

Berechnungsansätze zur Prozessoptimierung beim Walzenrunden von Blechen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel ¹,
Dipl.-Ing. Fabian Kapp ^{2*},
Dipl.-Ing. Christopher Heftrich ¹

¹ Lehrstuhl für Umformtechnik, Universität Siegen

² Gräbener Maschinenteknik GmbH & Co. KG

Zusammenfassung:

In der vorliegenden Arbeit werden Berechnungsansätze für eine Optimierung des Umformprozesses beim Walzrunden von Blechen auf einer 3-Walzen-Biegemaschine erläutert. Dabei werden zunächst verschiedene ermittelte und angewandte Ansätze dargestellt und anschließend miteinander verglichen. Diese zeigen den Zusammenhang zwischen dem Radius und dem mechanischen Hub der Seitenwalze auf. Der Hub der Seitenwalze ist dabei maßgebend für den gesamten Umformprozess. Anschließend wird die Sollwertgenerierung einer elliptischen Kontur näher beschrieben, um dann im praktischen Versuch weitere umgeformte Teile auswerten zu können. Die zur Auswertung der elliptischen Geometrie benötigte mathematische Vorgehensweise wird dazu aufgezeigt und schlussendlich ein Ausblick beschrieben, welche weiteren Maßnahmen zu erfolgen haben, um die Abweichungen zwischen der Soll- und Istkontur durch eine entsprechende Methodik über einen Algorithmus zu eliminieren.

SCHLÜSSELWÖRTER: 3-Walzen-Biegemaschine, Prozessoptimierung, Sonderanlagenbau, Berechnungsmethodik

1. EINLEITUNG

In ENGEL et al. (2015) wurden die benötigten Grundlagen für die Prozessoptimierung beim Walzrunden von Blechen als Vorbereitung zur Ermittlung einer Prozessoptimierung zur Herstellung von Windturmtürzargen beschrieben. Zunächst wurde die Notwendigkeit eines optimierten Herstellprozesses geschildert, ebenso wie die im Markt üblichen Herstellmethoden. In Folge dessen wurde das angewandte Umformverfahren mittels einer 3- bzw. 4-Walzen-Biegemaschine und die Notwendigkeit der Weiterentwicklung der Regelung der Walzen-Biegemaschinen dargestellt, um wiederholgenaue Geometrien mit variierendem Radius und Chargenschwankungen ausschließlich durch Veränderung der Maschineneinstellparameter fertigen zu können. Überdies wurde das Verhalten des verwendeten Werkstoffs erörtert, u.a. durch Untersuchung von Werkstoffproben im Zugversuch.

Aus den gewonnenen Ergebnissen wird im Folgenden beschrieben, welche weiteren Maßnahmen zur Prozessoptimierung notwendig sind. Zur Durchführung der Prozessoptimierung wird der Prozess mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode (FEM) simuliert. Die hierbei zu erwartenden Abweichungen zu den vorangegangenen Versuchen können sich u.a. aus den in ENGEL et al. (2015) beschriebenen Toleranzen, wie z.B. Maschinenverformungen oder Lagerspielen etc. ergeben. Sie sind ein Grund für Untersuchungen, in wie weit diese Abweichungen durch einen prozessoptimierten Regler minimiert oder vermieden werden können.

Die Anlagensteuerung einer Biegemaschine besitzt im Allgemeinen keine ausreichende Rechenkapazität, um eine FE-Simulation des Umformprozesses durchführen zu können. Zudem erfordert eine FE-Simulation einen erhöhten Zeitaufwand, der einen

* Korrespondierender Autor: Gräbener Maschinenteknik GmbH & Co. KG, Am Heller 1, 57250 Netphen, Tel.: +49 2737 989 500, Fax: +49 2737 989 110, f.kapp[at]graebener-group.com

Einsatz in einer Produktionsmaschine nicht zulässt, da die Berechnung im Verhältnis zu den Fertigungszyklen zu viel Zeit in Anspruch nimmt. Maßgabe ist es daher, eine numerische Berechnungsmethode zu entwickeln, mit deren Hilfe die Umformung berechnet werden kann, um somit eine Grundlage für den Prozessregler zu schaffen. Auch diese Methode wird aufgrund der zuvor genannten Anlagentoleranzen eine Abweichung zwischen Soll- und Ist-Kontur hervorbringen. Für diese Abweichungen soll eine Methodik unter Verwendung eines Algorithmus entwickelt werden, der wiederum diese Abweichungen kompensiert und so einen optimierten Regler für den Umformprozess hervorbringt. Schlussendlich soll aus der Kombination zwischen numerischem Sollwertgenerator und Prozessregelalgorithmus ein möglichst optimaler Biegeprozess mit einem Minimum an Umformschritten hervorgehen.

2. AUSWERTUNGEN

2.1. FE-Simulation

Mit Hilfe der FE-Simulation, der Anlagengeometrie und den zuvor ermittelten Werkstoffdaten, wurde der Umformprozess für einen konstanten Krümmungsradius in der Software Abaqus 6.12 simuliert. Die Simulation wurde dabei, wie in Abbildung 1 zu erkennen ist, in drei Schritte eingeteilt:

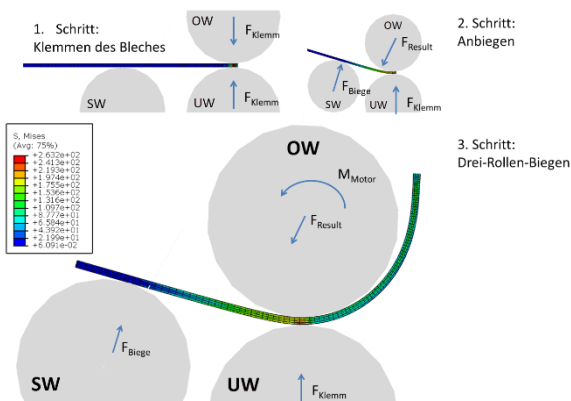


Abbildung 1: FE-Simulation des Biegeprozesses

Im ersten Schritt wurde das Blech zwischen der Ober- (OW) und Unterwalze (UW) mit der Kraft F_{Klemm} durch vertikale Zustellung der Unterwalze geklemmt. Im nächsten Schritt wird das Blech durch Zustellung der Seitenwalze (SW) auf eine Position von 25 mm angebogen. Im dritten Schritt wird durch das Drehmoment der Oberwalze M_{Motor} das Blech durch die Anlage befördert. Daraus resultiert eine konstante Krümmung des Bleches. Die Unterwalze wird dabei konstant auf eine Kraft von 30 kN geregelt. Aus dieser Simulation lässt sich

nun der Krümmungsradius über die Bogenlänge auftragen. Dieser Radienverlauf (Abbildung 2, rot) wird mit Hilfe der Dehnungsverteilung über die Blechdicke nach BUHL (2014) berechnet.

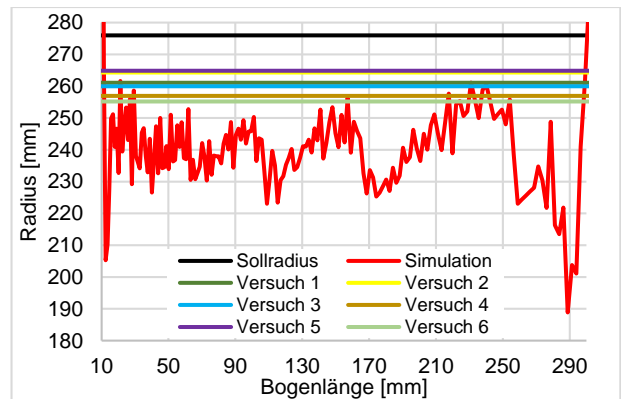


Abbildung 2: Radienverlauf über die Blechkontur

Der Vorteil dieser Methode liegt darin, dass die Oberflächenbeschaffenheit keinen Einfluss auf das Messergebnis hat und die simulierten Dehnungswerte eine ausreichende Genauigkeit aufweisen. Diese Simulation dient zur Ermittlung grundlegender Kenntnisse des hier verwendeten Umformprozesses.

Die dargestellten Radien aus den sechs Versuchen in Abbildung 2 wurden durch Umformung mittels des vorgegebenen konstanten Sollradius (Abbildung 2, schwarz) ermittelt. Die Berechnung der einzelnen Radien erfolgte dabei im Anschluss an die Blechkonturvermessung mit Hilfe des Gauss-Newton-Verfahrens nach MANTHEY (1999-2005) (vgl. Kapitel 3.2).

2.2. Numerische Alternative zur FE-Simulation

In der Biegeanlage soll während der Produktion die Berechnung der optimalen Radien/Hub-Beziehung direkt durch die Anlagensteuerung auf Grundlage verschiedener Parameter erfolgen. Eine Inline FE-Simulation nach 2.1 lässt sich wie zuvor beschrieben aus Zeitgründen nicht realisieren. Somit ist eine numerische Methode als Alternative zur FE-Simulation, die annähernd gleiche Ergebnisse erzielt, anzuwenden. Die numerische Methode bietet eine schnelle Berechnung der notwendigen Seitenwalzenzustellung für einen geforderten Radius im zurückgefederten Zustand und wird in ENGEL et al. (2014) im Detail beschrieben.

Zusammenfassend wird dabei wie folgt vorgegangen: Es wird zunächst eine Startbedingung vorgegeben (Tabelle 1) und zugehörige Parameter dazu abgeschätzt. Mit den in ENGEL et al. (2014) getroffenen Annahmen und einer Werkstoffbeschreibung nach Swift wird der Biegeprozess über einen belasteten Kragbalken moduliert. Dabei wird über

den Hub und die Kraft der Seitenwalze der Verlauf des aufgebracht Biegemomentes, das auf den eingespannten Blechabschnitt wirkt, berechnet. Nach Bestimmung des diesem entgegenwirkenden inneren Momentes lässt sich die Krümmung bestimmen.

vorgegeben	abgeschätzt
Hub H_{SW}	Kraft F_{Biege}
Kraft F_{Biege}	Hub H_{SW}
Krümmung κ	Hub H_{SW} und Kraft F_{Biege}

Tabelle 1: Startbedingungen

Die für diese Berechnung notwendige Abschätzung der Biegelinie erfolgt mittels des linearen Ansatzes aus ENGEL et al. (2014):

$$w_j = w_{j-1} + \Delta w \quad \text{für} \quad 2 \leq j \leq J \quad (2.1)$$

Ausgehend von einem Startwinkel $\alpha_0 = 1,5 \cdot \pi$ wird mit Hilfe der zuvor im Algorithmus bestimmten Krümmung κ_j in jedem Punkt P_j des Konturverlaufs im Blech zunächst die Änderung (Δw) der Biegelinie berechnet (Abbildung 3).

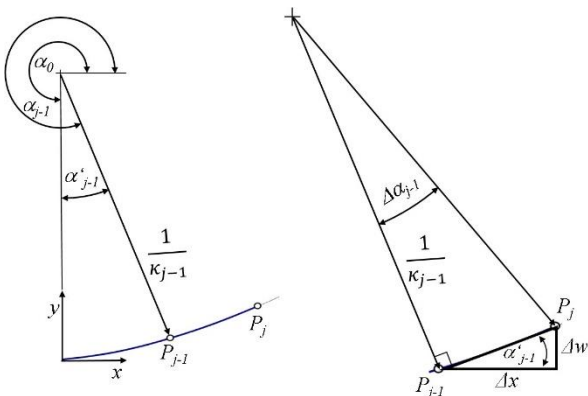


Abbildung 3: Lineare Näherung der Biegelinie

Hierbei wird der Konturverlauf zwischen zwei zueinander folgenden Punkten P_{j-1} und P_j über eine Gerade approximiert. Die Änderung (Δw) der Biegelinie wird über den Steigungswinkel α'_{j-1} dieser Geraden und dem Abstand Δx der zwei Punkte berechnet.

$$\Delta w = \tan \alpha'_{j-1} \cdot \Delta x \quad (2.2)$$

Dabei wird davon ausgegangen, dass die Gerade senkrecht zum Krümmungsradius $1 / \kappa_{j-1}$ steht. Zur Bestimmung des Winkels $\Delta \alpha_{j-1}$ für P_j werden folgende Annahmen getroffen:

- Kleine Winkeländerung ($\sin(\Delta \alpha_{j-1}) \sim \Delta \alpha_{j-1}$)
- Änderung der Krümmung wird vernachlässigt.

Es gilt somit:

$$\alpha_j = \alpha_{j-1} + \Delta \alpha_{j-1} \quad (2.3)$$

$$\text{mit} \quad \Delta \alpha_{j-1} = \kappa_{j-1} \frac{\Delta x}{\cos \alpha'_{j-1}}$$

Die zuvor angenommenen Startwerte (vgl. Tabelle 1), werden nun solange abgeschätzt, bis zuvor definierte Randbedingungen der Modellordnung als Kragbalken im Biegeprozess erreicht werden.

Im letzten Schritt wird die Biegelinie unter Berücksichtigung der Rückfederung erneut nach dem linearen Ansatz (2.1) berechnet. Nach LANGE (1990) gilt für die Rückfederung K_R :

$$K_R = K - \frac{M}{E \cdot I} \quad (2.4)$$

Dabei wird mit dem inneren Moment M , dem E-Modul E , dem Trägheitsmoment I und der Krümmung K in jedem Inkrement die Rückfederung K_R kalkuliert. Über diese Methode wird der Verlauf des Krümmungsradius über die Blechlänge ermittelt.

2.3. Radien/Hub-Beziehung

Wie ENGEL et al. (2014) aus den zuvor durchgeführten Versuchen und Überlegungen erkannten, ist die gewünschte Kontur sowohl abhängig von dem Hub als auch dem Drehwinkel der Oberwalze sowie dem Halbzeug (Abbildung 4).

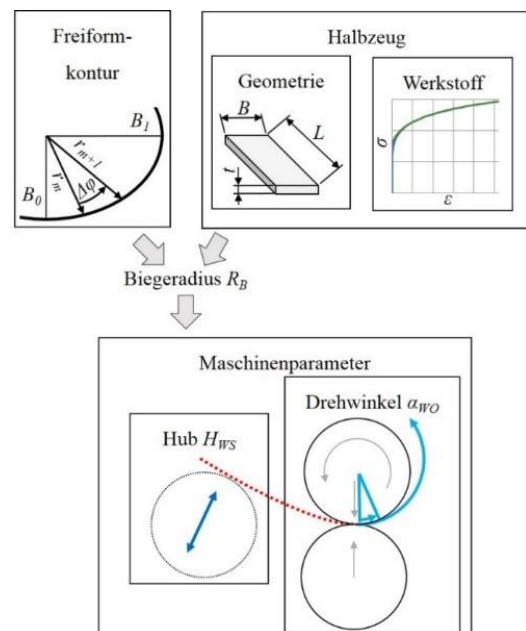


Abbildung 4: Zusammenhang der Parameter ENGEL et al. (2014)

Aus den Biegeversuchen zur Ermittlung des Werkstoffverhaltens in ENGEL et al. (2015) und den Simulationen in 2.1 ist ein Zusammenhang zwischen Seitenwalzenposition (Hub der Seitenwalze)

und dem rückgefederten Radius nach ENGEL et al. (2014) als doppelte e-Funktion mit den unbekannt Parameteren A_0 bis A_3 erkennbar:

$$H_{WS}(R_B) = A_0 e^{A_1 R_B} + A_2 e^{A_3 R_B} \quad (2.5)$$

Dabei werden die unbekannt Parameter A_0 bis A_3 auf Basis der

- Versuche,
- FE-Simulation unter Abaqus,
- numerischen Kalkulation im rückgefederten Zustand und über die
- numerische Kalkulation im rückgefederten Zustand mit optimierten Werten

bestimmt.

Für den rückgefederten (unbelasteten) Verformungszustand gibt der Verlauf des Versuchs (Abbildung 5, schwarz) eine Aussage zur Radien-Hub-Beziehung ebenso wie der durch die Simulationen mit Hilfe von Abaqus (Abbildung 5, blau) ermittelte. In beiden Graphen wurden die ermittelten, zurückgefederten Radienwerte bei eingestelltem Hub gegeneinander aufgetragen. Die Bestimmung der Zusammenhänge aus dem Versuch erfolgte durch Aufzeichnung der eingestellten Seitenwalzenposition zusammen mit dem Blechvorschub und der späteren Vermessung der Radien über die abgewickelte Länge des gebogenen Blechstreifens. Die Auswertung der Zusammenhänge der FE-Simulation mit Abaqus ist in Kapitel 2.1 erläutert.

Die in Abbildung 5 rot gestrichelte Linie „Numerisch“, stellt den Verlauf im rückgefederten Zustand nach der Umformung durch die alternative numerische Berechnungsmethode dar (vgl. Kapitel 2.2). Im Vergleich dazu wurden die Parameter des Verlaufs „Korrektur“ (Abbildung 5, grün) nach zuvor genannter Berechnung auf Basis der Versuchsergebnisse und der ursprünglichen numerischen Berechnungsmethode (vgl. Kapitel 2.2) neu bestimmt, so dass diese dem realen Verlauf angenähert und optimiert wurden. Die Anpassung erfolgte hierbei mit der Software MATLAB, indem ein Verhältnis zwischen den zu den Radien gehörenden Hübten aus den Versuchen und den Werten nach der numerischen Methode ermittelt wurde. Aus diesem Verhältnis wurde wiederum eine Korrekturfunktion in Abhängigkeit des Radius erstellt, die ebenso aus einer doppelten e-Funktion besteht, allerdings über die Parameter K_0 bis K_3 definiert wird. Aus der Verrechnung des theoretischen Ansatzes mit den Parametern A_0 bis A_3 nach Formel (2.5) mit der neu ermittelten Korrekturfunktion

$$H_{WS}(R_B) = (K_0 e^{K_1 R_B} + K_2 e^{K_3 R_B})(A_0 e^{A_1 R_B} + A_2 e^{A_3 R_B}) \quad (2.6)$$

kann eine bereits optimierte Sollwertvorgabe für den Hub in Abhängigkeit des Radius vorgegeben werden. Aus dem Verlauf ist zu erkennen, dass der Radius immer minimal größer ist als in den Versuchsbiegungen. Dies eignet sich für die spätere Optimierung des Biegeprozesses, da ein Nachbiegen problemlos möglich ist. Im Gegensatz dazu ist ein überbogenes Blech Ausschuss, da ein solches auf der 4-Walzen-Biegemaschine nicht zurückgebogen werden kann.

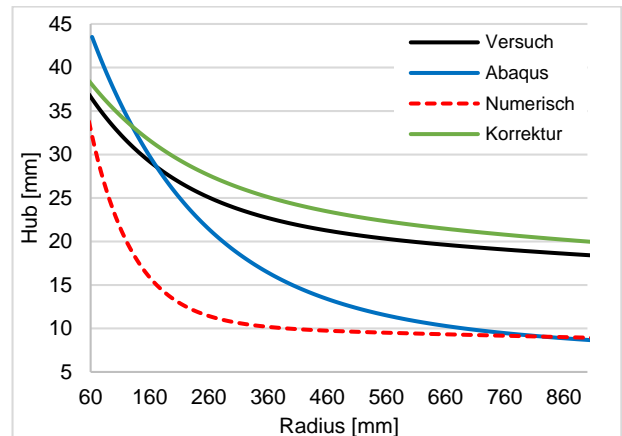


Abbildung 5: Radien-Hub-Beziehung

Zu erkennen ist die quantitative Differenz der theoretischen Ansätze nach Abaqus und der numerischen Berechnungsmethode im Vergleich zu dem Korrekturverlauf und den praktischen Biegeversuchen. Dies ist u.a. zurückzuführen auf die in ENGEL et al. (2014) durchgeführte Annahme

- der Vernachlässigung der Nachgiebigkeit in der gesamten Steifigkeitsstruktur, durch die Lagerspiele in den Drehlagern und Verschiebeeinheiten sowie der Reibung zwischen Blech und Walzen,
- eines konstanten rechteckigen Querschnitts in Längsrichtung,
- eines isotropen Materialverhaltens,
- der Vernachlässigung der Umformgeschwindigkeit und -temperatur,
- dass die neutrale Faser in der Mittelebene liegt und
- es gilt die Bernoulli Hypothese nach GROSS et al. (2014).

Die Radien-Hub-Beziehung mit optimierten Parametern ist für den Einsatz als Sollwertgenerator geeignet. Diese Gleichung benötigt keine hohe Rechenleistung und kann direkt vor dem Biegeprozess geeignete Sollwerte ausgeben, um die Regelabweichung im Prozess mit angemessenem Rechenaufwand gering zu halten.

2.4. Verfahrensgrenzen

Es hat sich gezeigt, dass die für die Umformung benötigte Kraft nicht nur von der Blechgeometrie und dem Werkstoff, sondern auch von der Blechkrümmung abhängig ist. Jedoch ist die Kraftgrenze bei diesen Versuchen für die Umformung zu vernachlässigen, da die maximale Kraft der Seitenwalze im Umformvorgang nicht erreicht wird. Für das hier verwendete Material ergibt sich unter Zuhilfenahme des vereinfachten elastisch-idealplastischen Biegemomentes nach LANGE (1990)

$$M = \frac{b \cdot s^2}{4} \sigma_s - \frac{1}{3} \sigma_s \cdot b \cdot r_m^2 \cdot \varepsilon^2 \quad (2.7)$$

eine Seitenwalzenkraft von 38 kN. Dabei sind folgende Annahmen zu berücksichtigen:

- Der durch die Geometrie begrenzte kleinstmögliche Innenradius r_i beträgt 55 mm.
- Die durch die Geometrie maximal mögliche Blechdicke s beträgt 14 mm.
- Die angenommene Blechbreite b von 150 mm ergibt sich aus dem Anlagenverhältnis bezogen auf ein reales Bauteil.
- Das Verhältnis der Wirkrichtung zwischen Seitenwalzenkraft und Biegekräft der Umformung.

Die hierbei ermittelte Seitenwalzenkraft liegt unter der mechanisch maximal möglichen Seitenwalzenkraft von 40 kN. Weiterhin kommt hinzu, dass die für die Versuche verwendete Blechdicke lediglich 4 mm beträgt, da dies im Verhältnis dem Maßstab der Versuchsanlage in Bezug auf ein real umzuformendes Bauteil entspricht.

Die Umformzone befindet sich zwischen der Ober- und Unterwalze. Sie verläuft weiter in Längsrichtung in Abhängigkeit der Zustellung und dem damit verbundenen Krümmungsradius. Hierzu können Grenzen für den Hub und den daraus resultierende Krümmungsradius wie folgt ermittelt werden.

Der minimale innere Krümmungsradius unter Last wird durch den Oberwalzenradius auf 55 mm begrenzt. Der dazugehörige Außenradius ändert sich entsprechend mit der Blechdicke.

Der maximale Krümmungsradius ergibt sich aus den Eigenschaften des Werkstoffs. GELEJI (1961) beschreibt, dass die Verformungsarbeit elastisch ist, solange an keiner Stelle der Krümmungsradius kleiner ist als:

$$r_f = \frac{s \cdot E}{2\sigma_f} \quad (2.8)$$

Sobald also für den Krümmungsradius r_k gilt

$$r_k < r_f \quad (2.9)$$

tritt eine plastische Verformung ein. Dies kann als Grenzwert für den maximalen Radius bei der plastischen Verformung angenommen werden.

Diese beiden Radien, der minimale und maximale Radius unter Last, bei einer plastischen Verformung, definieren die Grenzen der Umformung bzw. überhaupt die Möglichkeit einer plastischen Verformung. Für den hier verwendeten Werkstoff X5CrNi18-10 (1.4301) ergibt sich für diese Annahme folgender Zusammenhang (Abbildung 6) zwischen Blechdicke, Seitenwalzenhub und Außenradius.

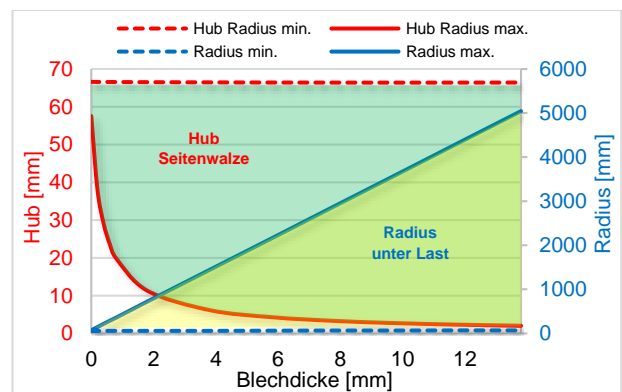


Abbildung 6: Umformgrenzen

Der nutzbare Hub vergrößert sich mit zunehmender Blechdicke, da die Rückfederung des Blechs abnimmt. Die blauen Linien stellen den kleinstmöglichen bzw. den maximalen äußeren Krümmungsradius jeweils unter Last über der Blechdicke dar. Die roten Linien zeigen den jeweiligen Hub der Seitenwalze zu dem minimalen bzw. maximalen Krümmungsradius der zugehörigen Blechdicke unter Last. Hierbei versteht sich der Hub als der relative Verfahrensweg der Seitenwalze ausgehend von einem eingelegten unverformten Blech mit entsprechender Blechdicke und dem Verfahrensweg von 0 mm.

Für das hier verwendete Material und einer Blechdicke von $s = 4 \text{ mm}$ gelten folgende Grenzwerte im belasteten Zustand bei bleibender Formänderung:

Minimaler Radius	59 mm
Hub bei min. Radius	66,46 mm
Maximaler Radius	1440,85 mm
Hub bei max. Radius	6,18 mm

Tabelle 2: Umformgrenzen für Versuchsanordnung

3. VALIDIERUNG

3.1. Sollvorgaben

Nach der Auswertung des Zusammenhangs zwischen dem gewünschten Krümmungsradius und dem dazu benötigten Hub der Seitenwalze nach Formel (2.6)(2.5) wurden zur Verifizierung der Ergebnisse weitere Umformversuche durchgeführt, in deren Rahmen eine elliptische Kontur gebogen wurde.

Um die Sollparameter für die Steuerung der Anlage zu ermitteln, ist zu berücksichtigen, dass zu dem Integral zur Bestimmung der Bogenlänge einer Ellipse nach BRONSTEIN et al. (2013) mit

$$u_{EL} = \int \sqrt{(a \cos \varphi)^2 + (b \sin \varphi)^2} d\varphi \quad (3.1)$$

keine Stammfunktion existiert und somit keine mathematisch geschlossene Formel als Lösung in diesem Fall erreicht werden kann. Zur Berechnung des Krümmungsradius eines Punktes auf dem Bogen einer Ellipse muss daher anderweitig vorgefahren werden.

Zur Lösung wird ein einfaches Halbierungsverfahren mit einer numerischen Annäherung verwendet. Bekannt ist, dass die Berechnung nur in dem Bereich des Ellipsenwinkels (entspricht dem Lagewinkel φ , Abbildung 7) zwischen $\varphi = 0^\circ$ und $\varphi = 90^\circ$ durchgeführt werden muss. Eine solche Winkeldefinition entspricht dem Ellipsenbogen des umzuformenden Blechstreifens. Die Bogenlänge in diesem Bereich wird inkrementell aufgeteilt. An jedem inkrementellen Punkt auf der Bogenlänge wird der Krümmungsradius bestimmt.

Zur Berechnung genügen eine Definition des Startwinkels, die bekannte Bogenlänge vom Blechbeginn bis zu dem Punkt auf der Kontur an der der Krümmungsradius bestimmt werden soll und die gewünschte Genauigkeit der Bogenlänge. Dabei wird der Startwinkel iterativ halbiert und zu dem vorhergehenden addiert oder subtrahiert und sich so bis auf die vorgegebene Toleranz dem gewünschten Messpunkt, der durch die Bogenlänge definiert ist, genähert. Durch dieses Verfahren ist der Ellipsenwinkel φ an dem gesuchten Messpunkt (Bogenlänge) bekannt.

Zur Ermittlung des Hubs der Seitenwalze zu den zuvor definierten Messpunkten auf der Sollkontur der Ellipse, muss in diesem zunächst der Krümmungsradius R_K ermittelt werden. Es gilt auf der Basis nach BRONSTEIN et al. (2013):

$$R_K = a^2 b^2 \sqrt{\left(\frac{x^2}{a^4} + \frac{y^2}{b^4}\right)^3} \quad (3.2)$$

Mit der Anwendung von Polarkoordinaten folgt anschließend:

$$R_K = \frac{1}{ab} \sqrt{(a^2 \sin^2 \beta + b^2 \cos^2 \beta)^3} \quad (3.3)$$

Die lange und kurze Halbachse der Ellipse sind definiert durch a und b , der aktuelle Drehwinkel mit β , der nicht dem Lagewinkel φ des gegebenen Punktes auf der Ellipse entspricht, sondern dem Zeiger im Polarkoordinatensystem.

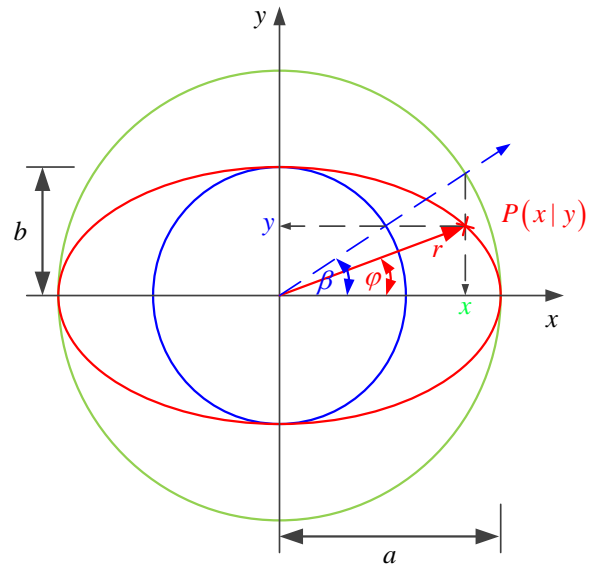


Abbildung 7: Dreh- (β) und Lagewinkel (φ) einer Ellipse

Der Lagewinkel φ der Ellipse muss durch folgende Beziehung umgerechnet werden, damit eine Berechnung auf Grundlage des Drehwinkels β möglich ist:

$$\beta = \arctan\left(\frac{a}{b} \tan \varphi\right) \quad (3.4)$$

So kann für vorgegebene Punkte auf dem Ellipsenbogen mit den bekannten Lagewinkeln φ der dazugehörige Krümmungsradius nach (3.3) und der benötigte Seitenwalzenhub nach (2.6) ermittelt werden. Über festgelegte Inkremente ist die Bogenlänge zu jedem Krümmungsradius bekannt. Mit der Annahme, dass kein Schlupf zwischen dem geklemmten Blech und der Oberwalze existiert, ist die Oberwalzenposition mit dem Maß der Bogenlänge identisch. Somit sind alle relevanten Größen bekannt, um ein Blech mit Hilfe des Walzrunds in eine elliptische Geometrie zu verformen.

Aus den beschriebenen Berechnungen ergeben sich die in Abbildung 8 dargestellten Abhängigkeiten zwischen dem Hub der Seitenwalze und dem Krümmungsradius sowie dem Hub und dem Ellipsenlagewinkel.

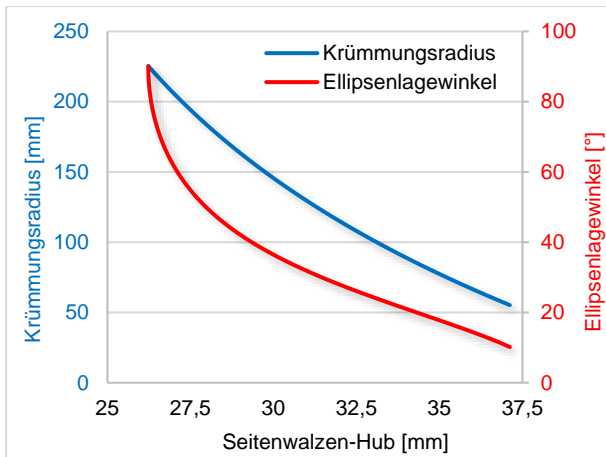


Abbildung 8: Radien-Hub-Beziehung

Es ist zu erkennen, dass mit zunehmender Seitenwalzenposition (Seitenwalzen-Hub) der Krümmungsradius (blau) der Ellipse kleiner wird und so den Verlauf der Ellipse abbildet. Der kleinste Radius der Ellipse befindet sich am Blechanfang, an dem Punkt, an dem die Seitenwalze die größte Zustellung erfährt.

3.2. Vermessung der Krümmungsradien

Die Vermessung des gebogenen Blechstreifens, der ein Viertel einer Ellipsenkontur darstellt, liefert ein Koordinatensystem, indem jeder einzelne Punkt auf der Kontur der Ellipse dargestellt wird.

Damit eine Aussage zur Qualität des Umformergebnisses getätigt werden kann, werden die Daten in einzelne Krümmungsradien umgerechnet. Mit der maximalen Länge der Kontur, die einem Viertel des Umfangs der hergestellten Ellipse entspricht, kann die Anzahl der zu ermittelnden Radienbereiche definiert werden. Für eine möglichst exakte Wiedergabe der Radien über den Konturverlauf, sollten sich die einzelnen Radienbereiche zur Auswertung überschneiden.

Für den Vergleich zwischen Soll- und Ist-Krümmungsradius in den Teilbereichen der Ellipse werden vorab die Sollwerte an diesen Punkten bestimmt. Zur Durchführung wird das beschriebene Verfahren aus Kapitel 3.1 verwendet, es werden lediglich angepasste Startwerte zur Berechnung angenommen.

Um nun die Ist-Krümmungsradien in den definierten Abständen auf der Kontur auswerten zu können, wird die Methode der kleinsten Fehlerquadrate nach dem Gauß-Newton-Verfahren eingesetzt, wie MANTHEY (1999-2005) dies beschreibt. Das ermöglicht eine exakte Bestimmung der Ist-Krümmungsradien, auch bei Schwankungen innerhalb der aufgenommenen Punkte.

Unter Verwendung dieses Verfahrens wird ein Mittelwert aus allen einbezogenen Punkten berechnet, dessen Verlauf den ermittelten Krümmungsradius an einem ausgewählten Punkt auf der Ellipse beschreibt. Bedingung für die Verwendung dieser Methode ist, dass es mindestens so viele Gleichungen wie Unbekannte gibt. Mit einer Abschätzung der Startwerte für den Kreismittelpunkt von $x_0 = 0$, $y_0 = 0$ und einem angenommenen Krümmungsradius von $r = 1$ werden über die Kreisgleichung in linearer Form nach BRONSTEIN et al. (2013)

$$f(A, B, C) = A(x^2 + y^2) + Bx + Cy - 1 \quad (3.5)$$

die im Folgenden aufgezeigten Rechenschritte durchgeführt. Der Vorteil der linearen Form besteht darin, dass keine Kenntnis über die ungefähre Verschiebung und Größe des Kreises bekannt sein muss und trotzdem ein eindeutiges Ergebnis erreicht wird. Mit (3.6) bis (3.8) wird ein Gleichungssystem aufgestellt.

$$A = \frac{1}{r^2 - x_0^2 - y_0^2} \quad (3.6)$$

$$B = \frac{-2x_0}{r^2 - x_0^2 - y_0^2} \quad (3.7)$$

$$C = \frac{-2y_0}{r^2 - x_0^2 - y_0^2} \quad (3.8)$$

Mit der Jacobi-Matrix J können die Parameter A , B und C ermittelt werden, dabei gilt:

$$\begin{bmatrix} A \\ B \\ C \end{bmatrix} = (J^T J)^{-1} J^T K \quad (3.9)$$

Die Elemente der Jacobi Matrix sind nach BLATTER (1996) dabei jeweils die ersten partiellen Ableitungen der Funktion $f(A, B, C)$. Durch Einsetzen der oben genannten Startwerte in die Funktion (3.5) wird das Residuum K ermittelt durch:

$$K = 0 - f(A, B, C) \quad (3.10)$$

Als Resultat für das Residuum ergibt sich somit für jeden Rechenschritt $K = 1$. Mit diesen Größen zeigen sich der Kreismittelpunkt und der Ist-Krümmungsradius nach (3.11) bis (3.13)

$$x_0 = \frac{-B}{2A} \quad (3.11)$$

$$y_0 = \frac{-C}{2A} \quad (3.12)$$

$$r = \left(\frac{\sqrt{4A + B^2 + C^2}}{2A} \right) \quad (3.13)$$

Diese Methode über die lineare Annahme ergibt eine angenäherte Lösung für jede Gleichung, aber niemals eine exakte.

Um die Ergebnisse nun noch exakter bestimmen zu können, wird das Gauß-Newton-Verfahren auf einer nichtlinearen iterativen Methode weitergeführt. Diese benötigt allerdings zur Lösung Startwerte, die annähernd im Bereich der Endergebnisse liegen müssen. Damit können die Ergebnisse aus der zuvor durchgeführten linearen Berechnung als Startwerte verwendet werden. Eine Konvergenz ist somit weitestgehend sichergestellt.

Nun wird die Gleichung eines Kreises in ihrer Ursprungsform verwendet (vgl. BRONSTEIN et al. (2013)).

$$f(x_0, y_0, r) = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2} - r \quad (3.14)$$

In diesem Fall berechnet sich das Residuum K als Differenz aus:

$$K = 0 - f(x_0, y_0, r) \quad (3.15)$$

Mit Verwendung der Jacobi Matrix J und des Residuums K werden nun die Differenzwerte zu den in diesem Rechenschritt angenommenen Startwerten über

$$\begin{bmatrix} \Delta x_0 \\ \Delta y_0 \\ \Delta r \end{bmatrix} = (J^T J)^{-1} J^T K \quad (3.16)$$

ermittelt. Um sich einem möglichst exaktem Ergebnis anzunähern, muss die Berechnung nach (3.14) bis (3.16) mehrmals iterativ durchlaufen werden. Zur Durchführung werden die ermittelten Differenzwerte aus (3.16) auf die verwendeten Startwerte addiert und diese Summe wiederum für den nächsten Iterationsschritt als neue Startwerte verwendet.

Es hat sich gezeigt, dass schon nach zwei Schleifen die ermittelten Abweichungen des Ergebnisses zu den angenommenen Startwerten in einer Größenordnung kleiner 10^{-3} mm liegen. Damit liegt als Endergebnis nun der aus der Messung hervorgehende Ist-Krümmungsradius an dem zuvor definierten Punkt auf dem Ellipsenbogen vor.

3.3. Vergleich der Radien

Auf Grundlage der Berechnung zur Ermittlung der Ist-Krümmungsradien (vgl. Kap. 3.2) zu festgelegten Messpunkten auf dem Ellipsenbogen kann nun die Abweichung zu den zuvor berechneten Sollwerten ermittelt werden. Dazu werden mehrere Ist-Krümmungsradien zu einem Radius zusammengefasst. Die Anzahl der Soll- bzw. Istwerte bestimmt die Genauigkeit der Blechkontur. Bei Verwendung einer hohen Anzahl an Messpunkten auf der Kon-

tur sollte der Bereich auf der Kontur, der zur Berechnung der Krümmungsradien herangezogen wird im Verhältnis dazu korrelieren. Andernfalls entstehen zu große Überschneidungen bei der Auswertung von Messpunkten.

Im vorliegenden Versuch zur Auswertung eines Ellipsenbogens hat sich gezeigt, dass ein Messraster mit einem Abstand von 5 mm , beginnend $2,5 \text{ mm}$ vom Bogenanfang eine zufriedenstellende Anzahl an Krümmungsradien über den Blechverlauf ausgibt (Abbildung 9).

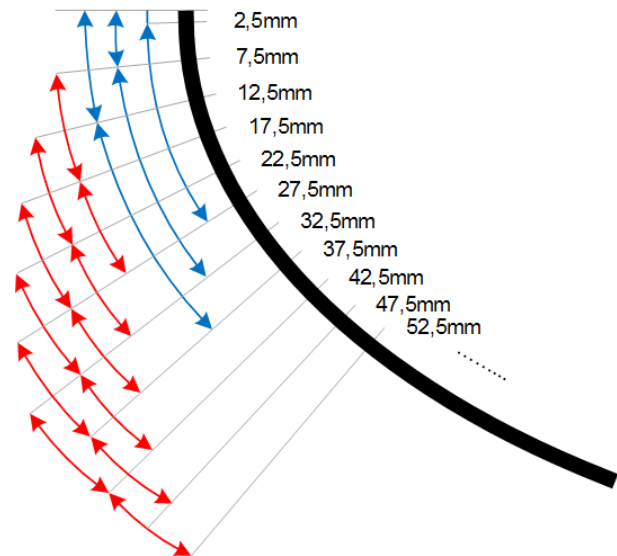


Abbildung 9: Messraster zur Auswertung eines Ellipsenbogens

Dabei wird je 10 mm vor und nach einem ausgewählten Messpunkt (Abbildung 9 rote Pfeile) der Wertebereich erfasst. So wird über einen Bereich von 20 mm sichergestellt, dass genügend Werte für eine genaue Krümmungsbestimmung verwendet werden und sich die ausgewählten Bereiche überschneiden.

Als Einschränkung muss allerdings der Bereich mit dem kleinsten Krümmungsradius am Bogenanfang genannt werden. Dort ist bei gleichem Messpunkt-abstand für die ersten drei Messungen ein Messbereich einzubeziehen (Abbildung 9 blaue Pfeile), sofern dieser auf der Kontur liegt. So wird bei der Radien-auswertung verhindert, dass durch die Berechnung Radien mit großer Ungenauigkeit ausgegeben werden. Diese Besonderheit am Blechanfang wird im Folgenden erläutert:

KLEIN (1978) bezeichnet diesen Anfangs- bzw. Endbereich des Blechs als „Endstück mit abweichender Krümmung“, da das Biegen eines Bleches bis zu seinem Ende eine unendlich große Biege-kraft erfordert und somit praktisch unmöglich ist. In Abbildung 10 ist zu erkennen, dass obwohl die Ober- (OW) und Unterwalze (UW) horizontal exakt

übereinanderstehen, sich durch die Belastung der Seitenwalze (SW) eine Verschiebung der OW und UW zu einander ergibt und sich daraus folgend ein Hebelarm zwischen OW und UW einstellt.

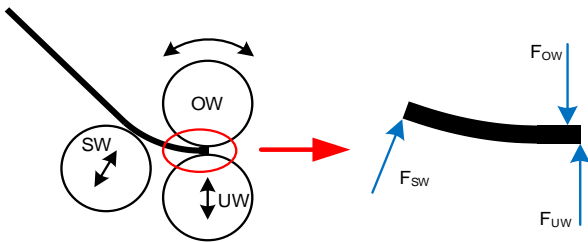


Abbildung 10: „Endstück mit abweichender Krümmung“ nach KLEIN (1978)

Diese Verschiebung ergibt sich aus den mechanischen Eigenschaften (Verformungen, Lagerspiele etc.) der Walzenbiegemaschine. Das hierdurch hervorgerufene „Endstück mit abweichender Krümmung“, bzw. die Länge des nicht umgeformten Endstücks wird als ein vielfaches der Blechdicke s angegeben und ist in Abhängigkeit der Größe ein Maß für die Anbiegeleistung. Je kleiner dieser Faktor ist, desto höher ist die benötigte Kraft zum Anbiegen und umso geringer ist das nicht geformte Endstück.

In Abbildung 11 ist der Konturverlauf aus dem Biegeversuch und der dazugehörige Sollverlauf der idealen geometrischen Ellipsenform zu erkennen. Es lässt sich entnehmen, dass im mittleren Bereich überbogen und der Blechbeginn zu gering umgeformt worden ist.

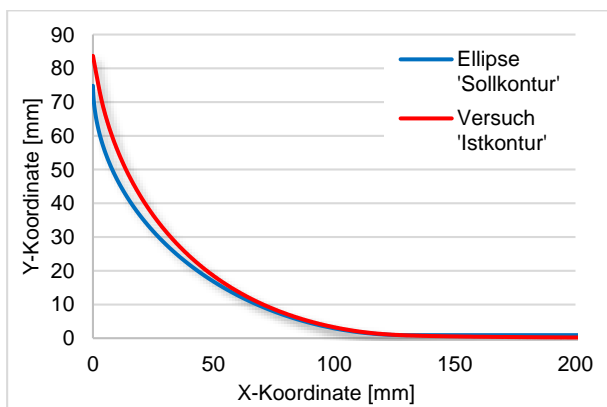


Abbildung 11: Vergleich Ellipsenkontur

Diese Erkenntnis wird deutlich sichtbar, wenn der ermittelte Krümmungsradius zu jedem Messpunkt auf der Kontur aufgetragen wird (Abbildung 12). Die maximale Differenz zwischen dem Soll- und Ist-Krümmungsradius im überbogenen Bereich liegt mit $38,7 \text{ mm}$ an dem Messpunkt $87,5 \text{ mm}$ auf der Blechkontur.

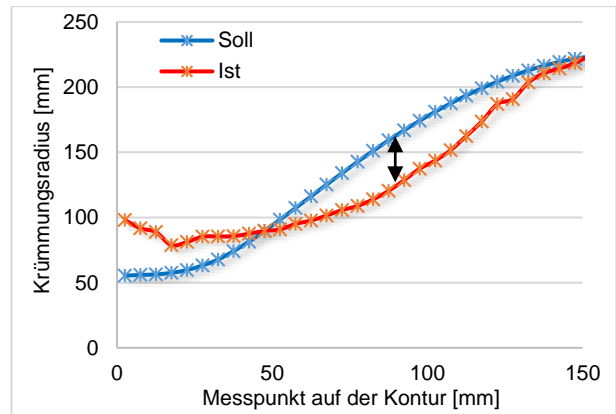


Abbildung 12: Verlauf des Krümmungsradius

Die hieraus ermittelten Abweichungen zwischen Soll- und Istverlauf der Krümmungsradien sind nun durch eine entsprechende Methodik mit Hilfe eines Algorithmus zu eliminieren, so dass mit nur einem weiteren Umformschritt in der Anlage die endgültige Kontur erreicht werden kann.

4. AUSBLICK

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen ist die Entwicklung einer Methodik notwendig, die auf Basis eines Algorithmus einen Regler verwendet, der unter Berücksichtigung

- der Radien-Hub-Beziehung,
- der Werkstoffdaten und des Werkstoffverhaltens, wie Verfestigung und Rückfederung,
- den bereits gefertigten Produkten,
- der Umformsimulation,
- sowie dem Anlagenverhalten

die Stellwerte für die Umformachsen berechnet und damit für die unmittelbar folgende Umformung weitere iterative Umformschritte erbringt. Eingriffe des Bedienpersonals in den eigentlichen Umformprozess werden damit vermieden. Durch die kontinuierliche Optimierung der Biegeschritte im Prozess in Form einer automatisierten Lernkurve aus vorangegangenen Umformungen werden die Fertigungszeit sowie die Qualität der Bauteile entscheidend verbessert.

LITERATURVERZEICHNIS

BLATTER, C. (1996):

Ingenieur Analysis 2. Zweite Auflage. Berlin: Springer. 978-3-642-61055-4.

BRONSTEIN, I. N.; SEMENDJAEW, K. A.; GROSCHE, G.; ZEIGLER, V. und D. ZIEGLER (2013):

Springer-Taschenbuch der Mathematik. 3., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Spektrum. 978-3-8348-2359-5.

BUHL, J. (2014):

Umformverhalten und Grenzen von Schichtverbundwerkstoffen. Dissertation. 1., Aufl. Aachen: Shaker. 978-3-8440-2822-5 (Forschungsberichte des Lehrstuhls für Umformtechnik, Bd. 4).

ENGEL, B.; HEFTRICH, C.; KUHNEN, C. und F. KAPP (2014):

Entwicklung eines Berechnungsansatzes zur Prozessregelung beim Drei-Walzen-Biegen von Blechen. 33. Verformungskundliches Kolloquium. Lehrstuhl für Umformtechnik. Montanuniversität Leoben. Leoben, 15.03.2014.

ENGEL, B.; KAPP, F. und C. HEFTRICH (2015):

Grundlagen zur Prozessoptimierung beim Walzenrunden von Blechen. Universität Siegen. Online verfügbar unter:

<http://www.maschinenmarkt.vogel.de/blechumformung/articles/489713/>, zuletzt geprüft am 15.02.2016.

GELEJI, A. (1961):

Bildsamer Formung der Metalle in Rechnung und Versuch. unveränd. Nachdr. d. 1. Aufl. Berlin.

GROSS, D.; HAUGER, W.; SCHRÖDER, J. und W. A. WALL (2014):

Technische Mechanik 2. Elastostatik. 12., aktualisierte Auflage. Berlin: Springer Vieweg. 978-3-642-40966-0.

KLEIN, W. (1978):

Die Technologie des Blechrundbiegens. Teil II. In: *Blech Rohre Profile*, 25 (12), S. 607–612.

LANGE, K. (1990):

Umformtechnik. Handbuch für Industrie und Wissenschaft. Band 3: Blechbearbeitung. 2., völlig neubearb. u. erw. Aufl. Berlin: Springer. 3-540-50039-1.

MANTHEY, D. (1999-2005):

General Least-Squares - Direct Solutions and Bundle Adjustments. Hg. v. manthey@orbitals.com. Online verfügbar unter:

<http://www.orbitals.com/self/least/least.htm>, zuletzt geprüft am 15.02.2016.