

Beurteilung von Auflaufstellen

Literaturstudie, August 2024

Impressum

Herausgegeben von: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (DGUV)
Glinkastrasse 40
10117 Berlin
Telefon: 030 13001-0 (Zentrale)
E-Mail: info@dguv.de
Internet: www.dguv.de

Verfasst von: M. Clermont, D. Drolshagen, J. Zimmermann
Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen
Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin

Zusammengestellt für das Sachgebiet „Maschinen der
chemischen Industrie“ im Fachbereich „Rohstoffe und
chemische Industrie“ der DGUV.

Ausgabe: Ausgabedatum 12/2025, Studie 08/2024

Satz und Layout: Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen
Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin

Copyright: Diese Publikation ist urheberrechtlich geschützt.
Die Vervielfältigung, auch auszugsweise, ist nur
mit ausdrücklicher Genehmigung gestattet.

Bezug: Bei Ihrem zuständigen Unfallversicherungsträger oder
unter www.dguv.de/publikationen › Webcode: p022834

Inhaltsverzeichnis

Einführung	4
Teil 1	5
1.1 Grundlagen	5
1.2 Unfallberichte	8
1.3 Fazit	8
Teil 2	9
2.1 Körperkräfte	9
2.2 Unfallfolgen	13
2.3 Fazit	14
Teil 3	15
3.1 Materialbahn; nicht angetriebene Umschlingungswalze	15
3.2 Fazit	19
Literaturverzeichnis	20
Normen	21
Abkürzungsverzeichnis	22

Einführung

Diese Ausarbeitung gibt einen ersten Einblick in die Thematik der Einzugsgefährdung an Folienauflaufstellen bei *nicht angetriebenen* Bahnführungswalzen. Die aus der Literatur gewonnenen Informationen können als Orientierungshilfe für die Einschätzung von Einzugsgefahren herangezogen werden. Berücksichtigt wurde eine Auswahl an aktuellen Regelwerken und Normen, welche Sicherheitsanforderungen an ähnliche Gefahrstellen, u.a. aus der Kunststoff- oder Papierindustrie, beschreiben. Zudem lag der Fokus darauf, herauszuarbeiten, welche Ansätze es bereits gibt, Auflaufstellen unter Aspekten der technischen Mechanik zu beschreiben. Diese können als Grundlage für die Erstellung eines ersten Modells zur Abschätzung von Einzugskräften dienen. Um Einzugskräfte kritisch bewerten zu können, wurde ein Augenmerk darauf gelegt, welche Kraft eine Person aus biomechanischer Sicht den Einzugskräften entgegenbringen kann.

Die Literaturstudie gliedert sich in drei Teile:

Die Einleitung beschreibt die Notwendigkeit der Untersuchung, auf der Grundlage des „Status Quo“ der aktuellen Normen und Regelwerke. Zudem wird die Bedeutung der Untersuchung anhand von exemplarischen Schilderungen von Unfallgeschehen dargestellt (**Grundlagen & Unfallberichte**).

Des Weiteren wird beschrieben, welche aktiven Körperkräfte Personen mit den oberen Extremitäten unter Berücksichtigung verschiedener Körperpositionen aufbringen können. Die oberen Extremitäten wurden als besonders gefährdet hinsichtlich der Einzugsgefahr identifiziert. Zudem werden einige Unfallfolgen beschrieben (**Körperkräfte & Unfallfolgen**).

Mechanische Grundlagen des Kontaktes einer Materialbahn mit einer Bahnführungswalze sind ausschlaggebend für eine modellbasierte Berechnung von Einzugskräften und werden in dieser Arbeit beschrieben. Zudem werden Grundlagen der Kontaktmechanik im Hinblick auf den Einfluss von Reibungsfaktoren beschrieben (**Materialbahn & nicht angetriebene Umschlingungswalze**).

Teil 1

1.1 Grundlagen

Nach Neudörfer (2014) wird die Gefährdung an Auflaufstellen durch den „Einzugsspalt zwischen rotierenden und flexiblen auflaufenden Teilen, in dem Körperteile zuerst erfasst, dann gequetscht und mitgerissen werden“ beschrieben [1]. Solche Kontakt situationen treten häufig an Transportbändern, Riemenantrieben oder Materialbahnen auf. Im Fall des Einzugs in eine solche Auflaufstelle können leichte bis schwerwiegende Verletzungen auftreten, z. B. Quetschungen, Knochenbrüche und Amputations. Bewegte Teile bilden an Maschinen immer Gefahrenstellen, wenn ein ungewollter Kontakt des Menschen mit dem Maschinensystem auftreten kann. Diese Stellen haben meist eine technologische Funktion und sind bewusst so gestaltet [1]. Auflaufstellen treten unter anderem dort auf, wo eine Materialbahn, z. B. eine Folie, durch die Maschine geführt wird.

Nach der Maschinenrichtlinie sind Gefahrenstellen grundsätzlich zu vermeiden, wenn von diesen ein Unfallrisiko ausgeht. Die Maschinenrichtlinie sieht vor, dass „bewegte Teile [einer] Maschine so konstruiert und gebaut [sind], dass Unfallrisiken durch Berührung dieser Teile verhindert [werden]. Falls Risiken dennoch bestehen, müssen die beweglichen Teile mit trennenden oder nichttrennenden Schutzeinrichtungen ausgestattet [werden].“ (Maschinenrichtlinie 2006/42/EG, Anhang 1, 1.3.7. Risiken durch bewegliche Teile)

Beweglich trennende Schutzeinrichtungen mit Verriegelung sind zu verwenden, wenn häufige Eingriffe an beweglichen Teilen, die der Kraftübertragung dienen, vorgenommen sind. (Maschinenrichtlinie 2006/42/EG, Anhang 1, 1.3.8.1. Bewegliche Teile der Kraftübertragung)

In Folienmaschinen sind Bahnführungswalzen häufig bestimmten Prozessabschnitten wie z.B. dem Zuschnitt der Folie vorgelagert, um die Bahn unter anderem zu stabilisieren. Diese Abschnitte erfordern meist freien Zugang durch den Maschinenbediener, weshalb auch die Auflaufstelle an der Führungswalze frei zugänglich sein kann. Ein möglicher Kontakt mit der Auflaufstelle ist somit organisatorisch manchmal nicht vollständig auszuschließen. Trennende Schutzeinrichtungen hindern in manchen Fällen die technologische Funktion des Maschinenabschnitts. Für diesen Fall werden Schutzzeichen bzw. Warnzeichen angebracht. Diese sind jedoch keine Schutzeinrichtungen.

Wie das Sicherheitskonzept für Wickelmaschinen zur Folienherstellung beispielhaft zeigt, sind vereinzelte verfahrenstechnische Anforderungen in den Sicherheitskonzepten

nach Maschinenrichtlinie und geltender Norm (DIN EN 13418:2013) nicht ausreichend berücksichtigt [2]. Aus diesem Grund sind Beurteilungsgrundlagen von Eingriffssituationen bei rotierenden Maschinenteilen notwendig. So auch bei den beschriebenen Folienauflaufstellen, die nicht Bestandteil von Wickelprozessen o.ä. sind.

Im Rahmen der Anforderungen des Sicherheitskonzeptes wird zum Beispiel für Wickelmaschinen empfohlen, dass bei notwendigem Betrieb für das einmalige Einziehen der Bahn und gleichbedeutendem Eingriff die Umfangskraft $\leq 150 \text{ N}$ sein muss. Diese sicherheitstechnische Anforderung gilt, wenn das Einziehen der Bahn auf die Rolle aus technischen Gründen im Stillstand oder mittels automatischer Einrichtungen nicht möglich ist [2]. Eine konkrete Eingrenzung welche Einzugskräfte bei der festgelegten maximalen Umfangskraft, entstehen gibt es bisher jedoch nicht.

Es ist notwendig, die Rahmenbedingungen der Maschine so zu gestalten, dass Auflaufstellen keine erhöhte Einzugsgefahr darstellen. Aus der DIN EN 13418:2013-08, Kunststoff- und Gummimaschinen – Wickelmaschinen für flache Bahnen – Sicherheitsanforderungen, ist zu entnehmen, dass das Sichern der Materialauflaufstellen bei nicht angetriebenen Walzen nicht erforderlich ist, wenn die Walzen mit der Hand gehalten werden können und keine Gefährdung durch die Eigenschaft des Materials besteht (z.B. Kleben, Rauigkeit usw.).

In der DIN EN ISO 11111-1:2016-12: Textilmaschinen – Sicherheitsanforderungen – Teil 1: Gemeinsame Anforderungen (ISO 11111-1:2016) werden ebenfalls Sicherheitsanforderungen an Walzen beschrieben. Hier findet sich die Anmerkung wieder, dass Walzen [...] unabhängig davon, ob sie direkt oder durch Reibung zwischen der Walzenoberfläche und einem beweglichen Transporttuch, Mitläufer oder dem beweglichen Prozessmaterial angetrieben werden, [...] ein Risiko für gefährdete Personen darstellen können, es sei denn, die Walzen können leicht mit der Hand gehalten werden (Abschnitt 6.5 Walzen, Anmerkung 1).

Die Sicherung der Einzugsstellen zwischen Walzen und dem auflaufendem Prozessmaterial wird wie folgt beschrieben:

Einzugsstellen zwischen Walzen und dem auflaufenden Prozessmaterialien müssen nicht gesichert werden, wenn die Bedingungen von Anhang D erfüllt sind oder eine Risikobeurteilung nach ISO 12100:2011 und ISO/TR 14121-2 nur ein geringes Verletzungsrisiko für Finger und Hände zeigt. Die in Anhang D (ISO 11111-1:2016) beschriebenen Bedingungen umfassen unter anderem den

Umschlingungswinkel, die Warenzugkraft bezogen auf die Warenbreite sowie die Walzenoberfläche, die Walzengeschwindigkeit und den Walzendurchmesser.

Darüber hinaus beschreibt die Norm, ab wann Einzugsstellen allgemein mit trennenden oder nicht trennenden Schutzeinrichtungen versehen werden müssen.

Der Ansatz der händischen Kontrolle ist in der Praxis jedoch nicht immer durchführbar und auch nicht zu empfehlen. Auch ein kontrollierter Kontakt mit der Walze birgt ein potenzielles Risiko und sollte daher vermieden werden. Generell sind Sicherheitsabstände für die oberen Gliedmaßen nach EN ISO 13857:2020 einzuhalten.

Die DIN EN 1010-4:2010-12 Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsanforderungen an Konstruktion und Bau von Druck- und Papierverarbeitungsmaschinen – Teil 1 und Teil 4 beschreibt die Notwendigkeit von Schutzeinrichtungen und deren Anforderungen.

Teil 1 der Norm ist zu entnehmen, dass Einzugsstellen auch bei nicht motorisch angetriebenen Walzen vorhanden sind, wenn sie durch die Materialbahn entsprechend angetrieben werden. Die Gefährdung kann von verschiedenen Faktoren abhängig sein, z. B. Art und Festigkeit des Materials, Umschlingungswinkel, Bahngeschwindigkeit, Trägheitsmoment. [...] (3.2. Einzugsstellen). Allgemein sind Einzugsstellen an Zylindern, Walzen, Trommeln, Rollen und ähnlichen Teilen durch Schutzeinrichtungen oder durch Mindestabstände nach EN 349:1993 abzusichern (5.2.1 Sicherung von Einzugsstellen).

In Teil 4 wird die Anforderung an Auflaufstellen wie folgt beschrieben: [...] Die Einzugsstellen zwischen der beschichteten reißfesten Materialbahn und Umlenkwalzen [Skizze: eigen], die von Durchgängen aus in der Maschine erreichbar sind und deren Umschlingungswinkel 45° und mehr beträgt, müssen durch feste Schutzeinrichtungen gesichert sein. [...] (DIN EN 1010-4:2010-12, Absatz 5.4.1.12).

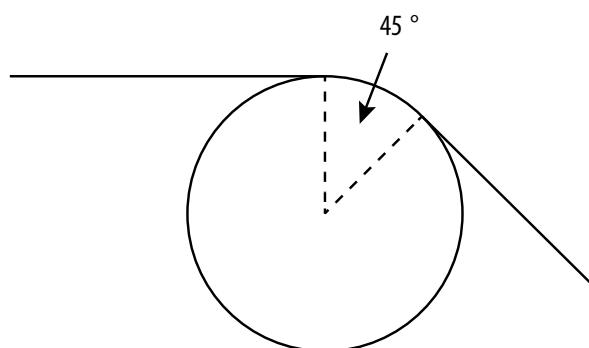


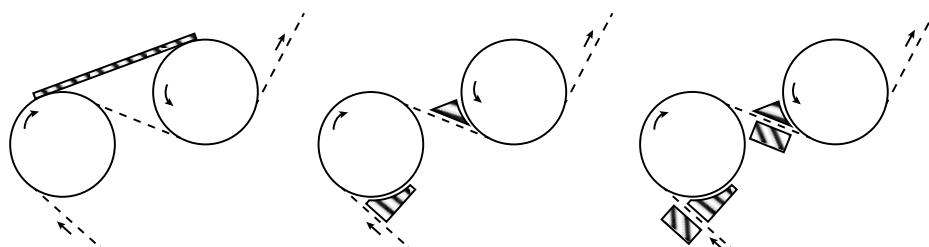
Bild 1: Skizze Umschlingungswinkel an Umlenkwalze nach der Darstellung in der Norm DIN EN 1010-4:2010-12

In der DIN EN 1034-1:2010-12: Sicherheit von Maschinen – Sicherheitstechnische Anforderungen an Konstruktion und Bau von Maschinen der Papierherstellung und Ausstattung – Teil 1: Gemeinsame Anforderungen, Deutsche Fassung EN 1034-1:2010-12 (zurückgezogen, aktuelle Version: DIN EN 1034-1:2021-08) werden Schutzeinrichtungen an Auflaufstellen ebenfalls beschrieben.

Auflaufstellen von Filzen, Sieben oder Bändern, die für den Operator erreichbar sind, müssen durch feststehende trennende Schutzeinrichtungen gesichert sein. Vorzugsweise sind trennende Schutzeinrichtungen zu verwenden, die unmittelbar vor der Auflaufstelle angebracht sind und einen Eingriff verhindern. Wenn dies nicht möglich oder zweckmäßig ist, sind trennende Schutzeinrichtungen mit Sicherheitsabständen nach EN ISO 13857:2020 zu verwenden (5.4.2 Schutzeinrichtung an Auflaufstellen).

In der BG Information 653 wird die Sicherung von Gefahrenstellen an Walzen beschrieben. So kann das Einzugsrisiko an nicht angetriebenen Walzen, bei niedrigen Bahnspannungen und begrenzten Umschlingungswinkeln (z.B. z.B. $< 90^\circ$ bei Webwaren oder $< 180^\circ$ bei Strickwaren) ausgeschlossen werden. Bei der Gefahr des Einzugs aus resultierenden hohen Bahnspannungen, muss der Eingriff durch Schutzeinrichtungen verhindert werden. Ansonsten sei ein Ausschluss der Gefährdung nur durch Versuche möglich [3].

Bild 2: Trennende Schutzeinrichung nach BG Information 653 [3]



Die beschriebenen Auszüge aus den aufgeführten Normen zeigen Anforderungen an Schutzeinrichtungen, um eine Gefährdungsreduzierung an Einzugsstellen umzusetzen. Es werden Anforderungen beschrieben, für die eine Anbringung von zusätzlichen Schutzeinrichtungen nicht notwendig ist. Jedoch gibt es nach unserem Kenntnisstand kein (quantitatives) Verfahren für eine Gefährdungsbeurteilung, welches tatsächlich wirkende Einzugskräfte beschreibt und diese kritisch einordnet, somit auch keinen Nachweis, ob diese Stellen tatsächlich unkritisch sind.

Des Weiteren ist zu beachten, dass die zitierten Normen (DIN EN 1034-1:2010-12, DIN EN ISO 11111-1:2016-12 und DIN EN 1010-4:2010-12) aufgrund der abweichenden Prozessmaterialien möglicherweise nicht eins zu eins für Folienmaschinen anwendbar sind. Eine Übertragbarkeit der Gestaltungsparameter auf Folienmaschinen ist schwierig bzw. nicht ohne Überprüfung möglich¹. Im Hinblick auf die Beurteilung der Gefährdung speziell an Folienmaschinen ist eine gesamtheitliche Betrachtung notwendig. Es wurden bisher keine studienbasierten Beurteilungsgrundlagen für notwendige Gestaltungsparameter an Folienmaschinen, welche zur Risikobeurteilung herangezogen werden können, identifiziert.

Ein geringes Verletzungsrisiko für Finger und Hände (DIN EN ISO 11111-1:2016-12) kann z.B. nach dem aktuellen Kenntnisstand nicht mittels konkreter Untersuchungsergebnisse beschrieben werden. Die Sichtung verschiedener Unfallberichte zeigt, dass die Gefahr bei einem Einzug in eine Auflaufstelle bei Folienmaschinen auch darin bestehen kann, dass im Fall eines nicht schwerwiegenden Mitreißens ein eigenständiges Entfliehen aus der Gefahrenstelle nicht mehr möglich ist. In diesem Fall könnten die Belastungsdauer und einsetzende Reibungseffekte zu oberflächlichen Verletzungen oder Verbrennungen der Extremitäten führen. Häufig führen Reibungen zwischen einem externen Körper und der Haut zu Blasen (wiederholende Bewegung) und leichten Abrasionen [4]. Aufgrund der Arbeitsplatzgestaltung kommen besonders häufig die oberen Extremitäten in Kontakt mit Auflaufstellen.

Ältere Studien stellen die potenziellen Gefahren durch bewusstes Entfernen der Schutzeinrichtungen von rotierenden Maschinenteilen dar. Im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) wurde an der Universität Wuppertal eine Untersuchung zur Erfassung von solchen Gefahren durchgeführt. Die damalige Grundlage der Untersuchung von 1999 lautet wie folgt:

„[...] Die Vorschriften und Regelungen zum Schutz vor rotierenden Maschinenteilen fordern fast ausnahmslos die Anbringung bzw. die Anwendung von feststehenden oder beweglichen trennenden Schutzeinrichtungen. Es gibt jedoch Einsatzfälle, vor allem besondere Betriebszustände, wie das Anfahren, Abschalten, Erproben, Einrichten, Umrüsten, Programmieren, Fehlersuchen, Störungsbeseitigen, Materialstaubbeseitigen, Reinigen, Warten und das Inspizieren, bei denen auf die trennenden Schutzeinrichtungen ganz verzichtet werden muss oder diese vorübergehend beseitigt werden müssen, welche insbesondere zum Schutz von Personen gegen mechanische Gefährdungen, einschließlich der gefährlichen Maschinenteile, vorgesehen sind.“ ([5], S.1)

„[...] Daneben ist in Einzelfällen auch ein Eingreifen bei laufendem Betrieb in unmittelbarer Nähe von Gefahrenstellen erforderlich. Dabei kann es dann, z. B. für Maschinenarbeiter, Einrichter oder Instandhalter, zu Gefährdungssituationen kommen, wobei schwere und tödliche Unfälle nicht auszuschließen sind. Für die betrachteten Einsatzfälle fehlen z. T. noch Gestaltungsparameter und Grenzwerte, wie z. B. zulässige Drehzahl, Durchmesser, spezifische Oberflächengestalt, oder vorhandene Gestaltungslösungen sind noch nicht ausreichend auf Verallgemeinerbarkeit überprüft worden [...]“ [5].

Im Rahmen der Untersuchung der BAuA wurden Gefährdungsbeispiele ermittelt und Ableitungen für erforderliche Parametergrenzwerte gewonnen. Konkrete Richtwerte wurden jedoch nicht erarbeitet, sodass es aktuell keinen ausreichenden Lösungsansatz zur Bestimmung von notwendigen Gestaltungsparametern von Auflaufstellen und kritischen Belastungswerten bei einem Einzug gibt [5].²

Nach aktueller Betriebssicherheitsverordnung sind die Verfahrensprozesse des aktiven Eingreifens in solche Gefahrenstellen zu vermeiden, jedoch nie ganz auszuschließen. Hinsichtlich der Gefährdungsbeurteilung nach Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV) gilt: [...] Die Arbeitsmittel einschließlich ihrer Schnittstelle zum Menschen müssen an die körperlichen Eigenschaften und die Kompetenz der Beschäftigten angepasst sein sowie biomechanische Belastungen bei der Verwendung vermieden sein. Zu berücksichtigen sind hierbei die Arbeitsumgebung [sowie] die Lage der Zugriffstellen [...] (§ 6 Grundlegende Schutzmaßnahmen bei der Verwendung von Arbeitsmitteln).

Giraud et. al. 2004 haben 85 schwere Arbeitsunfälle in den USA, bezogen auf die Gefahrenstelle, an denen diese

aufraten, betrachtet. Ca. 11 % der Gefahrstellen waren Umlenk- und Tragrollen. Ein Drittel der Arbeitsunfälle an diesen Gefahrenstellen entstand bei Reinigungsarbeiten (31 %). Ca. 26 % der Unfälle entstehen bei Instandhaltungsprozessen an einem bewegten Förderband [6]. Auch wenn diese Betrachtung nicht im Detail Auflaufstellen als Gefahrstelle ausmacht, so wird deutlich, dass Reinigungsarbeiten und Instandhaltungsarbeiten nicht unerheblich für das Risiko der Gefährdung vergleichbaren Gefahrstellen sind. Diese Gefahrenstellen lassen sich häufig mit trennenden Schutzeinrichtungen vermeiden.

1.2 Unfallberichte

Im Folgenden werden beispielhaft zwei Unfallszenarien beschrieben. Diese wurden aus Unfallberichten des Sachgebietes Maschinen der chemischen Industrie der DGUV anonymisiert abgeleitet.

Unfall 1: Randabschnitt – Auflaufstelle an nicht angetriebener Umlenkwalze

Bedienpersonal (keine Reinigungskraft) wurde während des Reinigungsprozesses, welcher im Normalbetrieb nicht vorgesehen ist, mit einem Tuch gefangen und in die Gefahrenstelle eingezogen. Ein eigenständiges Befreien bzw. Bedienen der Not-Halt-Einrichtung war nicht möglich. Die Person konnte dank eines aufmerksamen Kollegen nach kurzer Zeit befreit werden. Es kam zu leichten Verletzungen (Verbrennung/Quetschung) des linken Arms.

Die Verletzungsschwere wurde als weniger problematisch betrachtet, jedoch könnte diese durch eine längere Einzugsdauer erhöht werden. Das nicht selbständige Befreien aus dieser Situation erhöhte die Gefährdung. Ein Reißen der Materialbahn war aufgrund der Materialstärke nicht möglich.

Die Unfallstelle war eine nicht-angetriebene Umlenkrolle ca. 1,60 m über dem Boden mit einem Umschlingungswinkel der Folie von 60–90°. Die Bahngeschwindigkeit betrug 40 m/min (30m/min im Normalbetrieb) und die Folientemperatur ist <40°C.

Not-Halt-Stopp: Stopp des Bandbetriebs mit sofortigem Nachlass der Bahnspannung (Nachlaufzeit vorhanden).

Unfall 2: Gummiextrusion – Materialaufgabe

Bei einer Gummigeschwindigkeit von 0,12 m/s [7,2 m/min] wurde ein männlicher handschuhtragender Bediener mitgerissen und in eine Quetsch- / Einzugsstelle zwischen nicht selbst angetriebenen Rollen hineingezogen. Bei dem Vorfall kam es zum Verlust von vier Fingern der rechten Hand.

Die beschriebenen Unfallszenarien zeigen, dass eine Einzugsstelle zwischen Materialbahn und Walze schwerwiegende Verletzungen verursachen kann. Unfall 1 zeigt, dass bei leichten Verletzungen die Belastungsdauer von Bedeutung sein kann.

1.3 Fazit

Auflaufstellen an Folienmaschinen stellen eine potenzielle Gefährdung durch einen unkontrollierten Einzug dar. Häufig sind feststehend trennende, beweglich trennende oder berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen etc. prozessbedingt nicht umsetzbar, da diese die technologische Funktion der Maschine behindern könnten. Die Anforderung an Schutzeinrichtungen wird für Auflaufstellen häufig so beschrieben, dass diese nicht notwendig sind, wenn von einem geringen Verletzungsrisiko auszugehen ist oder Walzen mit der Hand gestoppt werden können. Eine Bewertungsgrundlage, in welchen Fällen dies der Fall ist, gibt es nach unserem Kenntnisstand jedoch nicht.

Eine Betrachtung einer zumutbaren Gefährdung am Einzugsplatz hinsichtlich der Belastungen auf den menschlichen Körper, insbesondere der oberen Extremität, könnte ein zielführender Ansatz sein.

Über das Verletzungsrisiko an Folienauflaufstellen ist bisher wenig bekannt, somit können aktuell nur Annahmen getroffen werden. Die Auswertung der vorliegenden Unfallberichte (anonymisiert) schildert jedoch die Situation, dass ein Problem darin besteht, dass sich in der Einzugsstelle gefangene Personen nicht selbstständig aus dieser befreien konnten, um die Maschine stillzulegen. Ein mögliches Verletzungsrisiko ist neben der akuten kurzzeitigen (mögliches Abtrennen von Körperteilen) auch die länger andauernde (Beschädigung oberflächlicher Strukturen durch z. B. Verbrennungen) Belastung.

Eine hinreichende Aussage bezüglich der Einzugsgefahr, besonders an Auflaufstellen an nicht angetriebenen Walzen, und notwendiger Gestaltungsparameter, um diese auszuschließen, ist bisher nicht bekannt. Eine gezielte Beurteilung der Gefährdung und des Verletzungspotenzials ist bisher nicht möglich.

Es ist notwendig, eine Grundlage für die Bewertung zu schaffen und einzugrenzen, welche Maschinen- und Prozessparameter an Folienmaschinen zu einem Einzug in eine Auflaufstelle führen können. Dem Betreiber soll dadurch ermöglicht werden eine Gefährdungsbeurteilung schon in einem frühen Stadium der Konzeptphase von Folienmaschinen durchzuführen.

Teil 2

2.1 Körperkräfte

Körperkräfte beschreiben in diesem Zusammenhang, welche Kräfte eine Person aktiv aufbringen kann, unter Berücksichtigung der biomechanischen Belastbarkeit und der Bewegungsausführung. Im weiteren Verlauf dient die Haltung der oberen Extremität ausgestreckt vor der Brust (0°) bis ausgestreckt über dem Kopf (90°) als Orientierung für die Betrachtung der Körperkräfte.

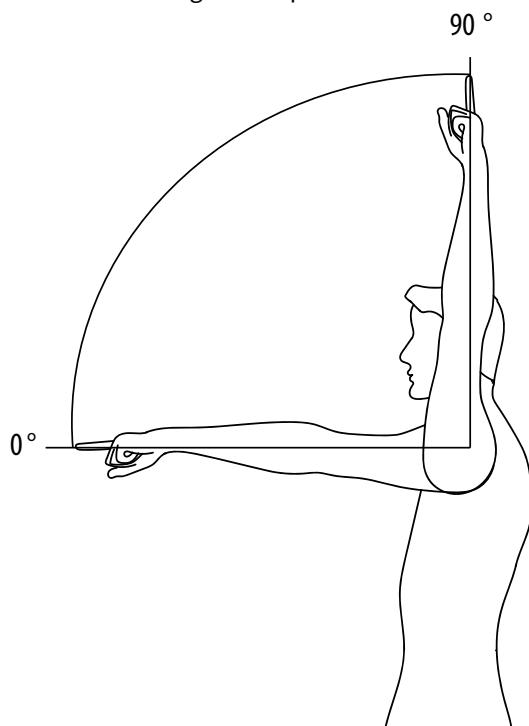


Bild 3: Winkel der Armposition in der Sagittalebene

Der Montagespezifische Kräfteatlas (BGIA-Report) beschreibt Körperkräfte des Arm-Schulter-Systems und des Hand-Finger-Systems. Diese können als Richtwerte bei der Arbeitsplatzgestaltung angenommen werden.

Die im Kräfteatlas aufgezeigten Kräfte beschreiben keine dynamische Bewegung, wie sie in der Praxis häufig aufgebracht wird. Die beschriebenen Kräfte beziehen sich auch statische, isometrische Kraftaufbringung. Statische Kraftaufbringungen sind methodisch einfacher zu reproduzieren. Zu beachten ist, dass die isometrische Muskelkraft zu

einer Verminderung der Durchblutung führt, weshalb die Dauerleistung bei ca. 15 % der individuellen Maximalkraft liegt. Das ist bei der Arbeitsplatzgestaltung und auch bei der Beurteilung von möglichen Gefährdungen zu berücksichtigen.

Die ermittelten Kräfte werden auch als Aktionskräfte bezeichnet und können auf verschiedene Weisen bestimmt werden. Für die Berechnung von Aktionskräften sind eine messtechnische Datenerfassung oder empirische Erkenntnisse notwendig. Die Bewertung von Aktionskräften ist die Beurteilung einer fallbezogenen Zulässigkeitsgrenze. Die Ermittlung von Aktionskräften ist durch versuchsmethodische, interindividuelle und intraindividuelle Einflussgrößen sowie Umwelteinflüsse limitiert [7].

Isometrische Muskelkräfte bzw. Aktionskräfte werden durch folgende Faktoren beeinflusst [7]:

- gestaltbare Systemparameter (Körperstellung/-haltung, Raumpunkt, Hauptkraftrichtung, Betätigungsrichtung, Kopplungsart, Fußstellung, Griffart, branchenabhängige Gewichte, usw.)
- biomechanische und physiologische Einflussfaktoren (Körbergewicht, anthropometrische Maße, Geschlecht, usw.)
- psychologische Einflussfaktoren der Menschen (Leistungsbereitschaft, Motivation usw.)

Sie sind somit stark situationsabhängig und sehr stark abhängig von körperlichen Voraussetzungen.

Die reallistische Kraftausübung wird durch die Körperhaltung beeinflusst. Die Körperhaltung ist stets das Produkt aus Arbeitsplatz- und/oder Produktgeometrie und anthropometrischen und biomechanischen Eigenschaften einerseits sowie Fähigkeiten des Bewegungsapparates und Fertigkeiten der Person andererseits. Symmetrische Körperhaltungen sind gut reproduzierbar. Die Körperhaltung ist entscheidend für die aufzubringende Kraft und kann negativ durch eine Neigung oder Rotation des Körpers beeinflusst werden [7].

Der Kräfteatlas zeigt die vorher festgelegten Perzentile der Maximalkraft bei beidarmiger Ausübung für Männer. Die Werte für Frauen werden mit dem Faktor 0,5 berechnet.

Montagespezifischer Kraftatlas											
F_{max}		Alle Kräfte in Newton [N]									
Ganzkörperkräfte, beidhändig, Männer (Korrekturfaktor für Frauenwerte: 0,5)											
Die angegebenen Werte sind die Resultierenden der Kraftvektoren auf 5 N gerundet											
P15 : 15. männliches Kraftperzentil (für Planungsanalysen) P50: 50. männliches Kraftperzentil (für Ist-Analysen)											
aufrecht		P15	P50	gebeugt		P15	P50	über Kopf			
	+A	380	515		+A	320	485		+A	360	455
	-A	405	530		-A	305	405		-A	410	520
	+B	260	340		+B	315	420		+B	245	330
	-B	380	505		-B	440	645		-B	395	525
	+C	205	315		+C	225	335		+C	160	235
	-C	170	280		-C	140	230		-C	150	235
stehen - aufrecht		h = 1 500 mm		gebeugt		h = 1 100 mm		über Kopf		h = 1 700 mm	
	+A	320	450		+A	275	410		+A	345	460
	-A	345	455		-A	290	360		-A	410	520
	+B	335	485		+B	335	555		+B	320	430
	-B	370	530		-B	340	475		-B	340	445
	+C	225	335		+C	220	310		+C	200	300
	-C	180	265		-C	160	230		-C	200	295
knie - aufrecht		h = 800 mm		gebeugt		h = 600 mm		über Kopf		h = 1 100 mm	
	+A	315	435		+A	295	425		+A	330	410
	-A	375	465		-A	300	400		-A	395	475
	+B	330	435		+B	380	485		+B	305	390
	-B	315	410		-B	325	450		-B	325	390
	+C	190	270		+C	205	300		+C	155	215
	-C	175	260		-C	155	230		-C	150	220
sitzen - aufrecht		h = 1 000 mm		gebeugt		h = 800 mm		über Kopf		h = 1 200 mm	

Bild 4: Beispielhafte Darstellung im Montagespezifischen Kraftatlas. Quelle: [7]

Das 15. Kraftperzentil dient für Planungsanalysen und das 50. für die Ist-Analysen. Das 15. Perzentil wurde anstelle des 5. Perzentils ausgewählt, da „niedrige“ Kräfte und Planungsanalysen üblicherweise diesem Kraftperzentil zugeordnet werden. Zudem ist es sinnvoll, ein niedriges Perzentil zu betrachten, um eine größere Spanne an Personen unabhängig des Geschlechts abzudecken. Wie aus **Bild 4** (blaue Umrandung) zu entnehmen, liegt das 15. Kraftperzentil, bei einer zu erwartenden Position der oberen Extremität frontal über Kopf, bei einem möglichen Einzug in eine Auflaufstelle bei ca. 300 N bis 400 N. Somit sind für Frauen entsprechend Werte im Bereich von 150 N bis 200 N anzunehmen [7].

Neben der Anwendung des Montagespezifischen Kräfteatlases konnten mögliche Körperkräfte bzw. Aktionskräfte der oberen Extremität bezogen auf die Bewegungsausführung (Zugbewegung) aus der Literatur abgeleitet werden.

Nach Riemann et al. 2016 sind bei Stoß- und Zugbewegungen der oberen Extremitäten mehrere Muskelgruppen beteiligt, welche die notwendigen Momente aufbringen und für die Stabilität an den einzelnen Gelenken der jeweiligen Körperteile sorgen [8]. Untersucht wurde die Maximalkraft bei isokinetischer Ausführung von Stoß- und Zugbewegungen anhand eines Probandenkollektivs aus 24 männlichen und weiblichen Probanden, ohne Vorerkrankungen und bei physischer Gesundheit (Alter: 23–25 Jahre).

Die Spitzentoßkräfte reichten von **573 N** bis **599 N** und die Zugkräfte zwischen **557 N** bis **575 N** [8]. Zu berücksichtigen bei der Einordnung dieser Maximalkräfte ist die geführte Ausführung am isokinetischen Dynamometer in sitzender Position und zusätzlicher Stabilisation durch eine Fixierung des Oberkörpers und Stützkraft der kontralateralen Extremität. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass bei isokinetischer Ausführung die

Bewegungsgeschwindigkeit konstant ist. In einem dynamischen Bewegungsablauf wie er in realtypischen Situationen vorkommt ist dies nicht der Fall.

Bei der Betrachtung der oberen Extremität ist zu berücksichtigen, dass die Gelenke sehr beweglich und Band- und Muskelgeführt sind. Der Faktor Bewegungsstabilität ist bei einer freien Ausführung nicht zu vernachlässigen. Im Bereich der oberen Extremitäten treten vermehrt Luxationen und Verletzungen des Band- und Muskelapparats auf.

Bei der Wiederherstellung der Funktionalität nach einer Verletzung der oberen Extremität liegt der Fokus mehr als bei anderen Körpersegmenten auf der Sensibilität und den feinmotorischen Strukturen. Aus diesem Grund sind besonders Verletzungen der Haut und von tieferen Strukturen sehr problematisch. Knöcherne Strukturen sind aufgrund ihrer Statik häufig mehr auf Druck- als auf Zugbelastungen ausgelegt, weshalb gerade Zugbelastungen häufig nicht im Fokus der Betrachtung liegen.

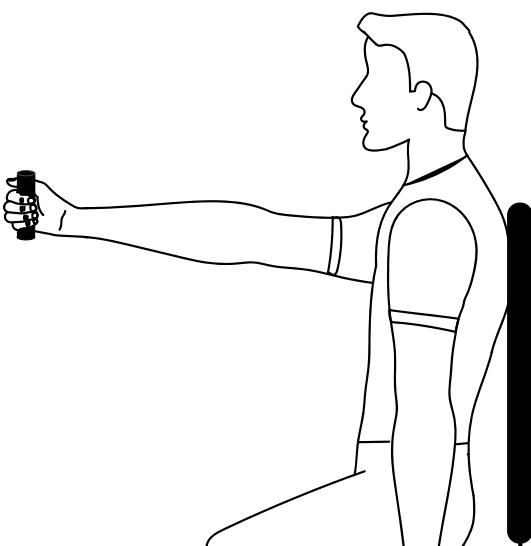


Bild 5: Skizze: Bewegungsausführung am isokinetischen Dynamometer. Quelle: ähnlich Riemann et al. 2016 [8]

Die Arbeitsgruppe Das et al. 2004 hat isometrische Stoß- und Zugkräfte der oberen Extremität bei einseitiger Ausführung für verschiedene Haltungspositionen (sitzende und stehende Position) untersucht. Im Hinblick auf die aufzubringende Kraft im Arbeitsumfeld ist eine optimale Körperhaltung notwendig, um eine Überlastung zu verhindern [9].

Aktuelle Untersuchungen zielen darauf ab, dass auch in extremen Arbeitsbereichen z.B. bei weniger gut erreichbaren Tätigkeiten, die maximal möglichen Kräfte

aufgebracht werden können. Das et al. 2004 konnten aufzeigen, dass die Aufbringung von Kräften zunächst stark von der Körperhaltung abhängt. So konnte eine ca. 30 % höhere Zugkraft bei isometrischer Ausführung im Sitzen (normale Reichweite), als im Stehen aufgezeigt werden [9].

Das et al. 2004 haben mit folgendem Versuchsaufbau den Einfluss von anthropometrischen Voraussetzungen, Griffentfernung, Winkelposition (vertikal-horizontal) und des Geschlechts untersucht. Die Probanden durften sich mit der konterlateralen Seite nicht abstützen und der Oberkörper wurde nicht fixiert [9].

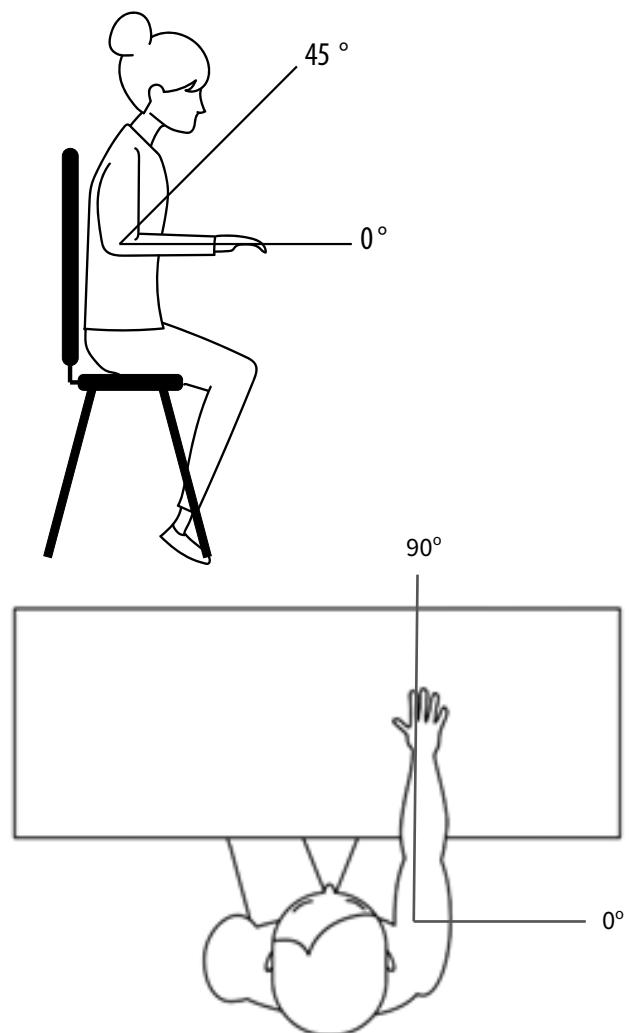


Bild 6: Versuchsaufbau / Winkelbestimmung in vertikale und horizontale Richtung. Quelle: ähnlich Das et al. 2004 [9]

Die Studie konnte den Winkeleinfluss der oberen Extremität auf die maximalen isometrischen Kräfte darstellen. Wenn der Arm sich in 90° (horizontal) in der sagittalen Ebene vor der Schulter befindet, sind die Schultermuskeln in ihrer optimalen Länge. Die höchsten Kräfte wurden in einer 90°-Position (vertikal) erfasst [9]. Dies hat einen großen Einfluss auf die Kraft-Längen-Relation der Muskulatur, welche ausschlaggebend für die jeweilige Generierung von Muskelkräften ist. Der Bewegungsumfang, der für die Einzugsgefahr an Auflaufstellen betrachtet wurde (z.B. vertikal, 45° über Kopf) konnte im Rahmen dieser Untersuchung abgedeckt werden, weshalb die Ergebnisse übertragbar sein können.

Das et. al 2004 zitieren in ihrer Diskussion weitere Untersuchungen, welche aufzeigen konnten, dass Zug- und Stoßbewegungen erheblich durch den Winkel im Ellbogengelenk beeinflusst werden. Die maximale Kraft (5. Perzentil) bei einem Winkel des Ellbogengelenks (*sitzende Körperhaltung*) von 150° liegt bei 245 N und bei 180° bei 223 N (Hunsicker et al. 1955² [9]).

Bei extremer Reichweite waren die Kräfte in der Regel geringer als bei normaler Reichweite, solange die Schultermuskulatur keinen Einfluss auf die Bewegungsausführung hatte. Befinden sich die Arme oberhalb der Schultern, so konnten höhere Kräfte aufgebracht werden als unterhalb. Das et al. 2004 konnten die Schlussfolgerung ziehen, dass ein signifikanter Einfluss der Kraftgenerierung (stehend) bei Männern bezogen auf die Reichweite nicht erkennbar ist [9].

Stehend betrug die durchschnittliche Zugkraft **ca. 148 N** bei Männern bzw. **ca. 85 N** bei Frauen. Betrachtet man im Detail die Armhaltung von 45° über Kopf (45° vertikal) und frontal vor der Brust (90° horizontal) betrug die mittlere Kraft **142,04 N ± 21,12 N** (bzw. 90,53 N ± 31,71 N, Frauen).

La Delfa et al. 2019 haben sich mit der Fragestellung befasst, welchen Einfluss die Orientierung der Hand bezüglich der Kraftgenerierung hat. Denn besonders im Arbeitsumfeld ist die Anforderung bzw. Belastung häufig sehr variabel, wodurch es schwierig ist, geeignete Grenzwerte der Last zu ermitteln. Untersucht wurde die maximale Belastung in die verschiedenen Bewegungsrichtungen; anterior (körperfern), posterior (körpernah), superior (nach oben), inferior (nach unten), medial (nach innen) und lateral (nach außen) bei verschiedenen Orientierungen eines Handgriffs (0°, 45°, 90°, 135°). Zusätzlich wurde

die Position des Griffes in der Horizontalen und Vertikalen verändert und somit der zusätzliche Einfluss der Armstellung ermittelt. Untersucht wurde die maximale Armkraft bei 15 Probanden im Alter von 19 bis 21 Jahren mit guten gesundheitlichen Konditionen (m/w). Der horizontale Abstand der Probanden zu dem Griff und Kraftsensor wurde festgelegt und konstant gehalten. Die Entfernung betrug für alle Probanden 80 % der maximalen Armstreckung. Die Kraft wurde für maximal 3 Sekunden aufgebracht (kurz, dynamisch), um Ermüdungseinflüsse zu reduzieren. Besonders die Aufbringung in anterior/posterior ist in Bezug auf Zugkräfte von Bedeutung [10].

Winkeldefinition: z.B. Schulter - 0°. Abstand zwischen Acromion- Boden (Position in der Vertikalen) und der Orientierung in der Horizontalen (0° entspricht der Stellung vor der Schulter)

Es wurden Effekte bzgl. der Kraftausübung und der Handorientierung ermittelt. Die Aufbringung von Stoßkräften ist limitiert durch die Fähigkeit der Probanden, die Stabilität der Gelenke der oberen Extremitäten aufrechtzuerhalten. Die Orientierung hat einen Einfluss auf die maximal ausgeübte Kraft. So zeigen die Ergebnisse, dass die Handorientierung im rechten Winkel zur ausgeübten Kraftrichtung (90°-Orientierung) die größte Kraftgenerierung ermöglicht [10]. In Zugrichtung (posterior) liegt die Spitzenkraft (Ausreißer) bei ca. **140 N**.

Chow et al. 2015 haben verschiedene Einflüsse bezüglich der Maximalkraft bei Bewegungsausführungen in Stoß- bzw. Zugrichtung untersucht. Hierzu wurden zwei Handgriffe zentral schulterbreit vor dem Körper positioniert. Der Abstand entsprach der funktionellen Armentfernung für jeden Probanden.

Untersucht wurde der Einfluss der Variation der Griffhöhe (100 cm und 150 cm über dem Boden), sowie die Orientierung der Griffe (horizontal und vertikal) in der Frontalebene. Zudem wurde auf Grundlage des Probandenkollektivs der Einfluss des Geschlechts untersucht. Während der Variation der Position und Orientierung sollte keine Veränderung der Körperhaltung vorgenommen werden (aufrechter Stand und schulterbreite Beinstellung) [11].

Das Ergebnis der Untersuchung ist die hauptsächliche Beeinflussung der Muskelkraft durch die Ausführungsart (Stoß-/Zugbelastung) und durch das Geschlecht. Frauen erbringen ca. 67 % der manuellen Muskelkraft von Männern. Zudem ist das Ergebnis dieser Studie, dass

² Hunsicker, PA. *Arm strength at selected degrees of elbow flexion*. Wright Air Development Center, Air Research and Development Command, United States Air Force, Wright-Patterson Air Force Base, 1955.

Stoßkräfte höher sind als Zugkräfte. Bei einer Positionierung in 150 cm Höhe ist der Einfluss der Ausführung (Stoß/Zug) deutlich. Die Ausführung ist generell stark durch die Positionierung des Körpers beeinflusst. Tendenziell zeigt die Untersuchung von Chow et al. 2015, dass höhere Zugkräfte bei niedrigerer Griffposition erzeugt werden, da der Rumpf womöglich weniger ausbalanciert werden muss. Im Rahmen dieser Studie konnte ein Einfluss durch die Orientierung der Griffe nicht festgestellt werden (Chow 2015) und steht somit entgegen der Erkenntnisse aus der Studie von La Delfa et al. 2019). Bei einer Positionierung der Griffe in 150 cm Höhe können Frauen eine Muskelkraft von **ca. 140 N** generieren, Männer **ca. 210 N** [11].

Brace et al. 2005 haben den Einfluss der Bewegungsausführung näher untersucht, indem man z.B. einen Wagen vor sich her schiebt und nachzieht. Die Zugaktivität ist die Aufbringung einer Kraft durch die Hand in horizontaler Richtung [12]. Stoß- und Zugkräfte sind durch einen dreistufigen Ablauf charakterisiert: Zunächst benötigt es eine initiale Kraft, um die Bewegung auszuführen; eine etwas geringere Kraft um die Bewegung/Ausführung zu halten; und letztlich eine abbremsende Kraft. Aus Zugkräften resultieren musculoskelettale Belastungen der Nacken-, Rücken-, Schulter- und Armmuskulatur [12].

2.2 Unfallfolgen

Ältere Studien zeigen, dass bei mangelnder Schutzeinrichtung besonders der Eingriff in mögliche Gefahrenstellen zu schwerwiegenden Unfällen führen kann. In der Textilindustrie kam es zu häufigen Verletzungen der Hand, die auch als „winger injuries“ bezeichnet wurden [13]. Oft führte der Eingriff in eine Wäschemangel zu Abrissfrakturen oder Hautabtrennungen der Hand. Hierfür wurde überwiegend das rotierende Element der Wäschemangel als Gefahrenstelle ausgemacht. Als Ursache für Verletzungen beim Eingriff gelten die Oberflächenbeschaffenheit des druckausübenden Elements, Spaltgröße und Rollengeschwindigkeit sowie die Einwirkzeit. Die Geschwindigkeit und Spaltgröße ist entscheidend für die Verletzungsschwere. Bei einer Spaltbreite von 2 bis 3 cm und langsamen Umdrehungsgeschwindigkeiten kommt es häufiger zu Knochenbrüchen, da hoher Druck auf tiefliegende Strukturen der Hand ausgeübt wird. Diese hohen Belastungen sind bei Folienauflaufstellen jedoch nicht zu erwarten. Bei geringen Spaltgrößen, bis zu 1 cm, kommt es vermehrt zu Hautabtragungen vor allem im Bereich der Finger. Ein Faktor hierfür ist der Versuch dem Einzug zu

entfliehen. Durch entstehende Relativbewegungen führen auftretende Scherkräfte zu Hautabtragungen [13].

Unfallberichte aus dem Hospital Regional, Comodoro Rivadavia in Argentinien zeigen, dass solche Einzüge sowohl offene als auch geschlossene Wunden erzeugen. Bei geschlossenen Wunden sind meist tiefere Strukturen betroffen [14].

Walzenquetschverletzungen

Bei Quetschverletzungen, wie sie häufig bei Einzugsstellen zwischen Walzen vorkommen, treten meist Schäden des kutanen und subkutanen Gewebes auf ohne dass dieses durchdrungen wird oder eine offene Verletzung entsteht.

Bei Walzenquetschverletzungen wirken gleichzeitig Druck-, Zug- und Reibungskräfte. Die Schwere der Verletzung resultiert aus dem Zusammenspiel dieser Krafteinwirkungen und macht eine detaillierte Voraussage kaum möglich. Nach Neudörfer 2014 hängt die Schwere der Verletzung primär von dem resultierenden Druck ab, der sich in dem viskoelastischen Gewebe aufbaut [1].

Grundsätzlich kann es bei Walzeneinzug zu drei grundlegenden Verletzungstypen der Haut kommen:

- Gewebeschäden in tieferen Strukturen
- Oberflächenverletzungen wie Hautrisse, Ablederungen oder Zerreißungen von etwas tiefer gelegenen Hautstrukturen im Bereich der Lederhaut
- Oberflächliche Verbrennungen, welche durch die auftretende Reibungswärme entstehen

Die auftretenden Verletzungen sind zum einen von der Gestaltung der Einzugs- bzw. Auflaufstelle und von der durch die Oberflächenbeschaffenheit der Walze/ Warenbahn beeinflussten Krafteinwirkung abhängig, zum anderen ist der zeitliche Verlauf des Einzugs und die mögliche Belastungsdauer für die Schwere der Verletzung entscheidend. Mit zunehmender Einzugstiefe können sich die mechanischen Belastungen verändern und die Verletzungsschwere negativ beeinflusst werden. Eine grundsätzliche Aussage über die resultierende Schwere der Verletzung ist einerseits aufgrund der Vielzahl an äußeren Einflüssen der Belastung und andererseits aufgrund der jeweiligen strukturellen Beschaffenheit der oberen Extremität kaum zu treffen [1].

Reibungsbedingte Verletzungen

Wundstellen entstehen bei sich wiederholender entgegengesetzter Bewegung zwischen der Körperstelle (Haut) und einer angrenzenden Fläche (z.B. Kleidung etc.). An den Kontaktflächen ist Reibung häufig mit Feuchtigkeit kombiniert. Meist sind die Folgen nicht schwerwiegend und milder Natur, jedoch entzündungsanfällig, wodurch Folgeschäden auftreten können [4].

Eine wiederholende Bewegung ist für den Auszug von Körperteilen aus Auflaufstellen nicht zu erwarten, deshalb müsste die kurzfristige Einwirkung der Reibung in Betracht gezogen werden. Dies tritt auf, wenn sich beim Kontakt mit der Folie und Walze, Gleitreibung einstellt.

Akute Abrasionen durch erhöhte Reibung sind häufig, fallen aber in der Regel bei geringer Einwirkung nicht schwerwiegend aus und benötigen keine zusätzliche medizinische Behandlung, wenn nur die oberste Hautschicht betroffen ist. Abrasion tritt bei kurzfristigen Einwirkungen durch Reibung auf. Ist die nächsttiefere Hautschicht betroffen (Dermis/Papillarschicht), kann es zu leichten punktuellen offenen Wunden kommen. Diese erfordern eine entzündungsreduzierende Behandlung [4].

2.3 Fazit

Die aus der Literatur gewonnenen Erkenntnisse decken sich weitestgehend mit der Erkenntnis aus dem Montagespezifischen Kräfteatlas, sodass versuchsmethodische Einflüsse erhebliche Auswirkungen auf die maximal mögliche Kraftgenerierung von Zug-, als auch Stoßkräften haben.

Für Frauen sind kritische Kraftwerte von bis zu **150 N** zu erwarten. Angenommen, dass Frauen ca. 50 % der Kraft von Männern aufbringen können, könnte die kritische Kraftgrenze nach oben korrigiert werden, abhängig vom Anwendungsfall. Eine Kraftgrenze von **max. 300 N** erscheint als plausibel, da im Fall des Einzugs eine dynamischere Bewegung zu erwarten ist.

Mögliche Unfallfolgen sind Verletzungen, die durch einen erhöhten Druck bei Quetschung und Abschürfung (hervorgerufen durch Reibung an den eingezogenen Körperteilen) entstehen. Diese können in ihrer Schwere stark variieren und wie in den Unfallberichten dargelegt, bis zum Abriss einzelner Körperteile führen.

Teil 3

3.1 Materialbahn; nicht angetriebene Umschlingungswalze

Allgemeines

(nach „Erfahrungen und Grundlagen der Wickeltechnik“, Band 1+2, Taube 2019):

Entscheidend für den Transport von Warenbahnen ist, von welchem Medium die Transportarbeit ausgeht. Bei Auflaufstellen an nicht angetriebenen Umschlingungs-/Umlenkwalzen wird diese von der Materialbahn selbst übertragen. Dies geschieht nur durch die Aufbringung von „inneren“ Kräften im Material, den Zugkräften. Die Warenbahn treibt die nicht angetriebene Walze bei ausreichendem Kraftschluss an. Reibungsverluste der Walzenlage rung und evtl. Energien zur Beschleunigung müssen dabei überwunden werden. Zudem muss eine ausreichende Spannung der Bahn zwischen zwei Führungswalzen gewährleistet sein, da das Eigengewicht der Folie Materialdehnungen und ein Durchhängen verursachen kann ([15], Band 1).

Bei Führungswalzen muss die Umfangsgeschwindigkeit der Walze gleich der momentanen Geschwindigkeit der Warenbahn sein, um relative Geschwindigkeiten oder Materialdehnungen und -stauchungen zu vermeiden.

Zugkraft

Die Zugkraft dient der Spannung der Materialbahn (Bahnspannung). Das durch eine Antriebswalze eingeleitete Drehmoment führt zur Einleitung der Zugkraft in die Warenbahn. Die Zugkraft wird auch als spezifische Zugkraft angegeben (Kraft pro Einheitsbreite der Bahn) und entspricht der Bahnspannung. Beim Kontakt mit der Walze, nachdem die geradlinige Bewegung in eine Rotation übergeht, wirken Radialkräfte (Normalkraft) auf die Bahn. Die notwenige Kraft, um diese Radialkräfte auszugleichen, ist die Anpresskraft. Bei der Betrachtung von spezifischen Zugkräften (Bahnspannung) kann die Materialbreite variieren und es lassen sich dennoch gleiche Anpresskräfte berechnen ([15], Band 1).

Umfangskraft

Während der Führung der Folie über die Walze sollen keine relativen Verschiebungen erfolgen. Die Richtung der Antriebskraft aus dem äußeren Drehmoment wirkt tangential zum Walzenradius. Bei nicht angetriebenen Walzen entspricht diese Kraft der maximalen Reibungskraft zwischen Walze und Folie. Die Antriebskraft, auch

Umfangskraft (F_u), wirkt entgegengesetzt der Zugkraft (F_{zug}) und bildet sich aus der Differenz der einlaufenden und auslaufenden Zugkraft. Ähnlich wie die Hangabtriebskraft bei einer schiefen Ebene ist die Antriebskraft, proportional zur Anpresskraft (F_n), durch die eine notwendige Haftreibung zwischen beiden Komponenten auftritt. Beide Kräfte sind durch Reibungskoeffizienten miteinander Verknüpft (μ) [15].

$$F_u = F_{zug} \cdot \left(1 - \frac{1}{e^{\mu \cdot \theta}}\right) \quad (1)$$

$\theta = \text{Umschlingungswinkel}$

Bahnspannung

Besonders bei Folienmaschinen ist die Bahnspannung (\triangleq spezifische Zugkraft [Kraft/Einheitsbreite]) der Folie ein oft berücksichtigter Prozessparameter, da dieser einen großen Einfluss auf die Qualität der Folie hat. Das Verhältnis der Bahnspannung (T) lässt sich mit Hilfe der Seilreibungsformel (Euler-Eytelwein-Formel) beschreiben ([15], Band 2).

$$\frac{T_{ein}}{T_{aus}} = e^{\mu \cdot \theta} \quad (2)$$

Im Idealfall kommt es zu einem vollständigen Kraftschluss zwischen Bahn und Umlenkrolle. Aufgrund eines möglichen Lufteinschlusses durch erhöhte Bahngeschwindigkeiten kann das Verhältnis der Bahnspannung mittels Seilreibungsformel annähernd, jedoch nicht vollständig beschrieben werden [16]. Um die Berechnung zu vereinfachen, kann ein konstanter Kontaktdruck, ohne Reduzierung durch Lufteinschluss, entlang des Umschlingungswinkels angenommen werden. Rice et al. 2003 haben in einem 1D-Modell zur Bestimmung der Haftreibung zwischen Umlenkrolle und Bahn eine modifizierte Seilreibungsformel, unter Berücksichtigung des Lufteinschlusses, aufgestellt [16].

$$p_c = T/R (-p_a) \quad (3)$$

Das Verhältnis von Bahnspannung (T) zum Radius (R) der Umlenkrolle beschreibt den Kontaktdruck (p_c). Reduziert wird der Kontaktdruck durch den Anteil des Luftdrucks (p_a). Dieser kann jedoch bei der Annahme des vollständigen Kraftschlusses zwischen Bahn und Walze auch vernachlässigt werden.

Maximaler Kontaktdruck herrscht im statischen Fall, wenn die Geschwindigkeit von Bahn und Rolle gleich Null ist, da eine Erhöhung dieser zu einer Abnahme des Kontaktdrucks durch Lufteinschluss führt [16]. Im dynamischen Fall ist also immer mit einem Lufteinschluss zu rechnen, welcher jedoch das Einzugsgeschehen, bei anfänglichem Kontakt, nicht verändert. Für die modellbasierte Ermittlung der Bahnspannung wurde angenommen, dass die Bahn in Querschnittsrichtung starr ist und die Oberflächenbeschaffenheit der Bahn vernachlässigt wurde und für die Rolle als unendlich steif angenommen werden kann [16]. Durch Zentrifugalkräfte wird ebenfalls eine Spannung in der Bahn erzeugt. Die durch die Zugkraft erzeugte Spannung muss immer größer sein als die durch die Zentrifugalkraft. Der Einfluss der Haftreibung zwischen Bahn und Umlenkrolle muss für den Fall des Eingriffs neu beurteilt werden.⁴

Lynch et al. 2013 haben den Einfluss von zusätzlichen Umlenkwalzen bzw. Führungswalzen auf das Verhalten der Bahnspannung (T) betrachtet. Die Bahnspannung lässt sich nicht erhöhen, indem zwischen die Antriebswalze und der Zielwalze noch weitere Führungswalzen installiert werden [17]. Diese Erkenntnis ermöglicht eine Übertragung der vorgegebenen Bahnspannung am Antriebspunkt auf die Bahnspannung an der zu analysierenden Gefahrenstelle. Vorgelagerte Walzen erhöhen die Bahnspannung nicht [17].

$$T_n = E_{Bahn} \cdot \left(\frac{v_n}{v_{ref}} \cdot \left(1 + \frac{T_{ref}}{E_{Bahn}} \right) - 1 \right) \quad (4)$$

Auch hier wird der Vollkontakt bzw. Kraftschluss zwischen Bahn und Walze angenommen und relative Geschwindigkeiten sowie mögliche Lufteinschlüsse können vernachlässigt werden. Im Fall der Auflaufsituation auf angetriebenen Walzen ist die Bahngeschwindigkeit durch diese limitiert. Bei nicht angetriebenen Walzen muss man davon ausgehen, dass ausreichend Zugkraft dazu führt, dass keine relativen Geschwindigkeiten auftreten und die Bahngeschwindigkeit gleich der Walzengeschwindigkeit ist (). Bei ausreichender Traktion haben kleine Veränderungen der Reibungskoeffizienten zwischen Bahn und Umlenkwalze keinen Einfluss mehr auf die Bahngeschwindigkeit. Erst bei relativen Geschwindigkeiten ist ein möglicher effektiver Reibungskoeffizient nicht zu vernachlässigen (μ_{eff}) [17].

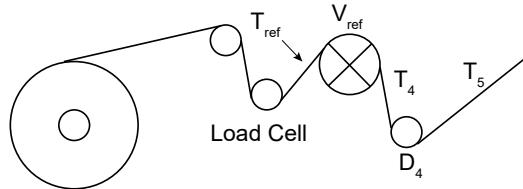


Bild 7: Verlauf von aufeinanderfolgenden Bahnführungswalzen. Quelle: nach Lynch et al. 2013

Die Arbeitsgruppe Zahlan et al., 1995 hat das Haftreibungsverhalten mittels FE-Simulation betrachtet. Im Kontaktverhalten zwischen Bahn und Umlenkwalze treten zwei Kontaktzonen auf, die „stick zone“ und „slip zone“. In der „slip zone“, bei Verlassen der Bahn von der Umlenkwalze, sind relative Bewegungen zu beobachten. In der „stick zone“ ist ein konstanter Kontakt im Gleichgewichtszustand von Brems- und Antriebsmoment (Geschwindigkeits- und Spannungsabhängig) zu erwarten. Beide Zonen sind abhängig vom Umschlingungswinkel [18].

Auch Harrison et al. 1998 haben die Bahnspannung entlang einer Antriebswalze untersucht. Hier wurde ebenfalls die Seilreibungsformel genauer betrachtet. Diese ist beeinträchtigt durch einen effektiven Reibungskoeffizienten, Umschlingungswinkel und lokal wirkende Momente. Zudem wird die Elastizität der Bahn nicht berücksichtigt. Bei Förderbändern werden meist effektive Reibungskoeffizienten von 0,25 (Stahl/Stahl) bis 0,35 (Stahl/Gummi) angenommen. Harrison et al. 1998 beschreiben einen effektiven Reibungskoeffizienten von 0,32 bis 0,84 abhängig der Bahnspannung. Die tatsächliche wirkende Reibung wird jedoch als deutlich größer (0,7 bis 1,2) angenommen. Bei Förderbändern ist der Einfluss von großen Spannungsänderungen zu vernachlässigen und gegebenenfalls aufgrund des größeren Flächengewichtes des Förderbands erwünscht [19].

Child et al., 1979 betrachten einen Reibungskoeffizienten zwischen gummibeschichteten Förderbändern und einer glatten Walze (keine genaue Angabe zu Oberfläche und Material) von 0,3 bis 0,8. Die Reibeigenschaften von Bahn zur Walze sind proportional zur realen Kontaktfläche („adhesion theory of friction“) [20].

Nach Jones et al. 2001 wird dann kein Drehmoment auf die Rolle übertragen, wenn das Verhältnis der Eingangs- zu Ausgangsbahnspannung eins ist. Für diesen Fall sind

4 persönliche Anmerkung

die Geschwindigkeiten der Materialbahn und Umlenkrolle entlang des gesamten Umschlingungswinkels gleich [21]. Wird die Haftreibung zu groß, wirkt sich dies ebenfalls negativ auf die Bahndehnung aus, da eine Schlupfdehnung eintritt. Der Spannungsgradient entlang des Umschlingungswinkels ist somit entweder

$$dT = 0 \quad (5)$$

oder

$$dT = \mu \cdot F_n = \mu \cdot \frac{T}{R}, \quad (6)$$

Der resultierende Kontakt kann beschrieben werden mit der Summe aus [21]:

- Anpresskraft
- Zentripetalkraft
- Luftdruck

Haftreibung

Reibungskoeffizienten sind gegebenenfalls experimentell zu bestimmen, jedoch aufgrund der individuellen Abhängigkeit von Grenzschichten (Lufteschluss), Oberflächenbeschaffenheit und Flächenpressung etc. häufig nicht reproduzierbar. Bezogen auf den Kontakt der Folie mit der Walze, ist der Reibungskoeffizient mittels der Kontaktmechanik einzuordnen, da das Spannungsverhältnis der Bahngleichung ausgeglichen sein sollte, um eine optimale Bahnführung zu ermöglichen.

Für den notwendigen Kraftschluss zwischen der Materialbahn und der Umlenkrolle ist eine ausreichende Haftreibung notwendig, um ungewollte Spannungen in der Materialbahn zu vermeiden. Die Funktion der Umlenkrolle ist es, die Materialbahn zu leiten, ohne deren Eigenschaften negativ zu beeinflussen [15]. Für den Fall einer idealen Rolle ohne Rotationswiderstand durch die Lagerung und unter Bedingungen im Vakuum, sollte kein Schlupfverhalten zwischen Bahn und Umlenkrolle auftreten, solange der Reibungskoeffizient größer null ist.

In einer Untersuchung bezüglich der Reibungseigenschaften von Plastikbahnen, in einem bestimmten Winkel entlang einer Umlenkwalze, haben Budinski et al. 2001 unter verschiedenen Methoden, den „capstan friction test“ als beste Methodik herausgearbeitet diese zu beschreiben, da diese den zu untersuchenden Zusammenhang am realistischsten beschreiben kann.

Der Versuchsaufbau dient der Untersuchung der Haftreibung mit Hilfe der Kraft, bei der die Haftreibung überwunden wird. Die Gleitreibung wurde über die mittlere Kraft während einer Verschiebung von 300 mm bestimmt. Die Bahn wurde mit einer Geschwindigkeit von 0,6–6 m/min über eine Umlenkrolle gezogen. Der Umschlingungswinkel betrug dabei 90° [22].

Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe zeigen, dass der Reibungskoeffizient für verschiedene Plastikbahnen auf einer hartbeschichteten Aluminiumwelle im Maximum zwischen 0,15 und 0,3 liegt. Der geringste Gleitreibungs-koeffizient tritt bei PTFE auf (< 0,1) [22].

Die effektiven Reibungskoeffizienten für Förderbänder aus den Studien Child et al. 1979 und Harrison et al. 1998 werden als größer angenommen. Grundsätzlich ist die notwendige Haftreibung zwischen Folie und Walze so zu beschreiben, dass Einflüsse wie Schlupf, Gleiten oder Lufteschluss zu vermeiden sind. Entlang des Umschlingungswinkels verändern diese jedoch die Kontakteigenschaften zwischen der Walze und der Folie.

Die folgenden Studien befassen sich mit dem Einfluss von Reibungseigenschaften, bei Kontakt mit der menschlichen Haut.

Die Arbeitsgruppe Hendriks et al. 2009 hat den Einfluss auf die Reibungseigenschaften der menschlichen Haut untersucht. Hierzu wurden Materialien mit verschiedenen Oberflächenbeschaffenheiten unter verschiedenen Umgebungssituationen (Luftfeuchte) untersucht. Die betrachteten Normalkräfte in dieser Studie liegen in einer Größenordnung von 1 N bis 5 N. Die Oberflächenrauheit hat einen deutlichen Einfluss auf den resultierenden Reibungskoeffizienten in sehr detaillierten Betrachtungsbereichen (sehr kleine Unebenheiten, Oberflächenrauheit < 1 μm). Je geringer die Rauheit, in der Größenordnung von < 1 μm, desto größer wird der Reibungskoeffizient (Haftreibung). Die Materialeigenschaft als solche spielt dabei eine untergeordnete Rolle [23]. In feuchten Bedingungen (Haut) ist der Reibungskoeffizient doppelt so hoch wie in trockenen Bedingungen für sehr geringe Rauheiten (0,1 μm), in diesem Fall ergibt sich für eine Betrachtung im sehr geringen μ-Bereich ein niedriger Reibungskoeffizient für eine glatte, trockene Kontaktfläche [23]. Grundsätzlich führt eine Schmierung der Oberfläche zu einer Reduzierung der Haftreibung und somit des Reibungskoeffizienten. Die Art der Körperstelle hat ebenfalls einen Einfluss, da sich die Oberflächeneigenschaft der obersten Hautschicht an unterschiedlichen Regionen unterscheidet. Die betrachtete Haftreibung der Haut zur

Kontaktfläche hat auch eine zeitliche Abhängigkeit, da die Haut zu Beginn des Kontaktes aufgrund der mechanischen Eigenschaften nachgibt.

Im Rahmen dieser Studie ist jedoch der geringe Kraftbereich (1 N bis 5 N) zu berücksichtigen. Bei der Kontakt situation an Auflaufstellen sind deutlich höhere Kräfte, von über hundert Newton, zu erwarten. Somit muss der Einfluss der Reibungseigenschaften in diesem Fall neu bewertet werden. Nach Martinot et al. 2006 ist die Kontakt situation der Fingerkuppe mit gerillten, rotierenden Körpern abhängig von Kontaktwinkel und der damit verbundenen Kontaktfläche. Die Kontaktkraft steht in Relation zur Kontaktfläche [24]. Auch hier ist die betrachtete Normalkraft in einem Bereich von 1 N.

O'Meara et al. 2001 haben die Reibeigenschaften der Haut an der Handinnenfläche in Kontakt mit Aluminium und Stählen mit verschiedenen Oberflächenbeschaffenheiten, unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen der Kontaktfläche der Haut (trocken, nass und eingeseift) untersucht. Methodisch wurden die verschiedenen Handläufe aus unterschiedlichem Material auf einer Kraftmessplatte befestigt und die Normalkraftkomponente und die horizontale Kraftkomponente bei Verschiebung der Handinnenfläche auf dem jeweiligen Handlauf ermittelt. Aus der Normalkraft und der jeweiligen Reibungskraft wurde der Haftreibungskoeffizient ermittelt. Die Normalkraftkomponente zeigt keine offensichtlichen Unterschiede bei der Verwendung von verschiedenen Materialien der Handläufe. Trockene und nasse Handinnenflächen führen zu keinem signifikanten Unterschied der Haftreibung. Bei trockenen Händen ist zu erkennen, dass die Reibungskoeffizienten bei strukturierten Oberflächen gegenüber glatten reduziert sind. Bei eingeseiften Handinnenflächen ist eine entgegengesetzte Reibeigenschaft zu beobachten [25].

Die Ergebnisse der Haftreibung liegen bei trockenen und nassen Handinnenflächen im Kontakt mit glatten Oberflächen in einem Bereich zwischen 0,9 und 1,3 und bei strukturierten Oberflächen zwischen 0,8 und 1. Der Vergleich zwischen trockenen und eingeseiften Handinnenflächen zeigt, dass die Kontaktumgebung die Reibeigenschaften deutlich beeinflussen kann. Eine Grenzschicht führt meist zu einer Reduzierung der Reibeigenschaften bei glatten Kontaktflächen. Somit ist die Kontaktsschicht zwischen beiden Kontaktpartnern deutlich ausschlaggebender als das verwendete Material der in dieser Studie verwendeten Handläufe [25].

Zusammenfassend ist zu berücksichtigen, dass die Oberflächenrauheit einen Einfluss auf die Reibungseigenschaften hat. Der Materialeinfluss spielt dabei eine eher untergeordnete Rolle. Neben zusätzlichen Einflüssen wie die lokale Feuchte beeinflussen die anisotropen Eigenschaften der Haut das Verhalten bezüglich der Haft- und Gleitreibung. So hat die Epidermis einen größeren Einfluss als tiefer liegende Weichgewebsstrukturen. Alles in allem ist die Übertragbarkeit der zuvor genannten Einflüsse auf die Reibeigenschaften aufgrund des geringen Lastbereiches in Bezug auf den Anwendungsbereich an Auflaufstellen kritisch zu sehen.

Im Vergleich zu Hendriks 2009 und Martinot 2006 liegen die Normalkräfte in der Untersuchung von O'Meara et al. in einem Bereich von ca. 200 N, weshalb der Einfluss der Oberflächenfeuchtigkeit reduziert ist.

Einordnung nach Neudörfer: Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte und Einzugsstellen – Gefahrenstellen, die es in sich haben

„Geometrisch und funktionell betrachtet, sind Auflaufstellen ein Sonderfall von Einzugsstellen. Das Band [Materialbahn] bewegt sich entlang einer Geraden [Bogen mit unendlich großem Radius] auf die Walzen zu, um im Einzugsspalt mit ihr zusammenzulaufen. Der Einzugsspalt bzw. der Kontakt beider Maschinenelemente ist im Unterschied zur Einzugsstelle auf einen größeren Teil des Umlangs verteilt. Von Tordierungen eingezogener Körperteile bei großen Umschlingungswinkel abgesehen, unterscheiden sich physikalische Effekte nur marginal zu denen in Einzugsstellen mit zwei Walzen mit endlichen Krümmungsradien.“ ([1] S. 476).

Als klassische Einzugsstelle werden zwei gegenläufige Walzen betrachtet, an denen die Zustellbewegung des Materials mit der Verformungsbewegung synchron zusammenläuft. Somit besteht ein erhöhtes Einzugsrisiko. Ausgehend von den zylindrischen Manteloberflächen der Walzen kommt es durch Keilwirkung zu einem Selbstverstärkungseffekt bei einem Einzug. Die elastischen Eigenschaften der Finger führen zu einer Veränderung der Richtungseinwirkung der Reibungskräfte. Je tiefer der Finger/ die Hand eingezogen wird, desto flacher wird das aufgespannte Kräfteparallelogramm und so stärker wird die Einzugskraft. Mit zunehmender Verformung der Finger verstärkt die Zunahme der Normalkräfte bzw. der Keilwirkung [1].

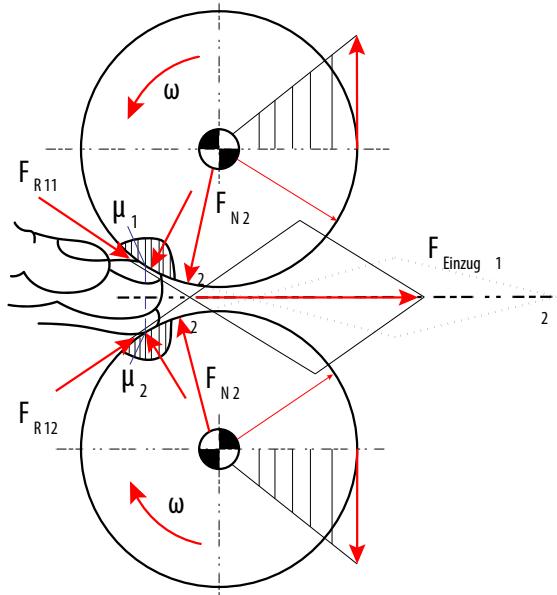


Bild 8: Mechanische Effekte in Einzugsstellen. Quelle: nach Neudörfer (2014) [1]

Eine Veränderung der Walzengeschwindigkeit führt nicht zu einem veränderten Einzugsverhalten. So kommt es sowohl bei hohen als auch bei geringen Umfangsgeschwindigkeiten gleichermaßen zu Verletzungen. Nach Neudörfer sind Verletzungen an gegenläufigen Walzen bei Geschwindigkeiten von lediglich 1,8 m/min dokumentiert. Entscheidend ist eher die Drehrichtung (entgegenläufige Walzen) als die Geschwindigkeit [1].

Wirkgröße für das Einziehen sind nach Neudörfer et al. 2014 unter anderem die: Krümmungsradien, die Richtung der Bewegung, die Oberflächenstrukturen und die Reibungsverhältnisse (möglicherweise Fingernagel vs. Fingerbeere).

Die wirkende Verformungsenergie steht im Zusammenhang mit der Antriebsenergie der Walzen (Energieerhaltung). Aufgrund der zu berücksichtigenden Massenträgheiten und Abbremszeiten können die Walzen nicht ohne eine Nachlaufzeit gestoppt werden [1].

Werden tolerierbare Grenzwerte der Verformungsarbeit in und an Körperstellen überschritten, kommt es zu schwerwiegenden Verletzungen durch Druck-, Zug- und Reibungskräften. Bei Reibungskräften führt die Wärmeentwicklung meist zu leichten Verbrennungen. Die Einwirktiefe bei Druckbelastungen hat einen großen Einfluss auf die Verletzungsart [1].

3.2 Fazit

Zusammenfassend zeigt sich, dass die Kontaktsituation einer Folienbahn an nicht angetriebenen Walzen vor allem durch die Zugkraft und den Umschlingungswinkel sowie Reibungseigenschaften zwischen beiden Kontakt-partnern bestimmt ist.

In der Realität sind Grenzschichten zwischen Bahn und Walze, welche sich durch eine dünne Luftsicht ausbildet, meist nicht ganz zu vernachlässigen, jedoch ist ein Führen der Bahn durch die Walze nur bei Kontakt mit verschwindend geringer 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 Budinski et al. 2001 sind für den Kontakt zwischen Folie und Aluminiumwalze Werte zwischen 0,15 und 0,3 zu erwarten. Die Eingrenzung des Reibungskoeffizienten ist notwendig, um die Kontaktsituation vollständig beschreiben zu können. Rückschlüsse auf die wirkende Einzugskraft bei Kontakt der Hand mit der Walze und Folie können nur eingegrenzt unter diesen Annahmen getroffen werden.

Literaturverzeichnis

- [1] A. Neudörfer, Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte: Methoden und systematische Lösungssammlungen zur EG-Maschinenrichtlinie., Springer-Verlag, 2014.
- [2] „Sicherheitskonzept für Wickelmaschinen zur Folienherstellung - Empfehlung des FB RCI - SG Maschinen der chemischen Industrie,“ 04/2020.
- [3] „Berufsgenossenschaftliche Information für Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit (BGI),“ 06/1997.
- [4] S. Phillips, E. Seiverling und M. Silvis, „Pressure and friction injuries in primary care.,“ Primary Care: Clinics in Office Practice, Bd. 42, Nr. 4, S. 631-644, 2015.
- [5] B.-J. Vorath, „Untersuchungen typischer Unfallgefährdungen durch rotierende Maschinenteile.,“ 2001.
- [6] L. Giraud, S. Massé und L. Schreiber, „Belt Conveyor Safety,“ Professional Safety, Bd. 10, Nr. S. 20-27, 2004.
- [7] J. Wakula, K. Berg, K. Schaub, R. Bruder, U. Glitsch und R. Ellegast, „BGIA-Report3/2009 - Der montage-spezifische Kraftatlas,“ DGUV, Berlin, 3/2009.
- [8] B. Riemann, „Intersession reliability of upper extremity isokinetic push-pull testing.,“ International Journal of Sports Physical Therapy , Bd. 11, Nr. 1, S. 85, 2016.
- [9] B. Das und Y. Wang, „Isometric pull-push strengths in workspace: 1. strength profiles.,“ International Journal of Occupational Safety and Ergonomics, Bd. 10, Nr. 1, S.43-58, 2004.
- [10] N. La Delfa, „The influence of hand location and handle orientation on female manual arm strength.,“ Applied Ergonomics, Bd. 81, Nr. S. 102896, 2019.
- [11] A. Chow und C. Dickerson, „Determinants and magnitudes of manual force strengths and joint moments during two-handed standing maximal horizontal pushing and pulling,“ Ergonomics, Bd. 59, Nr. 4, S. 534-544, 2016.
- [12] T. Brace, „The dynamics of pushing and pulling in the workplace: assessing and treating the problem.,“ Aohn Journal, Bd. 53, Nr. 5, S. 224-229, 2005.
- [13] I. Matev, „Wringer injuries of the hand.,“ The journal of bone and joint surgery., Bd. 49, Nr. 4, S. 722-730, 1967.
- [14] M. Sanguinetti, „Reconstructive surgery of roller injuries of the hand.,“ Journal of Hand Surgery, Bd. 2, Nr. 2, S. 134-140, 1977.
- [15] W. Taube, Erfahrungen und Grundlagen der Wickeltechnik, Wickeln-Grundlagen Band I + Band II, 2019.
- [16] B. S. Rice und R. Gans, „Simple model to predict web-to-roller traction.,“ 2003.
- [17] R. Lynch, „Myth busters: Web handling and the power of modeling.,“ 2013.
- [18] N. Zahlan und D. Jones, „Modeling web traction on rollers,“ 1995.
- [19] A. Harrison, „Modeling belt tension around a drive drum,“ Bulk Solid Handling, Bd. 18, Nr. 1, S. 75-80, 1998.
- [20] T. Childs, „The contact and friction between flat belts and pulleys.,“ International Journal of Mechanical Sciences, Bd. 22, Nr. 2, S. 117-126, 1980.
- [21] D. P. Jones, „Traction in web handling: A review.,“ 2001.
- [22] K. Budinski, „Friction of plastic webs.,“ Tribology international , Bd. 34, Nr. 9, S.625-633, 2001.
- [23] C. Hendriks, „Influence of surface roughness, material and climate conditions on the friction of human skin.,“ Tribology Letters, Bd. 37, Nr. 2, S.361-373, 2010.
- [24] F. Martinot, „Mechanical responses of the fingerpad and distal phalanx of a grooved surface: Effect of the contact angle.,“ 14th Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems, Bd. IEEE, Nr. S. 297-300, 2006.
- [25] D. O'Meara und R. Smith, „Static friction properties between human palmar skin and five gabrals materials.,“ Ergonomics, Bd. 44, Nr. 11, S. 973-988, 2001.

Normen

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

DIN EN 1010-4:2010-12, Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsanforderungen an Konstruktion und Bau von Druck- und Papierverarbeitungsmaschinen - Teil 4: Buchbinderei-, Papierverarbeitungs- und Papierveredelungsmaschinen; Deutsche Fassung EN 1010-4:2004+A1:2009, DIN Media

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

DIN EN 1034-1:2010-12, Sicherheit von Maschinen – Sicherheitstechnische Anforderungen an Konstruktion und Bau von Maschinen der Papierherstellung und Ausrüstung – Teil 1: Gemeinsame Anforderungen, Deutsche Fassung EN 1034-1:2010-12 (zurückgezogen), DIN Media

DIN EN ISO 13857:2020-04, Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsabstände gegen das Erreichen von Gefährdungsbereichen mit den oberen und unteren Gliedmaßen, Deutsche Fassung EN ISO 13857:2019, DIN Media

DIN ISO/TR 14121-2:2013-02, Sicherheit von Maschinen – Risikobeurteilung – Teil2: Praktischer Leitfaden und Verfahrensbeispiele, Deutsche Fassung ISO/TR 14121-2:2012, DIN Media

DIN EN ISO 12100:2011-03, Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsansätze -Risikobeurteilung und Risikominderung, Deutsche Fassung ISO 12100:2010, DIN Media

Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung). ABl. EU (2006) Nr. L157, S.42 (<https://eur-lex.europa.eu>)

Abkürzungsverzeichnis

T	Bahnspannung [N/mm^2]
T_n	Bahnspannung am Messpunkt n [N/mm^2]
T_{Ref}	Referenzbahnspannung [N/mm^2]
μ	Reibungskoeffizient
Θ	Umschlingungswinkel [°]
R	Walzenradius [mm]
p_c	Kontaktdruck [N/mm^2]
p_a	Druckanteil durch Lufteinschluss zwischen Bahn und Walze [N/mm^2]
v	Bahngeschwindigkeit [m/s]
v_n	Bahngeschwindigkeit zum Messzeitpunkt n [m/s]
v_{ref}	Referenzgeschwindigkeit [m/s]
F_{zug}	Bahnzugkraft [N]
F_n	Anpresskraft [N]
F_M	Berechnete Messkraft aus Bahnzugkraft [N]
F_U	Umfangskraft [N]
E_{Bahn}	E-Modul der Materialbahn [N/mm^2]

Begriffe

nicht angetriebene Umschlingungswalze / Umlenkwalze:

Walze zum Führen der Bahn durch die Maschine, die von
der flachen Bahn angetrieben wird.

(DIN EN 13418:2011-01)

**Deutsche Gesetzliche
Unfallversicherung e.V. (DGUV)**

Glinkastrasse 40
10117 Berlin
Telefon: 030 13001-0 (Zentrale)
E-Mail: info@dguv.de
Internet: www.dguv.de