

Industrieverband Massivumformung e. V.
in Kooperation mit
Fachhochschule Südwestfalen / Labor für Massivumformung
Hirschvogel Eisenach GmbH
EJOT GmbH & Co. KG
Presswerk Krefeld GmbH & Co. KG
LASCO Umformtechnik GmbH

**Steigerung der Ressourceneffizienz in der Massivumformung durch
Absicherung und Erweiterung der Verfahrensgrenzen beim
Querkeilwalzen**

Abschlussbericht,
gefördert unter dem Az: 33234/01-24
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

| | |
|------------------------------|---------------------------|
| | von |
| Prof. Dr.-Ing. Michael Marré | Labor für Massivumformung |
| Dipl.-Ing. Harald Hermanns | Labor für Massivumformung |
| Dipl.-Ing. Sebastian Frank | LASCO Umformtechnik GmbH |

Hagen,
11. Oktober 2019

Der Abschlussbericht kann angefordert werden beim
Industrieverband Massivumformung, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen



Industrieverband Massivumformung e. V.
in Kooperation mit
Fachhochschule Südwestfalen / Labor für Massivumformung
Hirschvogel Eisenach GmbH
EJOT GmbH & Co. KG
Presswerk Krefeld GmbH & Co. KG
LASCO Umformtechnik GmbH

Steigerung der Ressourceneffizienz in der Massivumformung durch Absicherung und Erweiterung der Verfahrensgrenzen beim Querkeilwalzen

Abschlussbericht,
gefördert unter dem Az: 33234/01-24
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

| | |
|------------------------------|---------------------------|
| | von |
| Prof. Dr.-Ing. Michael Marré | Labor für Massivumformung |
| Dipl.-Ing. Harald Hermanns | Labor für Massivumformung |
| Dipl.-Ing. Sebastian Frank | LASCO Umformtechnik GmbH |

Hagen,
11. Oktober 2019

**Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



| | | | | | |
|------------------------------|---|-------------------|-----------------|--|------------------|
| Az | 33234/01-24 | Referat | 24/0 | Fördersumme | 250.376 € |
| Antragstitel | Entwicklung und Untersuchung einer Methodik zur Ermittlung von material- und chargenspezifischen Prozesskennfeldern für das Querkeilwalzen zwecks Steigerung der Ressourceneffizienz | | | | |
| Stichworte | Energie, Energieeffizienz | | | | |
| Laufzeit | Projektbeginn | Projektende | Projektphase(n) | | |
| 31 Monate | 01.12.2016 | 30.06.2019 | | | |
| Zwischenberichte | | | | | |
| Bewilligungsempfänger | Industrieverband Massivumformung e.V. Goldene Pforte 1 58093 Hagen | | | Tel | 02331 / 9588-32 |
| | | | | Fax | 02331 / 51046 |
| | | | | Projektleitung Herr Kucharzewski | |
| | | | | Bearbeiter Frau Mertens/Frau Kühnel | |
| Kooperationspartner | Fachhochschule Südwestfalen / Labor für Massivumformung, 58644 Iserlohn Hirschvogel Eisenach GmbH EJOT GmbH & Co. KG Presswerk Krefeld GmbH & Co. KG LASCO Umformtechnik GmbH | | | | |

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Das Querkeilwalzen ist ein besonders geeignetes Massivumformverfahren zur Herstellung material-effizienter Vorformen. Allerdings können neben Oberflächenfehlern vor allem innere Defekte in Form von Rissen und Hohlräumen auftreten, die unter dem Begriff Mannesmann-Effekt bekannt sind und deshalb besonders kritisch sind, weil sie bei der Massenproduktion nicht erkannt werden.

Ziel des Vorhabens ist die Steigerung der Ressourceneffizienz in der Massivumformung durch Entwicklung eines sicheren Auslegungskriteriums für Querkeilwalzwerkzeuge auf Basis von Prozesskennfeldern, mit dem eine Materialschädigung infolge des Mannesmann-Effektes vermieden wird. Hiermit soll ein signifikanter Beitrag zur Umweltentlastung geleistet werden, indem die Ressourcenpotentiale des Querkeilwalzens bis an die Grenzen ausgenutzt werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Ein erfolgversprechender und praxisorientierter Weg ist, dass die fehlerfreie Auslegung von QKW-Werkzeugen auf der Grundlage von Prozesskennfeldern erfolgt, die unter Nutzung der Methoden der Ähnlichkeitsmechanik mit deutlich reduziertem Versuchsaufwand auf halbempirischem Weg ermittelt werden. Dieser Weg wurde und wird bei vielen Problemen in Physik und Technik, bei denen aufgrund der Komplexität der betrachteten Vorgänge keine abgesicherte und mathematisch formulierbare Theorie vorliegt, erfolgreich angewendet. Die wesentlichen physikalischen Einflussparameter können hierbei durch dimensionslose Ähnlichkeitsvariablen direkt identifiziert werden.

Die geplanten Arbeiten im Einzelnen:

- AP 1/2 Ableiten der problembeschreibenden „Ähnlichkeitsvariablen“ und der relevanten Wertebereiche
- AP 3 Entwicklung, Herstellung, Aufbau und Validierung eines Standardversuchs und -werkzeugs
- AP 4 Auswahl und Test eines Prüfverfahrens zur Fehlerdetektierung
- AP 5/6 Abgrenzung des Versuchsumfangs und Erarbeitung eines DoE-Standardversuchsfeldes
- AP 7 Versuchsdurchführung für unterschiedliche Stahl Werkstoff
- AP 8 Design der Kennfelder für die verschiedenen Werkstoffe
- AP 9 Anwendung und Validierung der Kennfelder für 2 Praxisfälle
- AP 10 Stichversuch an einem Aluminium-Werkstoff
- AP 11 Erstellen eines Anwenderleitfadens
- AP 12 Konzeption für die Umrüstung bestehender Querkeilwalzen zur Befähigung einer variablen Zustellung unter Last

Ergebnisse und Diskussion

Zu AP1 bis AP6: Die für die Rissentstehung bedeutsamen Einflussgrößen wurden zusammengestellt und in Form eines Ishikawa-Diagramms dokumentiert. Aus den dominanten, schädigungswirksamen Einflussparametern wurde eine Schädigungsfunktion aufgestellt und unter Berücksichtigung der Ähnlichkeitsmechanik die dimensionslose Variable n abgeleitet. Somit können die wesentlichen physikalischen Einflussparameter durch eine dimensionslose Ähnlichkeitsvariable direkt identifiziert werden.

Es wurde ein Prüfstand konzipiert, konstruiert und in Betrieb genommen. Dieser neue „Standard-Prüfstand“ wird als Flachbackenvariante aufgebaut und in eine bei der Forschungsstelle vorhandene hydraulische Presse integriert. Eine diskutierte „Walzen-Variante“ ist aus wirtschaftlichen Gründen im Rahmen des Projektes nicht realisierbar und aus technologischer Sicht für den Erkenntnisgewinn obsolet. Der Prüfstand erfüllte alle gestellten Anforderungen. Im Rahmen des Projektes wurden mehr als 700 Versuchsteile problemlos gefertigt.

Für die Detektierung der Innenfehler wurde ein geeignetes Prüfverfahren ermittelt und angewendet.

Zur Abgrenzung des Versuchsumfanges erfolgte auf Grundlage eigener Erfahrung und Literatúraussagen die Auswahl der Einfluss- und Einstellgrößen.

Zu AP7 bis AP11: Für drei Stahlwerkstoffe werden die notwendigen Versuche zur Erstellung der jeweiligen Arbeitskennfelder durchgeführt. Die Basis der Arbeitskennfelder bildet die dimensionslose Variable n , die ein Maß für die Anzahl der Überrollungen und Belastung eines reduzierten Bauteilbereichs darstellt und dadurch eine Abschätzung der Gefahr und Größenordnung von Innenrissen ermöglicht. Die Variable n ist eine Funktion von bauteil- und werkzeugspezifischen Einflussgrößen. Bei der Validierung und industriellen Erprobung der erstellten Kennfelder wurde deutlich, dass ein weiterer wesentlicher Faktor bei der Kennfelderstellung beachtet werden muss. Die Bildung von Innenrissen ist neben den berücksichtigten Einflussgrößen zusätzlich noch von dem Bereich der Werkzeuggeometrie abhängig, mit der die Durchmesserreduzierung erfolgt.

Die Kennfelder sind daher sehr gut zur Vergleichbarkeit verschiedener Werkstoffe und/oder Chargen geeignet, jedoch nicht zur quantitativen Vorhersage von Materialschädigungen.

Zu AP12: Es wurden technische Lösungen für die Umrüstung bestehender Querkeilwalzen erarbeitet, welche aber einen sehr hohen Kostenaufwand verursachen und damit aus wirtschaftlicher Sicht nicht sinnvoll umsetzbar sind. Auf Basis einer Variantenanalyse wird eine reine Versuchseinrichtung in Form eines Flachbacken-Walzmoduls als sinnvollste Lösung erachtet.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt □ An der Bornau 2 □ 49090 Osnabrück □ Tel 0541/9633-0 □ Fax 0541/9633-190 □ <http://www.dbu.de>

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Zu Projektanfang erfolgte die Verbreitung der Projektziele in nachfolgender Weise: Fachzeitschrift „Stahl und Eisen“, Ausgabe 5/2017, „Impuls, Hochschulzeitung der FH Südwestfalen“, Ausgabe 5/2017 und „Iserlohner Kreisanzeiger (IKZ)“, Ausgabe 27.04.2017.

In 2019 erfolgte die Präsentation der Ergebnisse in der IMU-Faktendatenbank.

In 2020 ist die Verbreitung der Vorhabensergebnisse in nachfolgender Weise vorgesehen: VDI-Fachtagung Feb.2020, Düsseldorf, Fachaufsatz in der Zeitschrift massivUMFORMUNG.

Fazit

Mit der erarbeiteten Vorgehensweise können auf Basis einer dimensionslosen Variablen Arbeitskennfelder für die Auslegung von QKW-Werkzeugen/-prozessen für die Vorformfertigung erstellt werden. Die Vorgehensweise wurde erfolgreich an 3 Stahlwerkstoffen und einer Aluminiumlegierung durchgeführt.

Bei der Validierung und industriellen Erprobung der erstellten Kennfelder wurde jedoch deutlich, dass ein weiterer wesentlicher Faktor bei der Kennfelderstellung beachtet werden muss.

Die Kennfelder sind in der erzielten Form daher sehr gut zur Vergleichbarkeit verschiedener Werkstoffe und/oder Chargen geeignet, aber nicht zur quantitativen Vorhersage von Materialschädigungen.

Um dem Anspruch der vollständigen Ausnutzung der Verfahrensgrenzen gerecht zu werden, wird als weitere Vorgehensweise die Untersuchung des neu identifizierten und somit in Bearbeitung bisher fehlenden Einflussfaktors, und dessen Berücksichtigung in den Auslegungskriterien, im Rahmen eines weiteren Vorhabens vorgeschlagen.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt □ An der Bornau 2 □ 49090 Osnabrück □ Tel 0541/9633-0 □ Fax 0541/9633-190 □ <http://www.dbu.de>

Inhaltsverzeichnis

Inhalt

| | | |
|-------|---|----|
| 0 | Zusammenfassung..... | 1 |
| 1 | Einleitung..... | 2 |
| 2 | Vorhabensdurchführung | 6 |
| 2.1 | Ableiten der problembeschreibenden „Ähnlichkeitsvariablen“ | 6 |
| 2.2 | Ermittlung des praktisch relevanten Wertebereichs der „Ähnlichkeitsvariablen“ .. | 6 |
| 2.3 | Entwicklung, Herstellung, Aufbau und Validierung eines Standardversuchs und – werkzeugs | 6 |
| 2.4 | Auswahl und Test eines Prüfverfahrens zur Fehlerdetektierung | 7 |
| 2.5 | Abgrenzung des Versuchsumfangs | 7 |
| 2.6 | Erarbeitung eines DoE-Standardversuchsfeldes..... | 7 |
| 2.7 | Versuchsdurchführung für insgesamt 3 unterschiedliche Stahl Werkstoffe | 8 |
| 2.8 | Design der Kennfelder für die verschiedenen Werkstoffe | 8 |
| 2.9 | Anwendung und Validierung der Kennfelder | 8 |
| 2.10 | Stichversuch an einem Aluminium-Werkstoff | 8 |
| 2.11 | Erstellen eines Anwenderleitfadens | 8 |
| 2.12 | Konzeption für die Umrüstung bestehender Querkeilwalzen zur Befähigung einer variablen Zustellung unter Last | 9 |
| 3 | Vorhabensergebnisse | 10 |
| 3.1 | Ableiten der problembeschreibenden „Ähnlichkeitsvariablen“ | 10 |
| 3.2 | Ermittlung des praktisch relevanten Wertebereichs der „Ähnlichkeitsvariablen“ .. | 12 |
| 3.3 | Entwicklung, Herstellung, Aufbau und Validierung eines Standardversuchs und – werkzeugs | 14 |
| 3.4 | Auswahl und Test eines Prüfverfahrens zur Fehlerdetektierung | 18 |
| 3.5 | Abgrenzung des Versuchsumfangs | 20 |
| 3.6 | Erarbeitung eines DoE-Standardversuchsfeldes..... | 20 |
| 3.7 | Versuchsdurchführung für insgesamt 3 unterschiedliche Stahl Werkstoffe | 22 |
| 3.8 | Design der Kennfelder für die verschiedenen Werkstoffe | 25 |
| 3.9 | Anwendung und Validierung der Kennfelder | 28 |
| 3.9.1 | Realwerkzeuge..... | 29 |
| 3.9.2 | Industriewerkzeug | 32 |
| 3.10 | Stichversuch an einem Aluminium-Werkstoff | 35 |
| 3.11 | Erstellen eines Anwenderleitfadens | 37 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.12 | Konzeption für die Umrüstung bestehender Querkeilwalzen zur Befähigung einer variablen Zustellung unter Last | 41 |
| 4 | Verbreitung der Vorhabensergebnisse | 52 |
| 5 | Fazit..... | 53 |
| 6 | Literaturverzeichnis | 54 |

Verzeichnis der Bilder

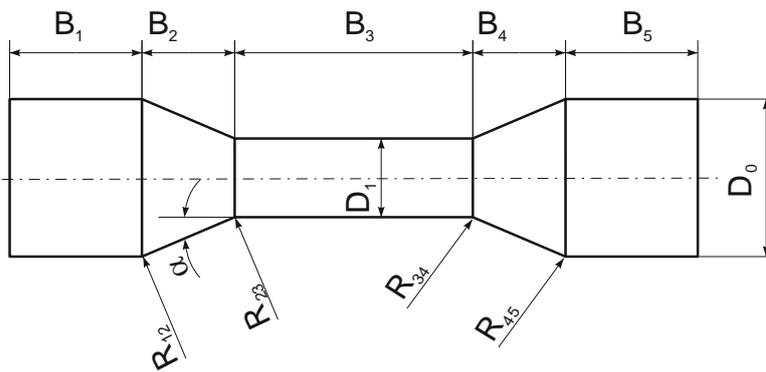
| | |
|--|----|
| Bild 1: Erwärmungsaufwand für deutsche Schmiedetonnage | 2 |
| Bild 2: CO ₂ Emission deutscher Schmiedetonnage durch Materialherstellung und - erwärmung | 2 |
| Bild 3: Primärenergiebedarf für die Herstellung von 1 kg Schmiedeteil..... | 2 |
| Bild 4: Einsparpotential von Primärenergie und CO ₂ Emission bei der Herstellung von Pkw- Pleuel | 4 |
| Bild 5: Einsparpotential von Primärenergie und CO ₂ Emission bei der Herstellung von Kurbelwellen..... | 4 |
| Bild 6: Gesamtes Einsparpotential der deutschen Schmiedeindustrie | 5 |
| Bild 7: Prinzipdarstellung des Standardversuchs und -werkzeugs..... | 7 |
| Bild 8: Bissverhältnis s_B/h (Definition und Beispiele) | 10 |
| Bild 9: Typ A und B der Keilgeometrie..... | 11 |
| Bild 10: Ishikawa-Diagramm..... | 12 |
| Bild 11: Einflussgrößen und Auswirkung | 13 |
| Bild 12: Einflussgrößen auf die Dimensionierung der QKW-Vorrichtung | 14 |
| Bild 13: Abhängigkeit der Gesamtlänge des Werkzeugs L_{Gesamt} von Durchmesser D_0 , Reduktionslänge λ , Schulterwinkel α , Keilwinkel β und Länge der Kalibrierzone $L_{\text{Kalibrier}}$ (Beispiel)..... | 14 |
| Bild 14: Abhängigkeit der Vertikalgeschwindigkeit v_{Vertikal} von Schulterwinkel α , Keilwinkel β und Horizontalgeschwindigkeit $v_{\text{Horizontal}}$ | 15 |
| Bild 15: Mögliche Varianten des Prüfstands | 15 |
| Bild 16: Führungsgestell mit horizontalem Antrieb | 16 |
| Bild 17: Hydraulikpresse mit montiertem Führungsgestell | 17 |
| Bild 18: Parametereinstellung der Vertikal- und Horizontalachsen | 17 |
| Bild 19: Werkzeuggeometrie | 18 |
| Bild 20: Praxisbeispiele von Größe und Ausprägung der Innenfehler | 18 |
| Bild 21: Gegenüberstellung der Prüfergebnisse (gleicher Prüfkörper)..... | 19 |
| Bild 22: Bildverarbeitungsmessgerät..... | 20 |
| Bild 23: Auswahl der Einflussgrößen | 20 |
| Bild 24: DoE-Versuchsplan | 21 |
| Bild 25: Antwortgrößen | 22 |
| Bild 26: Ergebnisse Versuchsfeld 1, Werkstoff 46MnVS5, Durchmesserreduktion $\varepsilon_D = 55\%$.23 | |
| Bild 27: Ergebnisse Versuchsfeld 1, Werkstoff 46MnVS5, Durchmesserreduktion $\varepsilon_D = 55\%$.24 | |
| Bild 28: Ergebnisse (Beispiel) Versuchsfeld 1, Werkstoff 46MnVS5, Antwortgröße: Breite 1, links..... | 24 |
| Bild 29: Aufbau Kennfeld..... | 26 |
| Bild 30: Definition Keilgeometrie Typ A und Kennfeld für den Werkstoff 46MnVS5 | 26 |
| Bild 31: Definition Keilgeometrie Typ B und Kennfeld für den Werkstoff 46MnVS5 | 27 |
| Bild 32: Kennfelder der drei Stahlwerkstoffe für die Keilgeometrie Typ A..... | 28 |
| Bild 33: Übersicht der Validierungsversuche | 29 |
| Bild 34: Ergebnis der 5-fach Belegung mit dem Realwerkzeug..... | 30 |
| Bild 35: Kennfeld (Linien) des Werkstoffs 46MnVS5 mit den Ergebnissen der Realwerkzeuge (Punkte) für die Bauteil-Querschnittsbereiche A und M. | 30 |
| Bild 36: Definitionen der Werkzeuggeometrien und deren Einfluss auf die Innenrissbildung | 31 |
| Bild 37: Einfluss der Werkzeugbereiche auf die Bildung von Innenrissen (Werkstoff 46MnVS5, Werkzeuggeschwindigkeit $v_{Wz} = 200\text{mm/s}$) | 31 |

| | |
|---|----|
| Bild 38: Industrierwerkzeug (abgewickelt) mit den Positionen der Walzstückentnahme | 32 |
| Bild 39: QKW-Maschine, Smeral ULS 70..... | 33 |
| Bild 40: Walzprodukte, Entnahme bei verschiedenen Werkzeugpositionen | 33 |
| Bild 41: Bezeichnungen am Walzstück und Angabe der jeweiligen Durchmesserreduktion ε_D und der Variablen Kenngröße n | 33 |
| Bild 42: Kennfeld (Linie) des Werkstoffs 46MnVS5 mit den Ergebnissen der Industrieanwendung (Punkte)..... | 34 |
| Bild 43: Längsschnitt durch ein Walzstück, keine Innenfehler ersichtlich | 34 |
| Bild 44: Einfluss der erhöhten Durchmesserreduzierung auf die Variable n | 35 |
| Bild 45: Einsparpotential von Primärenergie und CO2 Emission bei der Herstellung von Pkw-Pleuel | 35 |
| Bild 46: Walzergebnisse der ersten Vorversuche..... | 36 |
| Bild 47: Aluminium-Walzprodukt mit guter geometrischer Qualität..... | 36 |
| Bild 48: Versuchseinstellungen Aluminium-Walzen | 36 |
| Bild 49: Trennflächen der Aluminium Walzproben..... | 37 |
| Bild 50: Prinzipielle Vorgehensweise zur Erstellung von Arbeitskennfeldern | 37 |
| Bild 51: Programmoberfläche zur Ermittlung der Variablen n , des Prüfplans und der Parametereinstellungen der Prüfvorrichtung | 38 |
| Bild 52: Prinzip der QKW-Versuchseinrichtung und der Werkzeuggeometrie | 38 |
| Bild 53: Bestimmung der Fehlergrößen | 39 |
| Bild 54: Arbeitskennfeld | 39 |
| Bild 55: Beispiel Bauteilgeometrie | 40 |
| Bild 56: Beispiel Versuchsplan..... | 40 |
| Bild 57: Beispiel Auswertung und Arbeitskennfeld | 41 |
| Bild 58: Ausgangsparameter | 42 |
| Bild 59: Leistungsdaten Lasco QKW 700 | 42 |
| Bild 60: Aufbau Walzspaltverstellung Lasco QKW 700 | 43 |
| Bild 61: Aufbau Walzspaltverstellung Lasco QKW 700 - Detail..... | 44 |
| Bild 62: Walzspaltverstellung Lasco QKW 700 - Systemparameter | 44 |
| Bild 63: Lösungsansatz 1 – hydraulischer Umbau - Komponenten..... | 45 |
| Bild 64: Lösungsansatz 1 – hydraulischer Umbau - Merkmale | 45 |
| Bild 65: Lasco QKW 700 mit Formwerkzeugen | 46 |
| Bild 66: Lasco RCW 630So | 47 |
| Bild 67: Lasco Versuchswalze | 47 |
| Bild 68: Umbau QKW 700 auf Servoverstellung..... | 48 |
| Bild 69: Flachbackenwalze..... | 49 |
| Bild 70: Vergleichsmatrix..... | 49 |
| Bild 71: Beste Ausprägung - Rundwalzen..... | 50 |
| Bild 72: Beste Ausprägung – Flachbacken-Walzmodul | 51 |

Begriffe, Abkürzungen und Definitionen

| Formelzeichen | Bedeutung | Einheiten | Bemerkungen |
|----------------------------|---|-----------|-------------|
| α | Schulterwinkel | ° | Werkzeug |
| β | Keilwinkel | ° | Werkzeug |
| ε_D | Durchmesserreduktion | | Bauteil |
| λ | Reduktionslänge | | Bauteil |
| σ | Spannung | N/mm | |
| B_n | Breitenmaße am Bauteil | mm | Bauteil |
| D_0 | Ausgangsdurchmesser | mm | Bauteil |
| D_n | Reduzierter Durchmesser | mm | Bauteil |
| F_0 | Fourier-Kennzahl | | |
| H | Keilhöhe | mm | Werkzeug |
| I | Überrollungen | | |
| L_{Zufuhr} | Länge Zufuhrzone für den Knüppel | mm | Werkzeug |
| L_{Einstech} | Länge Einstechzone (Einstechpunkt bis Erreichen der Keilhöhe) | mm | Werkzeug |
| L_{Streck} | Länge Streckzone | mm | Werkzeug |
| L_{Streck_x1} | Länge Streckzone für den Bauteilbereich mit dem Abstand x_1 | mm | Werkzeug |
| $L_{\text{Kalibrier}}$ | Länge Kalibrierzone | mm | Werkzeug |
| L_{Entnahme} | Länge Entnahmezone für das gewalzte Werkstück | mm | Werkzeug |
| L_{Gesamt} | Gesamtlänge | mm | Werkzeug |
| $L_{\text{Umformung}}$ | Länge der Umformung | mm | Werkzeug |
| N | Variable | | |
| $n_{L_{\text{Streck}_x1}}$ | Variable für den Bauteilbereich mit dem Abstand x_1 | | |
| R_{nn} | Radien am Bauteil | mm | Bauteil |
| R_{Wz-nn} | Radien am Werkzeug | mm | Werkzeug |
| $s_h(t)$ | Weg (Geschwindigkeit) horizontal | mm (mm/s) | |
| $s_v(t)$ | Weg (Geschwindigkeit) vertikal | mm (mm/s) | |
| S_{Streck} | Umformweg in der Streckzone | mm | |
| $S_{\text{Kalibrier}}$ | Umformweg in der Kalibrierzone | mm | |
| S_{ges} | Umformweg gesamt | mm | |
| ΔS | Schädigungsfortschritt | | |
| T | Temperatur | °C | |
| $v_{\text{Horizontal}}$ | Horizontalgeschwindigkeit | mm/s | |
| v_{Vertikal} | Vertikalgeschwindigkeit | mm/s | |
| v_{Wz} | Werkzeug-Geschwindigkeit | mm/s | |
| x_1 | Lage des betrachteten Querschnitts | mm | Bauteil |

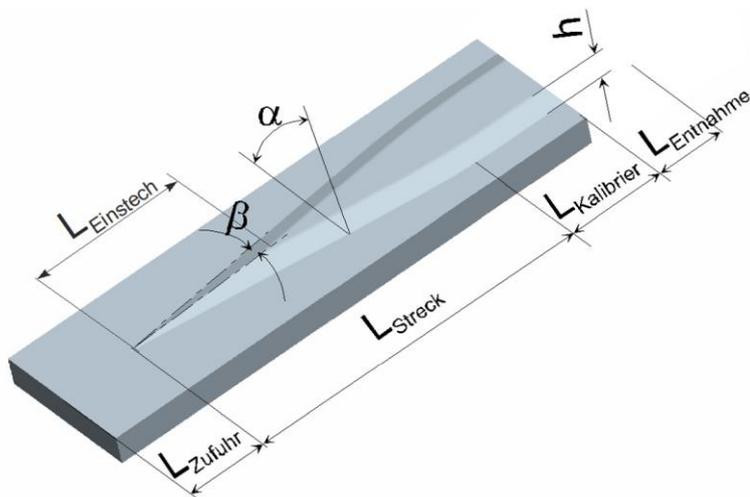
Definitionen am Bauteil



Geometrieparameter

- D_n : Reduzierter Durchmesser
- D_0 : Ausgangsdurchmesser
- B_n : Breitenmaße
- R_{nn} : Radien
- α : Schulterwinkel
- ε_D : Durchmesserreduktion, $\varepsilon_D = (D_0 - D_1)/D_0$
- λ : Reduktionslänge, $\lambda = B_3/D_1$

Definitionen am Werkzeug

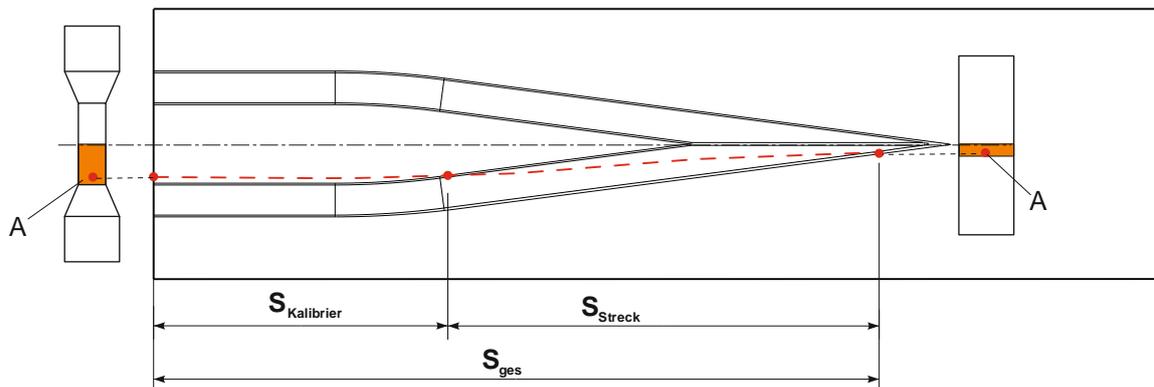


Geometrieparameter

- h : Keilhöhe
- L_{Zufuhr} : Zufuhrzone für den Knüppel
- $L_{Einstech}$: Einstechzone (Einstechpunkt bis Erreichen der Keilhöhe)
- L_{Streck} : Streckzone
- $L_{Kalibrier}$: Kalibrierzone
- $L_{Entnahme}$: Entnahmezone für das gewalzte Werkstück
- L_{Gesamt} : $L_{Gesamt} = L_{Streck} + L_{Kalibrier}$
- R_{Wz-nn} : Radien
- α : Schulterwinkel
- β : Keilwinkel

Definitionen der Umformwege

S : Weg den ein Werkstückelement aus dem reduzierten Bauteilbereich bei der Umformung zurücklegt



Umformweg

- S_{Streck} : Umformweg in der Streckzone
- $S_{\text{Kalibrier}}$: Umformweg in der Kalibrierzone
- S_{ges} : Umformweg gesamt

0 Zusammenfassung

Durch das Vorhaben soll ein sicheres Auslegungskriteriums für Querkeilwalzwerkzeuge auf Basis von Prozesskennfeldern, mit denen eine Materialschädigung infolge des Mannesmann-Effektes vermieden wird, erstellt werden. Hiermit soll ein signifikanter Beitrag zur Umweltentlastung geleistet werden, indem die Ressourcenpotentiale des Querkeilwalzens bis an die Grenzen ausgenutzt werden.

Aus den dominanten, schädigungswirksamen Einflussparametern wurde eine Schädigungsfunktion aufgestellt und die dimensionslose Variable n abgeleitet. Somit können die wesentlichen physikalischen Einflussparameter der Bauteil- und Werkzeuggeometrie durch eine dimensionslose Ähnlichkeitsvariable direkt identifiziert werden.

Der für das Vorhaben notwendige „Standard-Prüfstand“ wurde aufgebaut und erfüllte alle gestellten Anforderungen. Im Rahmen des Projektes wurden mehr als 700 Versuchsteile problemlos gefertigt.

Für die Detektierung der Innenfehler wurde ein geeignetes Prüfverfahren ermittelt und angewendet.

Mit der erarbeiteten Vorgehensweise, dem erprobten Versuchsstand und Versuchswerkzeugen wurden auf Basis der dimensionslosen Variable n Arbeitskennfelder für die Auslegung von QKW-Werkzeugen erstellt. Die Vorgehensweise wurde erfolgreich an 3 Stahlwerkstoffen und einer Aluminiumlegierung erprobt.

Bei der Validierung und industriellen Erprobung der erstellten Kennfelder wurde jedoch deutlich, dass ein weiterer wesentlicher Werkzeug-Faktor bei der Kennfelderstellung beachtet werden muss. Die Bildung von Innenrissen ist neben den berücksichtigten Einflussgrößen zusätzlich noch von dem Bereich der Werkzeuggeometrie abhängig, mit der die Durchmesser-Reduzierung erfolgt.

Die Kennfelder sind in der erzielten Form daher sehr gut zur Vergleichbarkeit verschiedener Werkstoffe und/oder Chargen geeignet, aber nicht zur quantitativen Vorhersage von Materialschädigungen.

Um dem Anspruch der vollständigen Ausnutzung der Verfahrensgrenzen gerecht zu werden, wird als weitere Vorgehensweise die Untersuchung des neu identifizierten und somit in Bearbeitung bisher fehlenden Einflussfaktors, und dessen Berücksichtigung in den Auslegungskriterien, im Rahmen eines weiteren Vorhabens vorgeschlagen.

Kooperationspartner

- Fachhochschule Südwestfalen / Labor für Massivumformung
- Hirschvogel Eisenach GmbH
- EJOT GmbH & Co. KG
- Presswerk Krefeld GmbH & Co. KG
- LASCO Umformtechnik GmbH

Das Vorhaben wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert (Az: 33234/01-24), wofür an dieser Stelle im Namen aller Beteiligten gedankt sei.

1 Einleitung

Die Branche Massivumformung mit ihren ca. 250 meist mittelständischen Unternehmen (schwerpunktmäßig massivumgeformte Stückgüter für die Automotive-Industrie) verarbeitet jährlich die in **Bild 1** dargestellten Stahlmengen und benötigt für die Prozesswärme die angegebenen Energiemengen.

| Deutschland ¹⁾ | |
|---------------------------------|----------------|
| Schmiedetonnage ²⁾ | 2.380.000 to/a |
| Erwärmungsenergie ³⁾ | 1.270 GWh/a |
| Erwärmungskosten ⁴⁾ | 127 Mio €/a |

¹⁾ IMU Produktionsstatistik 2014
²⁾ Gesenkschmiedeteile, Freiformschmiedestücke, gewalzte Ringe, Flansche und Rohrleitungsformstücke aus Stahl
³⁾ bei 400 kWh /to ; Gratanteil 25%
⁴⁾ bei 10 Cent/kWh

Bild 1: Erwärmungsaufwand für deutsche Schmiedetonnage

Diese riesigen Energiemengen werden nur in sehr geringem Umfang einer weiteren Nutzung zugeführt, sie werden schlichtweg in die Umgebung abgeführt.

Die bei der Materialherstellung und die bei der zur Warmumformung notwendige Materialerwärmung freigesetzte CO₂ Menge ist in **Bild 2** dargestellt:

| CO ₂ Emission bei..... | |
|-----------------------------------|------------------------------------|
| Materialherstellung ¹⁾ | 4.877.413 to CO ₂ /Jahr |
| Materialerwärmung ²⁾ | 708.660 to CO ₂ /Jahr |

¹⁾ CO₂ Emission Stahlherstellung 1537 kg/to_{Stahl}; Gratanteil 25%
²⁾ Es wird unterstellt, dass die benötigte Erwärmungsenergie zu 100% durch Strom bereitgestellt wird. CO₂ Emission = 558 g/kWh, deutscher Strommix 2011, Quelle: Umweltbundesamt

Bild 2: CO₂ Emission deutscher Schmiedetonnage durch Materialherstellung und -erwärmung

Der größte Anteil der verbrauchten Primärenergie bei der Herstellung von Massivumformteilen erfordert die Herstellung des Rohmaterials (**Bild 3**).

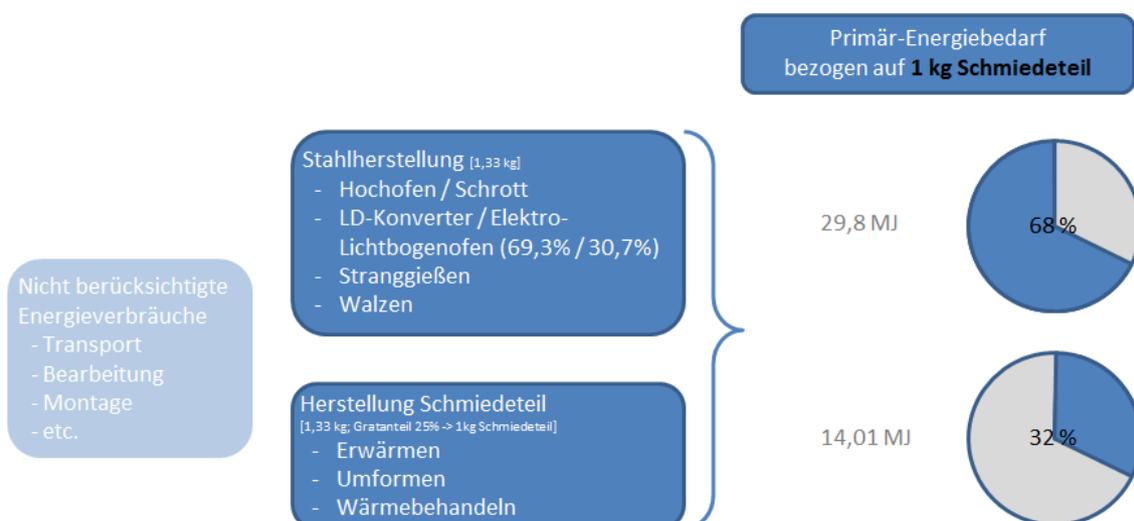


Bild 3: Primärenergiebedarf für die Herstellung von 1 kg Schmiedeteil

Aus energetischer-, umweltpolitischer und wirtschaftlicher Sicht ist die geschilderte Situation unakzeptabel.

Veränderungen in der Energiepolitik und steigende Energiekosten machen es erforderlich, für jeden Bereich, der Energieressourcen verbraucht, nach Energieeffizienzpotentialen zu suchen. Deshalb hat der benötigte Materialeinsatz signifikante Bedeutung für die Gesamtenergie- und CO₂-Bilanz. Derzeit liegt der durchschnittliche Materialverlust in der Branche Massivumformung bei ca. 25% /IMU2011/.

Aus eigenen Vorarbeiten der Forschungsstelle ist bekannt, dass das hohe Materialeinsparungs- und damit Ressourcenpotential bei Massivumformverfahren gehoben werden kann, wenn Produktgeometrie, Umformverfahren und Werkzeugtechnologie so kombiniert werden, dass in der ersten Vorformstufe eine produktspezifische Massenverteilung bei hohem Materialwirkungsgrad erreicht wird /IMU2008/; hierfür stehen unterschiedliche Umformverfahren zur Verfügung. Das Querkeilwalzen ist ein besonders geeignetes Massivumformverfahren zur Herstellung materialeffizienter Vorformen. Das Verfahren kann bei der Kalt-, Halbwarm- und Warmumformung sowie bei Eisen- und Nichteisenmetallen zur Anwendung kommen. Neben Oberflächenfehlern - die erkennbar sind - können vor allem innere Defekte in Form von Rissen und Hohlräumen auftreten, die unter dem Begriff Mannesmann-Effekt bekannt sind und deshalb besonders kritisch sind, weil sie bei der Massenproduktion nicht erkannt werden. Sieht man von Einschlüssen und anderen Herstellungsfehlern bei der Vormaterialproduktion ab, sind die wesentlichen Ursachen für die Entstehung dieser Hohlräume beim Querkeilwalzen

1. alternierende Normal- und Schubspannungen im mittleren Werkstückbereich, die zyklisch wechselnde plastische Deformationen bewirken (s.g. Friemeln),
2. überlagerter hydrostatischer Zugspannungszustand und
3. überlagerte Torsionsschubspannungen zwischen Querschnitten mit unterschiedlichen Außendurchmessern.

Zur Absicherung der Auslegung von Walzwerkzeugen wird in vielen Umformbetrieben die Finite Elemente Simulation eingesetzt. Damit allein ist es jedoch nicht möglich, eine sichere Materialschädigung infolge des Mannesmann-Effektes beim Querkeilwalzen vorherzusagen. Trotz intensiver FuE konnte bisher kein verlässliches und allgemein gültiges Versagenskriterium entwickelt werden.

Es existieren zwar wissenschaftliche Publikationen, bei denen der Mannesmann-Effekt unter Zuhilfenahme eines Schädigungsmodells simuliert wurde. Dabei wurden durchweg die freien Parameter des Schädigungsmodells durch experimentelle Versuche solange variiert, bis Versuch und Experiment eine bestmögliche Übereinstimmung brachten. Eine Übertragung eines so kalibrierten Schädigungsmodells auf andere Umformzustände ist im Allgemeinen mit einer notwendigen Aussagesicherheit noch nicht möglich. Dies zeigen auch Aussagen aus Industrieunternehmen, bei denen auch wissenschaftlichen Publikationen zur Simulation des Mannesmann-Effektes bekannt sind. Bisher haben keine Anpassungen der Simulationen zu einem anwendungsreifen Produkt geführt, mit dem sich der Mannesmann-Effekt unter Praxisbedingungen mittels Simulation in der Warmumformung vorherbestimmen und vermeiden lassen kann.

Deshalb versucht man bis heute, den möglichen inneren Defekten durch eine erfahrungsbasierte Wahl der Durchmesserreduktion, der Werkzeugparameter und durch verbesserte Werkstoffe zu begegnen. Konstruktive Fehleinschätzungen müssen dann während des Produktionsanlaufs durch aufwändige und damit teure Werkzeugänderungen und zusätzliche Rüstvorgänge korrigiert werden. Die Berücksichtigung des Einflusses der jeweiligen Materialcharge bleibt dabei gänzlich unberücksichtigt, weil faktisch unbekannt.

Die geschilderte Situation hat dazu geführt, dass Unternehmen im Bereich kleinerer Losgrößen auf die Vorformtechnologie mittels Querkeilwalzen aus Sicherheitsgründen

gegenüber dem Mannesmann-Effekt ganz verzichten oder aber das geometrisch ungenauere Reckwalzen zur Vorformung einsetzen und damit das Ressourcenpotential nicht nutzen. Des Weiteren reizen Unternehmen im Bereich großer Losgrößen aus Furcht vor dem Mannesmann-Effekt die möglichen Grenzen des Querkeilwalzens nicht aus, bleiben auf der sicheren Seite und lassen somit vorhandenes Ressourcenpotential ungenutzt.

Das in **Bild 4** dargestellte Beispiel „Herstellung von Pkw-Pleuel“ verdeutlicht das große Einsparpotential an Primärenergie und CO₂ Emission wenn die Verfahrensgrenzen beim Querkeilwalzen ausgenutzt werden. Nach Aussage eines deutschen Großserienherstellers von Pkw-Pleuelstangen, der fast ausschließlich das Querkeilwalzen als Vorformverfahren nutzt, liegt der Gratanteil in der optimierten Großserie bei 20 – 25% (Mittelwert über alle Produkte). Hier zeigt sich, dass noch ein erhebliches Potential zur Reduzierung der Einsatzmasse vorhanden ist.

| Einsparpotential ¹⁾ bei der Pleuefertigung durch... | Primärenergie [GJ / Jahr] | CO ₂ Emission [to / Jahr] |
|--|---------------------------|--------------------------------------|
| Materialerwärmung ²⁾ | 5.180 | 268 |
| Materialherstellung ³⁾ | 25.680 | 1.844 |
| Σ | 30.860 | 2.112 |

1) Bei 3 Mio. Pkw Neuzulassungen pro Jahr; 4 Pleuel pro Motor; 100 g Einsparung pro Pleuel
 2) Erwärmungsenergie 400 kWh/to; Primärenergiefaktor 3; CO₂ Emission 558 g/kWh (deutscher Strommix 2011; Umweltbundesamt)
 3) CO₂ Emission Stahlherstellung 1537 kg/to_{Stahl}

Bild 4: Einsparpotential von Primärenergie und CO₂ Emission bei der Herstellung von Pkw-Pleuel

Weitere Steigerungen der Ressourceneffizienz können durch Substitution des Reckwalzens durch das Querkeilwalzen erreicht werden, wie das Beispiel in **Bild 5** zeigt.

| Einsparpotential ¹⁾ bei der Kurbelwellenfertigung durch... | Primärenergie [GJ / Jahr] | CO ₂ Emission [to / Jahr] |
|---|---------------------------|--------------------------------------|
| Materialerwärmung ²⁾ | 22.662 | 1.172 |
| Materialherstellung ³⁾ | 112.350 | 8.069 |
| Σ | 135.012 | 9.241 |

1) Bei 3 Mio. Pkw Neuzulassungen pro Jahr; 7% Gewichtseinsparung pro Kurbelwelle
 2) Erwärmungsenergie 400 kWh/to; Primärenergiefaktor 3; CO₂ Emission 558 g/kWh (deutscher Strommix 2011; Umweltbundesamt)
 3) CO₂ Emission Stahlherstellung 1537 kg/to_{Stahl}

Bild 5: Einsparpotential von Primärenergie und CO₂ Emission bei der Herstellung von Kurbelwellen

Überträgt man die Ergebnisse auf die gesamte jährliche deutsche Schmiedetonnage und unterstellt, dass lediglich bei 10% aller Massivumformbauteile nur 10% Gewicht durch die Erweiterung der Prozessgrenzen beim Querkeilwalzen bzw. durch die Verfahrenssubstitution eingespart werden können, so ergeben sich die in **Bild 6** dargestellten Gesamteinsparpotentiale.

| Gesamtes Einsparpotential ¹⁾ der deutschen Schmiedeindustrie durch... | Primärenergie [GJ / Jahr] | CO ₂ Emission [to / Jahr] |
|--|---------------------------|--------------------------------------|
| Materialerwärmung ²⁾ | 136.978 | 7.083 |
| Materialherstellung ³⁾ | 679.093 | 48.774 |
| Σ | 816.072 | 55.857 |

1) Deutsche Schmiedetonnage 2,38 Mio to + 25% Gratanteil; bei 10% können im Mittel 10% Gewicht eingespart werden
2) Erwärmungsenergie 400 kWh/to; Primärenergiefaktor 3; CO₂ Emission 558 g/kWh (deutscher Strommix 2011; Umweltbundesamt)
3) CO₂ Emission Stahlherstellung 1537 kg/to_{Stahl}

Bild 6: Gesamtes Einsparpotential der deutschen Schmiedeindustrie

Ziel des Vorhabens ist die Steigerung der Ressourceneffizienz in der Massivumformung durch Entwicklung und Validierung eines sicheren Auslegungskriteriums für Querkeilwalzwerkzeuge auf Basis von Prozesskennfeldern, mit dem eine Materialschädigung infolge des Mannesmann-Effektes vermieden wird. Hiermit wird ein signifikanter Beitrag zur Umweltentlastung geleistet, indem die Ressourcenpotentiale des Querkeilwalzens bis an die Grenzen ausgenutzt werden.

Ein erfolgsversprechender und praxisorientierter Lösungsweg ist, dass die fehlerfreie Werkzeugauslegung auf der Grundlage von Prozesskennfeldern erfolgt, die unter Nutzung der Methoden der Ähnlichkeitsmechanik mit deutlich reduziertem Versuchsaufwand auf halbempirischem Weg ermittelt werden. Dieser Weg wurde und wird bei vielen Problemen in Physik und Technik, bei denen aufgrund der Komplexität der betrachteten Vorgänge keine abgesicherte und mathematisch formulierbare Theorie vorliegt, erfolgreich angewendet. Neben dem Vorteil eines sehr sicheren Lösungswegs kommt hinzu, dass hiermit die wesentlichen physikalischen Einflussparameter durch dimensionslose Ähnlichkeitsvariablen direkt identifiziert werden können. Weiterhin ist von Vorteil, dass es keine Vermischung zwischen verschiedenen möglichen Fehlereinflüssen gibt und eine Kalibrierung eines Schadensmodells nicht erforderlich ist. Und nicht zu unterschätzen ist gegenüber einem theoretischen/simulationsgestützten Ansatz, dass die mathematisch/physikalische Abbildung eines Wärmeübergangsgesetzes und eines Reibgesetzes nicht erforderlich ist, was in der Warmumformung nach wie vor nicht hinreichend befriedigend gelöst ist, andererseits aber sehr wichtig ist, weil die Parameter Wärmübergang, Wärmeleitung und Reibung indirekt Einfluss auf die Kernrisslockerung haben. Ein weiterer Vorteil ist, dass mittels Kennfeldern a priori die richtigen Werkzeugparameter ermittelt und in der Konstruktion berücksichtigt werden können, und das erforderliche Experimente/Versuche im eigenen Unternehmen mit bestehenden Produktionsanlagen und unter realistischen Produktionsbedingungen durchgeführt werden können.

2 Vorhabensdurchführung

2.1 Ableiten der problembeschreibenden „Ähnlichkeitsvariablen“

Zusammenstellung der dominanten schädigungswirksamen und beeinflussbaren geometrischen und technologischen Einflussparameter. Hierfür wird auf Erfahrungen des LFM und der Industriepartner aufgesetzt, aber auch vorhandene Publikationen (Fachveröffentlichungen, Dissertationen, FuE-Projekte) gesichtet und ausgewertet. Aus der damit aufstellbaren formalen Schädigungsfunktion

$$\text{Schädigung} = f(P_1, P_2, \dots, P_N)$$

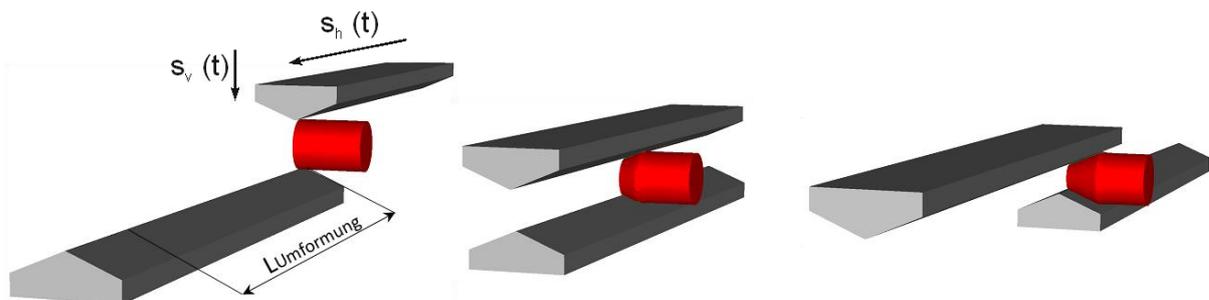
werden dann unter Anwendung der Dimensionsanalyse die signifikanten Ähnlichkeitskennzahlen als neue dimensionslose Variablen (Kennzahlen) hergeleitet. Neben dem Vorteil einer „physikalisch ähnlichen Übertragung“ der Ergebnisse auf zukünftige Walzfälle kommt für die Versuchstechnik entscheidend hinzu, dass die Anzahl der dimensionslosen Variablen immer geringer ist als die Anzahl der dimensionsbehafteten Einflussparameter, wodurch der Versuchsaufwand deutlich eingeschränkt werden kann.

2.2 Ermittlung des praktisch relevanten Wertebereichs der „Ähnlichkeitsvariablen“

Durch Sichtung und Bewertung vorhandener Walzfälle aus der Industrie sowie durch Betrachtung möglicher Grenzfälle wird der technisch sinnvolle Wertebereich der dimensionslosen Ähnlichkeitsvariablen für die späteren experimentellen Untersuchungen festgelegt. CAD-Konstruktionen und FEM-Simulationen kommen bedarfsbezogen zur Anwendung.

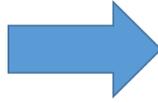
2.3 Entwicklung, Herstellung, Aufbau und Validierung eines Standardversuchs und -werkzeugs

Es wird ein „Standard Prüfstand“ für den Prozess Querkeilwalzen zur Ermittlung des Grenzumformvermögens in Abhängigkeit der wesentlichen Einflussparameter entwickelt, hergestellt und aufgebaut. Die Kombination aus einfachem, kostengünstigem Versuchswerkzeug mit einer angepassten Maschinensteuerung ermöglicht die Variation verschiedener Einflussgrößen und damit die Erfassung mehrerer Kennfeldpunkte mit nur einem Werkzeug. Hierbei werden die realen Parameter des QKW-Prozesses bezüglich Bauteilgeometrie, Werkzeuggeometrie und Werkzeuggeschwindigkeit auf die Parameter der horizontalen und vertikalen Wege und Geschwindigkeiten des Versuchs-Prozesses reduziert. Der Versuchs-Prozess soll mit konstanter Werkzeuggeometrie durchgeführt werden.



QKW-Prozess

- Bauteilgeometrie
 - Durchmesserreduktion
 - Reduktionslänge
- Werkzeuggeometrie
 - Keilwinkel
 - Schulterwinkel
 - Länge Kalibrierzone
- Werkzeuggeschwindigkeit



Versuchs-Prozess

- $S_v(t)$
- $S_h(t)$
- Konstante
Werkzeuggeometrie

Bild 7: Prinzipdarstellung des Standardversuchs und -werkzeugs

Der Demonstrator-Prüfstand soll möglichst in eine vorhandene Hydraulikpresse integriert werden, wodurch ein Walzen mit variablem Walzspalt unter Last nachgebildet werden kann.

2.4 Auswahl und Test eines Prüfverfahrens zur Fehlerdetektierung

In diesem Arbeitspaket soll ein Testverfahren identifiziert werden, mit dem die Versuchsteile auf Innenrisse geprüft werden können. Die Rissgröße soll hierbei quantifizierbar sein. Um ein entsprechendes Verfahren auswählen zu können, wird in einem ersten Schritt eine Fehlerklassifizierung anhand bekannter Beispiele aus der Praxis vorgenommen um daraus die notwendige Prüfschärfe des Verfahrens und ein Lastenheft ableiten zu können. Mit diesem Lastenheft wird eine Marktsichtung zur Identifikation geeigneter Fehlererkennungsverfahren durchgeführt. Mit den aussichtsreichsten Verfahren werden aussagefähige Tests durchgeführt. Anhand einer technisch / wirtschaftlichen Gesamtbewertung wird das am besten geeignete Verfahren ausgewählt.

2.5 Abgrenzung des Versuchsumfangs

Der Versuchsumfang soll auf das Notwendige reduziert werden. Hierzu werden in einem ersten Schritt alle in Frage kommenden Versuchsparameter (Einflussgrößen) zusammengestellt. Darauf aufbauend wird auf Grundlage von Erfahrung und der vorliegenden Literatur klassifiziert, welche Parameter von Bedeutung sind und welche nicht. Für die Parameter, zu denen keine oder nur unsichere Erkenntnisse vorliegen werden Vorversuche durchgeführt.

2.6 Erarbeitung eines DoE-Standardversuchsfeldes

Bei den durchzuführenden Versuchen wird die statistische Versuchsfeldplanung (DoE) angewendet. Diese Vorgehensweise garantiert im Vergleich zu klassischen Ein-Faktor-Versuchen ein Maximum an Ergebnissen und gleichzeitig ein Minimum an Versuchsaufwand. Mit den zu berücksichtigenden Einflussgrößen und der zu erwartenden Wechselwirkungseffekte wird ein geeignetes Versuchsfeld entwickelt. Anhand bekannter Streuungen aus der Praxis wird die notwendige Belegung der einzelnen Versuchspunkte (Anzahl Wiederholungen) ermittelt.

2.7 Versuchsdurchführung für insgesamt 3 unterschiedliche Stahlwerkstoffe

Das in AP 6 entwickelte Standardversuchsfeld wird für 3 unterschiedliche Stahlwerkstoffe angewendet. Vorgesehen ist einen unlegierten Kohlenstoffstahl, einen Vergütungsstahl und einen AFP-Stahl zu untersuchen, womit drei wesentliche und bedeutsame Materialgruppen berücksichtigt sind; die endgültige Typenfestlegung erfolgt zu Beginn dieser Untersuchungen in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss, um auch während der Untersuchungen eine sichere Materialversorgung durch die am Vorhaben beteiligten Unternehmen sicherstellen zu können. Unterschiedliche Materialdurchmesser werden durch spanende Bearbeitung hergestellt. Nach Durchführung der Versuche werden alle Versuchsteile bezüglich Innenfehlern, der Oberfläche und der Geometrie geprüft.

2.8 Design der Kennfelder für die verschiedenen Werkstoffe

Aus den Versuchsergebnissen des AP 7 werden für jeden untersuchten Werkstoff Arbeitskennfelder abgeleitet, die für die Konstruktion zukünftiger Werkzeuge eingesetzt werden sollen. Mit den beteiligten Umformbetrieben wird diejenige Darstellungsform ausgewählt, die den Konstruktionsablauf bestmöglich unterstützt.

2.9 Anwendung und Validierung der Kennfelder

Die Kennfelder werden in 2 realen Anwendungsfällen für die Warm- und Kaltumformung sowie die Flach- und Rundbackentechnologie überprüft. Hierzu werden die benötigten Werkzeuge anhand der ermittelten Kennfelder ausgelegt, gefertigt und in der Produktion eingesetzt. Ziel dieses Arbeitspunktes ist es aufzuzeigen,

- wieviel Material an einem bestehenden Serienteil eingespart werden kann,
- dass bei Anwendung der ermittelten Arbeitskennfelder i.O. Teile gefertigt werden, sowie
- der Nachweis (mittels Stichversuchen), dass bei Grenzüberschreitung der Kennfelder fehlerhafte Produkte gefertigt werden. Dafür werden die werkzeugunabhängigen Parameter Walzspalt, Umformtemperatur oder Umformgeschwindigkeit geändert.

2.10 Stichversuch an einem Aluminium-Werkstoff

Der Stichversuch dient zur Überprüfung, ob die prinzipielle Vorgehensweise und die Ausführungen des Standardversuchs auch auf Aluminium-Werkstoffe anwendbar sind. Hierzu werden von einem Industriepartner repräsentative Konstruktions- und Prozessparameter erarbeitet. In dem Stichversuch wird geprüft, ob die vorgegebenen Parameter mit dem Standardversuch umsetzbar sind und somit zu prüfbareren Versuchsteilen führen. Ggf. werden aus den Ergebnissen notwendige Anpassungen für den Prüfstand und die prinzipielle Vorgehensweise abgeleitet.

2.11 Erstellen eines Anwenderleitfadens

Ergebnis des Vorhabens ist eine Systematik, mit der Arbeitskennfelder für QKW erstellt werden, die zu geringstmöglichen Material- und damit Energieeinsatz und CO₂-Ausstoß führen. Im Vorhaben wird die Vorgehensweise exemplarisch bei drei Stahl-Werkstoffen entwickelt. In diesem Arbeitspaket wird die Vorgehensweise zur Ermittlung von

Arbeitskennfeldern für das Querkeilwalzen für beliebige andere Werkstoffe/Chargen in einem Anwenderleitfaden beschrieben.

2.12 Konzeption für die Umrüstung bestehender Querkeilwalzen zur Befähigung einer variablen Zustellung unter Last

Im Rahmen des Vorhabens werden die beim Querkeilwalzen von Massenvorverteilungen notwendigen Werkzeuggeometrien durch eine Kombination von einfachem Standardwerkzeug und intelligenter Maschinenfunktion nachgebildet, um die sonst sehr hohen Werkzeugkosten für die Untersuchungen im Projekt und später in der betrieblichen Praxis zu vermeiden. Innerhalb des Vorhabens wird diese Maschinenfunktion durch das Zustellen einer Hydraulikpresse zeitgleich zum Walzvorgang realisiert. Bei der späteren Anwendung in der betrieblichen Praxis mit Produktionswalzen muss diese Zustellfunktion durch eine gesteuerte Walzspaltverstellung während des Walzprozesses unter Last erfolgen. Hierfür wird auf Basis des aktuell verfügbaren Anlagenportfolios der Fa. Lasco ein geeignetes Nachrüstkonzept für bestehende Walzanlagen erarbeitet.

Neben den technischen Maßnahmen wird der Zeit- und Kostenrahmen für das Maschinenupgrade ermittelt.

3 Vorhabensergebnisse

3.1 Ableiten der problembeschreibenden „Ähnlichkeitsvariablen“

Der Mannesmann - Friemel Effekt ist das Aufreißen des Materials im Inneren des Walzproduktes infolge einer Überschreitung des Formänderungsvermögens des Werkstoffes. Diese Überschreitung ist eine Folge wechselnder plastischer Verformung im Kern bei gleichzeitiger Einwirkung von zyklischen Zugspannungen.

Wie in **Bild 8** dargestellt werden die maximalen Spannungen im Kern der Walzprodukte und bei möglichst kleinem Bissverhältnis s_B/h erreicht. Das bedeutet, je geringer die Durchmesserabnahme je Produktumdrehung ist umso kleiner ist das Bissverhältnis s_B/h und umso größer sind die Zugspannungen im Kern des Walzproduktes.

Daher bietet das QKW-Verfahren beste Voraussetzungen, Innenrisse zu erzeugen, und der sicherste Weg zur Zerstörung ist eine Durchmesserreduzierung mit einer möglichst geringen Abnahme pro Umdrehung bei gleichzeitig großer Anzahl von Überrollungen durchzuführen.

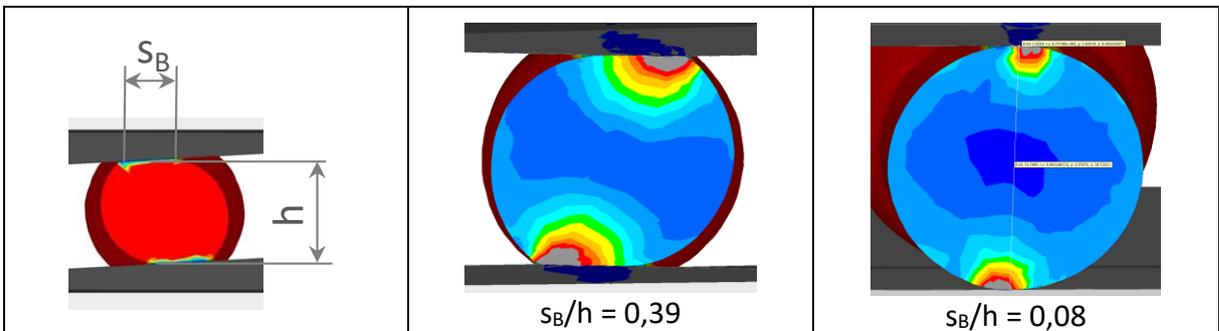
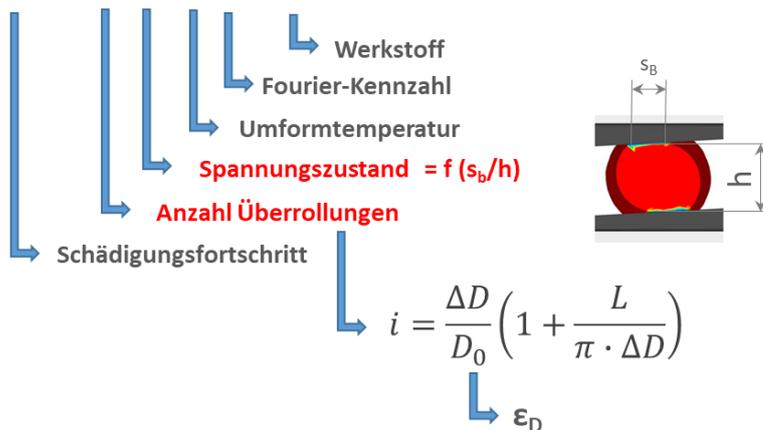


Bild 8: Bissverhältnis s_B/h (Definition und Beispiele)

Aus diesem Zusammenhang wird folgender Ansatz für ein Schädigungsmodell erstellt:

$$\Delta S = F(i, \sigma^m, T, Fo, \dots W)$$



Die Anzahl Überrollungen i ist abhängig von der Durchmesserabnahme und der überwalzten Werkzeuglänge L und kann wie folgt beschrieben werden:

$$i = \frac{\Delta D}{D_0} \left(1 + \frac{L}{\pi \cdot \Delta D} \right)$$

Die überwalzte Werkzeuglänge L kann in den Bereich der Streckzone und Kalibrierzone aufgeteilt werden. Nachfolgend wird ausschließlich der Bereich der Streckzone L_{Streck_x1} (siehe auch **Bild 9**) für den kritischen Produktabschnitt betrachtet.

Der Spannungszustand σ^m ist eine Funktion des Bissverhältnisses s_B/h und kann damit als Funktion von Produkt- und Werkzeuggeometrie dargestellt werden.

Aus der Zusammenfassung der Schädigungsgrößen, Überrollungen und Spannungszustand wird die Variable n abgeleitet:

$$n_{L_{\text{Streck}_x1}} = \frac{x_1 (1 - d_1^2/d_0^2) + \frac{(d_0 - d_1)/2}{\tan \alpha}}{\tan \beta \left(\frac{d_0 + d_1}{2} \right) \pi}$$

Wobei der Produktparameter x_1 die zu betrachtende Stelle am fertig gewalzten Bauteil beschreibt. Bei der Angabe von x_1 ist der Typ der Keilgeometrie (Keilwirkung einseitig oder beidseitig) zu beachten:

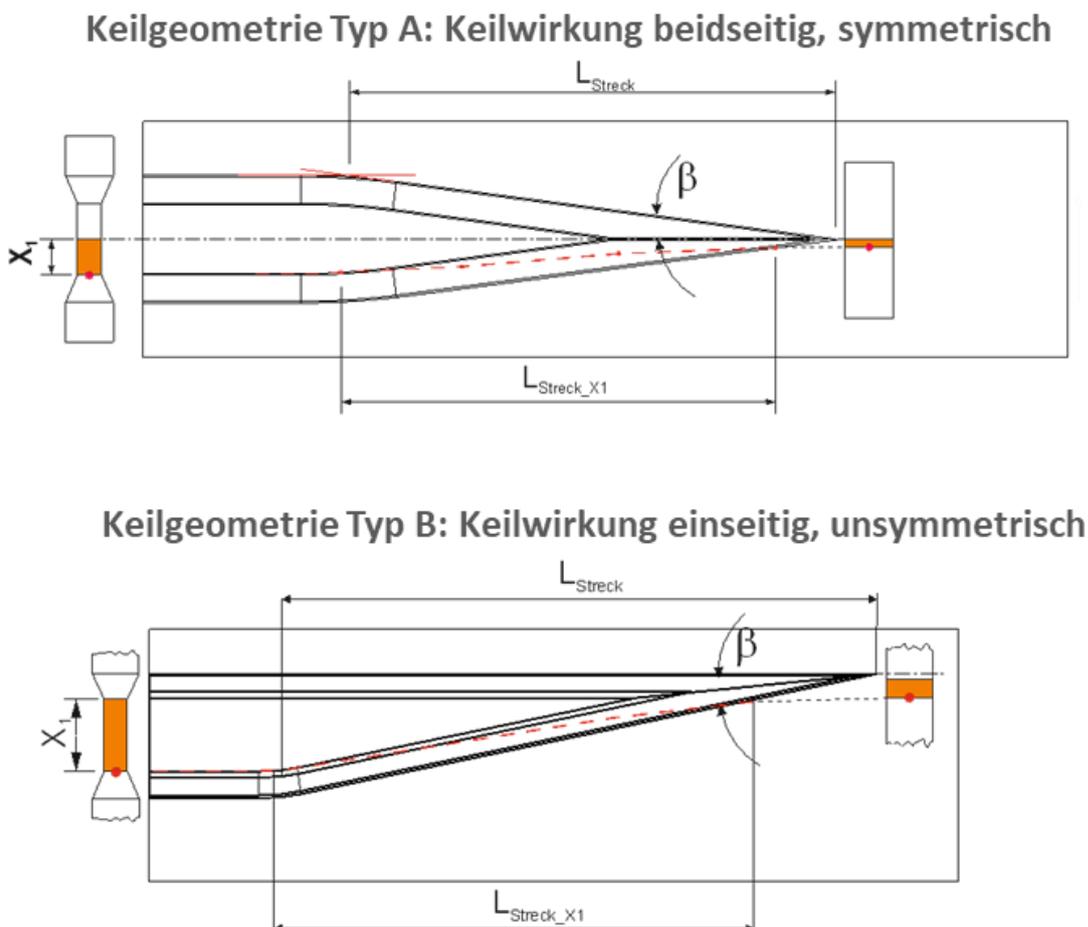


Bild 9: Typ A und B der Keilgeometrie

Die dimensionslose Variable n ist somit eine Funktion folgender Produkt- und Werkzeug-spezifischer Einflussparameter:

- Produktparameter
 - Ausgangsdurchmesser D_0
 - Durchmesserreduktion ε_D
 - Reduktionslänge λ
- Werkzeugparameter
 - Keilwinkel β
 - Schulterwinkel α
 - Typ der Keilgeometrie (Keilwirkung einseitig oder beidseitig)

Die dimensionslosen Kennzahlen der Produktgeometrie beruhen auf der Basis der Ähnlichkeitsmechanik. Die Durchmesserreduktion ε_D beschreibt das Verhältnis von Ausgangsdurchmesser zu reduziertem Durchmesser ($\varepsilon_D = (D_0 - D_n)/D_0$), die Reduktionslänge λ beschreibt das Verhältnis von der Länge des reduzierten Durchmessers zum reduzierten Durchmesser selbst ($\lambda = B_n/D_n$).

3.2 Ermittlung des praktisch relevanten Wertebereichs der „Ähnlichkeitsvariablen“

Zu Beginn des Arbeitspunktes wurden die für die Rissentstehung bedeutsamen Einflussgrößen zusammengestellt und in Form eines Ishikawa-Diagramms dokumentiert (**Bild 10**).

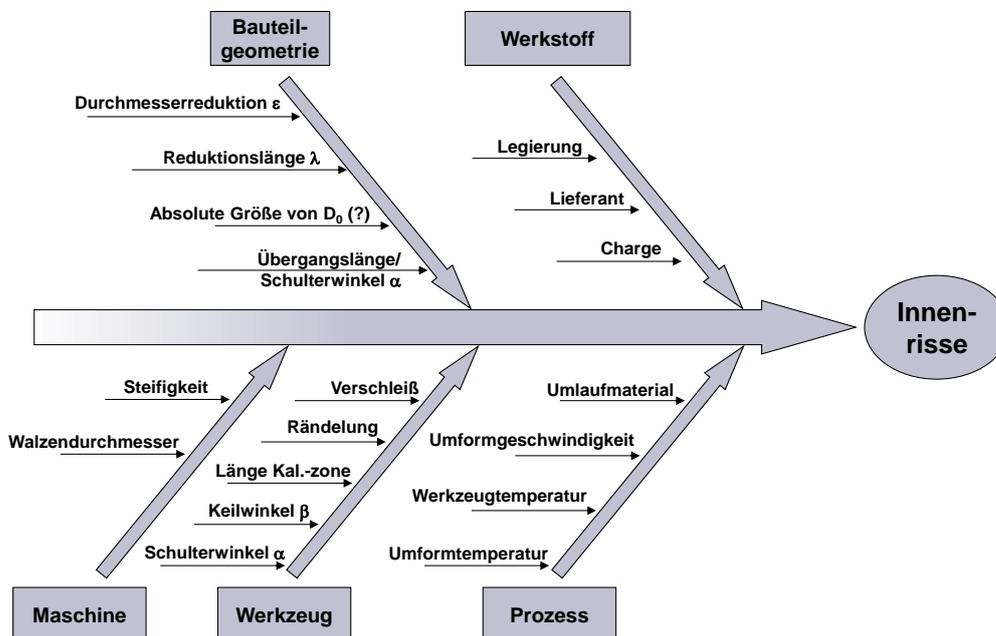


Bild 10: Ishikawa-Diagramm

Auf Basis von Literaturaussagen und eigenen Erkenntnissen wird die Bedeutung der Einflussgrößen für die Bildung von Innenrisse bewertet (**Bild 11**). Die Bewertungen und die getroffenen Aussagen beruhen neben den Literaturaussagen auf den langjährigen und umfangreichen praktischen Erfahrungswerten des LFM und der beteiligten Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses. Sowohl beim LFM als auch bei den beteiligten Unternehmen liegt der Schwerpunkt der bisherigen Erfahrungswerte in der Nutzung des

Querkeilwalzens als Vorformverfahren für das nachfolgende Gesenkschmieden. Aufgrund dieser, in Summe sehr umfangreichen Kompetenz des vorhandenen Erfahrungswissens und den ergänzenden Literatúraussagen kann mit hoher Wahrscheinlichkeit von der Vollständigkeit, der in Bild 11 dargestellten Aufstellung ausgegangen werden.

| Einflussgröße | Ausprägung | Praxisrelevante Werte | Bedeutung / Aussage-sicherheit | Bemerkung |
|--------------------------|--------------------------------------|---|--------------------------------|--|
| Bauteil-geometrie | Durchmesserreduktion ε_D | 15 – 55 % | hoch / sicher | Kleine Durchmesserreduktionen verursachen extreme Innenfehler. /Li04/: Mit steigender Durchmesserreduktion steigt die Größe und Anzahl von Innenfehlern. /Kach14/: Mit steigender Durchmesserreduktion steigt das Auftreten von Innenfehlern. |
| | Reduktionslänge λ | | erheblich / sicher | Mit zunehmender Länge der Durchmesserreduzierung steigt partiell die Anzahl von Überrollungen und damit die Gefahr von Innenfehlern |
| | Ausgangsdurchmesser | 10 - 150 | gering / fragwürdig | |
| Werkstoff | Legierung | | hoch / sicher | /Zach08/: <ul style="list-style-type: none"> • Es gibt keinen Zusammenhang zwischen C-Gehalt und Innenrisen • Der S-Gehalt ist entscheidend für Innenrisse • Bester Werkstoff (von 6 untersuchten): 100Cr • Schlechtestes Werkstoff: C70S6 |
| | Lieferant | | hoch / sicher | Bei „Mannesmann“-kritischen Legierungen |
| | Charge | | hoch / sicher | Bei „Mannesmann“-kritischen Legierungen |
| Maschine | Typ | <ul style="list-style-type: none"> • Walze • Flachback. | gering / relativ sicher | |
| | Steifigkeit | | erheblich / relativ sicher | |
| Werkzeug | Schulterwin. α_{Streck} | 15° - 35° | hoch / sicher | LFM; /Li08/: Kleine Schulterwinkel schlechter als große Schulterwinkel. |
| | Keilwinkel β | 7° - 10° | erheblich / relativ sicher | /Li04/: Große Keilwinkel schlechter als kleine Keilwinkel /Kach14/: Kleine Keilwinkel schlechter als große Keilwinkel (Halbwarmumformung) |
| | Länge Kalib-zone | $D_0 \times \Pi$ | hoch / sicher | Die Gefahr der Rissbildung steigt mit der Länge der Kalibrierzone |
| | Rändelung | Abhängig von der Anwendung | erheblich / sicher | Zu schwache oder verschlissene Rändelung führt zu Relativbewegungen (Durchrutschen) zwischen Bauteil und Werkzeug, damit zu Querschnittsdeformationen und steigert so die Gefahr der Rissbildung. |
| Prozess | Umformtemperatur | 1.100 – 1.300°C | erheblich / relativ sicher | /Meye15/: Innenrisse treten bei niedrigen Temperaturen auf (< 1.150°C) /Zach08/: Innenrisse treten eher bei niedrigen Temperaturen auf (C70S6, 16MnCrMo5, < 1.000°C), bei Stählen mit hohem C-Gehalt auch bei Temperaturen > 1.200°C /Kach14/: Innenrisse treten eher bei niedrigen Temperaturen auf (850° u. 950°C) |
| | Werkzeugtemperatur | max. 250°C | gering / fragwürdig | /Wang12/: Niedrige Werkzeugtemperaturen (20° statt 120°C) senken die Gefahr der Innenrissbildung |
| | Werkzeuggeschwindigkeit | max. 700mm/s | gering / fragwürdig | /Meye15/: Innenrisse treten bei niedrigen Walzgeschwindigkeiten auf (< 230mm/s) /Steg16/: Mit steigender Walzgeschwindigkeit nehmen die Innenrisse zu (200 – 800mm/s) |
| | Umlaufmaterial | | erheblich / relativ sicher | Effekt ähnlich wie verschlissene Rändelung |

Bild 11: Einflussgrößen und Auswirkung

Aus der Zusammenstellung wurden der technisch sinnvolle Wertebereich der Einflussgrößen und die daraus folgende Dimensionierung der QKW-Versuchseinrichtung erstellt (**Bild 12**).

| Einflussgröße | Ausprägung | Einfluss auf QKW-Vorrichtung | | | Leistung | Vorauswahl |
|-----------------------|---|------------------------------|------------------|----------|----------|---------------------------------------|
| | | Wz-länge | Wz-geschwindigk. | | | |
| | | | Horizont. | Vertikal | | |
| Bauteil- geometrie | Durchmesserreduktion ε_D | o | o | o | x | max.: 55%, |
| | Reduktionslänge λ | x | o | o | o | max.: 4 |
| | Ausgangsdurchmesser | x | o | o | x | max.: 35 |
| Werkzeug | Schulterwinkel α (Streckzone) | x | - | x | o | 25° |
| | Keilwinkel β | x | o | x | o | min.: 5°, max.: 9° |
| | Länge Kalibrierzone | x | o | - | - | max.: $D_0 \times 2\pi$ |
| Prozess | Werkzeuggeschwindigkeit (horizontal) | - | x | x | x | max.: 400 (Stichversuch: 700) mm/s |

- : kein Einfluss, o : geringer Einfluss, x : wesentlicher Einfluss

Bild 12: Einflussgrößen auf die Dimensionierung der QKW-Vorrichtung

3.3 Entwicklung, Herstellung, Aufbau und Validierung eines Standardversuchs und –werkzeugs

Die Dimensionierung der geometrischen und dynamischen Größen des „Standard-Prüfstands“ erfolgte auf Basis der Ergebnisse in AP 3.2. Die Anforderungen an den Kraft- und Leistungsbedarf in horizontaler und vertikaler Richtung wurden durch Simulationsverfahren ermittelt. Bei der Dimensionierung der einzelnen Größen waren insbesondere die gegenseitigen Abhängigkeiten der Einflussgrößen zu beachten. So ist zum Beispiel die für die Gesamtgröße des Prüfstands ausschlaggebende Werkzeuglänge nicht nur von der absoluten Größe der zu walzenden Bauteilgeometrie, sondern auch von den wesentlichen Konstruktionsparametern (Keil- und Schulterwinkel) des formgebenden Werkzeugkeils abhängig (**Bild 13**). Besondere Beachtung verlangte die notwendige Vertikalgeschwindigkeit, da insbesondere hohe Geschwindigkeiten eine große Anforderung an den Prüfstand darstellen (**Bild 14**).

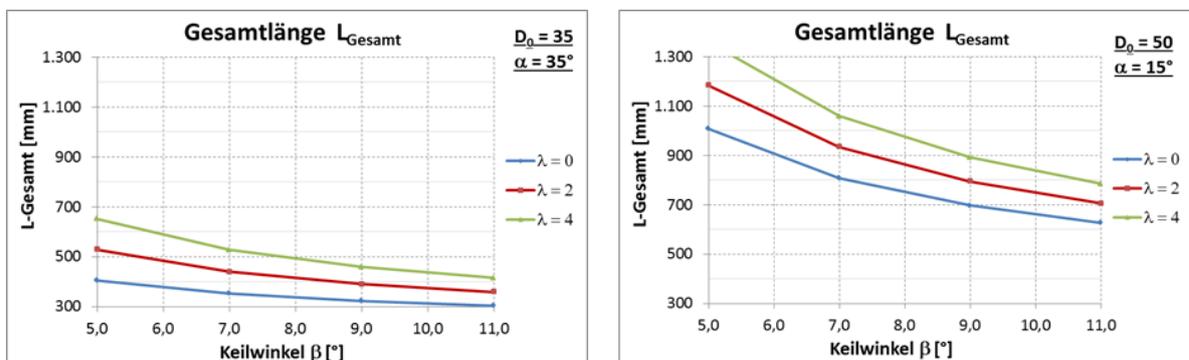


Bild 13: Abhängigkeit der Gesamtlänge des Werkzeugs L_{Gesamt} von Durchmesser D_0 , Reduktionslänge λ , Schulterwinkel α , Keilwinkel β und Länge der Kalibrierzone $L_{\text{Kalibrier}}$ (Beispiel)

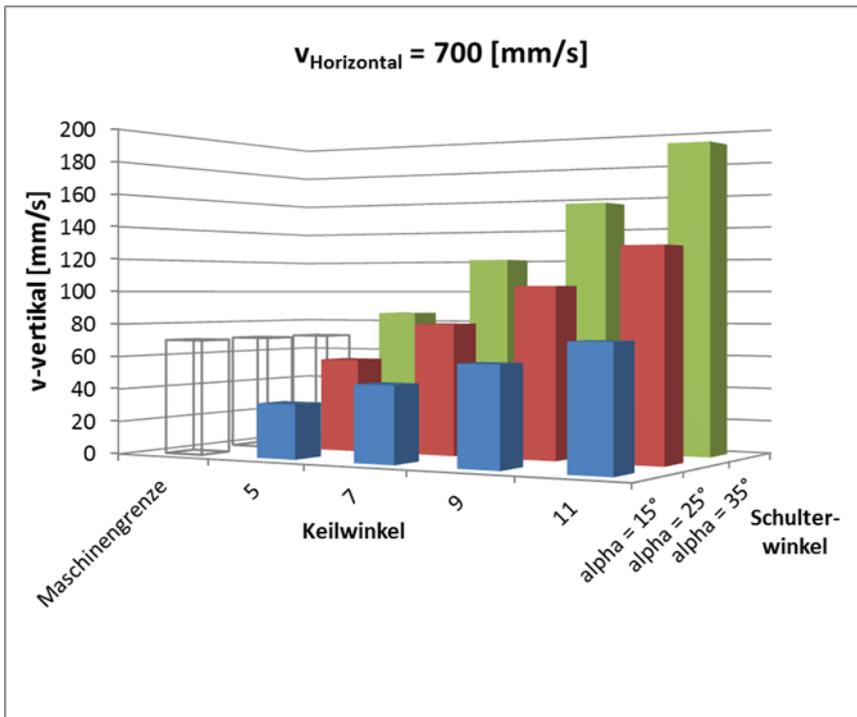


Bild 14: Abhängigkeit der Vertikalgeschwindigkeit v_{Vertikal} von Schulterwinkel α , Keilwinkel β und Horizontalgeschwindigkeit $v_{\text{Horizontal}}$

Für die Realisierung des Prüfstands werden 2 grundsätzliche Varianten betrachtet:

- Variante A: Rundwalze
- Variante B: Flachbackenmaschine

| Variante A: Rundwalze | Variante B: Flachbackenmaschine |
|---|---|
| | |
| <p>Abmessungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Walzendurchmesser: 280 • Werkzeugdurchmesser: 350 • Walzen-/Werkzeugbreite: 150 <p>Prozessparameter</p> <ul style="list-style-type: none"> • Walzen-Drehzahl: max. 40 min⁻¹ • Horizontalkraft (je Walze): 35 kN • Vertikalkraft: 100 kN • Achsabstand Walzen (unter Last verstellbar): <ul style="list-style-type: none"> ○ min: 365 ○ max: 400 ○ Vertikalgeschwindigkeit: max. 70 mm/s | <p>Abmessungen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Werkzeuggrundplatte: 1.000 x 160 <p>Prozessparameter</p> <ul style="list-style-type: none"> • Horizontalgeschwindigkeit: max. 700 mm/s • Horizontalkraft: 35 kN <p>Die Flachbackenvariante wird in eine im LFM vorhandene Hydraulikpresse integriert.</p> <p>Hydraulikpresse</p> <ul style="list-style-type: none"> • Vertikalkraft: 1.000 kN • Vertikalgeschwindigkeit: max. 70 mm/s |

Bild 15: Mögliche Varianten des Prüfstands

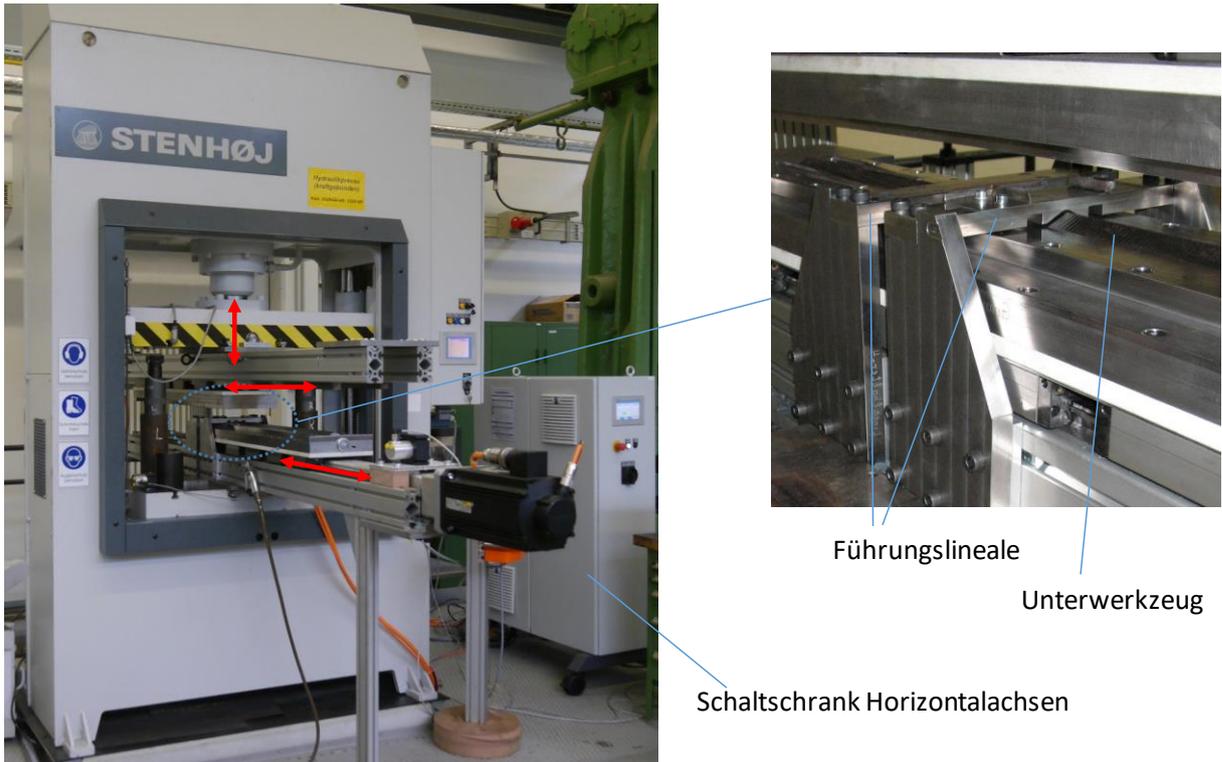
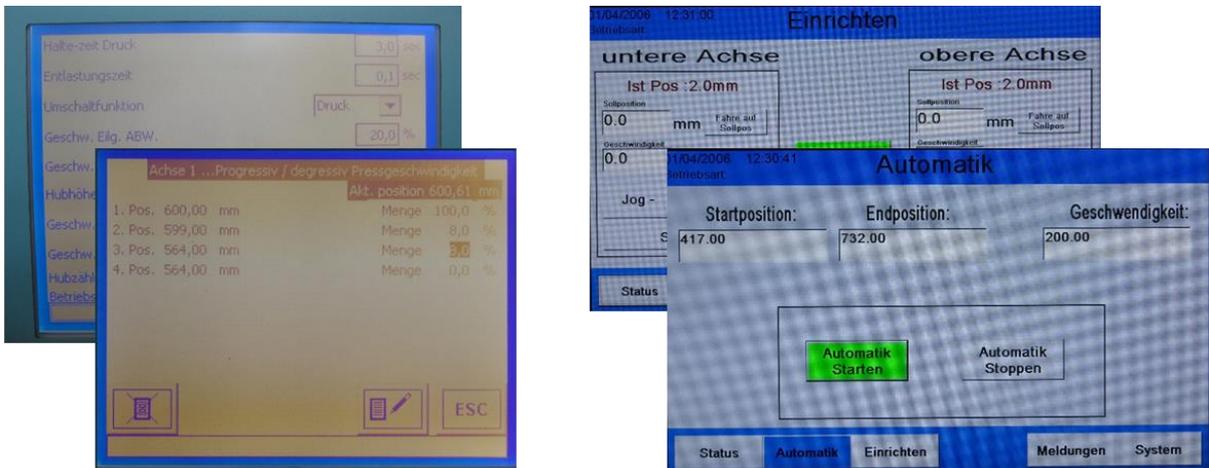


Bild 17: Hydraulikpresse mit montiertem Führungsgestell

Die Horizontalachsen (Flachbacken) und die Vertikalachse (Hydraulikpresse) haben jeweils ein eigenes, unabhängiges Steuerungsmodul. Die Synchronisation von horizontaler und vertikaler Werkzeugbewegung erfolgt über einen Wegsensor, der die vertikale Position erfasst und das Startsignal für die horizontale Bewegung liefert.



Parametereinstellung Vertikalachse (Hydraulikpresse)

Parametereinstellung Horizontalachsen (Flachbacken)

Bild 18: Parametereinstellung der Vertikal- und Horizontalachsen

Die Konstruktion und Auslegung der Werkzeuge erfolgten auf Basis der Ergebnisse in AP 3.2. Das Ober- und Unterwerkzeug ist geometrisch identisch.

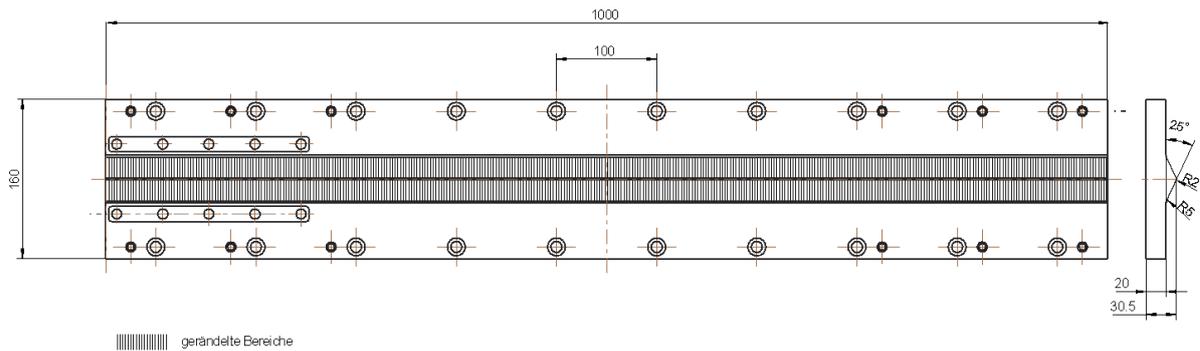


Bild 19: Werkzeuggeometrie

3.4 Auswahl und Test eines Prüfverfahrens zur Fehlerdetektierung

Um ein entsprechendes Verfahren auswählen zu können, wird in einem ersten Schritt eine Fehlerklassifizierung anhand bekannter Beispiele aus der Praxis vorgenommen, um daraus die notwendige Prüfschärfe des Verfahrens und ein Lastenheft ableiten zu können.

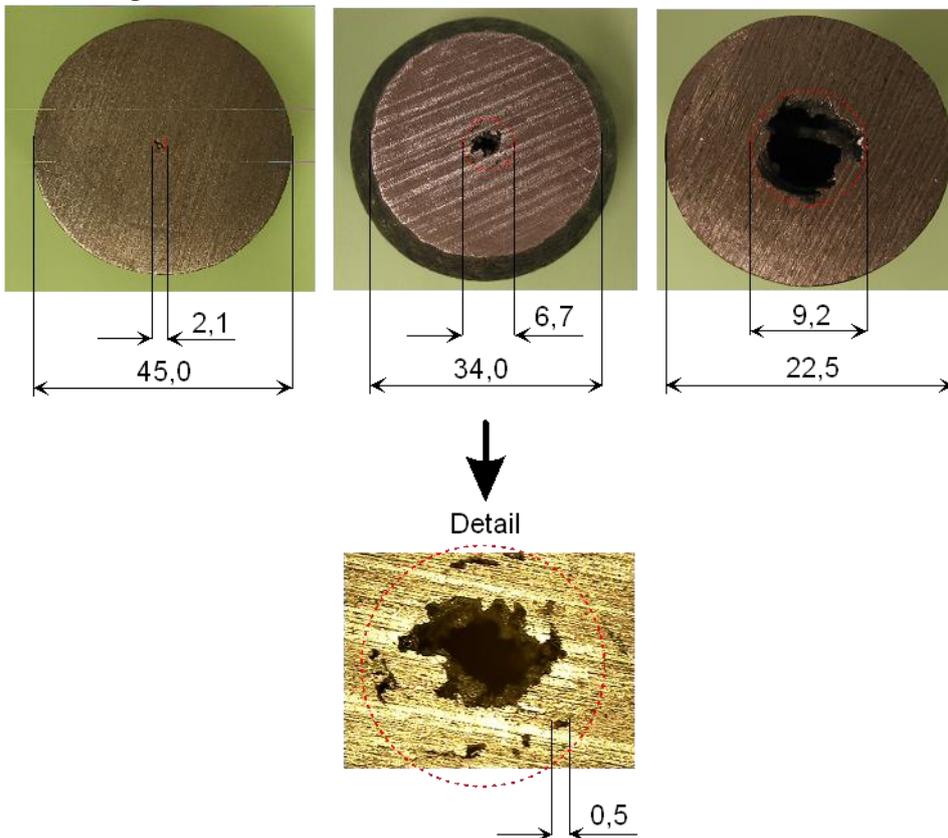


Bild 20: Praxisbeispiele von Größe und Ausprägung der Innenfehler

Ein Prüfsystem zur Erkennung der Innenfehler sollte Fehler in der Größe von 1% vom Produktaußendurchmesser erkennen.

Nach intensiver Marktrecherche wurden 3 Prüfverfahren ausgewählt und getestet:

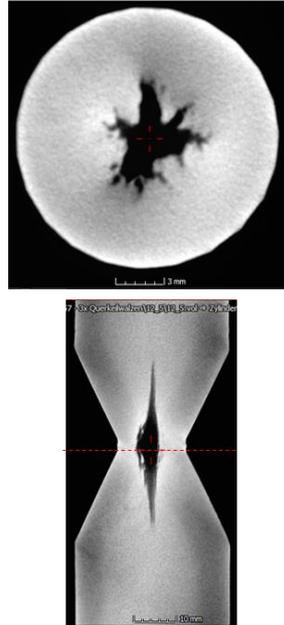
- Digitale Röntgenprüfung
- 3D-CT (Kegelstrahltomographie)
- Auftrennen der Proben und optische Messung der Fehlergröße

Digitale Röntgenprüfung
(kleinste erkennbare Fehlergröße: 0,5mm)



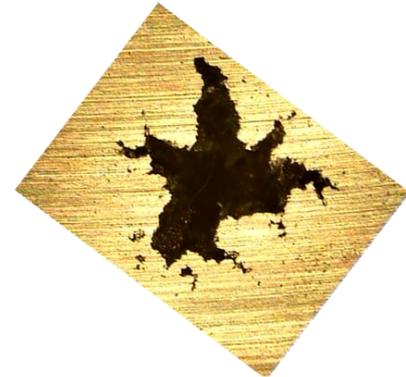
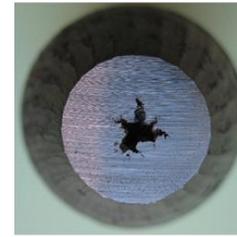
Probe 12.5

3D-CT (Kegelstrahltomographie)
(kleinste erkennbare Fehlergröße: 0,2mm)



Probe 12.5

Auftrennen der Proben und optische Messung der Fehlergröße
(kleinste erkennbare Fehlergröße: 0,05mm)



Probe 12.5

Bild 21: Gegenüberstellung der Prüfergebnisse (gleicher Prüfkörper)

Das beste Prüfergebnis liefert das 3D-CT, da nur hier, bei ausreichender Fehlerauflösung, die räumliche Ausdehnung der Innenrisse ersichtlich ist. Nachteilig sind der logistische und zeitliche Prüfaufwand (die Prüfung kann nur von Spezialanbietern durchgeführt werden) und die hohen Prüfkosten von ca. 300,- €/Stück.

Die digitale Röntgenprüfung ist deutlich günstiger als das 3D-CT (ca. 7,- €/Stück), hat aber eine deutlich schlechtere Fehlerauflösung und die gleichen Nachteile bezüglich logistischem und zeitlichem Prüfaufwand.

Das Auftrennen der Proben und die optische Messung der Fehlergröße bietet die beste Fehlerauflösung, zeigt den Fehler jedoch pro Trennvorgang nur 2-dimensional in einer Querschnittsfläche. Ein ganz wesentlicher Vorteil ist die unmittelbare Verfügbarkeit des Prüfverfahrens. Nach dem Abkühlen der Walzproben ist eine sofortige Fehlerkontrolle möglich. Aus den genannten Gründen wurde daher das Auftrennen der Proben und die optische Messung der Fehlergröße vorrangig als Prüfverfahren eingesetzt.

Die optische Messung wurde mit einem Bildverarbeitungsmessgerät durchgeführt.

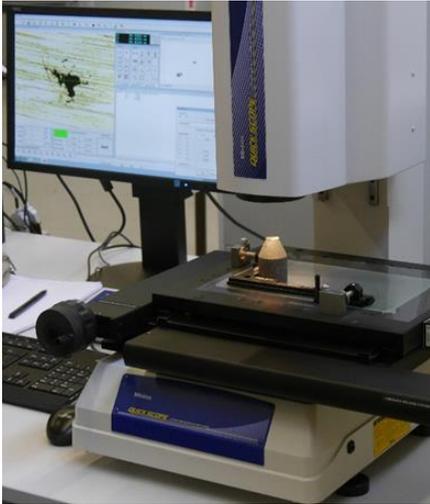


Bild 22: Bildverarbeitungsmessgerät

3.5 Abgrenzung des Versuchsumfangs

Der Versuchsumfang soll auf das für den Erkenntnisgewinn Notwendige reduziert werden. Auf Grundlage eigener Erfahrung und Literatúraussagen (siehe auch Ausführung unter AP 3.2) erfolgte die Auswahl nachfolgender Einfluss- und Einstellgrößen.

| Einflussgröße | Ausprägung | Auswahl | Anzahl Varianten |
|------------------|--------------------------------------|---|------------------|
| Bauteilgeometrie | Durchmesserreduktion ε_D | 10%, 55% | 2 |
| | Reduktionslänge λ | 2, 6 | 2 |
| | Ausgangsdurchmesser | 35 (+/- 2) | 1 |
| Werkstoff | Legierung | <ul style="list-style-type: none"> Unleg. C-Stahl, Vergütungsstahl, AFP-Stahl EN AW-6082 (AlMgSi1), Stichversuche | 3 |
| | Lieferant | | 1 |
| | Charge | | 1 |
| Werkzeug | Schulterwinkel α | 25° | 1 |
| | Keilwinkel β | 5°, 9° | 2 |
| | Länge Kalibrierzone | $D_0 \times \pi/2$, $D_0 \times 2\pi$ | 2 |
| | Rändelung | Relativ rau | 1 |
| | Verschleiß | ohne | 1 |
| Prozess | Umformtemperatur | 1.200 °C (? , Werkstoffabhängig) | 1 |
| | Werkzeugtemperatur | 40°C | 1 |
| Prozess | Werkzeuggeschwindigkeit | 200, 400 (Stichversuch: 700) mm/s | 2 |
| | Umlaufmaterial | ohne | 1 |

Bild 23: Auswahl der Einflussgrößen

Die Auswahl und Stufeneinstellungen führt insgesamt zu 96 Kombinationen (Versuchseinstellungen) beziehungsweise zu 32 Kombinationen je Werkstoff.

3.6 Erarbeitung eines DoE-Standardversuchsfeldes

Die Versuchsplanung erfolgte auf Basis der statistischen Versuchsfeldplanung (DoE). Diese Vorgehensweise garantiert im Vergleich zu klassischen Ein-Faktor-Versuchen ein Maximum an Ergebnissen und gleichzeitig ein Minimum an Versuchsaufwand; außerdem können Wechselwirkungen zwischen den Einflussgrößen identifiziert werden.

Für die vorliegenden Versuche wurde ein vollfaktorieller DoE-Versuchsplan erarbeitet, da hierdurch gewährleistet wird, dass alle Wechselwirkungen erfasst werden.

DoE 2⁵ => 3 Werkstoffe, je Werkstoff 1 Versuchsplan mit 32 Versuchspunkten, alle Wechselwirkungen werden berücksichtigt

| Std | Factor 1 A: Durchmesserreduktion % | Factor 2 B: Reduktionslänge - | Factor 3 C: Keilwinkel ° | Factor 4 D: Länge Kalibrierzone - | Factor 5 E: Werkzeuggeschwindigkeit mm/s | Response 1 Innenfehler |
|-----|--|-------------------------------------|--------------------------------|---|--|---------------------------|
| 1 | 10 | - | 2 | 5 | 1 | 200 |
| 2 | 55 | - | 2 | 5 | 1 | 200 |
| 3 | 10 | - | 6 | 5 | 1 | 200 |
| 4 | 55 | - | 6 | 5 | 1 | 200 |
| 5 | 10 | - | 2 | 9 | 1 | 200 |
| 6 | 55 | - | 2 | 9 | 1 | 200 |
| 7 | 10 | - | 6 | 9 | 1 | 200 |
| 8 | 55 | - | 6 | 9 | 1 | 200 |
| 9 | 10 | - | 2 | 5 | 4 | 200 |
| 10 | 55 | - | 2 | 5 | 4 | 200 |
| 11 | 10 | - | 6 | 5 | 4 | 200 |
| 12 | 55 | - | 6 | 5 | 4 | 200 |
| 13 | 10 | - | 2 | 9 | 4 | 200 |
| 14 | 55 | - | 2 | 9 | 4 | 200 |
| 15 | 10 | - | 6 | 9 | 4 | 200 |
| 16 | 55 | - | 6 | 9 | 4 | 200 |
| 17 | 10 | - | 2 | 5 | 1 | 400 |
| 18 | 55 | - | 2 | 5 | 1 | 400 |
| 19 | 10 | - | 6 | 5 | 1 | 400 |
| 20 | 55 | - | 6 | 5 | 1 | 400 |
| 21 | 10 | - | 2 | 9 | 1 | 400 |
| 22 | 55 | - | 2 | 9 | 1 | 400 |
| 23 | 10 | - | 6 | 9 | 1 | 400 |
| 24 | 55 | - | 6 | 9 | 1 | 400 |
| 25 | 10 | - | 2 | 5 | 4 | 400 |
| 26 | 55 | - | 2 | 5 | 4 | 400 |
| 27 | 10 | - | 6 | 5 | 4 | 400 |
| 28 | 55 | - | 6 | 5 | 4 | 400 |
| 29 | 10 | - | 2 | 9 | 4 | 400 |
| 30 | 55 | - | 2 | 9 | 4 | 400 |
| 31 | 10 | - | 6 | 9 | 4 | 400 |
| 32 | 55 | - | 6 | 9 | 4 | 400 |

Bild 24: DoE-Versuchsplan

Der dargestellte Versuchsplan wurde für alle 3 Stahlwerkstoffe angewandt.

Die Antwortgröße (Qualitätsmerkmal) der Versuche ist die Größe der Innenfehler. In Abhängigkeit des Prüfverfahrens werden folgende Antwortgrößen erfasst:

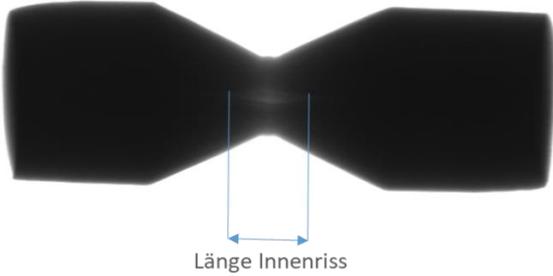
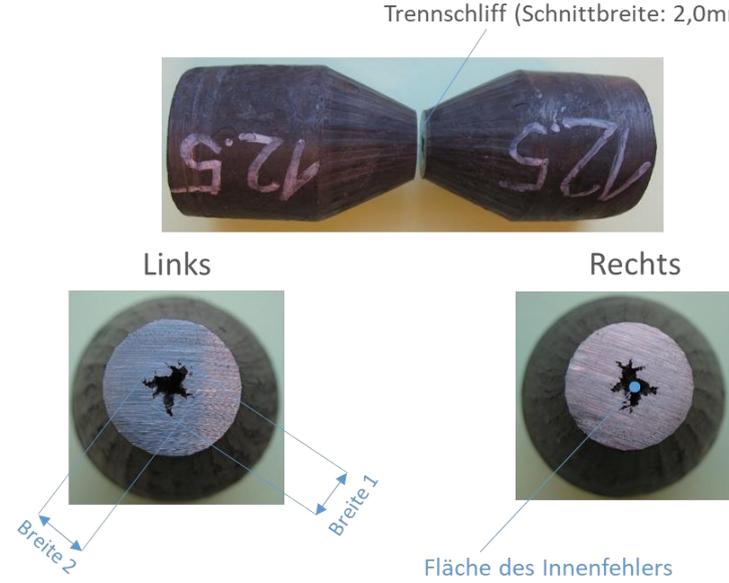
| Verfahren und Antwortgrößen | Definition der Antwortgröße |
|--|---|
| Digitale Röntgenprüfung (2D) <ul style="list-style-type: none"> • Länge Innenriss |  |
| Auftrennen der Proben und optische Messung der Fehlergröße <ul style="list-style-type: none"> • Breite 1 Links • Breite 1 Rechts • Breite 2 Links • Breite 2 Rechts • Fläche Links • Fläche Rechts |  |

Bild 25: Antwortgrößen

3.7 Versuchsdurchführung für insgesamt 3 unterschiedliche Stahlwerkstoffe

Das in AP 3.6 entwickelte Standardversuchsfeld wird für 3 Stahlwerkstoffe angewendet:

- 46MnVS5
- C45
- C70S6

Je Werkstoff werden die 32 Versuchseinstellungen des DOE-Versuchsfelds ausgeführt. Jede Versuchseinstellung wird aus statistischen Gründen 5-fach belegt, d. h., insgesamt wurden 480 Versuchsteile gefertigt.

Versuchsablauf: Die 5 Proben einer Versuchseinstellung werden gleichzeitig im Elektromuffelofen erwärmt, dann unmittelbar nacheinander in der Versuchseinrichtung umgeformt, an ruhender Luft abgekühlt und anschließend mit der Versuchskennzeichnung versehen.

Konstante Versuchsparameter:

- Ausgangsgeometrie ($D_0 \times L$):
 - 46MnVS5: 37,0 x 84
 - C45: 35,0 x 84
 - C70S6: 36,5 x 84
- Schulterwinkel α : 25°
- Erwärmungstemperatur: 1.250°C
- Werkzeugtemperatur: ca. 40°C

Die Kontrolle auf Innenrisse erfolgte durch:

- Digitale Röntgenprüfung (alle Proben der Werkstoffe 46MnVS5 und C45)
- 3D-CT, Kegelstrahltomographie (ausgewählte Einzelstücke des Werkstoffs 46MnVS5)
- Auftrennen der Proben und optische Messung der Fehlergröße (alle Proben)

Das erste Versuchsfeld wurde mit dem Werkstoff 46MnVS5 durchgeführt. Bei diesem Werkstoff traten, in Abhängigkeit der Versuchseinstellung, deutliche Innenfehler auf. Die Innenfehler traten nur bei den Versuchseinstellungen mit einer Durchmesserreduktion von $\varepsilon_D = 55\%$ auf. In der anderen Versuchshälfte mit $\varepsilon_D = 10\%$ waren keine Fehler ersichtlich.

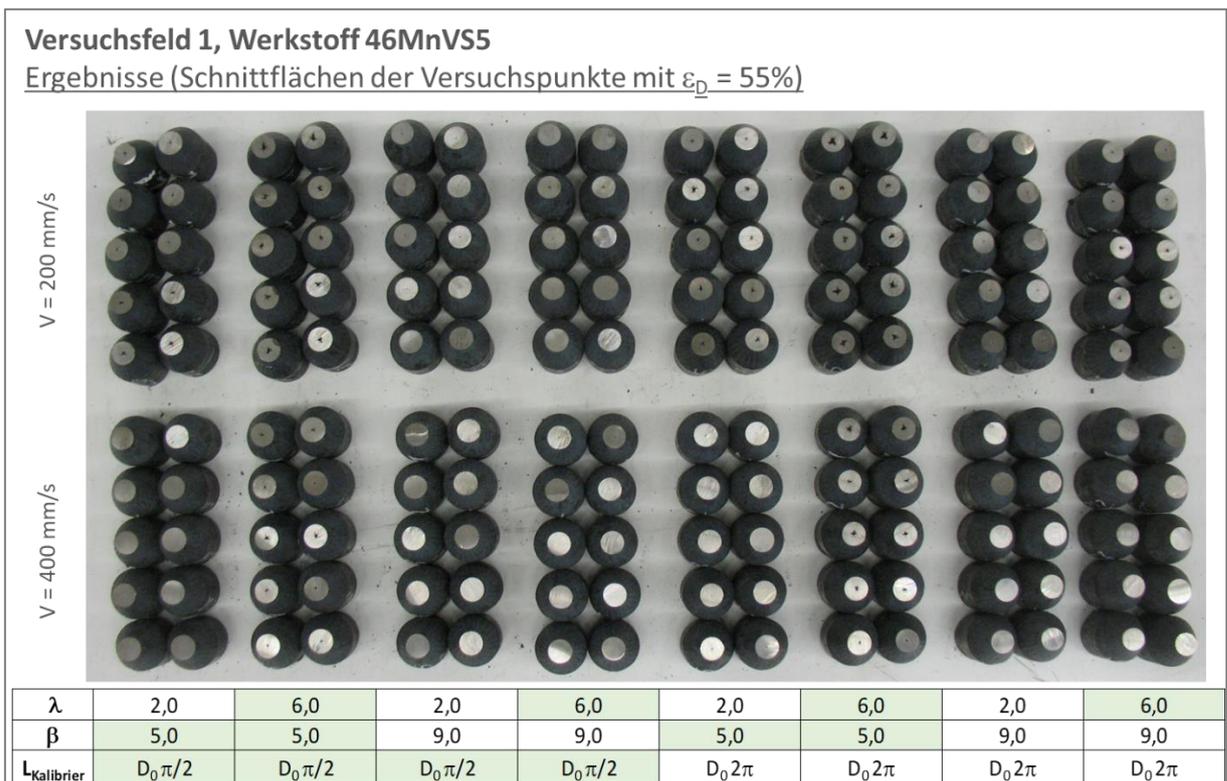


Bild 26: Ergebnisse Versuchsfeld 1, Werkstoff 46MnVS5, Durchmesserreduktion $\varepsilon_D = 55\%$

Die grafische Darstellung verdeutlicht die Ergebnisse. Dargestellt wird beispielhaft der Mittelwert der 4 Fehlergrößen Breite 1 links/rechts und Breite 2 links/rechts. Die Darstellung der flächenbezogenen Fehlergrößen liefern prinzipiell die gleichen Aussagen.

Versuchsfeld 1, Werkstoff 46MnVS5

Ergebnisse für Durchmesserreduktion $\varepsilon_D=55\%$

Auswirkung der Einflussfaktoren auf die Riss-Breite

(Hinweis: Der lineare Zusammenhang zwischen den jeweils 2 Größenwerten der Einflussfaktoren wurde für die vereinfachte Darstellung gewählt und ist **nicht** gesichert)

Legenden-Definitionen:

- 5°/9°: Keilwinkel
- klein/groß Kalibrier: Länge der Kalibrierzone
- v200/v400: Horizontalgeschwindigkeit
- Lf 2/6: Längenfaktor λ

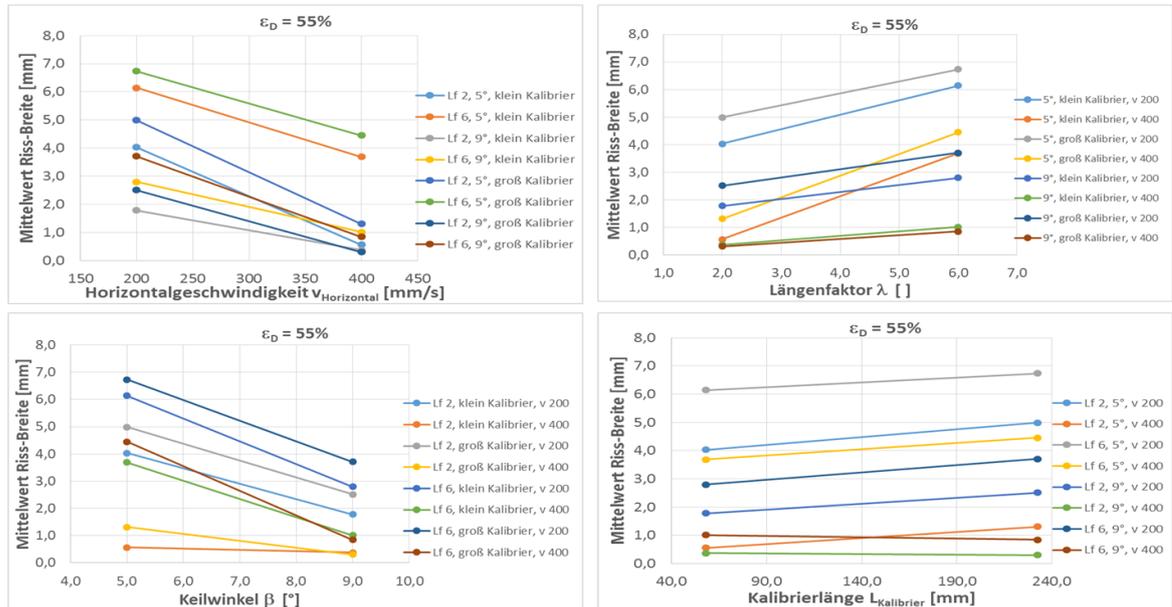


Bild 27: Ergebnisse Versuchsfeld 1, Werkstoff 46MnVS5, Durchmesserreduktion $\varepsilon_D = 55\%$

Die statistische Auswertung bestätigt die vorangestellten Ergebnisse und führt zu folgender Rangliste der Einflussgrößen:

1. Durchmesserreduktion ε_D (größter Einfluss, auch als Wechselwirkung)
2. Werkzeuggeschwindigkeit (mittlerer Einfluss)
3. Keilwinkel β (mittlerer Einfluss)
4. Reduktionslänge λ (geringer Einfluss)
5. Kalibrierlänge (Einfluss vernachlässigbar)

Seite 1 links

Pareto Chart

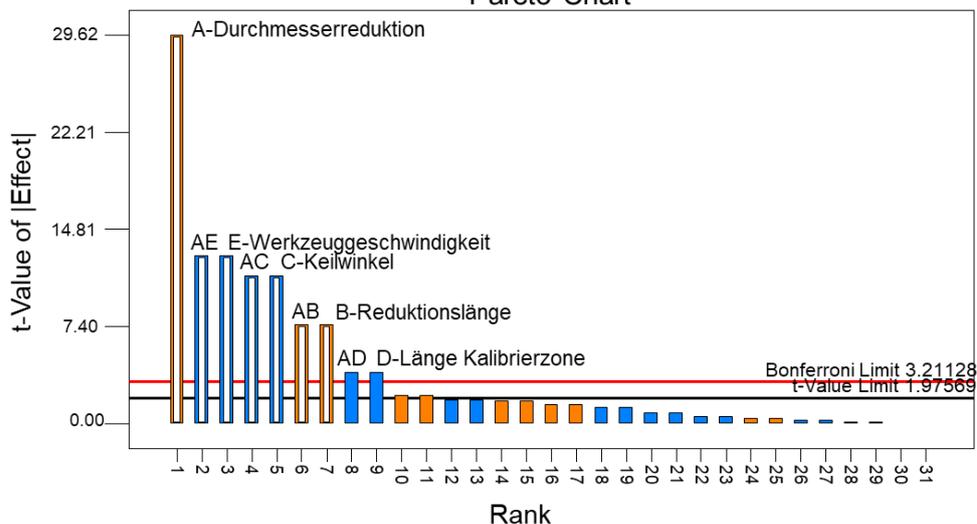


Bild 28: Ergebnisse (Beispiel) Versuchsfeld 1, Werkstoff 46MnVS5, Antwortgröße: Breite 1, links

Die Ergebnisse der Versuchsfelder 2 und 3 mit den Werkstoffen C45 und C70S6 zeigen, dass diese Werkstoffe eine erhebliche geringe Empfindlichkeit gegen die Bildung von Innenfehlern aufweisen.

Bei C45 wurden nur an 11 von 160 Proben Innenfehler mit einer Größe von wenigen Zehntelmillimetern festgestellt. Die statistische Auswertung zeigte keine signifikanten Ergebnisse.

Bei C70S6 war die Fehleranzahl (16 von 160 Proben) und -größen etwas höher als bei C45, die statistische Auswertung zeigte ebenfalls keine signifikanten Ergebnisse, tendenziell ist aber eine gleichartige Rangliste der Einflussgrößen wie bei 46MnVS5 zu erkennen.

3.8 Design der Kennfelder für die verschiedenen Werkstoffe

Die Basis der erstellten Kennfelder bildet die dimensionslose Variable n , die ein Maß für die Anzahl der Überrollungen und der Durchmesserreduktion je Überrollung eines reduzierten Bauteilbereichs darstellt. Die Variable n bildet hierdurch die zyklische, kritische Belastung des Werkstoffs, hervorgerufen durch das Bissverhältnis s_B/h (siehe auch AP 3.1) ab.

n ist eine Funktion folgender Einflussgrößen:

- Ausgangsdurchmesser D_0
- Durchmesserreduktion ε_D
- Reduzierter Länge B_3
- Keilwinkel β
- Schulterwinkel α
- Typ der Keilgeometrie (Keilwirkung einseitig oder beidseitig)

Ein Kennfeld besteht aus zwei Bausteinen, der Kennfeld-Tabelle und dem Kennfeld-Diagramm (**Bild 29**). Das Kennfeld-Diagramm wird durch die in AP 3.7 dargestellten Versuche erstellt und zeigt die Abhängigkeit der Größe des Mannesmann-Fehlers (z. B. der Mittelwert der Riss-Breite) von der Variablen n . Die Kennfeld-Tabelle ist als aktives System auf Basis einer Excel-Datei aufgebaut. Der Benutzer kann durch Variation der Bauteil- und/oder Werkzeugparameter unmittelbar die Auswirkung auf die Variable n und damit, in Abhängigkeit der Werkzeuggeschwindigkeit, die Gefahr und Größenordnung von Innenrissen abschätzen. Diese praxisorientierte Darstellung ermöglicht dem Benutzer, zum Beispiel dem Werkzeugkonstrukteur, die Auslegung der QKW-Werkzeugparameter optimal anzupassen.

In den Kennfeldern wird ausschließlich der Bauteilbereich mit der größten Anzahl an Überrollungen bzw. der höchsten „Mannesmann-Belastung“ dargestellt. Dieser Bereich wird durch die Werkzeuglänge L_{Streck_x1} definiert.

Kennfeld-Tabelle

| Bauteilgeometrie | | | | | Werkzeugparameter | | | Prozessparameter | Ergebnis |
|------------------|-------|-------------------------|-------|------------------------|---|---------|---|------------------------|----------|
| Eingabewerte | | | | | Eingabewerte | | | Eingabewerte | |
| D_0 | D_1 | B_3 (reduz. Länge) | s_0 | Längenfaktor λ | Schulterwinkel α (Streckzone) | β | Walzen- (Werkzeug) geschwindigkeit v_{Wz} | n für L_{Streck_X1} | |
| [mm] | [mm] | [mm] | [] | [] | [°] | [°] | [mm/s] | [] | |
| 37,0 | 31,5 | 80,00 | 0,15 | 2,5 | 25,0 | 8,0 | 400,0 | 1,1 | |
| 37,0 | 27,8 | 80,00 | 0,25 | 2,9 | 25,0 | 8,0 | 400,0 | 1,9 | |
| 37,0 | 24,0 | 80,00 | 0,35 | 3,3 | 25,0 | 8,0 | 400,0 | 2,8 | |
| 37,0 | 20,5 | 80,00 | 0,45 | 3,9 | 25,0 | 8,0 | 400,0 | 3,6 | |
| 37,0 | 16,5 | 80,00 | 0,55 | 4,8 | 25,0 | 8,0 | 400,0 | 4,6 | |
| 37,0 | 13,0 | 80,00 | 0,65 | 6,2 | 25,0 | 8,0 | 400,0 | 5,5 | |

n (z.B. =4,6)

Kennfeld-Diagramm

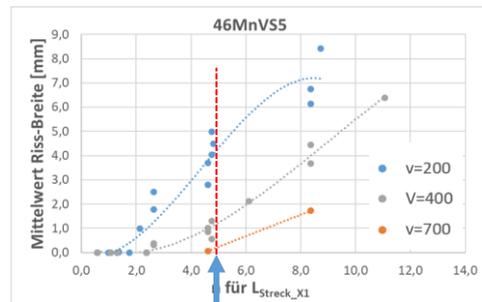
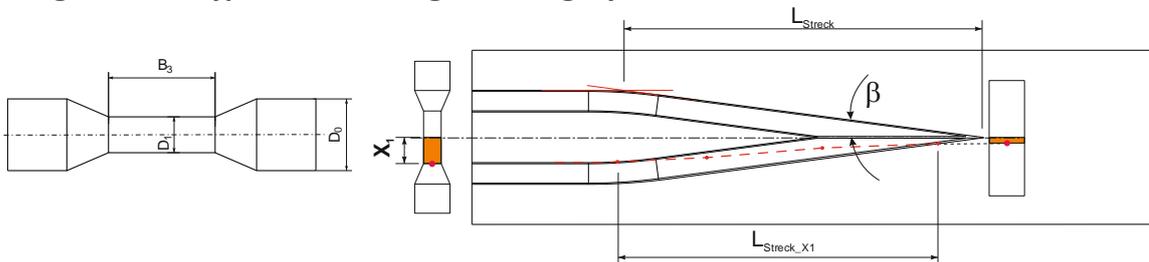


Bild 29: Aufbau Kennfeld

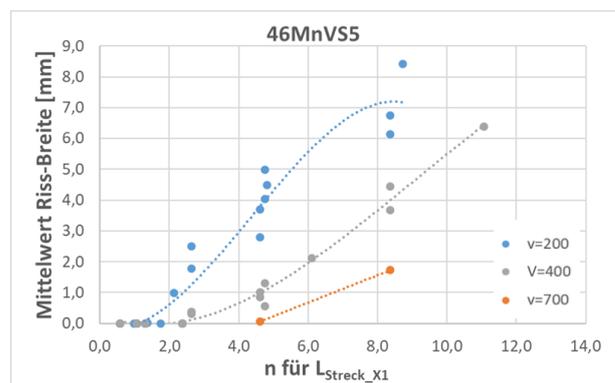
In Abhängigkeit der zu walzenden Werkstückgeometrie und der gewählten Werkzeugkonstruktion werden unterschiedliche Keilgeometrien verwendet. Da die Keilgeometrie einen erheblichen Einfluss auf die Variable n ausübt, werden die beiden grundlegenden Keilgeometrien bei dem Design der Kennfelder getrennt behandelt:

- Keilgeometrie Typ A: Keilwirkung beidseitig, symmetrisch
- Keilgeometrie Typ B: Keilwirkung einseitig, unsymmetrisch

Keilgeometrie Typ A: Keilwirkung beidseitig, symmetrisch



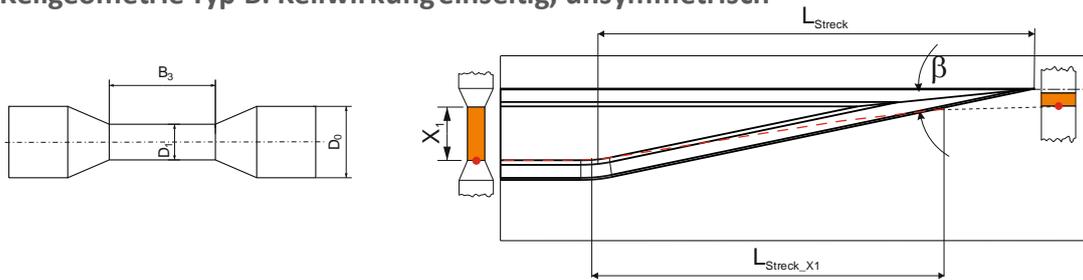
| Bauteilgeometrie | | | | | Werkzeugparameter | | | Prozessparameter | Ergebnis |
|------------------|-------|-------------------------|-------|------------------------|---|---------|---|------------------------|----------|
| Eingabewerte | | | | | Eingabewerte | | | Eingabewerte | |
| D_0 | D_1 | B_3 (reduz. Länge) | s_0 | Längenfaktor λ | Schulterwinkel α (Streckzone) | β | Walzen- (Werkzeug) geschwindigkeit v_{Wz} | n für L_{Streck_X1} | |
| [mm] | [mm] | [mm] | [] | [] | [°] | [°] | [mm/s] | [] | |
| 37,0 | 31,5 | 80,00 | 0,15 | 2,5 | 25,0 | 8,0 | 400,0 | 1,1 | |
| 37,0 | 27,8 | 80,00 | 0,25 | 2,9 | 25,0 | 8,0 | 400,0 | 1,9 | |
| 37,0 | 24,0 | 80,00 | 0,35 | 3,3 | 25,0 | 8,0 | 400,0 | 2,8 | |
| 37,0 | 20,5 | 80,00 | 0,45 | 3,9 | 25,0 | 8,0 | 400,0 | 3,6 | |
| 37,0 | 16,5 | 80,00 | 0,55 | 4,8 | 25,0 | 8,0 | 400,0 | 4,6 | |
| 37,0 | 13,0 | 80,00 | 0,65 | 6,2 | 25,0 | 8,0 | 400,0 | 5,5 | |



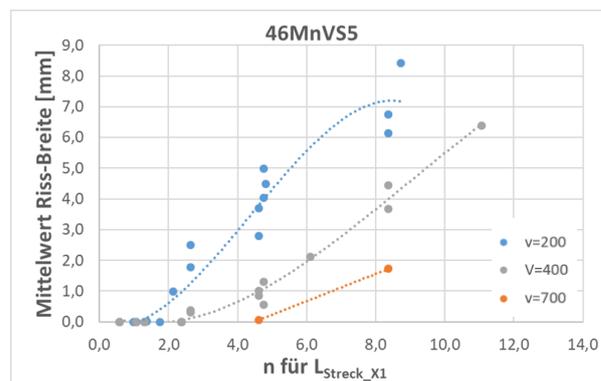
v: Werkzeuggeschwindigkeit

Bild 30: Definition Keilgeometrie Typ A und Kennfeld für den Werkstoff 46MnVS5

Keilgeometrie Typ B: Keilwirkung einseitig, unsymmetrisch



| Bauteilgeometrie | | | | | Werkzeugparameter | | Prozessparameter | Ergebnis |
|------------------------|------------------------|--|-----------------------|-----------------------|---|----------|--|--------------------------------------|
| Eingabewerte | | | | | Eingabewerte | | Eingabewerte | |
| D ₀ [mm] | D ₁ [mm] | B ₃ (reduz. Länge) [mm] | ε _D [] | Längenfaktor λ [] | Schulterwinkel α (Streckzone) [°] | β [°] | Walzen- (Werkzeug-)geschwindigkeit v _{Wz} [mm/s] | n für L _{Stretch_X1} [] |
| 37,0 | 31,5 | 80,00 | 0,15 | 2,5 | 25,0 | 8,0 | 400,0 | 1,8 |
| 37,0 | 27,8 | 80,00 | 0,25 | 2,9 | 25,0 | 8,0 | 400,0 | 3,1 |
| 37,0 | 24,0 | 80,00 | 0,35 | 3,3 | 25,0 | 8,0 | 400,0 | 4,5 |
| 37,0 | 20,5 | 80,00 | 0,45 | 3,9 | 25,0 | 8,0 | 400,0 | 5,8 |
| 37,0 | 16,5 | 80,00 | 0,55 | 4,8 | 25,0 | 8,0 | 400,0 | 7,3 |
| 37,0 | 13,0 | 80,00 | 0,65 | 6,2 | 25,0 | 8,0 | 400,0 | 8,7 |

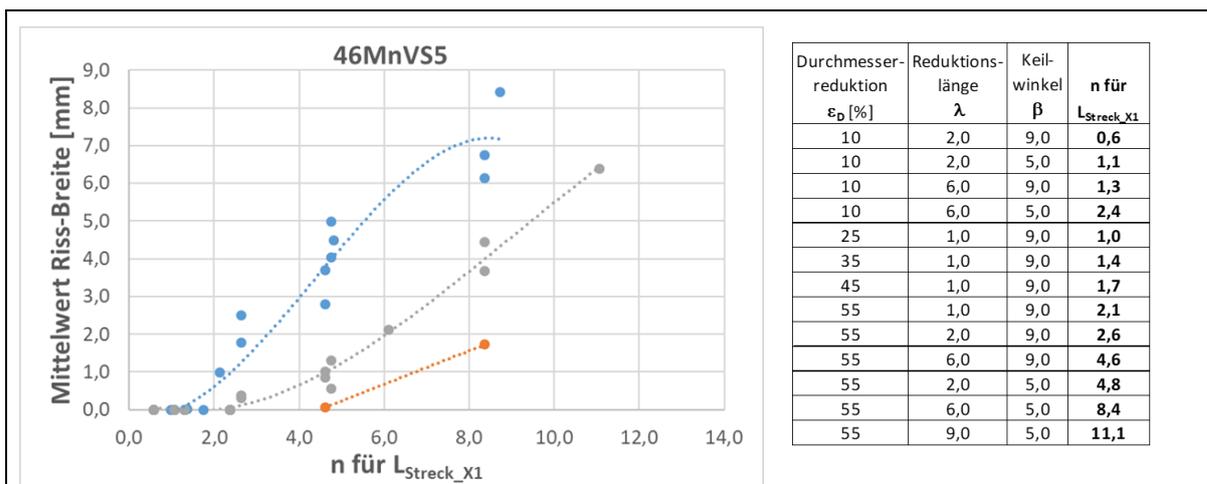


v: Werkzeuggeschwindigkeit

Bild 31: Definition Keilgeometrie Typ B und Kennfeld für den Werkstoff 46MnVS5

Für die drei untersuchten Stahlwerkstoffe wurden die Kennfelder für die Keilgeometrie Typ A erstellt.

An den Kennfeldern wird der große Empfindlichkeitsunterschied der Werkstoffe gegenüber der Bildung von Innenrisen ersichtlich. Der Werkstoff 46MnVS5 zeigt mit deutlichem Abstand die höchste Empfindlichkeit, gefolgt von dem Werkstoff C70S6. Der Werkstoff C45 ist weitestgehend unempfindlich gegen Innenrisenbildung. Diese Abstufung wird auch aus der industriellen Praxis bestätigt.



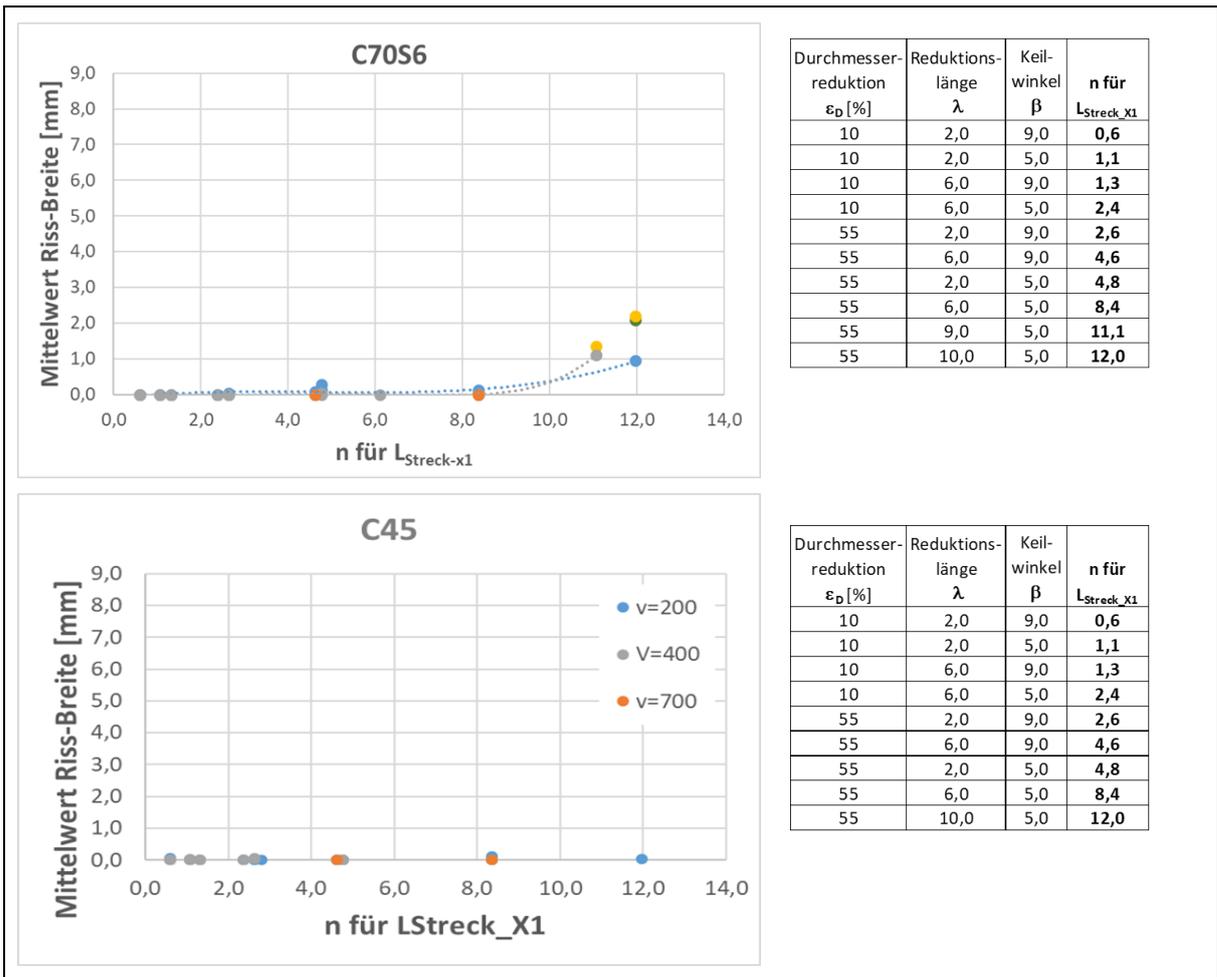


Bild 32: Kennfeld-Diagramme der drei Stahlwerkstoffe für die Keilgeometrie Typ A

3.9 Anwendung und Validierung der Kennfelder

Die Kennfelder werden in 3 realen Anwendungsfällen überprüft. Hierzu werden für die Flachbackenverfahren 2 Werkzeuge ausgelegt, gefertigt und auf der Versuchsanlage getestet. Die sogenannten Realwerkzeuge unterscheiden sich durch die Größe des Keilwinkels (9° und 4°). Die zu erzeugende Bauteilgeometrie ist bei beiden Werkzeugen identisch. Die Validierung mit einem Rundwerkzeug erfolgt mit einem Serienwerkzeug im Produktionsbetrieb eines der Industriepartner.

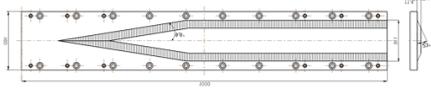
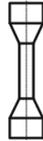
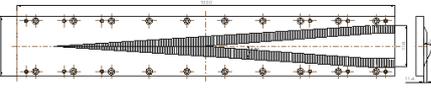
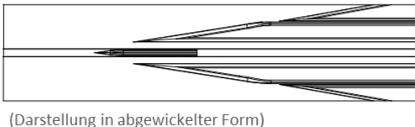
| Bezeichnung | Werkzeuggeometrie | Verfahren | Bauteil | Maschine | Werkstoffe |
|------------------------|--|----------------|---|------------------|-------------------------|
| Real- werkzeug 1 |  | Flachbacke |  | LFM-QKW | 46MnVS5 C45 C70S6 |
| Real- werkzeug 2 |  | | | | |
| Industrie- werkzeug |  (Darstellung in abgewickelter Form) | Rund- walze |  | Smeral ULS 70 | 46MnVS5 |

Bild 33: Übersicht der Validierungsversuche

3.9.1 Realwerkzeuge

Die Versuche mit den Realwerkzeugen wurden auf der Versuchsanlage unter folgenden Randbedingungen durchgeführt:

Konstante Versuchsparameter

- Ausgangsgeometrie ($D_0 \times L$): 37,0; 35,0; 36,5 x 84
(46MnVS5; C45; C70S6,
Chargen identisch mit den bisherigen Versuchen)
- Erwärmungstemperatur: 1.250°C
- Werkzeugtemperatur: 40°C

Varierte Einflussgrößen

- Durchmesserreduktion ε_D : 44 – 65%
- Werkzeuggeschwindigkeit: 200, 400 mm/s
(Stichversuche mit 100, 700 mm/s)

Anzahl Versuche je Werkstoff

- Versuchseinstellungen (46MnVS5): 19
- Versuchseinstellungen (C45, C70S6): je 8
- Versuchsbelegung: 5-fach
- Gesamtanzahl Proben: 135

Kontrolle auf Innenrisse

- Auftrennen der Proben und optische Messung der Fehlergrößen



Bild 34: Ergebnis der 5-fach Belegung mit dem Realwerkzeug

Ergebnisse der Validierung mit den Realwerkzeugen

Die Validierung zeigt teilweise abweichende Ergebnisse von den erstellten Kennfeldern. Es besteht eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse in der Mitte des reduzierten Bereichs (Bild 32, linkes Diagramm) im Schaft-Außenbereich zeigen die Real-Walzprodukte eine wesentlich geringere Anfälligkeit zur Bildung von Innenrissen auf (**Bild 35**, rechtes Diagramm).

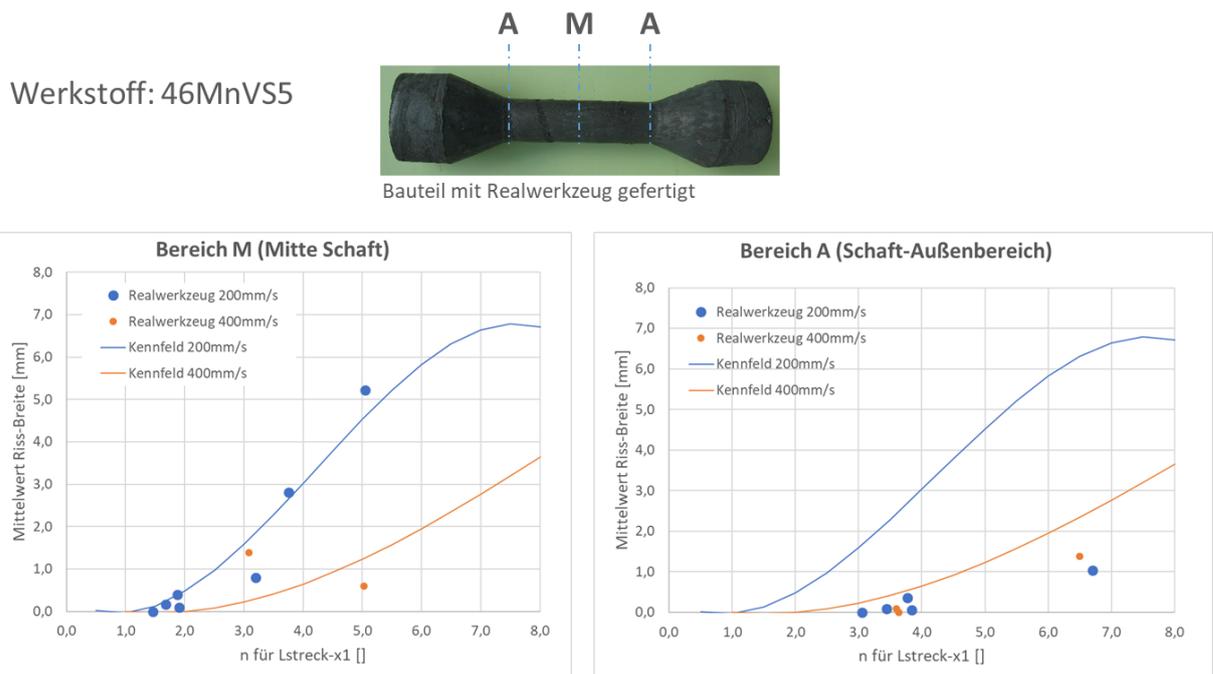


Bild 35: Kennfeld (Linien) des Werkstoffs 46MnVS5 mit den Ergebnissen der Realwerkzeuge (Punkte) für die Bauteil-Querschnittsbereiche A und M.

Bei den Werkstoffen C45 und C70S6 wurde keine Innenfehler festgestellt.

Als Ursache für die teilweise erhebliche Abweichung der Realwerkzeug-Ergebnisse von den erstellten Kennfeldern wurde der Einfluss der spezifischen Werkzeugbereiche ermittelt. Die Bildung von Innenrissen ist neben den bisher untersuchten Einflussgrößen zusätzlich noch von der Art der Werkzeuggeometrie abhängig, mit der die Durchmesserreduzierung erfolgt:

- Schulterfläche → geringster Einfluss auf Innenrissbildung

- Gratlinie der Einstechzone → mittlerer Einfluss auf Innenrisssbildung
- (Parallele Werkzeugflächen ohne Keilgeometrie) → größter Einfluss auf Innenrisssbildung

Die im Rahmen des Projektes erstellten Kennfelder entsprechen der Einflussgröße „Gratlinie der Einstechzone“.

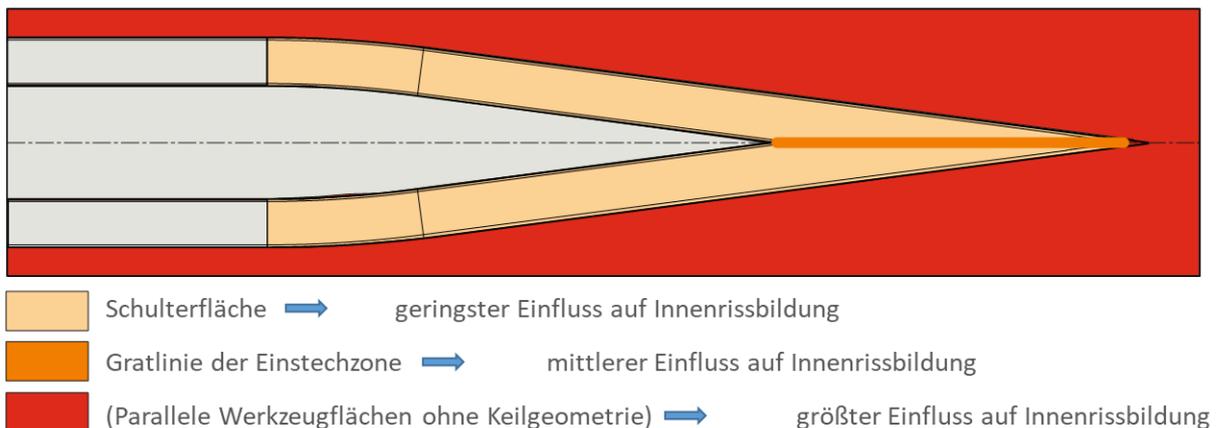


Bild 36: Definitionen der Werkzeuggeometrien und deren Einfluss auf die Innenrisssbildung

Dass die verschiedenen Bereiche der Werkzeuggeometrie einen unterschiedlichen Einfluss auf die Bildung von Innenrisen haben ist keine neue Erkenntnis. Die Anwendung paralleler Werkzeugflächen wird von erfahrenen Werkzeugkonstruktoren strikt vermieden, da hier die extreme Bildung von Innenrisen, auch durch das Wissen aus dem Mannesmann-Rohrwalz-Prozess, bekannt ist. Eine neue Erkenntnis ist allerdings der signifikante Unterschied des Einflusses von Schulterfläche und Gratlinie der Einstechzone. Dieser Unterschied war weder dem LFM, noch den beteiligten Industrieunternehmen bewusst und auch aus der Literatur nicht ersichtlich. Aufgrund dieses neuen Wissenstands muss die Variable **n** um eine weitere Einflussgröße ergänzt werden.

Zur Bestätigung des Einflusses der Werkzeuggeometrie wurde Sonderversuche durchgeführt, wobei die Umformung jeweils ausschließlich in einem der 3 Werkzeugbereiche vorgenommen wurde und die dimensionslose Variable **n** ungefähr von gleicher Größe war. Das Ergebnis in **Bild 37** zeigt die drastischen Unterschiede der Innenrisse in Abhängigkeit der umformenden Werkzeuggeometrie.

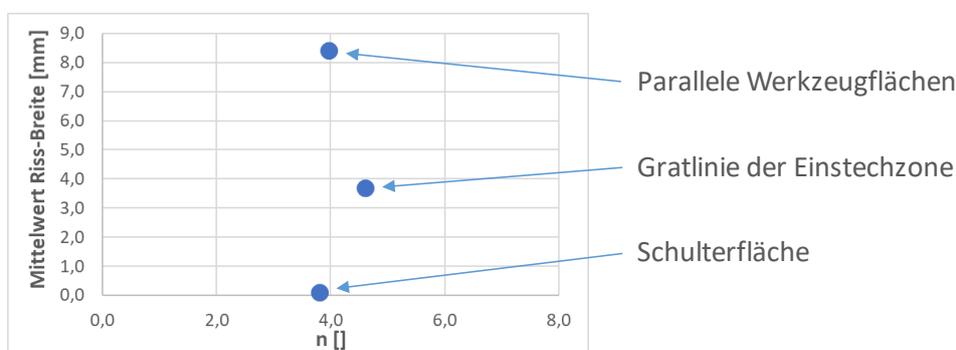


Bild 37: Einfluss der Werkzeugbereiche auf die Bildung von Innenrisen (Werkstoff 46MnVS5, Werkzeuggeschwindigkeit $v_{Wz} = 200\text{mm/s}$)

Auswirkung auf die Aussagefähigkeit der erstellten Kennfelder:

Die Kennfelder sind sehr gut zur Vergleichbarkeit verschiedener Werkstoffe und/oder Chargen geeignet, aber nicht zur quantitativen Vorhersage von Materialschädigungen.

3.9.2 Industrierwerkzeug

Die Versuche mit dem Industrierwerkzeug wurde auf einer Produktionsanlage unter folgenden Randbedingungen durchgeführt:

Konstante Versuchsparameter

- Ausgangsgeometrie ($D_0 \times L$): 36,0 x 242
- Werkstoff: 46MnVS5 (Charge ungleich den Laborversuchen)
- Erwärmungstemperatur: 1.290°C
(Induktionsanlage)
- QKW-Maschine: Smeral, ULS70
- Walzendurchmesser: 700 mm
- Werkzeugtemperatur: 90°C
- Werkzeuggeschwindigkeit: 405 mm/s

Variierte Einflussgrößen

- Durchmesserreduktion (für D_1) ϵ_D : 42 – 54%
- Genutzte Werkzeuglänge
Entnahme von Walzstücken bei 3 Positionen:
 - $L_{\text{Streck_X1-0}}$
 - $L_{\text{Streck_x1-max}}$
 - L_{gesamt} (Werkzeugende)

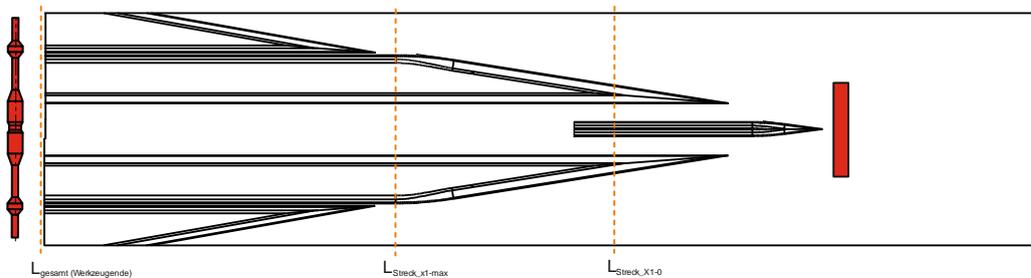


Bild 38: Industrierwerkzeug (abgewickelt) mit den Positionen der Walzstückentnahme

Die Auswahl der Entnahmepositionen erfolgte in der Art, dass Rückschlüsse auf den Einfluss der einzelnen Werkzeugbereiche (Gratlinie der Einstechzone, Schulterfläche, Kalibrierbereich), wie bei den Realwerkzeugen ermittelt, möglich sind.

Anzahl Versuche je Werkstoff

- Versuchseinstellungen (46MnVS5): 5
- Versuchsbelegung: 3-fach
- Gesamtanzahl Proben: 15

Kontrolle auf Innenrisse

- Auftrennen der Proben in mehreren Querschnittsbereichen und optische Messung der Fehlergrößen
- Abfräsen einer Probe in Längsrichtung zur Kontrolle der Längsausprägung von Innenrisse



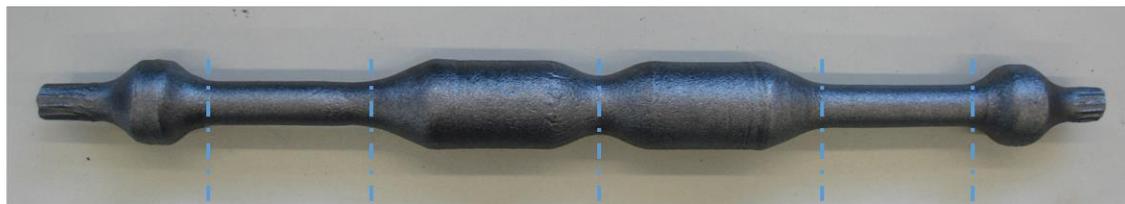
Bild 39: QKW-Maschine, Smeral ULS 70



Bild 40: Walzprodukte, Entnahme bei verschiedenen Werkzeugpositionen

Ergebnisse der Validierung mit dem Industriewerkzeug

Die Ergebnisse der Industrieanwendung bestätigen die Ergebnisse der Realwerkzeuge hinsichtlich des Einflusses der verschiedenen Werkzeugbereiche. Die im Rahmen der Untersuchung gefertigten Walzprodukte weisen in den kritischen Querschnitten keine Innenfehler auf. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass für die Kennfelderstellung und für die Industrieanwendung unterschiedliche Material-Chargen eingesetzt wurden.



| | | | | | |
|-----------------------------|-------|-------|-----|-------|-------|
| Bezeichnung: | B_L | C_L | D | C_R | B_R |
| ε_D : | 51% | 51% | 33% | 51% | 51% |
| n für L_{streck} : | 6,3 | 1,7 | 1,2 | 1,7 | 6,3 |

Bild 41: Bezeichnungen am Walzstück und Angabe der jeweiligen Durchmesserreduktion ε_D und der Variablen Kenngröße n

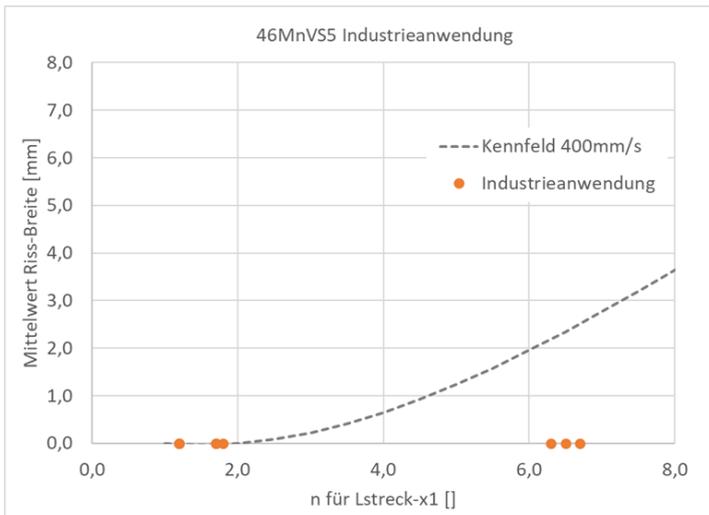


Bild 42: Kennfeld (Linie) des Werkstoffs 46MnVS5 mit den Ergebnissen der Industrieanwendung (Punkte)



Bild 43: Längsschnitt durch ein Walzstück, keine Innenfehler ersichtlich

Einsparpotential an Primärenergie und CO₂ Emission

Im Rahmen der Validierung mit dem Industriewerkzeug wurde versuchsweise der Walzspalt um 1,5mm verringert. Hierdurch werden, mit Ausnahme des Ausgangsdurchmessers, alle Walzstückdurchmesser ebenfalls um 1,5mm reduziert. Auch an diesen stärker reduzierten Durchmessern waren keine Innenfehler ersichtlich. Unter Berücksichtigung des relativ geringen Einflusses auf die Variable **n** (**Bild 44**) und der Erkenntnisse aus den erstellten Kennfeldern erscheint diese erhöhte Durchmesserreduzierung aus Sicht des „Mannesmann-Effektes“ realisierbar. Die Materialeinsparung je Walzstück beträgt 122g, der Materialüberschuss kann durch diese Einsparung von 33,8% auf 30,5% reduziert werden. Hieraus folgt das in **Bild 45** dargestellte Einsparpotential an Primärenergie und CO₂ Emission.

| | Bauteilgeometrie | | | | Werkzeugparameter | | Prozessparameter | Ergebnis | |
|-----------|------------------|----------------|----------------------------------|----------------|-------------------|----------------------------------|------------------|--|---------------------------------|
| | Eingabewerte | | | | Eingabewerte | | Eingabewerte | Überrollungen n | |
| | D ₀ | D _n | B ₃ (reduz. Länge) | ε _D | Längenfaktor λ | Schulterwinkel α (Streckzone) | β | Walzen- (Werkzeug-)geschwindigkeit v _{Wz} | n für L _{Streck X1} |
| | [mm] | [mm] | [mm] | [] | [] | [°] | [°] | [mm/s] | [] |
| Serie | 36,0 | 18,0 | 75 | 0,50 | 4,2 | 24,0 | 8,3 | 405,0 | 6,2 |
| Reduziert | 36,0 | 16,5 | 75 | 0,54 | 4,5 | 24,0 | 8,3 | 405,0 | 6,7 |
| | | D ₃ | | | | | | | |
| Serie | 36,0 | 16,0 | 30 | 0,56 | 1,9 | 24,0 | 8,3 | 405,0 | 3,9 |
| Reduziert | 36,0 | 14,5 | 30 | 0,60 | 2,1 | 24,0 | 8,3 | 405,0 | 4,3 |
| | | D ₄ | | | | | | | |
| Serie | 36,0 | 35,0 | 13 | 0,03 | 0,4 | 24,0 | 8,3 | 405,0 | 0,1 |
| Reduziert | 36,0 | 33,5 | 13 | 0,07 | 0,4 | 24,0 | 8,3 | 405,0 | 0,3 |

Bild 44: Einfluss der erhöhten Durchmesserreduzierung auf die Variable n

| Einsparpotential ¹⁾ bei der Pleuefertigung durch... | Primärenergie [GJ / Jahr] | CO ₂ Emission [to / Jahr] |
|--|---------------------------|--------------------------------------|
| Materialerwärmung ²⁾ | 3.623 | 159 |
| Materialherstellung ³⁾ | 17.962 | 1.290 |
| Σ | 21.585 | 1.449 |

1) Bei 3,44 Mio. Pkw Neuzulassungen pro Jahr; 4 Pleuel pro Motor; 61g Einsparung pro Pleuel

2) Erwärmungsenergie 400 kWh/to; Primärenergiefaktor 3; CO₂ Emission 474 g/kWh (deutscher Strommix 2018; Umweltbundesamt)

3) CO₂ Emission Stahlherstellung 1537 kg/toStahl

Bild 45: Einsparpotential von Primärenergie und CO₂ Emission bei der Herstellung von Pkw-Pleuel

3.10 Stichversuch an einem Aluminium-Werkstoff

Der Stichversuch dient zur Überprüfung, ob die prinzipielle Vorgehensweise und die Ausführungen des Standardversuchs auch auf Aluminium-Werkstoffe anwendbar sind. Der Werkstoff für die Untersuchung und die Prozessparameter für die Warmumformung werden von einem der Industriepartner zur Verfügung gestellt.

Konstante Versuchsparameter:

- Werkstoff
 - Legierung: EN AW-6082 (AlSi1MgMn)
 - Technologischer Zustand: F
 - Herstellungsverfahren: Strangpressen
- Ausgangsgeometrie (D₀ x L): 37,0 x 84
- Erwärmungstemperatur: 525°C

(Elektro-Muffelofen)

- Werkzeugtemperatur: 40°C
- Werkzeuggeometrie: identisch mit Stahlversuchen

Die ersten Vorversuche zeigten Probleme beim Walzvorgang, die zu nicht prüfbaren Versuchsteilen führten:



Bild 46: Walzergebnisse der ersten Vorversuche

Durch größere Verrundung und stufenweise Änderung der Höheneinstellung der Führungsliniale konnten Walzprodukte mit guter geometrischer Qualität gefertigt werden:



Bild 47: Aluminium-Walzprodukt mit guter geometrischer Qualität.

Mit der optimierten Walzvorrückung wurden 6 Versuchseinstellungen mit Variation der Einflussgrößen Reduktionslänge λ , Keilwinkel β und Werkzeuggeschwindigkeit v_{Wz} durchgeführt. Alle Versuche wurden 5-fach belegt.

| V-Nr. | Durchmesser- reduktion ϵ_D [%] | Reduktions- länge λ [°] | Keil- winkel β [°] | Geschwindig- keit v_{Wz} [mm/s] | n für L_{Streck_X1} [°] |
|-------|--|--|-----------------------------------|--|----------------------------------|
| 1 | 55 | 6,0 | 5,0 | 200,0 | 8,4 |
| 2 | 55 | 6,0 | 9,0 | 200,0 | 4,6 |
| 3 | 55 | 6,0 | 5,0 | 700,0 | 8,4 |
| 4 | 55 | 6,0 | 9,0 | 700,0 | 4,6 |
| 5 | 55 | 9,0 | 5,0 | 200,0 | 11,1 |
| 6 | 55 | 9,0 | 5,0 | 700,0 | 11,1 |

Bild 48: Versuchseinstellungen Aluminium-Walzen

Ergebnis der Stichversuche:

- Die prinzipielle Vorgehensweise und die Ausführungen des Standardversuchs sind mit geringfügigen Änderungen an der Walzvorrückung auch auf Aluminium-Werkstoffe anwendbar.
- Bei der Untersuchung der vorliegenden Aluminium-Legierung wurden bei keiner Parameterkombination Innenrisse festgestellt.



Bild 49: Trennflächen der Aluminium Walzproben

3.11 Erstellen eines Anwenderleitfadens

Vorgehensweise zur Erstellung von Arbeitskennfeldern

Die Basis der Arbeitskennfelder bildet die dimensionslose Variable n , die ein Maß für die Anzahl der Überrollungen eines reduzierten Bauteilbereichs darstellt und dadurch eine Abschätzung der Gefahr und Größenordnung von Innenrissen ermöglicht.

n ist eine Funktion folgender Einflussgrößen:

- Ausgangsdurchmesser D_0
- Durchmesserreduktion ε_D
- Reduzierter Länge B_3
- Keilwinkel β
- Schulterwinkel α
- Typ der Keilgeometrie (Keilwirkung einseitig oder beidseitig)

In den Kennfeldern wird ausschließlich der Bauteilbereich mit der größten Anzahl an Überrollungen bzw. der höchsten „Mannesmann-Belastung“ dargestellt. Dieser Bereich wird durch die Werkzeuglänge L_{Streck_X1} definiert.

Die prinzipielle Vorgehensweise ist in **Bild 50** dargestellt.

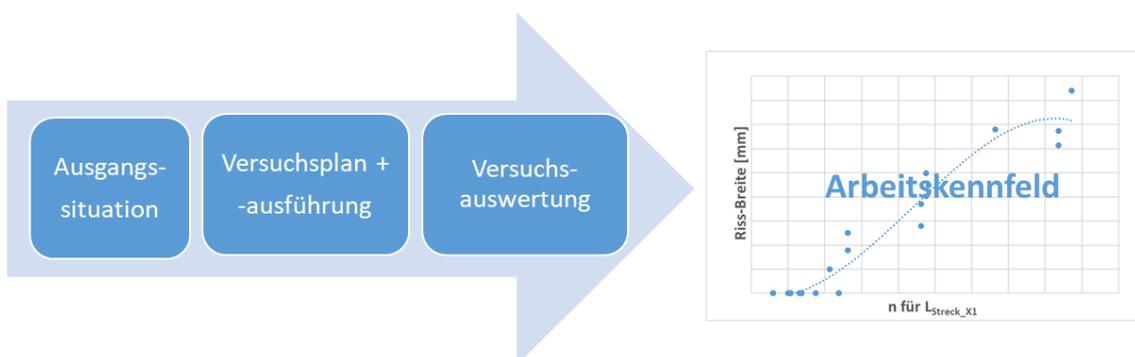


Bild 50: Prinzipielle Vorgehensweise zur Erstellung von Arbeitskennfeldern

Die Ausgangssituation liefert die Informationen über die Bauteilgeometrie, die Parameter des Walzwerkzeugs und des Umformprozesses. Aus diesen Informationen wird der für die Bildung von Innenrissen kritische Bauteilbereich und die Werkzeuggeschwindigkeit abgeleitet.

Der kritische Bauteilbereich wird durch den Bereich größter Durchmesserreduktion ε_D und größter Reduktionslänge λ bestimmt.

Der Versuchsplan wird mit dem Programm zur Ermittlung der Variablen n (die Excel-Tabelle wird vom Industrieverband Massivumformung ergänzend zum Leitfaden zur Verfügung gestellt) erstellt. Das Programm berechnet auch automatisch die notwendigen Parameter der Prüfvorrichtung. Für die Variable n wird der maximale Wert n_{\max} aus der Ausgangs-situation bestimmt, der minimale Wert n_{\min} sollte kleiner als 2,0 betragen. Die Schrittweite für die auszuführenden Versuche sollte zwischen n_{\min} und n_{\max} ca. 1,0 betragen. Die Schrittweitenänderung von n kann im Programm durch Variation der reduzierten Länge B_3 erfolgen.

| Bauteilgeometrie | | | | | Werkzeugparameter | | Prozessparameter | Ergebnis | Parameter Prüfvorrichtung | | | |
|------------------|-------|-------------------------|--------------|------------------------|---|---------|---|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| Eingabewerte | | | | | Eingabewerte | | Eingabewerte | Überrollungen n | | | | |
| D_0 | D_1 | B_3 (reduz. Länge) | ϵ_D | Längenfaktor λ | Schulterwinkel α (Streckzone) | β | Walzen- (Werkzeug-)geschwindigkeit v_{Wz} | n für $L_{Streck, X1}$ | Weg h vertikal [mm] | $v_{Vertikal}$ [mm/s] | Weg L hori- zontal [mm] | $v_{Horizontal}$ [mm/s] |
| 45,0 | 20,0 | 105,00 | 0,56 | 5,3 | 25,0 | 8,5 | 430,0 | 7,3 | 25,0 | 14,47 | 743,2 | 430,0 |
| 45,0 | 20,0 | 120,00 | 0,56 | 6,0 | 25,0 | 8,5 | 430,0 | 8,1 | 25,0 | 13,05 | 823,7 | 430,0 |
| 45,0 | 20,0 | 100,00 | 0,56 | 5,0 | 25,0 | 8,5 | 430,0 | 7,0 | 25,0 | 15,01 | 716,3 | 430,0 |
| 45,0 | 20,0 | 80,00 | 0,56 | 4,0 | 25,0 | 8,5 | 430,0 | 6,0 | 25,0 | 17,65 | 608,9 | 430,0 |
| 45,0 | 20,0 | 60,00 | 0,56 | 3,0 | 25,0 | 8,5 | 430,0 | 4,9 | 25,0 | 21,43 | 501,5 | 430,0 |
| 45,0 | 20,0 | 40,00 | 0,56 | 2,0 | 25,0 | 8,5 | 430,0 | 3,9 | 25,0 | 27,27 | 394,1 | 430,0 |
| 45,0 | 20,0 | 20,00 | 0,56 | 1,0 | 25,0 | 8,5 | 430,0 | 2,8 | 25,0 | 37,49 | 286,8 | 430,0 |
| 45,0 | 20,0 | 5,00 | 0,56 | 0,3 | 25,0 | 8,5 | 430,0 | 2,0 | 25,0 | 52,13 | 206,2 | 430,0 |

Bild 51: Programmoberfläche zur Ermittlung der Variablen n , des Prüfplans und der Parametereinstellungen der Prüfvorrichtung

Für die Versuchsausführung sind folgende Hilfsmittel erforderlich:

- QKW-Versuchseinrichtung, welche neben einer horizontalen (oder rotatorischen) auch eine definierte vertikale Werkzeugbewegung ermöglicht.
- Versuchswerkzeug

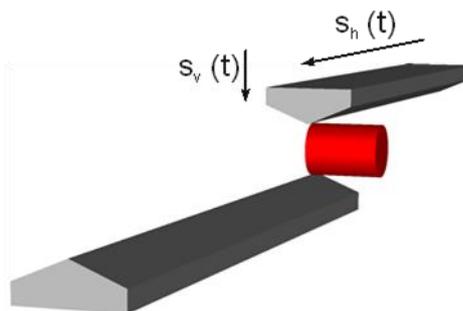


Bild 52: Prinzip der QKW-Versuchseinrichtung und der Werkzeuggeometrie

- Erwärmer für das Versuchsmaterial
- Trennschleifmaschine (oder entsprechende metallografische Laborausstattung) zum Trennen der Walzproben.
- Optisches 2D-Koordinatenmessgerät zur Bestimmung von Rissgrößen

Zur statistischen Absicherung sollten die Versuche mindestens 3-fach belegt werden.

Für die Versuchsauswertung werden die Walzproben an den kritischen Stellen getrennt und an den Trennflächen die Fehlergrößen bestimmt. Die Fläche der Innenfehler kann mit Bildverarbeitungsprogrammen bestimmt werden.

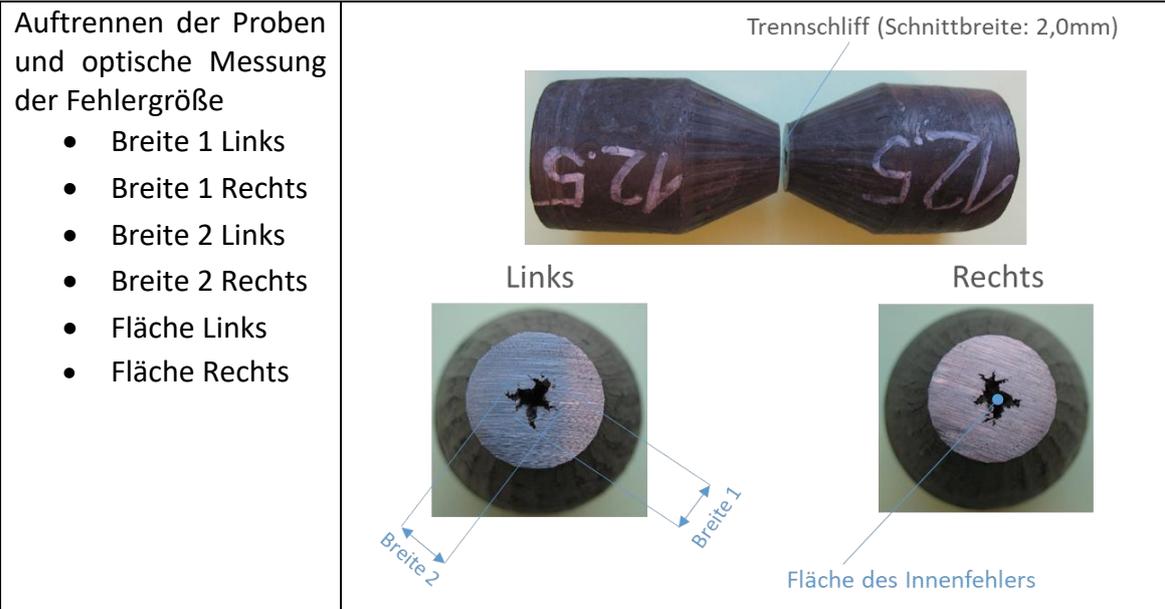


Bild 53: Bestimmung der Fehlergrößen

Aus den ermittelten Fehlergrößen wird das Arbeitskennfeld erstellt. Hierbei wird die ausgewählte Fehlergröße über der Variablen n aufgetragen.

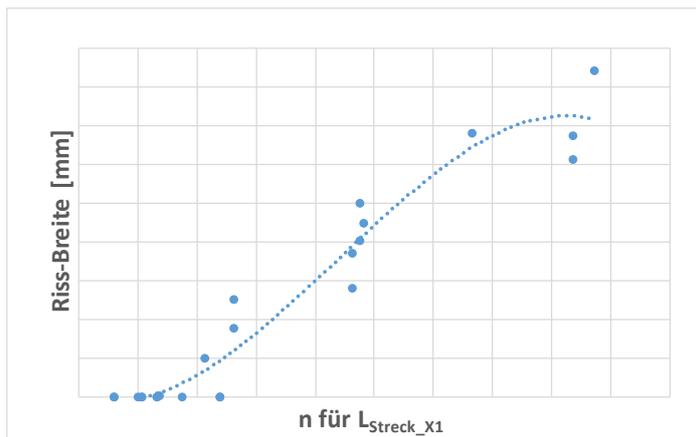


Bild 54: Arbeitskennfeld

Beispiel zur Vorgehensweise zur Erstellung von Arbeitskennfeldern

Ausgangssituation

- Bauteilgeometrie

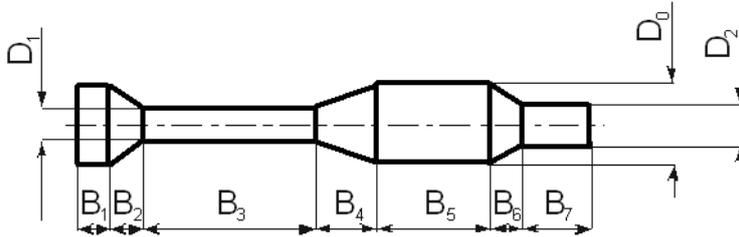


Bild 55: Beispiel Bauteilgeometrie

- $D_0 = 45$
- $D_1 = 20$ ($\epsilon_D = 56\%$)
- $D_2 = 25$ ($\epsilon_D = 44\%$)
- $B_3 = 105$ ($\lambda = 5,3$)
- $B_7 = 40$ ($\lambda = 1,6$)
- Kritischer Bauteilbereich aufgrund größter Durchmesserreduktion ϵ_D und größter Reduktionslänge λ : Bauteilbereich B_3
- Werkzeugparameter
 - Keil für Bauteilbereich B_3 : einseitig, $\alpha = 25^\circ$, $\beta = 8,5^\circ$
- Prozessparameter
 - Drehzahl Walze: 10 min^{-1}
 - Durchmesser Walzwerkzeuge: 820 mm
 - Umfangsgeschwindigkeit: 430 mm/s

Versuchsplan und -ausführung

Der Versuchsplan wird auf Basis des vorgegebenen Programms erstellt:

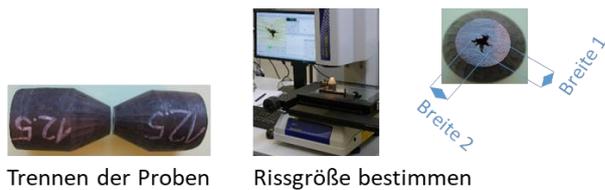
| Bauteilgeometrie | | | | | Werkzeugparameter | | Prozessparameter | | Ergebnis | Parameter Prüfvorrichtung | | | |
|------------------|---------------|-------------------------|--------------|------------------------|---|---------|---|---------------------------|-----------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------------|----------------------------|
| Eingabewerte | | B_3 (reduz. Länge) | ϵ_D | Längenfaktor λ | Schulterwinkel α (Streckzone) | β | Walzen- (Werkzeug-) geschwindigkeit v_{Wz} | n für $L_{Streck, X1}$ | Überrollungen n | Weg h vertikal [mm] | $v_{Vertikal}$ [mm/s] | Weg L hori- zontal [mm] | $v_{Horizontal}$ [mm/s] |
| D_0 [mm] | D_1 [mm] | | | | | | | | | | | | |
| 45,0 | 20,0 | 105,00 | 0,56 | 5,3 | 25,0 | 8,5 | 430,0 | 7,3 | | 25,0 | 14,47 | 743,2 | 430,0 |
| 45,0 | 20,0 | 120,00 | 0,56 | 6,0 | 25,0 | 8,5 | 430,0 | 8,1 | | 25,0 | 13,05 | 823,7 | 430,0 |
| 45,0 | 20,0 | 100,00 | 0,56 | 5,0 | 25,0 | 8,5 | 430,0 | 7,0 | | 25,0 | 15,01 | 716,3 | 430,0 |
| 45,0 | 20,0 | 80,00 | 0,56 | 4,0 | 25,0 | 8,5 | 430,0 | 6,0 | | 25,0 | 17,65 | 608,9 | 430,0 |
| 45,0 | 20,0 | 60,00 | 0,56 | 3,0 | 25,0 | 8,5 | 430,0 | 4,9 | | 25,0 | 21,43 | 501,5 | 430,0 |
| 45,0 | 20,0 | 40,00 | 0,56 | 2,0 | 25,0 | 8,5 | 430,0 | 3,9 | | 25,0 | 27,27 | 394,1 | 430,0 |
| 45,0 | 20,0 | 20,00 | 0,56 | 1,0 | 25,0 | 8,5 | 430,0 | 2,8 | | 25,0 | 37,49 | 286,8 | 430,0 |
| 45,0 | 20,0 | 5,00 | 0,56 | 0,3 | 25,0 | 8,5 | 430,0 | 2,0 | | 25,0 | 52,13 | 206,2 | 430,0 |

Ermittlung von n_{max} ←

Schrittweite für n durch Variation von B_3 bestimmen →

Bild 56: Beispiel Versuchsplan

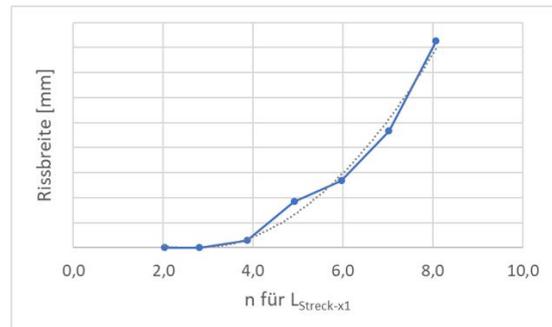
Auswertung



Trennen der Proben

Rissgröße bestimmen

| n für L _{Streck-x1} | V-Nr. | Beleg | Optische Prüfung | | | | | | Rissbreite | | Fläche | |
|------------------------------|-------|-------|------------------|-----------------|----------------|-----------------|--------------|---------------|------------|-----|------------|------|
| | | | Breite 1 Links | Breite 1 Rechts | Breite 2 Links | Breite 2 Rechts | Fläche Links | Fläche Rechts | Mittelwert | max | Mittelwert | max |
| 8,1 | 1 | 1 | 5,4 | 7,4 | 7,5 | 7,9 | 17,4 | 15,8 | 6,1 | 8,4 | 10,3 | 17,4 |
| | | 2 | 6,8 | 6,4 | 6,5 | 6,0 | 11,3 | 9,0 | | | | |
| | | 3 | 5,8 | 4,5 | 5,9 | 3,7 | 6,9 | 5,0 | | | | |
| | | 4 | 6,5 | 6,3 | 6,3 | 5,3 | 10,5 | 8,8 | | | | |
| | | 5 | 5,7 | 5,0 | 6,4 | 3,7 | 10,3 | 8,3 | | | | |
| 7,0 | 2 | 1 | 4,4 | 3,4 | 3,7 | 3,5 | 3,7 | 2,8 | 4,0 | 5,9 | 4,1 | 6,0 |
| | | 2 | 4,2 | 4,2 | 2,1 | 0,6 | 2,9 | 2,8 | | | | |
| | | 3 | 4,0 | 3,9 | 2,1 | 1,9 | 2,4 | 1,8 | | | | |
| | | 4 | 5,7 | 4,2 | 4,7 | 5,0 | 6,1 | 5,2 | | | | |
| | | 5 | 5,5 | 5,9 | 5,1 | 4,9 | 6,9 | 6,4 | | | | |
| 6,0 | 3 | 1 | 3,5 | 2,8 | 2,6 | 3,1 | 0,7 | 0,5 | 2,8 | 4,3 | 0,9 | 2,8 |
| | | 2 | 4,1 | 4,0 | 4,3 | 4,3 | 2,8 | 2,5 | | | | |
| | | 3 | 2,9 | 3,5 | 1,1 | 2,3 | 0,8 | 0,9 | | | | |
| | | 4 | 2,7 | 2,5 | 3,0 | 2,6 | 0,5 | 0,2 | | | | |
| | | 5 | 1,6 | 1,2 | 1,9 | 1,6 | 0,2 | 0,3 | | | | |
| 4,9 | 4 | 1 | 2,6 | 1,4 | 1,4 | 1,5 | 1,0 | 0,6 | 1,8 | 3,1 | 0,7 | 1,1 |
| | | 2 | 2,0 | 1,2 | 2,2 | 0,8 | 0,3 | 0,3 | | | | |
| | | 3 | 2,1 | 2,2 | 0,9 | 1,1 | 0,9 | 1,1 | | | | |
| | | 4 | 2,1 | 2,5 | 1,1 | 1,5 | 0,5 | 0,5 | | | | |
| | | 5 | 3,1 | 3,0 | 1,7 | 1,1 | 0,6 | 1,1 | | | | |
| 3,9 | 5 | 1 | 2,2 | 2,2 | 1,6 | 1,1 | 0,6 | 0,7 | 1,0 | 2,2 | 0,2 | 0,7 |
| | | 2 | 1,3 | 1,4 | 1,0 | 1,3 | 0,4 | 0,5 | | | | |
| | | 3 | 0,6 | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,0 | 0,0 | | | | |
| | | 4 | 0,8 | 1,2 | 0,2 | 0,6 | 0,0 | 0,0 | | | | |
| | | 5 | 1,0 | 1,2 | 1,1 | 0,6 | 0,1 | 0,0 | | | | |
| 2,8 | 6 | 1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | | 2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | | | | |
| | | 3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | | | | |
| | | 4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | | | | |
| | | 5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | | | | |
| 2,0 | 7 | 1 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| | | 2 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | | | | |
| | | 3 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | | | | |
| | | 4 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | | | | |
| | | 5 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | | | | |



Arbeitskennfeld

Bild 57: Beispiel Auswertung und Arbeitskennfeld

3.12 Konzeption für die Umrüstung bestehender Querkeilwalzen zur Befähigung einer variablen Zustellung unter Last

Um bestehende Querkeilwalzen für den Standardversuch einsetzen zu können wird ein Konzept entwickelt, das die notwendigen Änderungsmaßnahmen an bestehenden Querkeilwalzen aufzeigt. Ausgegangen wird hierbei von dem aktuell verfügbaren Anlagenportfolio der Fa. Lasco. Neben den technischen Maßnahmen wird der Kostenrahmen für das Maschinenupgrade ermittelt.

Aus den Anforderungen und Ergebnissen des im Rahmen des Projektes erstellten „Standard-Prüfstands“ wurden die notwendigen Parameter für die Umrüstung bestehender Querkeilwalzen abgeleitet.

Zur Auslegung eines Walzenumbaus sind folgende Parameter besonders relevant:

- Durchmesserreduktion = ϵ_D von 55%
- Werkzeuggeschwindigkeit = 400 mm/s

Über diese Werte kann für die Walze bestimmt werden, welcher Zustellweg und welche Drehmomente erforderlich sind.

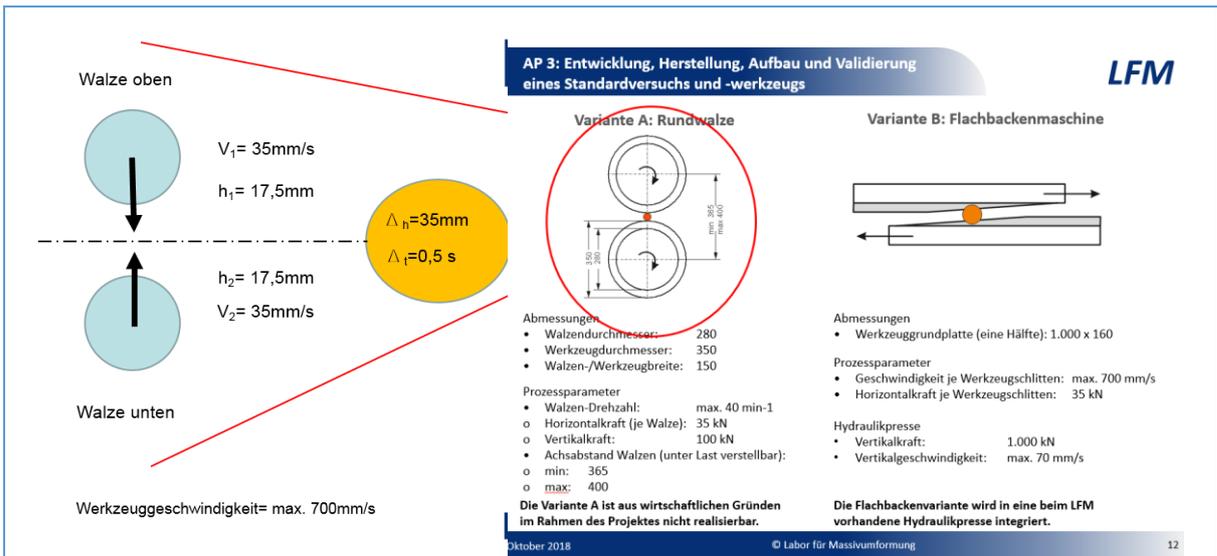


Bild 58: Ausgangsparameter

Aus den vorangegangenen Untersuchungen ergeben sich für die Walze folgende Parameter:

Oberwalze:

Erforderliche Zustellgeschwindigkeit: $v_1 = 35\text{mm/s}$

Erforderlicher Zustellweg: $h_1 = 17,5\text{mm}$

Unterwalze:

Erforderliche Zustellgeschwindigkeit: $v_2 = 35\text{mm/s}$

Erforderlicher Zustellweg: $h_2 = 17,5\text{mm}$

Werkzeuggeschwindigkeit: $v_w = \text{max. } 700\text{ mm/s}$

Vergleich zu den Leistungsdaten der Lasco QKW 700

Nachdem die erforderlichen Parameter ermittelt wurden, konnte ein Vergleich zu den aktuell verfügbaren Daten der Lasco QKW700 erfolgen.

| II. TECHNISCHE DATEN | | | |
|---|---------|--------------------------|--|
| | | QKW 700 | |
| Walzendurchmesser: | | 700 mm | |
| Walzenbreite: | | 700 mm | |
| Rohlingsdurchmesser: | max. | 70 mm | Walzendrehzahl: 5 – 20 min ⁻¹ |
| Rohlingslänge: | max. | 400 mm | Walzenverstellung: +/- 40mm |
| Walzendrehzahl: | max. | 5 - 20 min ⁻¹ | Walzen Verstellgeschwindigkeit: 8,5 mm/min |
| Maße Querkeilwalze | Breite: | ca. 4.300 mm | <div style="border: 2px solid yellow; border-radius: 50%; width: 40px; height: 40px; display: flex; align-items: center; justify-content: center;"> <p>$\Delta h = 35\text{mm}$</p> <p>$\Delta t = 0,5\text{ s}$</p> </div> <p>I.O.</p> <p>n.i.O. => ca. 4,2 min</p> |
| | Höhe: | ca. 3.300 mm | |
| | Tiefe: | ca. 2.400 mm | |
| Breite inkl. Beladung: | ca. | 5.000 mm | |
| Maschinengewicht: | ca. | 25.000 kg | |
| (inkl. Ober- und Unterwalze) | | | |
| Walzeneinzelgewicht: | ca. | 2.000 kg | |
| Walzenverstellung – Unterwalze und Oberwalze jeweils: | ca. | 30 mm | |

Bild 59: Leistungsdaten Lasco QKW 700

Aus dem Vergleich wurde abgeleitet, welche Parameter die Walze bereits abdeckt bzw. an welcher Stelle die Walze modifiziert werden muss.

Der Vergleich der Parameter zeigt, dass sowohl die Walzendrehzahl mit ca. 20 min^{-1} als auch die Walzspaltverstellung mit $\pm 40 \text{ mm}$ ausreichend ist.

Die für eine Untersuchung des Mannesmanneffektes erforderliche Walzen-Verstellgeschwindigkeit ist mit max. ca. $8,5 \text{ mm/s}$ gegenüber der geforderten 35 mm/s viel zu gering.

Aufbau der Walzspaltverstellung an der Lasco QKW 700

Um eine Modifikation der Walzspaltverstellung an der QKW 700 vornehmen zu können und diese bewerten zu können wurde zunächst das Verstellsystem untersucht.

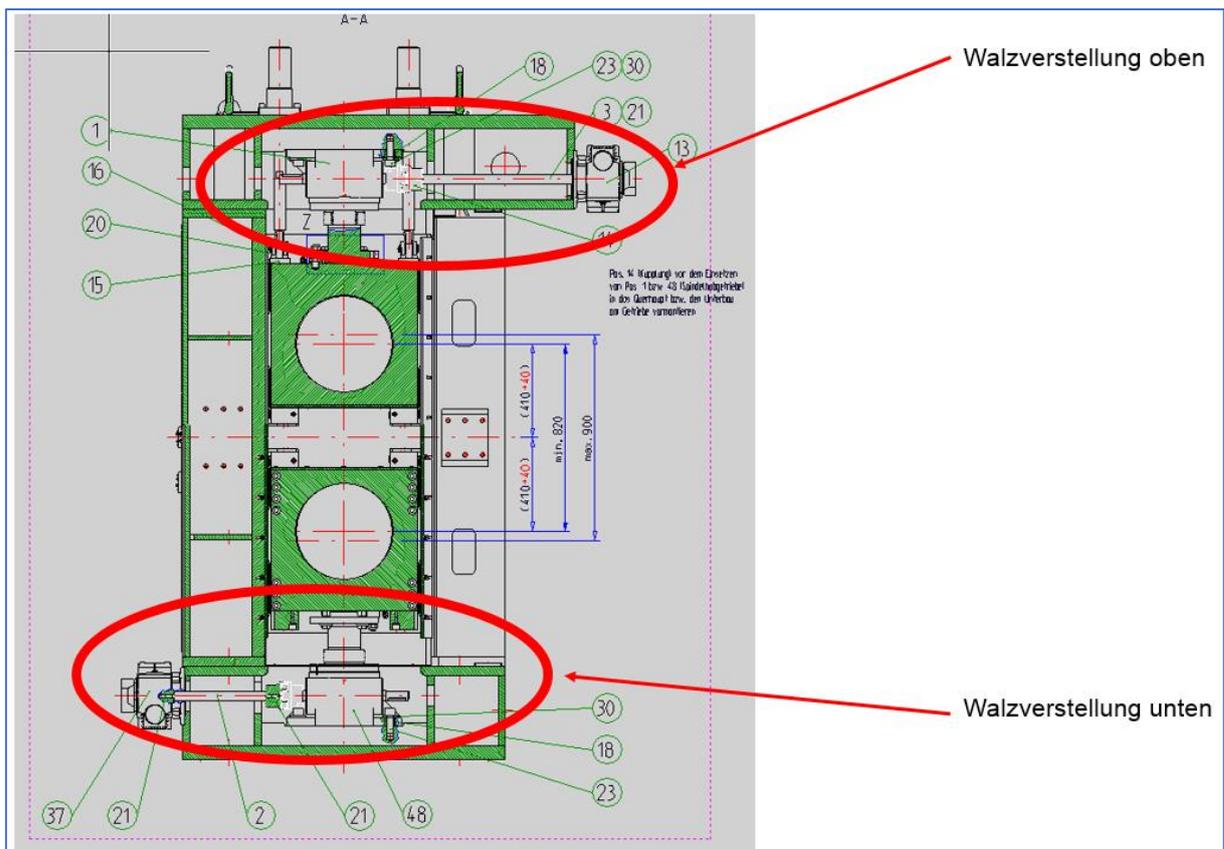


Bild 60: Aufbau Walzspaltverstellung Lasco QKW 700

Die Walzspaltverstellung an der QKW 700 wird durch zwei Einzelsysteme realisiert. Es lassen sich Ober- und Unterwalze unabhängig voneinander verstellen. Dadurch kann sehr präzise auf individuelle Prozessanforderungen reagiert werden.

Der Aufbau jedes Einzelsystems besteht aus je einem Getriebemotor, der über eine Zwischenwelle und eine Klauenkupplung ein Spindelhubgetriebe antreibt. Das Spindelhubgetriebe realisiert dann den Hub.

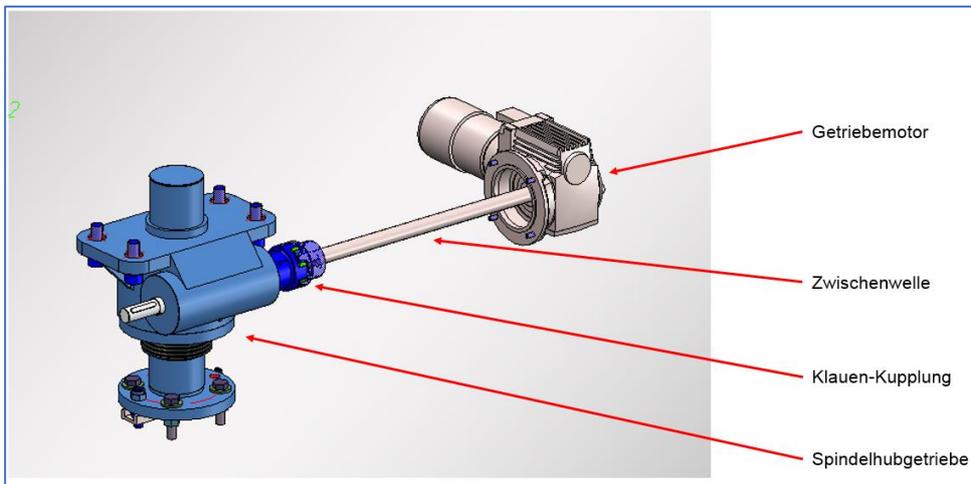


Bild 61: Aufbau Walzspaltverstellung Lasco QKW 700 - Detail

Um eine hohe Präzision im Walzprozess zu garantieren, ist dieses System so ausgeführt, dass der Walzspalt sehr feinfühlig justiert werden kann.

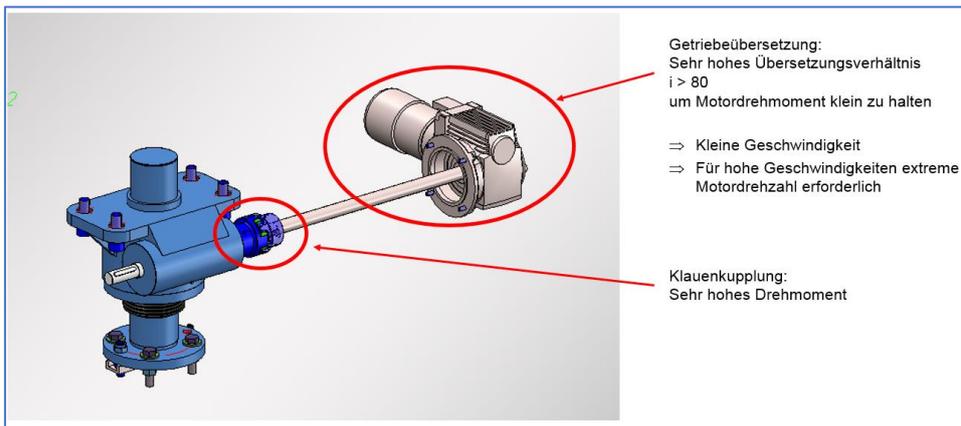


Bild 62: Walzspaltverstellung Lasco QKW 700 - Systemparameter

Die Übersetzung des Getriebemotors hat ein sehr hohes Übersetzungsverhältnis von $i > 80$. Dadurch kann das Motordrehmoment und somit die Antriebsleistung klein gehalten werden. Damit ergeben sich allerdings auch die Systemgrenzen. Durch die Motor-/Getriebe-Auslegung sind nur kleine Geschwindigkeiten realisierbar, was im Normalbetrieb nicht relevant ist. Für die Versuchsanordnung ist diese Systemausführung nicht geeignet. Um die geforderten hohen Geschwindigkeiten zu erreichen, wäre eine extrem hohe Motordrehzahl erforderlich. Die Klauenkupplung wiederum erlaubt ein sehr hohes Drehmoment.

Untersuchung von Lösungsvarianten

Um den Anforderungen an den Versuchsaufbau gerecht zu werden, wurden verschiedene Lösungsvarianten untersucht.

Lösungsvariante 1 – Umbau Bestandswalze

Im ersten Lösungsansatz wurde untersucht, wie an einer bestehenden Lasco QKW 700 die bestehende elektromechanische Walzspaltverstellung durch eine hydraulische Verstellung ersetzt werden kann.

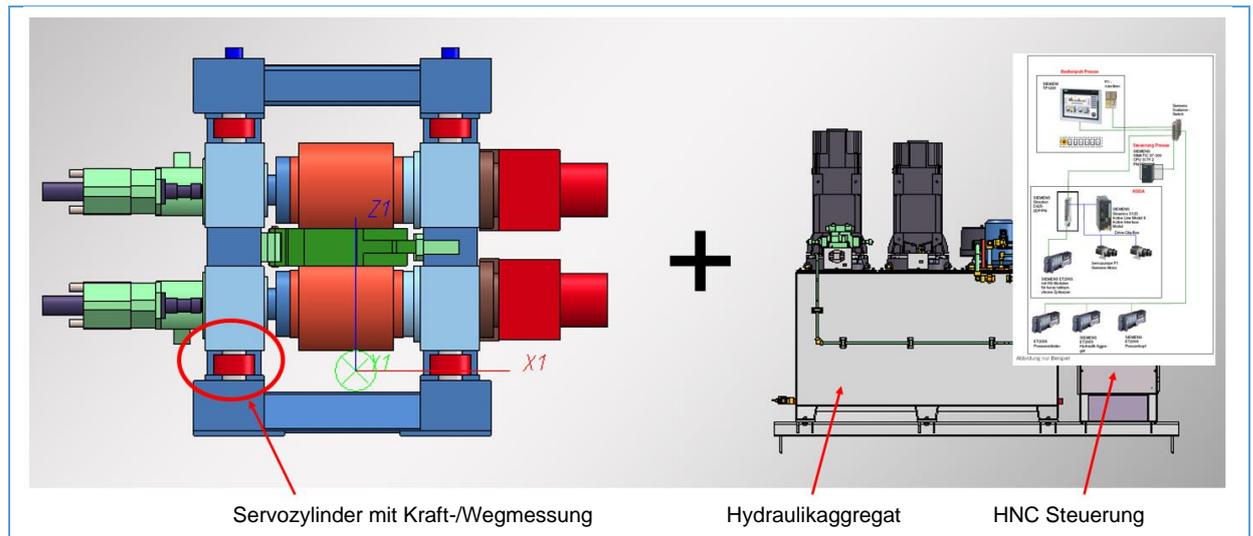


Bild 63: Lösungsansatz 1 – hydraulischer Umbau - Komponenten

Ein hydraulischer Umbau würde mit Servozylindern ausgeführt werden, um die nach wie vor erforderlichen Genauigkeiten im System abbilden zu können. Zusätzlich wird ein Hydraulikaggregat mit einer leistungsfähigen HNC Steuerung benötigt.

In der Übersicht werden die Merkmale dieser Umbauvariante nochmals dargestellt:

Umbau der bestehenden LASCO QKW 700

The diagram shows the retrofit of the existing LASCO QKW 700. It features a 3D cutaway view of the servo cylinder and a larger view of the hydraulic aggregate. A red circle highlights the integration point between the two components.

- Servozylinder mit Zusatzaggregat
- Servopumpentechnik
- Steuerung als HNC Achse
- Servoventiltechnik
- Steuerungsaufwand

- Verstellweg bleibt erhalten
- Hohe Dynamik
- Hohe Verstellgeschwindigkeit
- Hohe Flexibilität
- Materialvarianz geeignet

- Umbau Hydraulik > 500.000 €!
- Bei Nutzung als Versuchsstand keine Linienfunktion

Bild 64: Lösungsansatz 1 – hydraulischer Umbau - Merkmale

Ein hydraulischer Umbau stellt einen relativ großen Eingriff in die Ausführung der Lasco QKW 700 dar.

Für diesen Umbau müssten Gleichlauf-Servozylinder gebaut werden und in den vorgegebenen Einbauraum der Walze eingepasst werden. Ebenso ist eine sensible Hydraulik erforderlich. Geeignet wäre am besten eine hydraulische Servotechnik mit Servopumpen und Servoventilen. Die Steuerung müsste als HNC ausgeführt werden, um das System immer in einem eingespannten und somit sehr genau zu positionierendem Zustand zu halten. Dadurch ergibt sich ein erhöhter Steuerungsaufwand.

Mit diesem Systemansatz blieben die ursprünglichen Walzenparameter wie der Verstellweg erhalten. Das System erlaubt auch eine sehr hohe Dynamik und eine hohe Verstell-

geschwindigkeit. Ebenso ist eine hohe Flexibilität in der Anpassung auf sich ändernde Prozessparameter oder unterschiedlichste Materialvarianten garantiert.

Der Umbau wäre mit kalkulierten ca. 500.000,- Euro relativ teuer. Hier müsste bewertet werden, ob sich eine so hohe Investition lohnt.

Ein weiterer negativer Aspekt ist, dass in der Zeit, in der die Walze als Versuchsstand genutzt wird, die Linie nicht in Serienproduktion laufen kann.

Lösungsvariante 2 – Bestandwalze mit Formwerkzeug

Eine einfachere Möglichkeit, eine Bestandwalze zur Untersuchung des Mannesmann-effektes zu verwenden, ist die Umrüstung auf spezielle Formwerkzeuge.

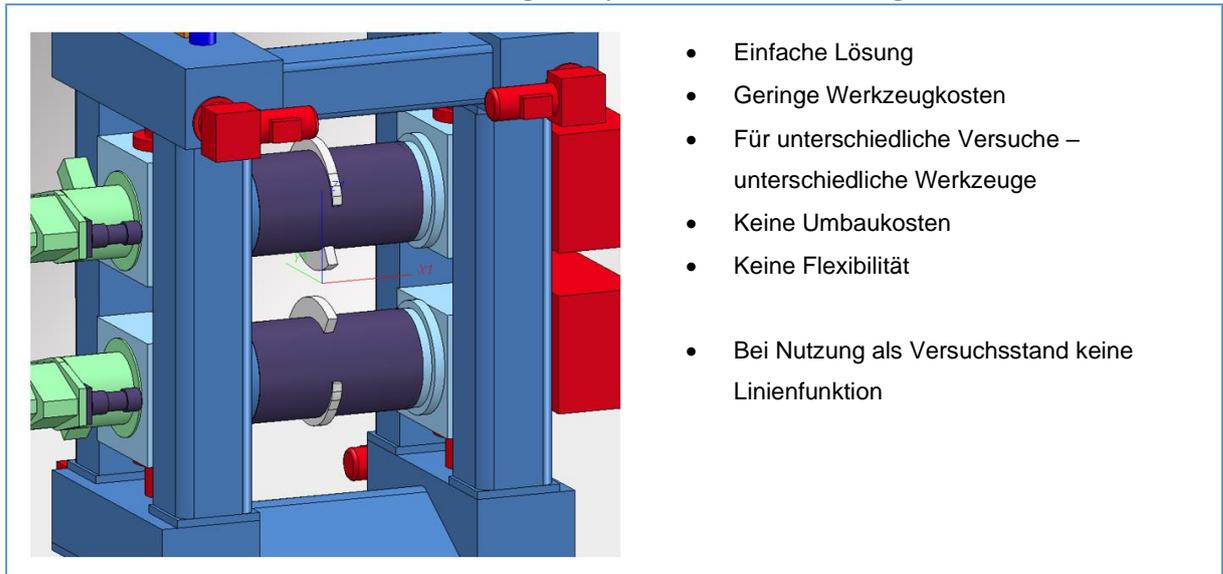


Bild 65: Lasco QKW 700 mit Formwerkzeugen

Die Formwerkzeuge können so gestaltet werden, dass sie auf die Walzenwerkzeugträger montiert werden können. Da normalerweise jeder Kunde mindestens ein Wechsel-Walzenpaar besitzt, stellt diese Möglichkeit eine günstige Alternative dar. Die Werkzeuge an sich können aus günstigem Material hergestellt werden, da sie für die Versuche nur überschaubare Belastungen aushalten müssen.

Die Umrüstzeit der Walze für den Versuch liegt wie bei einer normalen Werkzeugumrüstung ebenfalls bei ca. 15 min und ist somit schnell durchführbar. Die Walze bleibt dem Kunden somit ohne jeden weiteren Umbau erhalten.

Eine wesentliche Einschränkung ist hierbei die fehlende Flexibilität, da mit einem Formwerkzeug auch nur ein Belastungszustand dargestellt werden kann.

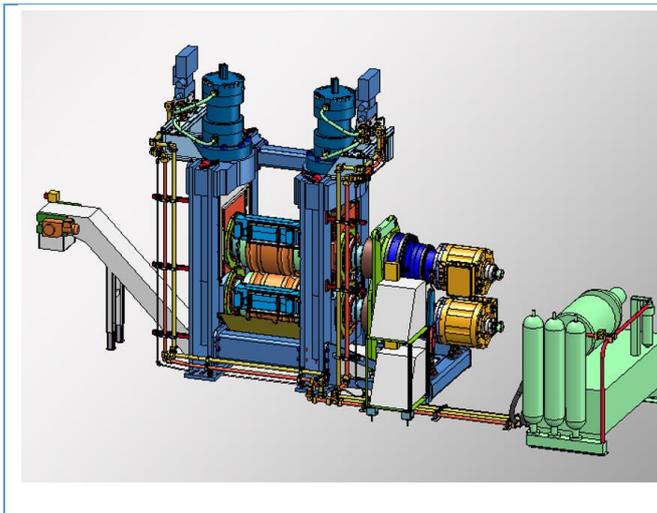
Lösungsvariante 3 – kleine Versuchswalze

Als Lösungsvariante 3 wurde eine reine Versuchswalze untersucht.

Diese Walze ist von Ihrem Aufbau her vergleichbar mit der Lasco Walze RCW630So mit fester Unterwalze und einer dynamischen Verstellung der Oberwalze. Die Versuchswalze wäre allerdings viel kleiner, so dass nur das entsprechend notwendige Versuchswerkzeug Platz finden würde.

Die Walzen würde ebenfalls individuell mit kleinen Servomotoren angetrieben, um verschiedene Betriebsarten abbilden zu können.

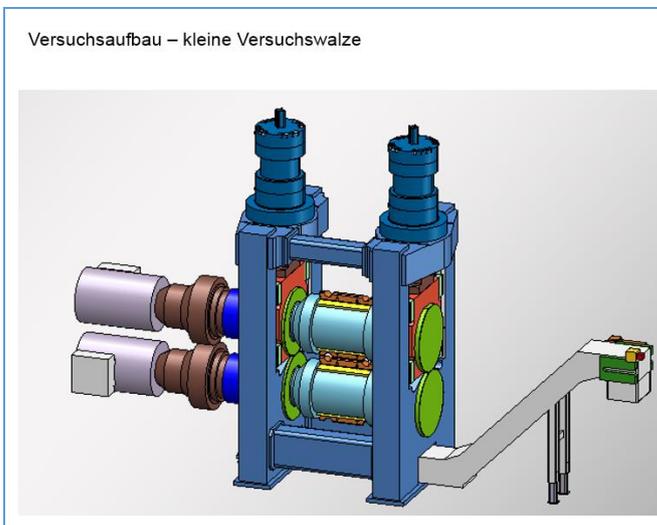
Die Verstellung der Oberwalze würde ebenfalls mit hydraulischer Servotechnik realisiert werden.



Dynamische Reckwalze – Lasco RCW 630So

- Starre Walzkörper
- Hochdynamische Verstellung der Oberwalze
- Walzverstellung im laufenden Prozess
- Walzendurchmesser: 630mm
- Nutzbare Walzenbreite: 550mm
- Walzspaltverstellung: 160mm
- Toleranz: +/- 0,2mm
- Gleichlaufstellung der Zylinder: +/- 0,2mm
- Hydraulische Zustellkraft: 200 kN
- Walzgeschwindigkeit: 500 mm/s
- Zustellgeschwindigkeit: 100 mm/s

Bild 66: Lasco RCW 630So



Versuchsaufbau – kleine Versuchswalze

- Servozylinder mit Zusatzaggregat
- Servopumpentechnik
- Steuerung als HNC Achse
- Servoventiltechnik
- Steuerungsaufwand
- Geringer Platzbedarf
- Hohe Dynamik
- Großer Verstellbereich realisierbar
- Hohe Verstellgeschwindigkeit
- Hohe Flexibilität
- Hohe Materialvarianz
- Nicht relevant für Linienintegration
- Komplexe Steuerung
- Kosten < 500.000 €

Bild 67: Lasco Versuchswalze

Die Versuchswalze wäre ein separates Aggregat, um Walzversuche jeglicher Art durchführen zu können. Sie zeichnet sich durch dynamische, hochflexible Antriebe sowohl der Walzen als auch der Verstellung aus. Die Versuchswalze ermöglicht einen relativ großen Verstellbereich mit einer schnellen Walzspaltverstellung. Dadurch ist eine hohe Flexibilität für verschiedenste Versuchsanordnungen gewährleistet.

Die Versuchswalze ist nicht zur Integration in Fertigungsprozesse geeignet. Die Kosten wurden nach ersten Abschätzungen je nach Größe und Ausführung unter 500.000 Euro liegen.

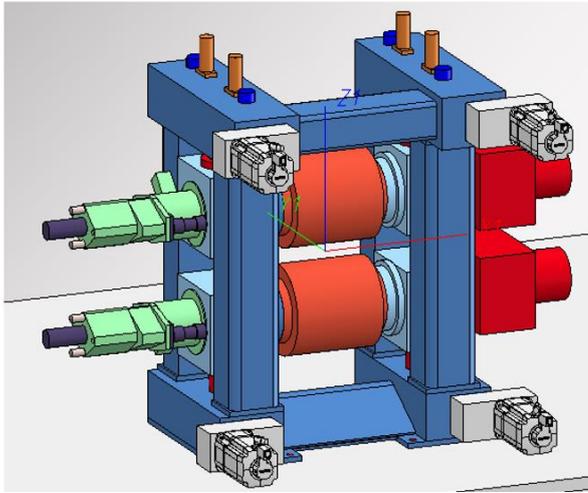
Lösungsvariante 4 – Ausblick – Umbau einer Bestandswalze

Es wurde noch eine weitere Möglichkeit untersucht, eine Bestandswalze vom Typ Lasco QKW 700 für den Gebrauch als Versuchswalze umzubauen.

Im hier verfolgten Ansatz werden vier Servomotoren anstelle der normalerweise verbauten Getriebemotore verwendet.

Ein solcher Umbau wäre möglich, bedeutet aber Einschränkungen in der Performance.

Umbau der bestehenden LASCO QKW 700 - Sonderlösung



Aufbauskizze:

Walzenverstellung mit 4 Servomotoren für festgelegte Ausgangsdurchmesser

- Parameter nur in engen Grenzen abbildbar
- Eingeschränkte Flexibilität
- Mäßige Verstellgeschwindigkeit
- Materialvarianz innerhalb der Systemgrenzen
- Verstellbereich voll nutzbar
- Umbaukosten überschaubar
- Bei Nutzung als Versuchsstand keine Linienfunktion

Bild 68: Umbau QKW 700 auf Servoverstellung

Mit einem solchen Umbau wären die Versuchsparameter bedingt abbildbar. Die Servomotoren müssten ein erforderliches Drehmoment von 46 Nm aufweisen bei einer erforderlichen Motorleistung von 20kW je Motor. Da das Spindelhubgetriebe weiterhin verwendet wird, ist eine maximale Eingangsdrehzahl von 4200 min⁻¹ möglich.

Nach wie vor gelten somit die Einschränkungen aus den verbleibenden Getrieben wie z.B. eine maximal mögliche Ausgangsdrehzahl von 600 min⁻¹ bei 100 KN.

Erreicht werden kann so allerdings nur eine geringe Verstellgeschwindigkeit von ca. 5mm/s.

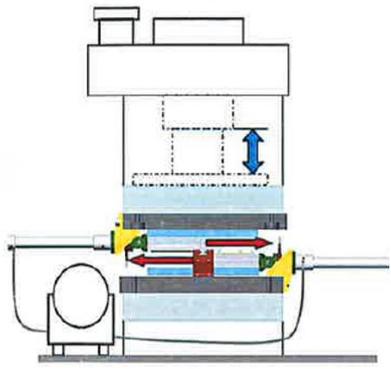
Lösungsvariante 5 – Flachbackenwalze

Als fünfte Lösungsvariante wurde der Einsatz einer Flachbackenwalze untersucht. Mit dieser Lösung werden bereits Versuche am LFM erprobt.

Die Flachbackenwalze ist eine Vorrichtung, die in eine normale vertikale hydraulische Presse eingebaut werden kann. Die vertikale Verstellung übernimmt die hydraulische Presse, wodurch der Verstellweg und die Verstellgeschwindigkeit in der Regel immer ausreichend vorhanden sind.

Die Walzvorrichtung besteht aus zwei Grundplatten, die mit Hilfe eines Hydraulikzylinders oder eines elektromechanischen Antriebs horizontal zueinander verfahren werden können. Der Walzkeil wird als „abgewickeltes“ Profil in die Oberflächen der Platten eingefräst.

Flachbackenwalze – wie am LFM realisiert



- Einfacher Aufbau
- Gut umsetzbar im Versuchsfeld
- Einfache Werkzeugauslegung
- Geringer Anlagenpreis
- Kostengünstige Werkzeuge
- Geringer Platzbedarf
- Hohe Dynamik
- Großer Verstellbereich realisierbar
- Hohe Verstellgeschwindigkeit
- Hohe Flexibilität
- Hohe Materialvarianz
- Nicht relevant für Linienintegration

Querkeilwalz-Modul:
Einbau in hydraulischer Presse

Bild 69: Flachbackenwalze

Dadurch ist das Werkzeug um ein Vielfaches günstiger und einfacher herzustellen als konventionelle runde Walzwerkzeuge. Somit lässt sich ein vergleichsweise günstiger Versuchsaufbau realisieren.

Zudem benötigt der Aufbau nur wenig Platz.

Besonders hervorzuheben sind die hohe Dynamik und die große Flexibilität der untersuchten Versuchsaufbauten.

Auswertung der Untersuchungen

Zur Untersuchung des Mannesmanneffektes beim Querkeilwalzen ist ein spezifizierter Versuchsaufbau notwendig, der es erlaubt, die vom LFM ermittelten Parameter abzubilden. Die erforderlichen Parameter sind ein Zustellweg von mindestens 17,5 mm je Walze, eine Zustellgeschwindigkeit von min. 35mm/s je Walze und eine Werkzeuggeschwindigkeit von bis zu 700mm/s.

Es wurden verschiedene Möglichkeiten untersucht. Die Varianten wurden in einer Vergleichsmatrix nebeneinandergestellt.

| Vergleichsmatrix | | | | | | | |
|--------------------------------|-------------|-------------------------|------------------|--------------|------------------|--------|---------------------------|
| Variante | Verstellweg | Verstellgeschwindigkeit | Verstell-dynamik | Flexibilität | Material-varianz | Kosten | Integrierbarkeit in Linie |
| Umbau QKW mit Servozylindern | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | -- | -- |
| QKW mit Formwerkzeug | -- | -- | -- | -- | - | ++ | -- |
| Versuchsstand | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | + | Nicht erforderlich |
| Umbau QKW mit Servoverstellung | ++ | - | - | ++ | ++ | 0 | -- |
| Flachbacken Walzmodul | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | Nicht erforderlich |
| | | | | | | | |

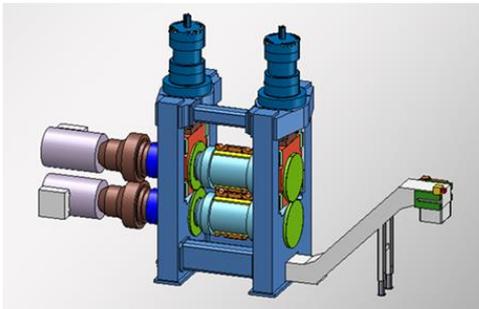
Bild 70: Vergleichsmatrix

Verglichen wurden der Verstellweg, die Verstellgeschwindigkeit, die Verstelldynamik, die Flexibilität des Systems sowie in Bezug auf die Nutzung für verschiedene Anwendungsbeispiele die Materialvarianz und die zu erwartenden Kosten.

Generell kann man erkennen, dass ein Umbau einer bestehenden Walze aus den verschiedensten Gründen nicht sinnvoll erscheint. Entweder gibt es drastische Einbußen in der Performance oder die Kosten sind schlichtweg zu hoch.

Es haben sich zwei Systeme besonders herausgestellt:

| Variante | Verstellweg | Verstellgeschwindigkeit | Verstell-dynamik | Flexibilität | Material-varianz | Kosten | Integrierbarkeit in Linie |
|--------------------------------|-------------|-------------------------|------------------|--------------|------------------|--------|---------------------------|
| Umbau QKW mit Servozylindern | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | -- | -- |
| QKW mit Formwerkzeug | -- | -- | -- | -- | - | ++ | -- |
| Versuchsstand | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | + | Nicht erforderlich |
| Umbau QKW mit Servoverstellung | ++ | - | - | ++ | ++ | 0 | -- |
| Flachbacken Walzmodul | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | Nicht erforderlich |



Versuchsstand erscheint vielversprechend wenn eine Walze verwendet werden soll

- Gute Realisierbarkeit
- Kostengünstiger als der Umbau einer Bestandswalze
- Geringer Platzbedarf in separatem Versuchsfeld
- Keine Beeinträchtigung der Produktion

Bild 71: Beste Ausprägung - Rundwalzen

Zum einen punktet der Versuchsstand.

Wenn es für die Versuche erforderlich ist, dass runde Walzkörper verwendet werden sollen, ist der Versuchsstand am besten geeignet. Er vereint alle erforderlichen Parameter in der bestmöglichen Performance.

Zudem sind die zu erwartenden Kosten relativ gering.

Die zur Untersuchung des Mannesmanneffektes in Summe als beste bewertete Lösung ist die Flachbackenwalze.

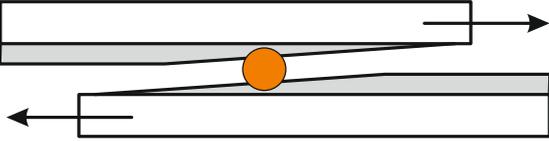
Mit diesem System können die geforderten Parameter am besten abgebildet werden.

Durch das Verwenden eines Flachbackenwerkzeugs bleibt die dazu verwendete hydraulische Presse als Aggregat in ihren Möglichkeiten erhalten. Somit bietet diese Lösung die höchste Flexibilität.

Die von der Presse zur Verfügung gestellten Parameter wie Hub und Pressgeschwindigkeit bieten in der Regel viel mehr Möglichkeiten als eine Walzenkonstruktion.

Konkurrenzlos ist der Kostenvorteil dieser Lösung. Sowohl die einfache Modulkonstruktion als auch die Werkzeuge sind im Vergleich unschlagbar günstig.

| Variante | Verstellweg | Verstell-Geschwindigkeit | Verstell-dynamik | Flexibilität | Material-varianz | Kosten | Integrierbarkeit in Linie |
|--------------------------------|-------------|--------------------------|------------------|--------------|------------------|--------|---------------------------|
| Umbau QKW mit Servozylindern | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | -- | -- |
| QKW mit Formwerkzeug | -- | -- | -- | -- | - | ++ | -- |
| Versuchsstand | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | + | Nicht erforderlich |
| Umbau QKW mit Servoverstellung | ++ | - | - | ++ | ++ | 0 | -- |
| Flachbacken Walzmodul | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | Nicht erforderlich |



Flachbacken Walzmodul ist am besten für einen Versuchsaufbau realisierbar

- Gute Realisierbarkeit
- Kostengünstige Lösung
- Höchste Flexibilität zu erwarten
- Keine Beeinträchtigung der Produktion

Bild 72: Beste Ausprägung – Flachbacken-Walzmodul

Zusammenfassung

Die Untersuchung zum Thema „Entwicklungsansatz zum Umbau bestehender Lasco Querkeilwalze zur Untersuchung des Mannesmanneffektes“ hat aufgezeigt, dass es durchaus Möglichkeiten gibt, bestehende Walzen umzurüsten.

Jedoch sind diese Umbauten mit einem hohen Aufwand an Kosten verbunden und beeinträchtigen im Versuchsdurchlauf die Linienproduktion.

Somit ist ein Umbau einer Bestandswalze nur in speziellen Fällen geeignet.

Als sinnvolle Systeme haben sich reine Versuchsaufbauten herausgestellt, wie sie teilweise bereits an den renommierten Forschungseinrichtungen im Einsatz sind.

Besonders die Flachbackenwalze in Verbindung mit einer normalen hydraulischen Presse vereint die Anforderungen aus Performance und Flexibilität am besten.

4 Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Bereits während der Projektlaufzeit erfolgte die Verbreitung von Zwischenergebnissen in nachfolgender Weise:

- Fachaufsatz in der Zeitschrift „Stahl und Eisen“, Ausgabe 5/2017
- Fachaufsatz in der Zeitschrift „Impuls, Hochschulzeitung der FH Südwestfalen“, Ausgabe 5/2017
- Projektbeschreibung in der Tageszeitung „Iserlohner Kreisanzeiger (IKZ)“, Ausgabe 27.04.2017
- Präsentation der Ergebnisse in der IMU-Faktendatenbank, wo sich die Unternehmen der Branche via Internet informieren können
- Jahrestagung „Massivumformung“ des IMU, Juni/2019
- Fachaufsatz in der Zeitschrift massivUMFORMUNG „Voraussage der Kernrißinitiierung in Querwalzprozessen“ September 2019

In 2020 ist die Verbreitung der Vorhabensergebnisse in nachfolgender Weise vorgesehen:

- VDI-Fachtagung Feb.2020, Düsseldorf
- Fachaufsatz in der Zeitschrift massivUMFORMUNG

5 Fazit

Durch das Vorhaben soll ein sicheres Auslegungskriteriums für Querkeilwalzwerkzeuge auf Basis von Prozesskennfeldern, mit denen eine Materialschädigung infolge des Mannesmann-Effektes vermieden wird, erstellt werden. Hiermit soll ein signifikanter Beitrag zur Umweltentlastung geleistet werden, indem die Ressourcenpotentiale des Querkeilwalzens bis an die Grenzen ausgenutzt werden und infolge dessen der Materialüberschuss beim nachfolgenden Gesenkschmieden reduziert werden kann.

Aus den dominanten, schädigungswirksamen Einflussparametern wurde eine Schädigungsfunktion aufgestellt und die dimensionslose Variable n abgeleitet. Somit können die wesentlichen physikalischen Einflussparameter der Bauteil- und Werkzeuggeometrie durch eine dimensionslose Ähnlichkeitsvariable direkt identifiziert werden.

Der für das Vorhaben notwendige „Standard-Prüfstand“ wurde aufgebaut und erfüllte alle gestellten Anforderungen. Im Rahmen des Projektes wurden mehr als 700 Versuchsteile problemlos gefertigt. Für die Detektierung der Innenfehler wurde ein geeignetes Prüfverfahren ermittelt und angewendet.

Mit der erarbeiteten Vorgehensweise, dem erprobten Versuchsstand und Versuchswerkzeugen wurden auf Basis der dimensionslosen Variablen Arbeitskennfelder für die Auslegung von QKW-Werkzeugen erstellt. Die Vorgehensweise wurde erfolgreich an 3 Stahlwerkstoffen und einer Aluminiumlegierung erprobt.

Bei der Validierung und industriellen Erprobung der erstellten Kennfelder wurde jedoch deutlich, dass ein weiterer wesentlicher Werkzeug-Faktor bei der Kennfelderstellung beachtet werden muss. Die Bildung von Innenrissen ist neben den berücksichtigten Einflussgrößen zusätzlich noch von dem Bereich der Werkzeuggeometrie abhängig, mit der die Durchmesserreduzierung erfolgt. Die Kennfelder sind in der erzielten Form daher sehr gut zur Vergleichbarkeit verschiedener Werkstoffe und/oder Chargen geeignet, aber nicht zur quantitativen Vorhersage von Materialschädigungen.

Wissenszuwachs:

Die in dem Vorhaben ausgeführte Methode, Experimente auf Grundlage ähnlichkeitsmechanischer Ansätze, zur Erstellung der Kennfelder hat sich als geeignet herausgestellt. Auf Basis der unter realistischen Produktionsbedingungen erstellten Kennfelder können die richtigen Werkzeugparameter und/oder Grenzen der walzbaren Bauteilparameter ermittelt und in der Konstruktion berücksichtigt werden.

Zusätzlich zur Zielstellung des Vorhabens wurde ein wesentlicher Wissenszuwachs in Bezug auf die Bildung von Innenfehlern beim Querkeilwalzen erreicht. Der komplexe Zusammenhang der für die Kernauffreiungen verantwortlichen Werkzeug-, Bauteil- und Prozessparameter kann durch den Aufbau des aktiven Kennfeldsystems dargestellt werden. Das Wissen und Verständnis um die Ursachen und Einflüsse auf die Kernrisse wurde hierdurch wesentlich erweitert, auch um die Tatsache, dass die Anzahl der wesentlichen Einflussgrößen noch um den Werkzeug-Faktor „Umformender Werkzeugbereich“ ergänzt werden muss.

Die vorliegenden, langjährigen industriellen Erfahrungswerte hinsichtlich des Werkstoffeinflusses auf die Innenfehler wurden im Wesentlichen bestätigt, erstmals besteht jetzt aber die Möglichkeit eines quantitativen Vergleichs der Empfindlichkeit unterschiedlicher Werkstoffe oder Chargen.

Weiterführende Untersuchungen:

Um dem Anspruch der vollständigen Ausnutzung der Verfahrensgrenzen gerecht zu werden, wird als weitere Vorgehensweise die Untersuchung des neu identifizierten und somit in Bearbeitung bisher fehlenden Einflussfaktors, und dessen Berücksichtigung in den Auslegungskriterien, im Rahmen eines weiteren Vorhabens vorgeschlagen.

6 Literaturverzeichnis

- /IMU2011/ Systematische Identifikation von Möglichkeiten zur Energieeffizienzsteigerung in Betrieben der Massivumformung, DBU-Projekt (Az: 26966) 2011
- /Kach14/ Kache, Hans.: Methode zur Auslegung von Querkeilwalzprozessen mittels Kleinskalierung am Beispiel der Halbwarmumformung, *Berichte aus dem IPH, Band 4/2014*
- /Kais2001/ Kaiser, P.: Beitrag zur Untersuchung des Formänderungsvermögens metallischer Werkstoffe unter besonderer Berücksichtigung des hydrostatischen Spannungsanteils, *Dissertation, TU Chemnitz, 2001*
- /Li04/ Li, Qiang: The establishment of a failure criterion in cross wedge rolling, *Int J Adv Manuf Technol (2004) 24: 180–189*
- /Li08/ Li, Qiang: Cross wedge rolling failure mechanisms and industrial application, *Int J Adv Manuf Technol (2008) 37: 265–278*
- /Meye15/ Meyer, Matthias: Querkeilwalzen und mehrdirektionales Umformen als Vorformverfahren zur Herstellung von Kurbelwellen, *Dissertation, IPH, 2015*
- /Steg16/ Steger, Jürgen: Querwalzen von Leichtmetallen, Fraunhofer IWU, 4. VDI Fachtagung Warmmassivumformung, 2016
- /Wang12/ Wang, Menghan: Influence of cooling condition of tools on central deformation of workpiece and tool wear in cross wedge rolling, *Int J Adv Manuf Technol (2012) 59: 473–482*
- /Zach08/ Zachäus, R.: Influence of tramp elements (P, Cu, S, Sn) on the Mannesmann effect in the transversal hot rolling of engineering steels (MANNESTRAMP), *European Commission, Contract No RFSR-CT-2004-00025, ISBN 978-92-79-09973-1, 2008*