

Kennwerte am Federwerkstoff

-Einfluss auf Eigenschaften der Federbauteile und Werkzeugauslegung-

1. Problemstellung

Bei der Prüfung eines Federwerkstoffes für kaltgeformte Biegeteile sind die Kennwerte für das Arbeitsvermögen eines Materials zu ermitteln.

Die Eigenschaften für eine gleichmäßige Formbarkeit sind für eine Herstellung innerhalb vorgegebener Toleranzen von Bedeutung.

Je nach Einzelfall wird auch eine sichere Schweißung zu gewährleisten sein.

Beim Widerstandsschweißen ist vor allem die Leitfähigkeit γ neben der Oberflächenbeschaffenheit zu beachten.

Das Arbeitsvermögen eines Werkstoffes ist durch den Elastizitätsmodul E und der Elastizitätsgrenze σ_E vorgegeben.

Bei Biegewechselbeanspruchung ist die Belastbarkeit durch σ_{BW} begrenzt.

Werden an die mechanische Lebensdauer hohe Anforderungen gestellt sind die Eigenschaften längs und quer zur Walzrichtung zu berücksichtigen.

(σ_{BW} längs / σ_{BW} quer)

Die Elastizitätsgrenze R_p und die Zugfestigkeit R_m geben die oberen Schranken der Formbarkeit an.

Für eine gleichmäßige Formbarkeit ist zunächst die Materialdicke t zu nennen.

Sie beeinflusst, bei sonst gleicher Werkstoffeigenschaft und Werkzeugeinstellung, die Größe der Randspannung, die wiederum nach der Rückfederung die Restspannung bestimmt.

Weiterhin ist für eine gleichmäßige Formbarkeit von einer konstanten Vickershärte, also einem gleichmäßigen Walzvorgang und der Materialkörnung abhängig.

Diese Größen beeinflussen alle die elastische Dehnung ϵ_{el} in unterschiedlicher Weise und können sich in manchen Fällen sogar gegenseitig aufheben.

Nachfolgend soll daher auf die Bestimmung von ϵ_{el} näher eingegangen werden.

Zur Ermittlung von ϵ_{el} kann an einer Biegeprobe der Rückfederungsdurchmesser D' oder der Verformungswinkel α' gemessen werden.

Beide Verfahren sollen im Weiteren miteinander verglichen werden.

2. Geometrischer Zusammenhang zwischen gebogener und rückgefederter Materialprobe

Die Bogenlänge um den Windungsdurchmesser D_o am 180° angelegtem Federband ergibt sich

$$\text{aus } b = \left(\frac{\pi}{2}\right) D_o \quad [1]$$

mit der Gesamtdehnung am Federband mit der Dicke t :

$$\varepsilon_{ges} = t \left(\frac{1}{D_o}\right) \quad \text{bzw.} \quad \varepsilon_{ges} = t \left(\frac{\pi}{2b}\right) \quad [2]$$

[3]

Die gleiche Bogenlänge nach der Rückfederung ergibt sich aus dem Verformungswinkel α' und dem Rückfederungsdurchmesser D'

$$\text{aus } b = \left(\frac{\alpha'\pi}{360^\circ}\right) D' \quad [4]$$

mit der plastischen Verformung:

$$\varepsilon_{pl} = t \left(\frac{1}{D'}\right) \quad \text{bzw.} \quad \varepsilon_{pl} = t \left(\frac{\alpha'\pi}{360^\circ b}\right) \quad [5]$$

[6]

(1) und (4) gleichgesetzt, ergibt für D'

$$D' = \left(\frac{180^\circ}{\alpha'}\right) D_o \quad [7]$$

Aus der Differenz ($\varepsilon_{ges} - \varepsilon_{pl}$)

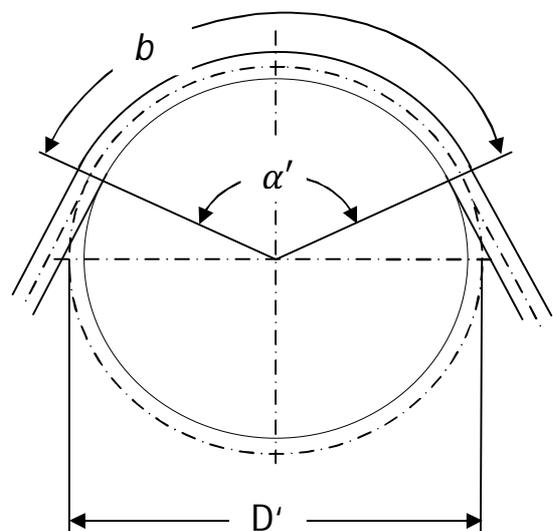
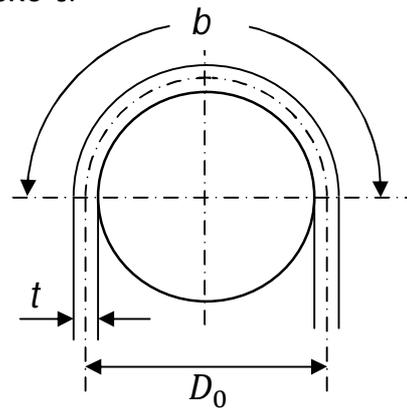
erhält man die elastische Dehnung ε_{el} als $f(t, D_o, D')$ bzw. $f(t, D_o, \alpha')$

$$\varepsilon_{el} = t \left(\frac{1}{D_o} - \frac{1}{D'}\right) \quad [8]$$

und mit (7):

$$\varepsilon_{el} = \left(\frac{t}{D_o}\right) \left(1 - \frac{\alpha'}{180^\circ}\right) \quad [9]$$

Die Gleichungen (8) und (9) werden nun auf ihre Fehlereigenschaft untersucht.



2.1 Fehlerbetrachtung an [8]

$$\varepsilon_{el} = t(1/D_0 - 1/D')$$

mit einem absoluten Fehler:

$$\Delta\varepsilon_{el} = \pm \left[\left(\frac{1}{D_0} - \frac{1}{D'} \right) |\Delta t| + \left(\frac{t}{D_0} \right) \left| \frac{\Delta D_0}{D_0} \right| + \left(\frac{t}{D'} \right) \left| \frac{\Delta D'}{D'} \right| \right] \quad [8.1]$$

und dem relativen Fehler:

$$\Delta\varepsilon_{el} \% = \pm \left[|\Delta t/t| + \frac{|\Delta D_0/D_0|}{(1-D_0/D')} + \frac{D_0|\Delta D'/D'|}{D'(1-D_0/D')} \right] * 100\% \quad [8.2]$$

Beispiel: mit $(D_0/D') = 8/18$

$$|\Delta t/t| = 0,0125$$

$$|\Delta D_0/D_0| = 0,0050$$

$$|\Delta D'/D'| = 0,0250$$

$$\Delta\varepsilon_{el} \% = \pm 4,00\%$$

2.2 Fehlerbetrachtung an [9]

$$\varepsilon_{el} = (t/D_0)(1 - \alpha'/180)$$

Mit einem absoluten Fehler:

$$\Delta\varepsilon_{el} = \pm \left[\left(\frac{1 - \frac{\alpha'}{180}}{D_0} \right) (|\Delta t| + t \left| \frac{\Delta D_0}{D_0} \right|) + \left(\frac{t}{180D_0} \right) |\Delta \alpha'| \right] \quad [9.1]$$

und dem relativen Fehler:

$$\Delta\varepsilon_{el} \% = \pm \left[|\Delta t/t| + \left| \frac{\Delta D_0}{D_0} \right| + \frac{|\Delta \alpha'|}{(180 - \alpha')} \right] * 100\% \quad [9.2]$$

Beispiel: mit $\alpha' = 77^\circ$

$$\Delta \alpha' = \pm 1^\circ$$

$$|\Delta t/t| = 0,0125$$

$$|\Delta D_0/D_0| = 0,0050$$

$$\Delta\varepsilon_{el} \% = \pm 2,72\%$$

→ Verringerung des Systemfehlers im angegebenen Beispiel von 4,0% auf 2,7%

Wie die Fehlerbetrachtung an Gleichung [8] und [9] zeigt ergeben sich für die Winkelmessung eindeutige Vorteile.

Bedingung für die Winkelmessung ist jedoch, dass die Probestreifen exakt gerade sind, um eine Fehlinterpretation der Messung auszuschließen.

Die Ausgangsform des Bandmaterials, deren Krümmung, ist nach der oben gezeigten Berechnung zu berücksichtigen.

Ein Richtvorgang, wie er beim Materialeinzug an der Biegevorrichtung für das Werkstück durchgeführt wird, führt aber zu einem nicht unerheblichen Aufwand; wengleich dies der Praxis am nächsten kommen würde.

Eine rationelle wie auch genaue Methode, bietet das Abrollen des Probestreifens um den Dorndurchmesser D_0 , mit einer Band-Mindestlänge, entsprechend dem Umfanges der Rückfederung auf D' , mit $U' > \pi D'$.

Durch Aufschneiden dieser geschlossenen Ringe erhält man die gut messbare Umfangslänge der Biegeprobe im Zustand der Rückfederung.

Wird nun ein weiterer Probestreifen vom selben Coil entnommen, aber entgegen der vorangegangenen Probe eingelegt, um den Windungsdurchmesser D_0 abgerollt, kann dadurch die vorgegebene Krümmung der Materialcharge eliminiert werden.

Die elastische Dehnung lässt sich nun aus dem Mittelwert berechnen.

$$\text{Mit } \varepsilon_{el.1} = t \left[\frac{1}{D_0} - \underbrace{\left(\frac{1}{D'} - \frac{1}{D'_{coil}} \right)}_{\frac{1}{D'_1}} \right] \quad \text{und} \quad \varepsilon_{el.2} = t \left[\frac{1}{D_0} - \underbrace{\left(\frac{1}{D'} + \frac{1}{D'_{coil}} \right)}_{\frac{1}{D'_2}} \right]$$

$$\text{wird } \frac{(\varepsilon_{el.1} + \varepsilon_{el.2})}{2} = \frac{t}{2} \left[\frac{2}{D_0} - \left(\frac{1}{D'_1} + \frac{1}{D'_2} \right) \right]$$

und mit den gemessenen Umfangswerten $U'_1 = \pi D'_1$ und $U'_2 = \pi D'_2$ ergibt sich die Elastische Dehnung aus

$$\boxed{\varepsilon_{el} = t \left[\frac{1}{D_0} - \frac{\pi}{2} \left(\frac{1}{U'_1} + \frac{1}{U'_2} \right) \right]} \quad [10]$$

2.3 Fehlerbetrachtung an [10]

$$\varepsilon_{el} = t \left[\frac{1}{D_o} - \frac{\pi}{2} \left(\frac{1}{U'_{1}} + \frac{1}{U'_{2}} \right) \right]$$

Dazu wird der Term mit den Umfangswerten ersetzt

$$\text{durch } \frac{1}{D'_{ers}} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{1}{U'_{1}} + \frac{1}{U'_{2}} \right)$$

mit dem absoluten Fehler:

$$\Delta \left(\frac{1}{D'_{ers}} \right) = \pm \left[\frac{\pi}{2U'_{1}} \left| \frac{\Delta U'_{1}}{U'_{1}} \right| + \frac{\pi}{2U'_{2}} \left| \frac{\Delta U'_{2}}{U'_{2}} \right| \right]$$

und dem relativen Fehler:

$$\Delta \left(\frac{1}{D'_{ers}} \right)_{\%} = \pm \left[\frac{1}{\left(1 + \frac{U'_{1}}{U'_{2}}\right)} \left| \frac{\Delta U'_{1}}{U'_{1}} \right| + \frac{1}{\left(\frac{U'_{2}}{U'_{1}} + 1\right)} \left| \frac{\Delta U'_{2}}{U'_{2}} \right| \right] * 100\%$$

Die Genauigkeit der beiden Umfangsmessungen kann hier gleichgesetzt werden.

Damit vereinfacht sich die Gleichung und es gilt für

$$\Delta \left(\frac{1}{D'_{ers}} \right)_{\%} = \pm \left| \frac{\Delta U'}{U'} \right| * 100\%$$

Mit der nun möglichen Messgenauigkeit für $D' = \pm 1\%$, eingesetzt in die Beispielrechnung unter **2.1**, kann die Messung der elastischen Dehnung jetzt mit einer Genauigkeit von **2,5%** erreicht werden.

Damit ist die Methode mit den ganzen Ringen nach der Rückfederung, das einfachste Messprinzip mit guter Genauigkeit für die Ermittlung der elastischen Dehnung eines Federwerkstoffes.

3. Einfluss der Materialdicke t auf eine gleichmäßige Formbarkeit

Bestimmt man aus [8] das Verhältnis des Windungsdurchmessers zum mittleren Werkstückdurchmesser, so erhält man für

$$(D_0/D') = 1 - \frac{\varepsilon_{el}}{t} D_0 \quad [11]$$

Wie daraus zu erkennen ist, ist für die Wahl des Windungsdurchmessers D_0 in Bezug zur Materialdicke t , das Produkt $D_0 \cdot \varepsilon_{el} < t$ einzuhalten um eine bleibende Verformung zu erreichen.

Die Toleranz an dem Durchmesser Verhältnis setzt sich wie folgt zusammen:

$$\Delta(D_0/D') = \pm \left(\frac{\varepsilon_{el}}{t} D_0 \right) \left[\left| \frac{\Delta \varepsilon_{el}}{\varepsilon_{el}} \right| + \left| \frac{\Delta t}{t} \right| + \left| \frac{\Delta D_0}{D_0} \right| \right]$$

Somit beeinflusst neben der Dickentoleranz, auch die Toleranz der elastischen Dehnung, die Formgebung.

Soll ein Biegewerkzeug so ausgelegt werden, dass Materialschwankungen der unterschiedlichsten Lieferungen durch mögliches Nachstellen kompensiert werden sollen, muss der maximale Bereich der Werkstoffschwankungen ermittelt werden.

Der relative Fehler der Materialdicke $\left| \frac{\Delta t}{t} \right|$ ist den Toleranzangaben des Lieferanten bzw. aus den Werkstoffnormen zu entnehmen.

Für ε_{el} wird vorgeschlagen den relativen Fehler für den E-Modul zu übernehmen. Dieser liegt allgemein bei $\pm 5\%$.

Nun kann es sicher vorkommen, dass die Nachstellmöglichkeiten des Werkzeuges nicht mehr ausreichen oder die Gestaltung eines Biegeteils keinen größeren Spielraum zulässt.

Hier muss, um eine unnötige Toleranzeinschränkung der Materialdicke zu vermeiden, konstruktiv untersucht werden ob die Aufgaben eines Formfederteiles mit kleineren Biegeradien erfüllt werden kann.

Selbstverständlich ist hierbei als unterste Grenze der kleinste zulässige Biegeradius nach Angaben des Werkstofflieferanten zu beachten.

Ein großer Einfluss hat hierbei auch die Abkantrichtung – längs oder quer – zur Walzrichtung.

Hinweis:

Bei der Berechnung der Federeigenschaft an längs zur Walzrichtung belasteten Teilen kann der E-Modul bis zu 75% niedriger liegen als quer zur Walzrichtung.

Die vorangegangenen Abweichungen beziehen sich auf die Werkstofftoleranzen und Maschinenschwankungen. Demgegenüber stehen die geforderten Toleranzen in der Zeichnung, entsprechend der zu erfüllenden Funktion.

Mit [11]

$$(D_0/D') = 1 - \frac{\varepsilon_{el}}{t} D_0$$

und der Bedingung

$$D' \alpha' = D_0 \alpha_0 \quad [12]$$

Erhält man den Biegewinkel α_0 um den Windungsdurchmesser D_0

$$\alpha_0 = \alpha' \left(1 + \frac{\varepsilon_{el}}{t} D' \right) \quad [13]$$

mit dem relativen Fehler

$$(\Delta\alpha_0/\alpha_0) = \pm \left\{ |\Delta\alpha'/\alpha'| + \left(\frac{\varepsilon_{el} D'}{(\varepsilon_{el} D' + t)} \right) \left[\left| \frac{\Delta\varepsilon_{el}}{\varepsilon_{el}} \right| + \left| \frac{\Delta t}{t} \right| + \left| \frac{\Delta D'}{D'} \right| \right] \right\} \quad [13.1]$$

Der relative Fehler von α_0 ist hier gleichbedeutend mit dem erforderlichen Stellbereich des Werkzeuges. In ihm werden die relativen Fehler des Werkstoffs $\left| \frac{\Delta\varepsilon_{el}}{\varepsilon_{el}} \right| + \left| \frac{\Delta t}{t} \right|$, wie von oben bekannt, mit den zulässigen Abweichungen des Biegeteils $\left| \frac{\Delta D'}{D'} \right|$, $\left| \frac{\Delta\alpha'}{\alpha'} \right|$, berücksichtigt.

Man sieht in [13.1] auch, dass mit einer größeren Materialdicke t , der Stellbereich kleiner gehalten werden kann.

Jetzt ist noch zu zeigen mit welcher Sicherheit die geforderten Toleranzen eingehalten werden können.

Aus [12] gilt für den relativen Fehler

$$\pm \left(\frac{\Delta(D'\alpha')}{D'\alpha'} \right) = \left| \frac{\Delta D_0}{D_0} \right| + \left| \frac{\Delta \alpha_0}{\alpha_0} \right| \quad [12.1]$$

$\left| \frac{\Delta D_0}{D_0} \right|$ kann in diesen Zusammenhang vernachlässigt werden, da er als Abnutzungsfehler in vielen Fällen sehr klein ausfallen dürfte.

Er ist sicher während einer längeren Betriebsdauer von Interesse, wobei er meist durch geringes Nachstellen wegen anderer Abweichungen mit korrigiert wird, ohne dass er als spezifischer Abnutzungsfehler erkannt wird.

[12.1] geht damit über in:

$$\boxed{\left(\frac{\Delta(D'\alpha')}{D'\alpha'} \right) = \pm \left| \frac{\Delta \alpha_0}{\alpha_0} \right|} \quad [12.2]$$

Dies bedeutet, dass der Fehler $\left| \frac{\Delta \alpha_0}{\alpha_0} \right|$ für eine Fertigungscharge innerhalb den Zeichnungstoleranzen $\left(\frac{\Delta(D'\alpha')}{D'\alpha'} \right)$ liegen muss.

Die Schwankungen einer Fertigungscharge sind wiederum von den Werkstoffeinflüssen ε_{el} und t abhängig.

Allgemein wird vom Lieferant für eine Materialcharge die halbe Toleranzbreite zugesichert.

Es kann deshalb gelten:

$$\boxed{\left| \frac{\Delta(D'\alpha')}{D'\alpha'} \right| - \left(\frac{1}{2} \right) \cdot \left[\left| \frac{\Delta \varepsilon_{el}}{\varepsilon_{el}} \right| + \left| \frac{\Delta t}{t} \right| \right] > 0} \quad [14]$$

Engere Toleranzen in der Zeichnung erfordern daher eine sorgfältige Auswahl des Werkstoffes nach gleichmäßigen Kennwerten.

[14] kann daher als Sicherheitstoleranz für die Fertigung bezeichnet werden.

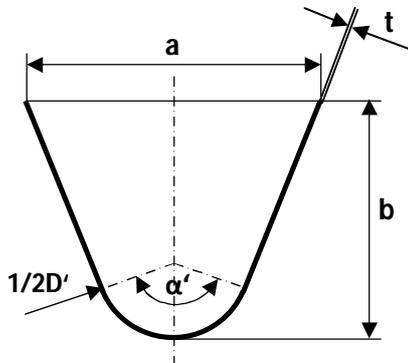
Wird die halbe Werkstofftoleranz in Bezug zur Zeichnungstoleranz gesetzt, kann damit die Einstellsicherheit beurteilt werden. Sie gibt an, mit welcher Treffsicherheit die Werkzeugeinstellung erfolgen kann.

Hierbei gilt für die Einstellsicherheit einer Materialcharge:

$$\boxed{\frac{2 \left| \frac{\Delta(D'\alpha')}{D'\alpha'} \right|}{\left| \frac{\Delta \varepsilon_{el}}{\varepsilon_{el}} \right| + \left| \frac{\Delta t}{t} \right|} > 1} \quad [15]$$

4. Beispiel Federbügel

4.1 Konstruktive Vorgaben



Abmessungen:

(im Bezug zur neutralen Faser; $t/2$)

$$a = 5 \pm 0,10 \text{ mm}$$

$$b = 5 \pm 0,10 \text{ mm}$$

$$D' = 2,5 \pm 0,10 \text{ mm} \rightarrow \pm 4\%$$

$$t = 0,08 \pm 0,0025 \text{ mm} \rightarrow \pm 3\%$$

α' ist entweder in der Zeichnung bereits angegeben oder muss aus den übrigen Angaben berechnet werden, wie in diesem Beispiel.

Berechnung von α' und $D'\alpha'$ nach den Zeichnungsangaben aus:

$$\alpha' = 2 \left\{ \arctan \left[\frac{(2b-D')}{a} \right] + \arcsin \left[\frac{D'}{\sqrt{a^2 + (2b-D')^2}} \right] \right\}$$

$$\alpha'_{\min} = 141,8^\circ \text{ mit: } a_{\max}; b_{\min}; D'_{\min}$$

$$\alpha'_{\max} = 147,8^\circ \text{ mit: } a_{\min}; b_{\max}; D'_{\max}$$

$$\alpha' = 144,8^\circ \pm 3^\circ \rightarrow \pm 2,1\%$$

und

$$D'_{\min} \alpha'_{\min} = 2,4 \text{ mm} * 141,8^\circ \rightarrow 340,3 \text{ mm}^\circ$$

$$D'_{\max} \alpha'_{\max} = 2,7 \text{ mm} * 147,8^\circ \rightarrow 384,3 \text{ mm}^\circ$$

$$D'\alpha' = 362,3 \text{ mm}^\circ \pm 22 \text{ mm}^\circ \rightarrow \pm 6,1\%$$

Mit $\varepsilon_{el} \pm 5\%$ und $t \pm 3\%$ ist nach [14] die Sicherheitstoleranz zu prüfen:

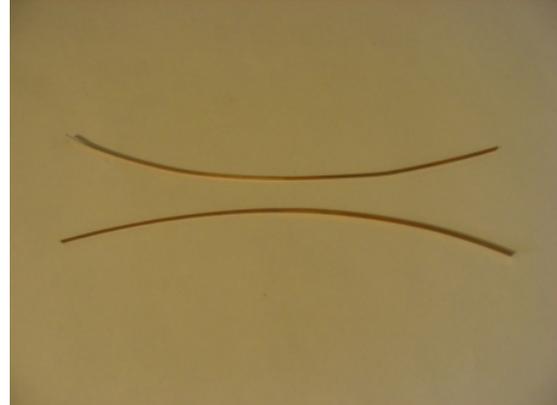
$$\begin{aligned} & \cdot \left| \frac{\Delta(D'\alpha')}{D'\alpha'} \right| - \left(\frac{1}{2} \right) \cdot \left[\left| \frac{\Delta\varepsilon_{el}}{\varepsilon_{el}} \right| + \left| \frac{\Delta t}{t} \right| \right] > 0 \\ \rightarrow & |6,1\%| - \left(\frac{1}{2} \right) \cdot [5\% + 3\%] > 0? \rightarrow +2,1\% \rightarrow \text{erfüllt!} \end{aligned}$$

und nach [15], die Einstellsicherheit für eine Materialcharge:

$$\begin{aligned} & \frac{2 \left| \frac{\Delta(D'\alpha')}{D'\alpha'} \right|}{(|\Delta\varepsilon_{el}/\varepsilon_{el}| + |\Delta t/t|)} > 1 \\ \rightarrow & \frac{2|6,1\%|}{(5\% + 3\%)} > 1? \rightarrow 1,525 \rightarrow \text{erfüllt} \end{aligned}$$

4.2 Materialkennwerte zur Werkzeugauslegung

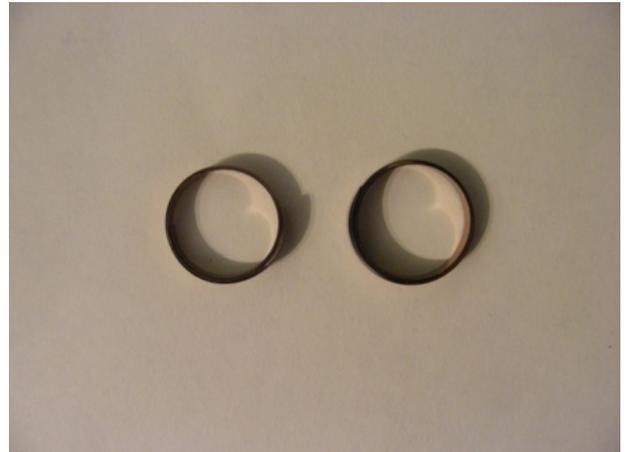
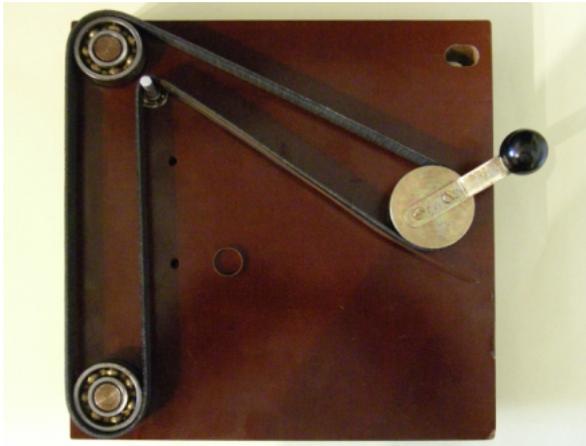
Vorbereitung der Probekörper:



Dazu wird ein genügend langes Stück Bandmaterial entnommen und in zwei Hälften getrennt.

Dann werden die Streifen gegenseitig nacheinander durch die Vorrichtung gespult.

Als Ergebnis erhält man zwei Bandwicklungen mit unterschiedlichem Durchmesser



Nach dem Auftrennen und strecken der Ringproben kann an den einzelnen Streifen die Umfangslänge gemessen werden.



Messwert $U'_1 = 44,33\text{mm} \pm 0,5\%$

Messwert $U'_2 = 47,77\text{mm} \pm 0,5\%$

Mit der Materialdicke $t = 0,08mm \pm 0,7\%$
 und dem Dorndurchmesser der Prüfvorrichtung plus der Banddicke
 $D_{0-Prüf} = 4,96mm + t \pm (0,1\% + 0,7\%) \rightarrow 5,04mm \pm 0,8\%$
 kann mit Gleichung [10], ε_{el} für die Materialprobe berechnet werden.

$$\varepsilon_{el} = 0,08 \cdot \left[\frac{1}{5,04} - \frac{\pi}{2} \left(\frac{1}{44,33} + \frac{1}{47,77} \right) \right]$$

$$\underline{\varepsilon_{el} = 0,010408} \quad \left(\frac{1}{D'_{Probe}} \right) = \frac{1}{14,638mm} \pm 0,5\% \rightarrow \left(\frac{D_{0-Prüf}}{D'_{Probe}} \right) = 0,3416$$

und mit Gleichung [8.2]:

$$\Delta\varepsilon_{el}\% = \pm \left[|0,007| + \frac{|0,008|}{(1-0,3416)} + 0,3416 \frac{|0,005|}{(1-0,3416)} \right] * 100\%$$

$$\underline{\Delta\varepsilon_{el}\% = \pm 2,17\%}$$

4.3 Werkzeugauslegung

Der Biegewinkel α_0 , um den Windungsdurchmesser D_0 , errechnet sich aus [13]

$$\alpha_0 = \alpha' \left(1 + \frac{\varepsilon_{el}}{t} D' \right)$$

$$\alpha_0 = 144,8^\circ \cdot \left(1 + \frac{0,010408}{0,08mm} 2,5mm \right)$$

$$\underline{\alpha_0 = 191,9^\circ}$$

mit der Toleranz nach Gleichung [13.1]

$$(\Delta\alpha_0/\alpha_0) = \pm \left\{ 0,021 + \left(\frac{0,010408*2,5}{(0,010408*2,5+0,08)} \right) [0,0217 + 0,03 + 0,08] \right\} * 100\%$$

$$\underline{(\Delta\alpha_0/\alpha_0) = \pm 5,33\%}$$

und schließlich D_0 aus [12] umgestellt: $D_0 = \frac{D' \alpha'}{\alpha_0}$ [16]

$$D_0 = \frac{362,3mm^\circ}{191,9^\circ}$$

$$\underline{D_0 = 1,888mm \pm 5,33\%} \rightarrow \underline{1,79mm \leq D_0 \leq 2,0mm}$$

(mit der Toleranz von α_0)

Um den Stellbereich für α_0 ganz auszunützen, wird für den Biegedorn der
 Mindestdurchmesser $D_{0-min} = 1,79mm - t \rightarrow 1,71mm$ gewählt.

Für die Anordnung der Biegestempel ist noch zu berücksichtigen, dass das Federband
 über 180° um den Biegedorn geführt werden muss.

Mit der Toleranz für α_0 ergibt sich ein Bereich des Biegewinkels je nach
 Materialcharge: $\underline{181^\circ \leq \alpha_0 \leq 202^\circ}$

Zur besseren Abstützung und Stabilität des Biegedorns wird dieser als Flachstempel auszuführen sein, mit einem tropfenförmigen Hinterschnitt von 202° .

Desweiteren ist zur Vermeidung der über 180° -Biegung die Teilekonstruktion zu prüfen, ob ein größerer Öffnungswinkel mit einem kleineren Biegeradius zugelassen werden kann.

Hinweis:

Die vorgestellte Werkzeugauslegung setzt voraus, dass die Formgebung ein reiner Biegevorgang ist, ein Umschlingen um den Biegestempel, ohne Prägestellen am Federband.

Für Konturbereiche mit hoher Lebensdauerforderung ist jedoch diese schonende Art der Bearbeitung ausschlaggebend für eine gesicherte Qualität in der Serienfertigung.