

# Messeinrichtung zur Messung von Einzugskräften an Folienauflaufstellen

## Dokumentation

### Inhalt

<b>I.</b>	<b>Formelverzeichnis</b>	<b>2</b>
<b>1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
1.1	Übersicht	4
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1	Kurzzusammenfassung der Literaturstudie	5
2.2	Berechnungsmodelle für die Einzugskraft	6
2.2.1	Physikalische Grundlagen	6
2.2.2	Parameteruntersuchung	9
2.2.3	Kräfte am Einzugsspalt	11
<b>3</b>	<b>Methodik</b>	<b>13</b>
3.1	Messeinrichtung	13
3.1.1	Kraftmesszelle und Lineareinheit	14
3.1.2	Kontaktkörper	16
3.1.3	Anbringung der Messeinrichtung	17
3.1.4	Betrieb der Messeinrichtung	17
3.2	Messwerterfassung	18
3.3	Untersuchung (Messreihe)	18
<b>4</b>	<b>Auswertung</b>	<b>20</b>
4.1	Untersuchungsergebnisse	20
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>28</b>
<b>II.</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>30</b>
<b>III.</b>	<b>Voruntersuchungen</b>	<b>31</b>
a.	Reibungseigenschaften der Folien	32
b.	Manueller Auszug aus statischer Folienumschlingung	33
<b>IV.</b>	<b>Messprotokoll</b>	<b>36</b>

# I. Formelverzeichnis

$F_Z$	Zugkraft [N]
$F_H$	Haltekraft [N]
$\varphi$	Umschlingungswinkel [rad]
$\mu$	Reibungskoeffizient
$T$	Bahnspannung [N/mm]
$L$	Bahnbreite [m]
$F_N$	Normalkraft [N]
$r$	Radius [m]

# 1. Einleitung

Im Rahmen des IFA-Projektes 5161 wurde eine Messeinrichtung zur Untersuchung von Einzugskräften an Folienauflaufstellen entwickelt. Beauftragt wurde das Projekt vom Sachgebiet Maschinen der chemischen Industrie im Fachbereich Rohstoffe und chemische Industrie, Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie (BG RCI). Die Messeinrichtung stellt den frontalen Eingriff mit der oberen Extremität, respektive der menschlichen Hand, in eine Folienauflaufstelle, an einer nicht angetriebenen Bahnführungswalze, nach.

In der Produktionsstrecke von Folienmaschinen sind frei zugängliche Stellen, bei denen die Folie über eine Führungswalze läuft, üblich und häufig eine potentielle Gefahrenstelle. Es entsteht ein „[...] Einzugsspalt zwischen, rotierenden und flexiblen auflaufenden Teilen, in dem Körperteile zuerst erfasst, dann gequetscht und mitgerissen werden“ [Neudörfer 2014, S. 108]. Beim Eingriff kann das jeweilige Körperglied eingezogen werden, sodass mitunter ein selbstständiges Entfliehen nicht mehr möglich ist. Dies kann zu einer leichten bis schweren Verletzung führen. *Abbildung 1* zeigt an einem Beispiel, wie die Hand einer Person in eine Folienauflaufstelle gezogen wird und die Person den Not-Aus der Maschine möglicherweise nicht eigenständig erreichen kann.

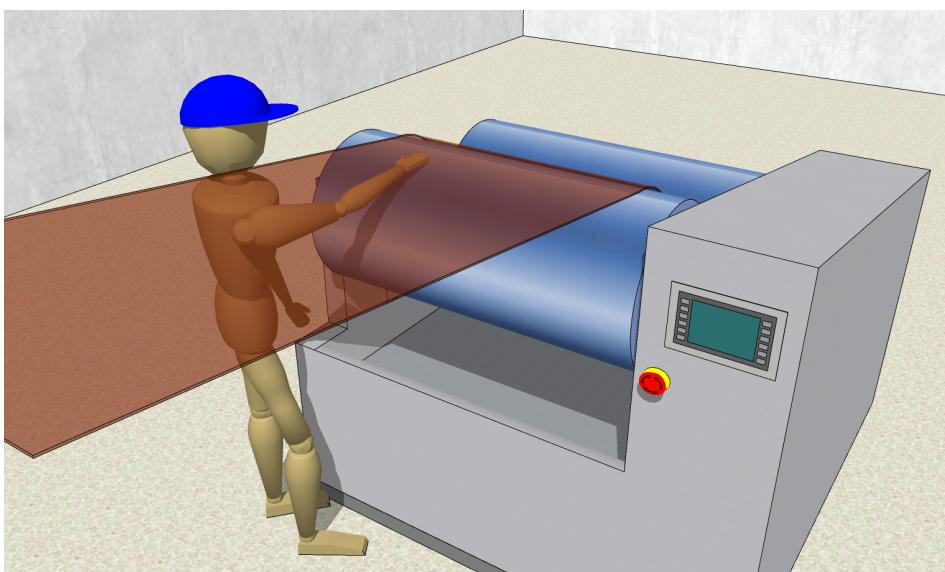


Abbildung 1: Einzugs situation in eine Folienauflaufstelle.

Aus der DIN EN 13418<sup>1</sup> geht bezüglich der Absicherung an Materialauflaufstellen bei nicht angetriebenen Umschlingungswalzen hervor, dass eine Absicherung nicht erforderlich sei, wenn die Walzen mit der Hand angehalten werden können und wenn keine Gefährdung durch die Eigenschaft des Materials (z.B. Kleben, Rauigkeit) bestehe. Anhang D der DIN EN ISO 11111<sup>2</sup> beschreibt, dass Auflaufstellen nicht abgesichert sein müssen, wenn die Walze von der Ware angetrieben wird, und die Walze einerseits mit der Hand gestoppt werden kann oder andererseits Maschinengrenzen eingehalten werden. So darf zum Beispiel der Umschlingungswinkel bei Webwaren nicht größer als 90° sein. Ebenfalls gibt es eine materialabhängige Eingrenzung der Geschwindigkeit sowie der Warenzugkraft (300 N/m bei Webwaren). Bezuglich der Gefährdung an Folienmaschinen gibt es normativ keine konkreten Aussagen, ab wann Auflaufstellen abgesichert sein müssen. Es gibt aktuell keine Grundlage, anhand derer die Einzugsgefahr an Folienauflaufstellen überprüft wird. Ob die einzuhaltenden Rahmenbedingungen bei Web- und Maschenwaren auch bei Folienwaren mit unkritischen Einzugskräften einhergehen, steht noch nicht fest.

Wie groß die Einzugsgefahr an einer Folienauflaufstelle in der betrieblichen Praxis tatsächlich ist, soll mit Hilfe einer Messeinrichtung untersucht werden. Dabei werden ein frontaler Eingriff nachgestellt und die

<sup>1</sup> DIN EN 13418:2013-08 Kunststoff- und Gummimaschinen – Wickelmaschinen für flache Bahnen - Sicherheitsanforderungen

<sup>2</sup> DIN EN ISO 11111-1:2016-12 Textilmaschinen – Sicherheitsanforderungen – Teil 1: Gemeinsame Anforderungen

auftretende Zugkraft erfasst. Neben der Gefahr von akuten Verletzungen durch den Einzug in eine Folienauflaufstelle zeigt das Unfallgeschehen, dass Maschinenbediener mit der oberen Extremität eingezogen wurden und sich nicht eigenständig aus dieser Situation befreien konnten. Zudem war in einem Fall die Betätigung der Not-Halt-Einrichtung, um die Maschine in den sicheren Zustand zu bringen, nicht möglich. Die Belastungsdauer kann ein Faktor bei der Entstehung von leichten Verbrennungen durch Reibung sein. Des Weiteren kann es bei einem schnellen Einzug, bei dem der Bediener die Kontrolle über die Bewegung verliert, dazu kommen, dass er gegen weitere Maschinenelemente gestoßen oder gedrückt wird.

Informationen darüber, welche Rahmenbedingungen (Bahnzugkräfte, Umschlingungswinkel etc.) zu einer Überschreitung kritischer Kraftgrenzen beim Eingriff führen, sind als Beurteilungsgrundlage für die entstehende Einzugsgefahr anzunehmen. Im Rahmen der Untersuchung wird der Fokus auf die Erfassung und Beurteilung von Einzugskräften gelegt. Die dadurch gewonnenen Erkenntnisse dienen der Einschätzung, welche Kraft eine Person aufbringen muss, um der Gefährdung durch Einzug eigenständig zu entfliehen.

Mit diesen grundlegenden Untersuchungen sollen Erkenntnisse darüber gewonnen werden, welche Kräfte an Folienauflaufstellen wirken. Diese können dann weiterführend bei der Gefährdungsbeurteilung an Folienauflaufstellen eingebracht werden. Eine vergleichbare Untersuchung wurde nach aktuellem Kenntnisstand bisher nicht durchgeführt.

## 1.1 Übersicht

Zu Beginn des Projektes wurde eine Literaturstudie durchgeführt, mit deren Hilfe eine Bewertung der Einzugsgefahr an Folienauflaufstellen erfolgen kann. Diese wird in Kapitel 2 der vorliegenden Publikation zusammengefasst.

Die Ermittlung der Einzugsgefahr erfolgt über die gemessene Einzugskraft. Um diese erfassen zu können, wurde eine Messeinrichtung entwickelt, deren Funktionsweise und Anwendung in Kapitel 3 beschrieben wird. Zudem wurde nach den Grundlagen, die aus der Literatur herausgearbeitet werden konnten, ein einfaches mathematisches Modell zur Berechnung von Einzugskräften erarbeitet. Des Weiteren wird die Anwendung der Messeinrichtung bei einem Hersteller für Folienmaschinen beschrieben. Dabei wurde die Funktionsweise der Messeinrichtung im praktischen Betriebsumfeld getestet.

Abschließend werden die Ergebnisse der Untersuchung dargestellt und diskutiert (Kapitel 4 und 5).

## 2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden zum einen Erkenntnisse aus der zuvor durchgeföhrten Recherche zusammenfassend dargestellt. Zum anderen wird die theoretische Grundlage für ein Modell zur Abschätzung von Einzugskräften wiedergegeben und der Einfluss einzelner Parameter untersucht.

### 2.1 Kurzzusammenfassung der Literaturstudie

Im Rahmen der Literaturstudie wurde für die Bewertung der Einzugsgefahr an Folienauflaufstellen folgender Ansatz verfolgt: Welche Kräfte können Personen aufbringen, um einem möglichen Einzug selbstständig zu entfliehen?

Die Gefährdung an Folienauflaufstellen kann nur dann erfolgreich beurteilt werden, wenn eine Einordnung der personenbezogenen Belastungsgrenzen erfolgt ist. Das Ziel der Literaturrecherche war es, einen geschlechterunabhängigen, bewegungsorientierten Kraftbereich einzugrenzen.<sup>3</sup> Der Fokus liegt dabei auf einer Zugbewegung der oberen Extremität zum Körper hin. Hier wird beispielhaft die Bewegungsausführung über Kopf betrachtet, da diese Position die maximale Erreichbarkeit begrenzt. Nach Berücksichtigung der ausgewählten Literatur ( $n = 5$ ) wird eine kritische Belastung für den Einzug ab Kräften, die größer als 150 N (bis max. 300 N) sind, eingeordnet [Das 2004, Wakula 2009, Chow 2015, Phillips 2015, LaDelfa 2019]. Dieser Bereich orientiert sich unter anderem an dem 15. Kraftperzentil für Frauen, bei einer Überkopftätigkeit, welche dem montagespezifischen Kräfteatlas entnommen werden kann [BGIA-Report, Wakula 2009]. Diese Belastungsgrenze dient lediglich der Einordnung der Gefährdung.

Ebenfalls sind Gefährdungen durch Verletzung von Strukturen der oberen Extremität zu berücksichtigen. So zeigt die Literatur, dass mögliche Verletzungen durch eine Quetschung und zunehmende Reibung auftreten und hinsichtlich der Schwere stark variieren können. Quetschverletzungen treten an Einzugsstellen zwischen zwei gegenläufigen Walzen auf, dabei wird ein Körperteil stark verformt. Besonders bei Walzenquetschungen ist das betroffene Körperteil gleichzeitig Druck- und Zugkräften, sowie Reibung ausgesetzt [Neudörfer 2014, Sanguinetti 1978]. Die Verletzungsschwere ist stark abhängig von der Gestalt der Einzugsstelle, weshalb bei Folienauflaufstellen das Risiko schwerwiegender Verletzungen gegebenenfalls reduziert sein kann. Aufgrund der Komplexität der Mechanismen, die zu einer Verletzung führen, wird im Rahmen der Untersuchung nicht detaillierter darauf eingegangen.

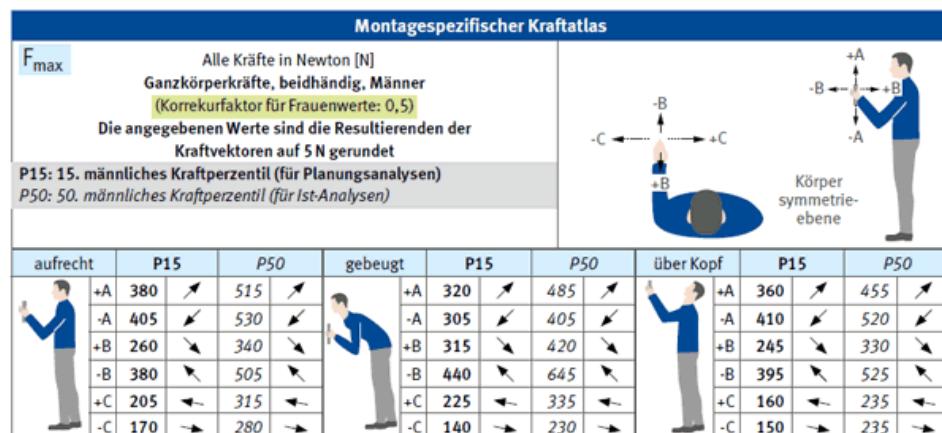


Abbildung 2: Auszug aus dem montagespezifischen Kräfteatlas. Dieser listet statische Aktionskräfte abhängig der Körperhaltung und Richtung der Kraftaufbringung auf.

Neben der Recherche personenbezogener Kraftgrenzen werden ebenfalls die technischen Grenzen von Folienauflaufstellen herausgearbeitet. Diese lassen sich unter vereinfachten Annahmen realitätsnah beschreiben. Funktionelle Grenzen der zu untersuchenden Folienauflaufstelle können damit festgelegt werden. Aus der Literatur kann herausgearbeitet werden, dass insbesondere die Folienumschlingung, die

<sup>3</sup> Beurteilung von Auflaufstellen - Literaturstudie, August 2024

Bahnzugkraft bzw. Bahnspannung und die effektive Haftreibung zwischen Folie und Walze den idealen Transport einer Folienbahn über eine Bahnführungswalze bestimmen. Diese Faktoren beeinflussen den Kraftschluss, der an nicht-angetriebenen Führungswalzen notwendig ist, und sind damit für die Abschätzung der Einzugskraft an Folienauflaufstellen zu berücksichtigen. In der Realität sind Grenzschichten zwischen Bahn und Walze, welche sich durch eine dünne Luftsicht ausbilden, meist nicht ganz zu vernachlässigen. Bei Kraftschluss ist jedoch eine verschwindend geringe Grenzschicht zu erwarten. Abhängig von den zu tolerierenden Änderungen der Bahnspannung im Material der Bahn und dem Umschlingungswinkel ist ein effektiver Reibungskoeffizient zu definieren. Nach der Literaturstudie ergeben sich für den Kontakt zwischen Folie und Aluminiumwalze Haftreibungskoeffizienten zwischen 0,15 und 0,3 [Budinski2001]. Die Einordnung des Reibungskoeffizienten ist notwendig, um die Kontakt situation beschreiben zu können.

Die Beschreibung des Kontaktes zwischen Folie und Walze mittels Reibung und Normalkraft dient als Grundlage, um die Einzugskräfte an Auflaufstellen rechnerisch und unter Berücksichtigung von idealen Annahmen, einschätzen zu können [Ducote 1995, Walker 2003, Ma 2015, Taube 2019].

Zu Beginn des Projektes wurde ein Hersteller, an dessen Maschine die Untersuchung stattfinden sollte, befragt. So wollte man herauszufinden welche Größenordnungen hinsichtlich der Werte für die Bahnzugkraft, Umschlingungswinkel etc. zu erwarten sind. Bei Folienmaschinen, die für diese Untersuchung in Betracht kamen, liegt die maximale Bahnzugkraft bei 400 N und die maximale Bahngeschwindigkeit bei 130 m/min. In der Praxis sind beide Parameter oftmals geringer. Die Bahnumschlingung ist abhängig von der lokalen Bahnführung und ist in der Regel zwischen 45° und 120°, kann aber bei einzelnen Walzen oder aufgrund bestimmter funktionaler Aspekte bei 180° liegen. Diese Stellen sind häufig jedoch nicht durch den Menschen erreichbar, z.B. weil sie hoch über dem Boden oder im Maschineninneren angeordnet sind. Laut Hersteller ist die Bahngeschwindigkeit nicht zwingend mit einer konstanten Bahnspannung für die Bahnführung durch die Maschine einhergehend. Die Führungswalzen haben im Regelfall einen Durchmesser von 120 mm, der aber je nach Hersteller variiert. Größere Walzendurchmesser werden in der Regel nur benötigt, wenn sie hinsichtlich einer bestimmten Funktion notwendig sind, wie z.B. kühlen oder erwärmen der Folie.

## 2.2 Berechnungsmodelle für die Einzugskraft

Um die Einzugskräfte zukünftig bereits in einer frühen Phase der Maschinenherstellung und -anwendung abschätzen zu können, wurde ein mathematisches Modell herangezogen, welches eine Berechnung der resultierenden Einzugskraft ermöglichen soll. Perspektivisch entsteht so eine Beurteilungsgrundlage, mit der die Gefährdung durch einen Einzug an Folienauflaufstellen beschrieben wird.

### 2.2.1 Physikalische Grundlagen

Als Grundlage für das Berechnungsmodell werden Modelle verwendet, die den Kontakt zwischen einer Warenbahn und einer Walze beschreiben. Besonders im Bereich der Führung von Warenbahnen in der Papierherstellung finden diese Anwendung. Im Folgenden werden die Modelle auf die Bahnführung von Folien übertragen.

Führungswalzen haben die technologische Funktion, die Materialbahn möglichst konstant und geführt zu transportieren, sodass das Material keine Strukturveränderungen, bedingt durch den Transport, erfährt. Eine optimale Führung wird dann erreicht, wenn zwischen der Walze und der Materialbahn eine ausreichende Haftreibung wirkt, sodass beide dieselbe Umlaufgeschwindigkeit haben. Bahnführungswalzen sind in der Regel nicht angetrieben und eine passive Komponente für den Transport der Materialbahn.

Nach Taube (2019) erfolgt der Antrieb der Bahnführungswalze in einem Grenzgebiet zwischen Haft- und Gleitreibung an der Oberfläche von Walze und Materialbahn [Taube 2019]. Diese Reibungskraft wird mit Hilfe der anliegenden Bahnspannung ( $T$ ), der Bahnumschlingung ( $\varphi$ ) mit der Walze und des Reibungskoeffizienten ( $\mu$ ) zwischen beiden Körpern beschrieben. Der durch die Reibungskraft notwendige Kraftschluss zwischen Folie und Walze unterliegt der Gesetzmäßigkeit der Euler-Eytelwein-Formel (Seilreibungsformel):

$$\frac{F_z}{F_H} = e^{\varphi \cdot \mu} \quad (1)$$

$F_z = \text{Bahnzugkraft}; F_H = \text{Haltekraft}$

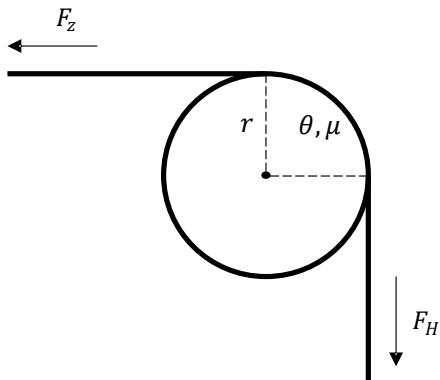


Abbildung 3: Schematische Darstellung einer Auflaufstelle.

Die anliegende Bahnspannung oder auch spezifische Bahnspannung ( $T$ ) wird über die Bahnzugkraft ( $F_z$ ) pro Bahnbreite ( $l$ ) definiert. Die Bahndicke wird in der Regel vernachlässigt, da sie im Verhältnis zur Bahnbreite und Länge sehr klein ist. Die Bahnspannung ist abhängig von der mechanischen Aufnahmefähigkeit der Materialbahn.

$$T = \frac{F_z}{l} \quad (2)$$

Die Bahnzugkraft bestimmt die Umfangskraft, welche bei Kraftschluss durch Haftreibung am Umfang der Walze wirkt. Die Umfangskraft entspricht im idealen Fall der Reibungskraft zwischen Folie und Walze, welche für den Kraftschluss notwendig ist.

Die Reibungskraft ergibt sich aus der Euler-Eytelwein-Formel wie folgt:

$$F_{Reibung} = F_z - F_H = F_z \cdot (1 - 1/e^{\varphi \cdot \mu}) \quad (3)$$

Unter Berücksichtigung des Reibungskoeffizienten zwischen Folie und Walze, kann aus der Reibungskraft die Normalkraft ( $F_N$ ) berechnet werden, die senkrecht auf die Folie und Walze wirkt.

$$F_N = \frac{F_{Reibung}}{\mu} \quad (4)$$

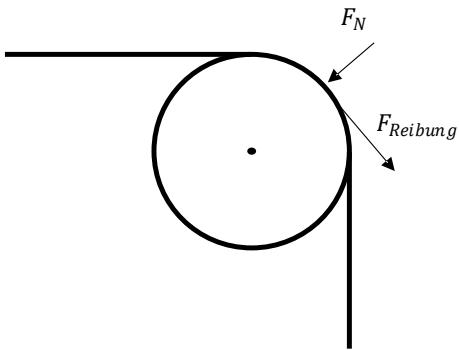


Abbildung 4: Wirkrichtungen der Normalkraft und der Reibungskraft.

Die Umfangskraft bzw. Reibungskraft ist abhängig vom Umschlingungswinkel und wird bestimmt durch einen ausreichend großen Flächendruck ( $p$ ) der Folie auf die Walze. Aus dem notwendigen Flächendruck lässt sich die Normalkraft abschätzen, die den Kraftschluss zwischen Walze und Folie bestimmt und für den Transport bei nicht angetriebenen Walzen notwendig ist. In dem hier beschriebenen Rahmen wird der Kraftschluss zwischen Walze und Folie als gegeben angenommen.

*Ducotey et al. (1995)* leitet den Flächendruck folgendermaßen her:

$$p = \frac{dF_N}{dA} = \frac{F_Z \cdot d\varphi}{r \cdot l \cdot d\varphi} = \frac{F_Z}{r \cdot l}$$

$F_N = \text{Normalkraft}$   
 $A = \text{Flächeninhalt}$

(5)

Nach *Ma et al. (2015)* ergibt sich der Flächendruck einer bewegten Folienbahn aus:

$$p = \frac{2 \cdot T \cdot \sin \frac{\theta}{2}}{r \cdot \theta}$$
(6)

Die Normalkraft ( $F_N$ ) lässt sich anhand der Modelle nach *Ducotey et al. (1995)* und *Ma et al. (2015)* wie folgt bestimmen:

$$dF_N = p \cdot dA = l \cdot p \cdot r \cdot \theta = T \cdot \theta \cdot l$$
(7)

Die Normalkraft wird für die Berechnung der Einzugskraft herangezogen.

Die Sichtung der Literatur zu der Thematik zeigt, dass die Optimierung des Kraftschlusses zwischen Bahn und Walze besonders für Prozesse in der Papier- und Textilindustrie von Bedeutung ist. Einige Studien haben gezeigt, dass der Kraftschluss mit zunehmender Bahngeschwindigkeit abnimmt und der Schlupf zwischen Bahn und Walze erhöht wird [*Rice 2003, Harshimoto 2007, Jones 2001, Taube 2019*].

Abbildung 5 zeigt den Vergleich der Normalkräfte unter Berücksichtigung der verschiedenen Ansätze nach der Seilreibungsformel, *Ducotey et al.* (1995) und *Ma et al.* (2015). Für geringe Umschlingungswinkel bis  $50^\circ$  macht die Wahl des Ansatzes keinen Unterschied hinsichtlich der wirkenden Normalkräfte. Die Abweichung zwischen den jeweiligen Berechnungsansätzen zeigt eine prozentuale Abweichung von unter 10 % für kleine Bahnumschlingungen ( $< 50^\circ$ ). Für sehr kleine Umschlingungen fällt diese noch geringer aus. Für Winkel größer als  $50^\circ$  ist die Abweichung hingegen deutlich größer. Den ähnlichsten Verlauf zeigen die Modelle nach Euler-Eytelwein-Formel und *Ducotey et. al* (1995).

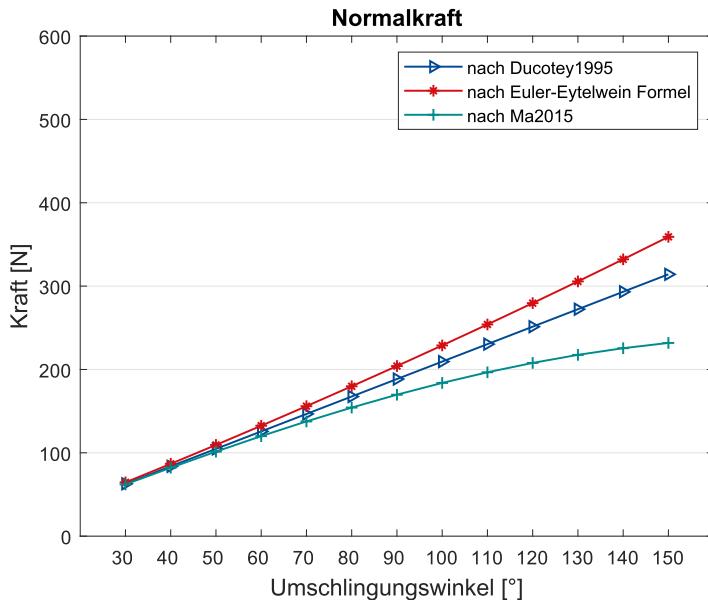


Abbildung 5: Vergleich der Normalkräfte nach den jeweiligen Berechnungsansätzen für folgende Rahmenbedingung:  
 $\mu = 0.1; F_{zug} = 120 \text{ N}$

Der Ansatz zur Berechnung der Normalkraft, bei Kraftschluss zwischen Materialbahn und Walze, ist nach der Literatur für kleine Bahnumschlingungen gültig. Je nach Modell werden verschiedene Randbedingungen berücksichtigt.

## 2.2.2 Parameteruntersuchung

Erwartet wird, dass die resultierende Einzugskraft abhängig von der zuvor beschriebenen Normalkraft ist. Die Normalkraft ist linear proportional zur Bahnzugkraft. Somit skaliert die Zugkraft die resultierende Normalkraft. In Abbildung 6 ist die wirkende Normalkraft auf Basis der Formel für den Flächendruck der Folie von *Ducotey1995* für verschiedene Bahnzugkräfte und Umschlingungswinkel dargestellt.

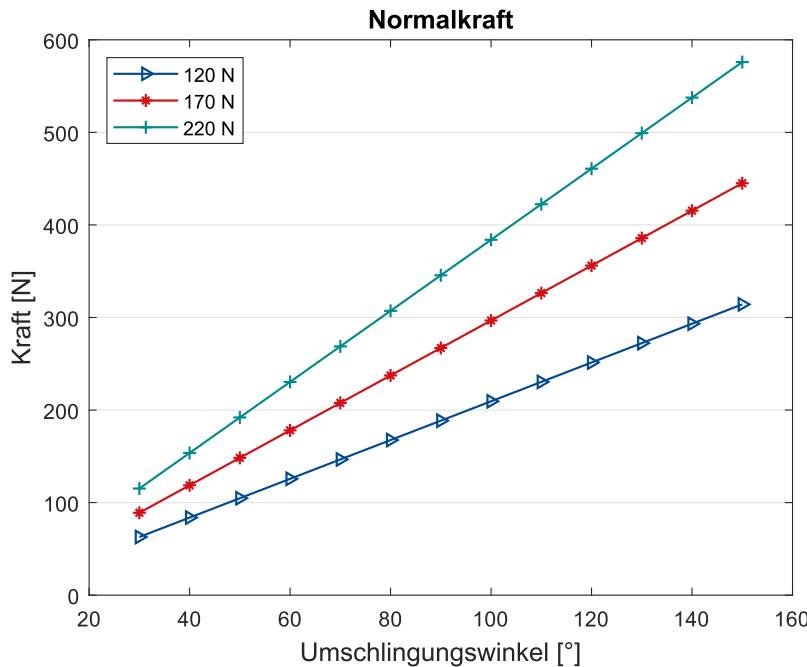


Abbildung 6: Darstellung der Normalkraft für verschiedene Bahnzugkräfte nach Ducotey 1995. Der Reibungskoeffizient beträgt  $\mu = 0,15$ .

Der Umschlingungswinkel und der Reibungskoeffizient zwischen Folie und Walze fließen in den Exponenten der Seilreibungsformel ein.

Der Einfluss verschiedener Reibungskoeffizienten in der Euler-Eytelwein-Formel ist in Abbildung 7 veranschaulicht.

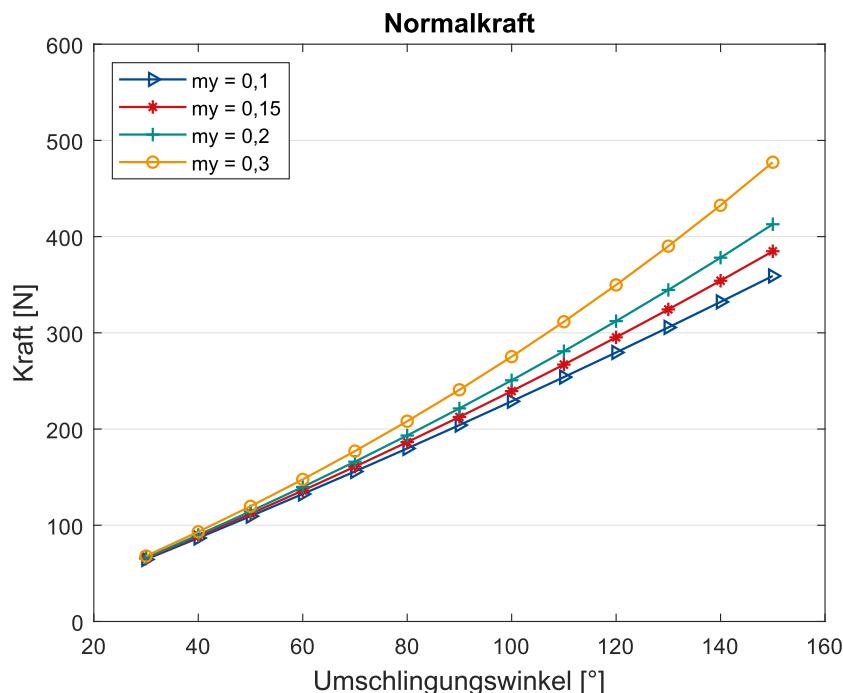


Abbildung 7: Darstellung der Normalkraft für verschiedene Reibungskoeffizienten zwischen Walze und Folie nach Euler-Eytelwein.

Für einen Reibungskoeffizienten in dem vorgeschlagenen Bereich zwischen 0,15 und 0,3 (Kapitel 2.1) verhält sich die Normalkraft annähernd linear.

## 2.2.3 Kräfte am Einzugsspalt

Für die Gefährdung des Einzugs an einer Folienauflaufstelle sind Kräfte am Einzugsspalt zwischen Folie und Walze verantwortlich. Ein Einzugsspalt hat für die Konstruktion einer Maschine häufig eine technologische Funktion. An kontinuierlich arbeitenden Maschinen ist ein Einzugsspalt dann gewollt, wenn eine Zustellbewegung eines Materials notwendig ist, um dieses zum Beispiel zu strecken, zu walzen oder umzuformen. Durch die entstehende Keilwirkung der rotierenden Walzen wird das Material gewünschten Druck- oder Zugkräften ausgesetzt. Durch die Keilwirkung entsteht eine zunehmende Einzugskraft auf ein Material bei zunehmender Einzugstiefe bei entgegenläufigen Walzen. Somit kann eine Zustellbewegung erfolgen. Der Einzug lässt sich physikalisch durch auftretende Reibungskräfte beschreiben [Neudörfer 2014]. Bei entgegenlaufenden Walzen sind die Reibungskräfte zwischen Körperteil und Walze direkt proportional zu den Normalkräften ausgehend von der Walze am Einzugsspalt.

Diese Keilwirkung tritt ebenfalls bei dem Eingriff in eine Auflaufstelle zwischen Materialbahn und Walze auf. Hier sorgt die durch den Kraftschluss an Auflaufstellen, wirkende Normalkraft, dafür, dass Reibungskräfte beim Eingriff in den Einzugsspalt auftreten. Sind die auftretenden Reibungskräfte ausreichend groß, erfolgt ein Einzug. Beim Eingriff wird die Hand unter der Folie gequetscht.

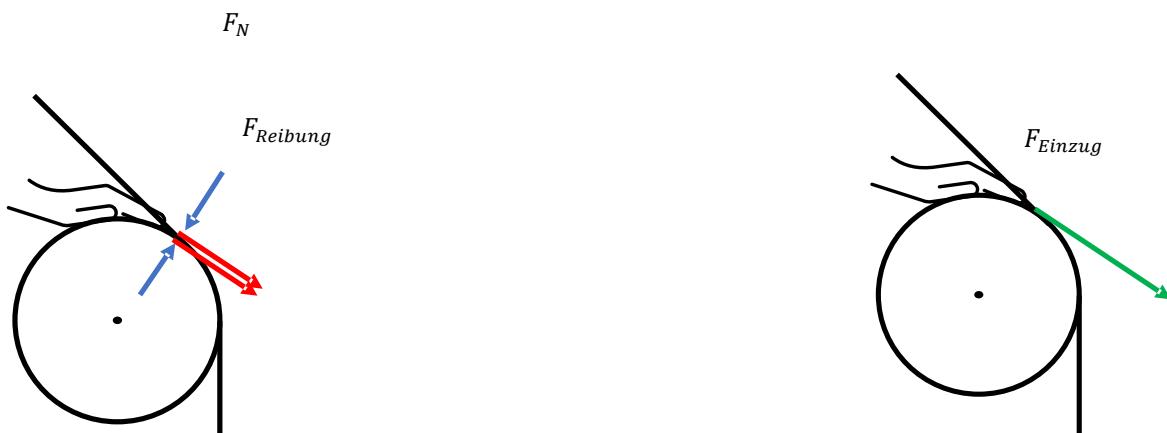


Abbildung 8: Eingriff einer Hand in eine Folienauflaufstelle. Die auftretenden Reibungskräfte erfolgen an der Kontaktstelle mit der Folie, sowie mit der Walze. links: Reibungskräfte aus den wirkenden Normalkräften. rechts: resultierende Einzugskraft aus Summe der Reibungskräfte.

Für die Abschätzung der Einzugskraft wird angenommen, dass der Kraftschluss des Systems nahezu konstant bleibt. Der Anteil von Verformungen der Hand und eines reduzierten Kraftschlusses der Folie mit der Walze bei Eingriff wird zur Berechnung der Einzugskraft vernachlässigt.

Unter der idealisierten Annahme, dass die Normalkraft auf den Kontaktkörper von beiden Seiten, also beim Folienkontakt und Walzenkontakt, denselben Betrag hat und am Scheitelpunkt genau entgegengesetzt wirken, lässt sich die resultierende Einzugskraft durch Summation der Reibungskräfte an beiden Kontaktstellen Hand-Folie ( $\mu_{HF}$ ) und Hand-Walze ( $\mu_{HW}$ ) berechnen:

$$F_{Einzug} = F_N \cdot (\mu_{HF} + \mu_{HW}) \quad (8)$$

Ob diese idealisierten Bedingungen in der Folienauflaufstelle vorliegen, muss noch überprüft werden. Wirken beispielsweise die Normalkräfte unter unterschiedlichen Winkeln zueinander, muss der Richtungseinfluss der entstehenden Reibkräfte berücksichtigt werden, wodurch sich die Komplexität des Modells erhöht und die resultierende Einzugskraft ändern kann. Einflüsse der Eindringtiefe bei verschiedenen Umschlingungswinkeln und Walzendurchmesser sowie unterschiedlicher Reibungskoeffizienten gilt es ebenfalls zu berücksichtigen.

Abbildung 9 zeigt exemplarisch den Einfluss der Reibung auf die resultierende Einzugskraft. Die Einzugskraft wird durch die Kontaktreibung linear skaliert. Die Summe der beiden Reibungskoeffizienten für den Kontakt aus Kontaktkörper mit der Walze und mit der Folie beträgt jeweils 0,4 und 1. Diese Werte sind zunächst reine Annahmen und orientieren sich an Vorversuchen zu den Reibungseigenschaften der Folien. Die anliegende Bahnzugkraft beträgt in diesem Beispiel 120 N.

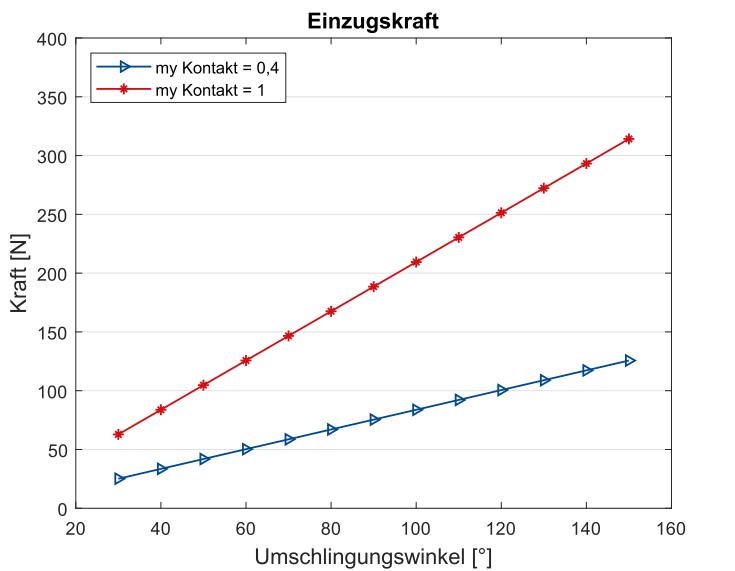


Abbildung 9: Einzugskräfte bei Annahme der Gültigkeit des Berechnungsmodells, bei einer Bahnzugkraft von 120 N und den Reibungskoeffizienten von 1 und 0,4.

Abhängig von dem angenommenen Reibungskoeffizienten kann die Einzugskraft stark variieren. Besonders bei großen Umschlingungswinkeln können resultierende Einzugskräfte deutlich größer sein als die Bahnzugkraft.

# 3 Methodik

Zur Erfassung der Zugkräfte im Einzugsspalt zwischen einer Folie und einer Walze wurde eine Messeinrichtung entwickelt. Die Messeinrichtung erfasst die axiale Kraft, die auf einen Kontaktkörper bei einem Einzug in einen Einzugsspalt wirkt. Über eine Lineareinheit wird der Kontaktkörper automatisiert in den Einzugsspalt bewegt und ein aktiver Eingriff nachgestellt. Die Zugkräfte am Kontaktkörper werden mittels Kraftmesszelle gemessen und können für die Bewertung von Einzugsgefahren an Folienauflaufstellen herangezogen werden. In den folgenden Unterkapiteln folgt die Beschreibung der Messeinrichtung hinsichtlich ihrer Komponenten und deren Funktionsweise.

## 3.1 Messeinrichtung

Die Messeinrichtung wurde für die Anwendung an einer Folienmaschine eines Herstellers von Folienmaschinen entwickelt und kommt dort zum Einsatz. Zukünftig kann die Messeinrichtung aber auch an anderen Orten eingesetzt werden.

Die folgenden Abbildungen zeigen die Komponenten der Messeinrichtung:

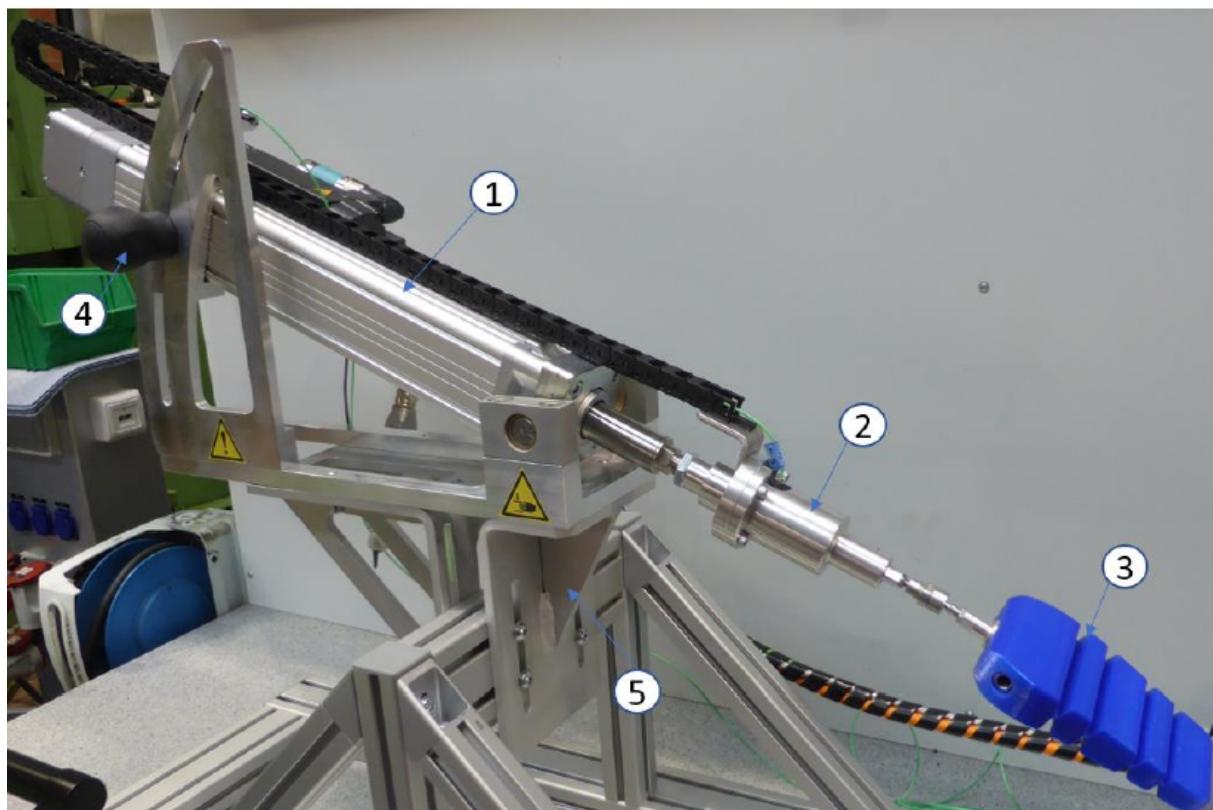


Abbildung 10: Aufbau der Messeinrichtung.

- |    |                                     |    |                   |
|----|-------------------------------------|----|-------------------|
| 1. | Lineareinheit (Elektrozylinder)     | 4. | Winkelverstellung |
| 2. | Trennvorrichtung mit Kraftmesszelle | 5. | Haltevorrichtung  |
| 3. | Kontaktkörper                       |    |                   |

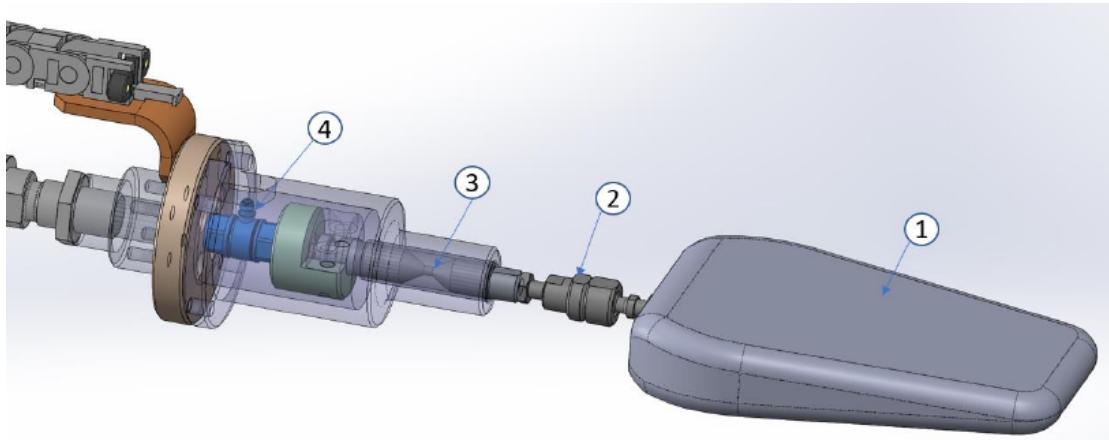


Abbildung 11: Darstellung der Komponenten: Kraftmesszelle, Kerbstift, Axialgelenk und Kontaktkörper.

- |                  |                                |
|------------------|--------------------------------|
| 1. Kontaktkörper | 3. Kerbstift (Sollbruchstelle) |
| 2. Axialgelenk   | 4. Kraftmesszelle              |

Die Kraftmessung erfolgt zeitgleich mit der linearen Bewegungsausführung des Kontaktkörpers, welche in zwei möglichen Betriebsmodi (Automatik- und Tastbetrieb) ausgeführt werden können. Mit Hilfe der Haltevorrichtung und der Winkelverstellung wird die Messeinrichtung an die Messumgebung angebracht und lässt sich darüber positionieren. Über das Axialgelenk kann der Kontaktkörper ebenfalls an die Messumgebung feinjustiert werden.

Ziel der Untersuchung ist es, die Einzugskraft zu erfassen. Resultierende Einzugskräfte können bezüglich der Größenordnung anhand der Prozessparameter abgeschätzt, jedoch nicht vorhergesagt werden. Daher muss davon ausgegangen werden, dass diese den Messbereich der Messtechnik sowie die Auslegung der Lineareinheit auch überschreiten können. Um die Sicherheit bei einer unverhofft auftretenden Überbelastung des Systems zu gewährleisten, wurde eine Sollbruchstelle (Kerbstift) implementiert. Über diese kann der Kontaktkörper mechanisch vom Rest getrennt werden, wenn Zugkräfte größer als 2 000 N auftreten.

### 3.1.1 Kraftmesszelle und Lineareinheit

Für die Kraftmessung (Kraftsignal) wird eine piezoelektrische Kraftmesszelle (9311C, Fa. Kistler, Schweiz) verwendet. Mit der Kraftmesszelle lassen sich axiale Zug- und Druckkräfte (Z-Achse) erfassen. Die Kraftmesszelle ist so angeordnet, dass die Kraft in Bewegungsrichtung der Lineareinheit gemessen wird. Komponenten von Querkräften werden nicht erfasst. Der Messbereich ist bis  $\pm 6$  kN kalibriert auf  $\pm 1$  % des Messbereichs. Die Linearität inkl. Hysterese ist 0,5 % FSO. Nach Angabe vom Hersteller eignet sich der Sensor durch eine konstante Messgenauigkeit über einen weiten Messbereich und lassen die Messung von Kleinstkräften zu.

Die Lineareinheit setzt sich aus einem Antrieb (Fa. Siemens) und einem Elektrozylinder (CASM-63 BS, Fa. Ewellix) zusammen. Der Hub des Elektrozylinders ist einstellbar und wird über einen integrierten magnetischen Näherungsschalter überwacht. Dies ermöglicht eine exakte Positionierung des Kontaktkörpers und eine Erfassung dieser Position (Wegsignal).

Elektrozylinder	max. Hub [mm]	max. Geschwindigkeit [mm/s]	Haltekraft [N]
CASM-63 BS,	100 - 300	300	5 000

Abbildung 12 zeigt einen beispielhaften Verlauf für das Kraft- und Positionssignal ( $\equiv$  Wegsignal).

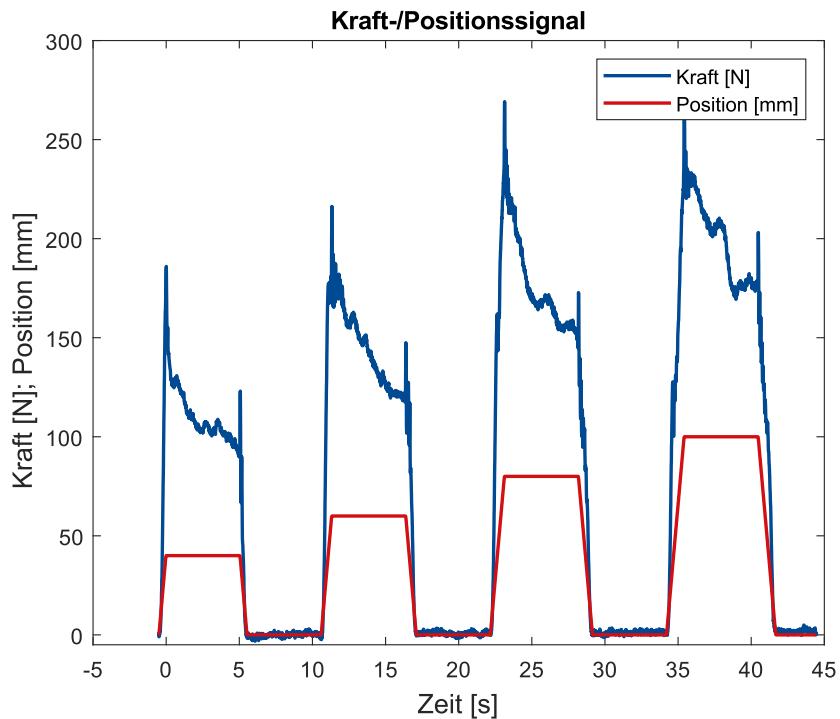


Abbildung 12: Beispielkurven für das Kraft- und Positionssignal.

Für die Auswertung des Kraftsignals wird der Kontaktanfang (0 bis 0,25 s) betrachtet (die Reaktionszeit des Menschen liegt bei ca. 200 ms).

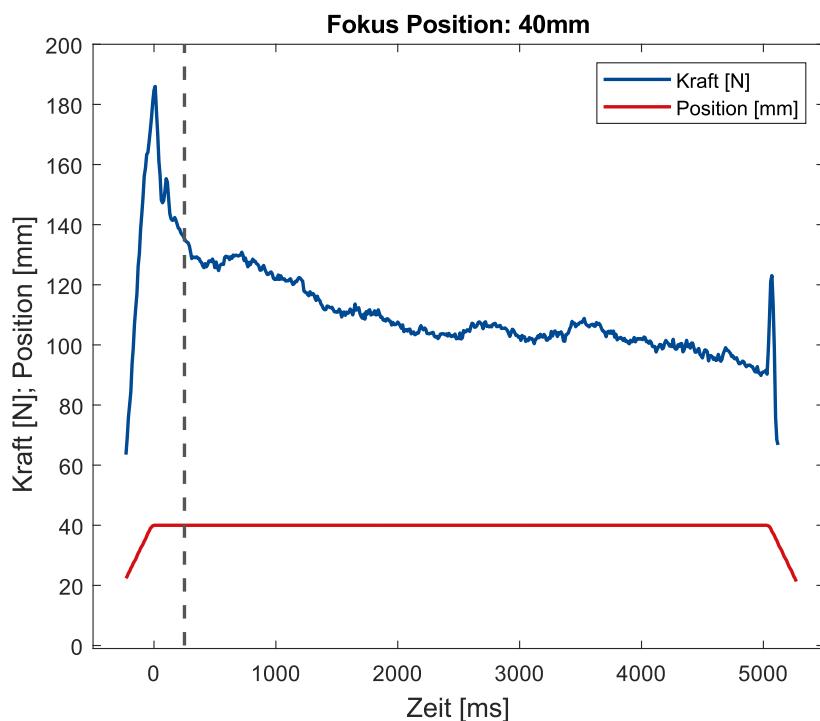


Abbildung 13: Dargestellt sind das Kraftsignal und das Positionssignal bei der Position 40 mm. Die gestrichelte Linie markiert den Zeitbereich bis 250 ms (Kontaktanfang). Die Kontaktzeit entspricht der Zeitspanne in der angefahrenen Position (40 mm).

Zusätzlich wurde der Mittelwert der Kraft während des Eingriffs bestimmt:

$$x_{mittel} = \sum_{i=1}^{n_{Zeit}} \frac{x_i}{n_{Zeit}}$$

Diese wird im Auswerteprogramm (MatLab) mit der Code Zeile

$x_{mittel} = mean(kraft(anfang:ende))$  umgesetzt.

### 3.1.2 Kontaktkörper

Für die erste Untersuchung wurden zwei Kontaktkörpervarianten entwickelt. Diese unterscheiden sich in Material und Form. Die Kontaktkörper orientieren sich rudimentär an den Maßen einer menschlichen Hand (nach DIN 33402<sup>4</sup>). Hier wurden die Maße des 50. Perzentil für Männer über alle Altersgruppen herangezogen. Hinsichtlich der Handlänge wurde das Perzentil konstruktionsbedingt nicht vollständig übernommen. Eine exakte Nachbildung der menschlichen Hand hinsichtlich der Form wird nicht als ausschlaggebend für die wirkenden Einzugskräfte angesehen.

Beide Kontaktkörper sind durch eine Verschraubung über das Axialgelenk mit der Lineareinheit verbunden. Die aktuellen Kontaktkörper wurden mittels additiver- und mechanischer Fertigung hergestellt und ihre Funktionalität, insbesondere ihre Festigkeit, durch Zugversuche validiert.

Der Kontaktkörper aus thermoplastischem Polyurethan (TPU) ist keilförmig und hat die Grundmaße L = 150 mm, H = 30 mm (bzw. 15 mm an der Spitze) und B = 80 mm bis 100 mm. Die Fertigung (additiv) geschah über ein 3D-Druck-Verfahren. Das verwendete Material ist abhängig von der Drucktechnik. Einkerbungen ermöglichen eine erhöhte Biegefähigkeit und orientieren sich an den Gelenkpositionen der menschlichen Hand. Der zweite Kontaktkörper (Silikon) ist einheitlich flach (L = 160 mm, H = 10 mm und B = 80 mm bis 100 mm). Er besteht aus einem weichen, silikonbeklebten PVC-Träger. Durch die flache Geometrie ist die Biegefähigkeit ebenfalls ausreichend vorhanden. Das verwendete Material unterscheidet sich in der Oberflächenbeschaffenheit deutlich von thermoplastischem Polyurethan. Materialbedingte Reibungseigenschaften können sich bei beiden Kontaktkörpern unterscheiden. Die Haftreibung fällt bei Silikon im statischen Fall größer aus.

Sowohl TPU als auch Silikon sind in einem gewissen Maß nachgiebig und wurden deswegen als Ersatzmaterial herangezogen (Abbildung 14). Alternative Materialien für die Gewebestruktur der Hand (Kombination aus Haut, Fett, Muskulatur, Sehnen und Knochen) sind hinsichtlich ihrer Nachbildung der mechanischen Eigenschaften auch aufgrund der hohen strukturellen Komplexität nur schwer auffindbar. Eine exakte Nachbildung der menschlichen Hand nach biomechanischen Aspekten ist aktuell nicht möglich. Häufig orientieren sich Ersatzmaterialien der Haut z.B. an der Sensibilität und ihrer Verträglichkeit gegenüber dritten Substanzen (Cremes etc.) oder an kosmetischen Gesichtspunkten. Diese sind für mechanische Belastungen jedoch nicht ausgelegt.

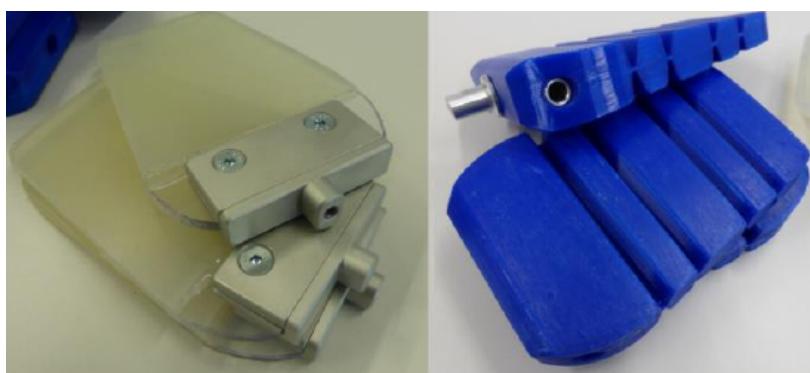


Abbildung 14 links: Kontaktkörper aus Silikon und PVC; rechts: Kontaktkörper aus TPU.

<sup>4</sup> DIN 33402-2:2020-12 Ergonomie-Körpermaße des Menschen- Teil 2: Werte

### 3.1.3 Anbringung der Messeinrichtung

Die Messeinrichtung wurde für den Einsatz an einer Wickelmaschine konstruiert. Es ist sicherzustellen, dass die Ortsbindung der Messeinrichtung während des Betriebs gegeben ist.

Die Anbringung der Messeinrichtung an der Folienmaschine (Abbildung 15) erfolgt über die Haltevorrichtung. Die Position ist mittig zur Breite der Folienbahn. Die Neigung der gesamten Lineareinheit (LE) wurde so eingestellt, dass der Kontaktkörper den Spalt zwischen Folie und Walze mit beidseitigem Kontakt mittig trifft. Nach der Montage befindet sich der Kontaktkörper im eingefahrenen Zustand ca. 100 mm vor dem Folienauflaufspalt.



Abbildung 15: Anbringung der Messeinrichtung an der Folienauflaufstelle.

Die Montage geschieht im sicheren (eingefahrenen und ausgeschalteten) Zustand der Messeinrichtung sowie im ausgeschalteten Zustand der Folienmaschine. Es muss sichergestellt sein, dass ein plötzliches Anlaufen der Folienmaschine ausgeschlossen ist. Der Schaltschrank ist transportabel und wird in ausreichendem Abstand zur Messeinrichtung positioniert. Über ein Bedienerpanel kann die gesamte Messeinrichtung nach der Montage in Betrieb genommen werden.

### 3.1.4 Betrieb der Messeinrichtung

Die Messeinrichtung wird für die Messwerterfassung im Automatikbetrieb betrieben. Für den Automatikbetrieb sind vorab Einstellungen bezüglich des Hubs der Lineareinheit (max. 800 mm) und des kraftbasierten Abbruchkriteriums vorzunehmen. Bei Abbruch wird die Referenzposition der Lineareinheit eingenommen. Das Kraftabbruchskriterium beträgt bei der ersten Untersuchung 500 N und orientiert sich an den potenziellen Kraftbereichen für Körperkräfte, die aus der Literatur abgeleitet werden.

Zudem wird ein Bewegungsablauf definiert, dessen Schritte, ausgehend von einer ebenfalls definierten Startposition, abgefahren werden. Für jeden Schritt wird eine Zielposition, eine Bewegungsgeschwindigkeit (max. 300 mm/s) und die Dauer der Ausführung dieses Schritts festgelegt (*Haltezeit*). Hieraus ergibt sich ein Bewegungsablauf, der automatisch abläuft und jederzeit manuell abgebrochen werden kann.

Im Rahmen dieser Untersuchung wird ein Bewegungsablauf mit den Zielpositionen 40 mm, 60 mm, 80 mm und 100 mm definiert, welche die ungefähre Eingriffstiefe angeben. 100 mm entsprechen ca. 2/3 der Bogenlänge der Folienauflage. Jede dieser Positionen wird zyklisch aus der Startposition heraus angefahren. Die Vorfahrgeschwindigkeit beträgt 50 mm/s und die Haltezeit ist 5 s. Die Startposition wird bei einem Wechsel des Kontaktkörpers oder einer neuen Ausrichtung der gesamten Messeinrichtung erneut bestimmt. Hierzu wird der Kontaktkörper im Tastbetrieb an den Spalt zwischen Folie und Walze gefahren, sodass ein erster, leichter Kontakt der Kontaktkörperspitze mit der Folie und Walze stattfindet. Die Vorfahrgeschwindigkeit ist gering, damit ein unkontrolliertes Vorfahren ausgeschlossen werden kann. Dieser

Betrieb dient der Ausrichtung und Einstellung der Messeinrichtung. Währenddessen die Folienmaschine ausgeschaltet ist, kann die Positionierung überprüft und gegebenenfalls korrigiert werden. Dabei werden alle Einstellungen vorgenommen, die einen fehlerfreien Ablauf der Messung ermöglichen.

Das Kraftsignal wird dauerhaft aufgezeichnet. Die Kraftmesswerte werden zyklisch in der SPS in einem Datenblock zwischengespeichert. Die Position wird bei Bewegungsstart ebenfalls zwischengespeichert. Die aktuelle Kraft zu der aktuellen Position wird ausgelesen.

## 3.2 Messwerterfassung

Abbildung 16 zeigt die Erfassung der einzelnen Messsignale der Messeinrichtung:

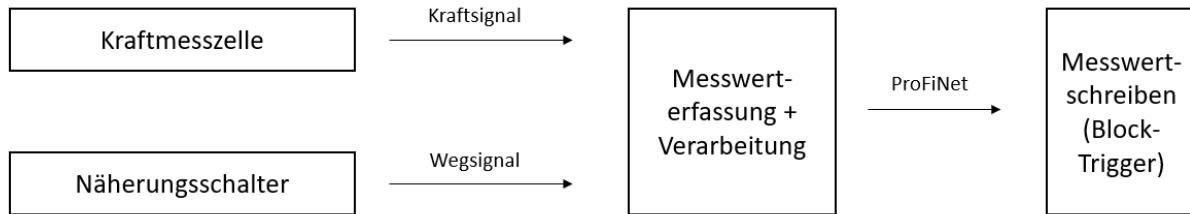


Abbildung 16: Messwerterfassungskette.

Die Messwerterfassung geschieht über die Einbindung der Messsignale in die Speicher Programmierbare Steuerung (SPS/Siemens SIMATIC S7). Ein vollständiger Datenblock wird alle 10 s, entsprechend einem Zyklus der SPS, geschrieben. Die Abtastfrequenz beträgt 100 Hz. Die Abtastrate der Kraftmesszelle ist deutlich höher (1000 Hz). Um ein mögliches Signalrauschen zu reduzieren, wird das Kraftsignal vorab mit einem Tiefpassfilter gefiltert

Kraft- und Positionssignal werden in der SPS zwischengespeichert und via Process Field Network (ProFiNet)-Schnittstelle an den PC übergeben. Über einen Block-Trigger (MB-Datasuite) können Daten aus dem Zwischenspeicher der SPS gelesen und geschrieben werden. Dies geschieht über die S7-Kommunikation Put/Get. Ein Datenblock enthält die Messwerte für einen SPS-Zyklus. Alle Datenblöcke werden fortlaufend in ein .xlsx-Format geschrieben.

Die Datensätze im .xlsx-Format können mittels eines MatLab-Skripts ausgewertet und verarbeitet werden.

## 3.3 Untersuchung (Messreihe)

Durchgeführt wird die Untersuchung an einer Folienwickelmaschine. Es wird eine Auflaufstelle ausgesucht, nach der die Folienbahn im Normalbetrieb zugeschnitten wird. Ein Durchgang ermöglicht den Zutritt in diesen Bereich, da der Zuschnitt gegebenenfalls kontrolliert und nachjustiert werden muss. Diese Stelle ist als mögliche Gefahrenstelle für einen Eingriff mit der oberen Extremität auszumachen.

Die Messreihe zur experimentellen Untersuchung der Einzugskraft ist durch die vorgegebenen Prozessparameter und Maschinengrenzen limitiert. Im Rahmen der Untersuchung werden drei Folien ( $n = 3$ ) auf- bzw. abgewickelt.

- **Folie I:** Testfolie (Material ist nicht bekannt), Materialstärke: 100 µm, Bahnbreite: ca. 1 000 mm
- **Folie II:** TPU-Träger + PP, Materialstärke: 170 µm, Bahnbreite: 1 200 mm.
- **Folie III:** TPU-Träger + PE, Materialstärke: 50 µm, Bahnbreite: 700 mm.

Der Bahnzug kann über ein Bremsmoment an der abwickelnden, angetriebenen Walze des Wicklers eingestellt werden. Hier ist eine maximale Bahnzugkraft von 400 N möglich. In der Messreihe wurden folgende Bahnzugkräfte ( $n = 4$ ) untersucht: 120 N, 170 N, 220 N und 250 N. Höhere Bahnzugkräfte sind für

die verwendeten Folien nicht geeignet. Die Bahngeschwindigkeit ( $n = 6$ ) beträgt 10 m/min, 20 m/min, 40 m/min, 60 m/min, 80 m/min und 100 m/min. Der Umschlingungswinkel ( $n = 1$ ) ist durch die vorgegebene Bahnführung an der Wickelmaschine limitiert und beträgt im Versuch ca. 135–140°. Eine Veränderung des Umschlingungswinkels kann im Rahmen der ersten Messreihe nicht vorgenommen werden. Zusätzlich wird die Geschwindigkeit der Messeinrichtung konstant auf 50 mm/s eingestellt. Für die Untersuchung werden die beschriebenen Kontaktkörper (TPU und Silikon) verwendet.

Die Prozessparameter sollen möglichst variiert werden, um den Einfluss auf die Einzugsgefahr in den Versuchsergebnissen abzubilden. Tabelle 1 zeigt welche Kombinationen der verschiedenen Parameter getestet werden.

Tabelle 1: Messmatrix ( $n = 70$ )

	Folie 1	Folie 2	Folie 3
<b>Bahnzugkraft [N]:</b>	120, 170, 220, 250	120, 170, 220, 250	120, 170
<b>Bahngeschwindigkeit [m/min]:</b>	20, 40, 60, 80, 100	10, 20, 40, 60	10, 20, 40
<b>Kontaktkörper</b>	Silikon, TPU	Silikon, TPU	Silikon, TPU
<b>Bewegungsgeschwindigkeit [mm/s]</b>		50	
<b>Umschlingungswinkel [°]</b>		135–140	

# 4 Auswertung

Die in der Untersuchung (Kapitel 3.3) mit der Messeinrichtung (Kapitel 3.1.) gewonnenen Messdaten wurden für die Auswertung analysiert. Dargestellt sind die Ergebnisse nach den unterschiedlichen Kontaktköpfen, der aufgetretenen Streuung, den Kraftmittelwerten, den Bahnzug und für die verschiedenen Folien und Bahngeschwindigkeiten.

## 4.1 Untersuchungsergebnisse

Insgesamt wurden 70 Messungen durchgeführt. Für jede Konstellation aus Bahnzug, Bahngeschwindigkeit, Folie und Kontaktkörper (Silikon: rot / TPU: blau) wurde mindestens ein Datensatz, bestehend aus Kraft-, Weg- und Zeitsignal, aufgezeichnet. Aufgrund von mehreren Messwiederholungen und einigen Datenverlusten konnten 44 Datensätze für die Auswertung berücksichtigt werden. Die einzelnen Datensätze wurden in MatLab eingelesen und ausgewertet. Eine weitere Nachbearbeitung der Messwerte mittels frequenzabhängiger Filterung wurde nicht durchgeführt. Ausgewertet wurden das absolut gemessene *Kraftmaximum am Anfang des Kontaktes* (Peak 1), nach Erreichen der Zielposition (0-0,25 s) sowie die *Kraftmittelwerte* über den Messzeitraum, in dem der Kontaktkörper in der Zielposition verweilt (ca. 5 s). Im Folgenden wird die angefahrene Zielposition (Wegsignal) als Position beschrieben.

Die Ergebnisse sind nach den folgenden Schlagworten aufgelistet:

- Kontaktkörper
- Streuung
- Kraftmittelwert
- Bahnzug
- Folie
- Bahngeschwindigkeit

und werden der Reihe nach vorgestellt.

## Kontaktkörper

Jede Konstellation aus Bahnzugkraft, Bahngeschwindigkeit und Folie wurde mit beiden Kontaktkörpern untersucht. Abbildung 17 zeigt die gemessenen Kraftmaxima am Anfang des Kontaktes für beide Kontaktkörper gegenüber der Position. Untersucht wurde die Auflaufstelle an Folie I, bei einer Bahngeschwindigkeit von 20 m/min und einer Bahnzugkraft von 120 N. Bei beiden Kontaktkörpern ist eine Zunahme der Einzugskraft bei zunehmender Position zu beobachten. Der Vergleich der beiden Kontaktkörper zeigt, dass mit dem Körper aus Silikon und PVC etwas größere Kraftmaxima gemessen werden als mit dem aus TPU. Für Folie I ist zu beobachten, dass mit zunehmender Position, die Differenz zwischen beiden Kontaktkörpern, für die dargestellten Messwerte, tendenziell zunehmen, wohingegen bei Folie II diese Tendenz nicht zu erkennen ist. Für beide Folien sind Unterschiede zu erkennen, die aber anhand der Messwerte nicht erklärbar sind.

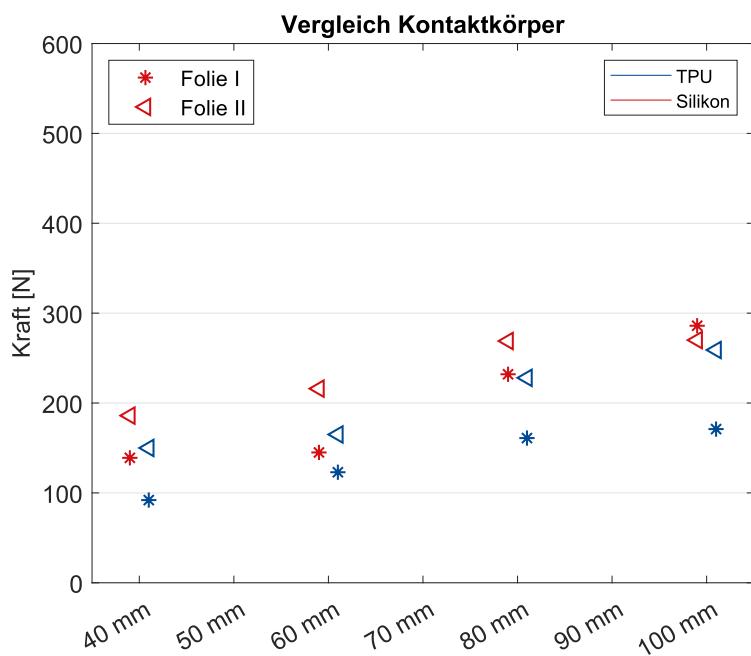


Abbildung 17: Einzugskräfte an der Folienauflaufstelle mit Folie 1 und Folie 2. Es wurden beide Kontaktkörper verwendet. Beide Kontaktkörper wurden auf die Position 40, 60, 80 und 100 mm gefahren.

Im Vergleich der beiden Kontaktkörper sind höhere Kräfte für den Silikonkörper aufgrund der unterschiedlichen Dicke und Nachgiebigkeit zu erklären. Zudem ist erwartbar, dass die Reibungseigenschaft des Silikonkörpers den Einzugseffekt etwas verstärkt.

## Streuung

Messwiederholungen für eine Konstellation mit einem Kontaktkörper geben einen Überblick über die Streuung der Messwerte. Mit dem Kontaktkörper aus Silikon wurden sechs Messungen bei einer Konstellation und mit dem Kontaktkörper aus TPU wurden jeweils 3 Messungen für zwei Konstellationen durchgeführt. In Abbildung 18 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Maximalkräfte am Anfang des Kontaktes dargestellt.

Für alle dargestellten Konstellationen nimmt der Mittelwert der Einzugskräfte mit zunehmender Position zu. Für den Kontakt mit dem TPU-Körper gilt das tendenziell auch, obwohl nicht alle Positionen abgefahren wurden (vorzeitiger Abbruch etc.). Das Verhalten, der zunehmenden Einzugskräfte mit zunehmender Position ist für alle ausgewerteten Messungen zu beobachten.

Betrachtet man die Standardabweichungen, zeigt sich, dass die Ergebnisse streuen und, bezogen auf die drei betrachteten Konstellationen, Abweichungen von 30 bis 60 N möglich sind. Mit zunehmender Position bleibt die Streuung absolut betrachtet gleich beziehungsweise wird etwas geringer, relativ gesehen nimmt sie also ab. Für weitere Konstellationen wurden keine Messwiederholungen durchgeführt, weshalb die Streuung nur für die hier dargestellten Varianten angegeben werden kann.

Die Streuung liegt für beide Kontaktkörper in einem vergleichbaren Bereich. Zu berücksichtigen ist die geringe Anzahl von drei bzw. sechs Wiederholungsmessungen.

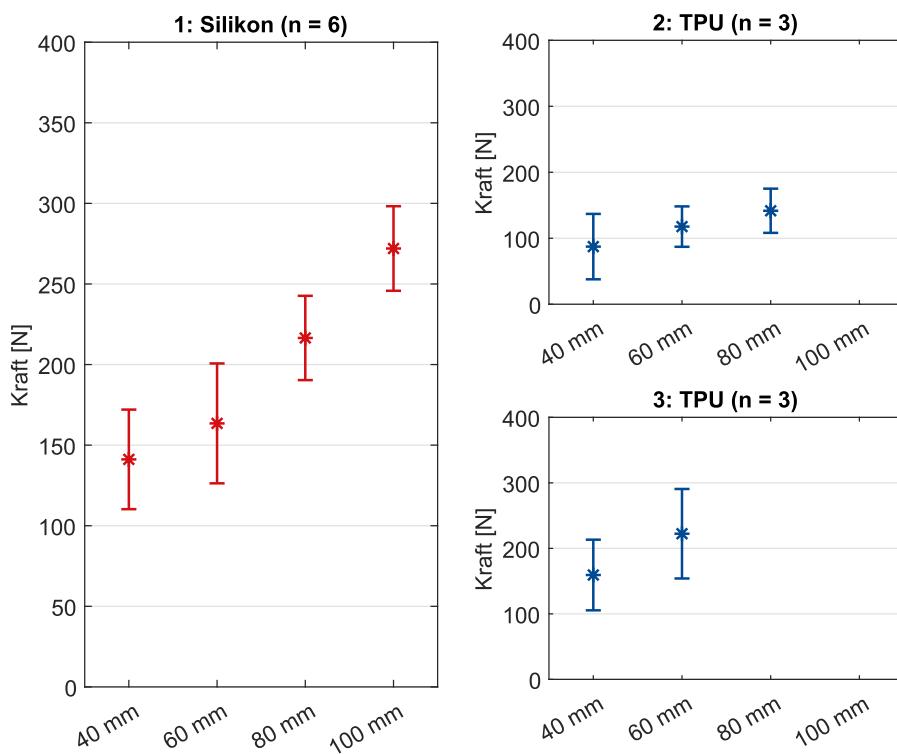


Abbildung 18: Dargestellt sind die Mittelwerte und Standardabweichungen für die Kraftmaxima am Kontaktanfang. l.: Folie I, Bahngeschwindigkeit 20 m/min, Bahnzugkraft 120 N; o. r.: Folie II, Bahngeschwindigkeit 10 m/min, Bahnzugkraft 120 N; u. r.: Folie II, Bahngeschwindigkeit 10 m/min, Bahnzugkraft 220 N.

## Kraftmittelwerte:

Abbildung 19 zeigt die Kraftmaxima am Kontaktanfang (1. Peak) sowie die Mittelwerte für alle Messungen, für die die Positionen 40 mm, 60 mm, 80 mm und 100 mm ausgewertet werden können ( $n = 29$ ).

Die Mittelwerte nehmen gegenüber den lokalen Maximalkräften unabhängig der Position ca. 10 bis 20 % ab. Betrachtet man exemplarisch den Kraftverlauf einer Einzelmessung, dann ist zu erkennen, dass die Kraft zu Beginn des Kontaktes deutlich ansteigt und dann schnell auf ein annähernd konstantes Niveau, welches etwa dem Kraftmittelwert entspricht, abfällt. Für den 1. Peak konnten bei einer Position Kräfte zwischen 150 N und 400 N gemessen werden. Zu berücksichtigen sind hier jedoch die unterschiedlichen Konstellationen, insbesondere die anliegenden Bahnzugkräfte zwischen 120 N und 250 N. Abbildung 19 zeigt eine große Spanne an gemessenen Kräften im Einzugsspalt für beide Kontaktkörper.

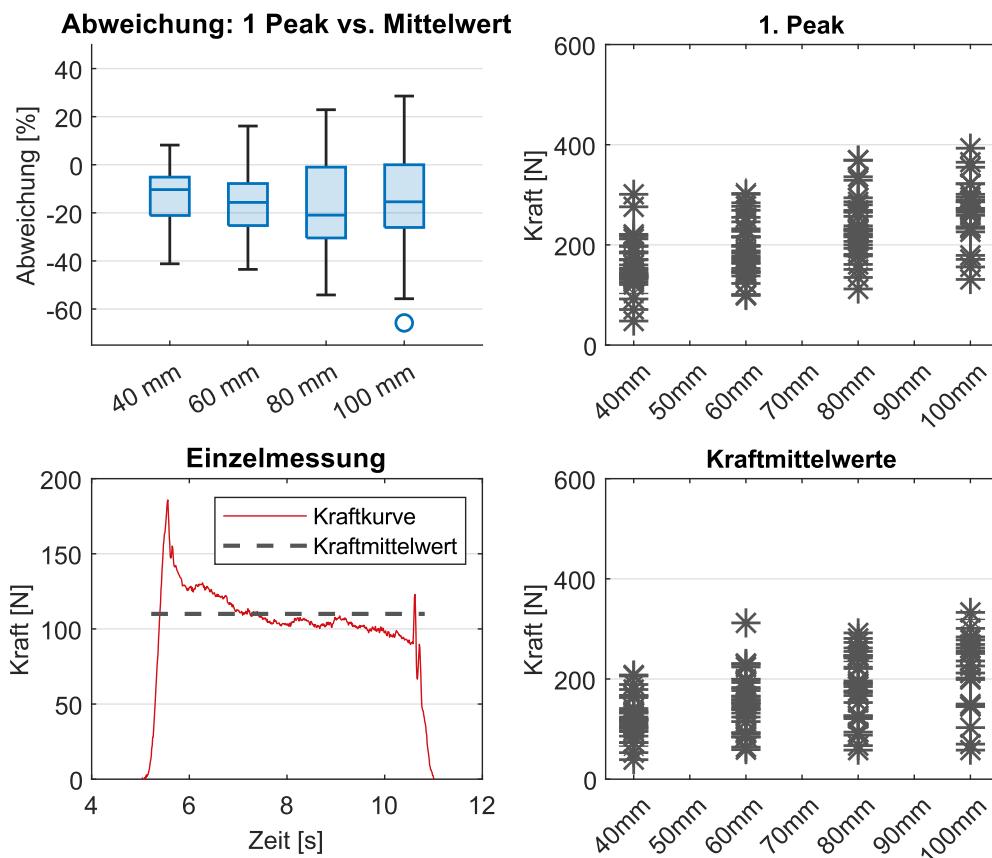


Abbildung 19: o l.: prozentuale Abweichung der Kraftmittelwerte gegenüber dem Kraftmaximum; o r.: Darstellung aller Kraftmaxima; u r.: Darstellung aller Kraftmittelwerte; u l.: Darstellung einer Einzelmessung mit 120 N Bahnzug und 20 m/min Bahngeschwindigkeit (Position: 40 mm).

## Bahnzug:

In Abbildung 20 wird die jeweilige gemessene Kraft (1. Peak), bei Verwendung des Silikonkörpers, bezogen auf die anliegende Bahnzugkraft, dargestellt. Hier wird Bezug auf die Auflaufstellen an Folie I und II mit einer Bahngeschwindigkeit von 20 m/min genommen. Als Bahnzugkraft wurden 120 N, 170 N, 220 N und 250 N angelegt. Zu berücksichtigen ist, dass die Bahnzugkraft einem Regelmechanismus unterliegt mit dem Ziel, eine konstante Bahnspannung zu ermöglichen. Bei Kontakt im Einzugsspalt konnte ein kurzzeitiger Anstieg der Bahnzugkraft beobachtet werden.

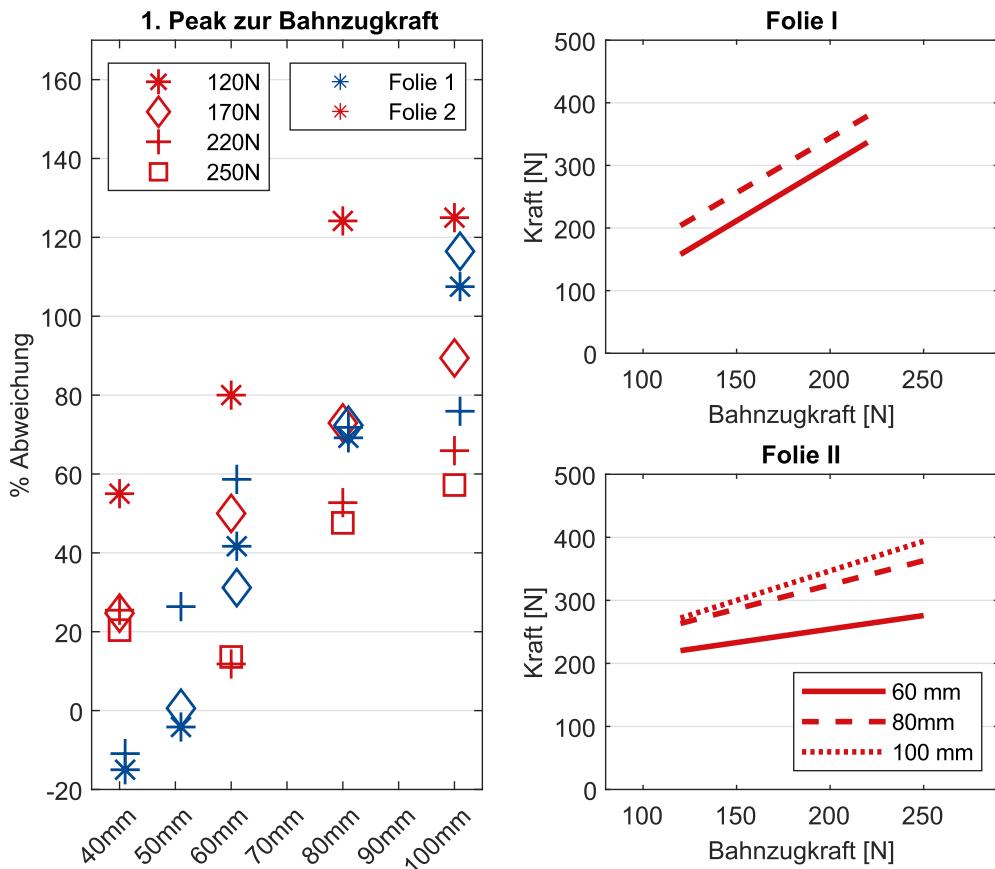


Abbildung 20: Kraftmaximum; l.: Prozentuale Abweichung der Einzugskräfte zur Bahnzugkraft bei Folie I und II; o. r. und u. r.: Darstellung der gemessenen Kraft (Einzugskraft) über die Bahnzugskraft für die Folien I und II.

Die prozentuale Abweichung der gemessenen Kraft (1. Peak) zur Bahnzugkraft zeigt, dass am Kontaktanfang Kräfte, die dem Doppelten der anliegenden Bahnzugkraft entsprechen, gemessen werden. Dies gilt für die Positionen 80 mm und 100 mm. Für die Position 40 mm und 60 mm liegt die Abweichung bei bis zu 60 %. Für die dargestellten Ergebnisse wurde überwiegend eine höhere Kraft als die anliegende Bahnzugkraft gemessen.

Das Verhalten der Kraft gegenüber der Bahnzugkraft kann linear angenähert werden.

Abbildung 21 zeigt den Vergleich der Mittelwerte der gemessenen Kräfte zur Bahnzugkraft für die selben Konstellationen wie in Abbildung 20. Für die Positionen 80 mm und 100 mm liegt die gemessene Kraft ebenfalls über der Bahnzugkraft. Die prozentuale Abweichung hat sich jedoch annähernd halbiert. Für die Positionen 40 mm und 60 mm kann beobachtet werden, dass in der Spitze noch eine Erhöhung von 20 % auftritt. Ein Einzelbeispiel für eine Halte- & Messzeiterhöhung auf 15 Sekunden zeigt, dass die Abweichung bei 20 % liegt.

Die Mittelwerte der Einzugskräfte steigen linear mit zunehmender Bahnzugkraft. Ein deutlicher Unterschied des Steigungsverhaltens für die beiden Folien (I und II) ist nicht zu erkennen.

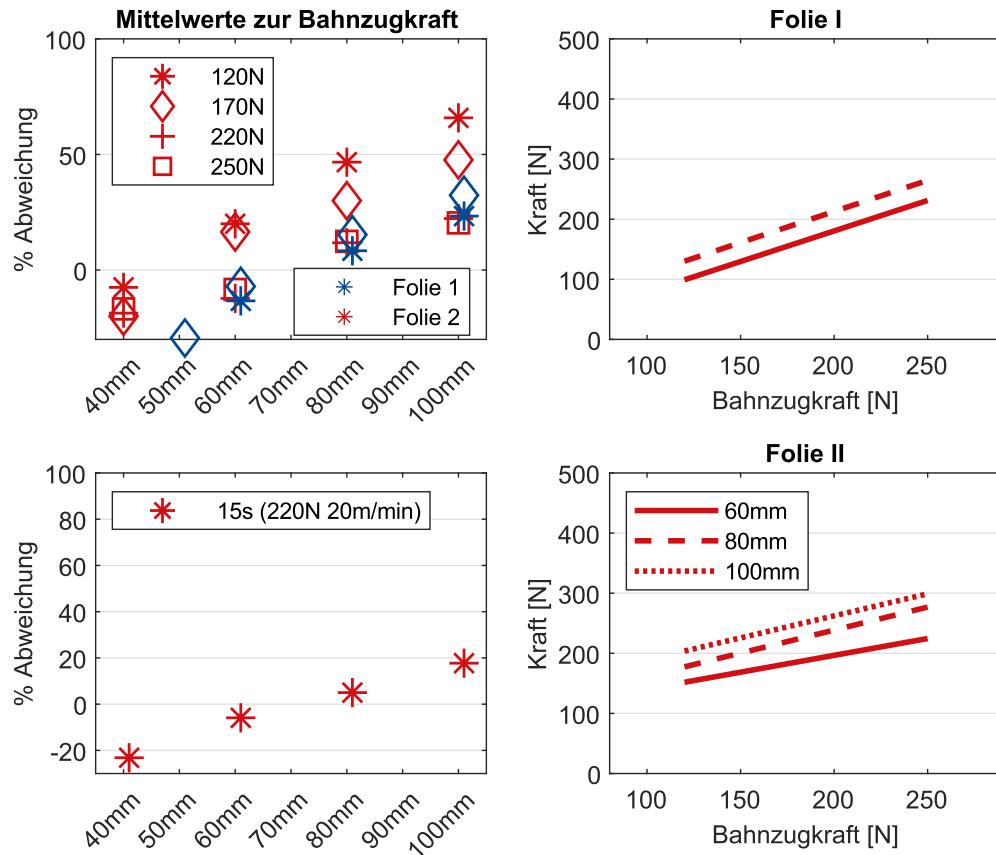


Abbildung 21: Kraftmittelwerte; l.: Prozentuale Abweichung der Einzugskräfte zur Bahnzugkraft bei Folie I und II; o r. und u r.: Darstellung der gemessenen Kraft (Einzugskraft) über die Bahnzugkraft für die Folien I und II.

## Folien:

In Abbildung 22 sind die Einzugskräfte für alle drei Folien mit der Bahnzugkraft 120 N und der Bahngeschwindigkeit 20 m/min dargestellt. Der Vergleich der Folien zeigt, dass für beide Kontaktkörper unterschiedliche Kräfte gemessen werden. Die dargestellten Ergebnisse zeigen, dass bei Folie II etwas höhere Kräfte gemessen werden als bei Folie I. Hier ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Unterschiede im Bereich der oben beschriebenen Standardabweichung der Messwiederholungen liegen.

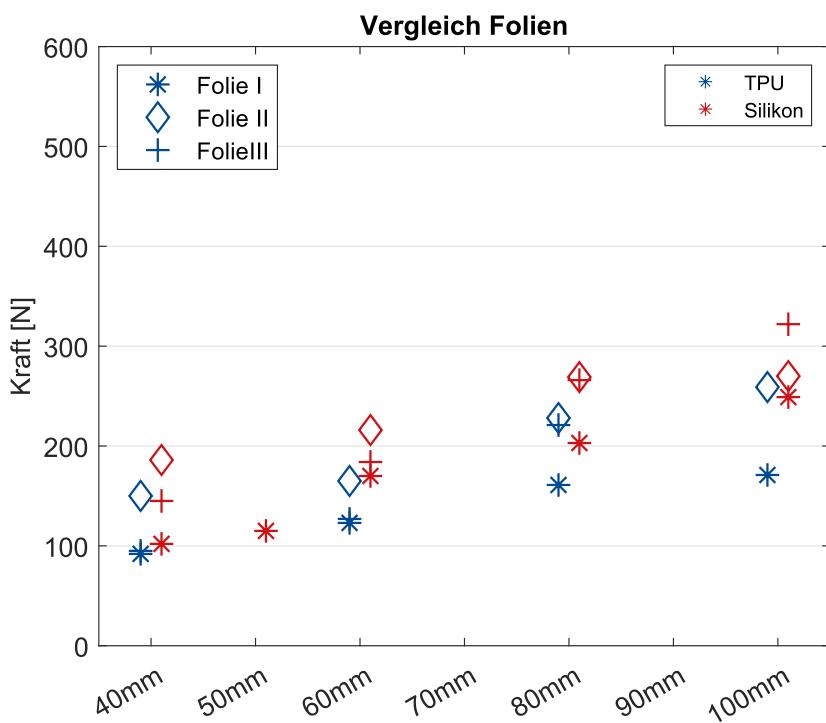


Abbildung 22: Dargestellt sind die Einzugskräfte bei Kontaktanfang für alle Folien mit der Bahnzugkraft 120 N und Bahngeschwindigkeit 20 m/min.

## Bahngeschwindigkeit:

Abbildung 23 zeigt, wie sich die gemessenen Kräfte für die Folien I und II abhängig von der Folien Geschwindigkeit verhalten. Die hier anliegende Bahnzugkraft ist 120 N.

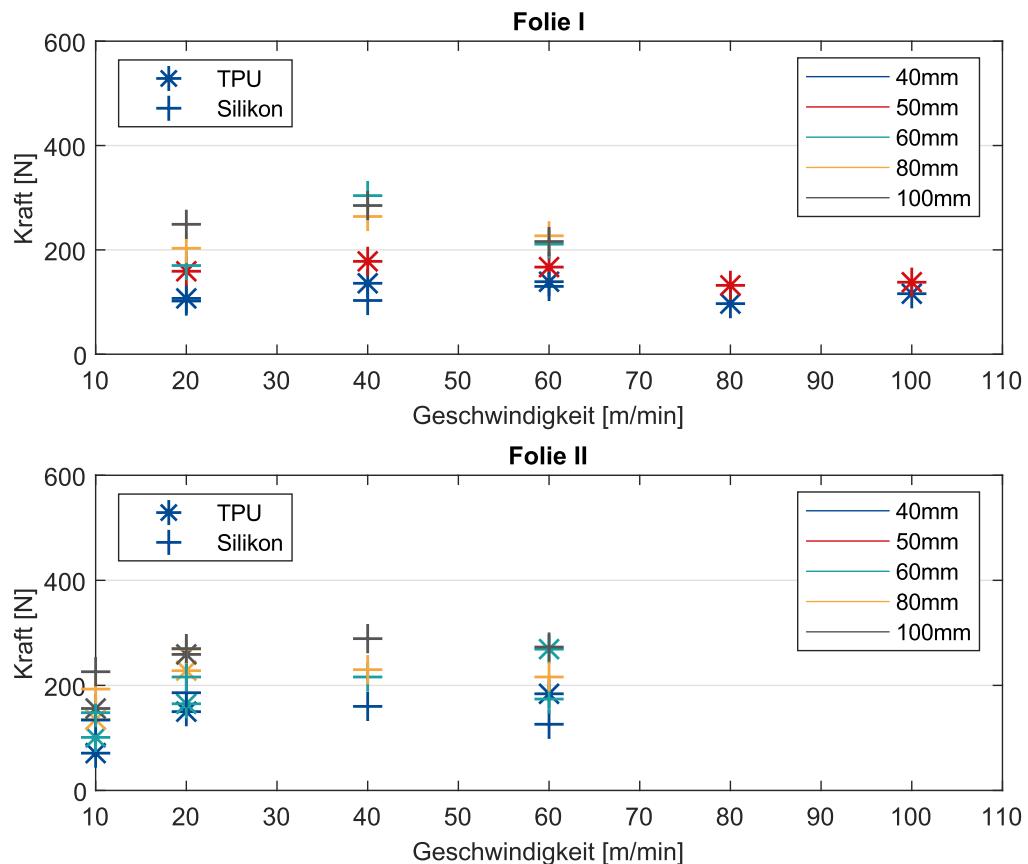


Abbildung 23: Dargestellt sind die gemessenen Kräfte für verschiedene Bahngeschwindigkeiten. Die Bahnzugkraft ist 120 N.

Die gemessene Kraft beider Folien ist tendenziell bei 40 m/min am größten. Bei zunehmender Folien Geschwindigkeit fällt die Kraft wieder ab. Ein Effekt der Bahngeschwindigkeit auf die Kraft kann anhand dieser Daten jedoch nicht festgestellt werden. Da alle drei untersuchten Folien in der Praxis mit einer Geschwindigkeit von unter 40 m/min geführt werden, wird bei den meisten Messungen eine Bahngeschwindigkeit von 20 m/min verwendet.

# 5 Diskussion

Die vorgestellte Messmethodik zur Ermittlung von Einzugskräften an Folienauflaufstellen liefert erste Ergebnisse hinsichtlich des Einflusses der Rahmenbedingungen auf die Einzugsgefahren an Folienauflaufstellen. Im Folgenden werden die Ergebnisse diskutiert und bewertet.

Das primäre Ziel der ersten Versuchsreihe ist es, nachzuweisen, dass die konzipierte, konstruierte und angefertigte Messeinrichtung funktionsfähig im Feld eingesetzt werden kann und verwendbare Messergebnisse liefert. Die große Anzahl der durchgeführten Versuche bestätigt, dass dieses Ziel erreicht wird.

Das sekundäre Ziel der Untersuchung ist es, den Einfluss verschiedener Eigenschaften von Auflaufstellen bezüglich der Einzugskräfte zu untersuchen, um herauszufinden, welche Parameter das System merklich beeinflussen und welche Eigenschaften nur eine untergeordnete Relevanz aufweisen.

Hier ergeben sich verschiedene Konstellationen aus Umschlingungswinkel, Bahnzugkraft, Bahngeschwindigkeit und Folieneigenschaft bzw. -abmessung. Der Umschlingungswinkel kann bei dieser Untersuchung nicht verändert werden, sodass ein Einfluss nicht untersucht werden kann. Gleches gilt für den Einfluss der verwendeten Folien. Alle drei Folien unterscheiden sich in ihrer Struktur (einlagig bzw. mehrlagig) und ihrer Bahnbreite, jedoch ist die Oberflächenstruktur für alle Folien ähnlich. Keine Folie weist besonders haftende Materialien in der Kontaktsschicht auf. Zudem ist die Dicke der Folien mit 50 bis 170 µm ähnlich. Durch die unterschiedlichen Bahnbreiten der verwendeten Folien kommt es zu Abweichungen in der tatsächlichen Bahnspannung für die anliegenden Bahnzugkräfte. Um einen Folieneinfluss beschreiben zu können, ist es von Vorteil, wenn alle Folien die gleiche Bahnbreite haben. Die Einstellungen Bahnzugkraft und Bahngeschwindigkeit können im Rahmen der Maschinengrenzen verändert werden. Die Messeinrichtung ist mit zwei in Material und Form verschiedenen Kontaktkörpern verwendbar.

Die Wiederholung der Messungen bei gleichbleibender Konstellation der Folienauflaufstelle zeigt, dass resultierende Einzugskräfte streuen, was bei einer Bewertung zu berücksichtigen ist. Im Rahmen der Untersuchung werden die Einzugskräfte für zunehmende Eingriffstiefen der Kontaktkörper ermittelt. Mit zunehmender Eingriffstiefe (Position) wird die wirkende Normalkraft größer, wodurch auch die gemessenen Kräfte ansteigen. Wenn die Position über die Hälfte des Kontaktes von Folie und Walze einnimmt, wird erwartet, dass die wirkenden Normalkräfte durch ein tieferes Eindringen nicht mehr wesentlich erhöht werden. Daher sollte bei einer Messung immer über die Position, die mindestens die Hälfte der Umschlingung ausmacht, hinausgefahren werden, um die maximalen Zugkräfte zu erfassen.

Für die Bahnzugkraft kann eine lineare Zunahme der resultierenden Einzugskräfte beobachtet werden. Die Zunahme der Einzugskräfte ist proportional zum Anstieg der Bahnzugkraft. Auch bei der modellbasierten Herangehensweise ist dieser Zusammenhang zu beobachten. Die Kenntnis der Bahnzugkraft ist voraussichtlich ein elementarer Bestandteil für die Gefährdungsermittlung an Auflaufstellen.

Beim verwendeten Wickler hält die Bahnzugkraft die Bahnspannung der Folie konstant und wird stetig nachgeregelt. Beim Einfahren mit dem Kontaktkörper wird ein Anstieg der Bahnzugkraft beobachtet. Die Folienmaschine regelt die Bahnzugkraft nach. Bei der Betrachtung einer Folienauflaufstelle, an der eine Regelung der Bahnspannung über die Bahnzugkraft nicht notwendig ist, kann das Einzugsverhalten deutlich von dem hier beschriebenen abweichen. In dieser Untersuchung fällt die gemessene Einzugskraft nach einer Kraftspitze bei Kontaktanfang meist deutlich ab.

Bei der Betrachtung der Bahngeschwindigkeiten zeigt sich, dass die Einzugskräfte bei einer Geschwindigkeit von ca. 40 m/min am höchsten sind und für langsamere und schnellere Geschwindigkeiten leicht abfallen. Das sollte auch für andere Umschlingungswinkel untersucht werden.

Unterschiede im Vergleich der beiden Kontaktkörper sind anhand der unterschiedlichen Geometrien und verwendeten Materialien zu erklären. Langfristig soll ein Kontaktkörper für die Messung der Einzugskräfte etabliert werden. Hier steht die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, im Sinne einer Abschätzung für

einen ungünstigen Fall, im Vordergrund. Um diesen zu erfassen, wird vorgeschlagen, dass der Kontaktkörper aus PVC-Silikon verwendet werden soll. Hinsichtlich der erwartbar erhöhten Haftriebung dieses Kontaktkörpers mit der Folie und Walze, bildet dieser den ungünstigen Fall gut ab. Zudem ist der Kontaktkörper flacher und ermöglicht ein gutes Einziehen in den Kontaktspalt, wie es bei einer menschlichen Hand auch zu erwarten ist. Die Materialeigenschaften von Silikon können einem hyperelastischen Gummi zugeordnet werden. Hyperelastizität wird ebenfalls bei der Modellierung von Weichgewebe (Haut, Fett, Muskel) verwendet, um mechanische Eigenschaften anzunähern.

Zu empfehlen ist, die bisher nicht experimentell untersuchten Parameter, wie z.B. den Umschlingungswinkel, in weiteren Messreihen noch genauer zu untersuchen und zusätzlich weitere Auflaufstellen an anderen Maschinen zu vermessen.

## II. Literaturverzeichnis

- Budinski 2001 BUDINSKI, K. G. Friction of plastic webs. *Tribology international*, 2001, 34. Jg., Nr. 9, S. 625-633.
- Chow 2015 CHOW, Amy Y.; DICKERSON, Clark R. Determinants and magnitudes of manual force strengths and joint moments during two-handed standing maximal horizontal pushing and pulling. *Ergonomics*, 2016, 59. Jg., Nr. 4, S. 534-544.
- Das 2004 DAS, Biman; WANG, Yanqing. Isometric pull-push strengths in workspace: 1. Strength profiles. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 2004, 10. Jg., Nr. 1, S. 43-58.
- Ducote 1995 DUCOTEY, K. S.; GOOD, J. K. The importance of traction in web handling. 1995.
- LaDelfa 2019 LA DELFA, Nicholas J.; EVANS, Zachary CT; POTVIN, Jim R. The influence of hand location and handle orientation on female manual arm strength. *Applied ergonomics*, 2019, 81. Jg., S. 102896.
- Ma 2015 MA, Li'e, et al. Moving web instability caused by the bending deflection of the support idle roller. 2015.
- Martinez 2012 MARTINEZ, Francisco Javier, et al. Analysis of wear mechanism in TPU-steel contact pair by means of long stroke tribometer tests. In: *LubMat'12*. 2012.
- Neudörfer 2014 NEUDÖRFER, Alfred. *Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte: Methoden und systematische Lösungssammlungen zur EG-Maschinenrichtlinie*. Springer-Verlag, 6. Auflage, 2014.
- Phillips 2015 PHILLIPS, Shawn; SEIVERLING, Elizabeth; SILVIS, Matthew. Pressure and friction injuries in primary care. *Primary Care: Clinics in Office Practice*, 2015, 42. Jg., Nr. 4, S. 631-644.
- Sanguinetti 1978 SANGUINETTI, Manuel V. Reconstructive surgery of roller injuries of the hand. *Journal of Hand Surgery*, 1977, 2. Jg., Nr. 2, S. 134-140.
- Taube 2019 TAUBE, Werner, Erfahrungen und Grundlagen der Wickeltechnik Wickeln - Grundlagen Band I + Band II, 2019
- Wakula 2009 WAKULA, J., et al. Der montagespezifische Kraftatlas (BGIA-Report, 3/2009). *DGUV*, Berlin, 2009
- Walker 2003 WALKER, T. J. Practical application of idler roller performance measurements and models. 2003.

### Normen:

DIN 33402-2:2020, Ergonomie - Körpermaße des Menschen - Teil 2: Werte

DIN EN 13418:2013-08, Kunststoff- und Gummimaschinen - Wickelmaschinen für flache Bahnen - Sicherheitsanforderungen; Deutsche Fassung EN 13418:2013

DIN EN ISO 11111-1:2016 12, Textilmaschinen – Sicherheitsanforderungen – Teil 1: Gemeinsame Anforderungen (ISO 11111-1:2016); Deutsche Fassung EN ISO 11111-1:2016

### III. Voruntersuchungen

Während der Konstruktionsphase der Messeinrichtung werden Voruntersuchungen durchgeführt, die sich unter anderem auf die Einordnung der Rahmenbedingungen fokussieren sowie die Anwendbarkeit der Kontaktkörper beschreiben.

Zunächst wurde versucht, einen Überblick über die Reibungseigenschaften der Folien II und III zu erhalten. Folie I lag zum Zeitpunkt der Durchführung nicht als Muster vor.

Mit Hilfe des Aufbaus einer statischen Folienauflaufstelle konnten erste Erfahrungswerte gesammelt werden, wie sich die Kontaktkörper bei Kontakt mit den Folien, in einer möglichst realitätsnahen Kontakt situation, verhalten. Zudem wurde die Belastbarkeit auf Zugbelastungen, wie sie in einem Einzugsspalt zu erwarten ist, untersucht.

Die Voruntersuchungen lieferten aufschlussreiche Ergebnisse, welche bei der Planung und Konstruktion der Messeinrichtung, sowie der Durchführung der Hauptuntersuchung berücksichtigt werden konnten.

## a. Reibungseigenschaften der Folien

Das Berechnungsmodell basiert auf Reibungseffekten, die zu einem resultierenden Einzug führen. Der Reibungskoeffizient beschreibt das Verhältnis zwischen Reibungskraft und Anpresskraft. Für das Berechnungsmodell müssen die Reibungskoeffizienten aus der Literatur abgeleitet oder geschätzt werden.

Um eine Orientierung hinsichtlich der Größenordnung der Reibungskoeffizienten zu erhalten, wurden Voruntersuchungen durchgeführt. Mit Hilfe eines Bodenbelag-Prüfstands können Reibungskoeffizienten für die Gleitreibung zwischen zwei Körpern ermittelt werden. Hierzu wurden die Versuchsfolien sowie die Kontaktkörpermaterialien untersucht. Neben den Materialien, die für die Kontaktkörper in Betracht gezogen wurden, wurden auch weitere Materialien untersucht, um eine Orientierung bezüglich der Reibungskoeffizienten zu erhalten.

In dieser Untersuchung wurden als Gleitmittel Kaltgewalzter Stahl, Kunstleder, TPU und Gummi ausgewählt.

Für die mobile Untersuchung von Bodenbelägen und deren Reibungseigenschaften wurde ein Messgerät zur Erfassung der Gleitreibung verwendet (Gleitreibungsmessgerät GMG-200, Fa. GTE). An das Messgerät ( $m = 10 \text{ kg}$ ) können verschiedene Gleitmittel mit unterschiedlichen Materialien angebracht werden. Das Messgerät erfasst die Gleitreibungskoeffizienten gemittelt über eine Strecke von  $0,5 \text{ m}$  ( $v = 15 \text{ m/min}$ ).

Abbildung 24 zeigt die Reibungskoeffizienten (RK), die für Folie II und Folie III gegenüber den verschiedenen Gleitmitteln ermittelt wurden. Für den TPU-Gleiter liegt der gemessene Reibungskoeffizient zwischen 0,6 und 0,8. Reibungskoeffizienten können je nach Versuchsumgebung abweichen. Aus der Literatur kann für TPU vs. Stahl ein Reibungskoeffizient von 0,6 abgeleitet werden [Martinez 2012].

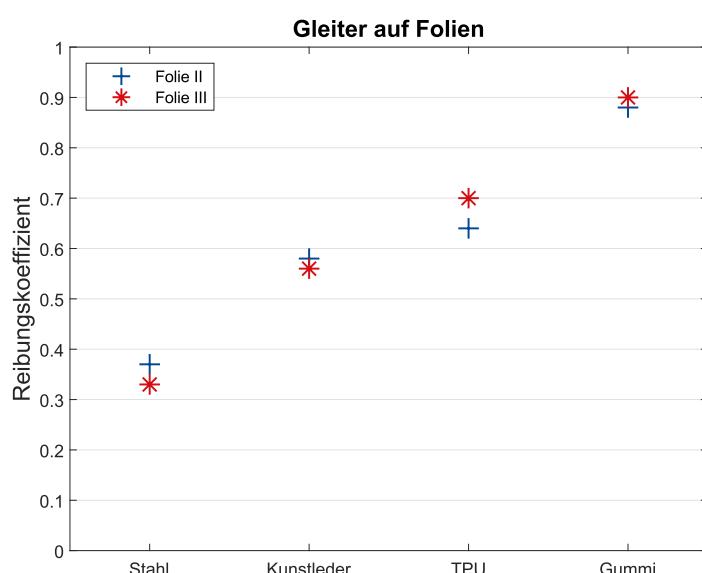


Abbildung 24: Darstellung der Gleitreibungskoeffizienten für verschiedene Materialien gegenüber der Versuchsfolien.

## b. Manueller Auszug aus statischer Folienumschlingung

Um erste Erkenntnisse darüber zu erhalten, wie sich die beiden Kontaktkörper bei einem Auszug aus dem Einzugsspalt zwischen Folie und Walze verhalten könnte, wurde ein provisorischer Versuchstand aufgebaut. Dieser beschreibt eine statische Folienauflaufstelle, bei der die Folien II und III um ein PVC-Rohr ( $d = 75$  mm) geschlungen werden. Die Folien sind an einem Ende fixiert und am freien Ende mit unterschiedlichen Lasten beschwert, um Bahnzugkräfte nachzustellen. Die Umschlingungswinkel der Folien betragen im Versuch  $90^\circ$  bzw.  $135^\circ$ .

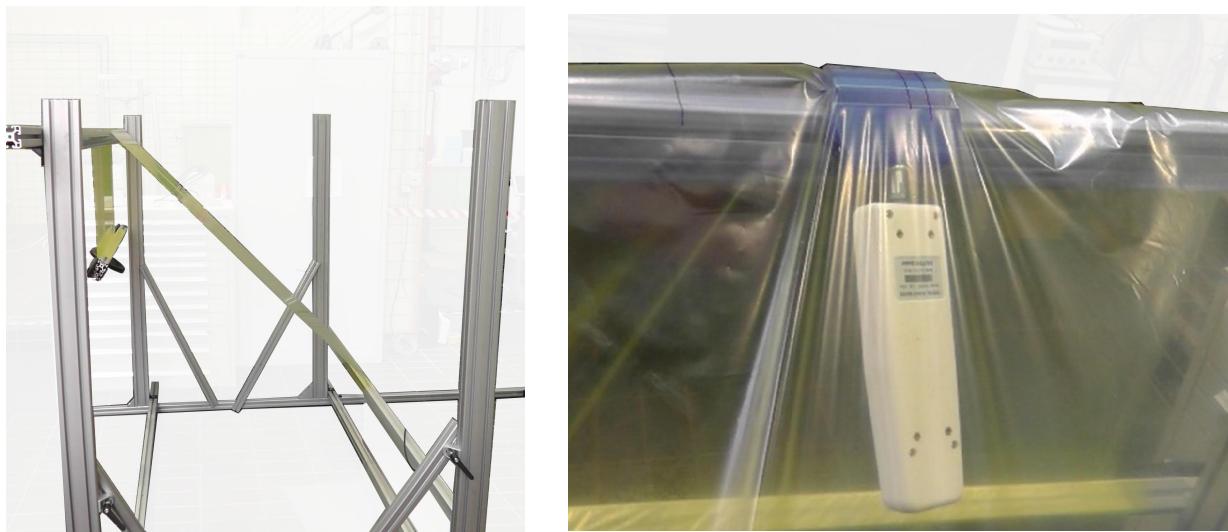


Abbildung 25: Folie III mit einem Umschlingungswinkel von  $135^\circ$  um das PVC-Rohr; r.: Position des TPU-Kontaktkörpers zwischen Folie III und PVC-Rohr.

Die Kontaktkörper wurden mit unterschiedlichen Auflageflächen mittig zur Folienbahnbreite zwischen dieser und dem Rohr eingeklemmt. Beide Kontaktkörper sind mit einem Handkraftmessgerät verschraubt. So kann die notwendige Kraft erfasst werden, um die Kontaktkörper aus der Klemmung zwischen Folie und Rohr herauszuziehen. Beide Folien haben unterschiedliche Bahnbreiten (Folie II: 120 mm; Folie III: 700 mm).

Folie II kann mit 7,5 kg und 10 kg beschwert werden und Folie III mit 6 kg und 8,5 kg. Um die gemessenen Kraftwerte vergleichen zu können, wurde die Last auf die jeweilige Breite normiert (Last pro Bahnbreite in N/m).

Abbildung 26 zeigt, dass in diesem statischen Kontaktfall, mit zunehmender Last pro Bahnbreite die notwendige Kraft für einen Auszug zunimmt. Zu berücksichtigen ist, dass die 700 mm breite Folie durch die Einklemmung der Kontaktkörper im Verhältnis zur Gesamtbreite mehr abgehoben wird als die 1 200 mm breite Folie. Im dynamischen Fall könnte das Abheben weniger ausgeprägt sein, da eine konstant hohe Bahnspannung für die Bahnführung nachgeregelt wird. Die Unterschiede bezüglich der beiden Folien lassen sich in dieser statischen Untersuchung hauptsächlich durch die Dicke und Nachgiebigkeit der Folie erklären. Die Reibungseigenschaften beider Folien sind hier ähnlich.

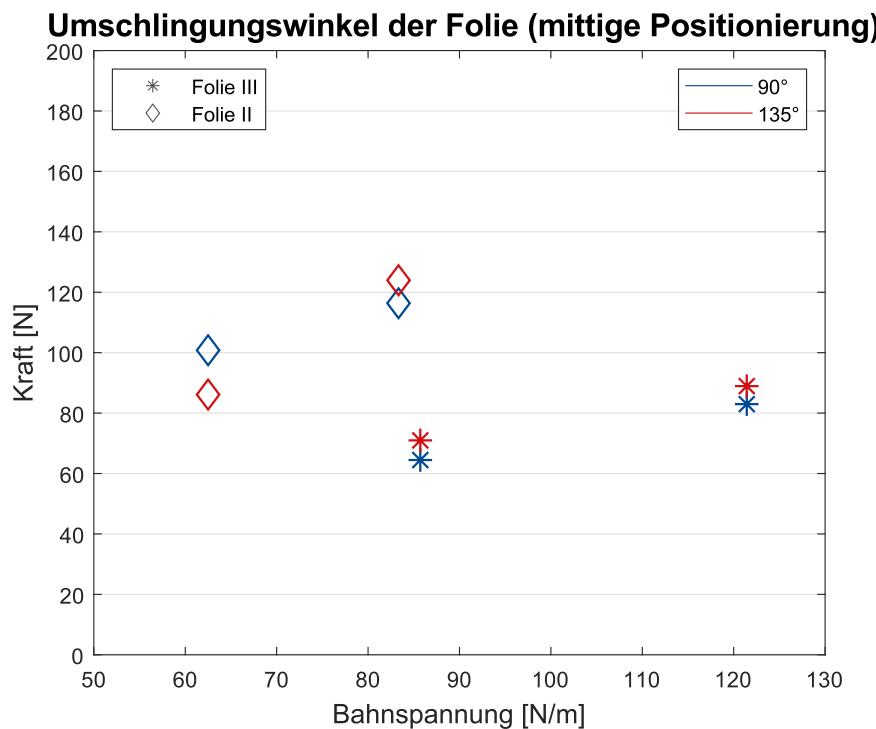


Abbildung 26: Darstellung der manuellen Auszugskraft aus der statischen Auflaufstelle unter zwei Umschlingungswinkeln.

Mit dem Kontaktkörper aus Silikon konnte der Versuch in dieser Form nicht durchgeführt werden, da ein manueller Auszug nicht möglich ist. Die benötigte Kraft kann nicht aufgebracht werden. Zu vermuten ist eine zu hohe Haftriebung zwischen Silikon und der Folien- bzw. Rohroberfläche.

Abbildung 27 zeigt, dass mit größerem Umschlingungswinkel auch größere Auszugkräfte zu erwarten sind. Zudem werden die Kontaktkörper mit unterschiedlich großer Auflagefläche eingeklemmt. Bei einer großen Klemmfläche muss auch eine höhere Kraft aufgebracht werden, um den Kontaktkörper herauszuziehen. Limitationen bezüglich des manuellen Auszugs mit dem Handkraftmessgerät sind zu berücksichtigen.

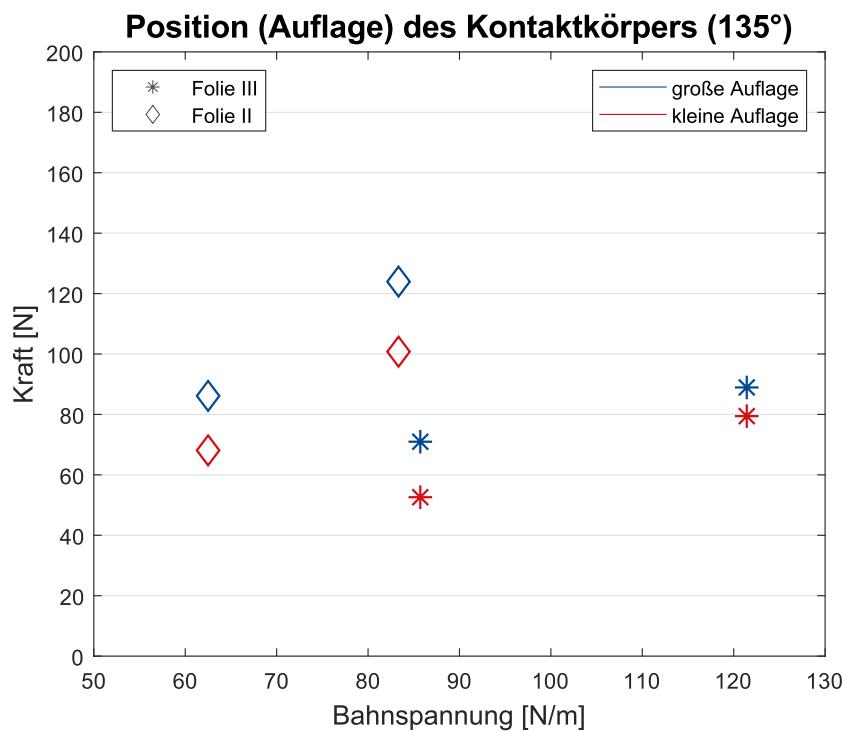


Abbildung 27: Darstellung der manuellen Auszugskraft aus der statischen Auflaufstelle für zwei verschiedenen große Auflagen des Prüfkörpers zwischen der Folie und dem Rohr.

## IV. Messprotokoll

Nr.:	Kontakt-körper	Folien	Bahnzug-kraft [N]	Bahngeschwindigkeit [m/min]	Auswertung
1	TPU	Folie I	120	20	x
2	TPU	Folie I	120	40	Dateifehler
3	TPU	Folie I	120	40	x
4	TPU	Folie I	120	60	x
5	TPU	Folie I	120	80	x
6	TPU	Folie I	120	100	x
7	TPU	Folie I	170	20	x
8	TPU	Folie I	220	20	x
9	TPU	Folie I	250	20	x
10	Silikon	Folie I	120	20	Dateifehler
11	Silikon	Folie I	120	20	x
12	Silikon	Folie I	170	20	x
13	Silikon	Folie I	220	20	x
14	Silikon	Folie I	120	40	Dateifehler
15	Silikon	Folie I	120	60	x
16	Silikon	Folie I	120	40	x
17	Silikon	Folie I	120	60	Abbruch
18	Silikon	Folie I	120	20	x
19	Silikon	Folie I	120	20	x
20	Silikon	Folie I	120	20	x
21	Silikon	Folie I	120	20	x
22	TPU	Folie I	120	20	x
23	TPU	Folie I	120	40	Abbruch
24	TPU	Folie I	120	60	Abbruch

25	TPU	Folie I	120	20	x
26	TPU	Folie I	120	40	x
27	TPU	Folie I	120	60	Abbruch
28	TPU	Folie I	170	20	Dateifehler
29	TPU	Folie I	220	20	Abbruch
30	Silikon	Folie I	120	20	x
31	Silikon	Folie I	220	20	x
32	Silikon	Folie II	120	10	x
33	Silikon	Folie II	120	20	x
34	Silikon	Folie II	120	40	x
35	Silikon	Folie II	100	60	x
36	Silikon	Folie II	220	10	
37	Silikon	Folie II	220	20	x
38	Silikon	Folie II	250	10	
39	Silikon	Folie II	250	20	x
40	Silikon	Folie II	170	10	x
41	Silikon	Folie II	170	20	x
42	Silikon	Folie II	220	10	
43	Silikon	Folie II	220	20	
44	TPU	Folie II	120	10	
45	TPU	Folie II	120	10	x
46	TPU	Folie II	120	20	x
47	TPU	Folie II	120	40	Abbruch
48	TPU	Folie II	120	60	x
49	TPU	Folie II	220	10	
50	TPU	Folie II	220	10	x
51	TPU	Folie II	220	20	x

52	TPU	Folie II	220	40	x
53	TPU	Folie II	120	10	
54	TPU	Folie II	120	20	
55	TPU	Folie II	120	40	
56	TPU	Folie II	120	60	
57	TPU	Folie II	220	10	x
58	TPU	Folie II	220	20	
59	TPU	Folie II	220	40	
60	TPU	Folie II	220	60	Dateifehler
61	TPU	Folie II	170	10	
62	TPU	Folie II	170	20	x
63	TPU	Folie II	250	10	
64	TPU	Folie II	250	20	x
65	TPU	Folie II	250	20	
66	Silikon	Folie III	120	20	x
67	Silikon	Folie III	120	40	
68	Silikon	Folie III	170	20	x
69	Silikon	Folie III	170	40	
70	Silikon	Folie III	120	10	
71	Silikon	Folie III	170	10	
72	TPU	Folie III	170	20	
73	TPU	Folie III	120	20	x
74	Silikon	Folie II	120	20	
75	Silikon	Folie II	120	20	
76	Silikon	Folie II	120	20	

## Impressum

Deutsche Gesetzliche  
Unfallversicherung e.V. (DGUV)  
Glinkastrasse 40  
10117 Berlin  
Telefon: 030 13001-0 (Zentrale)  
E-Mail: [info@dguv.de](mailto:info@dguv.de)  
[www.dguv.de](http://www.dguv.de)

## Weitere Informationen

Datum:  
Ausgabedatum 12/2025, erstellt 02/2025

Verfasser:  
Clermont, M. (IFA), Drolshagen, D. (IFA),  
Zimmermann, J. (IFA)

<https://publikationen.dguv.de>  
Webcode: p022841