

Betrachtung der Eignung von Kupferwerkstoffen für Biegebelastungen

Consideration of the suitability of copper materials for bending loads

Ivo Maximow
Tobias Schöneck
Sebastian Weise
Markus Golder

Professur Förder- und Materialflusstechnik
Institut für Fördertechnik und Kunststoffe
Fakultät für Maschinenbau
Technische Universität Chemnitz

Kurzbeschreibung: In dem Forschungsprojekt wird ein berührungsloses Direktantriebssystem für hochdynamische Bandförderer entwickelt. Die Förderkraft wird nach dem Prinzip der linearen Asynchronmaschine in den Gurt eingeleitet. Zur Umsetzung des Antriebsprinzips muss der Gurt eine flächige Kupferstruktur, die den Sekundärteil der Asynchronmaschine darstellt, beinhalten. Aus wirtschaftlichen Gründen soll sich der resultierende Bandförderer mit neuartigem Antriebssystem durch kleine Umlenkstrahlen, den Verzicht auf zusätzliche Zugträger sowie die Erreichung eines bestmöglichen motorischen Wirkungsgrades auszeichnen. Für diese Forschungsziele ist die Kupferstruktur, welche in den Gurt integriert wird, von herausragender Bedeutung. In diesem Beitrag wird das Ergebnis der Betrachtung der mechanischen Eigenschaften der Kupferwerkstoffe dargestellt und bewertet.

[Schlüsselwörter: Bandförderer, Direktantrieb, Asynchronmaschine, Kupferwerkstoff, Biegebeanspruchung]

Abstract: In the research project, a non-contact direct drive system for highly dynamic belt conveyors is being developed. The conveying force is impressed on the belt according to the principle of the linear asynchronous machine. To implement the drive principle, the belt must have a flat copper structure that represents the secondary part of the asynchronous machine. For economic reasons, the resulting belt conveyor with a new type of drive system should be characterized by small deflection radii, the elimination of additional tension members and the achievement of the best possible motor efficiency. The copper structure, which is integrated in the belt, is of outstanding importance for this research goal. In this article, the result of considering the mechanical properties of the copper materials is presented and evaluated.

[Keywords: belt conveyor, direct drive, asynchronous machine, copper material, bending stress]

1 EINLEITUNG

In dem Forschungsprojekt wird ein berührungsloses Direktantriebssystem für hochdynamische Bandförderer entwickelt. Die Förderkraft wird berührungslos nach dem Prinzip der linearen Asynchronmaschine direkt in den Gurt eingeleitet. Dieses Prinzip wurde gewählt, da hierbei keine Anziehungskräfte zwischen Fördergurt und Motor entstehen und der Gurt prinzipiell fähig ist, ohne externes Geber-system anzulaufen. Die Nachteile, dass der Antrieb einen hohen Blindleistungsbedarf hat und über eine geringere Energiedichte verfügt, sind Gegenstand der Forschung und sollen optimiert werden. Zur Umsetzung des Antriebsprinzips muss der Gurt eine flächige Kupferstruktur, die den Sekundärteil der Asynchronmaschine darstellt, beinhalten. Die Herausforderungen bei der Auslegung dieser Struktur bestehen in der Berücksichtigung der elektrischen Anforderungen zur Umsetzung des Linearmotors einerseits und andererseits in der Berücksichtigung der mechanischen Anforderungen die während des Betriebs des Förderers auftreten. Im weiteren Projektverlauf wird das Antriebssystem um ein Condition-Monitoring erweitert. Anhand der Statorströme wird die elektrodynamische Rückwirkung der Kupferstruktur im Gurt ausgewertet. Die gewonnenen Daten ermöglichen einen Rückschluss auf den Zustand der Kupferstruktur und gestatten somit eine Beurteilung des Verschleißzustandes des Motors und des Gurts. Ferner lässt sich der Bewegungszustand des Bandförderers bestimmen.

Um das Anwendungsgebiet des Systems zu erweitern, werden die Umlenkstrahlen des Gurts so klein wie möglich gestaltet. Dadurch minimieren sich Übergabespalt und Bauraum. Aus wirtschaftlichen Gründen soll sich der resultierende Bandförderer mit neuartigen Antriebssystem durch den Verzicht auf zusätzliche Zugträger sowie die Erreichung eines bestmöglichen motorischen Wirkungsgrades auszeichnen. Für diese Forschungsziele ist die Kupferstruktur, welche in den Gurt integriert wird, von herausragender Bedeutung. In diesem Beitrag sollen die diesbezüglichen Betrachtungen und Erkenntnisse vorgestellt werden.

2 WERKSTOFFBETRACHTUNG

Wie bereits in der Einleitung vorweggenommen wurde, soll Kupfer in den Gurt integriert werden. Dies begründet sich darin, dass für das Wirkprinzip der Asynchronmaschine Ströme im Gurt fließen müssen. Der Wirkungsgrad des Antriebs hängt dadurch direkt von der elektrischen Leitfähigkeit des Gurts ab. Diese Anforderung schränkt die Auswahl der Werkstoffe zur Integration stark ein. Nach Silber ist Kupfer das zweitleitfähigste Metall. Gold als drittleitfähigstes Metall erreicht nur 72% der Leitfähigkeit von Kupfer. [Deu00] [Fas05]

Aus Kostengründen wurde Silber nicht weiter betrachtet und Kupfer als Werkstoff zur Integration in den Gurt festgelegt.

2.1 KUPFERWERKSTOFFE

Die Bezeichnung von Kupferwerkstoffen ist durch verschiedene Normungen festgelegt. In Europa ist ein Werkstoffnummernsystem nach DIN EN 1412 mit zusätzlicher Zustandsbezeichnung nach DIN EN 1173 genormt. Parallel dazu verwenden die europäischen Normen zusätzliche Werkstoffkurzzeichen, die aus der ISO 1190-1 entnommen sind. Im amerikanischen Raum gilt die Normung ASTM B224-16 mit eigenem Werkstoffnummernsystem und Kurzbezeichnungen.

Der kubisch flächenzentrierte Gitteraufbau definiert im Wesentlichen die mechanischen Eigenschaften von Kupfer und seinen Legierungen. Es ist sehr gut plastisch formbar, hat eine geringe Festigkeit aber hohe Zähigkeit und zeigt keine ausgeprägte Streckgrenze. Aufgrund des verhältnismäßig edlen Lösungspotenzials sowie der Eigenschaft, in vielen Umgebungen schützende Deckschichten zu bilden, besitzt Kupfer gute Korrosionsbeständigkeit. Eine außergewöhnliche Eigenschaft besitzen Kupferionen, die selbst in niedrigen Konzentrationen viele pathologische Keime abtöten können. [Ber13] [BS18]

2.1.1 KUPFERSORTEN

Die vielfältigen Kupferwerkstoffe unterteilen sich prinzipiell in legiert und unlegiert. Letztere werden grundsätzlich in sauerstoffhaltig, sauerstofffrei und sauerstofffrei/desoxidiert unterschieden.

Innerhalb des Projektes kommt die Verwendung von legiertem Kupfer nicht in Frage. Durch Fremdatome im Gitter werden Störpotenziale im elektrischen Feld gebildet. Das führt zu einer Behinderung der Bewegung von Elektronen und verursacht somit ein Herabsetzen der elektrischen Leitfähigkeit. Beigemengte Stoffe, die sich im Kupfer lösen, haben hierbei einen besonders negativen Einfluss. Dabei wirkt sich die Bildung von Mischkristallen im Gitteraufbau äußerst negativ auf die elektrische Leitfähigkeit aus. [BS18]

Ein wichtiger Unterschied in den Eigenschaften zwischen sauerstoffhaltigen und sauerstofffreien Kupfersorten besteht in der Eignung für schwingende Beanspruchungen. Im Gefüge des sauerstoffhaltigen Kupfers sind Kupferoxydumfällungen vorhanden, diese wirken im Inneren als Kerbe und führen so zu früher einsetzenden Ermüdungserscheinungen. Ein weiterer Nachteil der sauerstoffhaltigen Kupfersorten besteht darin, dass bei Bearbeitungsprozessen mit Wasserstoffanteilen in der Umgebung dies zur Wasserstoffkrankheit führt. Der atomare Wasserstoff kann sich in Kupfer lösen und diffundiert ins Gitter. Zusammen mit den Kupferoxydpartikeln entsteht Wasserdampf mit Dampfdrücken von einigen 100 MPa. Als Folge daraus verliert der Werkstoff an Festigkeit, Zähigkeit und wird sehr spröde. Insgesamt wird der Werkstoff unbrauchbar und die Bauteile sind zu verwerfen, da die Wasserstoffkrankheit nicht rückgängig gemacht werden kann. [BS18]

2.1.2 VERARBEITUNGSZUSTÄNDE

Eine Kaltumformung führt zu Erhöhung der Festigkeit bei Verringerung der Bruchdehnung. Diese Effekte können durch eine anschließende Wärmebehandlung wieder ausgeglichen werden [VSW16]. Umfangreiche Kennwerte zu verschiedenen Verformungszuständen werden in [Dav01] und in einer Übersicht in [Deu00] angegeben. Die Werte der Zugfestigkeit variieren bei den hier betrachteten Kupfersorten von 200 bis mindestens 370 N/mm² abhängig von der Kaltverformung. Dabei ist zu beachten, dass durch erhöhte Kaltverformung die elektrische Leitfähigkeit (Mindestwerte) von $58 \cdot 10^6$ S/m auf $56 \cdot 10^6$ sinkt. [Deu00] [VSW16]

Im Zuge der Auslegung eines Gurtes spielen Lastwechsel eine große Rolle. In [Ber13] wird die Annahme vertreten, dass eine Erhöhung der statischen Festigkeit auch eine Erhöhung der Dauerfestigkeit bewirkt. Im Allgemeinen lässt sich bei Metallen etwas Derartiges beobachten. Die Verbesserung der Dauerfestigkeit steigert sich allerdings nicht im gleichen Maße. Dennoch sind die Zusammenhänge, welche die Ermüdungsfestigkeit betreffen, nicht vollständig geklärt. [Ber13]

In diesem Projekt werden „weiche“, wärmebehandelte und „harte“, kaltverformte Zustände untersucht. Die Vorbetrachtungen lassen bessere Eignung der „harten“ Zustände erwarten.

2.1.3 DAUERFESTIGKEIT

Bei der Beurteilung der Dauerfestigkeit von Metallen ist grundsätzlich der Gitteraufbau zu berücksichtigen. Bei kubisch raumzentrierten (krz) Metallen wird ab einer Schwingenspielzahl von 10^7 von Dauerfestigkeit ausgegangen. Kupfer gehört zu den kubisch flächenzentrierten (kfz) Metallen, bei welchen die Wöhlerkurve selbst nach 10^8 Schwingenspielen weiter in geringem Maße abfällt. Dennoch

kann und wird für die Beurteilung der Dauerfestigkeit dieser Metalle die Schwingspielzahl 10^8 herangezogen. [Ber13]

In der Literatur werden nur wenige Angaben zu Dauerfestigkeitseigenschaften von Kupferwerkstoffen gemacht. Zudem sind die verfügbaren Werkstoffe aufgrund der in den vorangegangenen Kapiteln erläuterten Sorten und Zustände äußerst vielfältig. In [Deu00] wird für weiche Kupfer bei 10^8 Schwingspielen pauschal eine Spannung von 70 N/mm^2 als dauerfest angegeben. In Abbildung 1 Kurve 126a ist die Wöhlerkurve eines vergleichbaren Werkstoffes dargestellt. Dieser ist bei einer Belastung von ca. 80 N/mm^2 dauerfest. Es zeigt sich nur ein äußerst geringes Abfallen der Kurve ab 10^8 Schwingspielen.

In [RM67] werden weitere Kurven für kaltverfestigte Werkstoffe angegeben. Diese erreichen geringfügig höhere Werte für die Dauerfestigkeit. Es ist allerdings keine Kurve angegeben, die die hier betrachteten Werkstoffe exakt beschreibt.

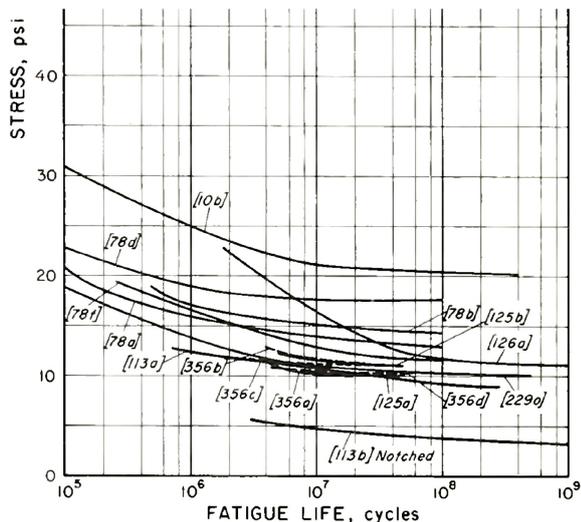


Abbildung 1: Dauerfestigkeitseigenschaften verschiedener Kupferwerkstoffe, Stress in $\text{psi} \cdot 10^3$ [RM67]

2.2 BELASTUNGEN

Die Antriebskraft wird bei herkömmlichen Bandförderern reibschlüssig über die Verbindung von Antriebsrolle zu Gurt eingeleitet. Aus diesem Antrieb geht die Anforderung hervor, dass der Gurt gespannt werden muss, um eine Kraft übertragen zu können. [GR18]

In dem neuartigen Antriebssystem wird die Antriebskraft berührungslos in den Gurt eingepreßt. Daher ist eine Spannung des Gurts für die Übertragung der Antriebskraft nicht nötig. Zudem wird im Laufe des Projekts eine Gurtführung nach gleichem Prinzip umgesetzt. Dadurch kann auf die Verwendung von balligen oder konischen Rollen als Geradlaufeinrichtung verzichtet werden. Wie in [EH01] und [EH12] gezeigt wird, basiert der Zentrierungseffekt

solcher Rollen auf der Verformung des Gurts. Die dadurch verursachten lokalen Dehnungen resultieren in zusätzlichen Spannungen bei herkömmlichen Gurten. In dem neuartigen Bandförderer werden zylindrische Rollen eingesetzt und es entstehen dadurch keine zusätzlichen Spannungen vergleichbar zu Geradlaufeinrichtungen durch ballige oder konische Rollen.

2.2.1 ZUGBEANSPRUCHUNG

Aufgrund des Antriebs- und Führungsprinzips ist die maximale Zugbeanspruchung im Gurt ausschließlich abhängig von der Antriebskraft. In der momentanen Projektphase wird mit einer Antriebskraft von 300 N bei einem Metallquerschnitt von 60 mm^2 kalkuliert. Dies ergibt eine Zugspannung σ_N von 5 N/mm^2 . Da die Zugfestigkeit selbst bei dem mechanisch weniger festen Kupfer bei 200 N/mm^2 bei einer $0,2\%$ -Dehngrenze von maximal 100 N/mm^2 [Deu00] liegt, soll die Zugspannung für die weiteren Betrachtungen vernachlässigt werden.

2.2.2 BIEGEBEANSPRUCHUNG

Es werden Versuche mit massivem Kupferband in den Stärken $0,05 \text{ mm}$ bis $0,25 \text{ mm}$ durchgeführt. Die betrachteten Umlenkradien betragen $15 - 40 \text{ mm}$. Die Biegebeanspruchung kann mit dem Ansatz der geraden Biegung berechnet werden, da es sich bei den vorhandenen Verhältnissen aus Dicke zu Radius um eine schwache Krümmung handelt [Nie+19].

Zur Berechnung der wirkenden Kräfte bei der Bewegung eines Bandes über eine Scheibe hat [FW18] die Biegespannung ebenfalls mit diesem Ansatz modelliert. Die Bedingungen ähneln sehr dem direktangetriebenen Gurt der um eine Rolle läuft. Die maximale Biegespannung σ_B tritt außen bei der Umlenkung auf und lässt sich somit bei gegebenem E-Modul E , Banddicke h und Radius r der neutralen Faser mit folgender Gleichung berechnen.

$$\sigma_B = E * \frac{h}{2 * r}$$

Aus den geometrischen Abmessungen ergibt sich im günstigsten Fall (Metalldicke von $0,05 \text{ mm}$ auf einer Umlenkung mit Radius 40 mm) eine Dehnung außen von $0,0625\%$. Im ungünstigsten Fall (Dicke von $0,25 \text{ mm}$ und Umlenkradius von 15 mm) ergibt sich bereits eine Dehnung von $0,8264\%$. Bei einem gemittelten E-Modul von 125 kN/mm^2 [BS18] beträgt bereits beim günstigsten Fall die Biegespannung σ_B rund 78 N/mm^2 . Dieser Wert übertrifft die Zugspannung um ein Vielfaches. Für die weiteren Betrachtungen wird daher nur die Beanspruchung durch Biegung betrachtet.

Werden die Werte für die Dauerfestigkeit aus der Literatur herangezogen, dann wäre bereits der günstigste Fall mit einer Spannung von 78 N/mm^2 an der Grenze der Dauerbelastbarkeit (vgl. Kapitel 2.1.3).

Während die maximale Biegung nur durch den Umlenkradius der Rolle bestimmt wird, ist das Auflaufverhalten des Bands von weiteren Parametern abhängig. In [FW18] wird die Biegelinie vor dem Auflaufen auf die Rolle mittels folgender Gleichung beschrieben. Diese ist abhängig vom E-Modul E , dem Flächenträgheitsmoment I , dem Radius der neutralen Faser r_n und der Zugkraft F . Der Parameter x_0 kann als Achsabstand interpretiert werden.

$$y(x) = \frac{1}{r_n * (\frac{F}{E * I})^2} * \frac{\sinh(\frac{F}{E * I} * x)}{\sinh(\frac{F}{E * I} * x_0)}$$

In der Abbildung 2 sind die Verläufe der neutralen Faser für verschiedene Bandstärken bei gleicher Belastung von ca. 300 N Zugkraft dargestellt. Es ist verständlich, dass sich das Kupferband mit zunehmender Banddicke und damit einhergehendem Flächenträgheitsmoment schlechter umlenken lässt. Bemerkenswert ist, dass sich der reale Auflaufpunkt dabei deutlich hinter die Rollenachse verschiebt. Dieser Effekt ist nur bei diesem Antriebssystem zu erwarten, da bei herkömmlichen Systemen die Gurtvorspannung bereits so hoch ist, dass dieser Effekt kaum auftreten kann. Bei der dargestellten Abbildung ist auch zu bemerken, dass die Verhältnisse bei maximaler Antriebskraft dargestellt sind. Im Teillastbereich verstärkt sich der Effekt weiter.

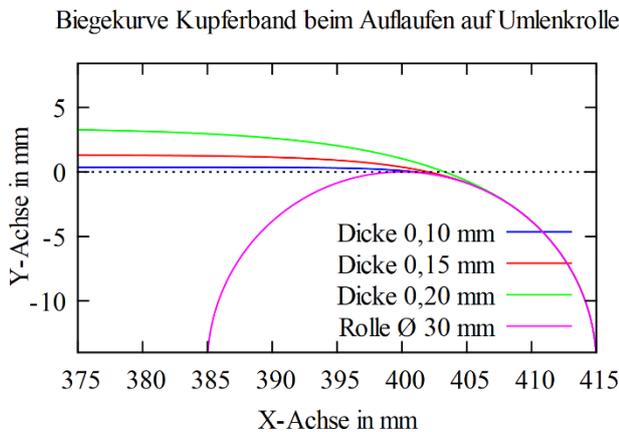


Abbildung 2: Biegekurve des Kupferbandes beim Auflaufen auf die Umlenkrolle [FW18]

2.3 EINFLUSS DER DEHNRATE

Da die Dehnrates einen Einfluss auf das Werkstoffverhalten hat, wurde eine Betrachtung des Effektes auf Kupferwerkstoffe durchgeführt. Prinzipiell gilt, dass eine Abhängigkeit der mechanischen Eigenschaften von der Dehnrates bei kfz-Metallen geringer als bei krz-Metallen

ausfällt [RHB08]. Im Allgemeinen führt eine höhere Beanspruchungsgeschwindigkeit zu einer verminderten Verformbarkeit [Ber13].

In [Wei95] wurden metallische Werkstoffe bei hohen Dehnrates untersucht. Im Rahmen der Arbeit wurde ein Modell entwickelt, welches dieses Verhalten beschreibt. Expliziert für Kupferwerkstoffe wurde die Modellierung anhand realer Messung abgestimmt. Der Abhängigkeit der Spannungs-Dehnungs-Kurve von der Dehnrates wird durch folgende Gleichung beschrieben [Wei95].

$$\sigma = \frac{K * \epsilon^n + \eta * \dot{\epsilon}}{1 + p * a * (\frac{K}{n+1} * \epsilon^{n+1} + \eta * \dot{\epsilon} * \epsilon)}$$

Die Parameter a , K , n , p , η repräsentieren charakteristische Eigenschaften und können beispielsweise auch Werkstoffdefekte mit abbilden. Für sauerstoffhaltiges kaltgezogenes Kupfer „E-Cu“ sind berechnete Diagramme in Abbildung 3 dargestellt.

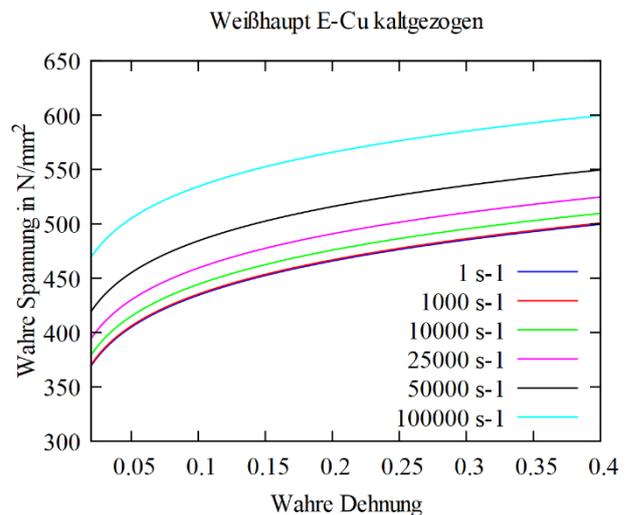


Abbildung 3: Berechnete Spannungs-Dehnungs-Diagramme nach einem Beispiel in [Wei95]

Die Berechnung ist als eine Näherung zu betrachten. Dennoch lässt sich grundsätzlich daraus ableiten, dass relevante Eigenschaftsänderungen erst bei außerordentlich hohen Dehngeschwindigkeiten um die 10^4 s^{-1} erscheinen. Diese treten beispielsweise beim Drahtziehen und Hochgeschwindigkeitsspanen auf [Hal05].

Abbildung 2 kann davon ausgegangen werden, dass das Band in einer harmonischen Bewegung auf die Rolle aufläuft und sich anschiebt. Dabei wird sich die Dehnrates bis zum Auflaufpunkt steigern. Es ist in diesem Fall nicht von Dehngeschwindigkeiten auszugehen, die relevante Änderungen im Werkstoffverhalten hervorrufen.

Der Einfluss der Dehnrates auf das Werkstoffverhalten ist zusätzlich abhängig von der Temperatur. So hat

[Emd09] Versuche mit verschiedenen Aluminiumlegierungen durchgeführt. Grundsätzlich wurde bei diesem Metall ab 400 °C ein deutlich veränderter Dehnrateneinfluss festgestellt. Hierbei ist anzumerken, dass dies in erheblichem Maße auf die Entfestigung des Werkstoffes bei der Temperatur zurückzuführen ist. Im Projektvorhaben wird das Antriebssystem bei Raumtemperatur betrieben, somit kann der Temperatureinfluss auf die Dehnrateneinflüsse vernachlässigt werden. Für eine Anwendung unter heißen Umgebungsbedingungen müsste zuerst grundsätzlich die Eignung der Kupferwerkstoffe betrachtet werden.

Es lässt sich zusammenfassen, dass für das Antriebssystem grundsätzlich die Dehnrates nicht berücksichtigt werden muss. Prinzipiell erscheinen Werkstoffe unter hohen Dehnrates fester. Inwieweit dies einen Vor- oder Nachteil für die beschriebene Anwendung darstellen könnte, ist allerdings nicht relevant. Grundsätzlich gilt, dass eine Erhöhung der statischen Festigkeit verbesserte Dauerfestigkeitseigenschaften bewirkt. Weichere Oberflächen begünstigen Rissbildung. [Ber13]

3 VERSUCHE MIT KUPFERWERKSTOFFEN

Aufgrund der Vorbetrachtungen allein ist es nicht möglich, eine Aussage über die Dauerlaufeigenschaften von Cu-PHC zu treffen. Dies liegt zu einen an den ungenügenden Informationen zu den Dauerfestigkeitseigenschaften, vor allem von kaltverfestigten Werkstoffe. Zum anderen ist die Anwendung speziell und die Geometrie (sehr breit im Verhältnis zur Dicke) ungewöhnlich. Aus diesem Grund wurden die folgenden Versuche durchgeführt. Die dargestellten Ergebnisse beschränken sich zur besseren Übersicht nur auf ausgewählte Versuche.

3.1 ZUGVERSUCHE

In der Abbildung 4 sind zwei exemplarische Spannungs-Dehnungs-Verläufe von Cu-PHC der Zustände R370 und R200 dargestellt.

Im Vergleich zu den Bruchdehnungen in [Deu00] werden erheblich geringere Werte erreicht. Dies ist auf den sehr dünnen Rechteckquerschnitt der Zugproben zurückzuführen, der ein plastisches Fließen erschwert. Für das Projektvorhaben ist dieser Versuch dennoch zu bevorzugen, da hierbei besser die Bedingungen im Bandförderer abgebildet werden. [Max+20]

Die Werkstoffe zeigen die typischen Verläufe eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms vom Typ 1a ohne Streckgrenze [Läp11]. Es herrscht nahezu kein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Dehnung über die gesamte Verformung. Aus dem Versuch lässt sich dennoch ableiten, dass der Cu-PHC im Zustand R370 bei 0,15-0,2% beginnt zu fließen, während dies bei dem Zustand R200 schon bei 0,03-0,05% geschieht

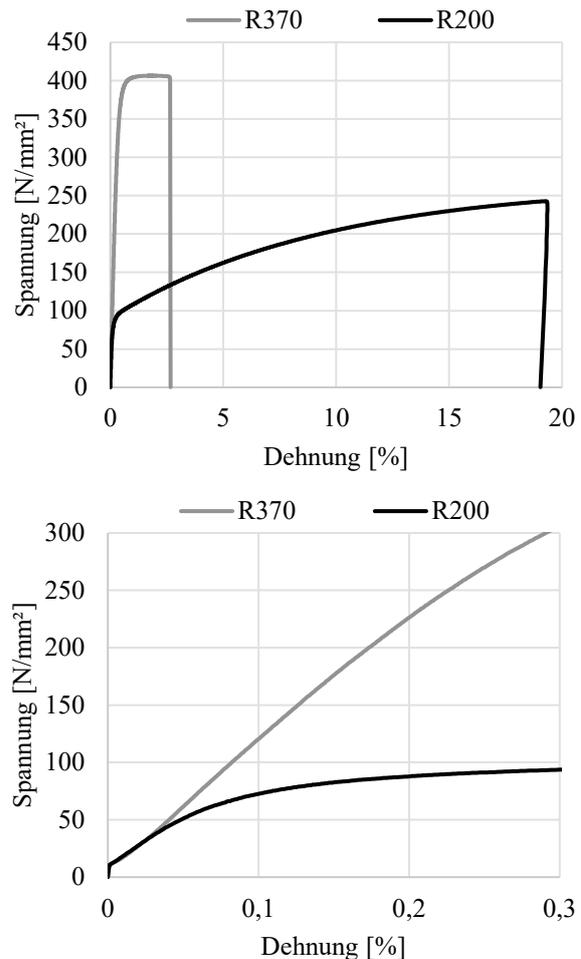


Abbildung 4: Spannungs-Dehnungs-Diagramm für Cu-PHC Band der Stärke 0,2 mm in den Zuständen R370 und R200. Oben: Ansicht über gesamten Dehnungsbereich, Unten: Ansicht bis 0,3% Dehnung. [Max+20]

3.2 DAUERBIEGEVERSUCHE

Für die Durchführung der Dauerlaufversuche wurde eigens ein Prüfstand entwickelt, dieser ist in Abbildung 5 dargestellt.

Im Prüfstand werden die realen Bedingungen im reversierfähigen Bandförderer nachgestellt. Das Kupferband wird endlos im Untertrum über eine Einspannung verbunden und angetrieben. Die Antriebskraft wird somit wie im Projektvorhaben umgelenkt. Die Bandspannung, die die Last simuliert, wird durch Gewichte an den verschiebbaren Prüfrollen aufgebracht. Die Prüffrequenz beträgt ca. 3 Hz, kann allerdings noch deutlich gesteigert werden. Die nachfolgenden Versuche wurden alle mit dieser Prüffrequenz durchgeführt.

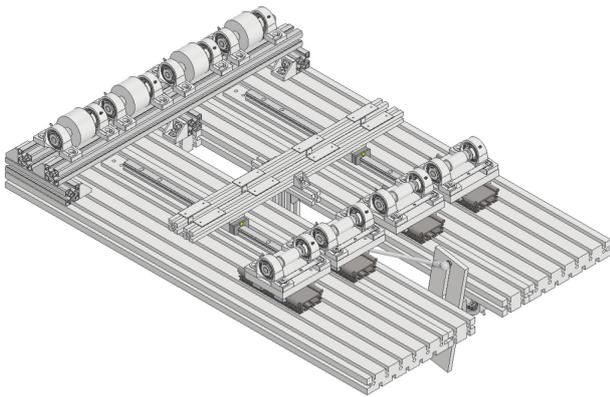


Abbildung 5: Prüfstand mit vier Prüfstellen zur Erprobung der Dauerlaufeigenschaften von Kupferbändern

Abbildung 6 und für 30 mm in Abbildung 7 dargestellt.

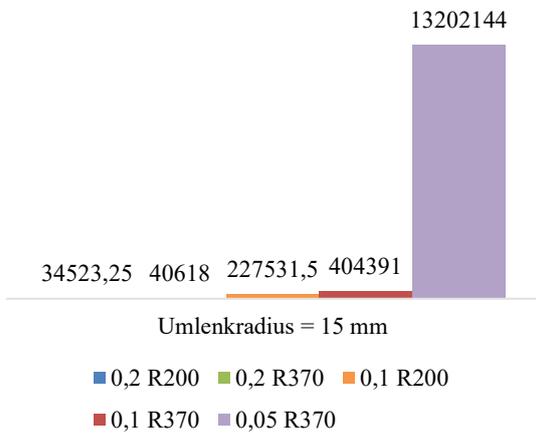


Abbildung 6: Erreichte Biegezahlen bei einem Umlenkradius von 15 mm

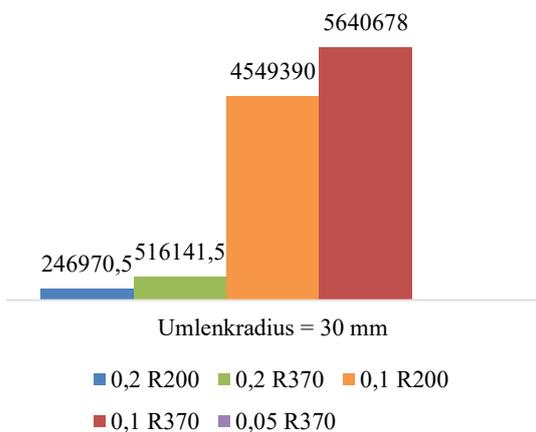


Abbildung 7: Erreichte Biegezahlen bei einem Umlenkradius von 30 mm

Die Legendenbezeichnung gibt die Banddicke in mm gefolgt von dem Verfestigungsgrad (R200 = „weich“, R370 = „hart“) an. Die angegebene Zyklenzahl beschreibt den Wert, bei dem die Probe vollständig durchgerissen ist. Für Band der Dicke 0,05 mm bei einem Umlenradius von 30 mm läuft der Versuch momentan und ist daher noch nicht eingetragen. Aktuell liegt der Versuch bei über 20 Millionen Zyklen.

Ein Vergleich zwischen verschiedenen Bandstärken, normiert auf gleiche Dehnung ist in Abbildung 8 dargestellt.

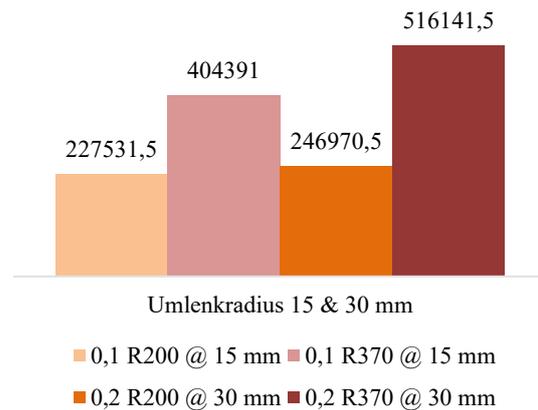


Abbildung 8: Vergleich der Biegezahlen bei verschiedenen Umlenradien und Banddicken

Erwartungsgemäß ertragen die Proben bei geringer Dehnung mehr Biegungen. In Tabelle 1 sind die berechneten Dehnungen für die hier dargestellten Band-Rollen-Kombinationen angegeben.

Tabelle 1. Banddehnung außen bei der Prüfung

Banddicke [mm]	Umlenradius [mm]	Banddehnung [%]
0,05	15	0,166389351
0,05	30	0,083263947
0,1	15	0,332225914
0,1	30	0,166389351
0,2	15	0,662251656
0,2	30	0,332225914

Bei der Interpretation der Werte muss beachtet werden, dass die Versuche eine lange Laufzeit haben und zum Zeitpunkt der Veröffentlichungen nicht alle Werte statistisch abgesichert sind. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass weiches Material weniger Zyklen erträgt als das härtere Material. Bei Dehnung von unter 0,17% werden mehr als 10^6 Biegungen erreicht. Die Paarungen in Abbildung 8 zeigen gleiche Ergebnisse bei Versuchen mit gleichen Dehnungen. Allerdings konnte diese Übereinstimmung nicht bei allen Versuchen erreicht werden. So erzielt das harte, 0,05 mm dicke Material bei einem Umlenradius von 15 mm mehr als doppelt so viele Zyklen wie das gleiche

Material der Dicke 0,1 mm bei einem Umlenkradius von 30 mm, obwohl auch hier die gleichen Dehnverhältnisse vorliegen. Momentan werden weiter Daten gesammelt um genauere Aussagen zu erzielen.

[EH01]

Martin Egger und Klaus Hoffmann. „Lateral Running Behaviour of Conveyor Belts“. Englisch. In: bulk solids handling. Running Behaviour of Conveyor Belts 21.3 (2001), S. 301–306.

4 SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK

In der beabsichtigten Anwendung als biegefähiger Sekundärteil einer Asynchronmaschine im Bandförderer muss der Kupferwerkstoff mechanisch für die Biegebeanspruchung in der Umlenkung ausgelegt werden. Anhand der Literaturangaben lässt sich keine sichere Aussage treffen. Die Zug- und Dauerbiegeversuche lassen vermuten, dass Cu-PHC im kaltverfestigten Zustand R370 bis zu einer Dehnung von rund 0,15-0,2% dauerfeste Eigenschaften aufweist. Weichgeglühtes Material schneidet schlechter ab und wird für die Anwendung verworfen. Damit lässt sich für weitere Versuche in dem Projekt ein erstes Band auslegen.

[EH12]

Martin Egger und Klaus Hoffmann. „Tracking of Flat Belts“. Englisch. In: Journal of Mechanics Engineering and Automation 2 (1 25. Jan. 2012), S. 27–36. ISSN: 2159-5283. DOI: 10.17265/2159-5275/2012.01.005.

[Emd09]

Tobias Emde. „Mechanisches Verhalten metallischer Werkstoffe über weite Bereiche der Dehnung, der Dehnrate und der Temperatur“. Diss. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2009. ISBN: 3-86130-736-7.

Die langwierigen Biegeversuche laufen weiter, sodass die Datenlage für präzisere Aussagen über die Dauerbiegefestigkeit von weichgeglühtem und kaltverfestigtem Cu-PHC in der Zukunft geschaffen wird.

[Fas05]

Gerhard Fasching. Werkstoffe für die Elektrotechnik. Mikrophysik, Struktur, Eigenschaften. 4. Aufl. Wien, New York: Springer, 2005. ISBN: 3-211-22133-6. DOI: 10.1007/b138728.

FÖRDERHINWEIS

Gefördert durch: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

[FW18]

Klaus Feyrer und Karl-Heinz Wehking. FEYRER: Drahtseile. Bemessung, Betrieb, Sicherheit. 3. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2018. ISBN: 978-3-642-54295-4. DOI: 10.1007%2F978-3-642-54296-1.

LITERATUR

[GR18]

Rudolf Griemert und Peter Römisch. Fördertechnik. Auswahl und Berechnung von Elementen und Baugruppen. 12. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018. ISBN: 978-3-658-21413-5. DOI: 10.1007/978-3-658-21414-2.

[Ber13]

Wolfgang Bergmann. Werkstofftechnik 1. Teil 1: Grundlagen. 7. Aufl. München: Carl Hanser Verlag, 2013. ISBN: 978-3-446-43536-0.

[BS18]

Hans-Jürgen Bargel und Günter Schulze, Hrsg. Werkstoffkunde. 12. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2018. ISBN: 978-3-662-48628-3. DOI: 10.1007/978-3-662-48629-0.

[Läp11]

Volker Läßle. Einführung in die Festigkeitslehre. Lehr- und Übungsbuch. 3. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2011. ISBN: 978-3-8348-1605-4.

[Dav01]

J. R. Davis, Hrsg. ASM Specialty Handbook: Copper and Copper Alloys. Englisch. Materials Park, Ohio 44073-0002: ASM International, 2001. ISBN: 0-87170-726-8.

[Hal05]

Thorsten Halle. „Zusammenhänge zwischen Spanvorgängen und dem mechanischen Werkstoffverhalten bei hohen Dehnungsgeschwindigkeiten“. Diss. Chemnitz: Technische Universität Chemnitz, 2005.

[Deu00]

Deutsches Kupfer-Institut e.V. Kupfer in der Elektrotechnik - Kabel und Leitungen. Hrsg. von Deutsches Kupfer-Institut Auskunfts- und Beratungsstelle für Verwendung von Kupfer und Kupferlegierungen. Düsseldorf, 2000.

[Max+20]

Ivo Maximow u. a. „Kupferwerkstoffe im Sekundärteil eines linearen Asynchronmotors – Betrachtung der mechanischen Eigenschaften“. In: innoTRAC Journal Volume 1 (2020), S. 159–169. DOI: 10.14464/innotrac.v1i0.450

- [Nie+19] Gustav Niemann u. a. Maschinenelemente 1. Konstruktion und Berechnung von Verbindungen, Lagern, Wellen. 5. Aufl. Berlin: Springer Vieweg, 2019. ISBN: 978-3-662-55481-4. DOI: 10.1007/978-3-662-55482-1.
- [RHB08] Joachim Rösler, Harald Harders und Martin Bäker. Mechanisches Verhalten der Werkstoffe. 3. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2008. ISBN: 978-3-8351-0240-8. DOI: 10.1007/978-3-8351-9245-4.
- [RM67] Richard P. Reed und Ritchie P. Mikesell. „Low Temperature Mechanical Properties Of Copper and Selected Copper Alloys. A Compilation From the Literature“. Englisch. In: Monograph 101. Institute for Materials Research, National Bureau of Standards. Boulder, Colorado 80302: U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards, 1. Dez. 1967.
- [VSW16] Eduard Vinaricky, Karl-Heinz Schröder und Josef Weiser. Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen. Grundlagen, Technologien, Prüfverfahren. Hrsg. von Eduard Vinaricky. 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2016. ISBN: 978-3-642-45426-4. DOI: 10.1007/978-3-642-45427-1.
- [Wei95] Herbert Peter Weißhaupt. „Verformungsverhalten metallischer Werkstoffe bei hohen Dehngeschwindigkeiten“. Diss. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 1995.

Dipl.-Ing. Ivo Maximow, Scientific Assistant at the Professorship of Conveying Engineering and Materials Handling, Technische Universität Chemnitz.

Address: Professur Förder- und Materialflusstechnik, Technische Universität Chemnitz, Reichenhainer Straße 70, Raum D241, 09126 Chemnitz, Germany
Phone: +49 371 531-34354, Fax: +49 371 531-834354,
E-Mail: ivo.maximow@mb.tu-chemnitz.de.

Dipl.-Ing. Tobias Schöneck, Scientific Assistant at the Professorship of Conveying Engineering and Materials Handling, Technische Universität Chemnitz.

Dr.-Ing. Sebastian Weise, Scientific Assistant at the Professorship of Conveying Engineering and Materials Handling, Technische Universität Chemnitz.

Prof. Dr.-Ing. Markus Golder, Professor of the Professorship of Conveying Engineering and Materials Handling, Technische Universität Chemnitz.