend gleichmäßige Ablegequalität vorausgesetzt werden. Das Aufnahmesystem nimmt die Komponenten in folgender Reihenfolge auf (siehe Abbildung 5.2):

- Materialzuführung,
- Vorschubeinheit,
- Schneidemechanismus,
- Bandpuffer,
- Endführung,
- Aufheizvorrichtung,
- Konsolidierungssystem.

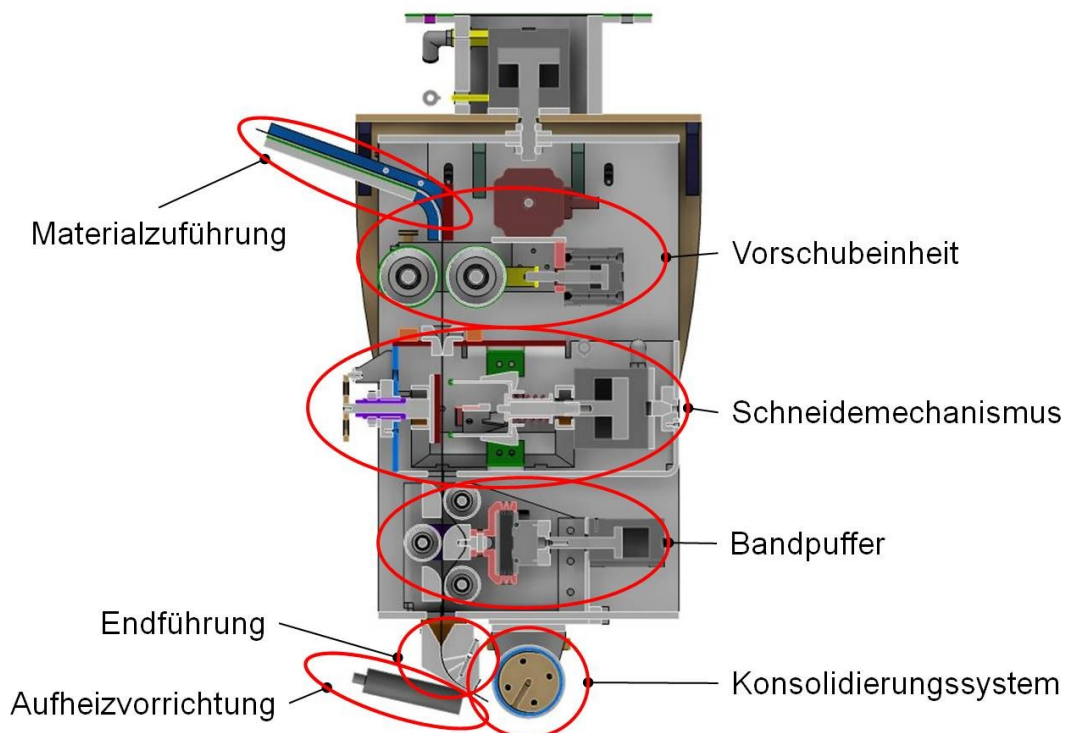


Abbildung 5.2: Schnittansicht durch den gesamten TLK samt Funktionsgruppen.

In den nachfolgenden Abschnitten wird eine detaillierte Beschreibung zur Ausführung dieser Funktionsgruppen dargelegt.

## 5.1 Aufnahmesystem

### 5.1.1 Beschreibung der Funktionsgruppe

Das Aufnahmesystem, siehe Abbildung 5.3, nimmt die einzelnen Funktionsgruppen auf und überträgt die Konsolidierungskraft. Der strukturelle Aufbau besteht primär aus zwei Baugruppen: Dem *starreren Oberteil*, der den *vertikal beweglichen Unterteil* führt. Durch diesen Aufbau können Positionsungenauigkeiten des Roboters kompensiert werden und die einzelnen Funktionsgruppen besitzen immer dieselbe Distanz zueinander. Dies wiederum unterstützt gleichbleibende Prozessparameter. Die beiden Baugruppen sollen in den kommenden Absätzen näher betrachtet werden.

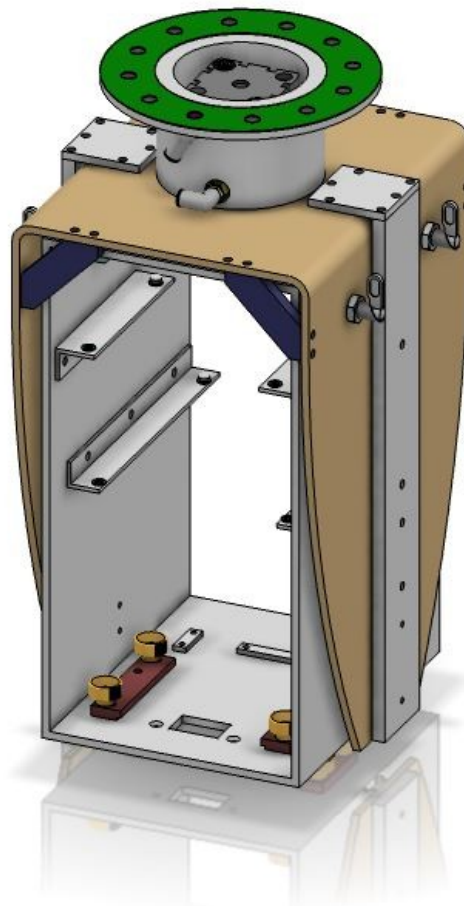


Abbildung 5.3: Isometrische Ansicht vom Aufnahmesystem.

Der Oberteil besteht aus mehreren Komponenten:

- Dem Anschlussflansch samt Dichtung, der als Schnittstelle zum Endaktuator des 6-Achs-Knickarmroboters bzw. zum Prüfstande dient,
- dem gebogenen Blechteil, auf dem die anderen Komponenten montiert sind und dessen Schenkel die Führungselemente aufnehmen sowie den Unterteil umschließen,
- den verschraubten Versteifungsplatten, die den Zweck besitzen die Gesamtsteifigkeit zu erhöhen sowie eine präzise Führung des Unterteils zu unterstützen,
- dem Kompaktzylinder ADN 50 und zugehöriger Peripherie, der vom Anschlussflansch umschlossen ist und eine maximale Konsolidierungskraft von 1178 N [25] im Vorlauf überträgt sowie
- die Sperrriegel, die als Anschlag für die durch den Kompaktzylinder vertikale erzeugte Bewegung des Unterteils dienen.

Der Unterteil ist eine geschweißte Kastenkonstruktion, die die erforderlichen Befestigungsprofile bzw. -bohrungen für die Funktionsgruppen sowie die Gegenstücke zu den Führungselementen des Oberteils aufnimmt. Der Kolben des Kompaktzylinders ist starr mit dem Kasten verbunden. Um die Kraftübertragung zu optimieren, werden im Kasten ebenfalls Versteifungsplatten eingesetzt.

Der Aufbau ist genügend steif (Berechnungen siehe Abschnitt 5.1.2) und die geforderte maximale Konsolidierungskraft von 1000 N kann mit dem gewählten Kompaktzylinder erreicht werden. Die Rücklaufkraft von 1057 N [25] ist für die Hebewegung des gesamten Unterteils mehr als ausreichend. Abbildung 5.4 zeigt das gesamte Aufnahmesystem mit Positionsnummern und dazugehöriger Beschreibung.

Die Befestigung der einzelnen Funktionsgruppen soll anhand zweier verwendeter Systeme erläutert werden: Das *erste System* dient zur Montage des Bandpuffers. Dieser wird über verschiebbare Klemmleisten befestigt. Die Klemmung erfolgt über vier Rändelmuttern und die Verschiebung über die in den Klemmleisten eingebrachten Langlöcher.



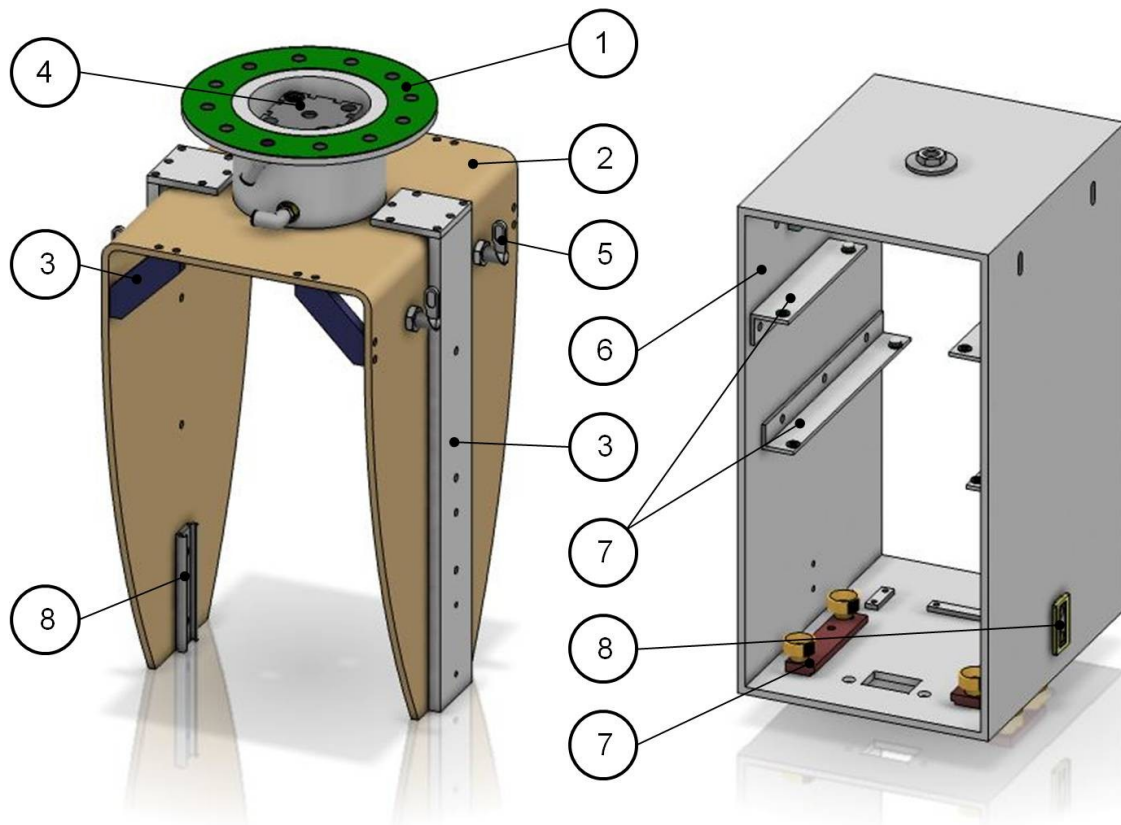
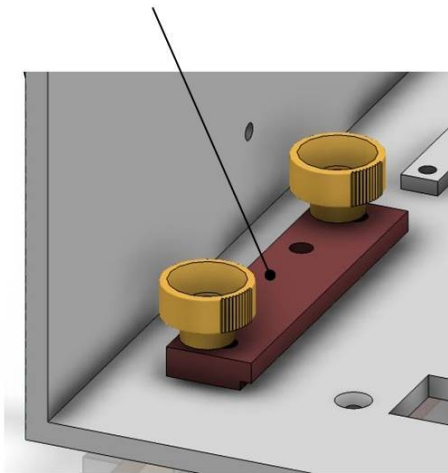


Abbildung 5.4: Isometrische Ansicht von Ober- und Unterteil (jeweils links bzw. rechts) des Aufnahmesystems (1. Anschlussflansch, 2. gebogener Blechteil, 3. Versteifungsplatten, 4. Kompaktzylinder, 5. Sperrriegel, 6. geschweißte Kastenkonstruktion, 7. Befestigungsprofile, 8. Führungselemente).

Das *zweite System* betrachtet die Befestigung der beiden Funktionsgruppen Vorschubeinheit und Schneidemechanismus. Ausgehend von der Empfehlung im Abschnitt 4.1.2 wird eine Kombination aus Spannelement und Klemmelement verwendet. Das Spannelement befindet sich an der Rückseite der Befestigungsschiene und besteht aus einem Bolzen mit einem konusförmigen Absatz. Die Geometrie dieses Elementes ist an die jeweiligen Befestigungsprofile der Funktionsgruppen angepasst und ermöglicht einen sicheren Sitz. Unterstützend werden elastomere Unterlegscheiben verwendet. Die Klemmung erfolgt – ähnlich wie bei der Bandpufferbefestigung – über Rändelschrauben.

Abbildung 5.5 zeigt einen Ausschnitt aus dem Unterteil des Aufnahmesystems, es sind die Befestigungen des Bandpuffers und des Schneidemechanismus (identisch mit Vorschubeinheit) dargestellt.

Horizontal verschiebbare  
Klemmleiste m. Rändelmuttern



Spannbolzen mit konusförmigem Absatz

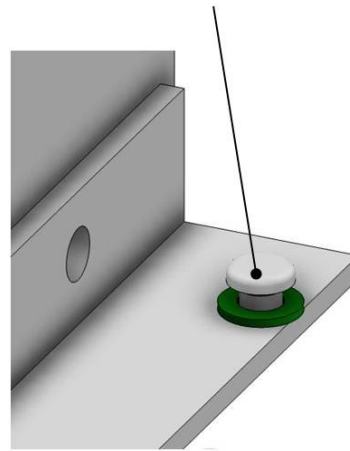


Abbildung 5.5: Isometrische Darstellung von den Befestigungsmöglichkeiten der Funktionsgruppen, links: Bandpufferbefestigung mit verschiebbarer Klemmleiste, rechts: Zweites Befestigungssystem mit Spannelement.

### 5.1.2 Mechanische Berechnungen

Die mechanische Berechnung betrachtet die Knickung des Unterteils sowie die auftretenden Spannungen in den Sperrriegeln. Diese dienen als Anschlag des Unterteils während der vertikalen Bewegung, die durch den Kompaktzylinder initiiert wird.

Die sehr vereinfachende Betrachtung für den Nachweis der Knickstabilität geht davon aus, dass eine Seitenwand des Unterteils der gefährdete Querschnitt ist. Die kritische Kraft  $F_K$  von 83612 N wird mithilfe der Eulerschen-Knickgleichung:

$$F_K = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{s^2}, \quad (5.1)$$

bestimmt. Hierbei ist  $E$  der E-Modul des Seitenwandwerkstoffes,  $I$  das Flächenträgheitsmoment und  $s$  die Knicklänge. Daraus resultiert ein Reservefaktor von 142. Eine genaue Beschreibung der Terme und der eingesetzten Parameter befinden sich im Abschnitt 10.3.2.

Die Sperrriegel werden auf Abscherung und Flächenpressung beansprucht. Die Abscherspannung je Riegel von 10,42 N/mm<sup>2</sup> kann wie folgt bestimmt werden:

$$\bar{\tau} = \frac{F_Z}{4 \cdot A_\tau} \leq \bar{\tau}_{zul}, \quad (5.2)$$

mit  $F_Z$  als Konsolidierungskraft,  $A$  als Querschnittsfläche eines Riegels und  $\bar{\tau}_{zul}$  als zulässige Abscherspannung. Die Sicherheit gegen Abscheren von 27,72 ist mit:

$$v = \frac{\bar{\tau}_{zul}}{\bar{\tau}}, \quad (5.3)$$

definiert. Die eintretende Flächenpressung von 8,92 N/mm<sup>2</sup> zwischen Sperrriegel und Seitenwand lässt sich mit:

$$p = \frac{F_Z}{4 \cdot A_p} \leq p_{zul}, \quad (5.4)$$

bestimmen. In diesem Zusammenhang ist  $A_p$  die Berührungsfläche zwischen Sperrriegel und Seitenwand und  $p_{zul}$  die zulässige Flächenpressung. Der Reservefaktor bzgl.  $p_{zul}$  von 10,08 lässt sich wie folgt ermitteln:

$$v = \frac{p_{zul}}{p}. \quad (5.5)$$

Die detaillierte Berechnung und die verwendeten Werte befinden sich im Abschnitt 10.3.3.

## 5.2 Materialzuführung

Die Materialzuführung stellt das für den Ablegeprozess notwendige Material zur Verfügung. Die Beschickung erfolgt in dieser Ausführung des TLK manuell, je abgelegter Bahn wird ein einzelnes Tape eingelegt.

Die Zuführung, siehe Abbildung 5.6, an sich besteht aus zwei Komponenten: Ein *U-förmiges Profil*, zusammengesetzt aus mehreren Blechteilen, dient zur Aufnahme des Tapes. Der *auswechselbare* – und somit an die Tapegeometrie anpassbare – *Einsatz* gewährleistet eine präzise Führung und Positionierung über der Vorschubeinheit.

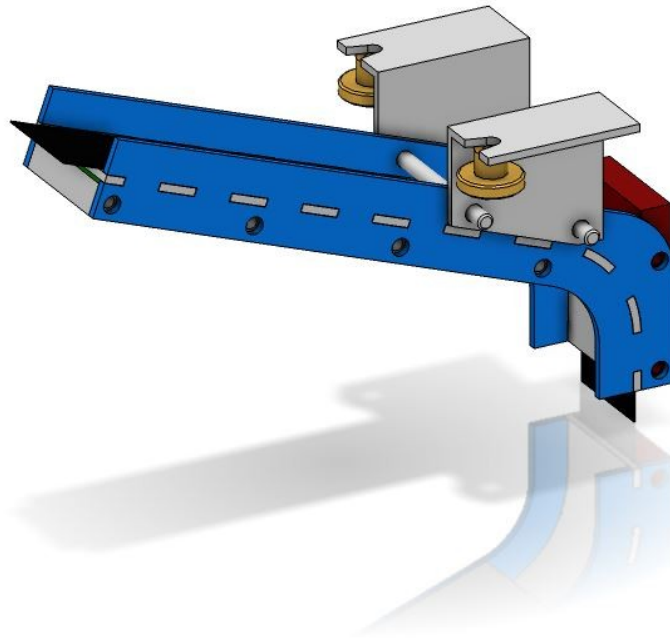


Abbildung 5.6: Isometrische Ansicht der Materialzuführung.

Das U-förmige Profil besteht aus einer Montageplatte, den beiden Seitenwänden und dem Auflageblech. Durch den Einsatz dieses Bleches ist ein spaltfreies und somit schonendes Führen des Tapes möglich. Die Seitenwände sind mit der Montageplatte mehrfach verschraubt. Die der Blechkontur des Auflagebleches angepassten Schlitze in den beiden Seitenwänden dienen zur Fixierung des Auflagebleches. Um etwaige Ungenauigkeiten bei der Fertigung auszugleichen sowie die Einspannung des Auflagebleches zu unterstützen, wird als Unterlage ein Gummieinsatz zwischen Montageplatte und Auflageblech eingebracht. Dadurch wird das Auflageblech zusätzlich verspannt.

Der Einsatz besitzt im unteren Bereich eine symmetrisch zusammenlaufende Nase, diese ist an den jeweiligen Tapequerschnitt angepasst und führt das Tape in Breitenrichtung. Der Einsatz ist mit den Seitenwänden verschraubt und kann somit einfach ausgewechselt werden.

Die gesamte Funktionsgruppe wird im beweglichen Unterbau über zwei L-Profile mittels Schrauben und Rändelmuttern fixiert. Eine spätere Verwendung einer automatisierten Materialzuführung mittels Halbzeugspule kann über die Bohrungen im Unterteil realisiert werden. Abbildung 5.7 zeigt die Materialzuführung in einer freigemachten Darstellung und erläutert die einzelnen Komponenten.

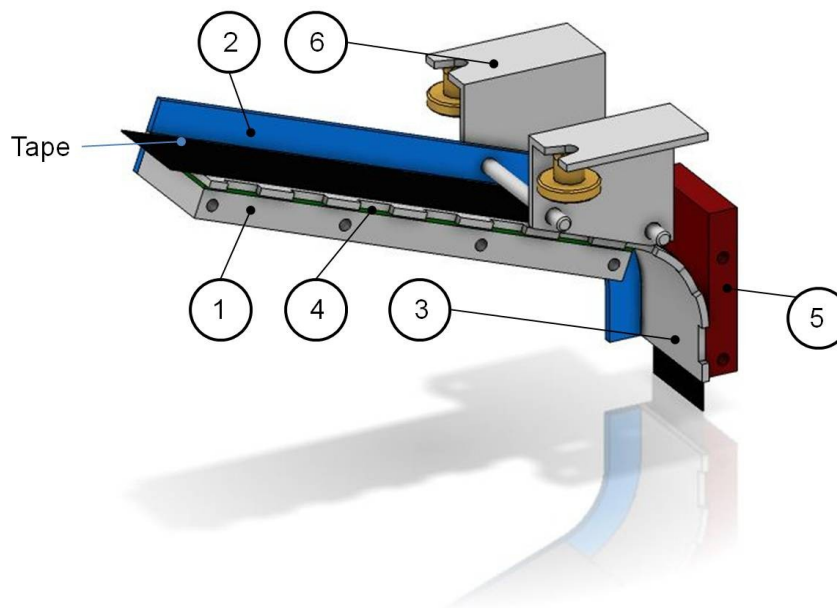


Abbildung 5.7: Freigemachte Darstellung der Materialzuführung (1. Montageplatte, 2. Seitenwände, 3. Auflageblech, 4. Gummiunterlage, 5. austauschbarer Einsatz, 6. Befestigungsblech).

### 5.3 Vorschubeinheit

Die Vorschubeinheit (Abbildung 5.8) fördert zu Beginn einer neuen Bahn das von der Materialzuführung bereitgestellte Tape zum Werkzeug bzw. Konsolidierungssystem. Bei Aktivierung wird das Tape zwischen Press- und Antriebsrolle eingeklemmt und anschließend definiert gefördert. Von einem Aufbau der Tapespannung über die Vorschubeinheit wird abgesehen, da nicht gewährleistet werden kann, dass diese während des gesamten Prozesses gleichmäßig – insbesondere während des Schneidvorganges – applizierbar ist.

Die Funktionsgruppe besteht aus vier Einheiten: Dem *äußeren Rahmen*, dem *inneren Rahmen*, dem *Schrittmotor* sowie dem *Kompaktzylinder*. In den kommenden Absätzen soll näher auf diese Komponenten eingegangen werden.

Der äußere Rahmen wird über eine verschraubte Konstruktion realisiert. Diese besteht aus zwei U-Profilen und einer Montageplatte. Der Aufbau nimmt die Antriebsrolle, den inneren Rahmen, den Kompaktzylinder sowie den Vorschubantrieb auf und dient gleichzeitig als Schnittstelle zum Aufnahmesystem.

Der Antrieb wird mithilfe des Schrittmotors AS1050-0110 realisiert. Der Motor weist ein Stillstands Drehmoment von 1,2 Nm [26] auf und ist mit der Antriebsrolle über einen Zahnriemen T5 verbunden.

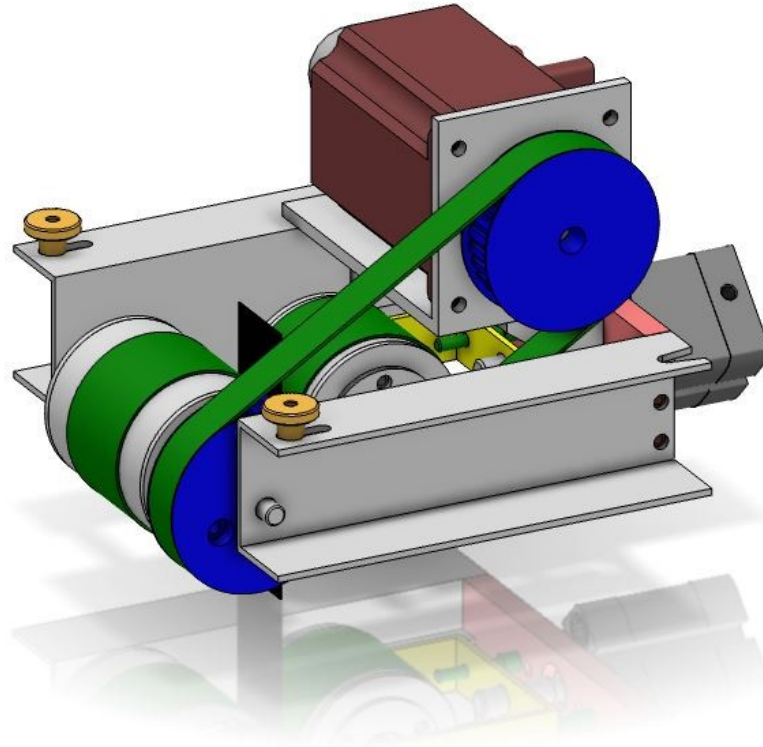


Abbildung 5.8: Isometrische Ansicht der Vorschubeinheit.

Der innere, horizontal bewegliche Rahmen ist ein U-Profil und nimmt die Anpressrolle auf. Die horizontale Verschiebung wird über einen Kompaktzylinder ADN 20 realisiert, der seine maximale Kraft von 188 N [25] bei einem Druck von 0,6 MPa erbringt. Um ein Verdrehen des Rahmens zu verhindern, werden zwei Führungsstifte eingesetzt.

Die Achsen der Anpress- wie auch der Antriebsrolle sind aus Platzgründen starr ausgeführt, die Lagerung wird über Rillenkugellager realisiert, die sich im Rollkörper befinden. Die Achsen werden mit dem jeweiligen Rahmen verschraubt. Dadurch wird die Steifigkeit der gesamten Konstruktion erhöht. Beide Rollen sind gummiert, um die Reibung zwischen Tape und Rolle zu erhöhen. Abbildung 5.9 stellt die Vorschubeinheit mit den Hauptkomponenten in einer freigemachten Ansicht dar (seitliches U-Profil ausgeblendet).

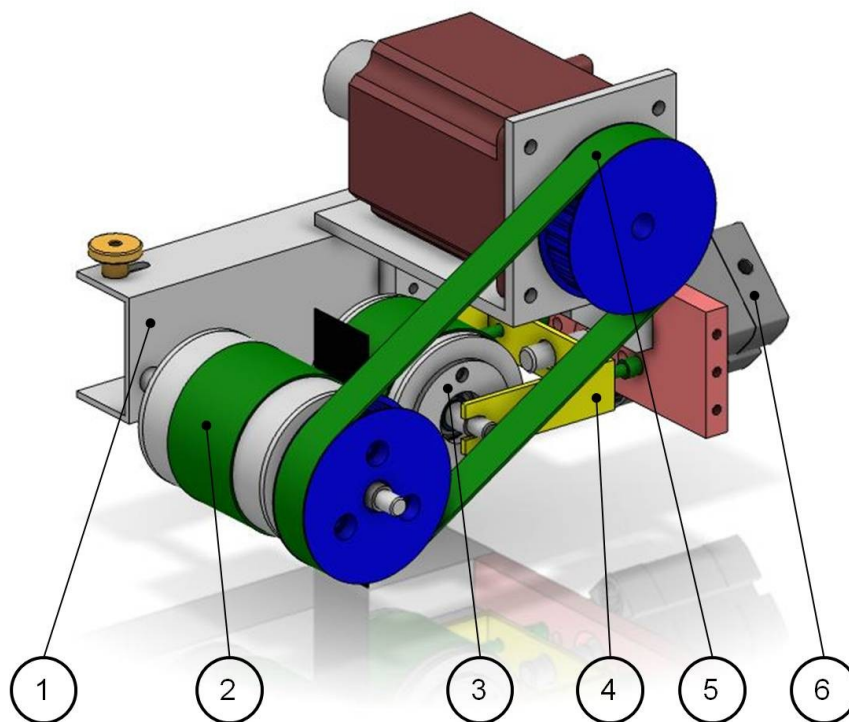


Abbildung 5.9: Freigemachte Ansicht der Vorschubeinheit (1. Äußerer Rahmen bestehend aus verschraubten Profilen, 2. Antriebsrolle, 3. Anpressrolle, 4. innerer horizontal verschiebbarer Rahmen, 5. Schrittmotor und Zahnriemen, 6. Kompaktzylinder)

## 5.4 Schneidemechanismus

### 5.4.1 Beschreibung der Funktionsgruppe

Der Schneidemechanismus, isometrisch dargestellt in Abbildung 5.10, trennt das Material am Ende einer Bahn auf. Die Konstruktion baut auf zwei Hauptbaugruppen auf: Der um  $\pm 45^\circ$  verdrehbare *innere Rahmen*, der im *äußeren Halterahmen* gelagert ist. In den folgenden Absätzen soll detaillierter auf diese beiden Baugruppen und die Funktionsweise eingegangen werden.

Die Grundstruktur des inneren Rahmens besteht aus verschweißten U-Profilen. Auf diesen ist der Kompaktzylinder befestigt, der eine maximale Schnittkraft von 1178 N [25] aufbringt. Durch die Verwendung einer quadratischen Kolbenstange kann auf eine Verdrehsicherung für die Schneidklinge verzichtet werden.



Die Klinge wird über mehrere Blechkomponenten aufgenommen und ist starr mit dem Kolben des Kompaktzylinders verbunden. Als Gegenstück für die Klinge dient eine Kunststoffblende. Der gefederte Niederhalter, verantwortlich für die Fixierung des Tapes während des Schneidvorganges, wird ebenfalls über den Kompaktzylinder betätigt. Beim Schneidprozess erreichen die gummierten und versteiften Schenkel des Niederhalters das Tape aus geometrischen Gründen vor der Klinge. Die Versteifungen des Niederhalters dienen gleichzeitig als Führungselement um ein Verdrehen bei einer Winkeländerung zu unterbinden. Durch die Druckfeder ist eine maximale horizontale Niederhaltekraft von ca. 120 N möglich. Auf der Rückseite des Kompaktzylinders ist ein Konus montiert, der die gesamte Struktur einerseits zentrieren und andererseits als Presselement für die Fixierung des eingestellten Winkels dienen soll. Das letzte Element in dieser Baugruppe ist das Handrad, mit dem in 5° Schritten der gewünschte Winkel durch Einrasten justiert werden kann.

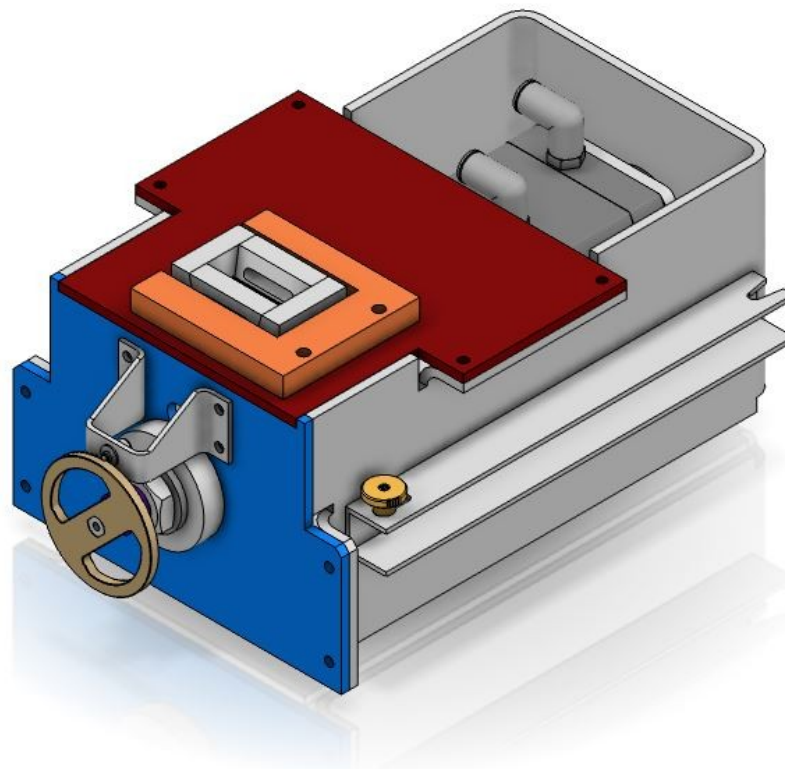


Abbildung 5.10: Isometrische Darstellung vom Schneidemechanismus.



Der äußere Halterahmen ist primär aus Blechkomponenten aufgebaut und nimmt den inneren Rahmen sowie die Befestigungsprofile zum Aufnahmesystem auf. Eine Anordnung mehrerer Führungsblöcke im Einlassbereich sorgt für eine exakte Positionierung des Tapes vor der Schneidklinge.

Das federnde Druckstück rastet im Handrad ein und justiert somit den gewünschten Winkel. Der Gewindebolzen fixiert die eingestellte Winkellage, indem der Konus in dessen Aufnahme gepresst wird. Des Weiteren sind Führungsbleche samt Gleitschienen montiert, die den Niederhalter gegen verdrehen sichern.

Die Befestigung der gesamten Funktionsgruppe im Aufnahmesystem erfolgt über das am Außenblech montierte U-Profil. In diesem sind Langlöcher für die Verschraubung mittels Rändelmuttern und die Zentrierung für das Spannelement des Aufnahmesystems eingebracht. Abbildung 5.11 und 5.12 zeigen eine Schnittdarstellung des Schneidemechanismus während des Ablegeprozesses. In diesem Fall wird das Tape nur durch den Schneidemechanismus geführt.

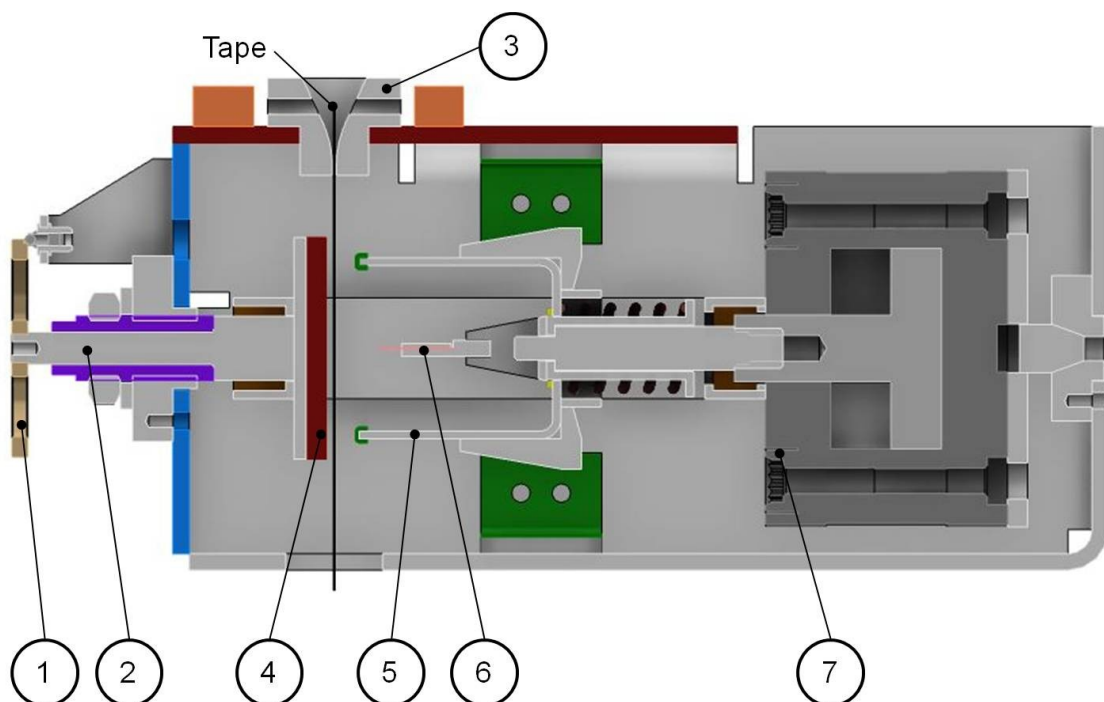


Abbildung 5.11: Schnittansicht vom Schneidemechanismus (1. Handrad mit federndem Druckstück, 2. Gewindebolzen, 3. Führungsblöcke, 4. Prallblende, 5. gefederter und geführter Niederhalter, 6. Klinge und -aufnahme, 7. Kompaktzylinder).

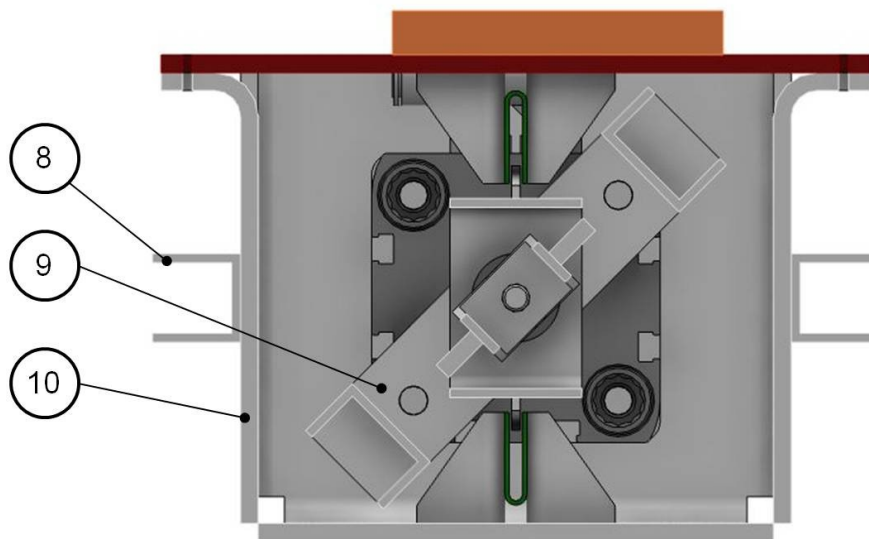


Abbildung 5.12: Schnittansicht des Schneidemechanismus bei einem eingestellten Winkel von  $45^\circ$  (8. Befestigungsprofile zum Aufnahmesystem, 9. innerer drehbarer Rahmen, 10. äußerer Rahmen).

Abbildung 5.13 illustriert die Stellung von Niederhalter und Klinge am Ende des Trennvorganges. Die nun zusammengepresste Feder und das Tape (vgl. mit Abbildung 5.11) sind in dieser Darstellung ausgeblendet.

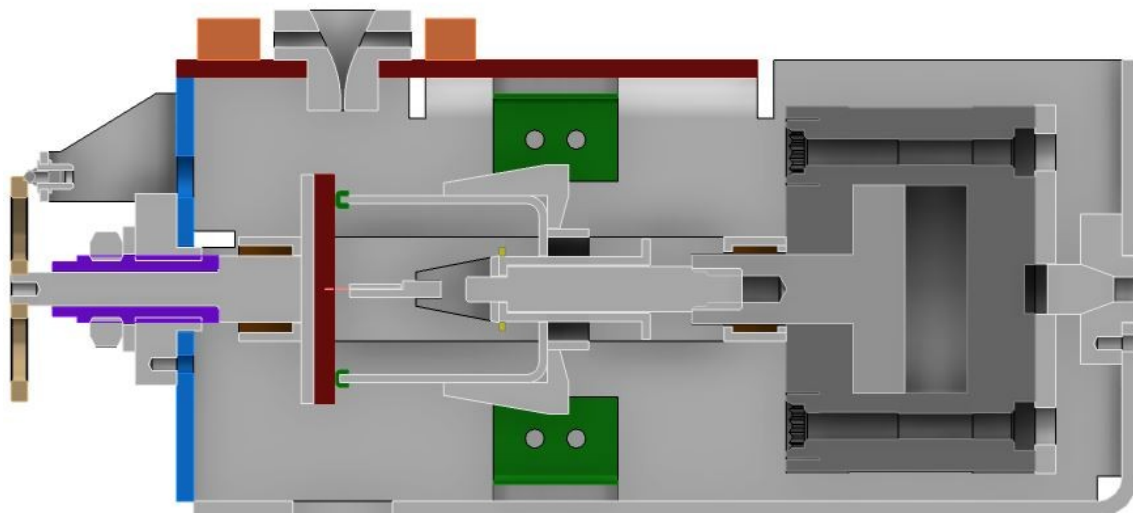


Abbildung 5.13: Position von Niederhalter und Klinge am Ende des Schneidvorganges.

### 5.4.2 Mechanische Berechnungen

Die Berechnung der Niederhalte­kraft, aufgebracht durch die Druckfeder, basiert auf dem zurückgelegten Weg und der Federkonstante. Um eine gewünschte Kraft  $F_2$  von 120 N einzustellen, ist ein Federweg  $s_2$  von 9,75 mm notwendig, dies errechnet sich aus folgendem Zusammenhang:

$$s_2 = \frac{F_2}{k}, \quad (5.6)$$

mit  $k$  als Federkonstante von 12,305 N/mm [27]. Der Weg  $s_2$  teilt sich in zwei Komponenten auf: dem während des Schneidprozesses zurückgelegten Weg und der Vorspannung. Ersterer setzt sich aus dem Überstand der Niederhalterschlenkel in Bezug auf die Schneidklinge (4,5 mm) und der Eindringtiefe der Klinge in die Prallblende (2,3 mm) zusammen. Dies ergibt eine Summe von 6,8 mm. Die Feder muss somit um den Weg  $s_1$  von 2,95 mm vorgespannt werden. Wird Gleichung (5.6) umgeformt, kann daraus die Vorspannkraft  $F_1$  von 36,33 N gewonnen werden. Aus fertigungstechnischen Gründen kann der Wert für  $s_1$  sicherlich nicht exakt eingestellt werden. Daraus resultiert eine, in dieser Phase nicht vorhersehbar, Schwankung der gewünschten Kraft  $F_2$ .

Durch die Einbringung der Schnittkraft treten in den U-Profilen des inneren Rahmens Biege- und Zugbeanspruchungen auf. Eine vereinfachte Berechnung, die weder die eingebauten Versteifungen, noch die verstärkende Geometrie (Blende) berücksichtigt, soll die Spannungen und die sich daraus ergebenden Sicherheiten überprüfen. Die Biegespannung von 54,92 N/mm<sup>2</sup> lässt sich wie folgt ermitteln:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W}, \quad (5.7)$$

wobei der Term  $M_b$  das Biege- und  $W$  das Widerstandsmoment darstellt. Die Zugspannung in den seitlichen U-Profilen von 5,77 N/mm<sup>2</sup> ist mit:

$$\sigma_z = \frac{F_z}{2 \cdot A}, \quad (5.8)$$

definiert. Hierbei ist  $F_z$  die Schnittkraft und  $A$  die Querschnittsfläche des U-Profiles.

Die Sicherheiten gegen eine plastische Verformung sind somit 2,91 (Biegebeanspruchung) und 27,71 (Zugbeanspruchung). Beide Werte lassen sich über die folgenden Gleichungen bestimmen:

$$v_b = \frac{\sigma_{zd,zul}}{\sigma_b}, \quad (5.9)$$

$$v_z = \frac{\sigma_{zd,zul}}{\sigma_z}, \quad (5.10)$$

wobei  $\sigma_{zd,zul}$  der zulässigen Streckgrenze entspricht. Eine ausführliche Berechnung befindet sich im Abschnitt 10.3.4.

### 5.4.3 Experimentelles

Die notwendige Schnittkraft ist primär von der Abscherfestigkeit und dem Querschnitt des Tapes abhängig. Die Abscherfestigkeit ist materialabhängig und für FKV mathematisch schwer erfassbar. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die eingebrachte Energie, die abhängig von bewegter Masse und Geschwindigkeit ist. Dieser Punkt wird in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht behandelt.

Für die Vorauslegung des Kompaktzylinders wurde die ermittelte Schnittkraft aus einem quasistationären Versuchsaufbau herangezogen. Das für diese Versuche herangezogene Referenzmaterial (CF/PA6.6) hat einen Faservolumengehalt von ca. 50 %. Der Aufbau und Ablauf des Versuchs sind in Abschnitt 10.4 näher beschrieben.

Der daraus gewonnene Wert von 1452 N liegt zwar über der verfügbaren Kraft von 1178 N [25], jedoch ist hier die dynamische Komponente nicht berücksichtigt. Es wird davon ausgegangen, dass durch die Energieeinbringung des Kompaktzylinders ein sauberer Schnitt möglich ist. Unterstützt wird diese Annahme durch das Referenzprojekt des IPT [2], dessen TLK eine maximale Schnittkraft von 754 N aufweist.

## 5.5 Bandpuffer

### 5.5.1 Beschreibung der Funktionsgruppe

Der Bandpuffer (siehe Abbildung 5.14) erzeugt einen Bandüberschuss, der während des Schneidvorganges – aufgrund des fortlaufenden Ablegeprozesses – aufgebraucht wird. Dadurch kann eine gleichbleibende Ablegebewegung erreicht werden.

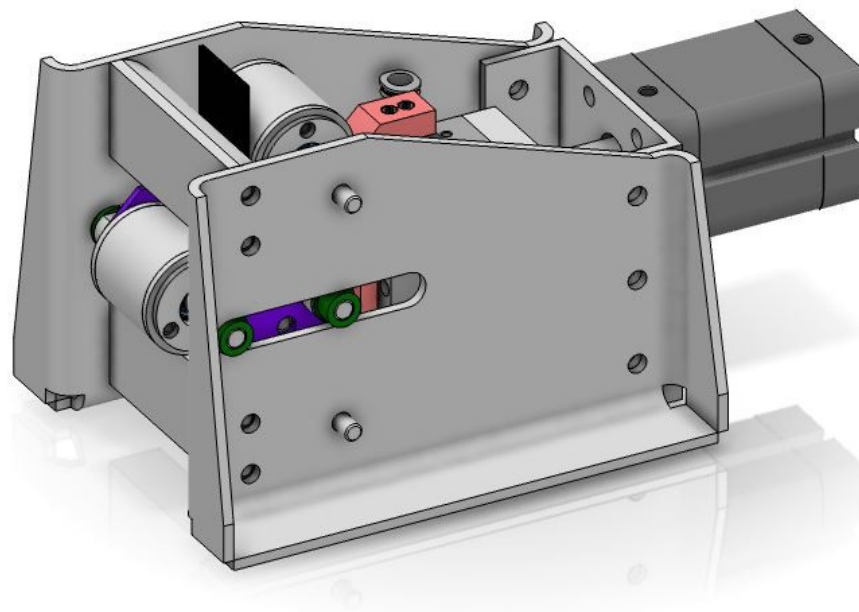


Abbildung 5.14: Isometrische Ansicht des Bandpuffers.

Die Funktionsgruppe an sich unterteilt sich in nachstehende Komponenten: Dem *Blechrahmen*, den beiden *äußeren starren Führungselemente*, dem *mittleren Führungselement* sowie der *Aktuatorik*. In den folgenden Absätzen sollen diese Komponenten detaillierter betrachtet werden. In Abbildung 5.15 ist eine Schnittdarstellung des Bandpuffers mit den wichtigsten Positionen illustriert.

Der Rahmen besteht aus gebogenen, miteinander verschraubten Blechen und nimmt alle anderen Komponenten auf. Die beiden äußeren Führungselemente bestehen aus einem abgerundetem Block und einer über Rillenkugellager drehbar montierte Rolle. Die Achse dieser Rolle und der Block sind starr aber lösbar mit den seitlichen Befestigungsblechen verbunden.

Das mittlere Führungselement ist vom Aufbau her, den beiden äußeren Elementen sehr ähnlich. Auch hier werden ein abgerundeter Block und eine drehbar gelagerte Rolle eingesetzt. Die gesamte Komponente ist jedoch horizontal beweglich im Befestigungsblech über Gleithülsen geführt. An der Rückseite des Blockes befindet sich ein aus Drehteilen gefertigter, T-förmiger Fortsatz. Dieser dient als Aufnahme für die Greifbacken des Parallelgreifers und wird für die horizontale Verschiebung verwendet.

Die Aktuatorik besteht aus einem Kompaktzylinder, der beim Rücklauf eine maximale Kraft von 247 N [25] erbringt und einem Parallelgreifer. Dieser ist über einen Adapterflansch mit dem quadratischen Kolben des Kompaktzylinders verdrehsicher verbunden, die axial aufnehmbare Kraft des Parallelgreifers beträgt 300 N [28]. Die beiden zugehörigen Greifbacken besitzen jeweils eine Bohrung, die auf den T-förmigen Fortsatz des mittleren Führungselementes abgestimmt ist.

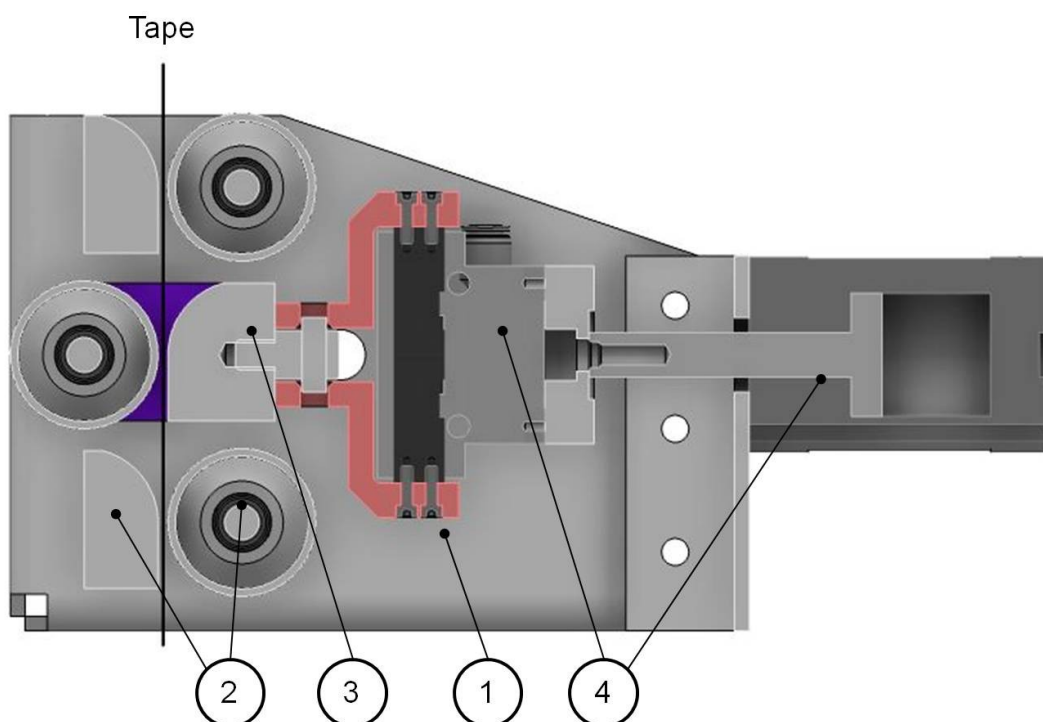


Abbildung 5.15: Schnittdarstellung des Bandpuffers (1. Blechrahmen, 2. äußere starre Führungselemente, 3. mittleres horizontal geführtes Führungselement, 4. Parallelgreifer und Kompaktzylinder).

Zu Beginn einer neuen Bahn ist der Kolben des Kompaktzylinders ausgefahren und die vertikale Ausrichtung des mittleren Führungselementes stimmt mit den äußeren Führungselementen überein. Dieser Zustand wird Modi-1 genannt (siehe auch Abbildung 5.15). Das Tape wird durch alle drei Führungselemente geleitet. Anschließend wird der Bandpuffer – mit Unterstützung der Vorschubeinheit – gefüllt. Dazu wird der Kolben des Kompaktzylinders eingefahren. Durch die geschlossenen Greifbacken ist das mittlere Führungselement mit dem Kolben verbunden (Modi-2). Bei bzw. kurz vor Fixierung des Tapes durch den Niederhalter werden die Greifbacken geöffnet, das mittlere Führungselement kann nun frei gleiten, vgl. mit Abbildung 5.16. Durch den fortlaufenden Ablegeprozess und die Klemmung durch den Niederhalter wird dieses Führungselement durch das Tape horizontal verschoben, nahe an jene Position von Modi-1. Anschließend wird der Kolben des Kompaktzylinders ausgefahren, dieser schiebt das Führungselement exakt an die Position von Modi-1. Die Greifbacken schließen und sind somit über den T-förmigen Anschluss wieder mit dem mittleren Führungselement verbunden.

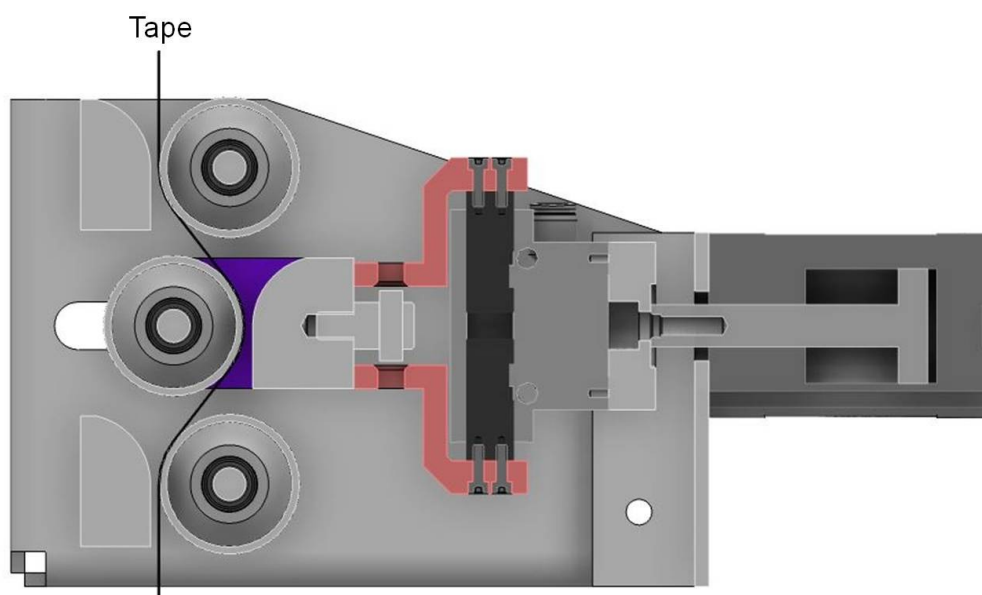


Abbildung 5.16: Schnittdarstellung des Bandpuffers bei geöffneten Greifbacken und eingefahrenem Kompaktzylinder.

### 5.5.2 Mechanische Berechnungen

Die erforderliche Größe bzw. Länge des Bandpuffers  $l_p$  von 8 mm (Herleitung und erforderlichen Daten befinden sich im Abschnitt 10.3.5) entspricht dem zurückgelegten Weg des TLK während der Schnittzeit und lässt sich durch Gleichung (5.11) bestimmen:

$$l_p = v_A \cdot \frac{2 \cdot x \cdot v}{v_S}, \quad (5.11)$$

wobei  $v_A$  die Ablegegeschwindigkeit,  $x$  den Abstand zwischen Klingenspitze und Blende,  $v$  den Sicherheitsbeiwert und  $v_S$  die gewählte Aufprallgeschwindigkeit bezeichnet.

Die horizontale Verstellung des mittleren Rollenpaares wurde aufgrund des nicht-linearen Zusammenhangs zur Größe des Bandpuffers empirisch via CAD-Software ermittelt und aus fertigungstechnischen Gründen vergrößert. Die Verstellung des Kompaktzylinders beträgt 20 mm, daraus resultiert ein  $l_p$  von 10,6 mm.

Die benötigte Kraft von 171,3 N für die Umlenkungen über die Führungselemente wird über die Dehnung ermittelt (Herleitung siehe Abschnitt 0):

$$F_{ges} = \frac{E \cdot b \cdot h^3}{3 \cdot \cos(\beta) \cdot l_T \cdot D}. \quad (5.12)$$

Hierbei ist  $E$  der E-Modul des Tapes,  $b$  die Breite des Tapes,  $h$  die Dicke des Tapes,  $\beta$  der Umschlingungswinkel,  $l_T$  der Abstand der Tangentenpunkte zwischen zwei Umlenkungen und  $D$  der Rollendurchmesser. Der ausgewählte Kompaktzylinder liefert mit einer maximalen Rücklaufkraft von 247 N [25] einen Reservefaktor  $v$  von 1,44. Dieser ergibt sich aus dem Zusammenhang:

$$v = \frac{F_K}{F_{ges}}, \quad (5.13)$$

mit  $F_K$  als maximaler Rücklaufkraft des Kompaktzylinders.



## 5.6 Endführung

Die Endführung – Abbildung 5.17 – bildet das Übergangselement zwischen Bandpuffer und Konsolidierungssystem und ermöglicht eine präzise und schonende Positionierung des Tapes. Das Tape wird in Breiten- und Dickenrichtung geführt.

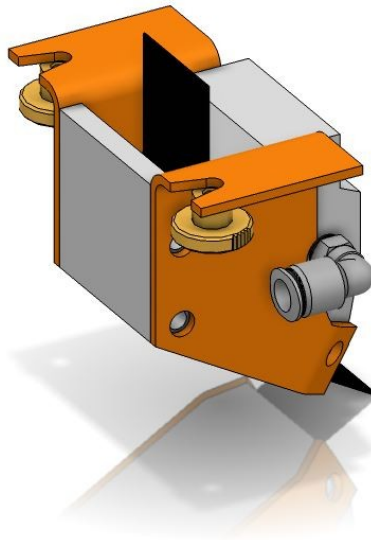


Abbildung 5.17: Isometrische Ansicht der Endführung.

Die Baugruppe besteht aus wenigen miteinander verschraubten Einzelteilen, siehe auch Abbildung 5.18: den Seitenblechen, dem Führungs- und dem Gleitblock. Die Besonderheit an dieser Baugruppe ist der Gleitblock. In diesen sind mehrere Bohrungen eingebracht, die mit Druckluft bedient werden können. Durch die Druckluft soll sich ein Luftpolster bilden, der die Reibung zwischen Tape und Gleitblock minimiert. Gleichzeitig wird die gesamte Baugruppe durch den Druckluftstrom gekühlt, dies ist aufgrund der unmittelbaren Nähe zur Wärmequelle vorteilhaft.

Die Befestigung im Unterteil des Aufnahmesystems erfolgt über die Seitenwände. In diese sind sich verengende Langlöcher eingebracht. Die Position wird über Rändelschrauben fixiert.

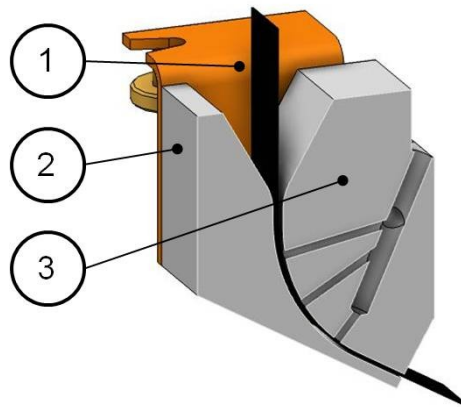


Abbildung 5.18: Schnittdarstellung der Endführung (1. Seitenblech, 2. Führungsblock, 3. Gleitblock mit Druckluftbohrungen).

## 5.7 Aufheizvorrichtung

Die Aufheizvorrichtung wird mit zwei Heißgasdüsen von ADC im Tandembetrieb umgesetzt. Die Abmessungen und genaue Anordnung der Düsen waren bis zum Zeitpunkt der Abgabe unbekannt.

Die Halterung wird aus Edelstahl gefertigt und mit zwei Isolierungen versehen, vgl. mit Abschnitt 4.6. Die Befestigung der Komponente im TLK kann entweder am Unterteil oder an den Rückwänden der äußeren Führungselemente des Bandpuffers erfolgen.

## 5.8 Konsolidierungssystem

### 5.8.1 Beschreibung der Funktionsgruppe

Das Konsolidierungssystem dient zum Verdichten des erwärmten Tapes, Abbildung 5.19 zeigt eine isometrische Darstellung. Die mit Wasser temperierte Rolle wird aus Edelstahl gefertigt, wobei besonderes Augenmerk auf eine glatte Oberfläche gelegt wird. Die Materialauswahl erfolgte unter Berücksichtigung der Dauergebrauchstemperatur von 80 – 90 °C und der Kontakttemperatur des Tapes von max. 450 °C auf der Rollenoberfläche des Konsolidierungssystems.

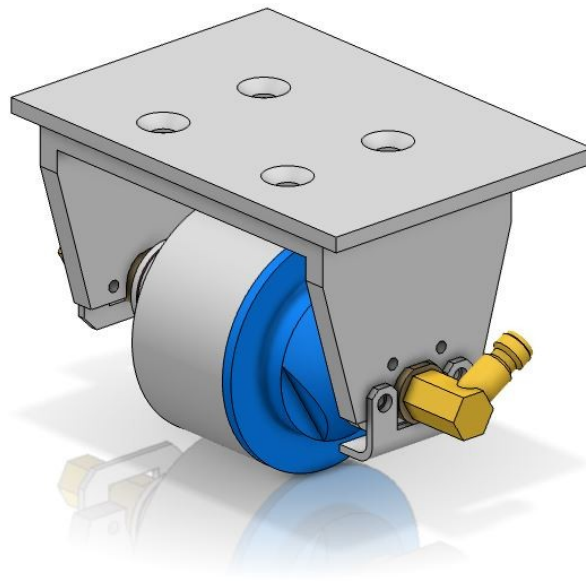


Abbildung 5.19: Isometrische Darstellung des Konsolidierungssystems.

Die Funktionsgruppe besteht aus drei Komponenten: Der drehbar gelagerte Rollenkörper, der starren Achse und dem Befestigungsprofil. In den folgenden Abschnitten soll genauer auf diese Teile eingegangen werden.

Der Rollenkörper setzt sich aus zwei miteinander verschraubbaren Hülsen, den Wellendichtringen, einem O-Ring und den Gleitlagern zusammen. Die beiden Wellendichtringe dienen als Dichtungen zwischen dem beweglichen Rollenkörper und der starren Achse. Sie sind auf einen Druck von maximal 0,5 MPa [29] ausgelegt. Der O-Ring dichtet die beiden Hülsen ab. Die Berechnung der Gleitlager weist eine ausreichende Lebensdauer auf (siehe Abschnitt 5.8.2). Ein weiterer Vorteil dieser Lager ist das sich verbessernde Gleitverhalten bei Wasserkontakt.

In die starre Achse werden unter anderem die Kühlkanäle, bestehend aus Vor- und Rücklaufbohrungen eingebracht (Abbildung 5.20, links). Im mittleren Sektor befindet sich eine helixförmige Verteilerstruktur. Die Anspeisung dieser Verteilerstruktur erfolgt über eine zentrale Bohrung. Um die Wärmeabfuhr zu optimieren wird die Position dieser Bohrung an den ersten Berührungspunkt des Tapes auf der Rolle angepasst (Abbildung 5.20, rechts).

Die Befestigung besteht aus einem U-Profil, das die starre Achse aufnimmt und einem zusätzlichen Blech. Dieses Blech ist mit dem U-Profil verschraubt und dient als Schnittstelle zum Unterteil des Aufnahmesystems. Die Fixierung erfolgt – ähnlich wie beim Bandpuffer – über verschiebbare Klemmleisten und Rändelmutter.

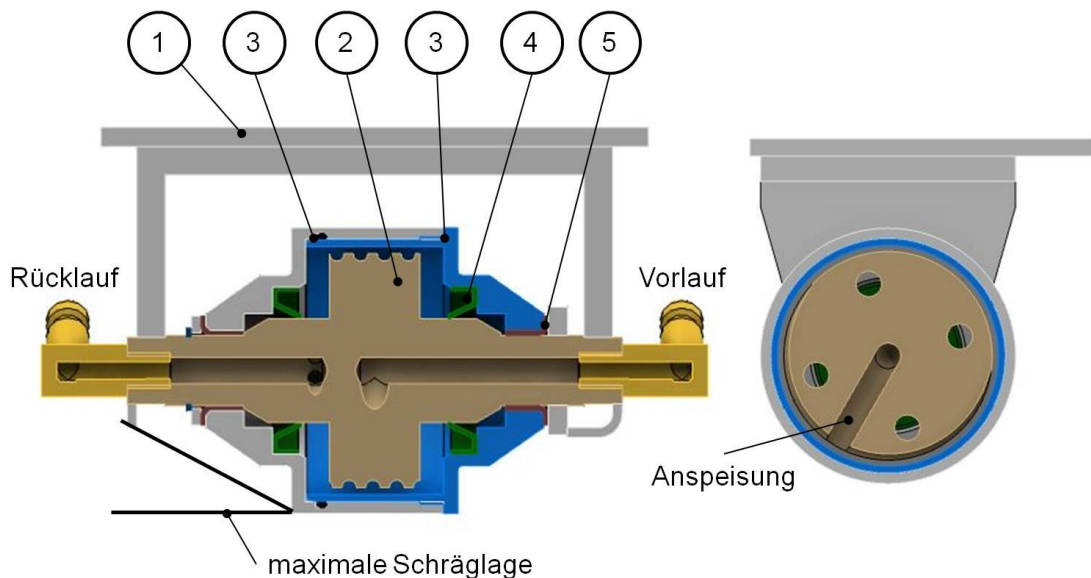


Abbildung 5.20: Schnittansicht des Konsolidierungssystems mit eingezeichneter maximaler Schräglage (1. Befestigungsprofil, 2. feststehende Achse, 3. Hülsenhälften, 4. Wellendichtring, 5. Gleitlager).

Der Durchmesser des Rollenkörpers beträgt 60 mm und die Breite der Auflagefläche 35 mm. Die maximale Schräglage von 24° ergibt sich geometriebedingt aus der Anordnung von Rollenkörper und kollisionsrelevanter Einzelteile. Dieser Winkel ist für die Vorauslegung der herzustellenden Bauteile relevant.

### 5.8.2 Mechanische Berechnungen

Der Hersteller [30] des ausgewählten Gleitlagers weist keine eigene Lebensdauerberechnung aus. Daher wurde die Berechnung eines anderen Herstellers [31] herangezogen um erste Aussagen treffen zu können.

Die Berechnung der nominellen Lebensdauer von 2772 h ist über folgende Gleichung möglich:

$$L_h = \frac{500}{pv} \cdot f_p \cdot f_v \cdot f_{pv} \cdot f_{\vartheta} \cdot f_R \cdot f_W \cdot f_A, \quad (5.14)$$

mit  $p$  als spezifische Lagerbelastung und  $v$  als Gleitgeschwindigkeit. Die nachfolgenden Terme sind Korrekturfaktoren:  $f_p$  für die Last,  $f_v$  für die Gleitgeschwindigkeit,  $f_{pv}$  für die Reibenergie,  $f_\theta$  für die Temperatur,  $f_R$  für die Rautiefe,  $f_W$  für den Werkstoff und  $f_A$  für den Belastungsfall.

Die Korrekturfaktoren wurden über die Tabellen des Datenblattes abgeleitet und es wurde der jeweils unvorteilhafteste Wert verwendet. Die detaillierte Berechnung befindet sich im Abschnitt 10.3.7.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

### 6.1 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war die konstruktive und fertigungstechnische Auslegung eines TLK. In Anlehnung an die empfohlene Vorgehensweise in der Konstruktionsmethodik wurde in einem ersten Schritt die Erstellung des Anforderungsprofils vorgenommen. Hierbei wurden die allgemeinen und speziellen Anforderungen an den TLK festgelegt.

Anschließend folgte die Ausarbeitung und Beschreibung der Konzepte für den TLK. Für die einzelnen Funktionsgruppen wurden jeweils mehrere Ausführungsvarianten aufgelistet. Die Bewertung der einzelnen Versionen erfolgte über Entscheidungsmatrizen.

Ausgehend von diesen Empfehlungen wurde die konstruktive Umsetzung realisiert. Durch die Verwendung von Standardprofilen und -teilen sowie unter Rücksichtnahme auf fertigungstechnische Möglichkeiten wurde versucht eine möglichst leichte und einfache Konstruktion umzusetzen.

### 6.2 Schlussfolgerung

Der in dieser Arbeit vorgestellte TLK „LS-I“ weist im Vergleich zu bestehenden Systemen zahlreiche Vorteile auf, die sich unter anderem positiv auf Prozessdynamik und Wartungsfreundlichkeit auswirken. Er ist sehr leicht und kann durch seinen modularen Aufbau für verschiedene Tapegeometrien, Faser-Matrix-Kombinationen als auch Prozesskonfigurationen herangezogen werden. Die Grundlage für eine weitestgehend gleichmäßige Ablegebewegung wird durch die Verwendung eines Bandpuffers sowie durch den Verzicht auf Tapespannung erreicht.

Die einzelnen Funktionsgruppen können durch die Befestigung im Aufnahmesystem über ein Schnellwechselsystem rasch ein- bzw. ausgebaut werden. Dadurch konnte die Wartungsfreundlichkeit erhöht werden.

Zusätzlich ist es möglich, die einzelnen Funktionsgruppen in Abhängigkeit des Anwendungsfalles im TLK mitzuführen oder zu demontieren. Dadurch sind auch etwaige Weiterentwicklungen schnell und einfach zu implementieren. Des Weiteren können alle geforderten Betriebsmodi bedient werden.

### 6.3 Ausblick

Zukünftige Arbeiten könnten sich mit der fertigungstechnischen Umsetzung bzw. Erweiterung des TLK beschäftigen. Ein weiterer Punkt wäre die Optimierung der minimalen Bauteillänge (Abstand zwischen Klinge und Konsolidierungsrolle) beschäftigen. Dazu müsste der Schneidemechanismus verkleinert oder die Position innerhalb des Aufnahmesystems verändert werden. Demzufolge wäre die gekapselte Bauweise jedoch nicht mehr gewährleistet. Um den Schneidemechanismus weiterzuentwickeln könnten Versuche zum Thema Schnittkraft durchgeführt werden, bei dem der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit näher untersucht wird.

Ein weiterer Punkt wäre die Untersuchung diverser Konstruktionsvarianten für die Konsolidierungsrolle, da diese in der aktuellen Ausführung nur eine geringe Schrägstellung ermöglicht. Mögliche Erweiterungen sind die automatisierte Materialzuführung, wie z. B. über eine Bandspule und die Verwendung einer Laseroptik anstelle der Heißgasdüse. Die gesamte Konstruktion könnte zur Bauteiloptimierung (Blechdicken, Versteifungspositionen, usw.) mittels FEM analysiert werden.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Schürmann, H.: Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, 2. Aufl., Springer, Berlin, Heidelberg, New York, 2007.
- [2] Kölzer, P.: Temperaturefassungssystem und Prozessregelung des laserunterstützten Wickelns und Tapelegens von endlos faserverstärkten thermoplastischen Verbundkunststoffen, Shaker, Aachen, 2008.
- [3] Koschmieder, M.: Verarbeitung und Eigenschaften von Faserverbundkunststoffen mit Elastomermatrix, Dissertation an der RWTH Aachen, 2000.
- [4] Neitzel, M. und Mitschang, P.: Handbuch Verbundwerkstoffe, Hanser, München, Wien, 2004.
- [5] Grant, C.: Automated Tape Layer Processing for Composite Components, 5th Annual SPE Automotive Composite Conference, Troy (MI), 12-14 September 2005.
- [6] Beresheim, G.: Thermoplast-Tapelegen – ganzheitliche Prozessanalyse und -entwicklung, Dissertation an der Technischen Universität Kaiserslautern, 2002.
- [7] Khan, M. A.: Experimental and Simulative Description of the Thermoplastic Tape Placement Process with Online Consolidation, Dissertation an der Technischen Universität Kaiserslautern, 2010.
- [8] Accudyne Systems: Homepage, URL: [www.accudyne.com](http://www.accudyne.com) (abgerufen am 17. Mai 2013).
- [9] Automated Dynamics: Homepage, URL: [www.automateddynamics.com](http://www.automateddynamics.com) (abgerufen am 17. November 2012).
- [10] Zachary, A., Michasiow, J., und Hauber, D.: Automated Fiber Placement of Thermoplastic Composites: A Cost Effective Out of Autoclave Process, SETEC 12, Lucerne (Schweiz), 19-20 September 2012.
- [11] Coriolis Composites: Homepage, URL: [www.coriolis-composites.com](http://www.coriolis-composites.com) (abgerufen am 23. Juli 2012).



- [12] Tierney, J. J., Weber, R., Shevchenko, N., Heider, D., Yarlagadda, S., und Gillespie, J. W., Jr.: Development of an Automated Materials Placement (AMP) System for Composite Processing, SAMPE Spring Conference, 2012.
- [13] MAG: Homepage, URL: [www.mag-ias.com](http://www.mag-ias.com) (abgerufen am 17. Mai 2013).
- [14] AMRC: Homepage, URL: [www.amrc.co.uk](http://www.amrc.co.uk) (abgerufen am 17. November 2012).
- [15] Heider, D., Piovoso, M.J., und Gillespie Jr, J.W.: Application of a neural network to improve an automated thermoplastic tow-placement process, Journal of Process Control, 12 2002, 101–111.
- [16] KU Leuven: AUTOW Projekt, URL: [www.mtm.kuleuven.be](http://www.mtm.kuleuven.be) (abgerufen am 6. Juli 2012).
- [17] Cano, R. J., Belvin, H. L., Hulcher, A. B., und Grenoble, R. W.: Studies on Automated Manufacturing of High Performance Composites, Hampton, 2001.
- [18] Pahl, G. und Beitz, W.: Konstruktionslehre: Grundlagen erfolgreicher Produktentwicklung. Methoden und Anwendung, 7. Aufl., Springer, Berlin, 2006.
- [19] Ehrlenspiel, K.: Integrierte Produktentwicklung: Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit, 4. Aufl., Hanser, München, Wien, 2009.
- [20] KUKA Roboter GmbH: Spezifikation des QUANTEC extra, 2011.
- [21] Ashby, M. F.: Materials selection in mechanical design, 4. Aufl., Butterworth-Heinemann, Burlington, MA, 2011.
- [22] PanGas: Aluminium Werkstoffe: Schweisstechnische Verarbeitung, Dagsmarsellen, 2012.
- [23] Kalweit, A., Paul, C., Peters, S., und Wallbaum, R.: Handbuch für Technisches Produktdesign: Material und Fertigung, Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [24] Feldhusen, J.: Gestalten als Prozess, Eindeutig, Einfach und Sicher, URL: <http://www.ikt.rwth-aachen.de/de/lehre/download.html> (abgerufen am 26. März 2013).

- [25] Festo: Datenblatt für Kompaktzylinder ADN/AEN, 2012.
- [26] Beckhoff Automation GmbH: Datenblatt für AS1xxx | Schrittmotoren, 2013.
- [27] Gutekunst: Datenblatt für Druckfeder D-288F, 2013.
- [28] Festo: Datenblatt für Parallelgreifer HGPD, 2013.
- [29] Saint-Gobain: Datenblatt für OmniLip, PTFE-Wellendichtringe, 2003.
- [30] Heinrich Reiter GmbH: Katalog für Wälzlager, Gleitlager und Zubehör, 2007.
- [31] Schaeffler Technologies AG & Co. KG: Datenblatt für Metall-Polymer-Verbundgleitlager, 2012.
- [32] MatWeb: Homepage, URL: [www.matweb.com](http://www.matweb.com) (abgerufen am 17. Mai 2013).
- [33] Zultner: Homepage, URL: [www.zultner.at](http://www.zultner.at) (abgerufen am 17. Mai 2013).
- [34] GLEICH Aluminiumwerk GmbH & Co. KG: Technisches Datenblatt EN AW 5083, 2013.
- [35] Deutsche Edelstahlwerke: Werkstoffdatenblatt 1.4305, 2008.
- [36] Künne, B.: Einführung in die Maschinenelemente: Gestaltung, Berechnung, Konstruktion, 2. Aufl., Teubner, Stuttgart [u.a.], 2001.
- [37] Hydro Aluminium Extrusion Deutschland GmbH: Strangpressen, 2013.
- [38] Dubbel, H., Grote, K.-H., und Feldhusen, J.: Taschenbuch für den Maschinenbau, 22. Aufl., Springer, Berlin, New York, 2007.

## 8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Spezifische Eigenschaften verschiedener Werkstoffe .....	1
Abbildung 1.2: Komplettes Tapelegesystem des Harbin Hafei Airbus Composite Manufacturing Centre mit Portalanlage und Ablegekopf .....	2
Abbildung 2.1: FWW mit unterschiedlichem Einzelschichtaufbau, links: quasiisotroper Aufbau, rechts: Sandwichaufbau .....	4
Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Kettenstruktur verschiedener Polymere .....	6
Abbildung 2.3: Schematischer Aufbau und Lieferform eines UD-Tapes.....	7
Abbildung 2.4: Exemplarische Projekte für automatisiertes Tapelegen von Primärstrukturen bei Kampfflugzeugen. ....	8
Abbildung 2.5: Schematische Darstellung der maßgeblichen Funktionsgruppen für das Tapelegen.....	9
Abbildung 2.6: Aufsetzen und Ablegen des Tapes.....	10
Abbildung 2.7: Einige Vorteile des automatisierten Tapelegeverfahrens .....	11
Abbildung 2.8: TLK mit Heißgasdüse, Konsolidierungssystem und Tapeführung	13
Abbildung 2.9: Schema einer TLK Konfiguration mit einer einzelnen Konsolidierungsrolle und Aufheizvorrichtung.....	14
Abbildung 2.10: Schema einer TLK Konfiguration mit jeweils zwei Konsolidierungsrollen und Aufheizvorrichtungen.....	15
Abbildung 2.11: Schema einer TLK Konfiguration mit unterschiedlich temperierten Konsolidierungsschuhen .....	15
Abbildung 2.12: Komplettes Tapelegesystem der Fa. Accudyne Systems.....	16
Abbildung 2.13: Flexibles Konsolidierungssystem von Accudyne Systems, das die Kontur eines Hammers nachbildet .....	17

---

Abbildung 2.14: Variante des TLK von ADC mit einer am Kopf mitgeführten Spulenbevorratung .....	18
Abbildung 2.15: Systemlösung von Coriolis Composites mit eigens entwickelten TLK.....	19
Abbildung 2.16: Kooperative Robotereinheiten für simultanen und hochdynamischen Ablegeprozess .....	20
Abbildung 2.17: TLK von ADC mit Multispulenbevorratung im Einsatz beim AMRC an der Universität Sheffield [9]. .....	22
Abbildung 2.18: TLK des CCM mit Vorkompaktierungs- und Konsolidierungsrolle sowie positionsgesteuerter Heißgasdüse .....	23
Abbildung 2.19: Modularer TLK des CCM; links: Darstellung im CAD System; rechts: Aufbau im realen Umfeld .....	24
Abbildung 2.20: Laserunterstützter TLK des Fraunhofer IPT .....	25
Abbildung 2.21: TLK Evo I mit Tapeführung am Kopf samt Roboter des IVW .....	27
Abbildung 2.22: TLK des AUTOW EU Projektes .....	27
Abbildung 2.23: Gesamtes Tapelegesystem (Roboter, TLK, Unterwerkzeug) der NASA-LARC.....	28
Abbildung 2.24: TLK Variante des NASA-LARC mit Elektronenstrahl.....	29
Abbildung 2.25: Generelles Vorgehen beim Entwickeln und Konstruieren lt. VDI-Richtlinie 2221 .....	30
Abbildung 4.1: Konzeptvarianten für das Aufnahmesystem. ....	45
Abbildung 4.2: Konzept für die Tapeführung mit außenliegendem Profil und innenliegendem, austauschbarem Einsatz. ....	47
Abbildung 4.3: Konzept für die Tapeführung mit Druckluftbohrungen zur materialschonenden Führung der Tapes.....	47
Abbildung 4.4: Schema zur Befestigung von Funktionsgruppen im Aufnahmesystem mittels Schraubverbindungen. ....	49

Abbildung 4.5: Schema zur Befestigung von Funktionsgruppen im Aufnahmesystem mittels Führungselementen in der Funktionsgruppe. ....	49
Abbildung 4.6: Schema zur Befestigung von Funktionsgruppen im Aufnahmesystem mittels Führungsschienen in der Funktionsgruppe. ....	50
Abbildung 4.7: Schema zur Befestigung von Funktionsgruppen im Aufnahmesystem mittels Positionsbolzen. ....	51
Abbildung 4.8: Schema zur Befestigung von Funktionsgruppen im Aufnahmesystem mittels Positionsbolzen und einem Spannsystem. ....	51
Abbildung 4.9: Schema zur Befestigung von Funktionsgruppen im Aufnahmesystem mittels Führungsrollen. ....	52
Abbildung 4.10: Konzept für die Materialzuführung mittels Führungs- und Umlenkprofil. ....	54
Abbildung 4.11: Konzept für die Vorschubeinheit; links: Tape läuft frei zwischen den Rollen; rechts: Tape wird zwischen den Rollen geklemmt und definiert gefördert. ....	55
Abbildung 4.12: Konzept für die Ausführung des Schneidemechanismus, links: Tape läuft frei zwischen den Niederhaltern; rechts: Tape wird durch Niederhalter geklemmt und anschließend geschnitten. ....	56
Abbildung 4.13: Schematische Darstellung der optionalen Schrägstellung der Klinge für den Schneidemechanismus. ....	57
Abbildung 4.14: Konzeptvorstellung des aktiven Bandpuffers, von links nach rechts: Bandpuffer ist aufgebaut, wird abgebaut und ist leer. ....	59
Abbildung 4.15: Konzeptvorstellung des passiven Bandpuffers, links: Der Bandpuffer ist aufgebaut; rechts: Der Bandpuffer ist leer. ....	60
Abbildung 4.16: Konzeptaufbau der manuellen Verstellmöglichkeiten der Aufheizvorrichtung. ....	62
Abbildung 4.17: Konzeptaufbau der automatisierten Positionierung der Aufheizvorrichtung. ....	62

Abbildung 4.18: Konzeptvariante „Ober-/Unterteil“ für die Ausführung des Konsolidierungssystems, links: Aufnahme einer einzelnen Rolle; rechts: spätere Aufnahme einer zweiten Rolle bzw. eines Schuhs. ....	63
Abbildung 4.19: Konzeptvariante „Modul“ für die Ausführung des Konsolidierungssystems, links: Ein-Rollen Aufhängung; rechts: Zwei-Rollen bzw. Schuhaufhängung. ....	64
Abbildung 4.20: Konzept für die Eigenkonstruktion der temperierten Konsolidierungsrolle. ....	65
Abbildung 5.1: CAD-Gesamtdarstellung vom konstruierten TLK mit der Bezeichnung „LS-I“.....	68
Abbildung 5.2: Schnittansicht durch den gesamten TLK samt Funktionsgruppen.	69
Abbildung 5.3: Isometrische Ansicht vom Aufnahmesystem. ....	70
Abbildung 5.4: Isometrische Ansicht von Ober- und Unterteil (jeweils links bzw. rechts) des Aufnahmesystems .....	72
Abbildung 5.5: Isometrische Darstellung von den Befestigungsmöglichkeiten der Funktionsgruppen, links: Bandpufferbefestigung mit verschiebbarer Klemmleiste, rechts: Zweites Befestigungssystem mit Spannelement. ....	73
Abbildung 5.6: Isometrische Ansicht der Materialzuführung.....	75
Abbildung 5.7: Freigemachte Darstellung der Materialzuführung.....	76
Abbildung 5.8: Isometrische Ansicht der Vorschubeinheit.....	77
Abbildung 5.9: Freigemachte Ansicht der Vorschubeinheit.....	78
Abbildung 5.10: Isometrische Darstellung vom Schneidemechanismus. ....	79
Abbildung 5.11: Schnittansicht vom Schneidemechanismus .....	80
Abbildung 5.12: Schnittansicht des Schneidemechanismus bei einem eingestellten Winkel von 45° .....	81
Abbildung 5.13: Position von Niederhalter und Klinge am Ende des Schneidvorganges.....	81
Abbildung 5.14: Isometrische Ansicht des Bandpuffers. ....	84

Abbildung 5.15: Schnittdarstellung des Bandpuffers .....	85
Abbildung 5.16: Schnittdarstellung des Bandpuffers bei geöffneten Greifbacken und eingefahrenem Kompaktzylinder. ....	86
Abbildung 5.17: Isometrische Ansicht der Endführung.....	88
Abbildung 5.18: Schnittdarstellung der Endführung .....	89
Abbildung 5.19: Isometrische Darstellung des Konsolidierungssystems.....	90
Abbildung 5.20: Schnittansicht des Konsolidierungssystems mit eingezeichneter maximaler Schräglage.....	91
Abbildung 10.1: Abmessungen des Adapterstücks für den Endaktuator am Roboter .....	104
Abbildung 10.2: Vergrößerte Darstellung des Aufnahmekonzeptes „Wangensystem“. ....	105
Abbildung 10.3: Vergrößerte Darstellung des Aufnahmekonzeptes „Formrohr“. ....	106
Abbildung 10.4: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für die Bestimmung der Schnittkraft. ....	122

## 9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Geforderte Verarbeitungsaspekte des TLK. ....	38
Tabelle 4.1: Vergleich der verschiedenen Materialindizes. ....	43
Tabelle 4.2: Entscheidungsmatrix zur Materialauswahl des Aufnahmesystems... 44	
Tabelle 4.3: Entscheidungsmatrix zur Auswahl des Aufnahmesystems.....	46
Tabelle 4.4: Entscheidungsmatrix zur Auswahl einer Tapeführung.....	48
Tabelle 4.5: Entscheidungsmatrix für die Auswahl eines Befestigungssystems der Konzepte 1 bis 3.....	53
Tabelle 4.6: Entscheidungsmatrix für die Auswahl eines Befestigungssystems der Konzepte 4 bis 6.....	53
Tabelle 4.7: Entscheidungsmatrix zur Auswahl der Klingenausführung. ....	58
Tabelle 4.8: Entscheidungsmatrix zur Auswahl eines Bandpufferkonzeptes.....	61
Tabelle 4.9: Entscheidungsmatrix zur Auswahl eines Konsolidierungssystems... 66	
Tabelle 10.1: Kennwerte für Aluminium und Edelstahl.....	104
Tabelle 10.2: Parameter für die Bestimmung der maximalen Knickkraft. ....	111
Tabelle 10.3: Parameter für die Berechnung der Sperrriegel. ....	112
Tabelle 10.4: Parameter für die mechanische Analyse des Schneidemechanismus. .....	114
Tabelle 10.5: Berechnungsdaten für die Bandpufferlänge. ....	116
Tabelle 10.6: Berechnungsdaten für die Auslegung des Kompaktzylinders für den Bandpuffer.....	118
Tabelle 10.7: Berechnungsdaten für die Lebensdauerberechnung der Gleitlager. .....	120
Tabelle 10.8: Korrekturfaktoren für Gleitlagerberechnung.....	121
Tabelle 10.9: Ermittelte Schnittkraft zur Durchtrennung des Referenzmaterials. 122	



## 10 Anhang

### 10.1 Tabellen

Tabelle 10.1: Kennwerte für Aluminium und Edelstahl [32, 33].

	Aluminium (EN AW 5083)	Edelstahl (1.4301)
E-Modul in GPa	70	196
Dichte in g/cm <sup>3</sup>	2,7	7,8
Artikel Nr. lt. [33]	026658	002332
Preis in €/kg	9,76	4,47

### 10.2 Abbildungen

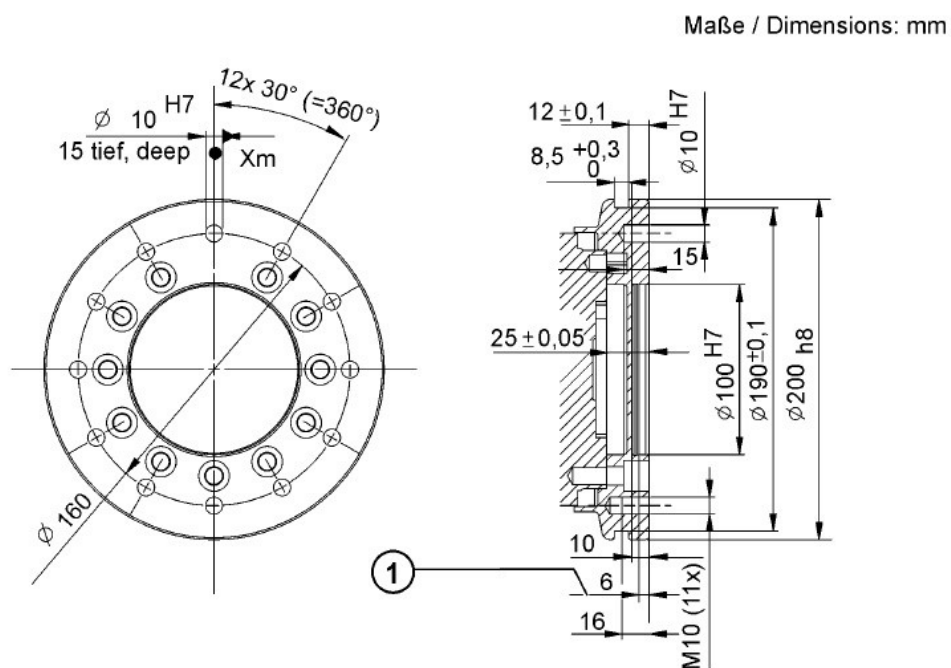


Abbildung 10.1: Abmessungen des Adapterstücks für den Endaktuator am Roboter [20].

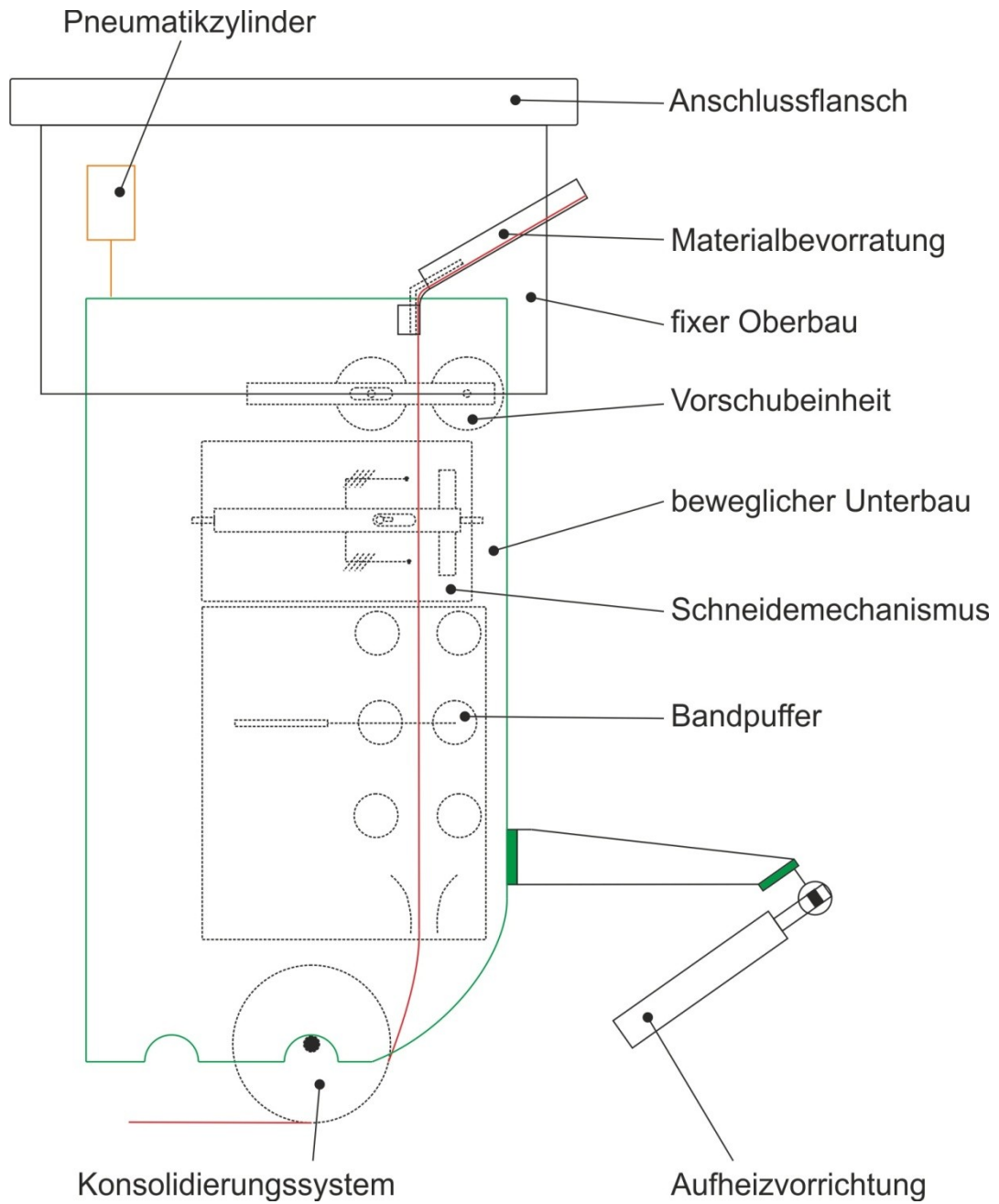


Abbildung 10.2: Vergrößerte Darstellung des Aufnahmeprinzips „Wangensystem“.

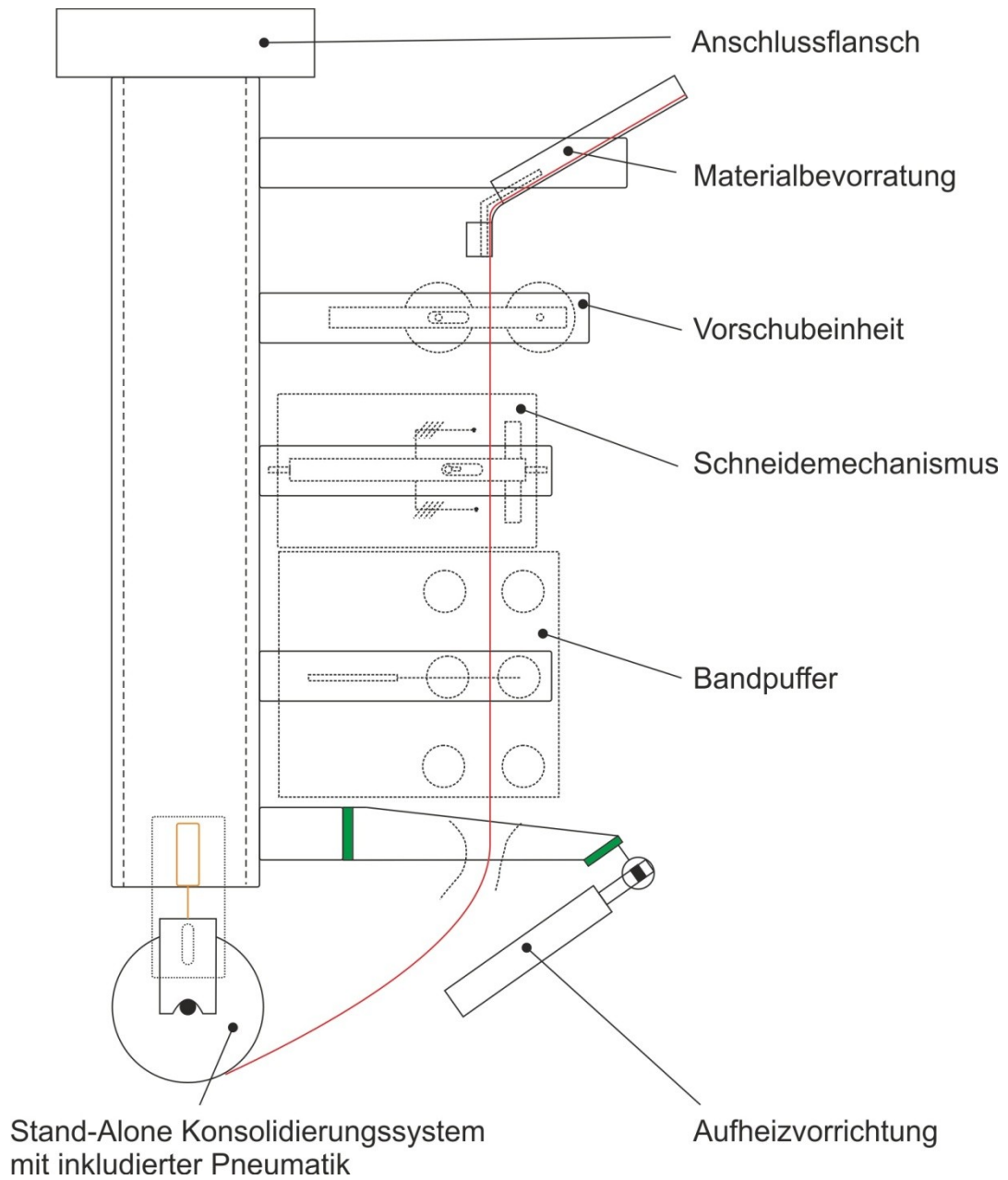


Abbildung 10.3: Vergrößerte Darstellung des Aufnahmekonzeptes „Formrohr“.

## 10.3 Berechnungen

### 10.3.1 Herleitung der Materialindizes

Zuerst wird eine Gleichung gesucht, in welcher der zu maximierende und minimierende Parameter vorkommt. Für unsere Anwendung ist dies das zu minimierende Gewicht bzw. die zu minimierenden Kosten. Diese Gleichung wird Zielfunktion genannt. Die Funktionsformel für die Gewichtsoptimierung:

$$m = A \cdot l \cdot \rho, \quad (10.1)$$

mit  $m$  als Masse,  $A$  als Querschnittsfläche,  $l$  als Länge und  $\rho$  als Dichte. Die Funktionsformel für die Kostenoptimierung:

$$C = C_m \cdot m = C_m \cdot A \cdot l \cdot \rho, \quad (10.2)$$

hier steht  $C$  für den Preis und  $C_m$  für den Preis je Gewichtseinheit. Am Aufnahmesystem wirkt die Konsolidierungskraft als Druckkraft, die erste Herleitung berücksichtigt die dadurch entstehende Verformung. Für die Materialindizes werden keine Geometriedaten oder Kräfte benötigt, diese sind allein in der analytischen Herleitung relevant. Die vorgegebenen Werte sind wie folgt:

- Kraft,
- Verformung,
- Länge.

Die Querschnittsfläche ist frei wählbar. Der allgemeine Ansatz für die Normalspannung lautet:

$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (10.3)$$

Hierbei ist  $\sigma$  die Normalspannung und  $F$  die Kraft normal zur Querschnittsfläche  $A$ . Unter Berücksichtigung des Hookeschen Gesetzes:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{\delta}{l}, \quad (10.4)$$

wobei  $E$  dem E-Modul,  $\varepsilon$  der Dehnung,  $\delta$  der Längenänderung und  $l$  der Ausgangslänge entspricht. Daraus ergibt sich die Längenänderung:

$$\delta = \frac{F \cdot l}{E \cdot A} = \frac{F}{S^*} \quad (10.5)$$

Umgeformt auf die erforderliche Steifigkeit  $S^*$ :

$$S^* = \frac{F}{\delta} = \frac{E \cdot A}{l} \quad (10.6)$$

Einbau des Sicherheitsfaktors  $\nu$ :

$$S = \frac{E \cdot A}{l} \geq S^* \cdot \nu \quad (10.7)$$

Umstellen auf die erforderliche Fläche:

$$A \geq \frac{S^* \cdot l \cdot \nu}{E} \quad (10.8)$$

Einsetzen der Fläche aus Gleichung (10.1) ergibt:

$$m \geq (S^* \cdot l^2 \cdot \nu) \cdot \left(\frac{\rho}{E}\right) \quad (10.9)$$

Den inversen letzten Term (Materialindex, fett dargestellt) gilt es zu maximieren:

$$V_{D2} = \frac{E}{\rho} \quad (10.10)$$

Wie aus Gleichung (10.10) hervorgeht, hat der E-Modul einen direkten Einfluss auf den Materialindex. Im Falle der Gewichtsoptimierung ändert sich der Materialindex wie folgt:

$$V_{D1} = \frac{E}{C_m \cdot \rho} \quad (10.11)$$

Für die vereinfachte Betrachtung des Knickens, wird von einem Balken mit gleichen Seitenlängen ausgegangen. Die vorgegebenen Parameter sind wie folgt:

- Kraft,
- Gesamtlänge.

Die Seitenlänge ist als Konstruktionsparameter frei einstellbar. Die Knickkraft kann für den elastischen Bereich durch eine einzige Formel dargestellt werden:

$$F \leq F_K = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{s^2}, \quad (10.12)$$

mit  $F$  als eingebrachter Druckkraft,  $F_K$  als kritischer Knickkraft,  $I$  als axiales Flächenträgheitsmoment des Querschnittes und  $s$  als Knicklänge. Die Gleichung wird nach dem Flächenträgheitsmoment umgestellt, da dieses – wie auch die Fläche – von den frei einstellbaren Seitenlängen abhängig ist:

$$I \geq \frac{F \cdot s^2}{\pi^2 \cdot E}. \quad (10.13)$$

Das Flächenträgheitsmoment lässt sich im Fall von gleichen Seitenlängen (bzw. bei Rundquerschnitten) unter Berücksichtigung von Gleichung (10.1) wie folgt anschreiben:

$$I = \frac{l_s \cdot l_s^3}{12} = \frac{l_s^4}{12} = \frac{A^2}{12} = \frac{m^2}{12 \cdot l^2 \cdot \rho^2}, \quad (10.14)$$

wobei  $l_s$  der Seitenlänge entspricht. Die Gleichungen (10.12) und (10.13) gleichsetzen und nach der Masse auflösen liefert:

$$m \geq \frac{\sqrt{12 \cdot F \cdot l \cdot s}}{\pi} \cdot \left( \frac{\rho}{\sqrt{E}} \right). \quad (10.15)$$

Angeschrieben als Materialindex:

$$V = \frac{\sqrt{E}}{\rho}. \quad (10.16)$$

Aus den vorangegangenen Schritten ist ersichtlich, dass sobald  $I \propto A^2$  ist, der E-Modul nicht mehr linear in den Materialindex eingeht. Daraus resultiert eine Geometrie- und Belastungsabhängigkeit der Materialindizes. Sobald die Proportionalität von Flächenträgheitsmoment und Fläche in dieser Form nicht mehr gegeben ist (die Abmessungen sind nicht mehr quader- oder kreisförmig), ergibt sich ein anderer, für diese Arbeit ebenfalls relevanter Materialindex. Als Beispiel dient ein allgemeiner Balken mit den Abmessungen Breite  $b$  x Höhe  $h$  x Länge  $l$ . Kraft und Länge sind – wie bereits in den vorangegangenen Berechnungen – gegeben.

Das Flächenträgheitsmoment für diesen Balken ist:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}. \quad (10.17)$$

Je nachdem, welcher Parameter ( $b$  oder  $h$ ) variiert werden soll, ergeben sich unterschiedliche Funktionsgleichungen:

$$m = A \cdot l \cdot \rho = b \cdot h \cdot l \cdot \rho,$$

bzw.

$$b = \frac{m}{h \cdot l \cdot \rho}, \quad (10.18)$$

und/oder:

$$h = \frac{m}{b \cdot l \cdot \rho}. \quad (10.19)$$

Das Einsetzen des Flächenträgheitsmomentes für den Balken in die Knickgleichung liefert:

$$\frac{b \cdot h^3}{12} \geq \frac{F \cdot s^2}{\pi^2 \cdot E}. \quad (10.20)$$

Auf  $b$  oder  $h$  umgeformt und durch die jeweilige Funktionsgleichung ersetzt:

$$b \geq \frac{12 \cdot F \cdot s^2}{\pi^2 \cdot E \cdot h^3}, \quad (10.21)$$

$$m \geq \frac{12 \cdot F \cdot s^2 \cdot l}{\pi^2 \cdot h^2} \cdot \left(\frac{\rho}{E}\right), \quad (10.22)$$

$$h^3 \geq \frac{12 \cdot F \cdot s^2}{\pi^2 \cdot E \cdot b}, \quad (10.23)$$

$$m \geq \sqrt[3]{\frac{12 \cdot F \cdot s^2 \cdot b^2}{\pi^2}} \cdot l \cdot \left(\frac{\rho}{\sqrt[3]{E}}\right). \quad (10.24)$$

Dadurch ergeben sich je nach Wahl des freien Parameters unterschiedliche Materialindizes. Für die Breite  $b$ :

$$V = \frac{E}{\rho}, \quad (10.25)$$

und für die Höhe  $h$ :

$$V_{K2} = \frac{E^{1/3}}{\rho}. \quad (10.26)$$

Wird nun das Kostenoptimum gesucht, ändert sich die Gleichung (10.26) wie folgt:

$$V_{K1} = \frac{E^{1/3}}{C_m \cdot \rho}. \quad (10.27)$$

Da das Aufnahmesystem im Querschnitt weder Quader- noch Ringförmig aufgebaut sein wird, sind die verwendeten Materialindizes in den Gleichungen (10.10), (10.11), (10.26) und (10.27) dargestellt.

### 10.3.2 Stabilitätsberechnung des Aufnahmesystems

Der Kasten des Unterteils besteht aus Aluminium, Materialbezeichnung: EN AW 5083. Für die Berechnung der kritischen Knickkraft ist der erste Schritt die Bestimmung des minimalen Flächenträgheitsmomentes. Die dafür notwendigen Parameter sind unter anderem in Tabelle 10.2 aufgelistet.

Tabelle 10.2: Parameter für die Bestimmung der maximalen Knickkraft.

E-Modul [34]	$E$	70 GPa
Breite	$b$	6 mm
Dicke	$h$	244 mm
Länge	$l$	381 mm
Knicklängenbeiwert	$\beta$	0,5
Max. Kraft des Kompaktzylinders ADN 50 [25]	$F_Z$	1178 N

Das Flächenträgheitsmoment von  $4392 \text{ mm}^4$  einer Seitenwand ist mit:

$$I = \frac{b \cdot h^3}{12}, \quad (10.28)$$



definiert. Die Knicklänge von 190,5 mm setzt sich aus der Länge und dem Knicklängenbeiwert zusammen:

$$s = \beta \cdot l. \quad (10.29)$$

Mit den nun bekannten Daten lässt sich die kritische Knickkraft von 83612 N wie folgt bestimmen:

$$F_K = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{s^2}. \quad (10.30)$$

Der Sicherheitsfaktor von 142 ergibt sich über:

$$v = \frac{2 \cdot F_K}{F_Z}. \quad (10.31)$$

### 10.3.3 Berechnung der Sperrriegel

Die Sperrriegel werden auf Abscherung und Flächenpressung beansprucht. Die Werkstoffnummer des Riegels ist 1.4305, die der Seitenwand des Unterteils EN AW 5083. Die Materialkenndaten und Abmessungen sind in Tabelle 10.3 aufgelistet.

Tabelle 10.3: Parameter für die Berechnung der Sperrriegel.

Zugfestigkeit EN AW 5083 [34]	$\sigma_{zB,1}$	270 MPa
Zugfestigkeit 1.4305 [35]	$\sigma_{zB,2}$	500 MPa
Durchmesser Sperrriegel	$d_S$	6 mm
Länge Auflagefläche	$l$	5,5 mm
Max. Kraft Kompaktzylinder ADN 50 [25]	$F_Z$	1178 N

Die abgescherte Fläche eines Riegels beträgt 28,27 mm<sup>2</sup> und wird mithilfe der folgenden Gleichung bestimmt:

$$A_\tau = \frac{d_S^2 \cdot \pi}{4}. \quad (10.32)$$

Da insgesamt vier Sperrriegel eingesetzt werden und angenommen wird, dass sich die Konsolidierungskraft gleichmäßig auf alle Riegel verteilt, ist die Abscherspannung von 10,42 N/mm<sup>2</sup> anhand der Gleichung (10.33) zu bestimmen:

$$\bar{\tau} = \frac{F_Z}{4 \cdot A_\tau}. \quad (10.33)$$

Die Sicherheit gegen Abscheren von 27,72 ist mit:

$$v = \frac{\bar{\tau}_{zul}}{\bar{\tau}}, \quad (10.34)$$

definiert. Hierbei ist  $\bar{\tau}_{zul}$  die zulässige Abscherspannung von 289 N/mm<sup>2</sup> und kann über die Zugfestigkeit ermittelt werden:

$$\bar{\tau}_{zul} = \frac{\sigma_{zB,2}}{\sqrt{3}}. \quad (10.35)$$

Die Auflagefläche zwischen Sperrriegel und Seitenwand beträgt 33 mm<sup>2</sup> und wird wie folgt bestimmt:

$$A_p = d_s \cdot l. \quad (10.36)$$

Die eintretende Flächenpressung von 8,92 N/mm<sup>2</sup> lässt sich mit:

$$p = \frac{F_Z}{4 \cdot A_p}, \quad (10.37)$$

ermitteln. Der Reservefaktor von 10,08 ist über folgenden Zusammenhang definiert:

$$v = \frac{p_{zul}}{p}. \quad (10.38)$$

Hierbei ist  $p_{zul}$  die zulässige Flächenpressung von 90 N/mm<sup>2</sup> des weniger festen Materials (EN AW 5083). Der Wert lässt sich über die Beziehung:

$$p_{zul} = \frac{\sigma_{zB,1}}{3}, \quad (10.39)$$

abschätzen [36].

### 10.3.4 Mechanische Analyse des Schneidemechanismus

Die mechanische Analyse betrachtet die Biege- und Zugspannungen in den U-Profilen aus Aluminium (EN AW 6060 T66) des inneren Rahmens, ohne die Berücksichtigung der eingebauten Versteifungen. Die notwendigen Daten sind in Tabelle 10.4 aufgelistet.

Tabelle 10.4: Parameter für die mechanische Analyse des Schneidemechanismus.

<b>U-Profil</b>		
Breite	$b^*$	25 mm
Höhe	$h^*$	15 mm
Dicke	$s$	2 mm
Eingespannte Länge	$l$	80 mm
<b>Sonstige Daten</b>		
Max. Kraft Kompaktzylinder ADN 50 [25]	$F_Z$	1178 N
Dehngrenze [37]	$R_e$	160 N/mm <sup>2</sup>

Im ersten Schritt wird die Biegespannung berechnet. Die vereinfachte Annahme geht von einem auf beiden Seiten starr eingespannten Profil aus. Daraus ergibt sich ein statisch unbestimmtes System. Das maximale Biegemoment von 7,4 Nm lässt sich wie folgt bestimmen [38]:

$$M_b = \frac{F_Z \cdot l}{8}. \quad (10.40)$$

Das Widerstandsmoment von 214,5 N/mm<sup>2</sup> setzt sich aus dem Flächenträgheitsmoment  $I$  und dem größten Randfaserabstand zusammen:

$$W = \frac{I}{e_{max}}, \quad (10.41)$$

für die Bestimmung des Flächenträgheitsmomentes werden neue Terme eingeführt:

$$B = 2 \cdot s; \quad b = b^* - B; \quad H = h^* \quad \text{und} \quad h = s, \quad (10.42)$$

$$I = \frac{B \cdot H^3 + b \cdot h^3}{3} - (B \cdot H + b \cdot h) \cdot e_1^2. \quad (10.43)$$

Hierbei ist  $e_1$  der kleinere Randfaserabstand, dieser ist mit:

$$e_1 = \frac{B \cdot H^2 + b \cdot h^2}{2 \cdot (B \cdot H + b \cdot h)}, \quad (10.44)$$

definiert. Der größte Randfaserabstand ist jedoch  $e_2$ , ermittelbar durch folgende Gleichung:

$$e_2 = e_{max} = H - e_1. \quad (10.45)$$

Die maximale Biegespannung von 54,92 N/mm<sup>2</sup> lässt sich mithilfe des Zusammenhanges:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W}. \quad (10.46)$$

ermitteln. Der nächste zu untersuchende Aspekt ist die Zugspannung in den beiden seitlichen Profilen. Die Fläche des U-Profiles von 102 mm<sup>2</sup> wird über folgende Beziehung bestimmt:

$$A = b^* \cdot h^* - ((b^* - 2 \cdot s) \cdot (h^* - s)). \quad (10.47)$$

Die Zugspannung von 5,77 N/mm<sup>2</sup> ist über:

$$\sigma_z = \frac{F_z}{2 \cdot A}, \quad (10.48)$$

bestimmbar. Die Sicherheiten gegen eine plastische Verformung sind 2,91 (Biegebeanspruchung) und 27,71 (Zugbeanspruchung). Diese Werte können über folgenden Gleichungen ermittelt werden:

$$v_b = \frac{\sigma_{zd,zul}}{\sigma_b}, \quad (10.49)$$

$$v_z = \frac{\sigma_{zd,zul}}{\sigma_z}, \quad (10.50)$$

mit:

$$\sigma_{zd,zul} = R_e. \quad (10.51)$$

### 10.3.5 Bestimmung der Bandpufferlänge

Die notwendigen Parameter für die Berechnung sind in Tabelle 10.5 aufgelistet. Die Werte des Kompaktzylinders ADN 50 sind dem Datenblatt [25] des Herstellers entnommen.

Tabelle 10.5: Berechnungsdaten für die Bandpufferlänge.

<b>Kompaktzylinder ADN 50</b>		
Max. Aufprallenergie	$E_{kin}$	1 J
Hub	$l_H$	15 mm
Bewegte Masse bei 0 mm Hub	$m_{Z0}$	0,14 kg
Massenzuschlage pro 10 mm Hub	$m_{Z10}$	16 g
<b>Schneidemechanismus</b>		
Bewegte Masse der Schneidvorrichtung	$m_K$	0,148 kg
Abstand zw. Klingenspitze/Blende	$x$	12,7 mm
<b>Prozess</b>		
Ablegegeschwindigkeit	$v_A$	20 m/min

Die zulässige Aufprallgeschwindigkeit  $v_{zul}$  von 2,53 m/s errechnet sich unter Berücksichtigung der maximalen Aufprallenergie und der bewegten Gesamtmasse  $m$  von 0,312 kg:

$$v_{zul} = \sqrt{\frac{2 \cdot E_{kin}}{m}}, \quad (10.52)$$

mit:

$$m = m_{Z0} + \frac{m_{Z10} \cdot l_H}{10} + m_K. \quad (10.53)$$

Die zulässige Geschwindigkeit dient als maximaler Grenzwert für die gewählte Geschwindigkeit  $v_S$ , letztgenannte wird mit 2 m/s angenommen.

$$v_S \leq v_{zul}. \quad (10.54)$$

Die Gleichungen (10.55) und (10.56) zeigen den Zusammenhang zwischen Weg und Geschwindigkeit bei konstanter Beschleunigung:

$$a = \frac{v_S}{t}, \quad (10.55)$$

mit:

$$x = x_0 + v_0 \cdot t + a \cdot \frac{t^2}{2}, \quad (10.56)$$

wobei  $x_0$  den Anfangsabstand,  $v_0$  die Anfangsgeschwindigkeit,  $t$  die Schnittzeit und  $a$  die Beschleunigung darstellt. Unter den Voraussetzungen, dass der Anfangsabstand 0 m und die Anfangsgeschwindigkeit 0 m/s beträgt, errechnet sich eine reine Schnittzeit  $t$  von 0,0127 s (= benötigte Zeit für den Abstand  $x$ ) durch Umformen der Gleichungen (10.55) und (10.56) wie folgt:

$$t = \frac{2 \cdot x}{v_S}. \quad (10.57)$$

Mögliche Verzögerungen durch Ein-/Ausfahren bzw. andere nicht vorhersehbare Unregelmäßigkeiten werden mithilfe des Sicherheitsfaktors  $\nu$ , der mit 2 beaufschlagt wird, berücksichtigt:

$$t^* = t \cdot \nu. \quad (10.58)$$

Mit dieser Schnittzeit kann die Größe des Bandpuffers  $l_p$  von 8 mm nach Gleichung (10.59) bestimmt werden:

$$l_p = v_A \cdot t^*. \quad (10.59)$$

### 10.3.6 Auslegung des Kompaktzylinders für den Bandpuffer

Für die Auslegung des Kompaktzylinders sind Angaben in Bezug auf erforderlichen Hub und Kraft erforderlich. Der Hub wurde empirisch via CAD ermittelt da er in einem nichtlinearen Zusammenhang zur Bandpuffergröße steht. Die gesamte Berechnung dient nur zu einer ersten Auslegung der benötigten Kraft.

Tabelle 10.6: Berechnungsdaten für die Auslegung des Kompaktzylinders für den Bandpuffer.

Fasertype		CF-HT
E-Modul parallel zur Faser [1]	$E_{F\parallel}$	230 GPa
Matrix		PEEK
E-Modul [1]	$E_M$	3,6 GPa
Faservolumengehalt	$\varphi$	65 %
Rollendurchmesser	$D$	30 mm
Tapedicke	$h$	0,35 mm
Tapebreite	$b$	25,4 mm
Umschlingungswinkel	$\beta$	37°
Länge des Tangentenstückes	$l_T$	20 mm

Bevor mit der eigentlichen Berechnung begonnen werden kann, muss der E-Modul des Tapes in Faserrichtung bestimmt werden. Dieser wird mithilfe der Gleichung (10.60) ermittelt und beträgt 151 GPa.

$$E = E_{F\parallel} \cdot \varphi + E_M \cdot (1 - \varphi). \quad (10.60)$$

Daraus wird die Dehnung  $\varepsilon$  von 1,17 % bestimmt, die aufgrund der Umlenkung des Tapes um die Rolle auftritt:

$$\varepsilon = \frac{h}{D}. \quad (10.61)$$

Der nächste Schritt ist die Bestimmung des erforderlichen Biegemomentes, dieses steht mit der Dehnung und auftretenden Spannung in folgendem Zusammenhang:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon = \frac{6 \cdot M_b}{b \cdot h^2}. \quad (10.62)$$

Das Biegemoment  $M_b$  von 912 Nmm ist notwendig um die zuvor ermittelte Dehnung zu erreichen und ergibt sich durch Umstellen der Gleichung (10.62):

$$M_b = \frac{E \cdot b \cdot h^3}{6 \cdot D}. \quad (10.63)$$

Es ist somit unabhängig vom Umschlingungswinkel. Das Biegemoment kann aufgebracht werden, indem eine Kraft  $F$  von 45,61 N normal auf den Hebelarm mit der Länge  $l_T$  wirkt. Die Länge des Hebelarms ist der Abstand zwischen den beiden tangentialen Berührungspunkten der Umlenkrollen.

$$F = \frac{M_b}{l_T}. \quad (10.64)$$

Die horizontale Kraft  $F_H$  von 57,1 N, die notwendig ist um das erforderliche Biegemoment aufzubringen, wird wie folgt ermittelt:

$$F_H = \frac{F}{\cos(\beta)}. \quad (10.65)$$

Da drei Umlenkungen notwendig sind, ist die Gesamtkraft  $F_{ges}$  von 171,3 N mithilfe von Gleichung (10.66) zu bestimmen:

$$F_{ges} = 3 \cdot F_H. \quad (10.66)$$

### 10.3.7 Lebensdauerberechnung der Gleitlager

Die Geometriedaten sowie Tragzahlen sind dem Katalog des Herstellers [30] entnommen. Die Berechnungsgrundlage und die Korrekturfaktoren stammen aus dem Datenblatt [31] eines anderen Herstellers, da beim ersten Lieferant keine explizite Angabe zur Berechnung der Lebensdauer gefunden wurde. Die aufgelisteten Parameter befinden sich in Tabelle 10.7.



Tabelle 10.7: Berechnungsdaten für die Lebensdauerberechnung der Gleitlager.

<b>Gleitlager PBG 151709 F</b>		
Innendurchmesser	$d$	15 mm
Breite	$B$	9 mm
Bundbreite	$B_1$	1 mm
Bundradius	$R$	1 mm
Dynamische Tragzahl	$C$	8300 N
Statische Tragzahl	$C_0$	26000 N
<b>Prozess</b>		
Ablegegeschwindigkeit	$v_A$	20 m/min
Konsolidierungskraft	$F$	1178 N
Außendurchmesser Konsolidierungsrolle	$D$	60 mm

Zunächst wird die projizierte Auflagefläche von 105 mm<sup>2</sup> ermittelt:

$$A = d \cdot (B - B_1 - R). \quad (10.67)$$

Dem folgt die Bestimmung der spezifischen Lagerbelastung (5,61 N/mm<sup>2</sup>):

$$p = \frac{F}{2 \cdot A}. \quad (10.68)$$

Die Gleitgeschwindigkeit von 0,08 m/s ist über die Gleichung:

$$v = v_A \cdot \frac{d}{D}, \quad (10.69)$$

definiert. Mit den bisher gewonnenen Daten lässt sich der  $p v$  Wert mit 0,47 Nm/mm<sup>2</sup>s anschreiben. Die nominelle Lebensdauer von 2772 h lässt sich wie folgt anschreiben:

$$L_h = \frac{500}{p v} \cdot f_p \cdot f_v \cdot f_{pv} \cdot f_{\vartheta} \cdot f_R \cdot f_W \cdot f_A, \quad (10.70)$$

die Werte der Korrekturfaktoren sind in Tabelle 10.8 gelistet.

Tabelle 10.8: Korrekturfaktoren für Gleitlagerberechnung.

$f_p$ für die Last	1
$f_v$ für Gleitgeschwindigkeit	0,9
$f_{pv}$ für die Reibenergie	1
$f_\vartheta$ für die Temperatur	0,9
$f_R$ für die Rautiefe	0,8
$f_W$ für den Werkstoff	2
$f_A$ für den Belastungsfall.	2

#### 10.4 Experimentelle Bestimmung der Schnittkraft

Die Bestimmung der quasistationären Schnittkraft für die Auslegung des Kompaktzylinders wurde auf einer Universalprüfmaschine ZWICK Z010 durchgeführt, der Aufbau ist in Abbildung 10.4 schematisch dargestellt. Das Tape wurde hierbei auf der unteren starren Traverse befestigt. Die Klinge wurde auf der oberen, vertikal beweglichen Traverse montiert. Anschließend wurde die Klinge in Kontakt mit dem Tape gebracht und mit einer Vorkraft von 50 N beaufschlagt. Für den Versuch selber bewegte sich die obere Traverse mit einer Geschwindigkeit von 2 mm/min in Richtung des Tapes. Während des gesamten Versuches wurde der Kraftverlauf aufgezeichnet.

Sobald das Tape vollkommen durchschnitten ist, lässt sich ein Kraftabfall im Verlauf erkennen. Das Referenzmaterial war ein endlosfaserverstärktes unidirektional thermoplastisches Tape aus CF/PA6.6 mit einem Faservolumengehalt von ca. 50 % und den Querschnittsabmessungen 24,5 x 0,31 mm<sup>2</sup>.

Insgesamt wurden fünf Schnittversuche durchgeführt, daraus erfolgte die Ableitung des Mittelwerts für die notwendige Schnittkraft. Die Ergebnisse der einzelnen Versuche sind in Tabelle 10.9 dargestellt.

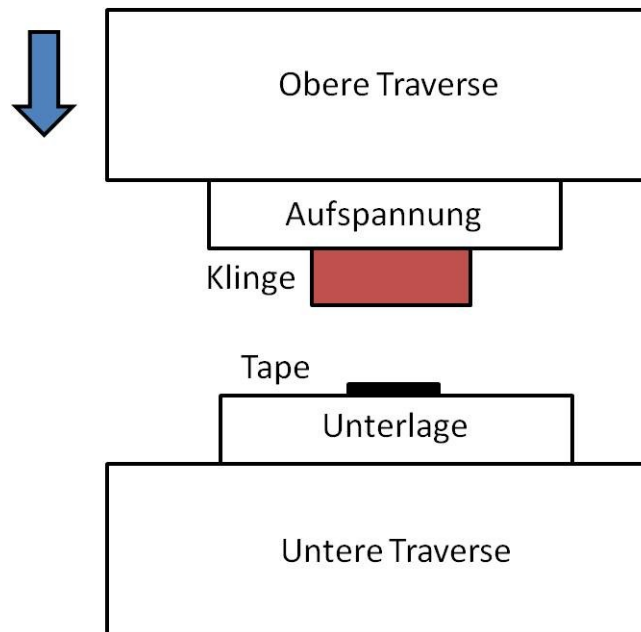


Abbildung 10.4: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für die Bestimmung der Schnittkraft.

Daraus ergibt sich ein Mittelwert von 1452 N. Zusätzlich ist angemerkt, ob ein vollständiger Schnitt über die gesamte Breite des Tapes erreicht werden konnte.

Tabelle 10.9: Ermittelte Schnittkraft zur Durchtrennung des Referenzmaterials.

Versuch	Schnittkraft in N	Vollständiger Schnitt
1	1410	
2	1420	
3	1510	X
4	1450	
5	1470	X
Ø	<b>1452 ± 40</b>	