



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

# **Bachelorarbeit**

Dietmar Schwittay

**Entwicklung eines Steuerungs- und Regelungs-  
konzeptes zur Integration einer Multilayer-Insert-  
Ablegeeinheit in die vorhandene Systemstruktur  
eines Automated Fiber Placement-Prozesses**

**Dietmar Schwittay**

**Entwicklung eines Steuerungs- und  
Regelungskonzeptes zur Integration  
einer Multilayer-Insert-Ablegeeinheit in  
die vorhandene Systemstruktur eines  
Automated Fiber Placement-Prozesses**

Bachelorarbeit eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung

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

in Zusammenarbeit mit:  
Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der  
Leibniz Universität Hannover  
Ottenbecker Damm 12  
21684 Stade

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schulz  
Zweitprüfer: Dr.-Ing. Carsten Schmidt  
Betreuer: Dipl.-Ing. Lukas Groß

Abgabedatum: 13.02.2017

# **Zusammenfassung**

**Dietmar Schwittay**

## **Thema der Bachelorarbeit**

Entwicklung eines Steuerungs- und Regelungskonzeptes zur Integration einer Multilayer-Insert-Ablegeeinheit in die vorhandene Systemstruktur eines Automated Fiber Placement-Prozesses

## **Stichworte**

AFP, Insert, lokale Verstärkung, FVK, Verbindung, Krafteinleitung, CFK, MLI, Regelungs-/ Steuerungstechnik, Automatisierung

## **Kurzzusammenfassung**

Die vorliegende Thesis stellt die Integration eines Multilayer-Insert-Ablegeprozesses in die vorhandene Systemstruktur des Automated Fiber Placement-Prozesses dar. Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der Konzeptionierung der Steuerung und Regelung des Multilayer-Insert-Ablegemodules und deren Einbindung in die vorhandene Systemstruktur. Beginnend mit der Darstellung des Standes der Technik in heutigen Serienprozessen und der verwendeten Technik wird darauf aufbauend der Automated Fiber Placement-Prozess in seinen Grundlagen erläutert. Anschließend werden die Konzeptionierung sowie die praktische Umsetzung einschließlich der verwendeten Sensoren, Servomotoren und Pneumatikventile mit Pneumatikaktoren dargestellt. Durch die Auswertung der Ausgangssignale der Sensoren und Motoren können diese für die Steuerung und Regelung verwendet werden. Abschließend wird auf das Ergebnis des Versuches eingegangen.

**Dietmar Schwittay**

## **Title of the paper**

Development of a control and regulation concept for the integration of a multilayer insert placement unit into the existing system structure of an Automated Fiber Placement process

## **Keywords**

AFP, insert, local reinforcement, fiber composite, CFRP, joint, introduction of force, MLI, control technology, automation

## **Abstract**

The present thesis shows the integration of a multilayer insert deposition process into the existing system structure of the automated fiber placement process. The main focus here is on the conception of the control and regulation of the multilayer insert placement module and their integration into the existing system structure. Starting with the presentation of the state of the art in today's series processes and the technology which is used, the Automated Fiber Placement process is presented in its basic form. Afterwards the conceptual design as well as the practical implementation are explained including the used sensors, servo motors and pneumatics valves with pneumatic actuators. By evaluating the output signals of the sensors and motors, they can be used for control and regulation. Finally, the results of the experiment are discussed.

## **Vorwort**

Bei der vorliegenden Arbeit handelt es sich um die Abschlussthesis meines Bachelorstudiums im Bereich Maschinenbau - Vertiefung Entwicklung und Konstruktion - an der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg. Diese ist in Zusammenarbeit mit der Forschergruppe Hochleistungsproduktion von CFK-Strukturen (im Folgenden HP CFK) im Bereich des Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover am CFK Nord in Stade entstanden.

An dieser Stelle möchte ich meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Lukas Groß für die Unterstützung, die gute Betreuung und Zusammenarbeit sowie für die konstruktive Kritik bedanken. Ebenso gebührt der gesamten Forschergruppe HP CFK mein Dank für die kollegiale und konstruktive Unterstützung und das angenehme Arbeitsklima.

Ebenso gilt mein Dank dem Leiter der Forschergruppe HP CFK Herrn Dr.-Ing. Carsten Schmidt für die Zweitprüfung meiner Bachelorarbeit und Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Schulz für Übernahme der Betreuung seitens der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg und für die Erstprüfung.

Abschließend möchte ich meiner Familie, meiner Freundin und meinen Freunden für die Unterstützung während des Studiums meinen herzlichsten Dank aussprechen.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Vorwort</b> .....	<b>I</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>II</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>VII</b>
<b>Abkürzungen</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	1
1.2 Ziel.....	2
1.3 Aufgabenstellung .....	3
<b>2 Grundlagen Automated Fiber Placement und Multilayer-Insert</b> .....	<b>4</b>
2.1 Automated Fiber Placement (AFP) .....	4
2.2 Multilayer-Insert (MLI) .....	8
2.3 Verwendete Materialien .....	10
2.3.1 Tow .....	10
2.3.2 Metalle .....	13
<b>3 Stand der Technik</b> .....	<b>14</b>
3.1 Automated Fiber Placement im Serienprozess .....	14
3.1.1 Erreichbare Geschwindigkeiten und Genauigkeiten in AFP-Prozessen .....	19
3.1.2 Verschnitt und Ablegegenauigkeit .....	20
3.2 Verbindungstechnik/ -methoden .....	21
3.2.1 Inserts .....	21
3.2.2 Herstellungsverfahren .....	23
3.3 Sprachen und Regler.....	24
3.3.1 Programmiersprachen .....	24
3.3.2 Reglergrundtypen.....	24
3.4 Induktive Näherungsschalter zur Positionierung .....	25
3.5 Ausstattung.....	28
3.5.1 Software .....	28
3.5.2 Hardware.....	28

<b>4</b>	<b>MLI-Ablegeprozess</b> .....	<b>31</b>
4.1	Komponenten der MLI-Ablegeeinheit.....	32
4.2	Steuerungs- und Regelungskonzept.....	36
4.2.1	Anforderungsliste .....	36
4.2.2	Arbeitsphasen .....	37
4.3	Steuerungs- und Regelungskonzept.....	39
4.3.1	Steuerungskonzept .....	39
4.3.2	Regelungskonzept.....	40
4.4	Programmierung.....	41
<b>5</b>	<b>Konstruktion</b> .....	<b>44</b>
5.1	Andruckplatte.....	45
5.2	Rücklaufsperr.....	46
5.3	MLI-Magazin .....	48
5.4	MLI-Trägerfilm .....	51
5.5	Beschichtung der MLI-Bleche .....	52
<b>6</b>	<b>Versuch</b> .....	<b>53</b>
6.1	Grundlagen der Versuchsauswertung.....	53
6.2	Versuchsvorbereitungen .....	55
6.3	Versuchsdurchführung.....	56
6.4	Versuchsauswertung .....	57
<b>7</b>	<b>Fazit und Ausblick</b> .....	<b>60</b>
<b>8</b>	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>62</b>
	<b>Anhang</b> .....	<b>66</b>
A 1:	Institutsvorstellung .....	66
A 2:	Datenblätter .....	67
A 3:	Tabelle Vertrauensniveau .....	80
A 4:	Programmcode (Auszug) .....	81

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Kerosinbedarfsentwicklung pro Passagier auf 100 Kilometer, [Bun12] ...2	
Abbildung 2-1: Beispiel für konturnahes Ablegen einer Lage mit dem AFP-Prozess, [Len15] .....5	5
Abbildung 2-2: Legekopfschema von AFP- und ATL-Ablegeköpfen, [nach Len15] .....5	5
Abbildung 2-3: Beispiel für konturgenaues Ablegen einer Lage mit dem ATL-Prozess, [Len15] .....6	6
Abbildung 2-4: Nutzung von automatisierten Herstellungsverfahren in der Luftfahrtindustrie, [Eva] .....7	7
Abbildung 2-5: Multilayer-Insert im Schnitt, [Gro16] .....8	8
Abbildung 2-6: Vergleich der ertragbaren Zugkraft von MLI und bigHead® in Abhängigkeit des Traversenweges, [HHG16] .....9	9
Abbildung 2-7: schematischer Ablauf eines Hot-Melt-Prozesses, [Len15] ..... 11	11
Abbildung 2-8: In ATL- und AFP-Serienprozessen erreichbare Ablegebreiten, [Len15] 11	11
Abbildung 2-9: schematische Darstellung eines Autoklaven mit Peripherie-geräten, [NMB14] ..... 12	12
Abbildung 2-10: beschichtetes MLI-Blech, 26 x 26 mm, [Ver16] ..... 13	13
Abbildung 3-1: Prozessstufen zur Herstellung eines automatisiert gefertigten Laminats, [nach SWH00] ..... 14	14
Abbildung 3-2: dargestellte AFP-Anlage mit aktiv drehbarem Kern (egnl. mandrel), [nach Gra06] ..... 15	15
Abbildung 3-3: Bahnplanung mit VERICTU® für einen Laminataufbau (blau: An- und Abfahrbewegungen, rot: Legepfade, grün & gelb: abgelegte Tows (Pfadabhängig), [CGT15] ..... 16	16
Abbildung 3-4: Prinzipdarstellung eines AFP-Legekopfes, [nach DCD11] ..... 18	18
Abbildung 3-5: segmentierte Kompaktierungseinheit, [MTH10]..... 18	18
Abbildung 3-6: Prinzipdarstellung Bridging-Effekt, [Ver16] ..... 19	19
Abbildung 3-7: Wichtige Nietformen, <b>a</b> ) Senkkopf-Vollniet für geringe bis mittlere Belastungen, <b>b</b> ) Senkkopf-Blindniet mit einfacher Dornsicherung (nach Huck) für niedrige bis mittlere Belastungen, <b>c</b> ) Senkkopf-Passniet (nach HILOK) für mittlere bis große Belastungen, [Sch07] .....21	21
Abbildung 3-8: verwendete Insertvarianten, [Sch07] .....22	22
Abbildung 3-9: Insert als Gewindeeinsatz (schräg schraffiert) wird direkt in das Laminat verschraubt. In das Innengewinde werden gewählte Befestigungselemente eingeschraubt, [Sch07] .....22	22
Abbildung 3-10: Prinzipdarstellung der Laminataufdickung <b>a</b> ) Insert ins Grundlaminat eingebracht <b>b</b> ) Onsert durch nachträglichen Arbeitsschritt auf das Grundlaminat appliziert, [Sch07] ..... 22	22
Abbildung 3-11: Aufdickung durch Einbringung eines Inserts in das Grundlaminat, [GF14] .....23	23
Abbildung 3-12: schematischer Aufbau induktiver Näherungsschalter, [ST14] .....25	25
Abbildung 3-13: Signalübergänge bei DC-Spannungsbeaufschlagung, [nach ifm03]....26	26
Abbildung 3-14: (1) Spannungsamplitude bei unbedämpftem Näherungsschalter, (2) Änderung der Spannungsamplitude bei bedämpftem Näherungsschalter, [ifm03] .....26	26
Abbildung 3-15: Schaltabstandsbereiche, nach Normmessverfahren der IEC 60947-5-2, a → Kantenlänge des Bleches, d → Durchmesser der aktiven Flanke, [nach ifm03].....27	27

Abbildung 3-16: Anordnung von Linearachse mit Roboter (1) und den beiden vorgelagerten Werkzeugpositionen (2) und (3), CNC-Steuerung (4), [Ver16].....	29
Abbildung 3-17: Achsen und Komponenten des Industrieroboters KR 300 R2500 ultra, [nach KUK16b].....	29
Abbildung 3-18: schematische Darstellung der Kommunikationswege in einer KR C4, [nach KUK16a].....	30
Abbildung 4-1: Prinzipdarstellung des MLI-Ablegeprozessen, <b>a)</b> TCP befindet sich auf der Schnittkante des abgelegten Tows (rot), <b>b)</b> Erfassungsbereich des Laser-Profil Sensor (lila) erfasst Schnittkante, <b>c)</b> MLI-Blech (grün) ist in die erzeugte Lücke abgelegt worden.....	31
Abbildung 4-2: CAD-Darstellung der verbauten MLI-Ablegeeinheit mit Rahmen (1), Träger (2), Lineareinheit mit Antrieb und Getriebe (3), Linearlager (4), Servomotor (5), Schwinge (6), Pneumatik-Flachzylinder (7), Andruckplatte mit integriertem induktiven Näherungsschalter (8), MLI-Förderriemen (9), Träger-filmaufwickler mit Hysteresebremse (10), MLI-Magazin (11), zweitstufiges Synchronriemengetriebe (12), Abzugskante (13), induktiver Näherungs-sensor (14), [Ver16].....	32
Abbildung 4-3: Bereiche der Schleppfehlerüberwachung, [nach Bec16a].....	34
Abbildung 4-4: induktiver Näherungssensor Typs SIEs-Q5B-PS-K-L, Anschlussleitung (1), Gehäuse (2), aktive Flanke (3), [Ver16].....	34
Abbildung 4-5: schematische Darstellung des Funktionsprinzips des MLI-Ablegeprozesses, [Ver16].....	37
Abbildung 4-6: Steuerungskonzept, [Ver16].....	39
Abbildung 4-7: Regelungsprinzip der MLI-Positionierung mit Kennzeichnung des Einflussbereiches der Positionsregelung, Maßangaben in mm, [Ver16].....	41
Abbildung 4-8: Grundstruktur des MLI-Ablege-Programms, [Ver16].....	42
Abbildung 5-1: Übersicht MLI-Ablegestrang, Andruckplatte (1), Förderriemen (2), beschichtetes MLI-Blech (3), Trägerfilm (4), Rücklaufsperr (5), Andruckblech (6), MLI-Magazin (7), Umlenkrolle (8), MLI-Magazinabdeckung (9), Trägerfilmaufwickler mit Hysteresebremse (10), [Ver16].....	44
Abbildung 5-2: Andruckplatte <b>a)</b> ursprüngliche Andruckplatte, Abzugskante (1), Befestigungsschrauben (2), <b>b)</b> modifizierte Abzugskante (3), Freimachung für den Halter des induktiven Näherungsschalters (4), [Ver16].....	45
Abbildung 5-3: induktiver Näherungsschalter in Einbaulage, <b>a)</b> Oberseite Andruckplatte (1), Halter (2), aktive Flanke (3), <b>b)</b> Unterseite Andruckplatte (4), Anzeige-LED (5), Anschlussleitung (6), [Ver16].....	46
Abbildung 5-4: Komponenten der Rücklaufsperr, Rückhaltewinkel (1), Klemm-körper (2), Rampe (3), Distanzscheibe (4), Grundkörper (5), Grundkörper (6), Verbindungselemente (7), [Ver16].....	47
Abbildung 5-5: Prinzipdarstellung Rücklaufsperr, <b>a)</b> Trägerfilm wird in Durchlassrichtung gezogen, <b>b)</b> Trägerfilm wird in Sperrrichtung gezogen, [Ver16].....	47
Abbildung 5-6: Freikörperbild, Rücklaufsperr gesperrt, [Ver16].....	47
Abbildung 5-7: modifiziertes MLI-Magazin, Gehäuse (1), Zentrierungen (2), Lagerung des Federelementes (3), Federelement (4), [Ver16].....	48
Abbildung 5-8: Federelement, Lagerpunkt (1), Federblätter (2), Federlasche (3), [Ver16].....	48



Abbildung 5-9: Definition der Messlängen, [Ver16].....	49
Abbildung 5-10: präparierter Trägerfilm, mäanderförmig gelegter Trägerfilm (1), Druckbereich des Federelements (2), beschichtetes MLI-Blech (3), [Ver16].....	50
Abbildung 5-11: Auszug eines MLI-Blechtes aus Magazin, <b>a</b> ) Magazin (1), Blattfeder (2), Trägerfilm mit MLI-Blechen (3), <b>b</b> ) ausgezogener Trägerfilm (4), Rückhalteblende (5), austretender Trägerfilm (6) und <b>c</b> ) beschichtetes MLI-Blech (7), zurückgehaltener Trägerfilm (8), Verschlussblende mit Aufbäum-fase (9), Leitblech (10), [Ver16] .....	50
Abbildung 5-12: an Rändern mit Sprühkleber beschichtetes Original-MLI-Blech (25,5 x 25,5 mm), [Ver16].....	52
Abbildung 6-1: Normalverteilung von Einzelmesswerten nach der Dichtefunktion $f(x)$ , [Pap11].....	54
Abbildung 6-2: Vertrauensbereich mit oberer und unterer Grenze, [Pap11].....	54
Abbildung 6-3: fixiertes Referenz-MLI-Blech (1), ausgerichteter Erfassungsbereich des Laser-Profil Sensors (blaue Markierungen) (2), abgelegtes MLI-Blech (3), Testlaminat (4), CFK-Tooling (5), [Ver16].....	55
Abbildung 6-4: schematische Trägerfilmbestückung, beispielhaft mit zwei MLI-Blechen (blau) Trägerfilmkontur (grau), alle nicht tolerierten Maße gemäß Toleranzklasse v, [Ver16].....	56
Abbildung 6-5: schematische Messanordnung, Referenz-MLI-Blech (orange), abgelegtes MLI-Blech (schwarz), ,schief abgelegte MLI-Blech (punktiert), Erfassungsbereich des Laser-Profil Sensors (blau), [Ver16].....	56
Abbildung 6-6: beispielhafter Pixelgraph mit Bereichseinteilung, [Ver16].....	57
Abbildung 6-7: Verteilung der Abweichungen von $\Delta L_{MLI}$ in Bezug auf den arithmetischen Mittelwert, [Ver16] .....	58

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1: Übersicht der einzelnen Regelanteile der Reglergrundtypen nach [Lun14], [SAM01], [Pos11], [Koe15a] und [Sva10] .....	24
Tabelle 4-1: Reduktionsfaktoren des gesicherten Schaltabstandes, [FES16] .....	35
Tabelle 4-2: Anforderungsliste, [Ver16] .....	36
Tabelle 5-1: Federkräfte in Abhängigkeit der Federblattanzahl und der Einfederung, [Ver16].....	49
Tabelle 5-2: Gewichtungsfaktoren zur Bewertungskriterien der Trägerfilmauswahl, [Ver16].....	51
Tabelle 5-3: Gewichtungsmatrix der Trägerfilmauswahl, [Ver16] .....	51
Tabelle 0-1: Parameter $t$ in Abhängigkeit von $n$ und $\gamma$ , [Pap11] .....	80

## Abkürzungen

a	Kantenlänge des Referenzbleches	mm
$a_1$	Abstand von vorderer Schnittkante zum MLI-Blech	mm
$a_2$	Abstand von MLI-Blech zur hinteren Schnittkante	mm
ACARE	Rat für Luft- und Raumfahrtforschung in Europa (engl. Advisory Council for Aeronautics Research in Europe)	
AFP	Automated Fiber Placement	
AS	Ablaufsprache	
ATL	Automated Tape Laying	
AWL	Anweisungsliste	
b	berechneter Abstand eines MLI-Blechtes bei vermittelter Ablage zu den Schnittkanten	mm
$b_{MLI}$	Breite / Länge eines MLI-Blechtes	mm
$B_{MLI}$	Lückenbreite im Versuchslaminat	mm
c	detektierte Ist-Länge einer MLI-Ablegelücke	mm
CAD	Computer Aided Design	
CAM	Computer Aided Manufacturing	
CFK	Kohlenfaserverstärkter Kunststoff	
CNC	Computerized Numerical Control	
CSP	cyclic synchronous position	
d	Durchmesser der aktiven Flanke eines induktiven Näherungsschalters	mm
D	Differentialanteil eines Relggers	
DC	Direct Current (Gleichspannung)	$V_{DC}$
DOC	gelöster organischer Kohlenstoff (engl. dissolved organic carbon)	

## Abkürzungen

---

e	Euler'sche Zahl	2,71828
e(t)	Regeldifferenz	
e <sub>bl</sub>	bleibende Regeldifferenz	
Erw. Mod.	Erweiterungsmodule	
f <sub>redu</sub>	Reduktionsfaktoren des gesicherten Schaltab-standes	
f(x)	Funktion von x	
F	Forderung	
F <sub>i</sub>	berechnete Federkraft	N
FBS	Funktionsbausteinsprache	
FUP	Funktionsplan	
FVB	Faserverbundbauteil	
FVK	Faserverstärkter Kunststoff	
g	Erdbeschleunigung	9,81 $\frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
G <sub>i</sub>	abgelesener Anzeigewert der Waage	kg
G-Code	grundlegende Maschinsprache	
H	Lichte Innenhöhe des MLI-Magazins	mm
HP CFK	Hochleistungsproduktion von CFK-Strukturen	
I	Integralanteil eines Reglers	
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission	
IFW	Institut für Fertigungstechnik und Werkzeug-maschinen	
INC	Inkrement	
inPosY	Ist-Position des AFP-Legekopfes in y-Koordinatenrichtung	mm
IR	Infrarot	

## Abkürzungen

---

$K_{DR}$	Differenzierbeiwert eines Reglers	
$K_{IR}$	Integrierbeiwert eines Reglers	
$K_{PR}$	Proportionalbeiwert eines Reglers	
KOP	Kontaktplan	
$\Delta L_{MLI}$	Abweichung der Lückenweite	mm
$L_i$	Länge der gestauchten Blattfeder	mm
$L_{MLI,Mittel}$	arithmetischer Mittelwert der gemessenen Lückenweiten	mm
$L_{MLI}$	Abstand zwischen Referenz-MLI-Blech und abgelegten MLI-Blech	mm
LC	Bestandteile (Induktivität und Kapazität) in einem Parallel-LC-Schwingkreis	
M-Befehl	Zusatzfunktionen in grundlegender Maschinensprache	
MLI	Multilayer-Insert	
n	Anzahl der Federblätter	
n	Anzahl der Messwerte	
$n_{an}$	Antriebsseitige Drehzahl	$\text{min}^{-1}$
NC	Numerical Control	
P	Wahrscheinlichkeit	
P	Proportionalanteil eines Reglers	
PLC	Programmable Logic Controller	s. SPS
PNP	Sensorbeschaltungsart, Signalausgabe (Ein) auf positive Flanke	
PVC	Polyvinylchlorid	
s	Standardabweichung um arithmetischen Mittelwert	

## Abkürzungen

---

$s_{\Delta L_{MLI}}$	Standardabweichung Abweichung der Lücken-weite	mm
$s_a$	Arbeitsschaltabstand	mm
$s_n$	Bemessungsabstand	mm
$s_r$	Realschaltabstand	mm
$s_u$	Nuttschaltabstand	mm
$s_{ges}$	gesicherter Schaltabstand	mm
$s_{\bar{x}}$	Standardabweichung um unbekanntem wahren Mittelwert	
SF	Skalierungsfaktor des CSP-Modus	
Shore A	Härtekennzahl für gummielastische Polymere und Elastomere	
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung	
ST	Strukturierter Text	
T	Teilung des Synchronriemen	mm
t	Parameter zur Berechnung von Messunsicherheit	
t	Blechstärke	mm
TCP	Tool Center Point (Berührungspunkt von Andruckrolle zum Werkzeug)	
UD	unidirektional	
$v_{Kopf}$	Bewegungsgeschwindigkeit des Legekopfes bei der MLI-Blech-Ablage	$\frac{mm}{s}$
$v_{relativ}$	Relativgeschwindigkeit zwischen MLI-Förderriemen und Legekopf	$\frac{mm}{s}$

## Abkürzungen

---

W	Wunsch	
x	Gemessene Länge der MLI-Lücke	mm
$\bar{x}$	arithmetischer Mittelwert	
$x_i$	Einzelmesswert	
$\Delta x$	Messunsicherheit	
XAE	eXtended Automation Engineering	
$y_D(t)$	Stellgröße eines Differentialanteils	
$y_I(t)$	Stellgröße eines Integralanteils	
$\Delta y$	Toleranzwert der Lückenabweichung	mm
$y_P(t)$	Stellgröße eines Proportionalanteils	
$z_1$	Anzahl der Zähne der angetriebenen Riemenscheibe	
$z_2$	Anzahl der Zähne der getriebenen Riemenscheibe	
$z_3$	Anzahl der Riemenrolle des Förderriemens	
$\gamma$	Vertrauensniveau	
$\mu$	wahrer unbekannter Mittelwert	

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) nehmen in der zivilen Luftfahrt-industrie eine immer stärkere Rolle bzgl. Konstruktion, Auslegung und Fertigung hochbelasteter Strukturelemente ein. Ziel der Verwendung von CFK-Strukturele-menten ist es, das Gesamtgewicht moderner Flugzeugtypen wie Airbus A350 und Boeing 787 Dreamliner zu senken, um die Emissionswerte und den Kraftstoff-verbrauch zu reduzieren (Abbildung 1-1) [NKe12] und [Vog11]. Zur Erstellung von CFK-Strukturelementen, bspw. Flügelschalen und Rumpfsegmente, finden heutzutage überwiegend die Prozesse Automated Fiber Placement (AFP) und Automated Tape Laying (ATL) Anwendung. Die leichten und steifen CFK-Strukturelemente müssen mit anderen Strukturelementen, die oftmals aus Aluminiumlegierungen bestehen, mechanisch der Art verbunden werden, dass diese Verbindungen einerseits belastungs-, andererseits materialgerecht ausge-führt werden. Heutige Verbindungsmethoden mit Inserts wie bigHead®-Varianten und spezielle Nietformen sind zwar belastungsgerecht ausgelegt, weisen allerdings im Aspekt der materialgerechten Verbindung von CFK-Strukturen mehrere Defizite auf. So sind hier Schwächungen des ausgehärteten Laminats durch mechanische Nachbearbeitung (z.B. Bohren/Reiben) bzw. die Aufdickung des Laminataufbaus im Bereich des Inserts und eine verhältnismäßig kleine Kontaktfläche zur umliegenden Faserverbundstruktur zu nennen. Aufbauend auf diesen Defiziten ist ein Lösungs-ansatz entwickelt worden, der auf einem schichtweisen Aufbau von Lasteinleitungs-stellen, sogenannte Multilayer-Inserts (MLI), basiert. Dieser Ansatz der belastungs- und materialgerechten Lasteinleitungselemente wird unter anderem am Standort des Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen Hannover (IFW) in Stade am CFK Nord im Rahmen des Forschungsprojektes Multilayer-Inserts untersucht. Aufgrund des speziellen Aufbaus von MLIs können sowohl belastungs- als auch materialgerechte Verbindungen zwischen Strukturelementen verschiedener Werkstoffe realisiert werden. Diese Eigenschaften kommen vor allem in dünnwandigen CFK-Strukturen zum Tragen. Um diese neuartige Insert-Technologie wirtschaftlich in der Serienfertigung von CFK-Strukturelementen



mittels AFP nutzen zu können, ist die Automatisierung und Integration in bestehende Fertigungsprozesse unabdingbar [HHG16].

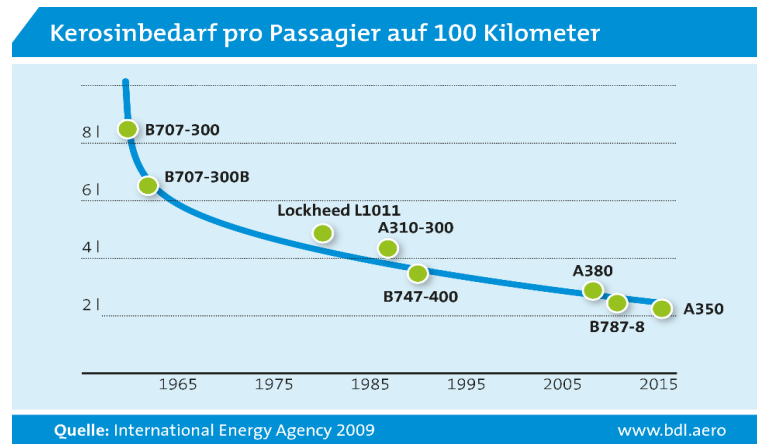


Abbildung 1-1: Kerosinbedarfsentwicklung pro Passagier auf 100 Kilometer, [Bun12]

## 1.2 Ziel

In der vorliegenden Bachelorarbeit werden der Entwurf und die Umsetzung eines Steuerungs- und Regelungskonzeptes als Ziel gesetzt. Am Ende der Thesis soll ein automatisierter MLI-Ablegeprozess unter Laborbedingungen im Rahmen des vorhandenen AFP-Prozesses am Standort CFK-Nord in Stade möglich sein. Die in dieser Thesis dargestellten Ergebnisse bilden die Grundlage für weitere Optimierungen der Regel- und Steuerungsparameter.

## 1.3 Aufgabenstellung



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

*Hamburg University of Applied Sciences  
Department Maschinenbau und Produktion*

# Aufgabenstellung

für die Bachelorthesis

von Herrn **Dietmar Schwittay**

Matrikel-Nummer: 2149589

**Thema:** **Entwicklung eines Steuerungs- und Regelungskonzeptes zur Integration einer Multilayer-Insert-Ablegeeinheit in die vorhandene Systemstruktur eines Automated Fiber Placement-Prozesses**

**Schwerpunkte:**

- Entwicklung einer Ablegesteuerung und –Regelung
  - Ansteuerung von Servomotoren, Pneumatikaktoren und Sensorik
  - Steuerungsaufbau (Hardware) und Programmierung
- Integration induktiver Näherungsschalter zur definierten Vorpositionierung der Multilayer-Insert-Bleche in der Ablegeeinheit
- Integration der Ablegesteuerung in die bestehende Systemstruktur
  - Versuchsaufbau und –Parameter festlegen
- Validierung der Ablagesteuerung
  - Versuchsdurchführung und Auswertung

25.10.16

Datum

G. Sen

Erstprüfer/in

## 2 Grundlagen Automated Fiber Placement und Multilayer-Insert

In diesem Kapitel werden die Grundlagen des automatischen Ablegens von Prepreg und der Insert-Technologie zur Orientierung kurz umrissen und im weiteren Verlauf der Bachelorthesis eingehender betrachtet. Das automatisierte Ablegen von unidirektionalen Prepregs (vorimprägniertes Faserhalbzeug) stellt die heutige Schlüsseltechnologie zur Herstellung großflächiger und großvolumiger Bauteile aus Faserverbundwerkstoffen im Bereich der Luft- und Raumfahrt dar [Len15]. Das Ziel der Automatisierung ist es, die bei der manuellen Herstellung bestehenden Nachteile zu eliminieren. Nachteile der manuellen Herstellung sind u.a. eine stark beschränkte Bauteilgröße, Qualitätsschwankungen, Lege- und Ausrichtungsfehler sowie eine geringe Wiederholgenauigkeit und hohe Folgekosten durch Ausschussteile bzw. aufwendige Reparaturen. Dabei haben das AFP- und das ATL-Verfahren aufgrund konstruktiver Merkmale der Legeköpfe verschiedene Anwendungsbereiche. So werden mit dem ATL großflächige Bauteile mit einfachen Oberflächenprofilen wie schwache Krümmungen hergestellt, z.B. Flügelschalen, Beplankungen und Panels für Leitwerke. Bauteile mit komplizierteren Oberflächenprofilen wie doppelten Krümmungsverläufen, Rampen und ähnlichen Bereichen werden mit dem AFP hergestellt. Als Beispiel sind Rumpfsegmente wie Heckkonen zu nennen [Len15].

### 2.1 Automated Fiber Placement (AFP)

Das Grundprinzip von Fiber Placement-Prozessen besteht in dem automatisierten Ablegen von Prepregs entlang programmierter Werkzeugbahnen. Im Bereich luft- und raumfahrttechnischer Anwendungen werden hochbeanspruchbare Lamine benötigt. Hier haben sich aufgrund ihrer Eigenschaften duroplastische Matrixwerkstoffe und Kohlenstofffasern als Verstärkungsfasern etabliert [NMB14] und [NL10]. In heutigen AFP-Serienprozessen verarbeitete Matrixwerkstoffe sind überwiegend Duroplaste. Diese sind zur Warmaushärtung bei ca. 180 C° in einem Autoklaven konzipiert. Duroplastische Matrixwerkstoffe basieren in der Regel auf Epoxidharzen, wobei in jüngerer Vergangenheit häufiger thermoplastische Matrixwerkstoffe Verwendung finden. Beim AFP-Prozess werden sogenannte Slittapes (im Weiteren Tows genannt) verarbeitet. Hierbei handelt es sich um schmale unidirektionale Prepregstreifen mit einer Breite von 3,175 mm ( $\frac{1}{8}$ "), 6,35 mm ( $\frac{1}{4}$ "), bzw. 12,7 mm ( $\frac{1}{2}$ "). Die Breitenfertigungstoleranz beträgt

$\pm 0,1$  mm. Sie stellen eine Sonderform von Prepreg dar [NL10]. Der Komplexitätsgrad der AFP-Prozesssteuerung ist sehr hoch, da bis zu 32 Tows simultan abgelegt bzw. individuell gesteuert und geschnitten werden können. So können konturnahe Laminatrohlinge hergestellt werden. In Abbildung 2-1 ist dies schematisch dargestellt.

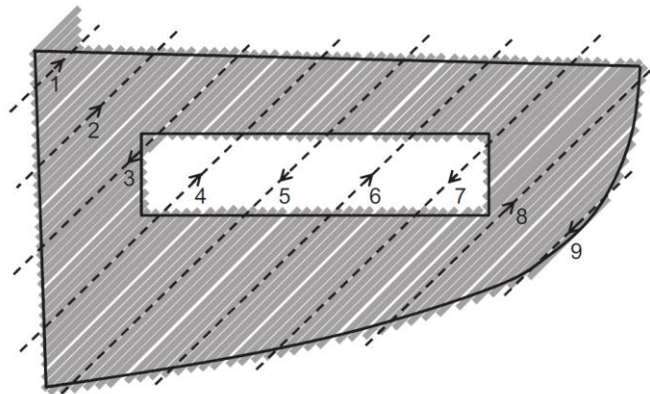


Abbildung 2-1: Beispiel für konturnahes Ablegen einer Lage mit dem AFP-Prozess, [Len15]

Auffallend ist dabei die minimale Ablegelänge wie sie oben links in der Ablegebahn 1 erkennbar ist [Len15]. Die minimale Ablegelänge ist von der Führungslänge zwischen der Schneideinheit und der Andruckrolle (Kompaktierung) abhängig (Abbildung 2-2). Sie beträgt sich zurzeit ungefähr 90 mm bis 140 mm.

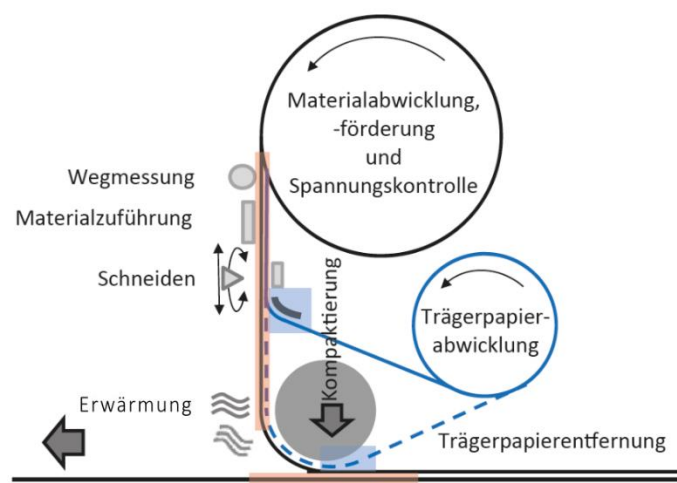


Abbildung 2-2: Legekopfschema von AFP- und ATL-Ablegeköpfen, [nach Len15]

AFP ist die Kombination und Weiterentwicklung der Verfahren Filamentwickeln und ATL. Diese Kombination findet ihre Begründung darin, dass die prozessbedingten Einschränkungen beim Filamentwickeln bzw. dem ATL-Prozess, wie mögliche Faserorientierung und Ablegen auf konkaven und komplexen Werkzeugen, eliminiert werden sollten [Ban01].

Die Prozesse AFP und ATL unterscheiden sich hinsichtlich der Breiten des zu verarbeitenden Prepregs. Beim ATL betragen die möglichen Breiten der Tapes 75 mm, 150 mm bzw. 300 mm. Im Gegensatz zum AFP können bei ATL konturgenaue Zuschnitte erfolgen (Abbildung 2-3). Das konturgenaue Schneiden der einzelnen Tapes wird durch den Aufbau der Schneideinheiten in ATL-Legeköpfen realisiert [Len15].

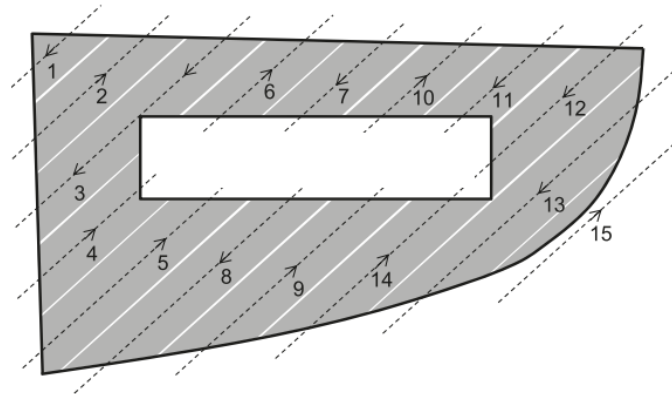


Abbildung 2-3: Beispiel für konturgenaues Ablegen einer Lage mit dem ATL-Prozess, [Len15]

Heutzutage werden Faktoren, die AFP-Prozess verlangsamen (Schneidvorgänge der Tows) durch Weiterentwicklungen minimiert. Bisher wurde bei Schneidvorgängen die Towförderung verlangsamt bzw. gestoppt. Durch Neuentwicklungen wie die des Herstellers MTorres aus dem Jahr 2011 ist es möglich, dass die Tows bei voller Ablegegeschwindigkeit geschnitten werden können und somit die Verzögerung durch die Blockierung des Förderkanals entfällt [Tor11a]. Ein weiterer Faktor für die Weiterentwicklung des AFP-Prozesses ist die Entwicklung und Herstellung neuer Flugzeugtypen. Hierbei werden verstärkt automatisierte Verarbeitungsprozesse eingesetzt, dies wird in Abbildung 2-4 verdeutlicht. Die anfängliche Nutzung automatisierter Faserverbundherstellung erfolgte im militärischen Bereich der Luftfahrtindustrie mit der Entwicklung des

Tarnkappenbombers B-2 Spirit bei Northrop Grumman und der F-117 Nighthawk von Lockheed. Bei nachfolgenden Flugzeugentwicklungen wird der AFP-Prozess verwendet bzw. eine Kombination aus dem ATL- und AFP-Verfahren (Abbildung 2-4).

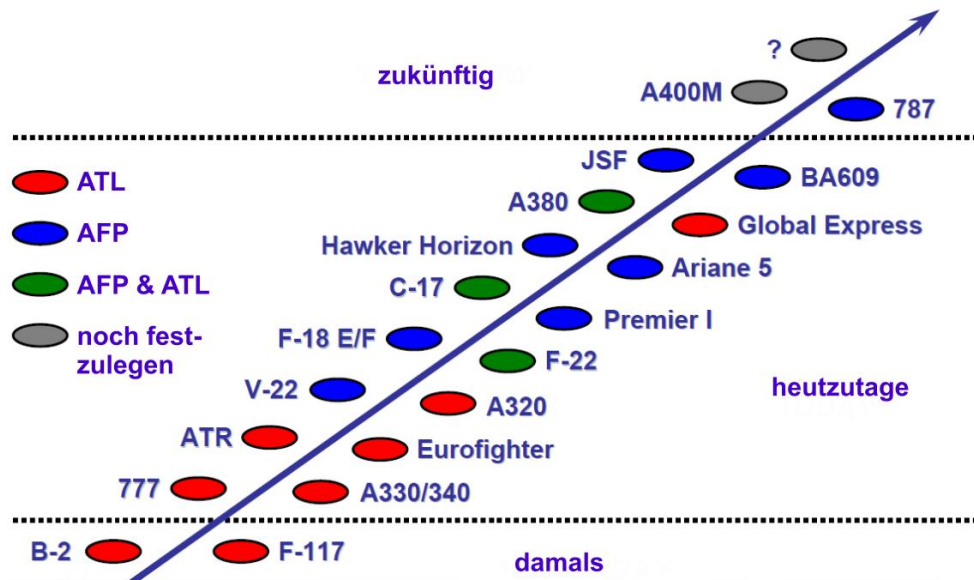


Abbildung 2-4: Nutzung von automatisierten Herstellungsverfahren in der Luftfahrtindustrie, [Eva]

Im weiteren Verlauf der vorliegenden Bachelorarbeit wird der Betrachtungsschwerpunkt auf den AFP-Prozess gelegt, da dieser von der Forschergruppe HP CFK am CFK Nord für Versuche und Untersuchungen genutzt wird.

## 2.2 Multilayer-Insert (MLI)

Ziel des Multilayer-Insert-Systems ist es, die Kontaktfläche im Übergang von Laminat zum metallischen Werkstoff der Inserts stark zu vergrößern (Abbildung 2-5), um diese Übergänge fasergerecht zu gestalten. Dasselbe Prinzip wurde von der Boeing Company zum Patent angemeldet, welches im März 2013 veröffentlicht worden ist [GG12]. Aufgrund des vergrößerten Grenzflächenbereiches kann die Krafteinleitung in die umgebende Laminatstruktur homogener als bei bisherigen Insertvarianten erfolgen.

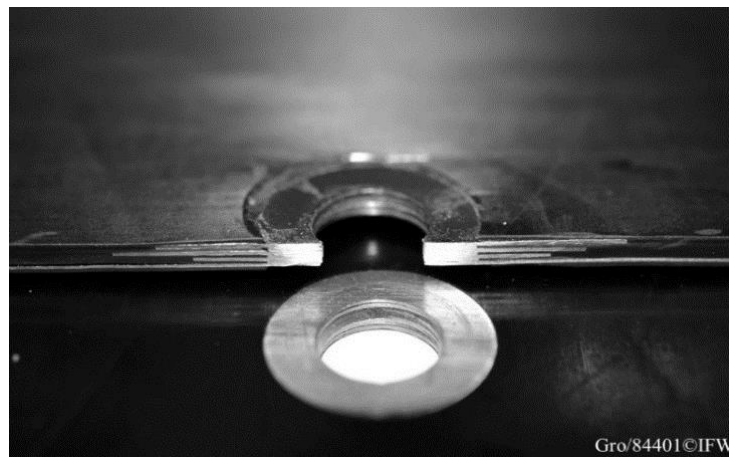


Abbildung 2-5: Multilayer-Insert im Schnitt, [Gro16]

Aufgrund des vergrößerten Grenzflächenbereiches resultieren geringere Lastspitzen für einzelne Schichten des Laminats. Ein Multilayer-Insert wird schichtweise aufgebaut, wodurch der schädigende Einfluss nachträglich eingebrachter Verbindungselemente, wie Bolzenverbindungen, vermieden wird. Durch den schichtweisen Aufbau besteht die Möglichkeit die Applizierung einzelner MLI-Bleche in den einzelnen Lagen im Rahmen der AFP-Prozesse zu automatisieren. Um bei einem automatisierten Herstellungsprozess die Anhaftung der MLI-Bleche untereinander und auf den bereits abgelegten Tows gewährleisten zu können, sind die MLI-Bleche auf ihrer Ober- und Unterseite mit einem speziellem Klebefilm beschichtet, welcher nach der thermischen Aushärtung in einem Autoklav eine stoffschlüssige Verbindung erzeugt. Diese besteht sowohl zwischen den einzelnen MLI-Blechen untereinander als auch im Bereich der Kontaktfläche zum Laminat. In Abbildung 2-6 werden MLIs aus Aluminium und Edelstahl und ein serienprozessüblicher bigHead® (Abbildung 3-8) hinsichtlich der ertragbaren Zugkraft in Abhängigkeit des Traversenweges gegenübergestellt. Deutlich zu

erkennen ist, dass ein MLI aus Edelstahl einen kontinuierlichen Kraftaufnahmeverlauf ohne Einbrüche besitzt. Dieses Verhalten ist auf die vergrößerte Kontaktfläche und die damit einhergehende verbesserte Krafteinleitung zurückzuführen. Im Maximum des Verlaufes erträgt es eine um ca. 40 % größere Zugkraft als ein bigHead®. Der bigHead® weist gegenüber dem MLI aus Aluminium eine um 36% höhere Zugkraftaufnahme auf. Aber hinsichtlich des Gewichtskraftverhältnisses ist die MLI-Variante dem bigHead® überlegen. [HHG16]

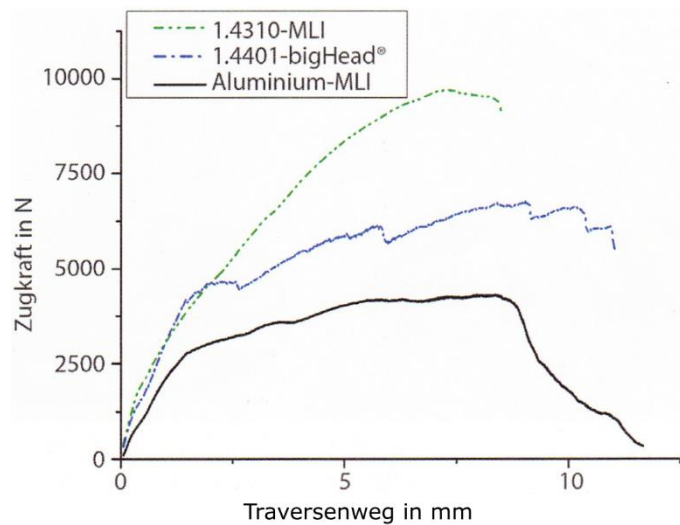


Abbildung 2-6: Vergleich der ertragbaren Zugkraft von MLI und bigHead® in Abhängigkeit des Traversenweges, [HHG16]

Eine Weiterentwicklung des MLI-Systems erfolgt durch eine definierte Perforation im Randbereich einzelner MLI-Bleche. Hierdurch wird ein Übergangsbereich geschaffen, der ein kontinuierliches Angleichen der Werkstoffeigenschaften ermöglicht [FH11].



## 2.3 Verwendete Materialien

In diesem Kapitel werden die von der Forschergruppe HP CFK im AFP-Prozess verwendeten Materialien aufgeführt und erläutert. Die Materialien werden heutzutage in den Serienprozessen der Flugzeugbauer Airbus und Boeing verwendet und stellen somit in diesem Bereich den Stand der Technik dar. Eine Ausnahme bildet das Material der Multilayer-Inserts, da diese Technologie noch im Forschungsstadium befindlich ist. Inserts, die bereits in Serienprozessen etabliert sind, werden in Absatz 3.2 vorgestellt.

### 2.3.1 Tow

Heutige Tow werden in ihrer Breite und Höhe mit engen Toleranzen hergestellt. Bei ihnen handelt es sich um die zweite Generation von Pregreg. Diese hohe Präzision bei der Herstellung der Tows ist notwendig, damit die im AFP-Prozess geforderte Wiederholgenauigkeit und Bauteilqualität erreicht werden kann [Len15]. Tows werden mit dem Hot-Melt-Verfahren hergestellt. Dieses basiert in seinen Grundzügen auf zwei Verfahrensschritten. Erster Arbeitsschritt ist die Beschichtung eines silikonierten Trägerpapiers mit Matrixwerkstoff. Aufgrund der sehr hohen Viskosität der zu vermischenden Matrixwerkstoffkomponenten auf Epoxidharzbasis werden diese in Extrudern homogenisiert und in einem System aus beheizten Kalanderwalzen vermischt. Anschließend wird ein dünner Film aus Matrixwerkstoff kontinuierlich auf das Trägerpapier aufgetragen. Der so präparierte Trägerfilm wird auf Spulen gewickelt und der Kühlkette ( $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) bis zur Weiterverarbeitung zugeführt, um die Aushärtereaktion signifikant zu reduzieren. Der nachfolgende zweite Herstellungsabschnitt des Hot-Melt-Verfahrens ist in Abbildung 2-7 schematisch dargestellt. Die Fasern werden in der Prä-Imprägnierzone durch Kamm- und Spreizstangenelemente aufgefächert in die Imprägnierzone eingeführt. In dieser wird der auf das Trägerpapier aufgebrachte Harzfilm durch einen Heiztisch erwärmt, wodurch die Viskosität reduziert wird. Hierdurch ist es möglich die unidirektionalen Endlosfasern mit dem Matrixwerkstoff mit Hilfe von Kompaktierungsrollen zu imprägnieren, anschließend werden die imprägnierten Endlosfasern abgekühlt und der Post-Imprägnierstrecke zugeführt. In dieser wird das Prepreg beidseitig mit einem Trägerfilm zum Schutz vor Verschmutzungen sowie Anhaften an sich selbst versehen und auf Spindeln aufgewickelt. So

vorbereitet werden die Spindeln erneut der Kühlkette zugeführt und bis zur Verarbeitung im AFP-Prozess gelagert.

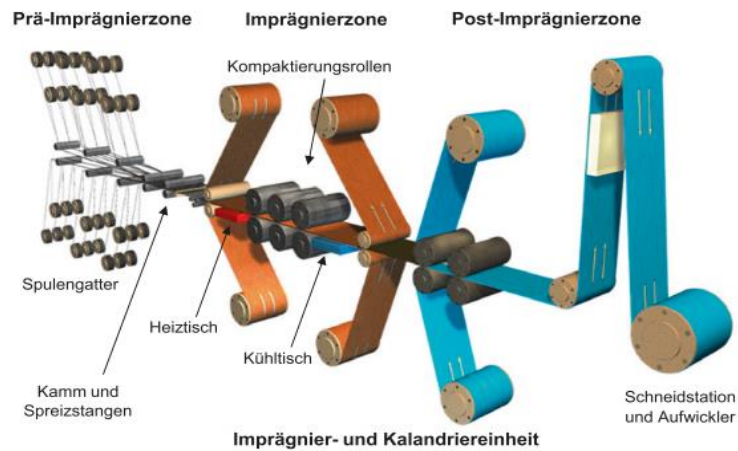


Abbildung 2-7: schematischer Ablauf eines Hot-Melt-Prozesses, [Len15]

Ein weiteres Verfahren zur Prepregherstellung ist das Imprägnieren mit lösemittelverdünnten Matrixwerkstoffsystemen (Solvent-Verfahren). Hierbei werden die Fasern durch ein Bad gezogen, welches das in organischen Lösemittel verdünnte Matrixharzsystem enthält. Zur Herstellung von Tows wird unidirektionales Prepreg mit einer Breite von 600 mm oder größerer hergestellt, das sogenannte Parent-Tape. Dieses wird anschließend im Herstellungsprozess durch nachgeschaltete Rollmesser in die vom Kunden geforderte Breite mit einer Toleranz von  $\pm 0,1$  mm geschnitten, einseitig mit Trennfolie bedeckt und aufgewickelt. Übliche Breiten der Tows sind  $1/8$ " ,  $1/4$ " und  $1/2$ ". Zurzeit erreichbare Ablegebreiten in AFP-Serienprozessen sind unter in Abbildung 2-8 vergleichend zu denen der ATL-Serienprozesse dargestellt.

Gesamte Ablegebreite gängiger Ablegekonfigurationen (mm)							
Tape- oder Towbreite	Anzahl von Tapes oder Tows						
	1	2	4	8	16	24	32
ATL	75 mm	75 mm	150 mm	300 mm			
	150 mm	150 mm	300 mm	600 mm			
	300 mm	300 mm	600 mm				
AFP	$1/8$ "	3,175 mm	6,35 mm	12,7 mm	25,4 mm	50,8 mm	76,2 mm
	$1/4$ "	6,35 mm	12,7 mm	25,4 mm	50,8 mm	101,6 mm	152,4 mm
	$1/2$ "	12,7 mm	25,4 mm	50,8 mm	101,6 mm	203,2 mm	304,8 mm

Abbildung 2-8: In ATL- und AFP-Serienprozessen erreichbare Ablegebreiten, [Len15]

Verwendete Matrixwerkstoffe werden dahingehend modifiziert, dass sie hochviskos eingestellt sind und somit nach der Faserimprägnierung nicht von den Fasern ablaufen können, sondern diese bedecken bzw. umhüllen [NL10]. Die Matrixsysteme bestehen in der Regel aus den drei Komponenten Harz, Härter mit Katalysatoren und Zusatzstoffen. Eine Vermengung und somit der Start der chemischen Aushärtereaktion der Komponenten erfolgt vor der Herstellung des zu verarbeitenden Prepregs. Um die chemische Reaktion des Matrixwerkstoffes zu verlangsamen wird das imprägnierte Faserhalbzeug bei  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  gelagert. Hierdurch kann eine Haltbarkeit/ Verarbeitbarkeit von maximal 12 Monaten erzielt werden. Sobald das Prepreg der Kühlkette entnommen wird, kann es in Serienprozessen innerhalb von zehn Tagen bei vollwertiger Klebrigkeit (engl. Tack) verarbeitet werden. Bei einer Umgebungstemperatur von ca.  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$  können Tows 42 Tage lang verarbeitet werden, wobei die Klebrigkeit abnimmt und es somit nicht mehr für jeden Prozess eingesetzt werden kann. Die Aushärtungstemperatur allgemein von Prepregs ist abhängig von dem zur Imprägnierung verwendeten Harzsystem. Die Warmaushärtung erfolgt in Autoklaven [Cyt12]. In Abbildung 2-9 ist der grundlegende Aufbau eines Autoklaven mit seiner zum Betrieb notwendigen Peripherie dargestellt. Hierbei handelt es sich neben Sicherheits- und Überwachungseinheiten um Systeme zur Druckbeaufschlagung des Autoklaven sowie zur Evakuierung der präparierten Bauteile im Autoklaven.

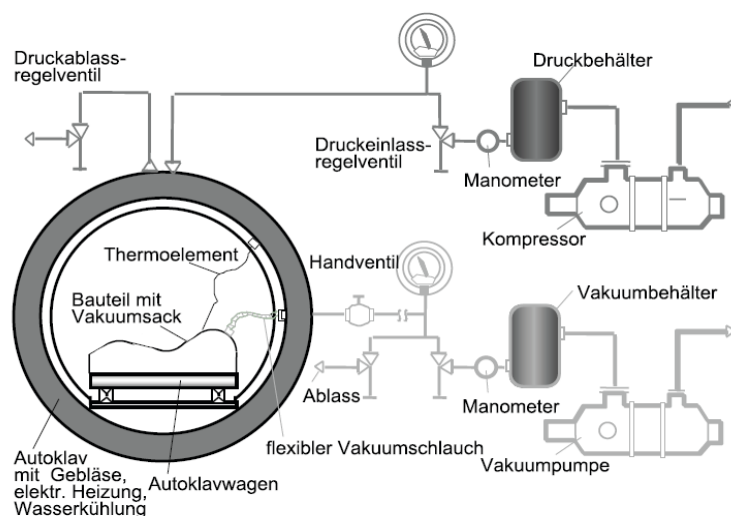


Abbildung 2-9: schematische Darstellung eines Autoklaven mit Peripherie-geräten, [NMB14]

### 2.3.2 Metalle

Die von der Forschergruppe verwendeten Multilayer-Insert-Bleche zum Aufbau der MLIs werden aus dem Edelstahl 1.4310 gefertigt. Hierbei handelt es sich um einen nichtrostenden austenitischen Chrom-Nickel-Stahl mit der Bezeichnung X10CrNi18 – 8. Dieser Werkstoff zeichnet sich durch eine gute Korrosionsbeständigkeit und eine ausgezeichnete Schweißeignung aus. Für laufende und nachfolgende Festigkeitsversuche ist die Schweißeignung ein wichtiger Parameter, um nach Kundenwünschen gestaltete Anbindungselemente, z.B. Muttern, Bolzen, etc., zur mechanischen Verbindung mit anderen Bauteilen herstellen zu können [Deu13]. Die Stärke des verwendeten Edelstahlbleches beträgt 0,1 mm zuzüglich der Stärke der Klebefilme auf beiden Seiten der Bleche. Maßgebend für dieses Maß ist die Stärke der Tows, welche im nicht ausgehärteten Zustand 0,135 mm beträgt. Die Stärke nimmt aufgrund der Verdichtung durch Vakuum und Überdruck im Autoklaven ab, so dass die MLI-Bleche und die einzelnen CFK-Lagen nach der Aushärtung annähernd dieselbe Stärke aufweisen. Die Beschichtung der MLI-Bleche wird ein spezieller Klebefilm sein, der von dem Unternehmen 3M entwickelt worden ist.

Für erste Ablegeversuche am CFK Nord werden die MLI-Bleche beidseitig mit doppelseitigem Klebeband beschichtet (Abbildung 2-10). Grund hierfür ist das bessere Anhaftungsverhalten, um unter optimalen Bedingungen den Ablegeprozess verstehen zu können. Eine Beschichtung mit dem 3M-Klebefilm erfolgt eventuell für Versuchslamine, die im Autoklaven ausgehärtet werden.



Abbildung 2-10: beschichtetes MLI-Blech, 26 x 26 mm, [Ver16]

### 3 Stand der Technik

Das vorliegende Kapitel gibt einen Überblick über den Stand der Technik in der Serienproduktion von CFK-Verbundbauteilen. Hauptaugenmerk seitens des Legeprozesses wird auf das Automated Fiber Placement gelegt, da dieser Prozess maßgebend die verfahrenstechnischen Grundlagen für die Ausarbeitung dieser Bachelorarbeit vorgibt. Weiterführend werden die aktuellen Verarbeitungsprozesse von mechanischen Verbindungselementen, im späteren Verlauf Inserts genannt, und deren Auswirkungen auf die Bauteileigenschaften dargestellt. Abschließend werden Aspekte der Steuerungs- und Regelungstechnik erläutert und versucht hieraus den Stand der Technik abzuleiten.

#### 3.1 Automated Fiber Placement im Serienprozess

Im Rahmen von AFP-Prozessen ist es möglich ausschließlich UD-Prepreg zu verarbeiten [Len15]. Zur Erstellung von Bauteilen mittels automatisierter Herstellungsprozesse wie AFP benötigte Prozessstufen werden in Abbildung 3-1 dargestellt. Ein solcher Prozess kann in drei Hauptgruppen eingeteilt werden. Diese sind die Erstellung der benötigten Datensätze mit der zugehörigen Arbeitsvorbereitung, der Legeprozess an sich und die nachfolgende Warmaushärtung mit abschließender Qualitätskontrolle.

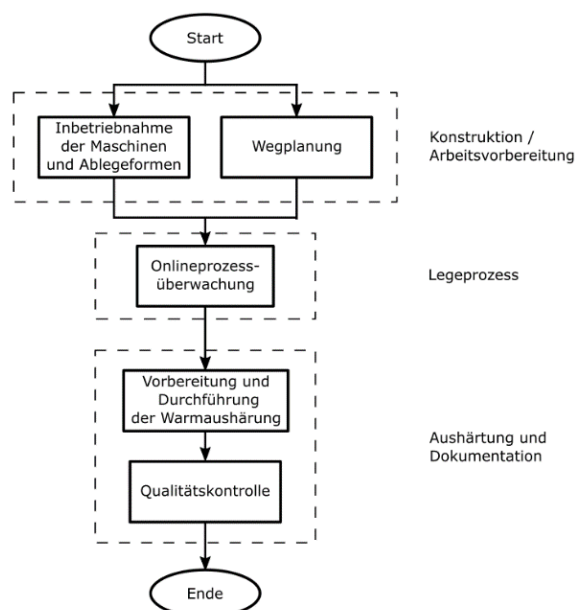
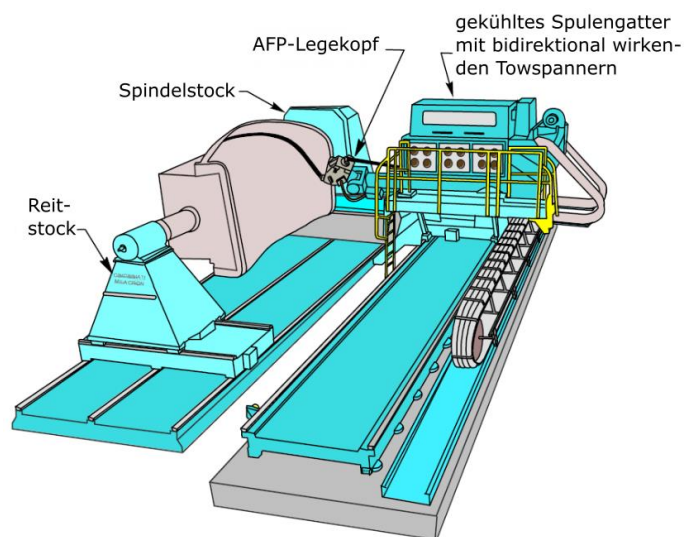


Abbildung 3-1: Prozessstufen zur Herstellung eines automatisiert gefertigten Laminats, [nach SWH00]

Zum Betrachtungszeitpunkt von AFP-Serienprozessen finden hauptsächlich zwei Prozessvarianten Anwendung. Zum einen ist es der Laminataufbau auf einem drehbar gelagerten Kern (engl. mandrel, Abbildung 3-2), wobei die Rotationsachse meist horizontal ausgerichtet ist, zum anderen der Laminataufbau mit einem fixen Formwerkzeug (engl. tooling). Bei letztgenannter Variante bestehen aufgrund verschiedener Anforderungen an AFP-Legemaschinen zwei Formwerkzeugorientierungen, die Horizontale und die Vertikale [Len15]. AFP wird in der Regel angewendet, wenn die zu erstellende Bauteilgeometrie einen bestimmten Komplexitätsgrad übersteigt, die durch ATL nicht bzw. nicht fehlerfrei erstellt werden kann. Dieser Komplexitätsgrad kann durch mehrfach gekrümmte Oberflächenverläufe, Ausformung von Rampen in Bezug auf Übergänge und Steigungen und variabler Stärke des aufzubauenden Laminats vorgegeben werden.



Quelle: Composites ASM Handbook

Abbildung 3-2: dargestellte AFP-Anlage mit aktiv drehbarem Kern (engl. mandrel), [nach Gra06]

Beispielhaft sind für solche Bauteilgeometrien Tragflächenschalen und mehrfach gekrümmte Rumpfpanele zu nennen. Um Abweichungen der ausgehärteten Bauteile zur Soll-Geometrie der Konstruktion durch Verzug oder ähnliche Effekte bei der Aushärtung vorzubeugen, werden die Ablegewerkzeuge so gefertigt, dass diese geometrischen Abweichungen bereits berücksichtigt werden. Auf solchen Ablegewerkzeugen hergestellte Bauteile besitzen keine bzw. nur sehr geringe geometrische Abweichungen zur Soll-Geometrie. Die zur automatisierten Ablage der Tows benötigte Bahnplanung mit den Bewegungspfaden des Legekopfes

werden mit kommerziellen Softwarepaketen wie VERICUT® von CGTech, die für gängige CAD-Systeme, z.B. CATIA V5® von Dassault Systems, verfügbar sind, auf Basis der Konstruktions-CAD-Daten der Ablegewerkzeuge und der zu fertigenden Bauteile erstellt. Abschließend werden diese erstellten Pfade der Bahnplanung mit einem herstellerspezifischen Postprozessor in G-Code (grundlegende Maschinsprache) umgewandelt. Dieser wird anschließend im Serienprozess von der CNC-Steuerung der Legemaschine abgearbeitet (Abbildung 3-3).

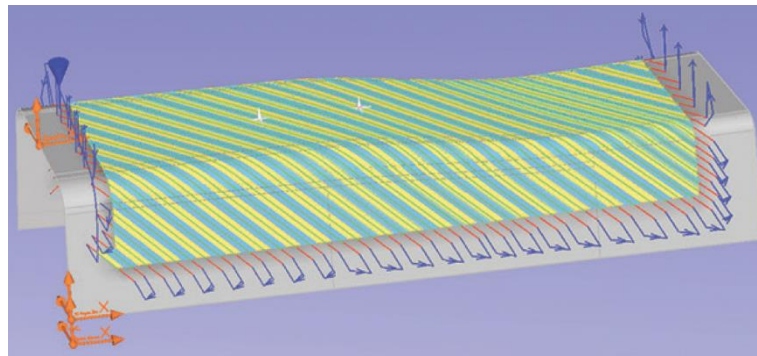


Abbildung 3-3: Bahnplanung mit VERICUT® für einen Laminataufbau (blau: An- und Abfahrbewegungen, rot: Legepfade, grün & gelb: abgelegte Tows (Pfadabhängig), [CGT15])

An Hand der Bahnplanung und bekannter Maschinengeometrie kann eine Simulation mit virtueller Maschinenumgebung generiert werden. Auf Grundlage aller berechneten Daten werden sogenannte Legepläne für jede abzulegende Schicht erstellt. Diese Pläne enthalten alle notwendigen Informationen (bspw. Material, Faserorientierung, Kontur, Verschnitt, etc.) zur Identifikation und eindeutigen Ablage der entsprechenden Laminatschicht. Das Tow beeinflusst ebenfalls mit seinen Eigenschaften wie Klebrigkeit, Imprägnierung, Eigensteifigkeit, Stabilität und seiner Drapierfähigkeit die Ablege- und Bauteilqualität. Als wichtiger Faktor ist die präzise Towherstellung bzgl. Towbreite zu erwähnen, damit das Entstehen von Lücken (engl. Gap), Überlappungen (engl. Overlap) und Verunreinigungen des Ablegekopfes durch vom Tow abgeschabte Filamente minimiert werden.

Marktübliche Maschinenarchitekturen, wie z.B. Portal- und Balkenbauart, besitzen mit Ausnahme der roboterbasierten Anlagen drei Translationsachsen X, Y & Z und drei Rotationachsen A, B & C. Bei der roboterbasierten Architektur werden in der Regel bis zu sechs Achsen simultan verfahren, um eine geradlinige Translationsbewegung entlang der kartesischen Koordinaten zu generieren. Im



Allgemeinen werden sechs Achsen benötigt, damit der Ablegekopf permanent orthogonal zur Oberfläche des Ablegeworkzeuges ausgerichtet werden kann [FR12]. Die zu wählende Maschinenkonfiguration wird maßgebend von der herzustellenden Bauteilgeometrie (z.B. Oberflächenverläufe), Größe und weiteren Faktoren bestimmt. Hier sind beispielhaft die geforderte Wiederhol- und Ablegegenauigkeiten, aber auch Ablegegeschwindigkeit, der vorhandene Platz und die geplanten Kosten aufzuführen.

In der Regel können alle am Markt befindlichen Maschinenkonfigurationen in die Bereiche Materialbevorratung, Towführung und Ablegekopf untergliedert werden [Len15]. Für eine hohe Prozessstabilität bei Ablegen der Tows ist die Kontrolle der Zugspannung, die auf die Tows wirkt, entscheidend. Diese Spannungsregelung erfolgt für jedes Tow separat. Die zur Erwärmung benötigte Energie, um die Klebrigkeit der gekühlten Tows kurz vor dem Ablegen zu erhöhen, wird bei duroplastischen Matrixwerkstoffen durch Konvektion mittels Heißluft oder Infrarot-Strahler bereitgestellt. Beide Systeme haben verfahrensbedingte Vor- und Nachteile. IR-Strahler können genau und schnell geregelt werden. Heißluftsysteme hingegen besitzen eine hohe Wärmeleistung, welche aber nicht präzise regelbar ist. Für die beiden genannten Systeme gibt es verschiedene Möglichkeiten der lokalen Energieeinbringung. Die Erwärmung des zu drapierenden Materials kann direkt erfolgen, wodurch die Klebrigkeit und die Drapierbarkeit größer ist als bei einer indirekten Aktivierung durch die Erwärmung der Oberfläche (Werkzeugoberfläche oder bereits abgelegte Tows) auf die abgelegt werden soll [Len15]. Am Legekopfsystem der Forschergruppe HP CFK werden IR-Strahler zur Aktivierung der bereits abgelegten Tows verwendet. Um eine ausreichend große und reproduzierbare Anpressung der abgelegten Tows auf der Oberfläche des Ablegeworkzeuges (erste Laminatlage) bzw. des bereits abgelegten Tows (ab der zweiten Laminatlage) zu erzielen, werden sogenannte Kompaktierungsrollen verwendet. Eine schematische Darstellung eines AFP-Legekopfes ist in Abbildung 2-2 und Abbildung 3-4 abgebildet. Der Grundaufbau eines AFP-Legekopfes besteht aus Förder-, Führungs-, Schneid-, Heiz- und Kompaktierungseinheit.



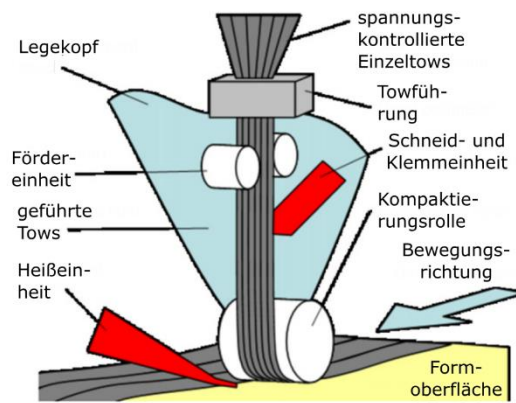


Abbildung 3-4: Prinzipdarstellung eines AFP-Legekopfes, [nach DCD11]

Entscheidend für die Qualität der Anhaftung der Tows ist neben der Erhöhung der Klebrigkeit die Güte der Kompaktierung. Diese wird maßgebend von den Abmaßen der Kompaktierungsrollen (Durchmesser und Breite), deren Auslegung und durch die der elastischen Beschichtung bestimmt. Die marktüblichen Kompaktierungsrollen bestehen entweder aus einem metallischen Kern mit elastischer Beschichtung. Der Rollenkernel besitzt zur Regulierung des Kompaktierungsdruckes pneumatisch betriebene Aktoren. Ein anderer Ansatz zur Kompensation ist eine große Schichtstärke der elastischen Rollenbeschichtung, die ausschließlich durch die elastische Verformung die Tows optimal kompaktiert [MTH10]. Die Qualität der Kompaktierung wird maßgeblich durch den aufgetragenen Anpressdruck, der Oberflächengeometrie des verwendeten Ablegewerkzeuges und der Material- und Geometrieauslegung der Kompaktierungsrollen selbst beeinflusst. Die direkte Wechselwirkung zwischen Komplexitätsgrad der Werkzeugoberfläche und der Kompaktierungsrollenbreite wird durch eine Segmentierung der Rolle entsprechend der Towanzahl reduziert. Oberflächenkrümmungen sowohl durch unterschiedliche Einfederungen der Segmentrollen als auch durch die Verformung der elastischen Beschichtung kompensiert werden (Abbildung 3-5).

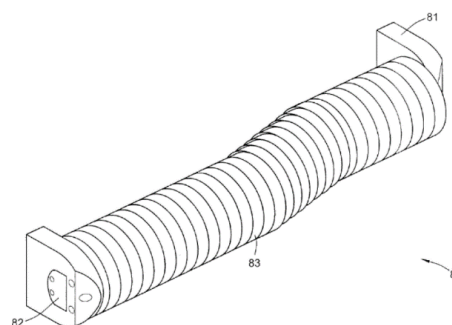


Abbildung 3-5: segmentierte Kompaktierungseinheit, [MTH10]

Der Rollendurchmesser wird von den Krümmungen der Werkzeugoberfläche und somit von der Bauteilgeometrie bestimmt, z.B. Übergänge an Rampen. Bei zu kleinen Krümmungsradien oder ungenügend angepassten Kompaktierungsrollen kann die Kompaktierung ggf. nicht ausreichend stark ausgeprägt und somit fehlerhaft sein. Es treten Ablösungsfehler auf, sogenannte Bridging-Effekte (Abbildung 3-6). [Len15]

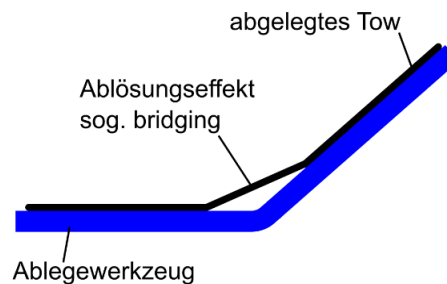


Abbildung 3-6: Prinzipdarstellung Bridging-Effekt, [Ver16]

### 3.1.1 Erreichbare Geschwindigkeiten und Genauigkeiten in AFP-Prozessen

Für moderne AFP-Anlagen wird eine Ablegegeschwindigkeit von  $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  angegeben, wobei die geschwindigkeitsreduzierenden Faktoren vielfältig sein können. Bei dem Schneiden der Tows hat sich als industrieller Standard eine Schnittlinie  $90^\circ$  zur Förderrichtung etabliert. Im Bereich des Schneidprinzips ist das Guillotine-Prinzip mit stoßender oder ziehender Klinge dominierend. Dieses hat den Nachteil, dass die zu fördernden Tows abgebremst werden müssen und somit die Ablegegeschwindigkeit auf ungefähr  $0,2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  bis  $0,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  reduziert wird [Len15]. Um diese Einschränkung zu eliminieren ist von der Firma MTorres ein Schneidesystem entwickelt worden, welches in der Lage ist ohne Reduzierung der Ablegegeschwindigkeit (engl. „cut/add on the fly“) die Tows quer zur Förderrichtung zu schneiden. Ermöglicht wird dies dadurch, dass die Klingen in radialen Öffnungen der Mantelflächen von rotierenden zylindrischen Klingenhaltern gelagert sind. Die Rotationsgeschwindigkeit der Zylinder wird geregelt, wodurch die Tows nicht über die Zylinder gezogen werden, sondern ein Abwälzvorgang zwischen Tows und Zylindern vorliegt. Dies verbessert sowohl die Genauigkeit der ausgeführten Schnitte als auch die resultierenden Schnittkanten [Tor11b].

Das von der Firma MTorres patentierte Schnittsystem mit rotierenden Klingenhaltern ist dahingehend weiterentwickelt worden, dass die Schnittwinkel

durch einen aufwändigen Verstellmechanismus variabel zur Förderrichtung eingestellt werden können [Tor11a]. Die Firma MTorres hat auf ihrem Patent basierend eine Anlagentechnologie entwickelt mit der Tows mit einer Geschwindigkeit von 1,41 m/s abgelegt, geschnitten und erneut abgelegt werden können ohne die Fördergeschwindigkeit zu reduzieren [IIM06].

### 3.1.2 Verschnitt und Ablegegenauigkeit

Der AFP-Prozess hebt sich hinsichtlich des Verschnittes deutlich von dem ATL-Prozess ab. Der Verschnitt liegt beim AFP im Bereich von 3 % bis 5 % [NL10] und ist somit um Faktor acht bis zehn kleiner als bei bisherigen ATL-PRozessen (30 % – 40 %) [Slo08].

Die Ablegegenauigkeit im AFP-Prozess wird von diversen Faktoren beeinflusst. So sind unter anderem die Positionierungs- und Wiederholgenauigkeit der Maschinen an sich, der Legekopfsysteme mit allen mechanischen Komponenten, sowie die Fertigung der Ablegewerkzeuge zu nennen. Ebenso beeinflussen die Steuerung und Regelung des gesamten Ablegeprozesses neben der Towherstellung die Ablegegenauigkeit hinsichtlich maßhaltiger Zuschnitte, Lücken und Überlappungen. Faktoren wie Temperaturen (Umgebung, Tow und Ablegewerkzeug) und die relative Luftfeuchtigkeit haben einen Einfluss auf die erreichbare Genauigkeit. Lücken zwischen den abgelegten Tows werden bis zu einer Breite von 0,5 mm bei einer Ablegebreite von acht Tows in heutigen Serienprozessen von den Flugzeugherstellern akzeptiert. Ein Ausschusskriterium hingegen stellen Überlappungen in der Erstellung der einzelnen Lagen für das gesamte Bauteil dar [LCD15]. Daher müssen diese in zeit- und kostenintensiven Inspektionen jeder Laminatlage ggf. ausgebessert werden [Maa15]. Über erreichbare Genauigkeiten in Serienprozessen konnten keine spezifischen Angaben gefunden werden [Len15].

### 3.2 Verbindungstechnik/ -methoden

Dieses Kapitel stellt die in industriellen Serienprozessen des Flugzeugbaus verwendeten Verbindungstechniken und –methoden vor und bildet den Stand der Technik ab.

#### 3.2.1 Inserts

Verbindungen zwischen Metall- und FVK-Strukturen sowie zwischen FVK-Strukturen basieren auf stoff-, form- und kraftschlüssigen Verbindungsarten. Primäre Fügemethode von Strukturen jeglicher Art in der Luftfahrtindustrie ist die Verwendung von kraft- und formschlüssigen Verbindungselementen, wie Niete (Abbildung 3-7) [WHK99].

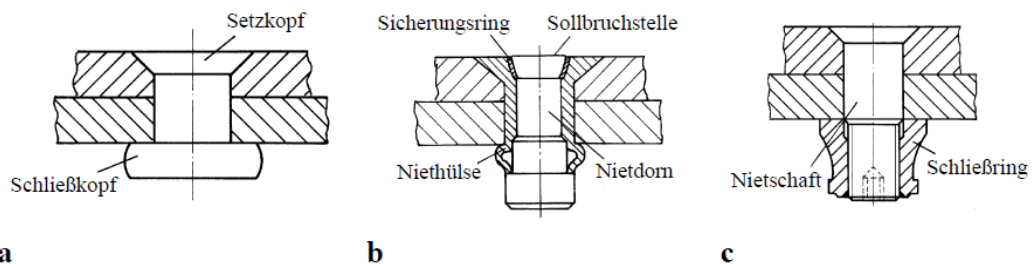


Abbildung 3-7: Wichtige Nietformen, **a)** Senkkopf-Vollniet für geringe bis mittlere Belastungen, **b)** Senkkopf-Blindniet mit einfacher Dornsicherung (nach Huck) für niedrige bis mittlere Belastungen, **c)** Senkkopf-Passniet (nach HILOK) für mittlere bis große Belastungen, [Sch07]

Diese Möglichkeit der Kraftübertragung stammt aus dem Bereich des Fügens metallischer Strukturen und ist auf das Fügen von obengenannten Materialpaarungen übertragen worden. In DIN 8593-5:2003-09 ist das Fügen basierend auf der Verwendung von Nietverfahren („Fügen durch Umformen“) definiert dargestellt. In DIN 8593-0:2000-09 ist die Begrifflichkeit des Fügens wie folgt definiert: „Das auf Dauer angelegte Verbinden oder sonstige Zusammenbringen von zwei oder mehr Werkstücken geometrisch bestimmter Form oder von ebensolchen Werkstücken mit formlosem Stoff. Dabei wird jeweils der Zusammenhalt örtlich geschaffen und im Ganzen vermehrt“ [DIN03]. Dieses Fügeverfahren ist in seiner heutigen Anwendungsbreite noch nicht optimal auf die Anforderungen von FVK-Strukturen, speziell CFK, eingestellt. So weisen FVK-Elemente eine hohe Sensibilität bzgl. Schädigung durch Kerben im Bereich der Lochlaibung auf [NL10]. Bei jeglicher kraft- und formschlüssigen Verbindung von

Metall und FVK stellt die Kontaktkorrosion aufgrund der elektrochemischen Potentialreihe der zu fügenden Werkstoffe (bspw. Aluminium und CFK, o.ä.) ein Problem dar. Eine stoffschlüssige Verbindung ausschließlich basierend auf Klebungen hat sich im Bereich der Automobilindustrie bereits als Stand der Technik durchgesetzt, in der Luftfahrtindustrie hingegen noch nicht [Mül11]. Die Gestaltung von mechanischen Anbindungspunkten mittels Inserts (Abbildung 3-8) birgt in Serienprozessen noch nachteilig auf das Kräfteinleitungsverhalten aus.

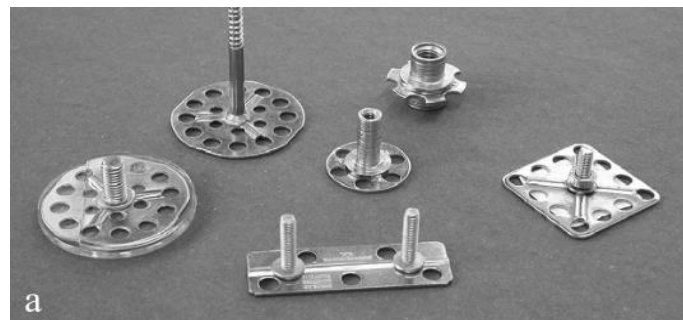


Abbildung 3-8: verwendete Insertvarianten, [Sch07]

Nachteilig an heutigen Insertsystemen ist, dass sie eine Schädigung des Faserlaufes durch nachträgliche mechanische Bearbeitung des Insertsitzes zur Folge haben (Abbildung 3-9) bzw. die Laminatstruktur aufdicken (Abbildung 3-10 und Abbildung 3-11) bzw.

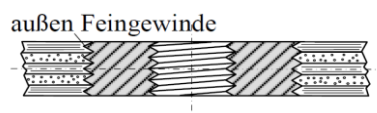


Abbildung 3-9: Insert als Gewindeeinsatz (schräg schraffiert) wird direkt in das Laminat verschraubt. In das Innengewinde werden gewählte Befestigungselemente eingeschraubt, [Sch07]

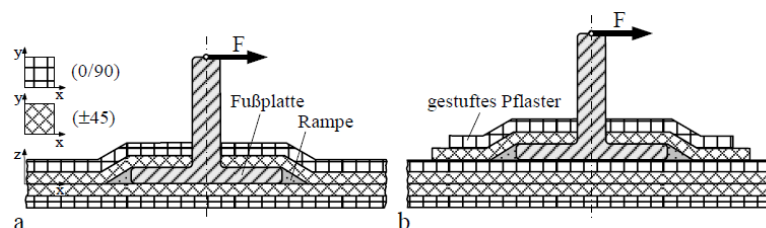


Abbildung 3-10: Prinzipdarstellung der Laminataufdickung **a**) Insert ins Grundlaminat eingebracht **b**) Onsert durch nachträglichen Arbeitsschritt auf das Grundlaminat appliziert, [Sch07]



Abbildung 3-11: Aufdickung durch Einbringung eines Inserts in das Grundlaminat, [GF14]

### 3.2.2 Herstellungsverfahren

Die zurzeit in Serienprozessen eingesetzten Inserts werden manuell mit maschineller Unterstützung von Facharbeitern während des Laminataufbaus in dessen Struktur eingebracht oder nachträglich in das ausgehärtete Bauteil. Eine Auswahl marktüblicher Inserts ist in Abbildung 3-8 dargestellt. Die Inserts selbst werden mittels verschiedener umformender, spanender und fügender Fertigungsverfahren hergestellt. Hauptsächlich bestehen in Serienprozessen verwendete Inserts nach Angaben des Herstellers bigHead® aus den Werkstoffen 1.4401 (V4A) und 1.4301 (V2A). Diese sind nichtrostende austenitische Stähle. Andere Stähle mit ähnlichen mechanischen Kennwerten, die aber keine ausgeprägte Korrosionsbeständigkeit aufweisen, werden ebenfalls als Werkstoff für handelsübliche Inserts verwendet. Um eine ausreichend hohe Korrosionsbeständigkeit dieser Stähle zu gewährleisten, werden solche Inserts nach der mechanischen Fertigung mit einem galvanischen Korrosionsschutz behandelt.

### 3.3 Sprachen und Regler

Im Rahmen dieses Kapitels wird auf die Programmiersprachen der IEC 61131-3:2014-06 und der Grundregelanteile eingegangen

#### 3.3.1 Programmiersprachen

In der IEC 61131-3:2014-06 sind fünf Programmiersprachen aufgeführt, die zur Programmierung von SPS-Anlagen genutzt werden können. Diese Sprachen können in zwei grundlegende Bereiche unterteilt werden. Zum einen sind es die graphisch aufgebauten Programmiersprachen, wie Kontaktplan (KOP), Funktionsbausteinsprache (FBS), auch Funktionsplan (FUP) genannt, und Ablaufsprache (AS). Die andere Gruppe wird durch die textbasierte Sprachen Strukturierter Text (ST) und Anweisungsliste (AWL) gebildet [Koe15b], [DIN14]. Bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung wird ausschließlich die Methode des Strukturierten Textes verwendet.

#### 3.3.2 Reglergrundtypen

Im Rahmen regelungstechnischer Anwendungen bestehen Gesamtsysteme im Allgemeinen aus Regler, Regelstrecke und Rückführung. Zur Realisierung von Reglern stehen drei Grundregelanteile (proportional, integral und differential) zur Verfügung. Regler können durch die Kombination dieser gebildet werden. In Tabelle 3-1 sind diese Anteile übersichtlich erläutert.

Tabelle 3-1: Übersicht der einzelnen Regelanteile der Reglergrundtypen nach [Lun14], [SAM01], [Pos11], [Koe15a] und [Sva10]

An- teil	Gl. des Reglers	Wirkprinzip	Verhalten	$e_{bl}$	Regelung
P	$y_P(t) = K_{PR} \cdot e(t)$	reagiert auf momen- tanen Ist-Werte von $e(t)$	je größer $e(t)$ , desto größer der Einfluss von $y_P(t)$	$\neq 0$	schnelle Anfangs- reaktion
I	$y_I(t) = K_{IR} \cdot \int e(t)dt$	reagiert auf vergan- gene Ist-Werte von $e(t)$	$y_I(t)$ wächst an bis $e_{bl} = 0$	0	langsame An- fangsreaktion
D	$y_D(t) = K_{DR} \cdot \frac{de(t)}{dt}$	reagiert auf zukünf- tige Ist-Werte von $e(t)$	$y_D(t)$ ist umso größer, je schnel- ler sich $e(t)$ ändert	$\neq 0$	keine Reaktion, wenn $e(t)$ kon- stant

### 3.4 Induktive Näherungsschalter zur Positionierung

Im Rahmen dieses Kapitels werden der prinzipielle Aufbau (Abbildung 3-12) und die Funktionsweise von induktiven Näherungsschaltern erläutert.

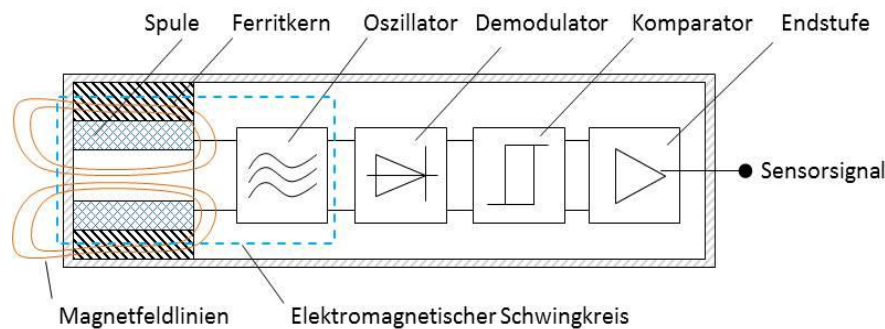


Abbildung 3-12: schematischer Aufbau induktiver Näherungsschalter, [ST14]

Hauptgruppen sind ein elektromagnetischer Schwingkreis, eine Auswertestufe und eine Endstufe. Der elektromagnetische Schwingkreis wird durch eine in einem Ferritkern eingebettete Spule und einen Oszillator gebildet. Der Oszillator, bestehend aus einem Parallel-LC-Schwingkreis, erregt bei einer Beaufschlagung mit Gleichspannung die Spule und es wird ein hochfrequentes elektromagnetisches Wechselfeld erzeugt. Dieses tritt in einem definierten Bereich, sog. aktive Flanke, aus dem Ferritkern/ Sensorgehäuse aus und bildet so den Erfassungsbereich des Sensors. In der durch Demodulator und Komparator aufgebauten Auswertestufe wird die hochfrequente Schwingung der Spule in ein auswertbares Signal gewandelt und kann vom Komparator verarbeitet werden. Dieser gibt ein binäres Signal aus, welches durch die Endstufe verstärkt wird. Der Vorteil von binären Signalen ist die eindeutige Zustandserkennung. Binäre Signale, die durch mechanische Endlagenschalter erzeugt werden, können ein Kontaktprellen aufweisen (Abbildung 3-13, b). Verhindert wird ein solches Verhalten und die damit verlängerte Reaktionszeit bis zu einem eindeutigen Ergebnis durch die berührungslose Arbeitsweise (Abbildung 3-13, c)).



Signalübergänge von 0 nach 1 im Gleichspannungsfall

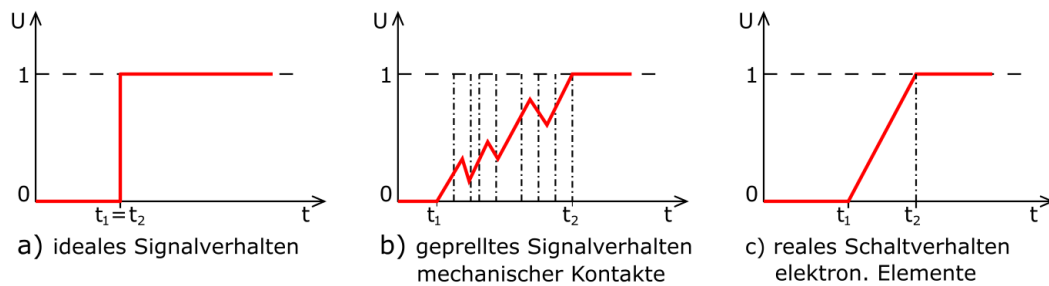


Abbildung 3-13: Signalübergänge bei DC-Spannungsbeaufschlagung, [nach ifm03]

Wird dem austretenden Magnetfeld in seinem räumlich begrenzten Wirkungsbereich durch einen metallischen Gegenstand Energie aufgrund von induzierten Wirbelströmen entzogen, wird der Sensor bedämpft. In diesem Zustand wird die Amplitude der Schwingung und somit die Spannung im Schwingkreis verändert. Registriert der Komparator einen Abfall der erzeugten Spannungsamplitude unter einen Grenzwert (Abbildung 3-14), schaltet er zur Endstufe frei und dort wird das Signal verstärkt.

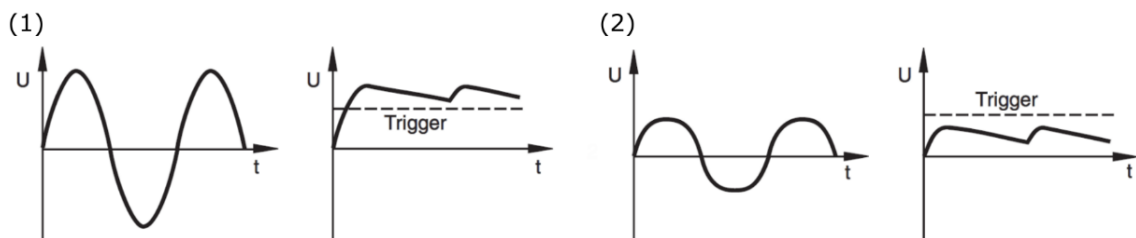


Abbildung 3-14: (1) Spannungsamplitude bei unbedämpftem Näherungsschalter, (2) Änderung der Spannungsamplitude bei bedämpftem Näherungsschalter, [ifm03]

Der ausgegebene Schaltzustand gibt an, ob sich ein Gegenstand im Wirkungsbereich befindet oder nicht. Eine Aussage bzgl. der Position kann durch einen einfachen Näherungsschalter nicht getroffen werden. Der in Abbildung 3-15 dargestellte Bereich ergibt sich bei einer Referenzdetektierung nach dem Normmessverfahren der IEC 60947-5-2. Der Bemessungsabstand  $s_n$  berücksichtigt keine beeinträchtigenden Einflüsse und dient nur zur Klassifizierung. Mit dem Realschaltabstand  $s_r$  werden fertigungsbedingte Exemplarstreuungen berücksichtigt. Um beeinträchtigende Faktoren wie Spannungs-, Temperatur-schwankungen und

verschiedene Einsatzumgebung zu berücksichtigen, wird der Nutzschaftabstand  $s_{u,min}$  und  $s_{u,max}$  ermittelt. Der Schaltabstand bei dem ein Objekt detektiert werden muss, nennt man Arbeitsschaftabstand  $s_a$  [ifm03].

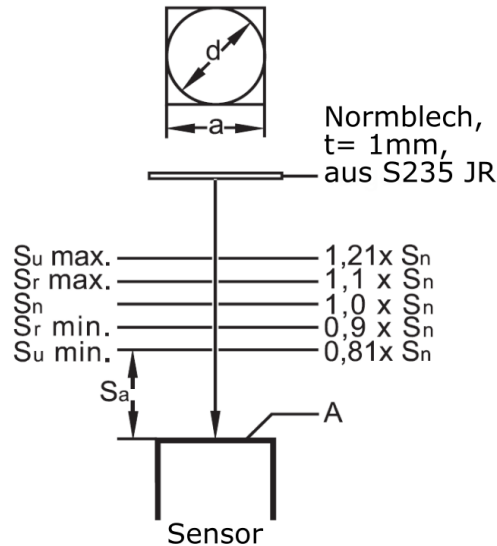


Abbildung 3-15: Schaltabstandsbereiche, nach Normmessverfahren der IEC 60947-5-2,  $a$  → Kantenlänge des Bleches,  $d$  → Durchmesser der aktiven Flanke, [nach ifm03]

Durch induktive Näherungsschalter können nur elektrisch leitfähige Materialien detektiert werden, wobei entsprechend des zu detektierenden Materials ggf. ein Korrekturfaktor (Tabelle 4-1, S.35) berücksichtigt werden muss. Dieser Faktor bestimmt die Verkleinerung des gesicherten Schaltabstands  $s_{ges}$  gemäß Formel 3-1.

$$s_{ges} = s_n \cdot f_{redu}$$

3-1

### **3.5 Ausstattung**

In diesem Kapitel wird die für die Bearbeitung der Aufgabenstellung verwendete Hard- und Software kurz erläutert.

#### **3.5.1 Software**

Für die Integration, Programmierung und Konfiguration der verwendeten Steuer- und Schaltklemmen sowie der Servomotoren der Firma Beckhoff in die vorhandene Programm- und Systemstruktur des Legesystems wird das Programm TwinCat3® in der Umgebung von Microsoft Visual Studio® verwendet. Somit können Echtzeitsysteme im Bereich der Anlagensteuerung und Robotik basierend auf SPS-, NC- und CNC-Steuerung programmiert. Die verwendete Arbeitsumgebungseinbindung von Beckhoff heißt XAE (eXtended Automation Engineering). Mit dieser können mehrere Objekte in einem Projekt mit verschiedenen Methoden der IEC 61131-3 parallel entwickelt werden [Bec16c]. Die Echtzeitkommunikation zwischen Steuerungsrechner und verwendeten Klemmen wird über Ethernet-Schnittstellen ermöglicht [KUK16c].

#### **3.5.2 Hardware**

Am Standort der Forschergruppe HP CFK am CFK Nord in Stade steht für Forschungszwecke ein Industrieroboter des Typs KR300 R2500 ultra der Firma KUKA Roboter GmbH zur Verfügung. Dieser verfügt über sechs Achsen, die simultan verfahren werden können. Die maximale Reichweite des Manipulators beträgt 2,496 m. Die Wiederholgenauigkeit bei Punktpositionierungen beträgt im gesamten Arbeitsraum  $\pm 0,06$  mm. Statt der Montage an einem festen Bodenfundament ist der Roboter auf einer Linearachse des Typs KL1500-3T der Firma KUKA Roboter GmbH montiert (Abbildung 3-16). Diese fungiert als siebte simultan verfahrbare Achse und besitzt eine Wiederholgenauigkeit von  $< \pm 0,02$  mm. Der Industrieroboter kann inkl. seiner Nennlasten durch sie mit einer Geschwindigkeit bis zu  $1,89 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  verfahren werden.

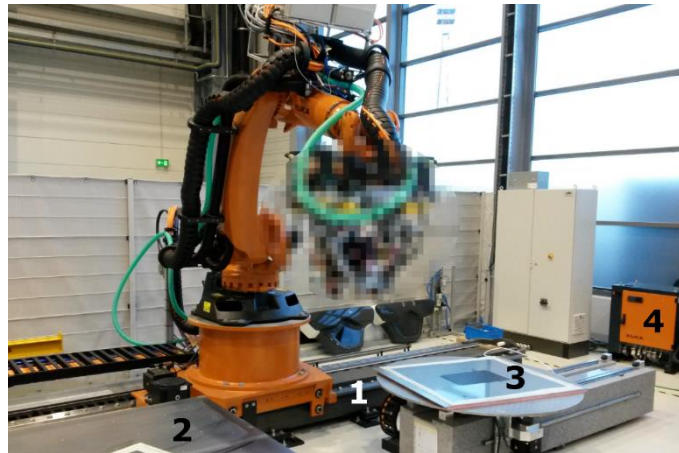


Abbildung 3-16: Anordnung von Linearachse mit Roboter (1) und den beiden vorgelagerten Werkzeugpositionen (2) und (3), CNC-Steuerung (4), [Ver16]

In Abbildung 3-17 ist der Industrieroboter KR300 R2500 ultra mit seinen Achsen und Komponenten dargestellt. Mit den Achsen A1 bis A6 kann der Endeffektor an der Zentralhand (Pos.1) in alle Richtungen mit definierter Geschwindigkeit und Beschleunigung bewegt werden. Die mechanischen Hauptbestandteile des Roboters sind neben der Zentralhand der Arm (Pos.2), die Schwinge (Pos.3), das Karussell (Pos.4) und das Grundgestell (Pos.5).

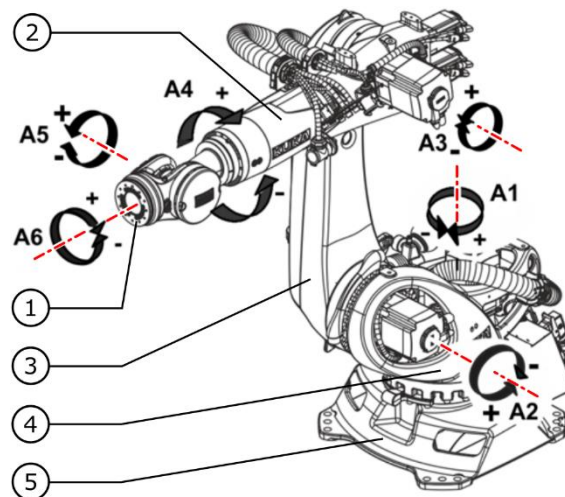


Abbildung 3-17: Achsen und Komponenten des Industrieroboters KR 300 R2500 ultra, [nach KUK16b]

Die Ansteuerung des KUKA-Roboters KR300 R2500 ultra und der Lineareinheit KL 1500/3T wird durch das Steuerungssystem KR C4 (Pos. 4, Abbildung 3-16) realisiert. Basierend auf der Soft- und Hardwarestruktur des Kuka-Steuerungssystems (Abbildung 3-18) können alle eingebundenen Steuerungen

(SPS, CNC, etc.) in Echtzeit direkt mit einander kommunizieren. In Sinne dieser Struktur wird die verwendete Lineareinheit als Erweiterungsmodul angesehen.

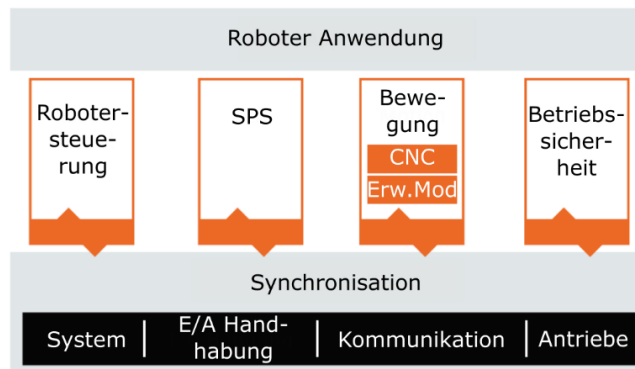


Abbildung 3-18: schematische Darstellung der Kommunikationswege in einer KR C4, [nach KUK16a]

Ausgelegt ist die KR C4 für die Steuerung von bis zu 9 Achsen. Des Weiteren ermöglicht sie es dem Anwender angeschlossene Industrieroboter mittels E/A-Handhabung und direkte G-Code-Programmierung zu steuern und zu verfahren. Diese Handhabung wird mit dem Bedienelement KUKA smartPAD ermöglicht. In diesem System betragen die Versorgungsspannungen für die Servomotoren  $50 V_{DC}$  und für die verwendete Sensorik  $24 V_{DC}$ .

## 4 MLI-Ablegeprozess

Der MLI-Ablegeprozess mit seinen Grundschrinen wird in Abbildung 4-1 schematisch dargestellt. In a) befindet sich der Tooling-Center-Point (TCP) über der Schnittkante der abgelegten Tows (rot). Die Kante entspricht den x- und y-Koordinaten der MLI-Lücke, die in der vorgeschalteten Wegplanung definiert worden sind. An dieser Position wird von der CNC-Steuerung des Kuka-Roboters der Befehl M 110 an die SPS des Legekopfes übermittelt, wodurch das Legeprogramm aufgerufen und gestartet wird. Der Laser-Profil Sensor des Typs LJ-7080 der Firma KEYENCE Deutschland GmbH detektiert (violett) die Schnittkanten der Tows (b)) und berücksichtigt die Ist-Position der Lücke online im MLI-Ablegeprogramm. C) zeigt ein in die Lücke abgelegtes MLI-Blech (grün), dass von der Andruckrolle der Schwinde vollständig überstrichen worden ist.

Der verwendete Laser-Profil Sensor wird an dem zugehörigen Controller des Typs LJ-V7001P der Firma KEYENCE Deutschland GmbH betrieben.

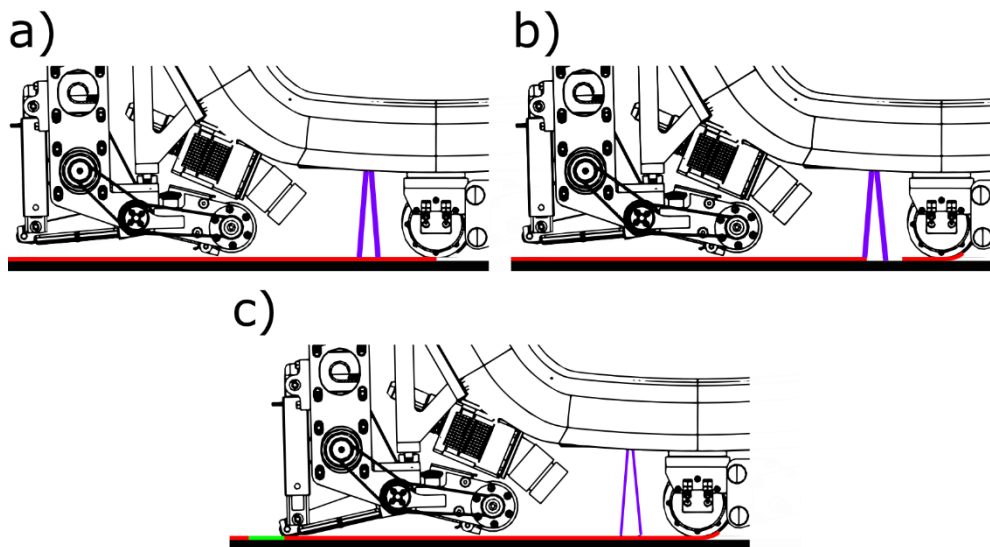


Abbildung 4-1: Prinzipdarstellung des MLI-Ablegeprozesses, **a)** TCP befindet sich auf der Schnittkante des abgelegten Tows (rot), **b)** Erfassungsbereich des Laser-Profil Sensor (lila) erfasst Schnittkante, **c)** MLI-Blech (grün) ist in die erzeugte Lücke abgelegt worden

#### 4.1 Komponenten der MLI-Ablegeeinheit

In diesem Kapitel werden die zum Betrieb der MLI-Ablegeeinheit verwendeten Komponenten (Abbildung 4-2) erläutert.

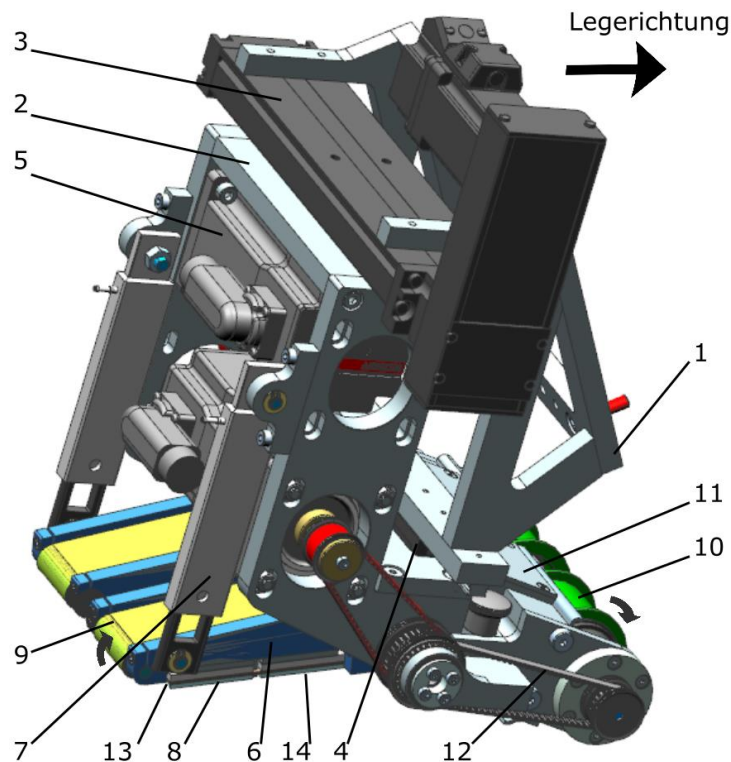


Abbildung 4-2: CAD-Darstellung der verbauten MLI-Ablegeeinheit mit Rahmen (1), Träger (2), Lineareinheit mit Antrieb und Getriebe (3), Linearlager (4), Servomotor (5), Schwinde (6), Pneumatik-Flachzylinder (7), Andruckplatte mit integriertem induktiven Näherungsschalter (8), MLI-Förderriemen (9), Trägerfilmaufwickler mit Hysteresebremse (10), MLI-Magazin (11), zweistufiges Synchronriemengetriebe (12), Abzugskante (13), induktiver Näherungssensor (14), [Ver16]

Die Bewegung während des Ablegeprozesses erfolgt gemäß der gekennzeichneten Legerichtung in y-Koordinatenrichtung.

Mit dem Rahmen (Pos.1) wird die MLI-Ablegeeinheit über Distanzbolzen an dem Legekopf montiert. Der über die Lineareinheit (Pos.3) und das Linearlager (Pos.4) mit dem Rahmen verbundene Träger (Pos.2) nimmt alle mechanischen Komponenten der MLI-Ablegeeinheit auf. Der Servomotor des Typs AM8121-1F10-0000 (Pos.5) treibt über das zweistufige Synchronriemengetriebe (Pos.12) in der ersten Getriebestufe den MLI-Förderriemen (Pos.9) an und in der zweiten Stufe den Trägerfilmaufwickler mit der Hysteresebremse (Pos.10). Im Legebetrieb wird die Schwinde (Pos.6) durch den Pneumatik-Flachzylinder (Pos.7) in

dargestellte Legestellung abgesenkt. Auf der Unterseite der Schwinge ist die Andruckplatte (Pos.8) montiert, die den induktiven Näherungsschalter (Pos.14) aufnimmt. Zwischen Oberseite der Andruckplatte und der nach unten orientierten Riemenfläche wird der Förderspalt gebildet, in dem die MLI-Bleche gemeinsam mit dem Trägerfilm MLI-Bleche bis an der Abzugskante (Pos.13) gefördert werden. Der Trägerfilm wird an der Abzugskante (Pos. 13) so umgelenkt, dass dieser vom MLI-Blech abgezogen und zum Trägerfilmaufwickler geführt wird. Aufgrund der Bewegung des Förderriemens werden die MLI-Bleche mit dem Trägerfilm aus dem MLI-Magazin (Pos.11) gezogen. Im Trägerfilmaufwickler ist eine reibungsfreie Hysteresebremse des Typs PMK 0,05 der Firma KERN Motion Technology verbaut (s. Datenblatt im Anhang A2).

Der zum Antrieb des Förderriemens und des Trägerfilmaufwicklers verwendete Servomotor wird über eine Servomotor-EtherCAT-Klemmen EL7211-0010 angesteuert und geregelt. Diese Klemmen verfügen über eine integrierte Regelungssystematik, die auf einer feldorientierten PI-Drehzahl- und Stromregelung basiert. Das System aus Servomotor und Servomotor-EtherCAT-Klemme verfügt über ein integriertes Feedbacksystem, welches Ist-Werte wie Drehwinkel, Beschleunigungen, Drehzahl, Schleppfehler, Position u.a. für die Steuerungs- und Regelungstechnik bereitstellt. Als Betriebsart der Servomotoren ist der Positionierungsmodus CSP (cyclic synchronous position) definiert worden. In diesem Modus wird mit Hilfe eines Skalierungsfaktors die Position des internen Encoders mit der Kinematik der Ablegeeinheit gekoppelt. Dieser Skalierungsfaktor wird mit Formel 4-1 bestimmt und beträgt  $5,36441803 \cdot 10^{-5} \frac{mm}{INC}$ .

$$SF = \frac{\text{Vorschub pro Umdrehung}}{2^{\text{Singleturn Bits}}} = \frac{\frac{z_1}{z_2} \cdot T \cdot z_3}{2^{\text{Singleturn Bits}}} = \frac{\frac{20}{32} \cdot 1,5 \text{ mm} \cdot 60}{2^{20}} \quad 4-1$$

Des Weiteren wurde die Schleppfehlerüberwachung aktiviert, um den Motor vor Beschädigungen zu schützen. Bei dieser Überwachung wird der tatsächliche Drehwinkel des Encoders mit dem theoretischen verglichen. Ist der vorhandene Winkelversatz zwischen den Drehwinkeln durch mechanische Belastung zu groß wird der Motor gestoppt. In Abbildung 4-3 werden die Bereiche der Schleppfehlerüberwachung dargestellt, ebenso die Lage der Referenzposition. [Bec16a], [Bec16b]



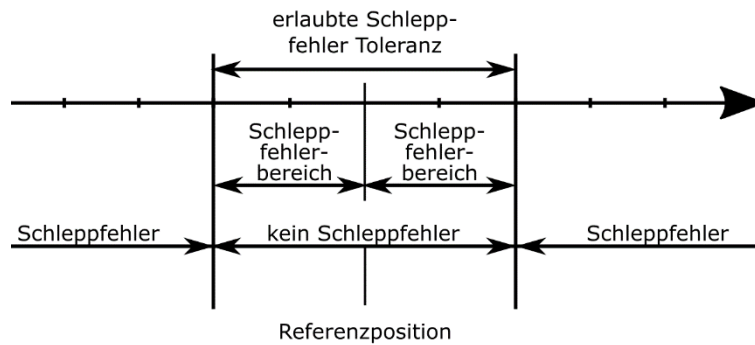


Abbildung 4-3: Bereiche der Schleppfehlerüberwachung, [nach Bec16a]

Zur Einbindung der induktiven Näherungsschalter des Typs SIEs-Q5B-PS-K-L der Firma FESTO (Abbildung 4-4) in die SPS des Legekopfes wird eine 2-Kanal-Digital-Eingangsklemme des Typs EL1002 verwendet. Angeschlossen werden können Sensoren, die entweder positiv oder negativ schaltend aufgebaut sind. Über die galvanisch getrennte Datenleitung werden die erfassten binären Sensorsignale an die Legekopfsteuerung übertragen. Die Taktung des Eingangsfilters beträgt 3 ms.

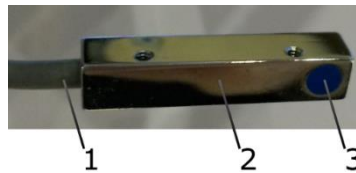


Abbildung 4-4: induktiver Näherungssensor Typs SIEs-Q5B-PS-K-L, Anschlussleitung (1), Gehäuse (2), aktive Flanke (3), [Ver16]

Der Näherungsschalter besitzt einen Schaltausgang in PNP-Konfiguration und ist als Schließer konzipiert. Bei einem Signalwechsel an der positiven DC-Spannungsversorgung schaltet der Näherungsschalter durch, sodass der Ausgang ein High-Signal (= 1) ausgibt, sobald sich ein zu detektierendes Objekt in dem Erfassungsbereich befindet. Der allgemeine Bemessungsabstand wird von FESTO mit 0,8 mm angegeben. Um das zu erfassende Material berücksichtigen zu können, wird dieser mit einem Korrekturfaktor für Edelstahl St 18/8 multipliziert. Reduktionsfaktoren bzgl. des verwendeten induktiven Näherungsschalters für gängige Materialien sind in Tabelle 4-1 aufgeführt.

Tabelle 4-1: Reduktionsfaktoren des gesicherten Schaltabstandes, [FES16]

Reduktionsfaktoren $f_{\text{redu}}$ des gesicherten Schaltabstandes	
Material	Reduktionsfaktor
Aluminium	0,4
Edelstahl St 18/8	0,7
Kupfer	0,3
Messing	0,4
Stahl S235 JR (St 37)	1,0

Um die Schwinge (Abbildung 4-2, Pos.6) der MLI-Ablegeeinheit in Ablegeposition verfahren zu können, ist pro Schwinge ein Pneumatikaktor in Flachzylinderbauform vom Typ EZH-5/20-25-B (Abbildung 4-2, Pos.7) verbaut. Die Funktionsweise ist einfachwirkend in drückender Ausführung bei Druckbeaufschlagung. Die Rückstellung erfolgt über eine im Zylinder befindliche Feder. Der Betriebsdruck wird über Druckluftregler mit angeschlossenem Druckluftaufbereitungssystem bereitgestellt. Die Pneumatik-Flachzylinder werden über Magnetventile CPE10-M1BH-5/3G-QS4-B der Firma FESTO angesteuert.

## 4.2 Steuerungs- und Regelungskonzept

In diesem Kapitel werden die an die Regelung und Steuerung gestellten Anforderungen in Form einer Anforderungsliste tabellarisch dargestellt. Gleiches gilt für die konzeptionelle Ausarbeitung von Regelung und Steuerung mittels graphischer Darstellungen.

### 4.2.1 Anforderungsliste

Die in Tabelle 4-2 aufgezählten Anforderungen sind nach Wunsch (W) und Forderung (F) gewichtet. Eine Forderung muss realisiert werden, ein Wunsch hingegen kann realisiert werden.

Tabelle 4-2: Anforderungsliste, [Ver16]

Erstellt am:	14.11.16	<b>Anforderungsliste für MLI-Ablegeeinheit</b>	
durch	D. Schwittay		
Blatt	1/1		
<b>Lfd.</b>	<b>F / W</b>		
		<b>Anforderung</b>	<b>Werte, Kommentare</b>
<b>1. Signal</b>			
1.1	F	Näherungsschalter	Ausgabesignal verarbeiten
1.2	F	Schaltereigniserkennung	eindeutig
<b>2. Regelung</b>			
2.1	F	MLI-Förderung	prozesssicher
2.2	F	MLI-Blech erfassen	ohne Förderriemen zu stoppen
2.3	F	Ablegegenauigkeit	Wiederholgenauigkeit < ±0,5 mm
2.4	W	Positionserfassung	Speicher, als Zählwerk für Füllgrad des Magazins nutzen
<b>3. Steuerung</b>			
3.1	F	Integration in vorhandene Struktur	Nutzung unter Laborbedingungen
3.2	W	Einbindung der Lineareinheit	Variable definieren
3.3	F	Legegeschwindigkeit	max. $1 \frac{m}{s}$
3.4	F	Ablegeprozess	Automatisiert durch M- Befehlsatz-Erkennung
3.5	W	Bedienbarkeit	intuitiv

#### 4.2.2 Arbeitsphasen

Die Bewegungen des Roboters entlang der Legepfade im AFP-Prozess sind durch die Bahnplanung der Arbeitsvorbereitung festgelegt, ebenso die Soll-Positionen der MLIs im späteren Bauteil und die Positionen der notwendigen Lücken (Abbildung 4-5, (3)). Diese Bahnplanung ist vor Bearbeitungsbeginn an die CNC-Steuerung zu übermitteln. Die auf dem Trägerfilm applizierten MLI-Bleche haben die Länge  $b_{MLI}$ . In Abbildung 4-5 ist das Funktionsprinzip des MLI-Ablegeprozesses am Beispiel eines MLI-Blechtes dargestellt und wird im Folgenden erläutert. Die Initialisierung erfolgt einmal vor Beginn des eigentlichen Ablegeprozesses und wird nicht erneut ausgeführt bis das Magazin leer gefördert worden ist oder eine Prozessstörung vorliegt.

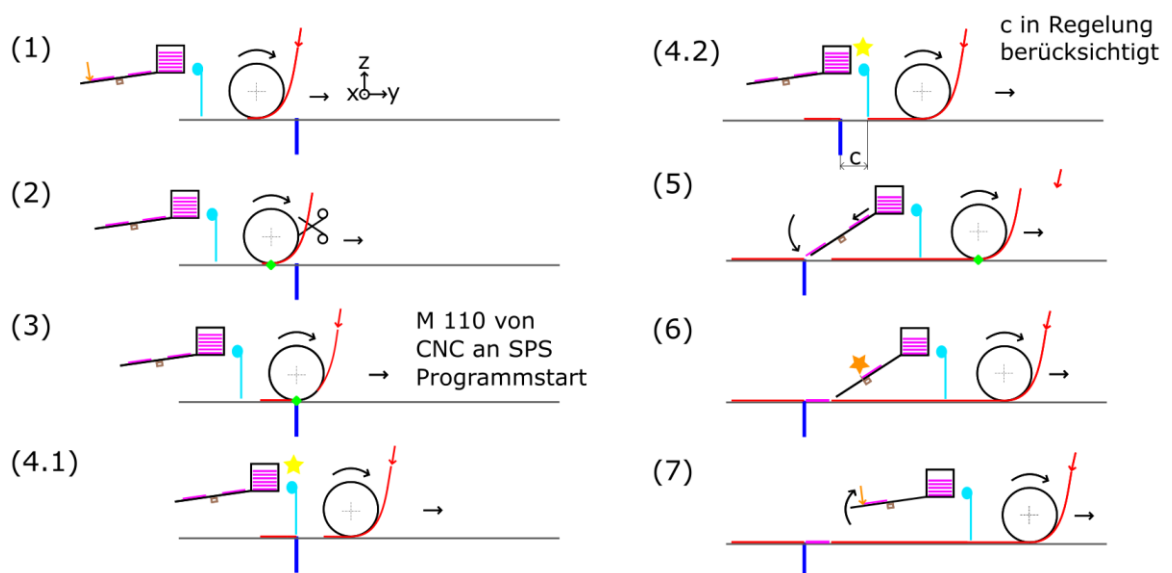


Abbildung 4-5: schematische Darstellung des Funktionsprinzips des MLI-Ablegeprozesses, [Ver16]

Das abzulegende MLI-Blech (pink) befindet sich nach der Initialisierung in der Zwischenposition (orangener Pfeil (1)). Die bei der Detektion des Bleches aktuelle Motorposition ist gespeichert worden. Vor dem induktiven Näherungsschalter (braun) befindet sich das nächste MLI-Blech. (1) Der Legekopf wird in Legerichtung (y-Richtung) entsprechend der Bahnplanung bewegt und die Tows (rot) auf das Tooling (grau) abgelegt. (2) Wenn der TCP (Tooling Center Point, grün) 68 mm (minimale Ablegelände) vor Soll-Position der MLI-Lücke (dunkelblau) ist, werden die Tows geschnitten (Scherensymbol) und die Förderung der Tows entsprechend

der Länge der MLI-Lücke gestoppt und anschließend wieder fortgesetzt. Die geschnittenen Tows werden passiv gefördert. (3) Wenn der TCP sich über der Schnittkante befindet, wird der Befehl M 110 von der CNC-Steuerung des Roboters an die SPS des Legekopfes übermittelt und das MLI-Ablegeprogramm gestartet. (4.1) und (4.2) Der Erfassungsbereich des Laser-Profil Sensors (hellblau) überstreicht die MLI-Lücke und vermisst diese online (gelbe Sterne). Die ermittelten Daten (Länge c) werden zur Ablage der MLI-Bleche verwendet. Zur mittigen Ablage der MLI-Bleche in der Lücke kann die Riemengeschwindigkeit angepasst werden. (5) Wenn der TCP 411 mm in y-Richtung verfahren worden ist, wird die Schwinge abgesenkt und das MLI-Blech in die Lücke abgelegt. (6) Während des Ablegens wird das nächste MLI-Blech detektiert (orangener Stern), die bei der Erfassung aktuelle Motorposition wird gespeichert und zur Erreichung der online angepassten Zwischenposition verwendet. Die Onlineanpassung der Zwischenposition ist die Positionsregelung. Mit dieser werden die variierenden Abstände der MLI-Bleche auf dem Trägerfilm ausgeglichen. Die Regelung des Servomotors beschleunigt den Förderriemen so, dass seine Geschwindigkeit simultan zu der des Legekopfes ist und sich eine Relativgeschwindigkeit des MLI-Blechtes von  $v_{\text{relativ}} = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  ergibt. (7) Erreicht das nächste MLI-Blech die online angepasste Zwischenposition (orangener Pfeil) wird der Förderriemen gestoppt, das MLI-Ablegeprogramm beendet, das Pneumatikventil wird nicht mehr angesteuert und die Schwinge wird angehoben. Das Andrücken des abgelegten MLI-Blechtes erfolgt während des Ablegeprozesses durch die Riemenrolle am Ende der Schwinge. Bei dem beschriebenen Ablegeprozess erfolgt die MLI-Blech-Detektion simultan zur Förderung.

### 4.3 Steuerungs- und Regelungskonzept

In den Kapiteln 4.3.1 und 4.3.2 werden die in der Programmierung umgesetzten Konzepte der Steuerung und Regelung übersichtlich dargestellt und erläutert.

#### 4.3.1 Steuerungskonzept

Das umgesetzte Steuerungskonzept ist in Abbildung 4-6 schematisch mit seinen Wirkbeziehungen dargestellt.

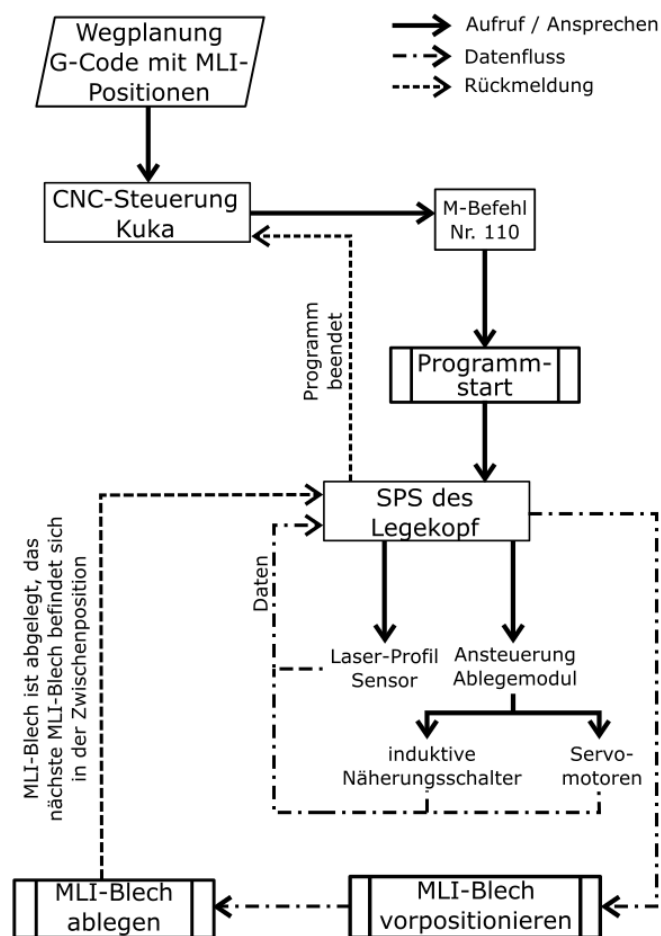


Abbildung 4-6: Steuerungskonzept, [Ver16]

Mit der Wegplanung wird der G-Code mit den definierten MLI-Positionen erzeugt und an die CNC-Steuerung des Roboters übertragen. Wenn sich der TCP an einer definierten MLI-Position befindet, werden von der CNC-Steuerung durch den Aufruf des Befehls M 110 das MLI-Ablegeprogramm und die Ansteuerung des Ablegemoduls gestartet. Das vorpositionierte MLI-Blech wird 411 mm später abgelegt. Dieser Abstand ist konstruktiv bedingt. Von der Steuerung werden die

Daten des induktiven Näherungsschalters ausgewertet und für die Positionsregelung der MLI-Bleche im Förderspalt verwendet. Mit den Daten des Näherungsschalters und des Servomotors können die verketteten Aktionen (MLI-Blech vorpositionieren und ablegen) ausgeführt und abgefragt werden. Bei erfolgreichem Durchlaufen dieser Kette wird durch die Erkennung des nächsten MLI-Blechtes und Förderung bis zur Zwischenposition eine Rückmeldung an die SPS des Legekopfes zurückgegeben, dass ein MLI-Blech abgelegt wurde. Dies wird an die CNC-Steuerung übermittelt, welche den Befehl M111 an die SPS übermittelt, um die Verwendung des M-Befehlsatzes zu beenden. Auf das MLI-Ablegeporgramm hat der Befehl M111 keinen Einfluss und wird aus diesem Grund in Abbildung 4-6 nicht aufgeführt.

### **4.3.2 Regelungskonzept**

In Abbildung 4-7 ist das Regelungskonzept zur MLI-Positionierung schematisch dargestellt. Zur Vorbereitung des Ablegeprozesses wird das System initialisiert (1). Hierbei wird die Vorderkante des ersten MLI-Blechtes in den Erfassungsbereich des Näherungsschalters gefördert und die aktuelle Motorposition in die Variable 1 geschrieben ((2) rote Markierung). Während das detektierte MLI-Blech mit einer Relativbewegung zur Zwischenposition gefördert wird, wird das nächste MLI-Blech vom Näherungsschalter erfasst ((3), blaue Markierung). Der vorherige Wert der Variable V1 wird in Variable V2 geschrieben. Die dann aktuelle Motorposition ((3) blaue Markierung) wird in Variable 1 übernommen. Wenn die Zwischenposition erreicht ist (4), ist die Initialisierung abgeschlossen und der Förderriemen wird gestoppt. Beim Ablegen des ersten MLI-Blechtes wird das dritte MLI-Blech erfasst ((5) grüne Markierung) und die aktuelle Motorposition in Variable 1 geschrieben. Der vorherige Wert wird wieder in die Variable 2 geschrieben. In (6) ist das erste MLI-Blech abgelegt. Dieses Prinzip wird bis zum n-ten MLI-Blech wiederholt. Mit dem Regelungskonzept können Abstandsschwankungen auf dem Trägerfilm ausgeglichen werden. Der Einflussbereich der Regelung erstreckt sich von der Beschreibung der Variable 1 an der aktiven Flanke bis zum Erreichen der Zwischenposition. Durch die Onlineanpassung der Variable 1 und der Vergleich der aktuellen Motorposition mit der Summe aus der Variable 1 und einer Geometriekonstanten.

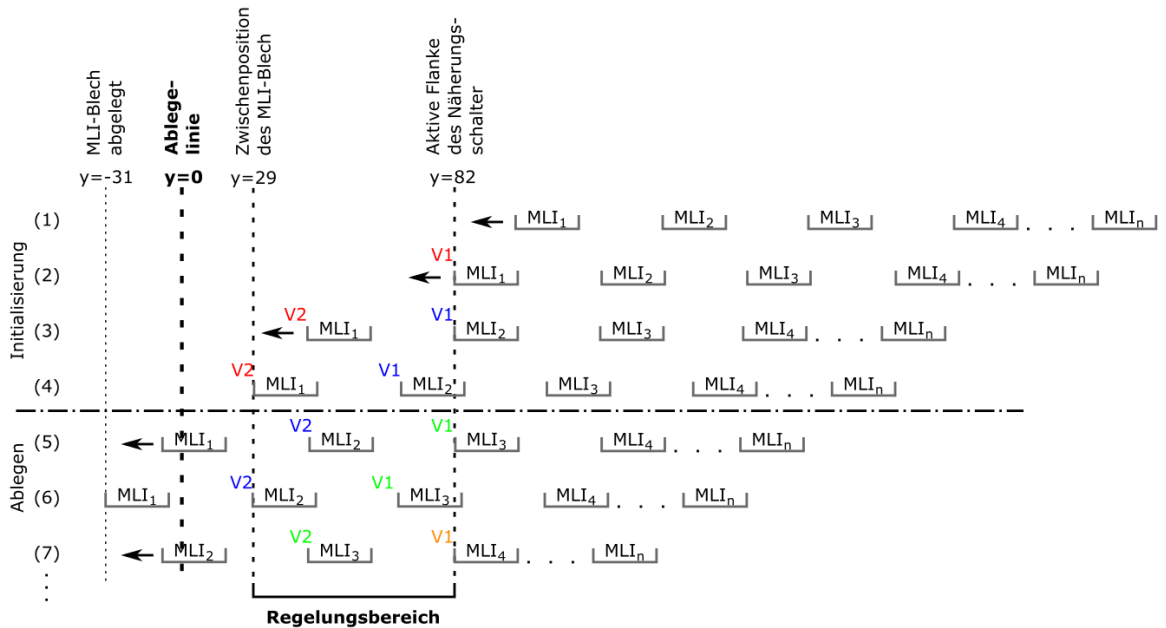


Abbildung 4-7: Regelungsprinzip der MLI-Positionierung mit Kennzeichnung des Einflussbereiches der Positionsregelung, Maßangaben in mm, [Ver16]

#### 4.4 Programmierung

In Abbildung 4-8 wird die Grundstruktur des MLI-Ablegeprogramms dargestellt. Erläutert werden die Programmstrukturen unterhalb der Peripheriegrenze (strichpunktiert). Die Programmstruktur besitzt aufgrund der Bedingung der Echtzeitläuffähigkeit keine Schleifen. Es werden ausschließlich IF-Bedingungen verwendet, um Endlosschleifen zu verhindern.

Durch die Initialisierung wird die Methode `MLI.Init()` im Funktionsblock MLI aufgerufen, wodurch die Variablen mit booleschen Ausdrücken vorbelegt werden, um einen definierten Zustand zu erzeugen. Die entscheidenden Variablen sind hier `MLI_vorbereiten := TRUE` und `MLI_erfasst := FALSE`. Wodurch die Methode `MLI.Vorbereiten()` aufgerufen und durchlaufen wird. In dieser wird abgefragt, ob eine steigende Flanke am Eingang des induktiven Näherungsschalters erkannt worden ist. Bei einer Erkennung wird die aktuelle Motorposition gespeichert und die Variable `MLI_Init` wird nach der Förderung des erfassten MLI-Blech bis zur Zwischenposition auf `TRUE` gesetzt und die Initialisierung abgeschlossen. Sollte keine Erkennung vorliegen, wird die Initialisierung abgebrochen. In diesem Fall müssen die Variablen durch `Reset` in den definierten Anfangszustand zurückgesetzt werden. Nach der Initialisierung wird im Peripheriebereich durch den M-Befehl M 110 in der Methode `MLI.Legen()` eine Überprüfung durchgeführt, ob das MLI-



Magazin bestückt ist (Magazin\_Leer := FALSE) und eine steigende Flanke erkannt wurde. Ist beides gegeben, wird die Variable LegenStatus auf TRUE gesetzt und der Hauptblock der Programmierung mit der Methode MLI() aufgerufen und ausgeführt.

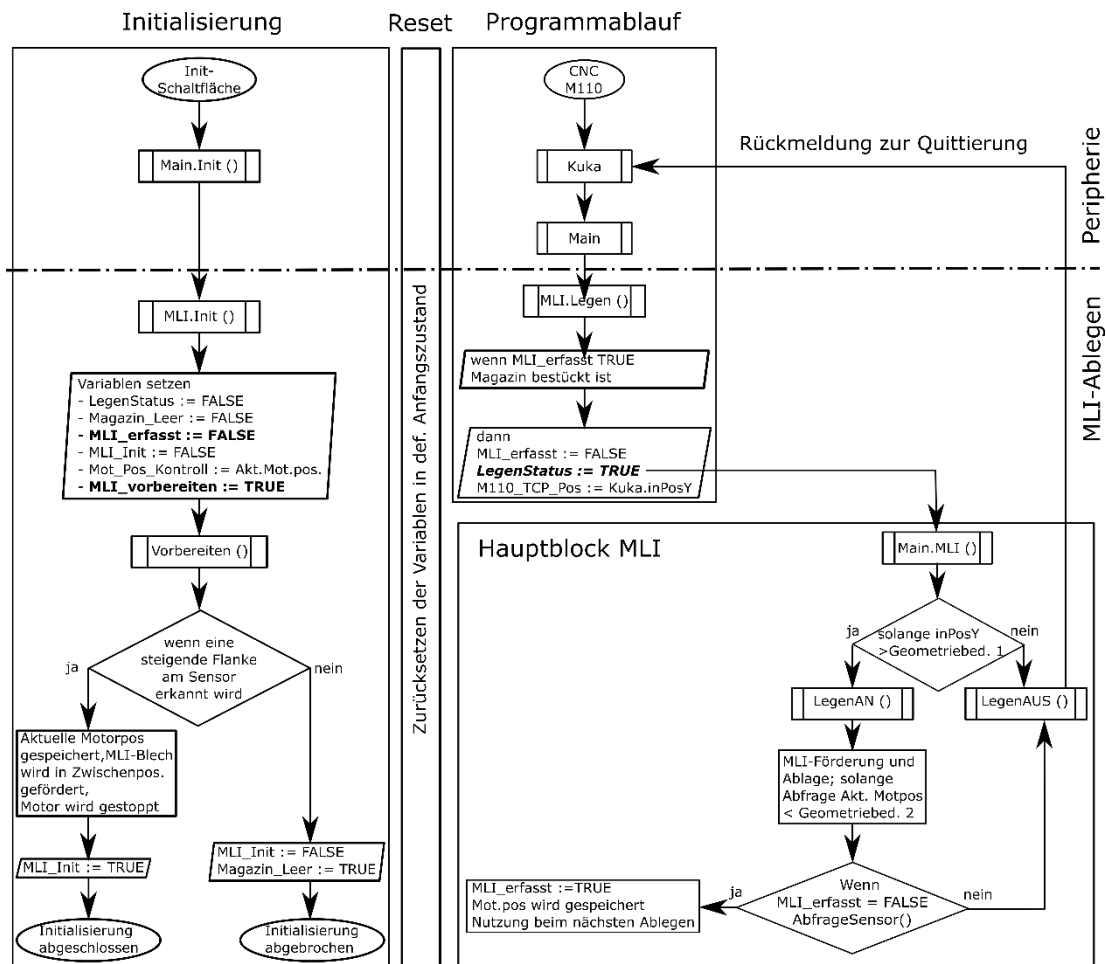


Abbildung 4-8: Grundstruktur des MLI-Ablege-Programms, [Ver16]

Hierin wird die Methode LegenAN() solange zyklisch durchlaufen bis die aktuelle Position des Legekopfes inPosY in y-Richtung größer ist als die Geometriebedingung 1. Die Geometriebedingung 1 setzt sich aus der in MLI.Legen() gespeicherten Ist-Position des Legekopfes (M110\_TCP\_Pos) und einer geometrischen Konstanten zusammen. In der Methode MLI.LegenAN wird das Ablegen der MLI-Bleche ausgeführt. Dies wird durch den Vergleich der aktuellen Motorposition des Fördermotors und der Geometriebedingung 2 realisiert. In der Geometriebedingung 2 sind die Motorposition bei der MLI-Detektion und konstruktiv bedingte geometrische Konstante enthalten.

Solange die aktuelle Position des Motors kleiner ist als die Geometriebedingung 2 ist die Fördergeschwindigkeit des Riemens synchron zu der Bewegungsgeschwindigkeit des Legekopfes. Während der Förderung wird die Methode MLI.AbfrageSensor() zyklisch ausgeführt. Erfasst der Näherungsschalter ein MLI-Blech, wird die dann aktuelle Motorposition in der Variable MLI\_Position\_NEU gespeichert und  $MLI_{erfasst} := TRUE$  gesetzt. Bei der beschriebenen Prozedur bestehend aus Sensorabfrage und dem Speichern der Motorposition handelt es sich um die Positionsregelung zum Ausgleich einer ungleichmäßigen Bestückung des Trägerfilms.

Wenn keine Detektion erfolgt, wird die Variable  $LegenStatus := FALSE$  gesetzt und die Methode MLI.LegenAUS() aufgerufen, welche den Ablegevorgang beendet. Dies wird von dem Funktionsblock Kuka als Quittierung interpretiert und an die CNC-Steuerung gemeldet.

Für die Einbindung des Laser-Profil Sensors zur Onlinevermessung der MLI-Lücke soll der in der Geometriebedingung 2 verwendete Sicherheitsabstand  $Fix10\_Sicherheit$  dienen und online angepasst werden. Zurzeit beträgt dieser 5 mm und wird dazu genutzt den Legekopf mit der MLI-Ablegeeinheit soweit zu verfahren, dass das abgelegte MLI-Blech vollständig von der Ablegeline überstrichen worden ist. Wenn sich die Ablegeline beim Anheben der Schwinge auf dem abgelegten MLI-Blech befindet, kann dieses anhaften und somit aus der Ablegelücke gehoben werden.

## 5 Konstruktion

In diesem Kapitel werden die Modifikationen der MLI-Ablegeeinheit dargestellt und erläutert. Ziel dieser ist es die Prozesssicherheit des MLI-Ablgeprozesses zu erhöhen. Abschließend wurde ein Material, das als Trägerfilm geeignet ist, experimentell bestimmt. In Abbildung 5-1 ist der MLI-Ablegestrang mit den mechanischen Änderungen dargestellt.

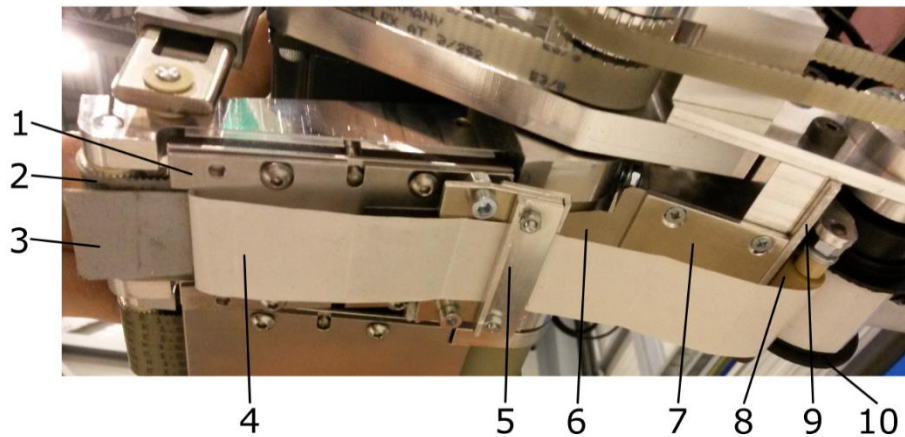


Abbildung 5-1: Übersicht MLI-Ablegestrang, Andruckplatte (1), Förderriemen (2), beschichtetes MLI-Blech (3), Trägerfilm (4), Rücklauf Sperre (5), Andruckblech (6), MLI-Magazin (7), Umlenkrolle (8), MLI-Magazinabdeckung (9), Trägerfilmaufwickler mit Hysteresebremse (10), [Ver16]

## 5.1 Andruckplatte

Die Andruckplatte (Abbildung 5-1, Pos.1) bildet die untere Begrenzung des MLI-Förderspalt. Hauptaufgaben dieser sind das vollflächige Andrücken der MLI-Bleche (Abbildung 5-1, Pos.3) an den Förderriemen (Abbildung 5-1, Pos.2) und das Bilden einer definierten Abzugskante (Abbildung 5-2, Pos. 1 und 3). Die Andruckkraft wird über vier Elastomer-Ringe (Härte von ca. Shore 40 A) realisiert. Diese befinden sich zwischen Schraubenköpfen (Abbildung 5-2, Pos.2) und der Andruckplatte.

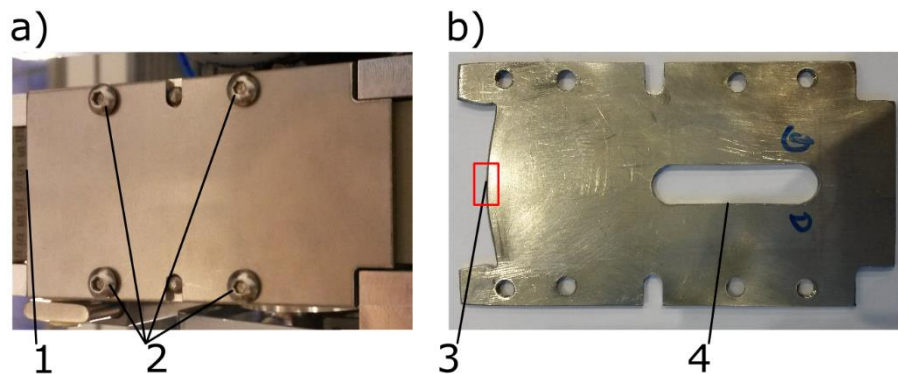


Abbildung 5-2: Andruckplatte **a)** ursprüngliche Andruckplatte, Abzugskante (1), Befestigungsschrauben (2), **b)** modifizierte Abzugskante (3), Freimachung für den Halter des induktiven Näherungsschalters (4), [Ver16]

Der Trägerfilm wird an der Abzugskante von einem MLI-Blech nach hinten abgezogen und durch die Rücklaufsperrung zum Aufwickler geführt (Abbildung 5-1). Um die Prozesssicherheit beim Abziehen zu erhöhen, ist der ursprüngliche Verlauf der Abzugskante (Abbildung 5-2, Pos.1) modifiziert worden (Abbildung 5-2 Pos.3). Die Abzugskante ist 6 mm nach hinten verlegt worden, um den Abstand zwischen dem umgelenkten Trägerfilm und der Oberfläche des Ablegewerkzeuges zu vergrößern. Hierdurch wird verhindert, dass bereits abgezogener Trägerfilm zwischen MLI-Blech und dem Ablegewerkzeug eingeklemmt wird. Die Änderung der Abzugskantenkontur ist darin begründet, die zum Abziehen des Trägerfilms von den MLI-Blechen benötigte Kraft zu reduzieren. Diese Kraftreduzierung wird durch die Verkürzung der effektiven Abzugsbreite (Abbildung 5-2 b, rote Markierung) realisiert. Hierdurch soll das benötigte Ruckmoment zu Beginn des Abziehvorganges der Art reduziert werden, dass das Rückhaltedrehmoment der Hysteresebremse im Trägerfilmaufwickler (Abbildung 5-1, Pos.10) ausreichend groß ist, um den Trägerfilm unter Zugspannung zu halten.

Der induktive Näherungsschalter ist in seiner Einbaulage (Abbildung 5-3 a) und b)) so ausgerichtet, dass die aktive Flanke zwischen den blauen Markierungen liegt (Abbildung 5-2, b)).

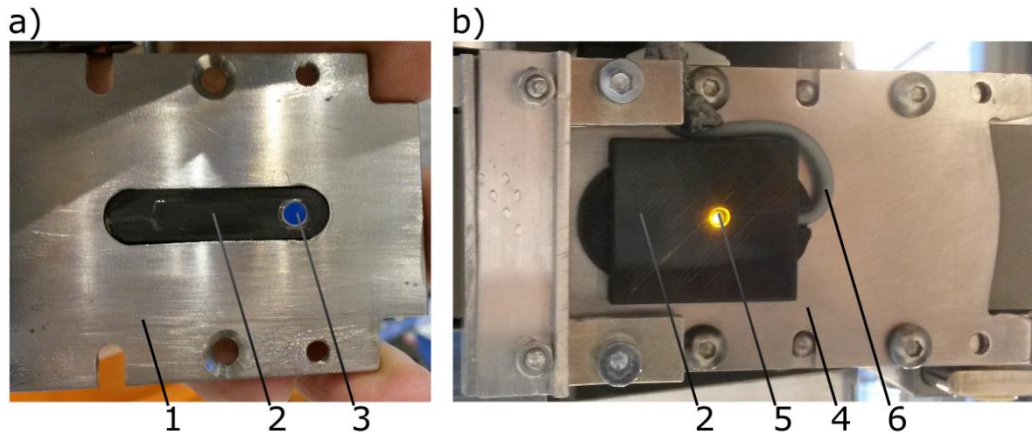


Abbildung 5-3: induktiver Näherungsschalter in Einbaulage, **a)** Oberseite Andruckplatte (1), Halter (2), aktive Flanke (3), **b)** Unterseite Andruckplatte (4), Anzeige-LED (5), Anschlussleitung (6), [Ver16]

## 5.2 Rücklauf Sperre

Zur Unterstützung der Hysteresebremse ist eine Rücklauf Sperre konstruiert und umgesetzt worden. Diese nimmt das Ruckmoment auf, welches anfangs bei dem Abziehen des Trägerfilmes von den MLI-Bleichen entsteht. Wegen des geringen zur Verfügung stehenden Bauraumes wurde die Bauform einer zweireihigen Einwegkupplung gewählt. Diese basiert auf dem Wirkprinzip von Hülsenfreiläufen. Hierbei liegt je ein Klemmkörper (Abbildung 5-4, Pos. 2) in einem sich verjüngenden Spalt. Dieser wird durch eine Rampe (Abbildung 5-4, Pos. 3) und eine Lauffläche (Abbildung 5-4, Pos. 6) gebildet. In der Einbaulage liegen die Klemmkörper auf der Lauffläche über dem Trägerfilm (Abbildung 5-5). In Durchlassrichtung (Abbildung 5-5, a) werden die Klemmkörper durch Reibung mit dem Trägerfilm an den Verschlusswinkel gezogen und rollen dort frei auf dem Trägerfilm. Wird der Trägerfilm in Sperrichtung gezogen (Abbildung 5-5, b), laufen die Klemmkörper in den Spalt bis zum Kontakt mit den Rampen. Die sich durch die Tangentialkräfte ( $F_T$ ) aufbauenden Normalkraftpaare ( $F_N$ ) bewirken, dass der Trägerfilm durch die Klemmkörper blockiert wird (Abbildung 5-6).

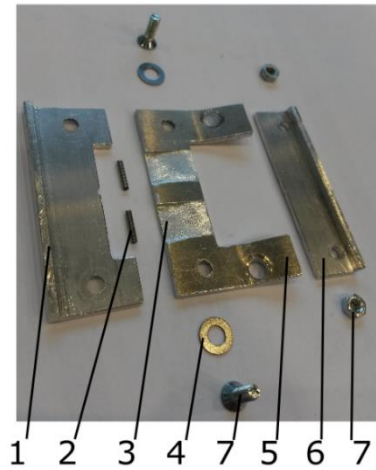


Abbildung 5-4: Komponenten der Rücklaufsperrung, Rückhaltewinkel (1), Klemmkörper (2), Rampe (3), Distanzscheibe (4), Grundkörper (5), Grundkörper (6), Verbindungselemente (7), [Ver16]

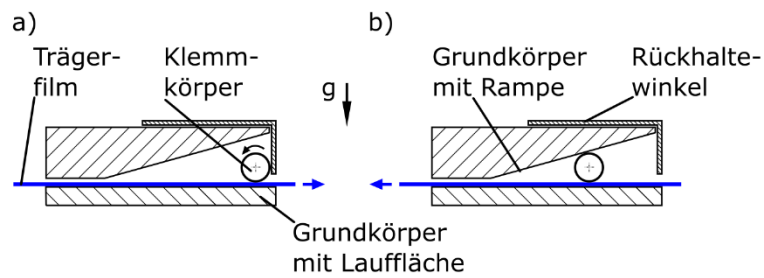


Abbildung 5-5: Prinzipdarstellung Rücklaufsperrung, **a)** Trägerfilm wird in Durchlassrichtung gezogen, **b)** Trägerfilm wird in Sperrichtung gezogen, [Ver16]

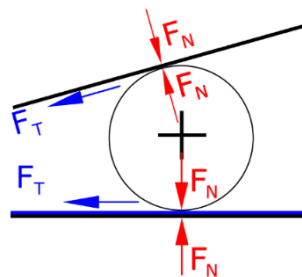


Abbildung 5-6: Freikörperbild, Rücklaufsperrung gesperrt, [Ver16]

### 5.3 MLI-Magazin

Am MLI-Magazin mussten einige Modifikationen durchgeführt werden, um eine reproduzierbare und gleichmäßige Förderung des mit MLI-Bleichen bestückten Trägerfilms zu gewährleisten. Um den präparierten MLI-Trägerfilm (Breite 30 mm) mittig aus dem Magazin fördern zu können, wurden seitlich Zentrierungen in das Magazin appliziert (Abbildung 5-7).

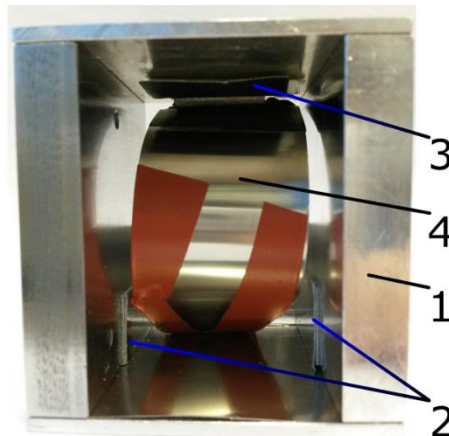


Abbildung 5-7: modifiziertes MLI-Magazin, Gehäuse (1), Zentrierungen (2), Lagerung des Federelementes (3), Federelement (4), [Ver16]

Zur Generierung einer annähernd konstanten Niederhaltekraft auf den Trägerfilm im Magazin ist ein Federelement angefertigt worden. Dieses ist dem Blattfederprinzip nachempfunden (Abbildung 5-8).



Abbildung 5-8: Federelement, Lagerpunkt (1), Federblätter (2), Federlasche (3), [Ver16]

In dem Federelement sind vier Federblätter verbaut. Eine Übersicht bzgl. der sich ergebenden Federkraft mit variierender Anzahl von Federblättern in Abhängigkeit der Einfederung ist in Tabelle 5-1 ersichtlich.

Tabelle 5-1: Federkräfte in Abhängigkeit der Federblattanzahl und der Einfederung, [Ver16]

Anzahl Federblätter n	$\frac{H = L_1}{[\text{mm}]}$	$\frac{G_1}{[\text{kg}]}$	$\frac{F_1}{[\text{N}]}$	$\frac{L_2}{[\text{mm}]}$	$\frac{G_2}{[\text{kg}]}$	$\frac{F_2}{[\text{N}]}$
1	47	0,050	0,49	25	0,130	1,28
2	47	0,150	1,47	25	0,283	2,78
3	47	0,245	2,40	25	0,426	4,18
4	47	0,375	3,68	25	0,609	5,97
5	47	0,480	4,71	25	0,769	7,54

Zur Ermittlung der Federkräfte ist eine Laborwaage des Typs FKB 65K1A der Firma KERN & Sohn GmbH (Genauigkeit: 0,001 kg) verwendet und die Erdbeschleunigung mit  $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$  vereinfachend angenommen worden. Mit der Formel 5-1 werden die Federkräfte  $F_i$  berechnet.

$$F_i = G_i \cdot g \quad 5-1$$

Die Definition der Messlängen  $L_1$  und  $L_2$  sind in Abbildung 5-9 ersichtlich.  $H$  ist die lichte Höhe des MLI-Magazins und beträgt 47 mm.

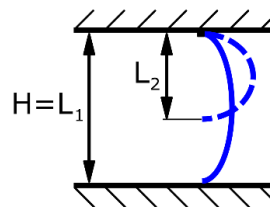


Abbildung 5-9: Definition der Messlängen, [Ver16]

Das Federelement ist vorgespannt im MLI-Magazin montiert, damit bei einer Bestückung mit wenigen MLI-Blechen eine reproduzierbare Förderung gewährleistet werden kann. Die Einfederungshöhe  $L_2$  ist mit 25 mm festgelegt worden. In diesem Zustand kann ein mit 43 MLI-Blechen bestückter Trägerfilm verwendet werden. Um einen mit bestückten Trägerfilm samt MLI-Blechen (Abbildung 5-10, 1) prozesssicher aus dem Magazin fördern zu können, wird dieser durch das Federelement im Bereich der Markierung niedergedrückt (Abbildung 5-10, 2; Abbildung 5-11, a). Hierdurch wird verhindert, dass sich die MLI-Bleche an der



Verschlussblende (Abbildung 5-11, 9) verkanten können. Um zu vermeiden, dass sich der Trägerfilm beim Auszug aus dem Magazin (Abbildung 5-11, 1) nicht vollständig von den beschichteten MLI-Blechen (Abbildung 5-11, 7) ablöst, sind zwei Blenden verbaut. Durch die Verschlussblende mit Aufbäumfase beult sich der austretende Trägerfilm (Abbildung 5-11, 6) nach oben hin aus, sodass er sich vom MLI-Blech ablöst. Dies wird von der Rückhalteblende (Abbildung 5-11, 5) verstärkt, da der Trägerfilm bei fortschreitender Förderung an dieser nach oben wandert (Abbildung 5-11, 8) und so vom MLI-Blech abgezogen wird. Damit der herausgezogene Trägerfilm (Abbildung 5-11, 4) und die darauf liegenden MLI-Bleche korrekt in den Förderspalt gezogen werden können, werden sie durch das Leitblech (Abbildung 5-11, 10) an den Förderriemen angelegt.

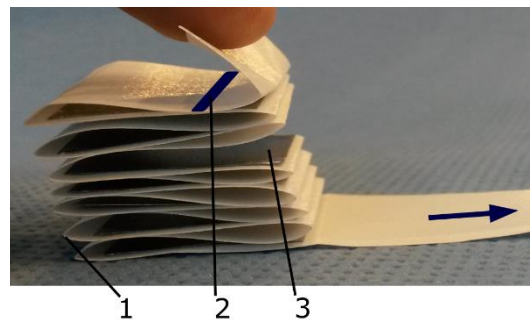


Abbildung 5-10: präparierter Trägerfilm, mäanderförmig gelegter Trägerfilm (1), Druckbereich des Federelements (2), beschichtetes MLI-Blech (3), [Ver16]

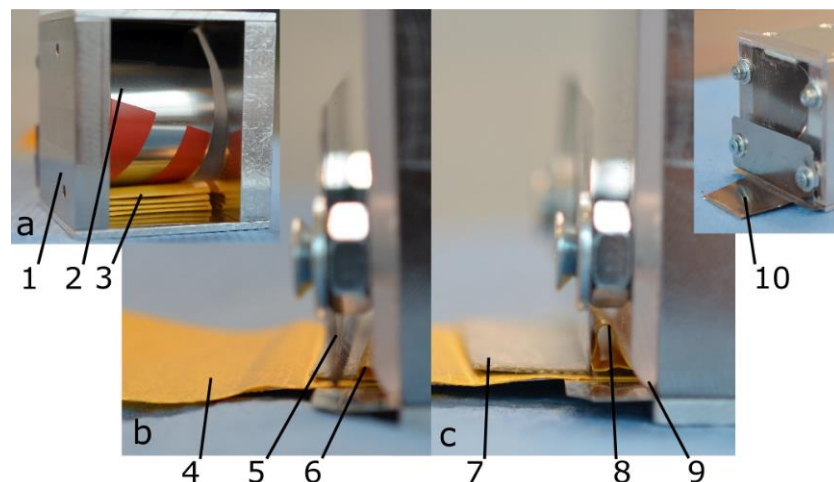


Abbildung 5-11: Auszug eines MLI-Blech aus Magazin, **a)** Magazin (1), Blattfeder (2), Trägerfilm mit MLI-Blechen (3), **b)** ausgezogener Trägerfilm (4), Rückhalteblende (5), austretender Trägerfilm (6) und **c)** beschichtetes MLI-Blech (7), zurückgehaltener Trägerfilm (8), Verschlussblende mit Aufbäumfase (9), Leitblech (10), [Ver16]

### 5.4 MLI-Trägerfilm

Bei den ersten Ablegeversuchen stellte sich heraus, dass die voll- und teilflächige Beschichtung der MLI-Bleche mit doppelseitigem Klebeband aufgrund der hohen Anhaftungskraft ungünstig für ein reproduzierbares Abziehen des Trägerfilms ist. Aus diesem Grund wurden verschiedene Materialien auf die Eignung als Trägerfilmmaterial unter Betrachtung definierter Kriterien getestet (Tabelle 5-3). Zur differenzierten Beurteilung der Versuchsmaterialien sind die Kriterien mit den in Tabelle 5-2 ersichtlichen Faktoren gewichtet worden. Abschließend werden die Summen gebildet. Das Material mit der höchsten Summe erfüllt die erarbeiteten Kriterien am besten und wird für weitere Versuche verwendet.

Tabelle 5-2: Gewichtungsfaktoren zur Bewertungskriterien der Trägerfilmauswahl, [Ver16]

Gewichtungsfaktoren	Bedeutung
9	= kein/e , sehr gut
7	= gering, gut
5	= mäßig
3	= groß , schlecht
1	= sehr hoch , sehr schlecht

Bei dem Vergleich der Trägerfilmmaterialien wurde das Polypropylenstreifen mit der höchsten Summe von 62 bewertet (Tabelle 5-3).

Tabelle 5-3: Gewichtungsmatrix der Trägerfilmauswahl, [Ver16]

Material	Kriterien	Längendehnung (< 1 mm)	reißfest	Einschnü- rverhalten	plötzliches Ver- sagen (ohne Dehnung)	abziehbar von beschichteten MLI-Blech	Umlenkung um Radien < 1 mm	plastische Verformung nach Faltung	Kosten	Summe
		Wrightlon 4600	7	9	5	9	1	5	7	1
Wrightlon 7400	5	7	7	9	1	9	7	1	46	
Ipplon KM 1300	1	1	1	9	1	7	7	1	28	
Folie E3760	7	5	1	9	1	9	5	1	38	
Diatex	9	9	9	9	1	9	7	1	54	
Silikonpapier, weiß	9	5	9	7	9	1	1	7	48	
PVC-Streifen	9	5	7	9	1	5	5	9	50	
Polypropylenstreifen	9	9	9	9	1	9	7	9	62	

## 5.5 Beschichtung der MLI-Bleche

Nach Auswahl des Trägerfilmmaterials wurden aufgrund des schlechten Abziehverhaltens der mit doppelseitigem Klebeband beschichteten MLI-Bleche verschiedene Beschichtungen untersucht. Als geeignete Beschichtung hat sich ein Kontaktklebstoff erwiesen, der nach einer Ablüftungsdauer von mindestens 20 Minuten eine gute Ablösefähigkeit vom gewählten Trägerfilmmaterial besitzt. Diese ist bei vollflächiger Beschichtung dennoch nicht ausreichend, um den Trägerfilm sicher reproduzierbar von den MLI-Blechen abziehen zu können. Daher wurde die Kontur der Beschichtung dahingehend verändert, dass diese durch Streifen an den Rändern gebildet wird (Abbildung 5-12).

Die verwendete Klebebeschichtung wird nur für die Dauer der Untersuchung der Wiederholgenauigkeit genutzt, da für diese ein prozesssicherer Ablegeprozess mit wenigen beeinflussenden Faktoren vorliegen sollte.

Die Anhaftungsfähigkeit der später zu verwendenden Beschichtung der Firma 3M wird durch mehrere Faktoren beeinflusst. Bei diesen handelt es sich u.a. um Reibungsverhalten zwischen Förderriemen und Beschichtung, die Temperatur des Untergrundes und der Beschichtung selbst, ebenso der Anpressdruck der durch die Schwinge aufgebracht wird.

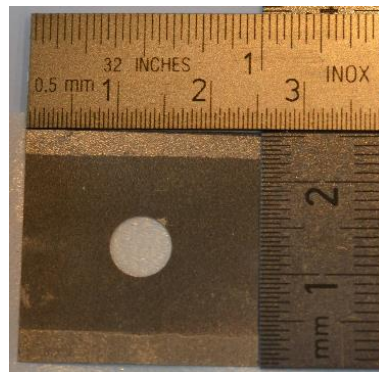


Abbildung 5-12: an Rändern mit Sprühkleber beschichtetes Original-MLI-Blech (25,5 x 25,5 mm), [Ver16]

## 6 Versuch

Ziel dieses Versuches ist es eine Aussage darüber treffen zu können, ob die realisierte Positionsregelung zum Ausgleich variierender Abstände zwischen den MLI-Blechen auf dem Trägerfilm in Kombination mit dem voreingestellten PI-Regler des Servomotors die Forderung 2.3 erfüllen kann. Die Forderung sieht eine Wiederholgenauigkeit  $< \pm 0,5$  mm beim Ablegen der MLI-Bleche vor.

### 6.1 Grundlagen der Versuchsauswertung

Grundlegende Annahme ist, dass die Messwerte mit gleicher Genauigkeit und unter konstanten Bedingungen ermittelt worden sind. Ausgewertet werden Daten auf Grundlage der im Folgenden dargestellten und kurz erläuterten Formeln. Aufgrund der Durchführung einer Versuchsreihe mit  $n$  Messwerten wird mit Formel 6-1 der arithmetische Mittelwert  $\bar{x}$  berechnet, der dem optimalen Schätz-/ Näherungswert des nicht bekannten wahren Mittelwertes  $\mu$  entspricht.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad 6-1$$

Um eine Aussage über die Genauigkeit der einzelnen Messungen treffen zu können, wird mit Hilfe der Standardabweichung  $s$  (Formel 6-2) die Streuung der einzelnen Messwerte  $x_i$  um  $\bar{x}$  bestimmt.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad n \geq 2 \quad 6-2$$

Hierbei wird angenommen, dass die Gesamtheit der ermittelten Messwerte durch eine Normalverteilung nach der Dichtefunktion (Formel 6-3) abgebildet werden kann.

$$f(x) \approx \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot s} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x-\mu}{s} \right)^2} \quad 6-3$$

In Abbildung 6-1 wird die Normalverteilungsfunktion nach Formel 6-3 gezeigt. Im Bereich  $\bar{x} \pm s$  werden 68,3 % der Einzelmesswerte erwartet, deren Werte bis zu einer Standardabweichung  $s$  von dem wahren Mittelwert  $\mu$  abweichen.

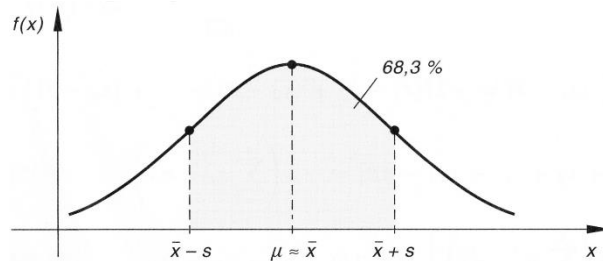


Abbildung 6-1: Normalverteilung von Einzelmesswerten nach der Dichtefunktion  $f(x)$ , [Pap11]

Die aus einzelnen Versuchsreihen gebildeten arithmetischen Mittelwerte  $\bar{x}$  unterliegen einer Streuung um den unbekanntem wahren Mittelwert  $\mu$ . Mit der Standardabweichung  $s_{\bar{x}}$  (Formel 6-4) wird diese Streuung ermittelt.

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (n \geq 2) \quad 6-4$$

Zur Einordnung des Näherungswertes  $\bar{x}$  bezugnehmend auf den wahren Mittelwert  $\mu$  wird ein symmetrischer Vertrauensbereich (Abbildung 6-2) um  $\bar{x}$  aufgespannt. Dessen Vertrauensgrenzen werden wie folgt gebildet (Formel 6-5).

$$\bar{x} \pm t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} = \bar{x} \pm \Delta x \quad 6-5$$

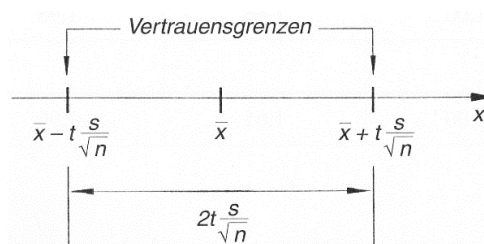


Abbildung 6-2: Vertrauensbereich mit oberer und unterer Grenze, [Pap11]

Dieser Bereich deckt mit einer gewählten Wahrscheinlichkeit  $P = \gamma$  den Mittelwert  $\mu$  ab.  $\gamma$  entspricht dem gewählten Vertrauensniveau und ist abhängig von der Anzahl der Messwerte  $n$  (Tabelle 0-1 in Anhang A3). [Pap11]

## 6.2 Versuchsvorbereitungen

Zur Durchführung der MLI-Bleche-Ablegeversuche ist ein Referenz-MLI-Blech auf dem Testlaminat fixiert worden (Abbildung 6-3, Pos. 1). Gründe für das zuvor abgelegte Testlaminat sind, dass die Programmtests und die Versuche unabhängig von schwankenden Faktoren wie Lufttemperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Materialalterung durchgeführt werden können. Des Weiteren kann die zur Durchführung der Versuche benötigte Wegplanung und Programmierung vom AFP-Legeprozess getrennt untersucht werden.

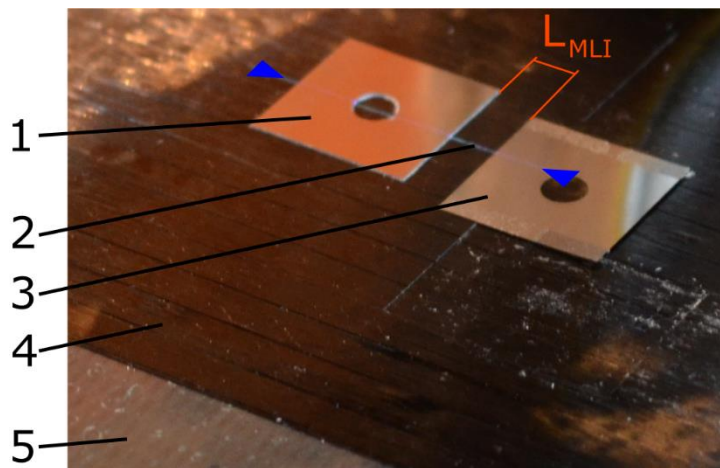


Abbildung 6-3: fixiertes Referenz-MLI-Blech (1), ausgerichteter Erfassungsbereich des Laser-Profil Sensors (blaue Markierungen) (2), abgelegtes MLI-Blech (3), Testlaminat (4), CFK-Tooling (5), [Ver16]

Zur Vermessung der Lücke ( $L_{MLI}$ ) zwischen dem Referenzblech und dem abgelegten Blech wird der im Legkopf montierte Laser-Profil Sensor genutzt. Der Legkopf wird so ausgerichtet, dass der Laser-Profil Sensor mit dem Erfassungsbereich auf der Mittellinie des Referenzbleches liegt und die zu vermessende Lücke überstreicht (Abbildung 6-3).

Für die Versuche werden die Trägerfilme mit sieben MLI-Blechen bestückt. Zwischen den Blechen beträgt der Abstand  $34 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ . Abmessungen und Positionen der Bleche sind in Abbildung 6-4 schematisch dargestellt.

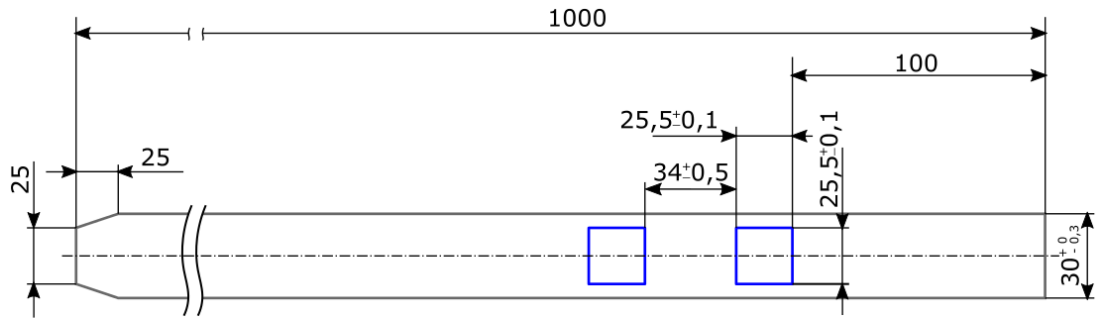


Abbildung 6-4: schematische Trägerfilmbestückung, beispielhaft mit zwei MLI-Blechen (blau) Trägerfilmkontur (grau), alle nicht tolerierten Maße gemäß Toleranzklasse v, [Ver16]

### 6.3 Versuchsdurchführung

Es werden 17 Messreihen durchlaufen. In einer Messreihe können bis zu sieben MLI-Bleche abgelegt werden. Der Legekopf wird mit einer Geschwindigkeit von  $v_{\text{Kopf}} = 50 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$  bewegt. Bei dieser Geschwindigkeit erfolgt das Ablegen der MLI-Bleche. Die MLI-Bleche werden einzeln hinter das Referenz-MLI-Blech gelegt (Abbildung 6-5). Nach Beendigung des Ablegevorganges erfolgt die Ausrichtung des Laser-Profil Sensors. Während einer Messwertermittlung wird die Lücke 100 mal vermessen. Dies erfolgt mit dem Ziel der Unterdrückung des Rauschens durch Oberflächenreflektionen.

Es wird mittig des Referenz-MLI-Blech gemessen (Abbildung 6-5, blaue Markierung), da die aktive Flanke des induktiven Näherungsschalters auf der Mittellinie der Andruckplatte ausgerichtet ist. Ein weiterer Grund für die mittig ausgerichtete Vermessung ist es, die Beeinflussung des Messwertes durch ein schief abgelegtes MLI-Blech (punktiert) zu reduzieren. Diese Ausrichtung ist nicht Gegenstand der vorliegende Bachelorarbeit.

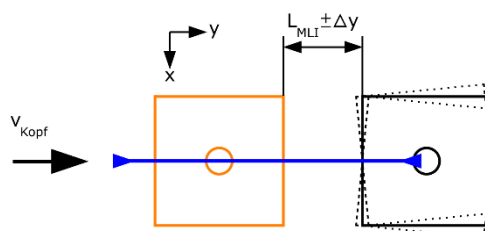


Abbildung 6-5: schematische Messanordnung, Referenz-MLI-Blech (orange), abgelegtes MLI-Blech (schwarz), ‚schief abgelegte MLI-Blech (punktiert), Erfassungsbereich des Laser-Profil Sensors (blau), [Ver16]

## 6.4 Versuchsauswertung

Die Auswertung der aufgenommenen Messwerte erfolgt nur in y-Koordinatenrichtung. Hierfür wurden die Programme Matlab® und Excel® genutzt. Ziel der Untersuchung ist die Dokumentation der Wiederholgenauigkeit der im Rahmen dieser Bachelorarbeit erstellten Ablegesteuerung. Es wurde eingangs angenommen, dass die aufgenommenen Messwerte der Normalverteilung unterliegen. Zur Bestimmung der Messauflösung des Laser-Profil Sensors wurden Referenzmessungen mit ausgerichtetem Laser-Profil Sensor durchgeführt. Ergebnis ist, dass ein Pixel einer Länge von 0,05 mm entspricht. Um aus den Pixelrohdaten des Sensors eindeutig auswertbare Graphen erzeugen zu können, wurden diese normiert und durch die Definition von Grenzwerten gefiltert. Ein Pixel-Datensatz wird durch Mittelwertbildung der 100 Messwiederholungen generiert. Mit Hilfe der Messauflösung werden die aus den Graphen ermittelten Pixelwerte in Längenmaße umgerechnet. Das durch die Medianbildung erzeugte Nullniveau entspricht der Oberfläche der abgelegten MLI-Bleche. Die Oberfläche des Referenz-MLI-Blechtes liegt oberhalb des Nullniveaus, da es durch die Fixierung erhöht ist. In Abbildung 6-6 ist der Pixelgraph einer aufbereiteten Messung dargestellt. Das noch vorhandene Rauschen ist durch das Reflexionsverhalten des Laminates und der MLI-Bleche bedingt.

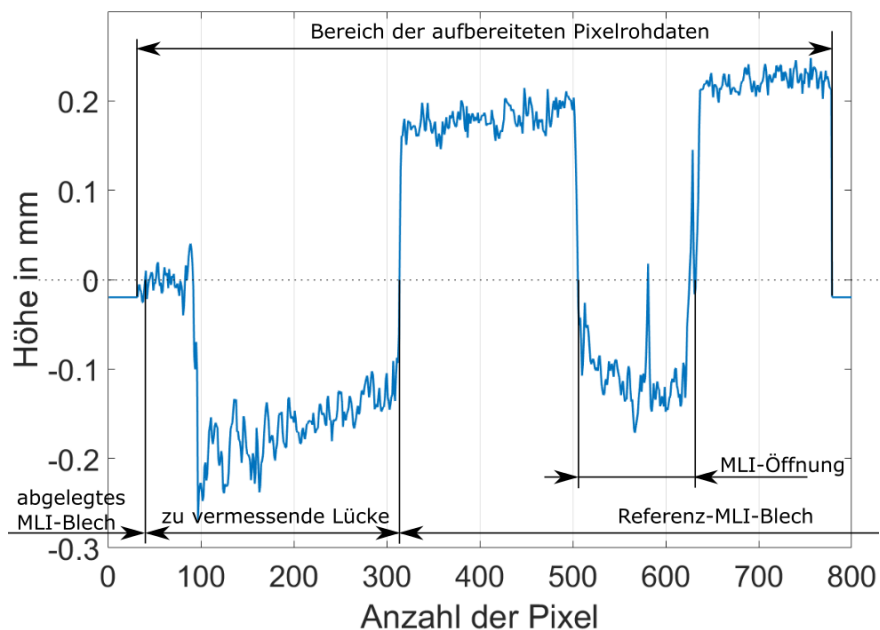


Abbildung 6-6: beispielhafter Pixelgraph mit Bereichseinteilung, [Ver16]



Aus den mit Formel 6-6 berechneten Abweichungen der vermessenen Lücken ergibt sich nach Formel 6-2 eine Standardabweichung von  $s_{\Delta L_{MLI}} = 0,156 \text{ mm}$ .

$$\Delta L_{MLI} = L_{MLI,i} - L_{MLI,Mittel} \quad 6-6$$

In Abbildung 6-7 sind die Abweichungen  $\Delta L_{MLI}$  in Bezug auf den arithmetischen Mittelwert aller  $\Delta L_{MLI}$  abgebildet. Hieraus ist ersichtlich, dass ein Toleranzbereich von  $\pm 0,4 \text{ mm}$  bzgl. der Ablegewiederholgenauigkeit erreicht wird.

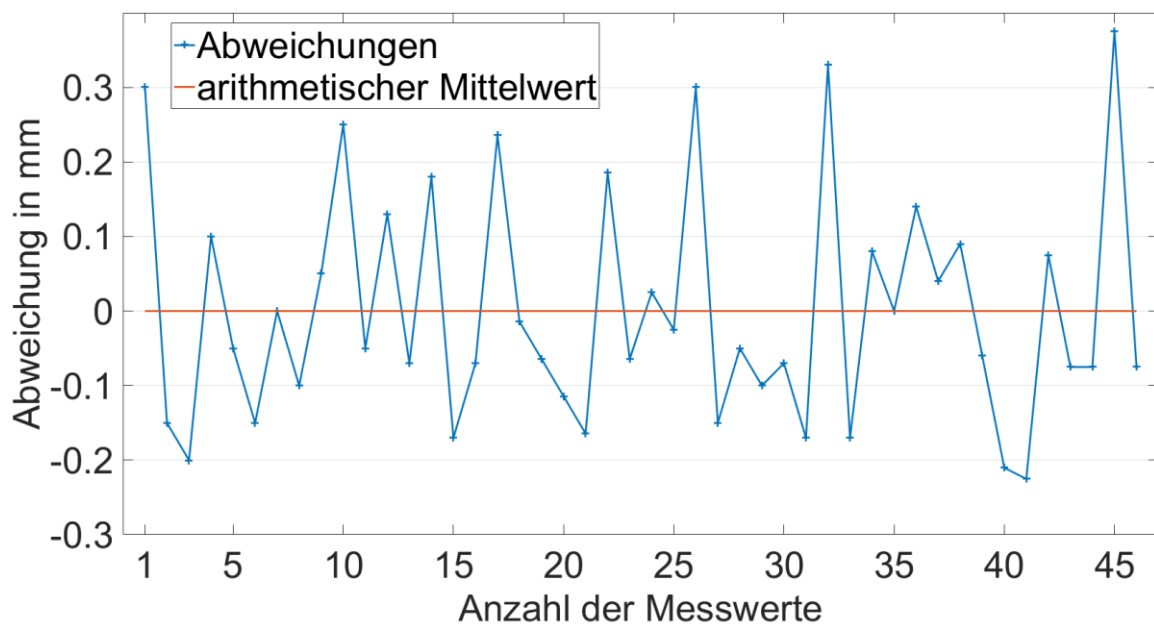


Abbildung 6-7: Verteilung der Abweichungen von  $\Delta L_{MLI}$  in Bezug auf den arithmetischen Mittelwert, [Ver16]

Es befinden sich 31 von 46 Messwerten im  $1 \cdot s_{\Delta L_{MLI}}$ -Bereich, dies entspricht 67,4 % der ausgewerteten Messwerte. 13 Messwerte (28,3 %) liegen im  $2 \cdot s_{\Delta L_{MLI}}$ -Bereich. Die restlichen 2 Messergebnisse entsprechen 4,3 % und befinden sich im  $3 \cdot s_{\Delta L_{MLI}}$ -Bereich. Vergleichend mit der Normalverteilung nach der Dichtefunktion (Abbildung 6-1) entsprechen die ermittelten Messwerte dieser angenommenen Verteilung. Die Versuchsauswertung hat ergeben, dass mit der realisierten Positionsregelung eine Wiederholgenauigkeit bei dem Ablegevorgang von  $\pm 0,4 \text{ mm}$  erreicht wird. Aus der Erfüllung der Anforderung 2.3 ergibt sich, dass die Positionsregelung zum Ausgleich variierender Abstände zwischen den auf dem Trägerfilm platzierten MLI-Bleichen in Kombination des voreingestellten Reglers des Servomotors ausreichend

genau ist. Somit ist die realisierte Positionsregelung ausschließlich durch den induktiven Näherungsschalter beeinflusst. Es kann auf die Verwendung eines optimierten Grundreglers verzichtet werden.

Die geforderte Wiederholgenauigkeit von  $< \pm 0,5 \text{ mm}$  ist aus einem Experteninterview abgeleitet worden. Aus diesem ist hervorgegangen, dass ein Gap  $< 1,5 \text{ mm}$  als unkritisch betrachtet werden kann. Der Gap zwischen der Schnittkante und dem MLI-Blech wird zu einem Teil durch Fasern der darüber bzw. darunter liegende Laminatlagen aufgefüllt und zum anderen durch den verflüssigten Matrixwerkstoff. Diese Füllvorgänge erfolgen ausschließlich während der Erwärmung und Verdichtung im Autoklaven. Das Verhalten der Fasern im Bereich der MLI-Kanten muss durch weiterführende Versuche untersucht werden.

## 7 Fazit und Ausblick

Ziel dieser Bachelorarbeit war es, ein Steuerungs- und Regelungskonzept zu entwickeln und zu realisieren, welches die automatisierte Ablage von MLI-Blechen auf ebenen Ablegewerkzeugen ermöglicht. Die Modifikationen einiger mechanischer Komponenten der MLI-Ablegeeinheit sowie des verwendeten Trägerfilms und der Beschichtung der MLI-Bleche hat eine Steigerung der Prozesssicherheit als Ziel gehabt. Die mechanischen Komponenten sind durch zusätzlichen Baugruppen ergänzt bzw. in ihrer Wirkung verstärkt worden. Bzgl. des Trägerfilmmaterials wurden verschiedene Materialien getestet und in einer Gewichtungsmatrix hinsichtlich festgelegter Kriterien bewertet. Für die Beschichtung der MLI-Bleche wurden ein Alternativmaterial und eine angepasste Beschichtungskontur untersucht. Abschließend ist die Wiederholgenauigkeit der Ablegeeinheit und der dahinterstehenden Programmierung untersucht worden. Die Versuchsauswertung hat ergeben, dass eine Wiederholgenauigkeit von  $< \pm 0,4$  mm erreicht werden kann. Des Weiteren ergab die Versuchsauswertung, dass 67,4 % der 46 ausgewerteten Messwerte im 1-Sigma-Bereich liegen. Die Standardabweichung beträgt 0,156 mm. 28,3 % der Messwerte liegen im 2-Sigma-Bereich und die restlichen 4,3 % liegen im 3-Sigma-Bereich. Hinblickend auf die Annahme, dass die ermittelten Messwerte der Normalverteilung nach der Dichtefunktion entsprechen, kann bestätigt werden. Die erreichte Wiederholgenauigkeit bestätigt die nach ersten Tests formulierte Annahme, dass eine zusätzliche Regelung des Fördermotors nicht notwendig ist. Auf Basis eines Experteninterviews bzgl. Untersuchung zum Einfluss von Gaps auf die mechanischen Eigenschaften einer CFK-Struktur hat ergeben, dass Gaps mit einer Ausdehnung  $< 1,5$  mm in Legerichtung keine signifikante Beeinflussung der mechanischen Eigenschaften zur Folge haben.

Ausblickend auf die Prozesssicherheit können Faktoren wie Gestaltung der Abzugskante und des Magazins sowie Optimierung des Beschichtungswerkstoffes eine Verbesserung hervorbringen. Die Optimierung des Beschichtungswerkstoffes kann dahingehend erfolgen, dass für die Verwendung des Klebefilms der Firma 3M Prozessparameter bestimmt werden. Weiterführend kann die Einbindung des Laser-Profil Sensors zur Online-Vermessung erzeugter Laminatlücken realisiert werden. Die Einbindung soll durch die vorgesehene Variable Fix10\_Sicherheit

erfolgen. Zurzeit ist diese Variable mit einem Fixwert von 5 mm beschrieben. Die Einbindung des zweiten MLI-Ablegestranges und das Ablegen von MLI-Blechen simultan zum AFP-Prozess bilden die nächsten Entwicklungsstadien der realisierten Steuer- und Regelungsprogrammierung, in Anlehnung an das „Cutting on the Fly“-Prinzip [Len15].

Anknüpfend an die automatisierte Ablage von MLI-Blechen auf ebenen Ablegewerkzeugen könnte diese auf ein- bzw. mehrfach gekrümmte Flächen übertragen werden. Hierdurch besteht die Möglichkeit das Anwendungsspektrum in späteren Serienprozessen zu erweitern.

## 8 Literaturverzeichnis

- [Ban01] BANNISTER, Michael: *Challenges for composites into the next millennium — a reinforcement perspective* 32 (2001), Nr. 7, S. 901–910
- [Bec16a] Beckhoff Automation GmbH & Co. KG: *EL72x1-001x : Servomotor-Klemmen mit OCT (One Cable Technology)*. 2016 (Dokumentation)
- [Bec16b] Beckhoff Automation GmbH & Co. KG: *Synchron Servomotoren AM8100*. 2016 (Dokumentation)
- [Bec16c] Beckhoff Automation GmbH & Co. KG: *TwinCAT 3 | eXtended Automation (XA)*. 2016
- [Bun12] Bundesverband der Deutschen Luftverkehrswirtschaft: *Umwelt, Energie, Emissionen: der Energieeffizienzreport 2012*. URL <https://www.bdl.aero/de/veroeffentlichungen/energieeffizienzreport/energieeffizienz-report-2012/> – Überprüfungsdatum 2016-11-20
- [CGT15] CGTech: *Vericut Composite Applications : Programming & Simulation Software for Automated Fiber Placement (AFP) & Tape Laying (ATL)*. URL [http://www.cgtech.de/wp-content/uploads/resources/brochures/VERICUT\\_Composite\\_Brochure.pdf](http://www.cgtech.de/wp-content/uploads/resources/brochures/VERICUT_Composite_Brochure.pdf) – Überprüfungsdatum 2016-11-16
- [Cyt12] Cytec Engineered Materials; SANDERS, Brenda (Mitarb.): *CYCOM (R) 977-2 Epoxy Resin System*. 2012
- [DCD11] DEBOUT, Pierre ; CHANAL, Hélène ; DUC, Emmanuel: *Tool path smoothing of a redundant machine : Application to Automated Fiber Placement*. In: *Computer-Aided Design* 43 (2011), Nr. 2, S. 122–132. URL [http://ac.els-cdn.com/S0010448510001788/1-s2.0-S0010448510001788-main.pdf?\\_tid=2912cc42-d516-11e6-9942-00000aab0f26&acdnat=1483820363\\_8d658a54f7dbdbc74925e417c8ba2b34](http://ac.els-cdn.com/S0010448510001788/1-s2.0-S0010448510001788-main.pdf?_tid=2912cc42-d516-11e6-9942-00000aab0f26&acdnat=1483820363_8d658a54f7dbdbc74925e417c8ba2b34) – Überprüfungsdatum 2017-01-07
- [Deu13] Deutsche Edelstahlwerke: *1.4310*. URL [https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publicationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4310\\_de.pdf](https://www.dew-stahl.com/fileadmin/files/dew-stahl.com/documents/Publicationen/Werkstoffdatenblaetter/RSH/1.4310_de.pdf) – Überprüfungsdatum 2016-12-03
- [Eva] Evans Don: *Automated Processing of Aerospace Composite Components – Überprüfungsdatum* 2016-11-15
- [FR12] FAUBION, Guy ; RUDBERG, Todd: *Unique Non-Orthogonal TCP Intersecting AFP Axes Design*. In: *SAE International Journal of Aerospace* 5 (2012), Nr. 1, S. 39–48. URL <https://www.electroimpact.com/WhitePapers/2012-01-1862.pdf> – Überprüfungsdatum 2016-12-27
- [DIN03] DIN, 8593-0: *Fertigungsverfahren Fügen Teil 0: Allgemeines Einordnung, Unterteilung, Begriffe*
- [FES16] FESTO: *Näherungsschalter SIES, induktiv : Datenblatt – Überprüfungsdatum* 2016-11-27
- [FH11] FINK, Axel ; HÜHNE, Christian: *Verbundwerkstoff aus mehreren Faserverbundschichten und einem Verstärkungsbereich - European Patent*

- Office - EP 2363282 A2*. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Anmeldenr. 11156210.4. 7. Sept.
- [GF14] GEBHARDT, J. ; FLEISCHER, J.: Experimental Investigation and Performance Enhancement of Inserts in Composite Parts : CIRP Conference on Assembly Systems and Te Conference on Assembly Technologies and Systems, Bd. 23, S. 7–12
- [Gra06] GRANT, Carroll: *Automated processes for composite aircraft structure*. In: *Industrial Robot: An International Journal* 33 (2006), Nr. 2, S. 117–121. URL <http://www.emeraldinsight.com/doi/pdfplus/10.1108/01439910610651428> – Überprüfungsdatum 2016-11-15
- [GG12] GRIESS, Kenneth Harlan ; GEORGESON, Gary E.: *Multi-layer metallic structure and composite-to-metal joint methods*. The Boeing Company. Anmeldenr. 13/443,687, Chicago, IL (US). 28.03.2013. USA. Veröffentlichungsnr. US 2013/0075526 A1
- [Gro16] GROß, Lukas: *Multilayer Insert : HP CFK bei WordPress.com*. URL <https://hpcfk.wordpress.com/projekte/multilayer-insert/> – Überprüfungsdatum 2016-11-17
- [HHG16] HERWIG, Alexander ; HORST, Peter ; GONZALEZ, Jonathan Serna ; MEINERS, Dieter ; GROß, Lukas ; DENKENA, Berend ; SCHMIDT, Carsten: *Entwicklung eines mehrlagigen Inserts für dünnwandige Hochleistungs-CFK- Strukturen*. Krafteinleitung. In: *Lightweight Design* 9 (2016), Nr. 1, S. 22–27
- [ifm03] ifm electronic gmbh: *Schulungsunterlagen, Induktive Sensoren : efector 100*. URL <http://www.ifm.com/obj/S100d.pdf> – Überprüfungsdatum 2016-11-16
- [IIM06] IZCO, Luis ; ISTURIZ, Javier ; MOTILVA, Manu: *High Speed Tow Placement System for Complex Surfaces with Cut / Clamp / & Restart Capabilities at 85 m/min (3350 IPM)*. In: *SAE Technical Paper* (2006), 2006-01-3138. URL <http://papers.sae.org/2006-01-3138/> – Überprüfungsdatum 2016-11-27
- [Koe15a] KOEPPEN, Birgit: *Vorlesung Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik Teil A, Kapitel 5 : Sommersemester 2015*. Hamburg, 2015 – Überprüfungsdatum 2016-11-26
- [Koe15b] KOEPPEN, Birgit: *Vorlesung Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik Teil B, Kapitel 3-4 : Sommersemester 2015*. Hamburg, 2015 – Überprüfungsdatum 2016-11-25
- [KUK16a] KUKA Roboter GmbH: *KR C4 : Das Steuerungssystem mit Zukunftssicherheit*. URL [http://www.kuka-robotics.com/austria/de/products/controllers/kr\\_c4/](http://www.kuka-robotics.com/austria/de/products/controllers/kr_c4/). – Aktualisierungsdatum: 2016 – Überprüfungsdatum 2016-11-19
- [KUK16b] KUKA Roboter GmbH: *KR QUANTEC ultra : Mit F- und C-Varianten, Spezifikation*. Spez KR QUANTEC ultra V10. 2016. – Spez KR QUANTEC ultra V10
- [KUK16c] KUKA Roboter GmbH: *Querschnittstechnologien : Industrieroboter, Steuerungen, Roboter Systeme*. URL [http://www.kuka-robotics.com/germany/de/products/software/hub\\_technologies/print/start.htm](http://www.kuka-robotics.com/germany/de/products/software/hub_technologies/print/start.htm) – Überprüfungsdatum 2016-12-04

- [LCD15] LAN, Marine ; CARTIÉ, Denis ; DAVIES, Peter ; BALEY, Christophe: *Microstructure and tensile properties of carbon–epoxy laminates produced by automated fibre placement : Influence of a caul plate on the effects of gap and overlap embedded defects*. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 78 (2015), S. 124–134 – Überprüfungsdatum 2016-11-16
- [Len15] LENGSELD, Hauke: *Faserverbundwerkstoffe, Prepregs und ihre Verarbeitung*. München : Hanser Verlag, 2015
- [Lun14] Lunze Jan: *Regelungstechnik 1 : Systemtheoretische Grundlagen, Analyse und Entwurf einschleifiger Regelungen*. 10. Aufl. Berlin, Heidelberg : Springer Vieweg, 2014
- [Maa15] MAASS, David: *Progress in automated ply inspection of AFP layups*. In: *Reinforced Plastics* 59 (2015), Nr. 5, S. 242–245 – Überprüfungsdatum 2016-11-15
- [MTH10] MISCHLER, Peter L. ; TINGLEY, Mark Curtis ; HOFFMANN, Klaus: *Compaction roller for a fiber placement machine*. Ingersoll Machine Tools, Inc. Anmeldenr. 11/467379, USA. 12. Oktober. USA. Veröffentlichungsnr. US7810539 B2
- [Mül11] MÜLLER, Anke: *Das Nieten ist Standard – wie lange noch?* URL <https://www.produktion.de/technik/fertigung/kleben-versus-nieten-klebe-ist-standard-wie-lange-noch-105.html> – Überprüfungsdatum 2016-11-28
- [NMB14] NEITZEL, Manfred (Hrsg.); MITSCHANG, Peter (Hrsg.); BREUER, Ulf (Hrsg.): *Handbuch Verbundwerkstoffe : Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage. München : Hanser, 2014
- [NKe12] Nguyen C.D. ; Krombholz C. ; et al.: *Einfluss einer Online Bahnkorrektur auf die Materialeigenschaften von Prepreg Tows im Fiber Placement Prozess* (Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress). Berlin, 2012 – Überprüfungsdatum 2016-11-15
- [NL10] NICOLAIS, Luigi (Hrsg.); LEE, Stuart M. (Hrsg.): *Wiley Encyclopedia of Composites*. Hoboken, NY : Wiley Interscience, 2010
- [Pap11] PAPULA, Lothar: *Mathematik für Ingenieure und Naturwissenschaftler : Vektoranalysis, Wahrscheinlichkeitsrechnung, Mathematische Statistik, Fehler- und Ausgleichsrechnung*. 6. Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2011 (3)
- [Pos11] POSTEL, Johannes: *70 Jahre Reglereinstellung nach Ziegler und Nichols*. URL [https://www.inf.tu-dresden.de/content/institutes/iai/tis-neu/lehre/archiv/fohlen.ws\\_2011/Vortrag\\_Postel.pdf](https://www.inf.tu-dresden.de/content/institutes/iai/tis-neu/lehre/archiv/fohlen.ws_2011/Vortrag_Postel.pdf) – Überprüfungsdatum 2016-12-16
- [SAM01] SAMSON AG: *Regler und Regelstrecken : Teil 1 Grundlagen*. Technische Information (2001) – Überprüfungsdatum 2017-02-05
- [ST14] SÄNGR, Anton ; Toni: *induktiver\_naehierungsschalter\_naehierungssensor.jpg (JPEG-Grafik, 822 x 300 Pixel)*. URL [http://www.precifast.de/wp-content/uploads/2014/01/induktiver\\_naehierungsschalter\\_naehierungssensor.jpg](http://www.precifast.de/wp-content/uploads/2014/01/induktiver_naehierungsschalter_naehierungssensor.jpg). – Aktualisierungsdatum: 2014-08-24 – Überprüfungsdatum 2016-12-04

- [Sch07] SCHÜRMAN, Helmut: *Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. 2.*, bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin, Heidelberg : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007 (VDI-Buch)
- [SWH00] SHIRINZADEH, Bijan ; WEI FOONG, Chee ; HUI TAN, Boon: *Robotic fibre placement process planning and control*. In: *Assembly Automation* 20 (2000), Nr. 4, S. 313–320. URL <http://www.emeraldinsight.com/doi/pdfplus/10.1108/01445150010353242> – Überprüfungsdatum 2016-11-17
- [Slo08] SLOAN, Jeff: *ATL and AFP: Signs of evolution in machine process control : CompositesWorld*. URL <http://www.compositesworld.com/articles/atl-and-afp-signs-of-evolution-in-machine-process-control> – Überprüfungsdatum 2016-12-03
- [DIN14] DIN EN, 61131-3: *Speicherprogrammierbare Steuerungen – Teil 3: Programmiersprachen*
- [Sva10] SVARICEK, Ferdinand: *Zusammenfassung der 9. Vorlesung Steuer- und Regelungstechnik*. Regelkreisentwurf und Einstellung eines PID-Regler. URL <https://www.unibw.de/Irt15/Institut/lehre/unterlagen/srtvorba/SRTv10.pdf> – Überprüfungsdatum 2016-12-17
- [Tor11a] TORRES, Martinez Manuel: *Strip-cutting system*. MTorres. Anmeldenr. 12/999,414, USA. 21. April. USA. Veröffentlichungsnr. US20110088527
- [Tor11b] TORRES MARTINEZ, Manuel: *Multi-Application Head For Fibre Strips and Method of Applying Said Fibre Strips*. MTorres. 07. September. Veröffentlichungsnr. EP 1 775 108 B1
- [Ver16] Verfasser. 2016/2017
- [Vog11] VOGGENREITER, Heinz: *Automation in der Produktion von Composite-Strukturen im Flugzeugbau : Begrüßung DLR, 1. Augsburger Produktionstechnik-Kolloquium, 2011*. Augsburg, 2011. URL [http://www.dlr.de/dlr/Portaldatal/1/Resources/bilder/portal/augsburg/Begruesung\\_zum\\_1.\\_Augsburger\\_Produktionstechnik-Kolloquium.pdf](http://www.dlr.de/dlr/Portaldatal/1/Resources/bilder/portal/augsburg/Begruesung_zum_1._Augsburger_Produktionstechnik-Kolloquium.pdf) – Überprüfungsdatum 2016-11-20
- [WHK99] WILMES, H. ; Herrmann A.S. ; KOLESNIKOV, B. ; Kröber I.: *Festigkeitsanalysen von Bolzenverbindungen für CFK-Bauteile mit dem Ziel der Erstellung von Dimensionierungsrichtlinien* Wilmes-09.99-DGLR\_Design-Rules-Bolzen.doc. 1999



## Anhang

- A1:** Institutsvorstellung
- A2:** Datenblätter
- A3:** Tabelle Vertrauensniveau
- A4:** Programmcode (Auszug)
- A5:** Aufgabenstellung

### A 1: Institutsvorstellung

Das Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW), geleitet von Prof. Dr.-Ing. Denkena, betrachtet umfassend die Thematik der spanenden Fertigung. Hierunter fällt neben dem eigentlichen Zerspanungsprozess die komplette Prozesskette von der Entwicklung von Werkzeugmaschinen über die Planung bis hin zur Organisation der Fertigung. Somit verfügt das IFW über Erfahrungen im Bereich der Grundlagenforschung, der praxisorientierten Forschung, Beratung und Dienstleistungen sowie der Entwicklung. Das so erworbene Wissen kann in der Lehre den Studenten umfassend vermittelt werden. Die Leibniz Universität Hannover hat am CFK Nord im Rahmen der Forschergruppe HP CFK eine Außenstelle des IFW gegründet, die den Schwerpunkt im Bereich der CFK-Bauteilfertigung gesetzt hat. So werden am CFK Nord Systeme für das Ablegen und die Handhabung von Textilien und Werkstoffen neben der Auslegung variabler funktionsintegrierter Formwerkzeuge betrachtet. Weiterführend werden die Verfahrenstechnik und Prozesstechnik einhergehend mit der Betrachtung einer prozessintegrierten Qualitätssicherung erforscht. Ein weiteres Forschungsfeld ist die Bewertung von Fertigungstechnologien und die Optimierung der Prozesskette.

## A 2: Datenblätter

**KUKA**

KR QUANTEC ultra

Roboter	Technische Daten
KR 210 R3100 ultra C	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Technische Daten (&gt;&gt;&gt; 4.16 "Technische Daten, KR 210 R3100 ultra C" Seite 110)</li> <li>■ Zusatzlasten (&gt;&gt;&gt; 4.18 "Zusatzlast" Seite 123)</li> <li>■ Schilder (&gt;&gt;&gt; 4.19 "Schilder" Seite 124)</li> <li>■ Anhaltewege und -zeiten (&gt;&gt;&gt; 4.21.10 "Anhaltewege und -zeiten KR 210 R3100 ultra C" Seite 165)</li> </ul>
KR 210 R3100 ultra C-F	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Technische Daten (&gt;&gt;&gt; 4.17 "Technische Daten, KR 210 R3100 ultra C-F" Seite 116)</li> <li>■ Zusatzlasten (&gt;&gt;&gt; 4.18 "Zusatzlast" Seite 123)</li> <li>■ Schilder (&gt;&gt;&gt; 4.19 "Schilder" Seite 124)</li> <li>■ Anhaltewege und -zeiten (&gt;&gt;&gt; 4.21.10 "Anhaltewege und -zeiten KR 210 R3100 ultra C" Seite 165)</li> </ul>

## 4.2 Technische Daten, KR 300 R2500 ultra


## 4.2.1 Grunddaten, KR 300 R2500 ultra

## Grunddaten

	KR 300 R2500 ultra
Anzahl Achsen	6
Anzahl der ansteuerbaren Achsen	6
Arbeitsraumvolumen	41 m <sup>3</sup>
Positionswiederholgenauigkeit (ISO 9283)	± 0,06 mm
Gewicht	ca. 1120 kg
Nenn-Traglast	300 kg
Maximale Reichweite	2496 mm
Schutzart	IP65
Schutzart Zentralhand	IP65
Schallpegel	< 75 dB (A)
Einbaulage	Boden
Aufstellfläche	830 mm x 830 mm
zulässiger Neigungswinkel	≤ 5 °
Standardfarbe	Grundgestell: schwarz (RAL 9005); Bewegliche Teile: KUKA orange 2567
Steuerung	KR C4
Trafoname	KR C4: KR300R2500 ULTRA C4 FLR
Durchmesser Hohlwelle	
A1	139 mm (teilweise durch Motorleitungen belegt)

## Umgebungsbedingungen

Feuchtekategorie (EN 60204)	-
Klassifizierung Umweltbedingungen (EN 60721-3-3)	3K3
Umgebungstemperatur	
Bei Betrieb	10 °C bis 55 °C (283 K bis 328 K)
Bei Lagerung und Transport	-40 °C bis 60 °C (233 K bis 333 K)

 Beim Betrieb im niedrigen Temperaturbereich kann ein Warmfahren des Roboters erforderlich sein.

## Verbindungsleitungen

Leistungsbezeichnung	Steckerbezeichnung Robotersteuerung - Roboter	Schnittstelle-Roboter
Motorleitung	X20 - X30	Beidseitig Harting Stecker
Datenleitung	X21 - X31	Beidseitig Rechteck-Stecker
Schutzleiter/Potentialausgleich 16 mm <sup>2</sup> (optional bestellbar)		Beidseitig Ringkabelschuh, M8

Leitungslängen	
Standard	7 m, 15 m, 25 m, 35 m, 50 m

Mindest-Biegeradius	5x D
---------------------	------

Detaillierte Angaben zu den Verbindungsleitungen siehe Beschreibung Verbindungsleitungen.

## 4.2.2 Achsdaten, KR 300 R2500 ultra

## Achsdaten

Bewegungsbereich	
A1	±185 °
A2	-140 ° / -5 °
A3	-120 ° / 155 °
A4	±350 °
A5	±122,5 °
A6	±350 °
Geschwindigkeit bei Nenn-Traglast	
A1	105 °/s
A2	101 °/s
A3	107 °/s
A4	122 °/s
A5	113 °/s
A6	175 °/s

Bewegungsrichtung und Zuordnung der einzelnen Achsen sind der Abbildung (>>> Abb. 4-1) zu entnehmen.



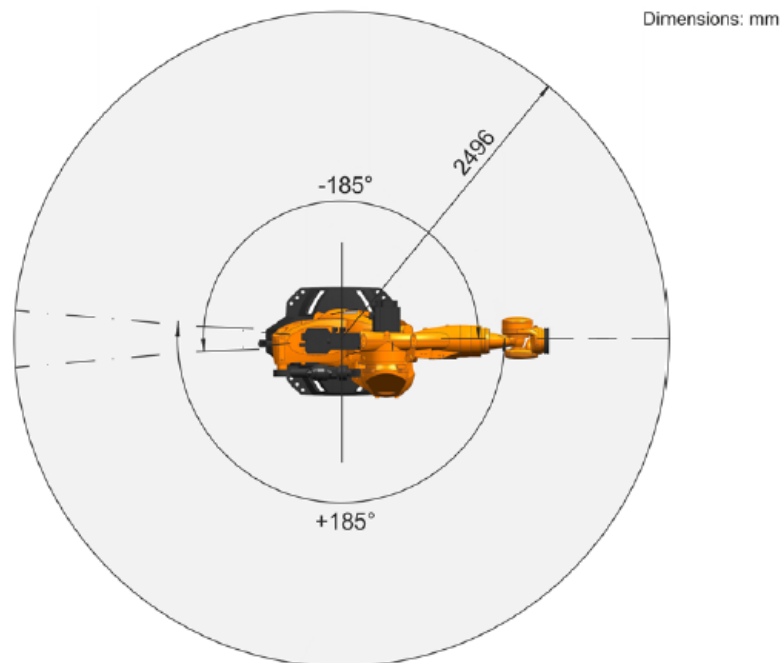


Abb. 4-3: KR 300 R2500 ultra Arbeitsbereich, Draufsicht

#### 4.2.3 Traglasten, KR 300 R2500 ultra

##### Traglasten

Nenn-Traglast	300 kg
Nenn-Massenträgheitsmoment	150 kgm <sup>2</sup>
Nenn-Gesamtlast	-
Nenn-Zusatzlast Grundgestell	-
Maximale Zusatzlast Grundgestell	-
Nenn-Zusatzlast Karussell	-
Maximale Zusatzlast Karussell	300 kg
Nenn-Zusatzlast Schwinge	-
Maximale Zusatzlast Schwinge	130 kg
Nenn-Zusatzlast Arm	50 kg
Maximale Zusatzlast Arm	150 kg
Nenn-Abstand Traglast-Schwerpunkt	
Lxy	270 mm
Lz	240 mm

**HINWEIS** Ein Überschreiten der Traglasten und Zusatzlasten geht in die Lebensdauer des Roboters ein und überlastet Motoren und Getriebe. Wir empfehlen den konkreten Anwendungsfall immer mit KUKA.Load zu prüfen. Bei Überschreitung einzelner Werte muss Rücksprache mit KUKA Roboter gehalten werden.

##### Traglast-Schwerpunkt

Der Traglast-Schwerpunkt für alle Traglasten bezieht sich auf den Abstand zur Flanschfläche an der Achse 6. Nenn-Abstand siehe Traglast-Diagramm.

## Servomotoren AM8121-1F10-000

**BECKHOFF**

Technische Daten

**10.2 AM812x**

Elektrische Daten		Symbol [Einheit]	AM8121-F	AM8121-F an EL7201	AM8122-F	AM8122-F an EL7201
	Stillstandsrehmoment	$M_0$ [Nm]	0,5	0,35	0,8	0,56
	Stillstandsstrom	$I_{0max}$ [A]	4,0	2,8	4,0	2,8
	Max. mech. Drehzahl	$N_{max}$ [min <sup>-1</sup> ]	12000	12000	12000	12000
	Max. Netzspannung	$U_N$ [V <sub>DC</sub> ]	50	50	50	50
$U_N = 24$ VDC	Nennrehzahl	$N_n$ [min <sup>-1</sup> ]	1000	1000	600	600
	Nennrehmoment	$M_n$ [Nm]	0,5	0,35	0,8	0,56
	Nennleistung	$P_n$ [W]	52	36	50	35
$U_N = 48$ VDC	Nennrehzahl	$N_n$ [min <sup>-1</sup> ]	3000	3000	2000	2000
	Nennrehmoment	$M_n$ [Nm]	0,5	0,35	0,8	0,56
	Nennleistung	$P_n$ [W]	157	110	167	117
	Spitzenstrom	$I_{0max}$ [A]	17	5,66	22,4	5,66
	Spitzendrehmoment	$M_{0max}$ [Nm]	1,97	0,69	4,06	1,09
	Drehmomentkonstante	$K_{Tmax}$ [Nm/A]	0,125	0,125	0,2	0,2
	Spannungskonstante	$K_{Emax}$ [mV/min]	8	8	13	13
	Wicklungswiderstand	$R_{20}$ [Ω]	1,6	1,6	1,5	1,5
	Wicklungsinduktivität	$L$ [mH]	2,8	2,8	3,3	3,3

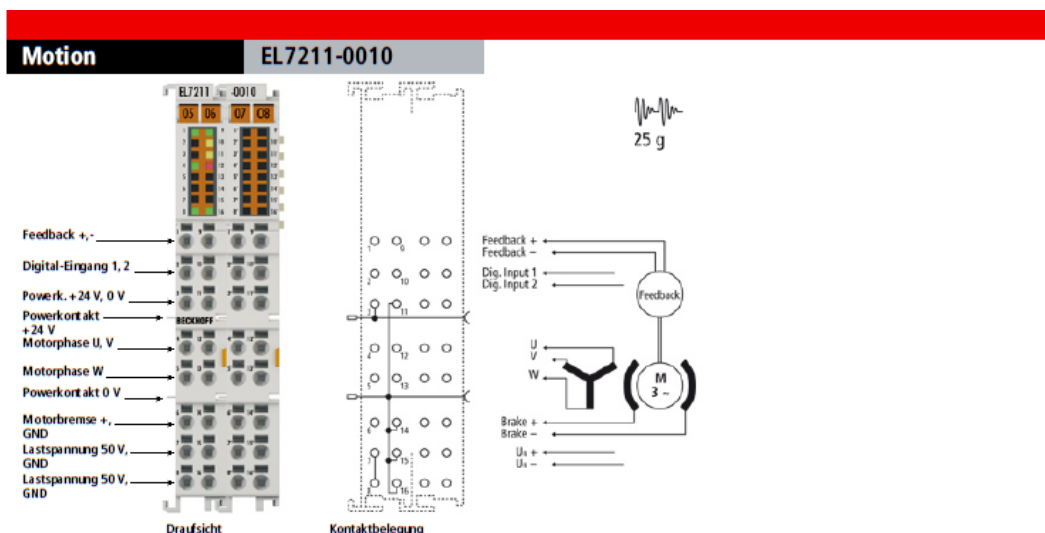
\* Bemessungsflansch Aluminium 230 mm x 130 mm x 10 mm

Einbau eines Wellendichtrings führt zu einer Reduktion der Nenndaten.

Mechanische Daten	Symbol [Einheit]	AM8121-F	AM8122-F		
Rotorträgheitsmoment (ohne Bremse)	$J$ [kgcm <sup>2</sup> ]	0,134	0,253		
Rotorträgheitsmoment (mit Bremse)	$J$ [kgcm <sup>2</sup> ]	0,204	0,324		
Polzahl		6	6		
Statisches Reibmoment	$M_R$ [Nm]	0,002	0,004		
Thermische Zeitkonstante	$t_{TH}$ [min]	10	13		
Gewicht (ohne Bremse)	$G$ [kg]	1,00	1,30		
Gewicht (mit Bremse)	$G$ [kg]	1,16	1,66		
Zulässige Radialkraft am Wellenende	$F_R$ [N]	Siehe 10.2.2			
Zulässige Axialkraft	$F_A$ [N]				

**Daten der optionalen Bremse**

Daten	Symbol [Einheit]	AM812x-F	
Haltemoment bei 120°C	$M_{BR}$ [Nm]	2,0	
Anschlussspannung	$U_{BR}$ [V <sub>DC</sub> ]	24 +6 -10 %	
Elektrische Leistung	$P_{BR}$ [W]	10	
Strom	$I_{on}$ [A]	0,3	
Lüftverzögerungszeit	$t_{BR1}$ [ms]	25	
Einfallverzögerungszeit	$t_{BR2}$ [ms]	8	



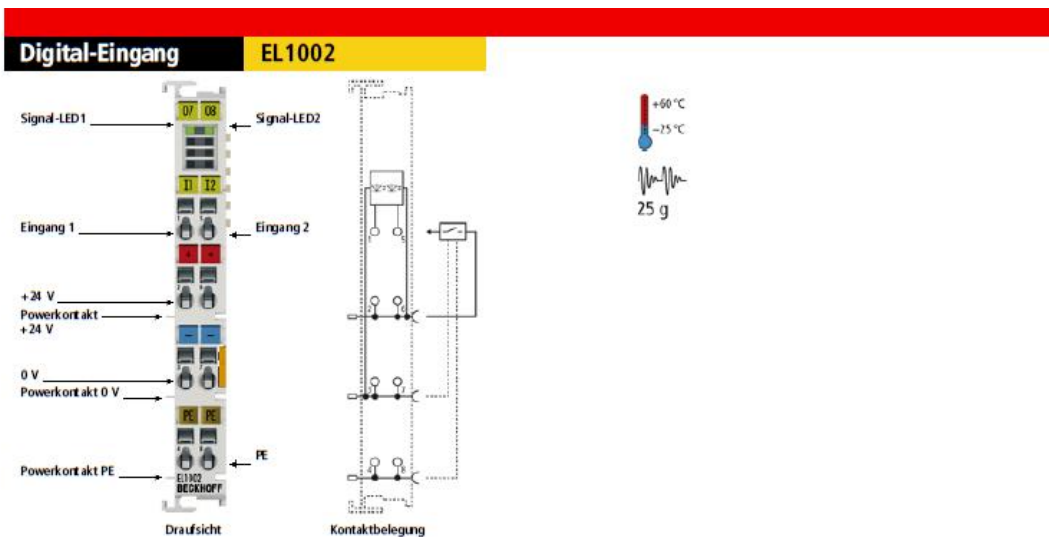
## EL7211-0010 | Servomotorklemme mit OCT, 50 V DC, 4,5 A RMS

Die Servomotor-EtherCAT-Klemme EL7211-0010, mit integrierter One Cable Technology (OCT), bietet hohe Servo-Performance in sehr kompakter Bauform, für Motoren der Baureihe AM8100, bis 4,5 A<sub>RMS</sub>. Die One Cable Technology vereint Motorleitung und ein absolutes Feedbacksystem in einer einzigen Leitung. Das integrierte elektronische Typenschild der AM81xx-Motoren kann von der Servoklemme automatisch eingelesen werden und konfiguriert die Motorparameter automatisch. Dadurch vereinfachen sich Verdrahtungsaufwand und Inbetriebnahme auf ein Minimum.

Die schnelle Regelungstechnik, auf Basis einer feldorientierten Strom- und PI-Drehzahlregelung, unterstützt schnelle und hochdynamische Positionieraufgaben. Zahlreiche Überwachungen, wie der Über- und Unterspannung, des Überstroms, der Klemmentemperatur oder der Motorlast, über die Berechnung eines I<sup>2</sup>T-Modells, bieten ein Höchstmaß an Betriebssicherheit. EtherCAT, als leistungsfähige Systemkommunikation, und CAN-over-EtherCAT (CoE), als Applikationsschicht, ermöglichen die ideale Anbindung an die PC-basierte Steuerungstechnik. Neueste Leistungshalbleiter garantieren minimale Verlustleistung und ermöglichen beim Bremsbetrieb eine Rückspeisung in den Zwischenkreis. 16 LEDs zeigen Status-, Warn- und Fehlermeldungen sowie eventuell aktive Limitierungen an.

Technische Daten	EL7211-0010
Anzahl Kanäle	1 Servomotor, absolutes Feedback, Motorbremse, 2 digitale Eingänge
Anschluss-technik	Motordirektanschluss
Lastart	permanenterregte Synchronmotoren
Nennspannung	8...50 V DC
Ausgangsstrom I <sub>N</sub>	4,5 A (effektiv)
Spitzenstrom I <sub>p</sub>	9,0 A (effektiv) für 1 s
Frequenzbereich	0...599 Hz
PWM-Taktfrequenz	16 kHz
Stromreglerfrequenz	doppelte PWM-Taktfrequenz
Drehzahlreglerfrequenz	16 kHz
Ausgangsspannung Motorbremse	24 V DC (+6 %/-10 %)
Ausgangsstrom Motorbremse	max. 0,5 A
Stromaufn. Powerkontakte	typ. 50 mA + Haltestrom Motorbremse
Stromaufnahme E-Bus	120 mA typ.
Besondere Eigenschaften	kompakt und systemintegriert, absolutes Feedback, One Cable Technology (OCT), Plug-and-play
Gewicht	ca. 95 g
Betriebs-/Lagertemperatur	0...+55 °C/-25...+85 °C
Relative Feuchte	95 % ohne Betauung
Schwingungs-/Schockfestigkeit	gemäß EN 60068-2-6/EN 60068-2-27
EMV-Festigkeit/-Ausendung	gemäß EN 61000-6-2/EN 61000-6-4
Schutzart/Einbaulage	IP 20/siehe Dokumentation





## EL1002 | 2-Kanal-Digital-Eingangsklemme 24 V DC, 3 ms

Die digitale Eingangsklemme EL1002 erfasst die binären Steuersignale aus der Prozessebene und transportiert sie galvanisch getrennt zum übergeordneten Automatisierungsgerät. Digitale Eingangsklemmen der Serie EL100x verfügen über einen 3-ms-Eingangsfiler. Ihren Signalzustand zeigen die EtherCAT-Klemmen durch jeweils eine Leuchtdiode an.

Technische Daten	EL1002   ES1002
Anschluss technik	4-Leiter
Spezifikation	EN 61131-2, Typ 1/3
Anzahl Eingänge	2
Nennspannung	24 V DC (-15 %/+20 %)
Spannung „0“	-3...+5 V (EN 61131-2, Typ 3)
Spannung „1“	15...30 V (EN 61131-2, Typ 3)
Eingangsstrom	3 mA typ. (EN 61131-2, Typ 3)
Eingangsfiler	3,0 ms typ.
Distributed-Clocks	-
Stromaufn. Powerkontakte	typ. 2 mA + Last
Stromaufnahme E-Bus	90 mA typ.
Potenzialtrennung	500 V (E-Bus/Feldspannung)
Breite im Prozessabbild	2 Inputs
Konfiguration	keine Adress- oder Konfigurationseinstellung
Besondere Eigenschaften	4-Leiteranschluss
Gewicht	ca. 50 g
Betriebs-/Lagertemperatur	-25...+60 °C/-40...+85 °C
Relative Feuchte	95 % ohne Betauung
Schwingungs-/Schockfestigkeit	gemäß EN 60068-2-6/EN 60068-2-27
EMV-Festigkeit/-Ausendung	gemäß EN 61000-6-2/EN 61000-6-4
Schutzart/Einbaulage	IP 20/beliebig
Steckbare Verdrahtung	bei allen ESxxx-Klemmen
Zulassungen	CE, UL, Ex



## 2D/3D Laser-Profil Sensor, Typ LJ-V7080, Auszug

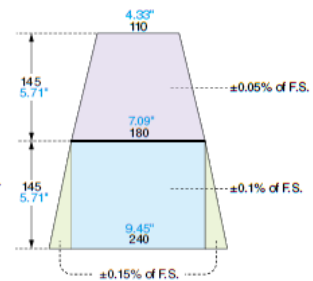
### Head/cable



#### Sensor head unit

Model		LJ-V7060K	LJ-V7060	LJ-V7080	LJ-V7200	LJ-V7300	
Mounting conditions		Specular reflection		Diffuse reflection			
Reference distance		54.6 mm 2.15"	60 mm 2.36"	80 mm 3.15"	200 mm 7.87"	300 mm 11.81"	
Measurement range	Z-axis (height)	±76 mm 2.99" (F.S.=15.2 mm 0.60")	±8 mm 0.31" (F.S.=16 mm 0.63")	±23 mm 0.91" (F.S.=46 mm 1.81")	±48 mm 1.89" (F.S.=96 mm 3.78")	±145 mm 5.71" (F.S.=290 mm 11.42")	
	X-axis (width)	NEAR side	8 mm 0.31"	13.5 mm 0.53"	25 mm 0.98"	51 mm 2.01"	110 mm 4.33"
		Reference distance	14 mm 0.55"	15 mm 0.59"	32 mm 1.26"	62 mm 2.44"	180 mm 7.09"
	Far side	8 mm 0.31"	15 mm 0.59"	39 mm 1.54"	73 mm 2.87"	240 mm 9.45"	
Light source		Blue semiconductor laser					
Wavelength		405 nm (visible beam)					
Laser class		Class 2 Laser Product	Class 2M Laser Product <sup>*10</sup>	Class 2 Laser Product			
Laser class IEC60825-1 FDA(CDRH) Part 1040.10 <sup>*11</sup>							
Output		4.8 mW	10 mW	4.8 mW			
Spot shape (reference distance)		Approx. 21 mm 0.83" x 45 µm 1.77 Mil		Approx. 48 mm 1.89" x 48 µm 1.89 Mil	Approx. 90 mm 3.54" x 85 µm 3.35 Mil	Approx. 240 mm 9.45" x 610 µm 24.02 Mil	
Repeatability <sup>*1</sup>	Z-axis (height) <sup>*2</sup>	0.4 µm 0.02 Mil		0.5 µm 0.02 Mil	1 µm 0.04 Mil	5 µm 0.20 Mil	
	X-axis (width) <sup>*3</sup>	5 µm 0.20 Mil		10 µm 0.39 Mil	20 µm 0.79 Mil	60 µm 2.36 Mil	
Linearity	Z-axis (height) <sup>*4</sup>	±0.1% of F.S.				±0.05 to <sup>*5</sup> ±0.15% of F.S.	
Profile Data interval	X-axis (width)	20 µm 0.79 Mil	50 µm 1.97 Mil	100 µm 3.94 Mil	300 µm 11.81 Mil		
Sampling cycle (trigger interval) <sup>*6</sup>		Top speed: 16 µs (high-speed mode) Top speed: 32 µs (advanced function mode)					
Temperature characteristics		0.01% of F.S./°C					
Environmental resistance	Enclosure rating <sup>*7</sup>	IP67 (IEC60529)					
	Ambient operating illuminance <sup>*8</sup>	Incandescent lamp: 10000 lux max					
	Ambient temperature <sup>*9</sup>	0 to +45°C 32 to 113°F					
	Operating Ambient humidity	20 to 85% RH (No condensation)					
	Vibration resistance	10 to 57 Hz, 1.5 mm 0.06" double amplitude in X, Y, and Z directions, 3 hours respectively					
Impact resistance	15 G/6 msec						
Material		Aluminum					
Weight		Approx. 450 g	Approx. 400 g	Approx. 550 g	Approx. 1000 g		

- \*1 This value is from a case in which measurement has been performed with a reference distance at an average frequency of 4096 times.
- \*2 The measurement targets are KEYENCE standard targets (white diffuse objects). This value is from a case in which the average height of the default setting area has been measured in height mode. All other settings are default.
- \*3 The measurement target is a pin gauge. This value is from a case in which the position of the intersection between the rounded surface of the pin gauge and the edge level has been measured in position mode. All other settings are default.
- \*4 The measurement targets are KEYENCE standard targets (white diffused objects). The profile data is from a case in which measurement has been performed with 64x smoothing and 8x averaging. All other settings are default.
- \*5 The linearity will differ depending on the measurement area. (See the diagram on the right.)
- \*6 When the measurement area is at its minimum, binning is ON, image capture mode is set to standard, and parallel image capture is ON in high-speed mode. All other settings are default.  
When the measurement area is at its minimum, binning is ON and image capture mode is set to standard in advanced function mode. All other settings are default.
- \*7 This value is from a case in which the head cable (CB-B\*) or extension cable (CB-B\*E) has been connected.
- \*8 When measuring white paper, this is the illuminance for the light-receiving surface of the sensor head when light has been shined onto white paper.
- \*9 Use the sensor head after first mounting it on a metal plate.
- \*10 Viewing the laser output with certain optical instruments (for example, eye loupes, magnifiers and microscopes) within a distance of 100 mm 3.94" may pose an eye hazard.
- \*11 The laser classification for FDA (CDRH) is implemented based on IEC60825-1 in accordance with the requirements of Laser Notice No.50.



#### Cables

Model	CB-B3	CB-B10	CB-B5E	CB-B10E	CB-B20E
Cable type	Head cable		Extension cable		
Cable length	3 m 9.8'	10 m 32.8'	5 m 16.4'	10 m 32.8'	20 m 65.6'
Minimum bend radius	22 mm 0.87"				
Enclosure rating <sup>*1</sup>	IP67 (IEC60529)				
Material (outer covering)	PVC				
Weight	Approx. 250 g	Approx. 750 g	Approx. 400 g	Approx. 800 g	Approx. 1500 g

- \*1 This value is from a case in which the sensor head has been connected. However, the controller side connector is not included.
- Regarding cable extension between the head and controller: Up to 2 cables can be connected with the CB-B\*E, and these cables should be kept to a total length of 30 m 98.4' or less.

## Permanent Magnet Hysterese Bremse PMK 0,05



### Einsatzgebiete / Anwendungen

- Textilindustrie Fadenbremse
- Sondereinsätze

### Vorteile und Eigenschaften

- Bremse werkzeuglos zehnstufig einstellbar
- Völlig verschleiß- und wartungsfrei
- Kein Betriebsstrom notwendig
- Einstellbare und voreingestellte Versionen
- Reproduzierbare Einstellung der Bremskraft
- Hohe Laufruhe auch bei niedrigen Drehzahlen
- Strapazierfähig und langlebig
- Kostengünstige und kompakte Bauform
- Preiswert durch Spritzgussgehäuse
- Sonderlösungen auf Anfrage

Hauptmerkmale	Werte
Einbaulänge	56 mm
Innendurchmesser	10 mm
Durchmesser Laufbuchse	38 mm
Anzahl der Rasten	10
Material Kunststoff grau	PA6 GF 25
Material Kunststoff schwarz	PA66 GF25H

### Standard

- Einstellbar
- Einstellkappe hellgrau, Korpus in Schwarz
- Befestigung durch Klemmverschluss

Daten	Werte
Min. Drehmoment	0,008 Nm
Max. Drehmoment	0,05 Nm
Max. zulässige Drehzahl	4000 min <sup>-1</sup>
Gewicht	0,08 kg
Max. Umgebungstemperatur	-30 bis 40°C
Zulässige Leistung	10 W
Toleranzbereich	+/- 10 %

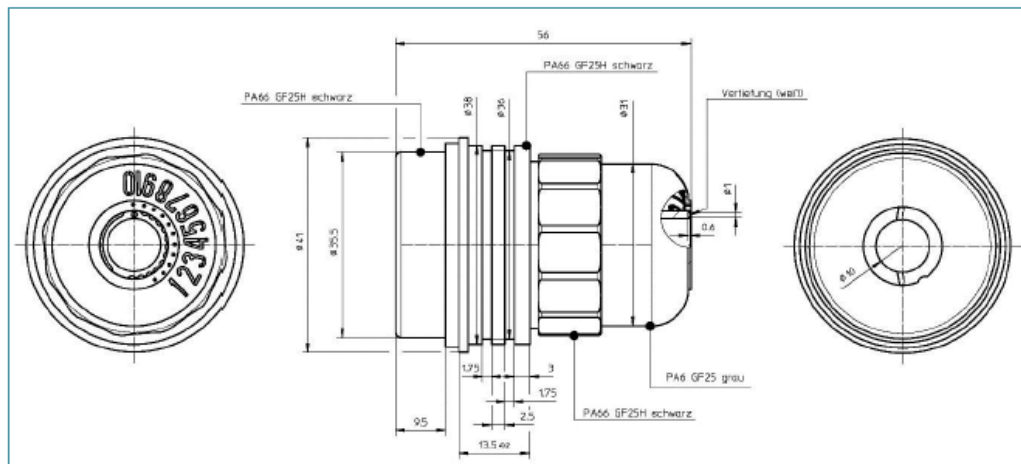
### Sonderlösungen

- Nicht einstellbar
- Spezialkunststoffe
- Laufbuchse für Riemenscheibe
- Laufbuchse für Zahnrad
- Weitere Optionen

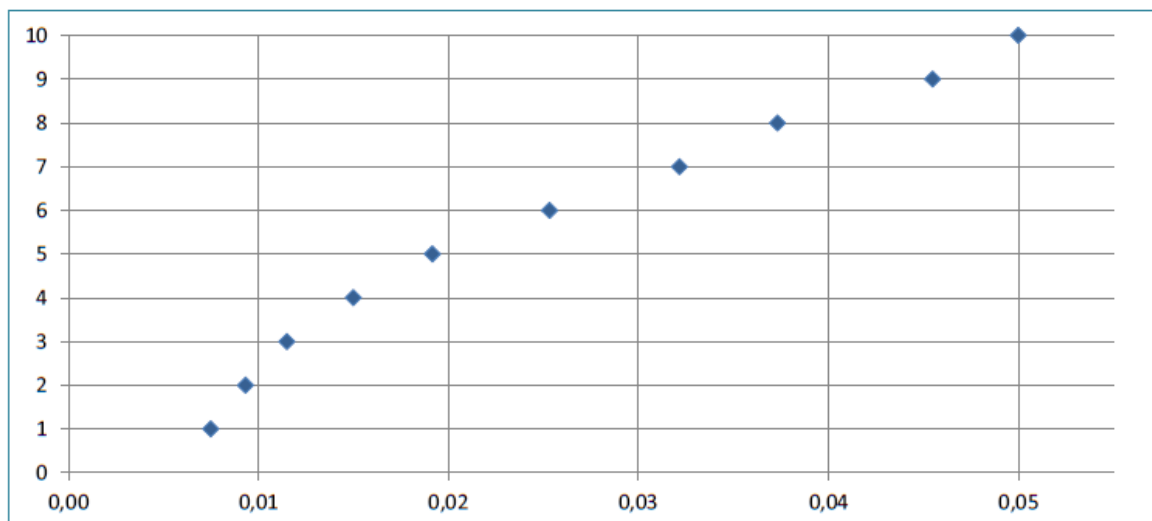
## Technisches Datenblatt

## Permanent Magnet Bremsen

## Maßzeichnung



## Drehmomentkennlinie



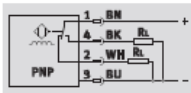
Die Zeichnungen und Daten dienen lediglich der Kundeninformation, für konkrete Anwendungsfälle ist ein gesondertes Angebot einzuholen.  
 Die Kern Antriebstechnik GmbH zeichnet sich nicht verantwortlich für mögliche Fehler in den Datenblättern.  
 Technische Änderungen vorbehalten.

## Näherungsschalter SIES, induktiv

FESTO

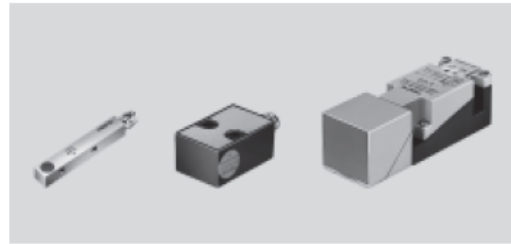
Datenblatt – Normschaltabstand, Sonderbauform

Funktion<sup>1)</sup>



1) z.B. Antivalent mit PNP-Ausgang und Klemmen

- Normschaltabstand
- für Gleichspannung
- quaderförmige Bauform



Allgemeine Technische Daten	
Entspricht Norm	EN 60947-5-2
Zulassung	c UL us - Listed (OL) RCM Mark
CE-Zeichen (siehe Konformitätserklärung)	nach EU-EMV-Richtlinie <sup>1)</sup>
Werkstoff-Hinweis	Kupfer- und PTFE-frei, RoHS konform

1) Bitte entnehmen Sie den Nutzungsbereich der EG-Konformitätserklärung: [www.festo.com/sp](http://www.festo.com/sp) → Zertifikate.  
Im Falle von Nutzungsbeschränkungen der Geräte in Wohn-, Geschäfts- und Gewerbebereichen, sowie Kleinbetrieben, können weitere Maßnahmen zur Reduzierung der Störaussendung erforderlich sein.

Eingangssignal / Messelement						
Typ		SIES-Q5	SIES-Q8	SIES-V3	SIES-QB	SIES-Q40
Baugröße	[mm]	5x5x25	8x8x40	15x20x30	12x26x40	40x40x120
Umgebungstemperatur	[°C]	-25 ... +70		-25 ... +85		

Ausgang, allgemein						
Typ		SIES-Q5	SIES-Q8	SIES-V3	SIES-QB	SIES-Q40
Baugröße	[mm]	5x5x25	8x8x40	15x20x30	12x26x40	40x40x120
Wiederholgenauigkeit	[mm]	0,04	0,07	0,1	0,1	0,75

Schaltausgang						
Typ		SIES-Q5	SIES-Q8	SIES-V3	SIES-QB	SIES-Q40
Baugröße	[mm]	5x5x25	8x8x40	15x20x30	12x26x40	40x40x120
Schaltausgang		PNP NPN		PNP NPN	-	PNP -
Schaltelementfunktion		Schließer Öffner		Schließer -	Öffner	Antivalent
Bemessungsschaltabstand	[mm]	0,8	1,5	2		15
Gesicherter Schaltabstand	[mm]	0,64	1,2	1,6		12
Reduktionsfaktoren						
Aluminium		0,4	0,45	0,45		0,3
Edelstahl St 18/8		0,7	0,8	0,7	0,8	0,7
Kupfer		0,3	0,4	0,3	0,35	0,25
Messing		0,4	0,55	0,5		0,3
Stahl St 37		1,0		1,0		1,0
Max. Schaltfrequenz DC	[Hz]	3000	3500	1200		100
Max. Ausgangsstrom	[mA]	200		-		-
Max. Ausgangsstrom bei ≤ 50 °C	[mA]	-		200		200
Max. Ausgangsstrom bei ≤ 85 °C	[mA]	-		150		150
Spannungsfall	[V]	≤ 2		≤ 3,2		≤ 3,5

## Näherungsschalter SIES, induktiv

FESTO

Datenblatt – Nomschaltabstand, Sonderbauform

Ausgang, weitere Daten	
Kurzschlussfestigkeit	taktend

Elektronik					
Typ	SIES-Q5	SIES-Q8	SIES-V3	SIES-QB	SIES-Q40
Baugröße [mm]	5x5x25	8x8x40	15x20x30	12x26x40	40x40x120
Betriebsspannungsbereich [V DC]	10 ... 30				10 ... 34
Restwelligkeit [%]	10				
Leerlaufstrom [mA]	≤ 10			≤ 30	
Verpolungsschutz	für alle elektrischen Anschlüsse				

Elektromechanik					
Elektrischer Anschluss	Kabel			Stecker	
Typ	SIES-Q5	SIES-Q8	SIES-QB	SIES-Q8	SIES-V3
Baugröße [mm]	5x5x25	8x8x40	12x26x40	8x8x40	15x20x30
Elektrischer Anschluss	Kabel, 3-adrig			Stecker, M8x1, 3-polig	
Kabellänge [m]	2,5			-	
Werkstoffinformation Kabelmantel	TPE-U (PUR)			-	

Mechanik					
Typ	SIES-Q5	SIES-Q8	SIES-V3	SIES-QB	SIES-Q40
Baugröße [mm]	5x5x25	8x8x40	15x20x30	12x26x40	40x40x120
Befestigungsart	mit Innengewinde			mit Durchgangsbohrung	
Einbauart	bündig			bündig	
Produktgewicht [g]	22	15	120	170	230
Werkstoffinformation Gehäuse	Messing vernickelt	Zink-Druckguss, verchromt	Zink-Druckguss	PBT-verstärkt	PBT, PA

Anzeige/Bedienung					
Typ	SIES-Q5	SIES-Q8	SIES-V3	SIES-QB	SIES-Q40
Baugröße [mm]	5x5x25	8x8x40	15x20x30	12x26x40	40x40x120
Betriebsbereitschaftsanzeige	-				
Schaltzustandsanzeige	LED gelb				

Immission/Emission					
Typ	SIES-Q5	SIES-Q8	SIES-V3	SIES-QB	SIES-Q40
Baugröße [mm]	5x5x25	8x8x40	15x20x30	12x26x40	40x40x120
Schutzart	IP67				

Steckerbelegung nach EN 60947-5-2			
M8x1, 3-polig			
Schließer/Öffner			
	Pin	Aderfarbe	Belegung
	1	Braun	+
	3	Blau	-
	4	Schwarz	Ausgang

## Nahrungsschalter SIES, induktiv

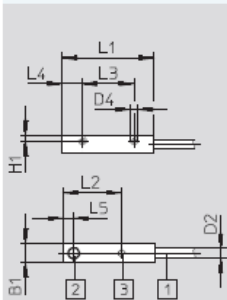
Datenblatt – Normschaltabstand, Sonderbauform

FESTO

### Abmessungen

SIES-Q5B

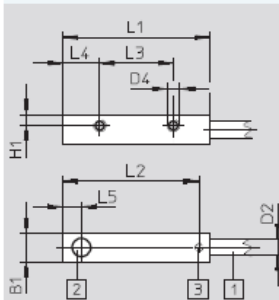
Kabel



- 1 3 adriges Kabel 2,5 m lang
- 2 aktive Flache
- 3 1 Schaltzustandsanzeige gelb

SIES-Q8B

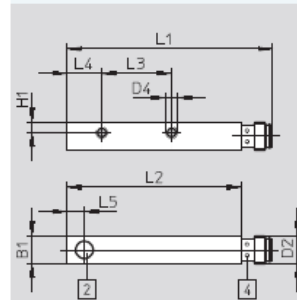
Kabel



- 1 3 adriges Kabel 2,5 m lang
- 2 aktive Flache
- 3 1 Schaltzustandsanzeige gelb

Download CAD-Daten → [www.festo.com](http://www.festo.com)

Stecker



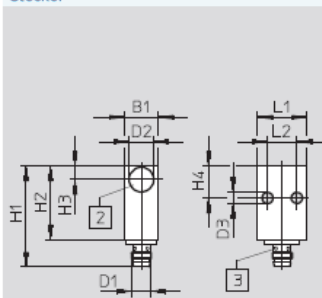
- 2 aktive Flache
- 4 4 Schaltzustandsanzeigen gelb

Typ	B1	D2 ∅	D2	D4	H1	L1	L2	L3	L4	L5
SIES-Q5B-...-K-L	5	2,5	–	M1,6	1,5	25	16	14	5,5	3
SIES-Q8B-...-K-L	8	3,5	–	M3	3	40	37	20	10	5
SIES-Q8B-...-S-L	8	–	M8x1	M3	3	59	50	20	10	5

### Abmessungen

SIES-V3B

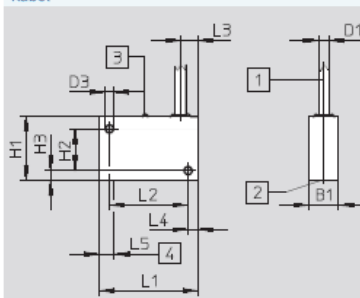
Stecker



- 2 aktive Flache
- 3 4 Schaltzustandsanzeigen gelb

SIES-QB

Kabel



- 1 3 adriges Kabel 2,5 m lang
- 2 aktive Flache
- 3 1 Schaltzustandsanzeige gelb
- 4 Sensormitte

Download CAD-Daten → [www.festo.com](http://www.festo.com)

Typ	B1	D1 ∅	D1	D2 ∅	D3 ∅	H1	H2	H3	H4	L1	L2	L3	L4	L5
SIES-V3B-...-S-S-L	15	–	M8x1	10	4,5	42	30	5,5	13	20	12	–	–	–
SIES-QB-P-...-K-L	12	4,5	–	–	3,2	26	17	4	–	40	32	6,5	4	6

**A 3: Tabelle Vertrauensniveau**Tabelle 0-1: Parameter t in Abhängigkeit von n und  $\gamma$ , [Pap11]

Anzahl der Messwerte n	Vertrauensniveau			
	$\gamma = 68,3 \%$	$\gamma = 90 \%$	$\gamma = 95 \%$	$\gamma = 99 \%$
2	1,84	6,31	12,71	63,66
3	1,32	2,92	4,30	9,93
4	1,20	2,35	3,18	5,84
5	1,15	2,13	2,78	4,60
6	1,11	2,02	2,57,	4,03
7	1,09	1,94	2,45	3,71
8	1,08	1,90	2,37	3,50
9	1,07	1,86	2,31	3,36
10	1,06	1,83	2,26	3,25
15	1,04	1,77	2,14	2,98
20	1,03	1,73	2,09	2,86
30	1,02	1,70	2,05	2,76
50	1,01	1,68	2,01	2,68
100	1,00	1,66	1,98	2,63
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
$\infty$	1,00	1,65	1,69	2,58

**A 4: Programmcode (Auszug)**

```
METHOD Init : BOOL
```

```
VAR_INPUT
END_VAR
VAR
END_VAR
```

---

```
MLIMot.Init(TRUE);
outMLI1Absenken := FALSE;
outMLI1Anheben := TRUE;
LegenStatus := FALSE ;
Magazin_Leer := FALSE;
MLI_erfasst := FALSE;
outFoerdereinheit13Oeffnen := FALSE;
outFoerdereinheit13Schliessen := TRUE;
(* outFoerdereinheit24Oeffnen := FALSE;
outFoerdereinheit24Schliessen := TRUE; *)
MLI_Init := FALSE ;
MLI_Vorbereiten :=TRUE;
Mot_Pos_Kontroll := MLIMot._Axis.NcToPlc.ActPos; (* fuer Abbruchbedingung
beim Initialisieren *)
```

---

```
METHOD Vorbereiten
```

```
VAR_INPUT
END_VAR
```

---

```
(* while_Zaehler := while_Zaehler + 1 ; *) (* Zur Kontrolle, ob zyklisch
durchlaufen *)
IF MLI_vorbereiten THEN
    MLIMot.MoveVelocity(20);
    MLI_Trig_Foerdern( CLK := Main.MLI[1].Sensoren.inMLI1Positioniert) ;
    IF MLI_Trig_Foerdern.Q AND NOT MLI_erfasst THEN
        MLI_Position_Neu := MLIMot._Axis.NcToPlc.ActPos ;
        MLI_erfasst := TRUE;
    END_IF
    IF MLI_erfasst THEN
        IF MLIMot._Axis.NcToPlc.ActPos < (MLI_Position_Neu + 53) THEN
            while_Zaehler := while_Zaehler + 1 ; (* Zur Kontrolle, ob
zyklisch durchlaufen *)
            MLIMot.MoveVelocity(20);
        ELSE
            MLI_Init := TRUE ;
            MLI_vorbereiten := FALSE;
            MLIMot.Stop();
        END_IF
    END_IF
    IF MLIMot._Axis.NcToPlc.ActPos > Mot_Pos_Kontroll + 150 THEN
        MLIMot.Stop();
        MLI_Init := FALSE ;
        MLI_vorbereiten := FALSE;
        Magazin_leer := TRUE;
    END_IF
END_IF
```

---



```
METHOD Reset : BOOL
VAR_INPUT
END_VAR
```

---

```
Stop();
outMli1Absenken := FALSE;
outMli1Anheben := TRUE;
LegenStatus := FALSE;
Magazin_Leer := FALSE;
Mli_erfasst := FALSE;
outFoerdereinheit13Oeffnen := FALSE; (*aus Materialbevorratung kopiert*)
outFoerdereinheit13Schliessen := TRUE; (*aus Materialbevorratung kopiert*)
(* outFoerdereinheit24Oeffnen := FALSE; (*aus Materialbevorratung kopiert*)
outFoerdereinheit24Schliessen := TRUE; (*aus Materialbevorratung kopiert*)
*)
Mli_Init := FALSE;
Mli_Vorbereiten :=FALSE;
```

---

```
FUNCTION_BLOCK FB_Kuka
VAR_INPUT
    enable : BOOL; (* True - Operationen sind erlaubt *)
END_VAR
VAR_OUTPUT
    error : INT; (* @1:Fehlerstatus *)
    status : DINT;
END_VAR
VAR
    outStatus AT %Q* : BYTE;
    outMBefehleQuittungen AT % Q * : DWORD;
    outParam1 AT %Q* : DINT;
    outParam2 AT %Q* : DINT;
    outParam3 AT %Q* : DINT;

    inStatus AT %I* : BYTE;
    inMBefehle AT %I* : WORD;
    inPosX AT %I* : DINT; (* .XXX mm *)
    inPosY AT %I* : DINT; (* .XXX mm *)
    inPosZ AT %I* : DINT; (* .XXX mm *)
    inPosA AT %I* : INT; (* .XXX mm *)
    inPosB AT %I* : INT; (* .XXX mm *)
    inPosC AT %I* : INT; (* .XXX mm *)

    inParam1 AT %I*: DINT;
    inParam2 AT %I* : DINT;
    inParam3 AT %I* : DINT;

    inKukaCNCStatus AT %I* : DWORD;
    inEinrichteFlags AT %I* : BYTE;
    Quittungszeit : TIME := T#100MS;

    M130Trig : R_TRIG;
    M130Puls : TP;

    KukaStatusModeOp : INT;
    KukaStatusBereit : BOOL;
    KukaStatusError : BOOL;
    KukaStatusCNCRunning : BOOL;

    cycleWait102 : BOOL;

    M110Trig: R_TRIG;
```

---

```
M110Puls: TP;
M111Trig: R_TRIG;
M111Puls: TP;
END_VAR
```

---

```
(*// gemeinsam genutzte Befehle*)
(*// M102 Schneiden Start////////////////////////////////////*)
M102Trig(CLK:= inMBefehle.1);
IF M102Trig.Q THEN
    // M102
    Main.Foerderer[1].schneiden();
    Main.Foerderer[2].schneiden();
    Main.Foerderer[3].schneiden();
    Main.Foerderer_M.schneiden();
    M102Puls(in:=FALSE);
    outMBefehleQuittungen.2 := FALSE;
    outMBefehleQuittungen.3 := FALSE;
    MSGList2[19] := TRUE;
    cycleWait102 := FALSE;
END_IF
IF cycleWait102 AND inMBefehle.1 AND Main.Foerderer[1].isAbgeschnitten
    AND Main.Foerderer[2].isAbgeschnitten
    AND Main.Foerderer[3].isAbgeschnitten
    AND Main.Foerderer_M.isAbgeschnitten THEN
    M102Puls(in:=TRUE, PT:=Quittungszeit);
    outMBefehleQuittungen.2 := TRUE;
    MSGList2[19] := FALSE;
ELSE
    //MSGList2[19] := TRUE;
    cycleWait102 := TRUE;
END_IF
M102Puls();
outMBefehleQuittungen.2 := M102Puls.Q;
(*////////////////////////////////////*)
(*// M103 Schneiden (Stop) //////////////////////////////////*)
M103Trig(CLK:= NOT inMBefehle.1);
IF M103Trig.Q THEN
    (* M103 *)
    M103Puls(in:=FALSE);
    M103Puls(in:=TRUE, PT:=Quittungszeit);
    outMBefehleQuittungen.3 := TRUE;
    outMBefehleQuittungen.2 := FALSE;
END_IF
M103Puls();
outMBefehleQuittungen.3 := M103Puls.Q;
(*////////////////////////////////////*)
(*// M104 Parametersatz 1////////////////////////////////////*)
M104Trig(CLK:= inMBefehle.2);
IF M104Trig.Q THEN
    (* M104 *)
    Main.Foerderer[1].setSollDruckAndruckrolle(inParam3/10.0);
    Main.Foerderer[2].setSollDruckAndruckrolle(inParam3/10.0);
    Main.Foerderer[3].setSollDruckAndruckrolle(inParam3/10.0);
    Main.Foerderer_M.setSollDruckAndruckrolle(inParam3/10.0);

    M104Puls(in:=FALSE);
END_IF
IF inMBefehle.2 THEN
    M104Puls(in:=TRUE, PT:=Quittungszeit);
    outMBefehleQuittungen.4 := TRUE;
    outMBefehleQuittungen.5 := FALSE;
```

```
END_IF
M104Puls();
outMBefehleQuittungen.4 := M104Puls.Q;
(*////////////////////*)
(*// M105 (Parametersatz2)////////////////////*)
M105Trig(CLK:= NOT inMBefehle.2);
IF M105Trig.Q THEN
  // M105
  M105Puls(in:=FALSE);
  outMBefehleQuittungen.5 := TRUE;
  outMBefehleQuittungen.4 := FALSE;
  M105Puls(in:=TRUE, PT:=Quittungszeit);
END_IF

M105Puls();
outMBefehleQuittungen.5 := M105Puls.Q;

(*////////////////////*)
M110Trig(CLK:= inMBefehle.5);
IF M110Trig.Q THEN
  (* M110 *)
  Main.MLI[1].Legen();
  (* M110 *)
  M110Puls(in:=FALSE);
  outMBefehleQuittungen.10 := TRUE;
  outMBefehleQuittungen.11 := FALSE;
  M110Puls(in:=TRUE, PT:=Quittungszeit);
END_IF

M110Puls();
outMBefehleQuittungen.10 := M110Puls.Q;
(*////////////////////*)
M111Trig(CLK:= NOT inMBefehle.5);
IF M111Trig.Q THEN
  (* M111 *)

  (* kein Inhalt *)

  (* M111 *)
  M111Puls(in:=FALSE);
  outMBefehleQuittungen.11 := TRUE;
  outMBefehleQuittungen.10 := FALSE;
  M111Puls(in:=TRUE, PT:=Quittungszeit);
END_IF

M111Puls();
outMBefehleQuittungen.11 := M111Puls.Q;
```

---

```
METHOD Legen
VAR_INPUT
END_VAR
```

---

```
IF NOT Magazin_Leer THEN
  M110_TCP_Pos := Main.Kuka.inPosY ;
  LegenStatus := TRUE ;
  MLI_Position := MLI_Position_Neu ;
  MLI_Position_Neu := MLI_Position + Fix3_MLI_Abst ;
  MLI_erfasst := FALSE ;
END_IF
```

---

```
FUNCTION_BLOCK FB_MLI
VAR_INPUT
    enable : BOOL;    (* True - Operationen sind erlaubt *)
END_VAR

VAR_OUTPUT
    error : INT ;    (* @1:Fehlerstatus *)
    status : DINT;
END_VAR

VAR
    inPositionAktRoh AT %I* : UDINT ;           (* Position_Rohdaten *)
    inStatusWort AT %I* : WORD ;
    inSchleppfehler AT %I* : DINT ;           (* aktueller Schleppfehler *)
    outKontrollWort AT %Q* :WORD ;
    outPositionZielRoh AT %Q* : UDINT ;       (* Zielposition_Rohdaten *)
    StatusSOLL : WORD ;    (* aus = 0, ausführen = 16#0f , reset = 16#80 *)
    DrehzahlMotSOLL : REAL ;                (* Umdrehungen pro Minute *)
    flagReadyToSwitchOn : BOOL;
    flagSwitchedOn : BOOL;
    flagOperationEnabled : BOOL;
    flagFault : BOOL;
    flagQuickStopInvers : BOOL;
    flagSwitchOnDisabled : BOOL;
    flagWarning : BOOL;
    flagToggle : BOOL;
    flagInternalLimitActive : BOOL;
    flagTargetValueIgnored : BOOL;
    stateMachineErg : BOOL ;

    (* Verknüpfungen *)
    MLIMot : FB_Achse ;                       (* Zugriff *)
    Sensoren : FB_Sensoren;
    _UnlockBrake : FB_UnlockBrake_7211;
    MLITrig : R_TRIG ;
    outMLI1Absenken AT %Q* : BOOL;           (* Klemme 124 *)
    outMLI1Anheben AT %Q* : BOOL;          (* Klemme 124 *)
    outFoerdereinheit13Oeffnen AT %Q* : BOOL; (* MLI_1-Schwinge *)
    outFoerdereinheit13Schliessen AT %Q* : BOOL; (* MLI_1-Schwinge *)
    outFoerdereinheit24Oeffnen AT %Q* : BOOL; (* MLI_2-Schwinge *)
    outFoerdereinheit24Schliessen AT %Q* : BOOL; (* MLI_2-Schwinge *)
    MLI_Trig_Foerdern : R_Trig ;

    (* Zustandsvariablen *)
    while_Zaehler : UDINT ;                 (* Kontrollzähler *)
    Mot_Pos_Kontroll : LREAL ;              (* fuer Abbruchbedingung *)
    runningMLI : BOOL ;
    MLI_Init : BOOL ;
    MLI_vorbereiten : BOOL :=FALSE;

    (* Funktionsvaribalen *)
    inMLI1Positioniert : BOOL ;
    LegenStatus : BOOL := FALSE ;
    Magazin_Leer : BOOL ;
    MLI_erfasst : BOOL ;
    Q: BOOL;

    (* Geometrie *)
    Fix1_Abst_Sensor : INT := 82 ;         (* Abstand zwischen aktiver
Flanke und Ablegeline in [mm] *)
    Fix2_MLI_Laenge : INT := 26 ;        (* Länge des verwendeten MLI-
Bleches in [mm] *)
```

## Anhang

---

```
Fix3_MLI_Abst : INT := 60 ; (* Abstand zwischen zwei MLI
auf dem Traeger *)
Fix4_Abst_Andruckrolle : INT := 411 ; (* Abstand TCP zur Ablegeline *)
M110_TCP_Korrektur : LREAL := -8 ; (* .XXX mm mit 11.5
16.5mm hinter Lückenanfang *)

(* Erfassung *)
MLI_Position : LREAL ;
MLI_Position_Neu : LREAL ; (* Akt. Mot.pos., wenn
Signal=1 , VORHERIGES MLI-Blech *)
MLI_Soll_Pos : DINT ; (* .XXX mm *)
M110_TCP_Pos : DINT ; (* .XXX mm *)

(* Einbindungsvariablen *)
Fix10_Sicherheit : INT := 5 ; (* Sicherheitsförderung in
[mm], damit Ablegeline vollständig über MLI-Blech verfahren wird, EINBINDUNG
für Laserscanner *)

(*Kontrolle*)
AktGeschw : LREAL ;
END_VAR
```

---

```
stateMachine(inStatusWort) ;
flagReadyToSwitchOn := inStatusWort.0;
flagSwitchedOn := inStatusWort.1;
flagOperationEnabled := inStatusWort.2;
flagFault := inStatusWort.3;
flagQuickStopInvers := inStatusWort.5;
flagSwitchOnDisabled := inStatusWort.6;
flagWarning := inStatusWort.7;
flagToggle := inStatusWort.10;
flagInternalLimitActive := inStatusWort.11;
flagTargetValueIgnored := inStatusWort.12;

(*////////////////////MLI-Legprozess////////////////////*)
MLIMot(enable := enable) ;
_UnlockBrake() ;

Vorbereiten();

IF LegenStatus AND Main.Kuka.inPosY > M110_TCP_Pos + (Fix4_Abst_Andruckrolle
- (Fix3_MLI_Abst - Fix2_MLI_Laenge - Fix10_Sicherheit)+
M110_TCP_Korrektur)*1000 THEN
    LegenAN() ;
    ELSE LegenAUS() ;
END_IF
```

---

```
METHOD LegenAN
VAR_INPUT
END_VAR
VAR
    CalcActVelo: INT;
END_VAR
```

---

```
IF outMLI1Absenken = FALSE THEN
    absenken() ;
END_IF
```

```
IF MLIMot._Axis.NcToPlc.ActPos < MLI_Position_Neu + (Fix1_Abst_Sensor -
(Fix3_MLI_Abst - (Fix2_MLI_Laenge + Fix10_Sicherheit))) THEN
    MLIMot.MoveVelocity( Main.Kuka.inBahnVelocity/1000.0 ) ;
    IF MLI_erfasst = FALSE THEN
        AbfrageSensor() ;
    END_IF
ELSE
    LegenStatus := FALSE ;
    IF NOT MLI_erfasst THEN
        Magazin_leer := TRUE ;
    END_IF
END_IF
```

---

```
METHOD AbfrageSensor
```

```
VAR_INPUT
```

```
END_VAR
```

```
VAR
```

```
END_VAR
```

---

```
MLI_Trig_Foerdern( CLK := Main.MLI[1].Sensoren.inMLI1Positioniert) ;
```

```
IF MLI_Trig_Foerdern.Q THEN
```

```
    MLI_Position_Neu := MLIMot._Axis.NcToPlc.ActPos ;
```

```
    MLI_erfasst := TRUE;
```

```
END_IF
```

---

```
METHOD absenken : BOOL
```

```
VAR_INPUT
```

```
END_VAR
```

```
VAR
```

```
END_VAR
```

---

```
outMLI1Absenken := TRUE ;
```

```
outMLI1Anheben := FALSE ;
```

---

```
METHOD LegenAUS
```

```
VAR_INPUT
```

```
END_VAR
```

---

```
Stop () ;
```

```
anheben () ;
```

---

```
METHOD anheben : BOOL
```

```
VAR_INPUT
```

```
END_VAR
```

```
VAR
```

```
END_VAR
```

---

```
outMLI1Absenken := FALSE ;
```

```
outMLI1Anheben := TRUE ;
```

---

