

Industrieverband Massivumformung e. V.
in Kooperation mit
Fachhochschule Südwestfalen / Labor für Massivumformung
Arnold Umformtechnik GmbH & Co.
LASCO Umformtechnik GmbH
Schmiedetechnik Plettenberg GmbH & Co.KG
Simufact Engineering GmbH
SMS group GmbH

**Weiterentwicklung der Methodik zur Absicherung der
Verfahrensgrenzen beim Querkeilwalzen zwecks Steigerung der
Ressourceneffizienz in der Massivumformung**

Abschlussbericht,
gefördert unter dem Az: 35857/01
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

	von
Prof. Dr.-Ing. Michael Marré	Labor für Massivumformung
Dipl.-Ing. Harald Hermanns	Labor für Massivumformung
Herr Ralf Vollmer	Schmiedetechnik Plettenberg GmbH & Co.KG

Hagen,
Dez. 2022

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
Arnold Umformtechnik GmbH & Co.
LASCO Umformtechnik GmbH
Schmiedetechnik Plettenberg GmbH & Co.KG
Simufact Engineering GmbH
SMS group GmbH

**Weiterentwicklung der Methodik zur Absicherung der
Verfahrensgrenzen beim Querkeilwalzen zwecks Steigerung der
Ressourceneffizienz in der Massivumformung**

Abschlussbericht,
gefördert unter dem Az: 35857/01
von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Prof. Dr.-Ing. Michael Marré
Dipl.-Ing. Harald Hermanns
Herr Ralf Vollmer

von
Labor für Massivumformung
Labor für Massivumformung
Schmiedetechnik Plettenberg GmbH & Co.KG

Hagen,
Dez. 2022

Inhaltsverzeichnis

Inhalt

0	Zusammenfassung	1
1	Einleitung	2
2	Vorhabensdurchführung.....	6
2.1	Entwicklung und Test eines geeigneten Versuchsablaufs und Werkzeuggeometrie	6
2.2	Versuchsdurchführung für insgesamt 3 unterschiedliche Stahl Werkstoffe	6
2.3	Design der Kennfelder für die verschiedenen Werkstoffe	6
2.4	Stichversuch an einem Aluminium-Werkstoff	6
2.5	Ergänzung/Vervollständigung des Anwenderleitfadens	6
3	Vorhabensergebnisse.....	7
3.1	Entwicklung und Test eines geeigneten Versuchsablaufs und Werkzeuggeometrie	7
3.2	Versuchsdurchführung für insgesamt 3 unterschiedliche Stahl Werkstoffe	10
3.3	Design der Kennfelder für die verschiedenen Werkstoffe	11
3.4	Stichversuch an einem Aluminium-Werkstoff	18
3.5	Ergänzung/Vervollständigung des Anwenderleitfadens	19
4	Verbreitung der Vorhabensergebnisse	26
5	Fazit	27
6	Literaturverzeichnis	28

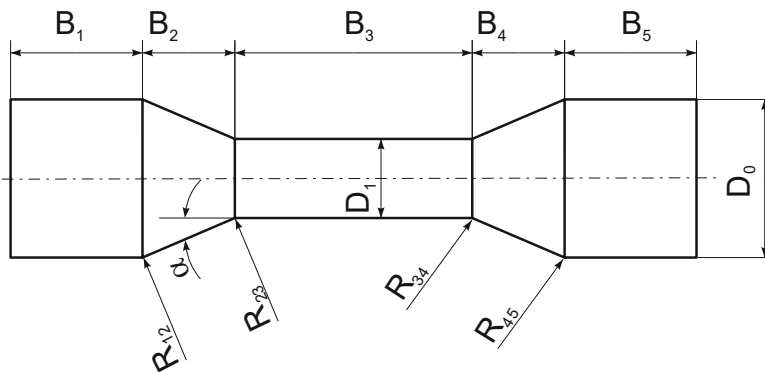
Verzeichnis der Bilder

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: Versuchswerkzeug und Walz-Vorform	7
Bild 8: Walzprodukt und „gedrehte“ Vorform, $n = 10,6$	8
Bild 9: Gegenüberstellung von Walzergebnissen (mit identischen Prozess- und Walzparametern) mit dem alternativen Werkstoff 46MnVS6 und dem bisher verwendeten Werkstoff (46MnVS5)	8
Bild 10: Ergebnisse der Innenrissbildung und Ausprägung der Walzstückenden bei „gedrehten“ und „gewalzten“ Vorformen.	9
Bild 11: Kennfeld aus dem Vorprojekt	9
Bild 12: Gegenüberstellung von Walzergebnissen (mit identischen Prozess- und Walzparametern) mit gewalzten und gedrehten Vorformen	9
Bild 13: Beispiel aufgetrennter Walzproben	11
Bild 14: Definition der Werkzeugbereiche	12
Bild 15: Definition des Parameters x_{1E}	12
Bild 16: Definitionen am Werkzeug und Bauteil	13
Bild 17: Darstellung Kennfeld	13
Bild 18: Kennfeld-Diagramme für den Werkstoff 46MnVS5 (Keilgeometrie Typ A)	15
Bild 19: Kennfeld-Diagramme für den Werkstoff C70S6 (Keilgeometrie Typ A)	16
Bild 20: Kennfeld-Diagramme für den Werkstoff C45 (Keilgeometrie Typ A)	17
Bild 21: Vorge drehte Walzproben	18
Bild 22: Aluminium-Walzprodukt nach dem Auftrennen	18
Bild 23: Definition der Werkzeugbereiche	19
Bild 24: Prinzipielle Vorgehensweise zur Erstellung von Arbeitskennfeldern	20
Bild 25: Programmoberfläche zur Ermittlung der Variablen n , des Prüfplans und der Parametereinstellungen der Prüfvorrichtung	21
Bild 26: Bestimmung der Fehlergrößen	22
Bild 27: Definition von x_{1E}	22
Bild 28: Arbeitskennfeld	23
Bild 29: Beispiel Bauteilgeometrie	24
Bild 30: Beispiel Versuchsplan A	24
Bild 31: Beispiel Versuchsplan b	25
Bild 32: Beispiel Auswertung und Arbeitskennfeld	25

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		Bauteil/Werkzeug
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

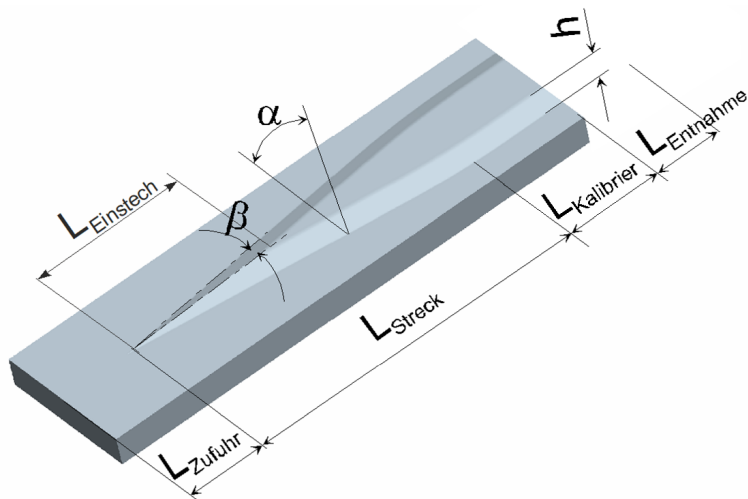
Definitionen am Bauteil



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, $\lambda = B_3/D_1$

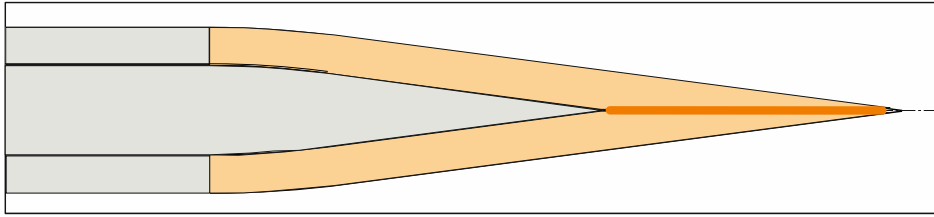
Definitionen am Werkzeug



Geometrieparameter

- h : Keilhöhe
- L_{Zufuhr} : Zufuhrzone für den Knüppel
- $L_{Einsteich}$: Einsteichzone (Einsteichpunkt 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

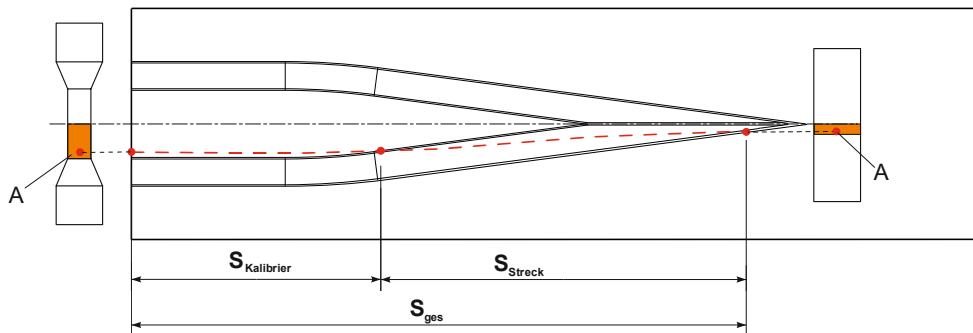
Werkzeugbereiche



- Schulterfläche
- Gratlinie der Einstechzone

Definitionen der Umformwege

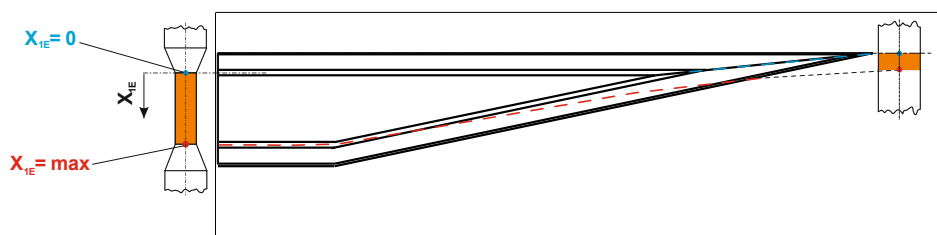
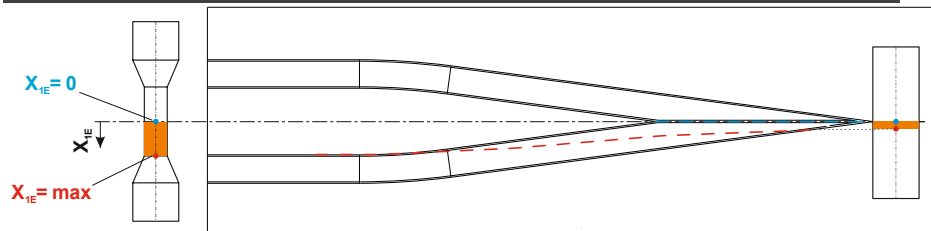
S : Weg den ein Werkstückelement aus dem reduzierten Bauteilbereich bei der Umformung zurücklegt



Umformweg

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

Definitionen am gewalzten Bauteil in Abhängigkeit der Keilgeometrie



Oben: Keilgeometrie beidseitig, symmetrisch (Typ A)

Unten: Keilgeometrie einseitig, unsymmetrisch (Typ B)

0 Zusammenfassung

Das Vorhaben muss in Kombination mit dem Vorgängerprojekt, dem DBU-Projekt "Steigerung der Ressourceneffizienz in der Massivumformung durch Absicherung und Erweiterung der Verfahrensgrenzen beim Querkeilwalzen, Az: 33234/01-24" betrachtet werden. In dem Vorgängerprojekt wurde ersichtlich, dass die dort erarbeitete Vorgehensweise zu Ermittlung von Arbeitskennfeldern um eine signifikante Einflussgröße, dem „Umformenden Werkzeugbereich“ ergänzt werden muss. Diese Ergänzung ist in dem vorliegenden Vorhaben erfolgt.

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.

Mit der erarbeiteten Vorgehensweise, dem erprobten Versuchsstand und Versuchswerkzeugen und der ergänzten Einflussgröße 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.

Die Arbeitskennfelder bilden damit ein sicheres Auslegungskriteriums für Querkeilwalzwerkzeuge, ermöglichen die vollständigen Ausnutzung der Verfahrensgrenzen und damit Optimierung der gewichtsrelevanten Walzteilgeometrie.

Kooperationspartner

- Fachhochschule Südwestfalen / Labor für Massivumformung
- Arnold Umformtechnik GmbH & Co.
- LASCO Umformtechnik GmbH
- Schmiedetechnik Plettenberg GmbH & Co.KG
- Simufact Engineering GmbH
- SMS group GmbH

Das Vorhaben wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert (Az: 35857/01), 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	
Produktionsmenge ^{1), 2)}	1.600.000 t/a
Erwärmungsenergie ³⁾	2.850 GWh/a
Produktionsstatistik, Industrieverband Massivumformung e. V., 2018 /IMU19/ Gesensschmiedeteile und Freiformschmiedestücke Bezogen auf Primärenergie, Gesensschmiedeteile mit 25% Gratanteil, Erwärmung Gesensschmiedeteile zu 2/3 induktiv, zu 1/3 mit Erdgas, Erwärmung Freiformschmiedestücke zu 1/1 mit Erdgas. /maFo17/	

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 der	
Materialherstellung ¹⁾	3.000.000 t CO ₂ /a
Materialerwärmung ²⁾	345.000 t CO ₂ /a
1) CO ₂ Emission Stahlherstellung: 1.460 kg CO ₂ /t Stahl /WSV17/ 2) Gesensschmiedeteile mit 25% Gratanteil, Erwärmung Gesensschmiedeteile zu 2/3 induktiv, zu 1/3 mit Erdgas, Erwärmung Freiformschmiedestücke zu 1/1 mit Erdgas /maFo17/	

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**).

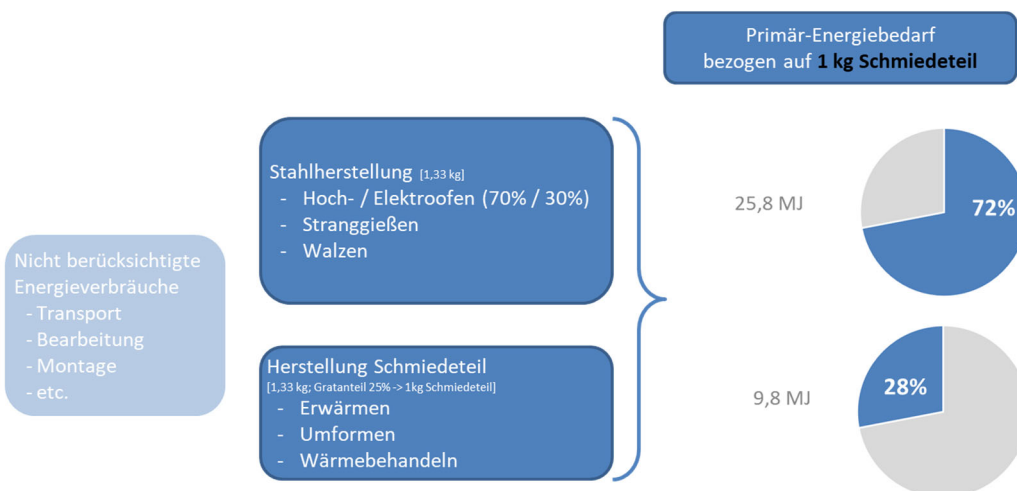


Bild 3: Primärenergiebedarf für die Herstellung von 1 kg Schmiedeteil

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; 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 /Kom2019/. 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 Pleueelfertigung durch...	Primärenergie [GJ / Jahr]	CO ₂ Emission [t / Jahr]
Materialerwärmung ²⁾	3.804	203
Materialherstellung ³⁾	17.962	1.225
Σ	21.767	1.428
1) Bei 3,4 Mio. PkW Neuzulassungen pro Jahr; 4 Pleuel pro Motor; 61g Einsparung pro Pleuel 2) Erwärmungsenergie 450 kWh/t Stahl; Primärenergiefaktor 2,8; CO ₂ Emission 537 g CO ₂ /kWh, [maFo17], [WD17], [BfW19] 3) CO ₂ Emission Stahlherstellung 1.460 kg CO ₂ /t Stahl [WSV17]		

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 [t / Jahr]
Materialerwärmung ²⁾	22.000	1.150
Materialherstellung ³⁾	103.000	7.000
Σ	125.000	8.150
1) Bei 3,4 Mio. PkW Neuzulassungen pro Jahr; 7% Gewichtseinsparung pro Kurbelwelle 2) Erwärmungsenergie 450 kWh/t Stahl; Primärenergiefaktor 2,8; CO ₂ Emission 537 g CO ₂ /kWh, [maFo17], [WD17], [BfW19] 3) CO ₂ Emission Stahlherstellung 1.460 kg CO ₂ /t Stahl [WSV17]		

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 [t / Jahr]
Materialerwärmung ²⁾	72.500	3.900
Materialherstellung ³⁾	342.000	23.400
Σ	414.500	27.300
1) Produktionsstatistik, Industrieverband Massivumformung e. V., 2018 [1], Gesenk-schmiedeteile und Freiformschmiedestücke. Bei 10% können im Mittel 10% Gewicht eingespart werden. 2) Erwärmungsenergie 450 kWh/t Stahl; Primärenergiefaktor 2,8; CO ₂ Emission 537 g CO ₂ /kWh, [maFo17], [WD17], [BfW19] 3) CO ₂ Emission Stahlherstellung 1.460 kg CO ₂ /t Stahl [WSV17]		

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 Entwicklung und Test eines geeigneten Versuchsablaufs und Werkzeuggeometrie

Auf Basis des abgeschlossenen DBU-Projektes "Steigerung der Ressourceneffizienz in der Massivumformung durch Absicherung und Erweiterung der Verfahrensgrenzen beim Querkeilwalzen, Az: 33234/01-24" wird ein Versuchsablauf mit einer geeigneten Werkzeug- und Bauteilgeometrie entwickelt, der eine streng differenzierte Betrachtung und Bewertung des Einflusses der verschiedenen umformenden Werkzeugbereiche ermöglicht.

2.2 Versuchsdurchführung für insgesamt 3 unterschiedliche Stahlwerkstoffe

Die in 2.1 entwickelte Vorgehensweise wird für 3 unterschiedliche Stahlwerkstoffe angewendet. Hierbei werden die identischen Stähle wie in dem Vorgängerprojekt untersucht (ein Vergütungsstahl (C45) und zwei AFP-Stähle (46MnVS5, C70S6)). Eventuell notwendige, konturierte Bauteilgeometrien werden durch Walzen und/oder spanende Bearbeitung hergestellt. Nach Durchführung der Versuche werden alle Versuchsteile bezüglich Innenfehlern geprüft.

2.3 Design der Kennfelder für die verschiedenen Werkstoffe

Aus den Versuchsergebnissen des AP 2.2 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.

2.4 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. In dem Stichversuch wird geprüft, ob die vorgegebenen Parameter mit dem Standardversuch umsetzbar sind und somit zu prüfaren Versuchsteilen führen. Gegebenenfalls werden aus den Ergebnissen notwendige Anpassungen für die Werkzeug- und/oder Bauteilgeometrie und die prinzipielle Vorgehensweise abgeleitet.

2.5 Ergänzung/Vervollständigung des 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.

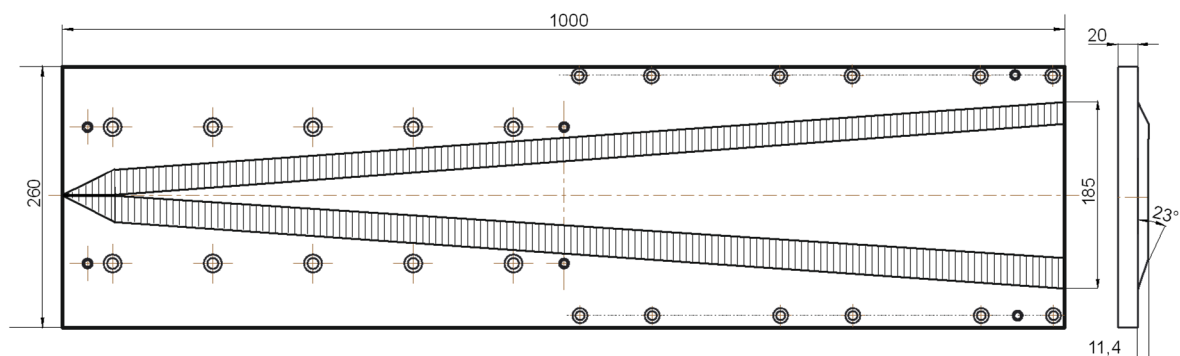
3 Vorhabensergebnisse

3.1 Entwicklung und Test eines geeigneten Versuchsablaufs und Werkzeuggeometrie

Die Entwicklung eines geeigneten Versuchsablaufs und Werkzeuggeometrie erfolgt unter Beachtung der folgenden Anforderungen beziehungsweise Problemstellungen:

- Die Umformung sollte ausschließlich im Schulterbereich erfolgen
- Für die Variable „n“ müssen Werte bis ca. 10 realisierbar sein
- Die Auswirkung der Einstechzone (Gratlinie) auf den Schulterbereich ist zu vermeiden
- Die geometrischen Grenzen der QKW-Versuchsanlage (max. Werkzeuglänge 1.000mm) ist zu berücksichtigen
- Das vorhandenes Versuchsmaterial aus dem Vorprojekt sollte wieder verwendbar sein (Länge und Durchmesser der Stangenabschnitte)
- Für die Belegung, Wiederholbarkeit der Versuche ist ein stabiler Walzprozess notwendig

Das unter diesen Anforderungen entwickelte Walzwerkzeug bedingt den Einsatz von vorgefertigten Walzproben. Durch die Vorbearbeitung der Walzproben wird eine ausschließliche Umformung im Schulterbereich gewährleistet.



Vorgedrehte Walzprobe

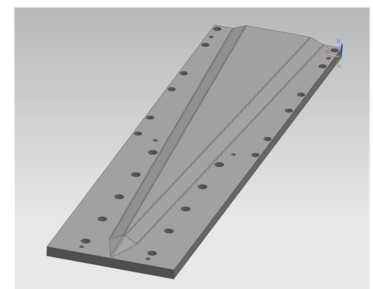
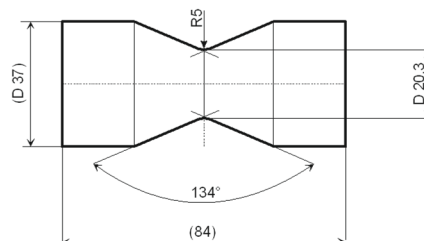


Bild 7: Versuchswerkzeug und Walz-Vorform

Mit dem neu angefertigten Werkzeug und vorgedrehten Walzproben wurden erste Versuche mit folgendem Ergebnis durchgeführt:

- Das neue Werkzeug liefert in Kombination mit vorbearbeiteten Vorformen stabile Walzergebnisse
- Für die Variable „n“ sind Werte im Bereich von $n = 10$ realisierbar, aber die Vorformen sind für große Werte von n zu kurz, da die Enden der Walzprodukte abgewalzt werden und dadurch Innenfehler entstehen können.

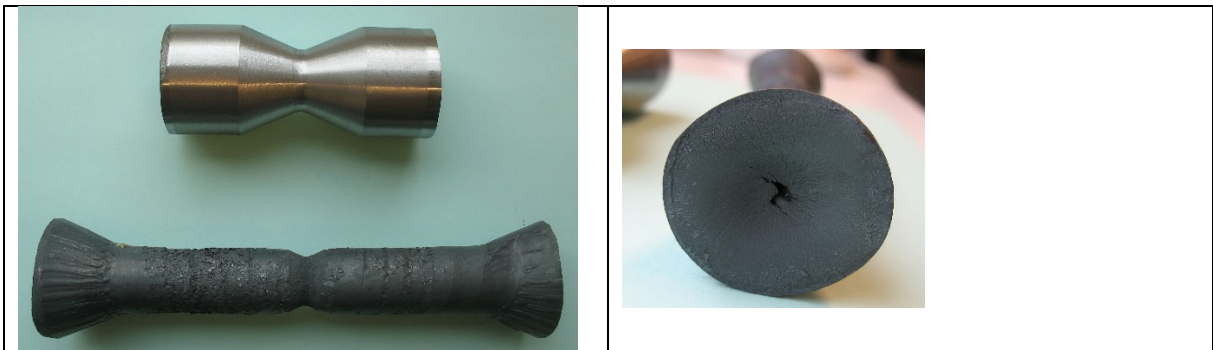


Bild 8: Walzprodukt und „gedrehte“ Vorform, $n = 10,6$

Zur Fertigung längerer Vorformprodukte wurde ein alternatives Stangenmaterial (D36, 46MnVS6) zur Verfügung gestellt.

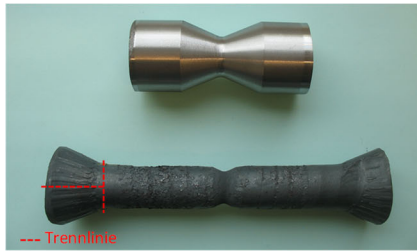
Der alternative Werkstoff erwies sich jedoch deutlich unempfindlicher gegenüber Kern-Rissbildung als der bisher verwendete Werkstoff und ist daher nicht als Ersatz für den bisher verwendeten Werkstoff geeignet.



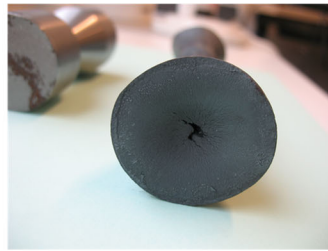
Bild 9: Gegenüberstellung von Walzergebnissen (mit identischen Prozess- und Walzparametern) mit dem alternativen Werkstoff 46MnVS6 und dem bisher verwendeten Werkstoff (46MnVS5)

Als Alternative wurde der Einsatz gewalzter Vorformen (welche eine größere Ausgangslänge ermöglichen) geprüft:

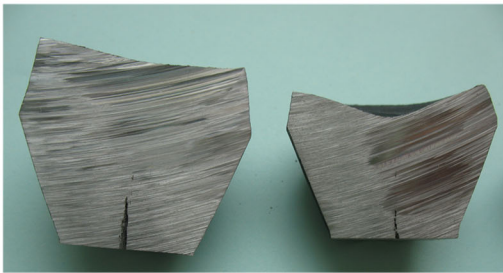
- Die Vorformen „gewalzt“ oder „gedreht“ führen zu gleichen Ergebnissen bezüglich der Ausprägung von Kern-Rissen.
- Mit der Länge der gewalzten Vorform können auch große Werte von „n“ realisiert werden.
- Alle weiteren Untersuchungen werden mit gewalzten Vorformen durchgeführt.



Walzprodukt und „gedrehte“ Vorform, n = 10,6

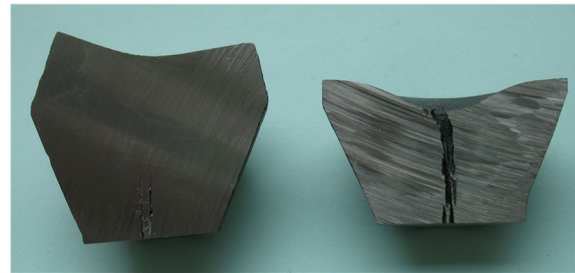


Vorform gewalzt (Werkzeug aus dem Vorprojekt)



Vorform: gewalzt
n: 7,8

Vorform: gedreht
n: 8,1

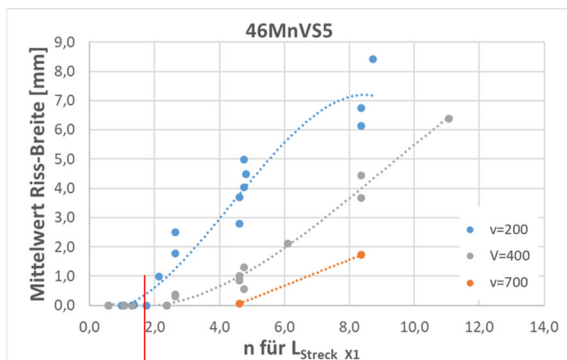


Vorform: gewalzt
n: 10,2

Vorform: gedreht
n: 10,6

Bild 10: Ergebnisse der Innenrissbildung und Ausprägung der Walzstückenden bei „gedrehten“ und „gewalzten“ Vorformen.

Die Fertigung der fehlerfreien (Kernrisse) Vorformen erfolgte auf Grundlage der Erkenntnisse aus dem Vorprojekt.



Arbeitspunkt zur Fertigung der Vorformen: n = 1,8; v = 500mm/s

Bild 11: Kennfeld aus dem Vorprojekt

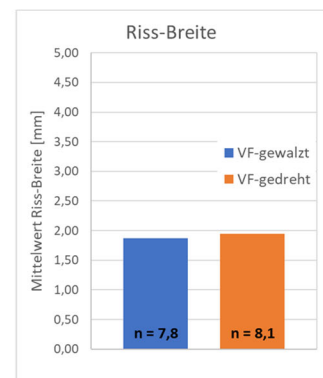
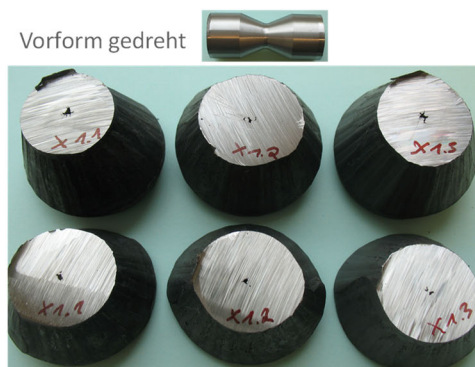


Bild 12: Gegenüberstellung von Walzergebnissen (mit identischen Prozess- und Walzparametern) mit gewalzten und gedrehten Vorformen.

3.2 Versuchsdurchführung für insgesamt 3 unterschiedliche Stahlwerkstoffe

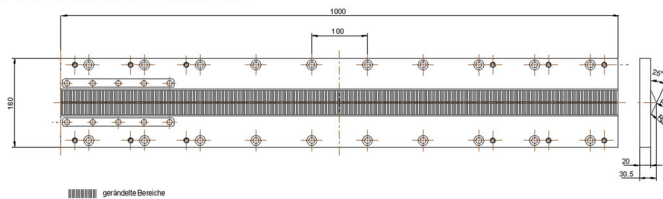
Der in AP 3.1 entwickelte Versuchsablauf wird für 3 Stahlwerkstoffe angewendet:

- 46MnVS5
- C45
- C70S6

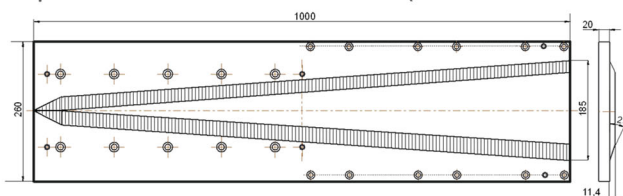
Je Werkstoff werden 8 Versuchseinstellungen ausgeführt. Jede Versuchseinstellung wird aus statistischen Gründen 3-fach belegt, d. h., insgesamt wurden 72 Versuchsteile gefertigt.

Versuchsablauf:

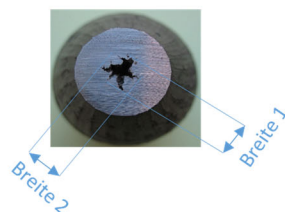
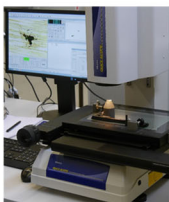
1. Vorformen walzen



2. Walzprodukte mit definiertem n (im Schulterbereich) walzen



3. Versuche auswerten



Konstante Versuchsparameter:

- Ausgangsgeometrie ($D_0 \times L$):
 - 46MnVS5: 37,0 x 84
 - C45: 35,0 x 84
 - C70S6: 36,5 x 84
- Erwärmungstemperatur: 1.200°C (Muffelofen)
- Werkzeugtemperatur: ca. 40°C

Die Kontrolle auf Innenrisse erfolgte durch:

- Auftrennen der Proben und optische Messung der Fehlergröße



Bild 13: Beispiel aufgetrennter Walzproben

Das erste Versuchsfeld wurde mit dem Werkstoff 46MnVS5 durchgeführt. Bei diesem Werkstoff traten, in Abhängigkeit der Versuchseinstellung, deutliche Innenfehler auf.

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 und bestätigen die Ergebnisse aus dem Vorprojekt.

Bei C45 und C70S6 war unabhängig von den Parametereinstellungen keine Fehlerbildung ersichtlich.

Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt in AP 3.3.

3.3 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 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)

Die Bildung von Innenrisen ist neben den genannten 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 Innenrissbildung
- Parallele Werkzeugflächen ohne Keilgeometrie → größter Einfluss auf Innenrissbildung

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. Die Arbeitskennfelder werden daher für die Werkzeugbereiche

- Gratlinie der Einstechzone und
- Schulterfläche

erstellt.

Hierzu werden 2 unterschiedliche Versuchswerkzeuge eingesetzt (Versuchswerkzeug I: Gratlinie der Einstechzone, Versuchswerkzeug II: Schulterfläche)

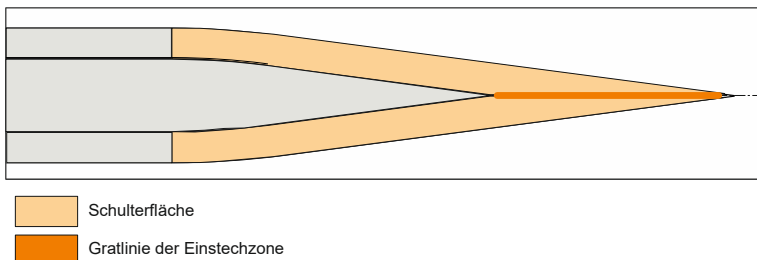


Bild 14: Definition der Werkzeugbereiche

Am gewalzten Bauteil entspricht der

- Werkzeugbereich „Schulterfläche“ dem Parameter $x_{1E} > 0$ und der
- Werkzeugbereich „Gratlinie der Einstechzone“ dem Parameter $x_{1E} = 0$.

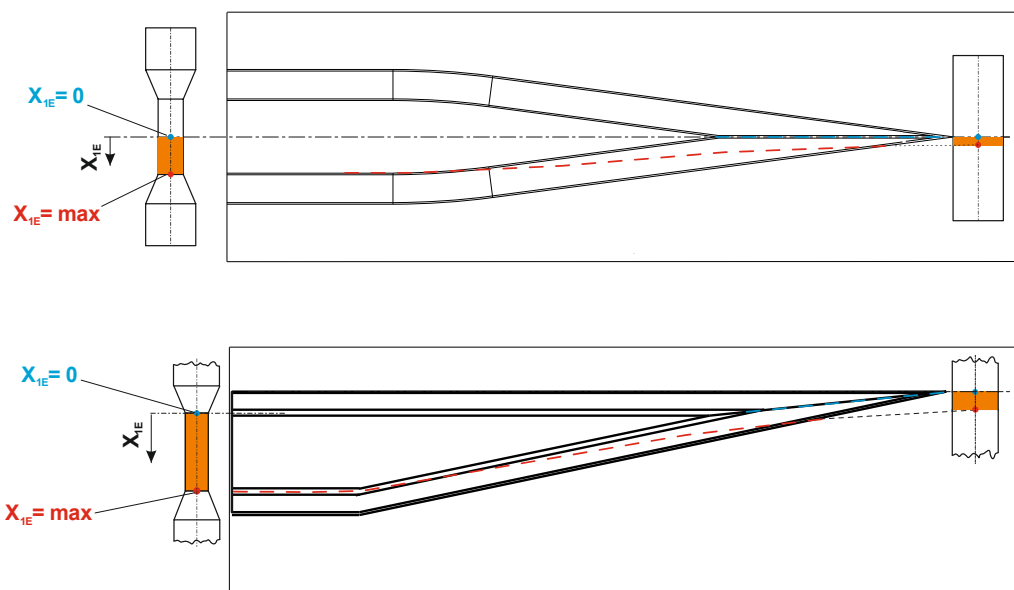


Bild 15: Definition des Parameters x_{1E} .

Oben: Keilgeometrie beidseitig, symmetrisch

Unten: Keilgeometrie einseitig, unsymmetrisch

In einem Kennfeld werden die Ergebnisse für beide Werkzeugbereiche ($x_{1E} = 0$ und $x_{1E} > 0$) dargestellt.

Das Kennfeld-Diagramm wird durch die in AP 3.1 dargestellten Versuche erstellt und zeigt die Abhängigkeit der Größe des Mannesmann-Fehlers (z. B. der Mittelwert der Riss-Breite) von der Variablen n .

In den Kennfeldern wird für den Parameter $x_{1E} > 0$ ausschließlich der Bauteilbereich mit der größten Anzahl an Überrollungen bzw. der höchsten „Mannesmann-Belastung“ dargestellt ($x_{1E \text{ max}}$). Dieser Bereich wird durch die Werkzeuglänge $L_{\text{Streck_x1}}$ definiert (**Bild 16**).

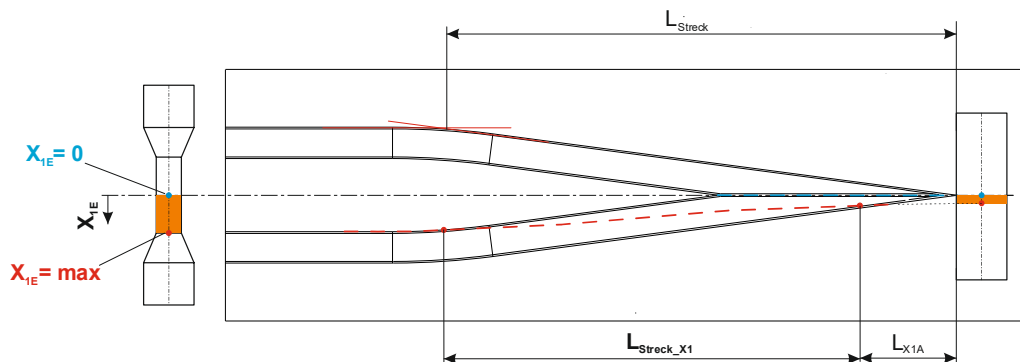


Bild 16: Definitionen am Werkzeug und Bauteil

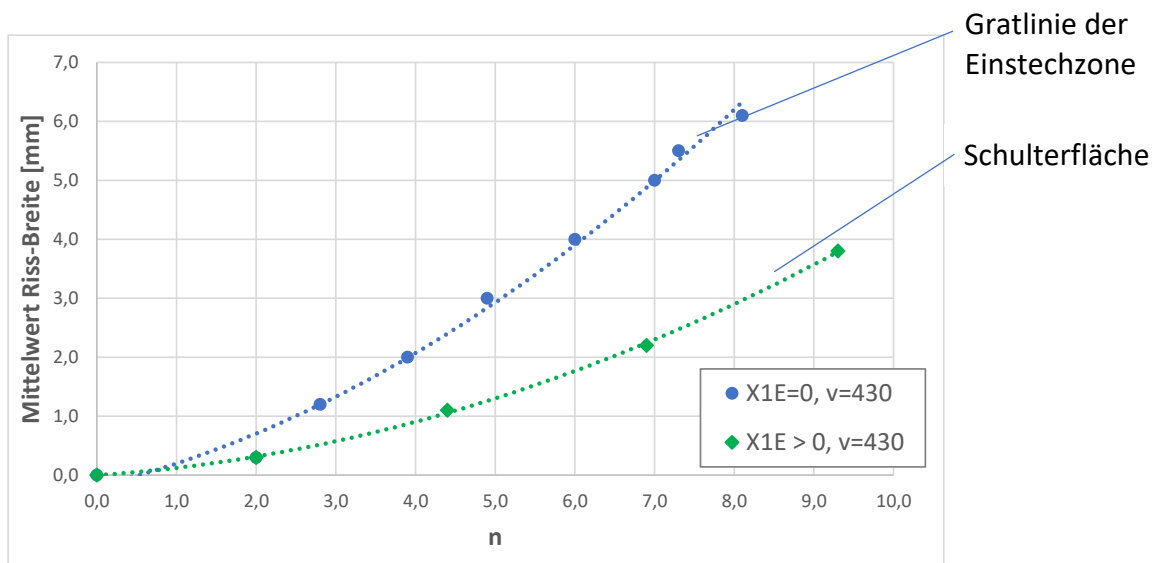


Bild 17: Darstellung Kennfeld

In Abhängigkeit der zu walzenden Werkstückgeometrie und der gewählten Werkzeugkonstruktion werden unterschiedliche Keilgeometrien verwendet. Da die Keilgeometrie für den Bauteilparameter $x_{1E} > 0$ einen erheblichen Einfluss auf die Variable n ausübt, werden die beiden grundlegenden Keilgeometrien bei dem Design der Kennfelder getrennt behandelt (siehe auch **Bild 15**):

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

Für die drei untersuchten Stahlwerkstoffe werden die Kennfelder für die Keilgeometrie Typ A dargestellt. Hierbei sind sowohl die Ergebnisse aus dem aktuellen Projekt ($x_{1E} > 0$), als auch die Ergebnisse aus dem Vorgängerprojekt ($x_{1E} = 0$) aufgeführt.

Für den Werkstoff 46MnVS5 sind zusätzlich die Ergebnisse der Validierung (aus dem Vorgängerprojekt) mit Realwerkzeugen dargestellt. Hierbei ist eine sehr gute Übereinstimmung des Kennfeldes mit den Validierungsergebnissen ersichtlich.

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

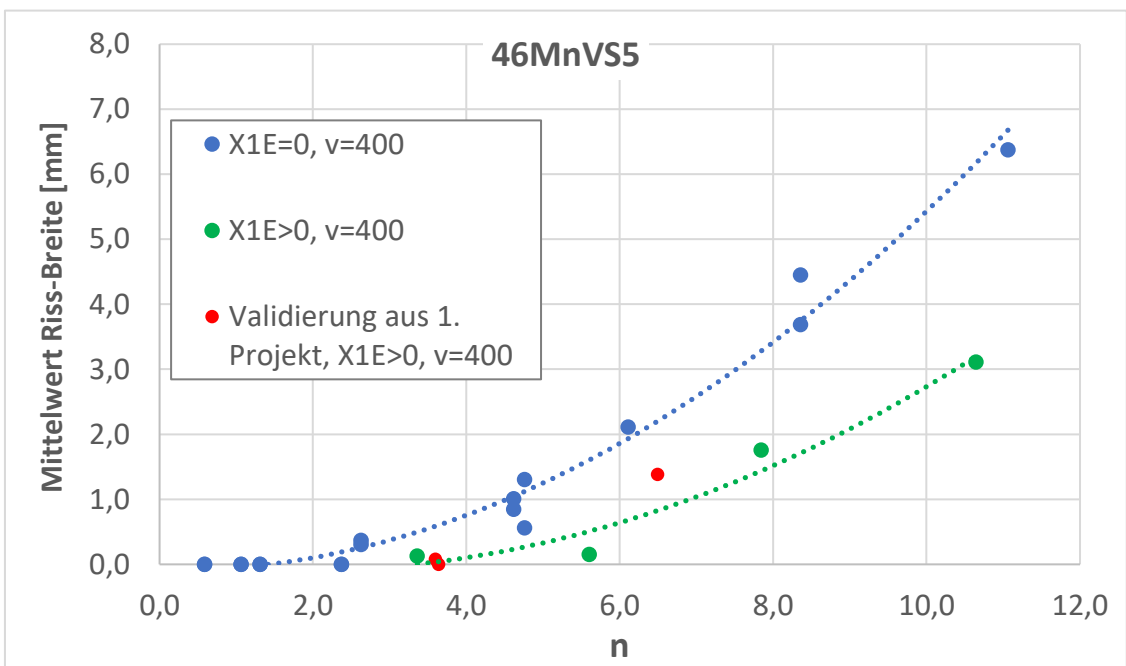
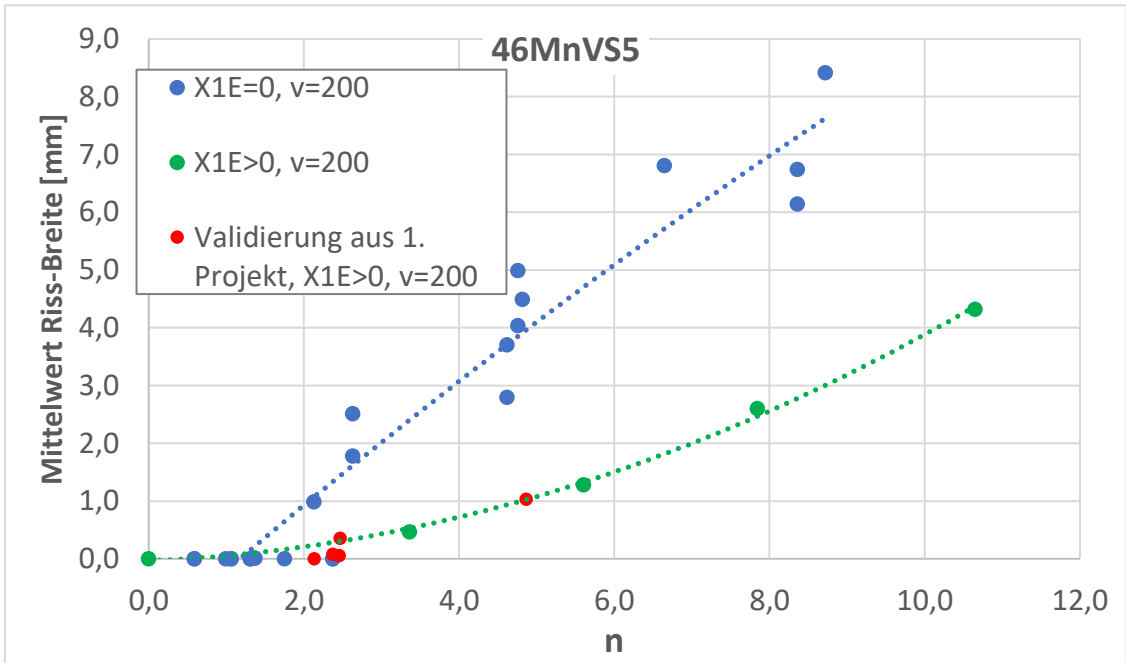


Bild 18: Kennfeld-Diagramme für den Werkstoff 46MnVS5 (Keilgeometrie Typ A)

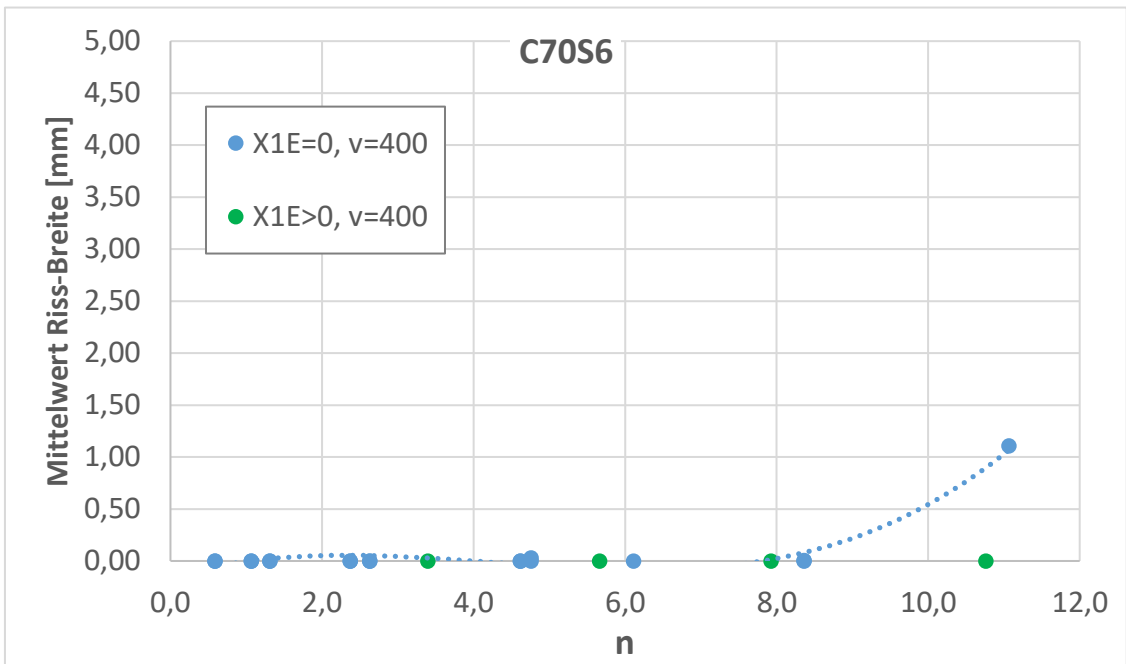
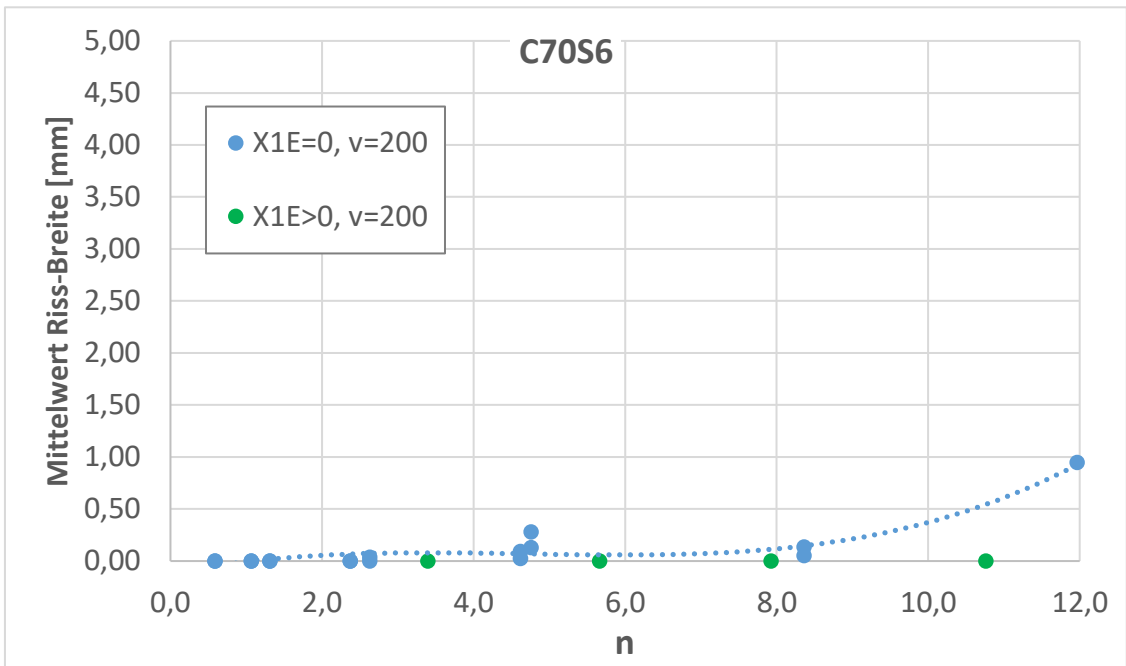


Bild 19: Kennfeld-Diagramme für den Werkstoff C70S6 (Keilgeometrie Typ A)

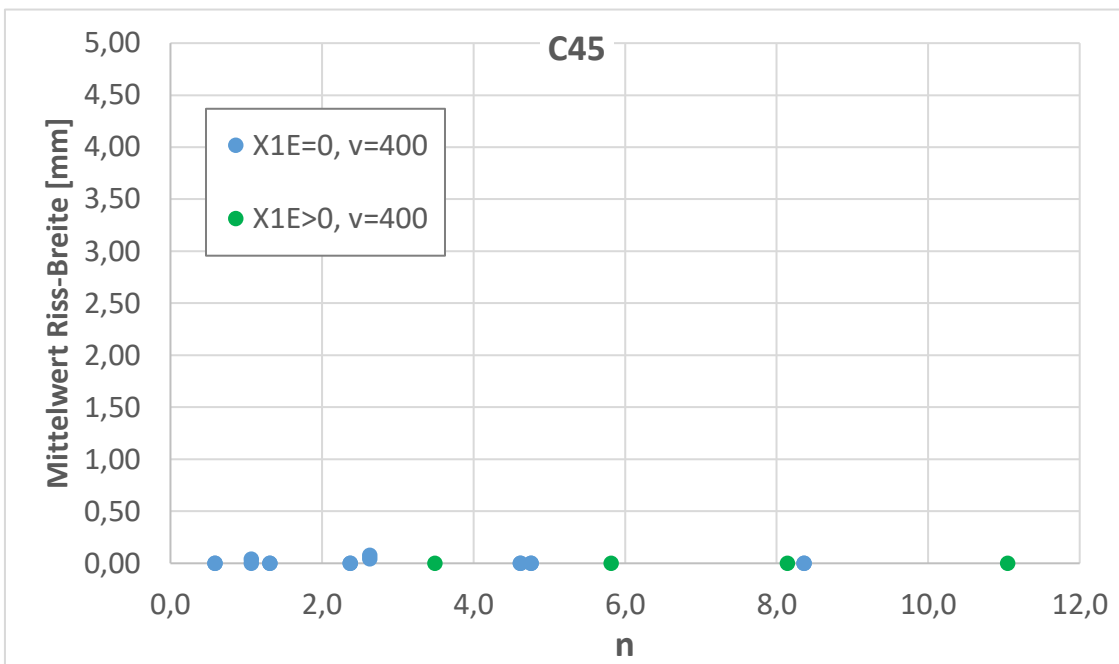
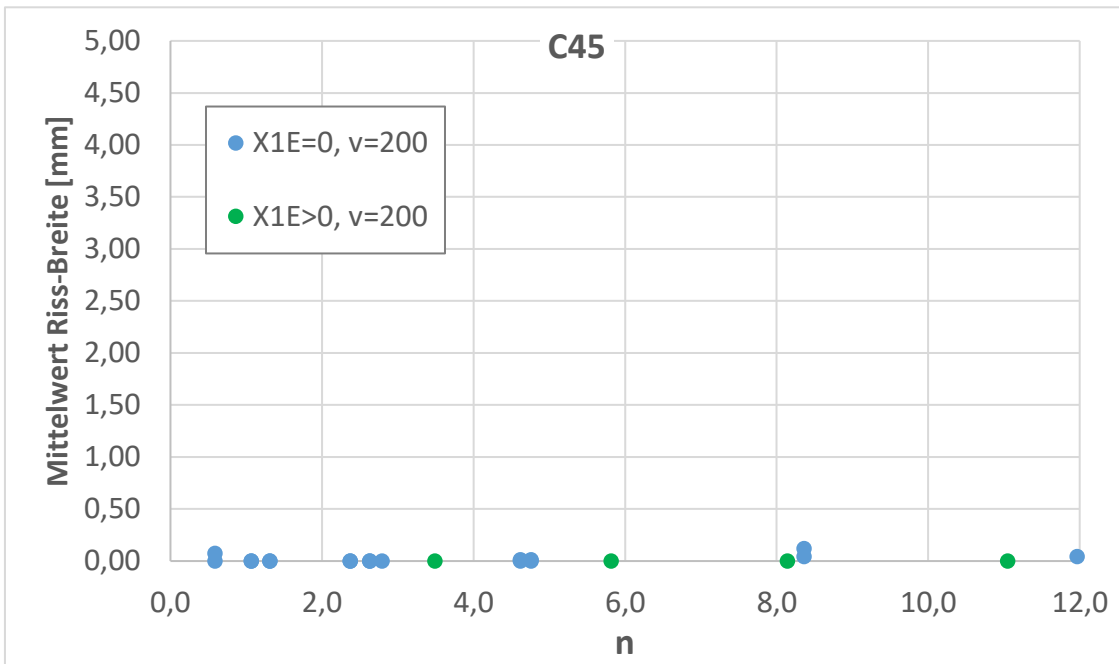


Bild 20: Kennfeld-Diagramme für den Werkstoff C45 (Keilgeometrie Typ A)

3.4 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 ($D_0 \times L$): 37,0 x 84
- Erwärmungstemperatur: 525°C
(Elektro-Muffelofen)
- Werkzeugtemperatur: 40°C
- Werkzeuggeometrie: identisch mit Stahlversuchen

Die Untersuchungen wurden mit dem neu angefertigten Werkzeug und vorgedrehten Walzproben durchgeführt.



Bild 21: Vorgedrehte Walzproben

Entsprechend den Versuchen mit den Stahlwerkstoffen, erfolgte die Kontrolle auf Innenrisse durch Auftrennen der Proben und optische Messung der Fehlergröße an den Trennflächen.

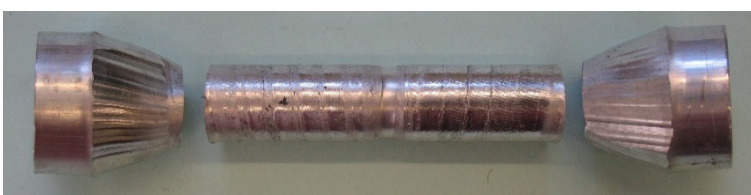


Bild 22: Aluminium-Walzprodukt nach dem Auftrennen.

Mit der optimierten Walzvorrichtung wurden 3 Versuchseinstellungen mit Variation der Einflussgröße Reduktionslänge λ durchgeführt. Alle Versuche wurden 3-fach belegt.

Ergebnis der Stichversuche:

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

3.5 Ergänzung/Vervollständigung des 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 Innenrisen ermöglicht.

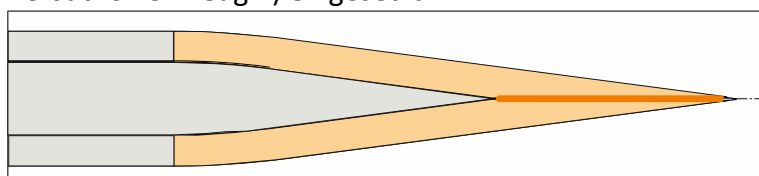
n ist eine Funktion folgender Einflussgrößen:

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

Die Arbeitskennfelder werden für die Werkzeugbereiche

- Gratlinie der Einstechzone und
- Schulterfläche

erstellt. Hierzu werden 2 unterschiedliche Versuchswerkzeuge (Versuchswerkzeug I und Versuchswerkzeug II) eingesetzt.





-  Schulterfläche
-  Gratlinie der Einstechzone

Bild 23: Definition der Werkzeugbereiche

Die prinzipielle Vorgehensweise zur Erstellung von Arbeitskennfeldern ist in **Bild 24** dargestellt.

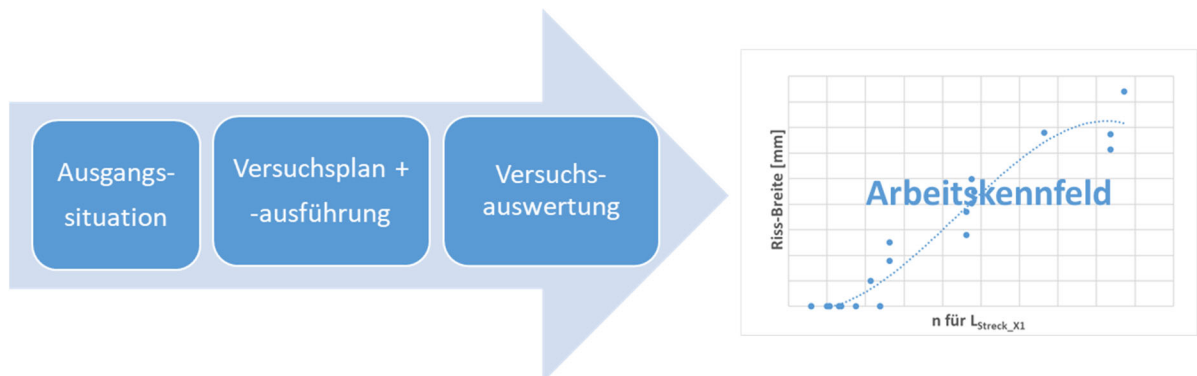


Bild 24: Prinzipielle Vorgehensweise zur Erstellung von Arbeitskennfeldern

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 Unterstützung der sogenannten Kennfeld-Tabelle erstellt. 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.

Das Programm berechnet auch automatisch die notwendigen Parameter der Prüfvorrichtung. Für die Variable n wird der maximale Wert n_{\max} aus der Ausgangssituation bestimmt, der minimale Wert n_{\min} sollte kleiner als 2,0 betragen. Die Schrittweite für die auszuführenden Versuche sollte zwischen n_n und n_{n+1} ca. 1,0 betragen. Die Schrittweitenänderung von n kann für $x_{1E}=0$ durch Variation des Durchmessers D_1 erfolgen und für $x_{1E} > 0$ beispielsweise durch Variation von B_3 (Länge des reduzierten Bereichs am Bauteil).

Bauteilgeometrie					Werkzeugparameter		Prozessparameter	Ergebnis		Parameter Prüfvorrichtung					
Eingabewerte					Eingabewerte		Eingabewerte	Überrollungen n		Versuchswerkzeug I (Gratlinie)			Versuchswerkzeug II (Schulterfläche)		
D ₀	D ₁	B ₃ (reduz. Länge)	ε _D	Längenfaktor λ	Schulterwinkel α (Streckzone)	β	Walzen- (Werkzeug-) geschwindigkeit v _{Wz}	n für x _{1E} = 0 (Gratlinie)	n für x _{1E} max (Schulterfläche)	Weg h vertikal	v _{Vertikal}	Weg L horizontal	v _{Horizontal}	Weg L horizontal	v _{Horizontal}
[mm]	[mm]	[mm]	[]	[]	[°]	[°]	[mm/s]			[mm]	[mm/s]	[mm]	[mm/s]	[mm]	[mm/s]
37,0	27,8	100,00	0,25	3,6	20,0	5,0	400,0	1,4	3,9	9,2	25,41	144,8	400,0	393,3	400,0
37,0	24,0	100,00	0,35	4,2	20,0	5,0	400,0	2,1	5,6	13,0	25,41	204,6	400,0	535,2	400,0
37,0	20,4	100,00	0,45	4,9	20,0	5,0	400,0	2,9	7,3	16,7	25,41	262,1	400,0	660,1	400,0
37,0	16,5	100,00	0,55	6,1	20,0	5,0	400,0	3,8	9,3	20,5	25,41	322,7	400,0	779,7	400,0
37,0	13,0	100,00	0,65	7,7	20,0	5,0	400,0	4,8	11,2	24,0	25,41	377,8	400,0	877,8	400,0
37,0	16,5	10,00	0,55	0,6	20,0	5,0	400,0	3,8	4,4	20,5	25,41	322,7	400,0	367,7	400,0
37,0	16,5	40,00	0,55	2,4	20,0	5,0	400,0	3,8	6,0	20,5	25,41	322,7	400,0	505,0	400,0
37,0	16,5	70,00	0,55	4,2	20,0	5,0	400,0	3,8	7,6	20,5	25,41	322,7	400,0	642,4	400,0
37,0	16,5	100,00	0,55	6,1	20,0	5,0	400,0	3,8	9,3	20,5	25,41	322,7	400,0	779,7	400,0
37,0	16,5	130,00	0,55	7,9	20,0	5,0	400,0	3,8	10,9	20,5	25,41	322,7	400,0	917,1	400,0

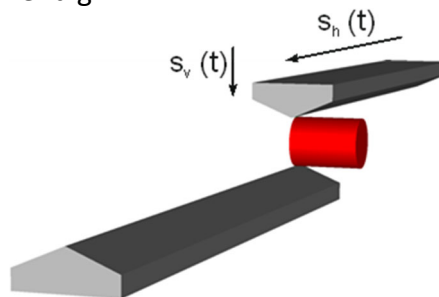
Bild 25: Programmoberfläche zur Ermittlung der Variablen n, des Prüfplans und der Parametereinstellungen der Prüfvorrichtung

Für die Versuchsausführung sind folgende Hilfsmittel erforderlich:

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

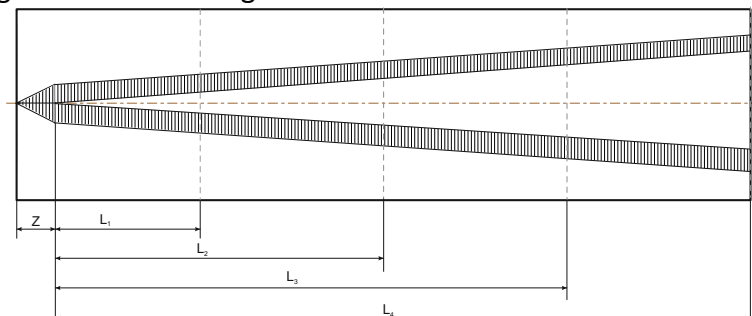
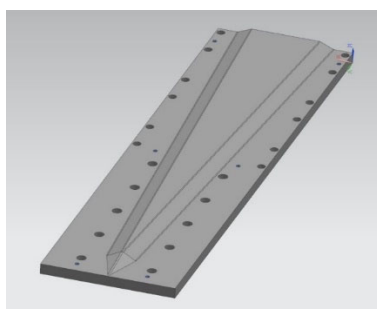
Versuchswerkzeug I:

Dieses Werkzeug wird benötigt, um den Einfluss der Grat-Linie der Einstechzone auf die Innenrissbildung zu untersuchen. Hierzu ist eine gleichzeitige horizontale und vertikale Werkzeugbewegung notwendig.



Versuchswerkzeug II:

Dieses Werkzeug wird benötigt, um den Einfluss der Keil-Schulterfläche auf die Innenrissbildung zu untersuchen. Hierbei werden vorgedrehte oder vorgewalzte Walzprodukte eingesetzt (siehe AP 3.2). Eine vertikale Werkzeugbewegung ist beim Einsatz des „Schulterwerkzeugs“ nicht notwendig.



Bei der Verwendung des „Schulterwerkzeugs“ werden Walzproben an verschiedenen Werkzeuglängen (z. B.: L₁ – L₄) entnommen. Hierdurch werden die unterschiedlichen Werte für n realisiert.

- 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. Um den Einfluss der Gratlinie beim Einsatz des Versuchswerkzeugs II zu vermeiden, sollten vorgeformte Walzproben verwendet werden (siehe AP 3.2)

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.

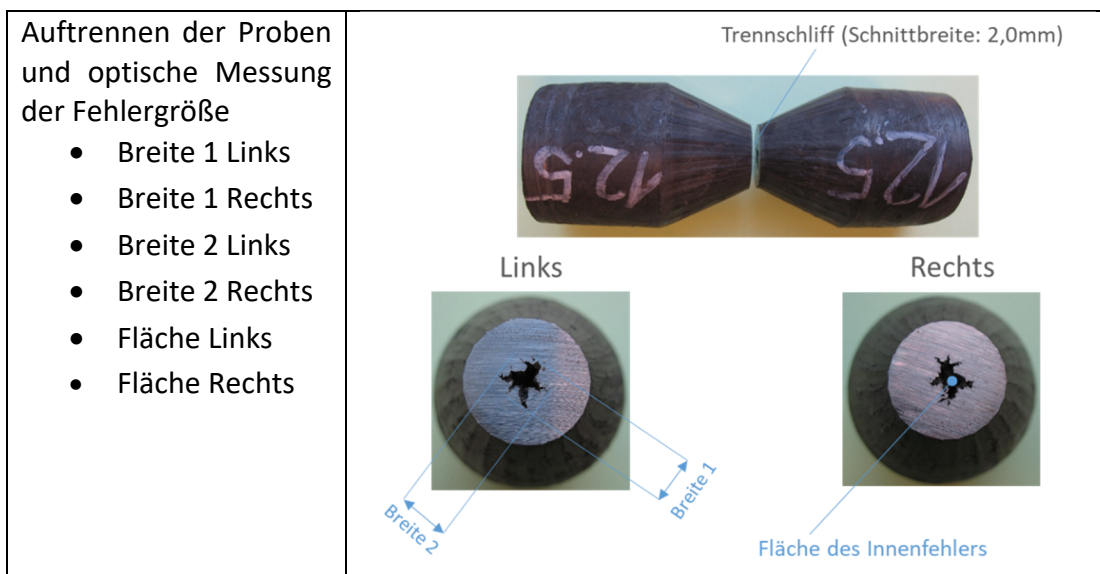


Bild 26: Bestimmung der Fehlergrößen

Aus den ermittelten Fehlergrößen wird das Arbeitskennfeld (**Bild 28**) erstellt. Hierbei wird die ausgewählte Fehlergröße über der Variablen n aufgetragen. Ein vollständiges Arbeitskennfeld enthält 2 Kennlinien, für $x_{1E} = 0$ und für $x_{1E} > 0$.

Der Wert x_{1E} ist die Längenvariable im reduzierten Bereich eines gewalzten Bauteils.

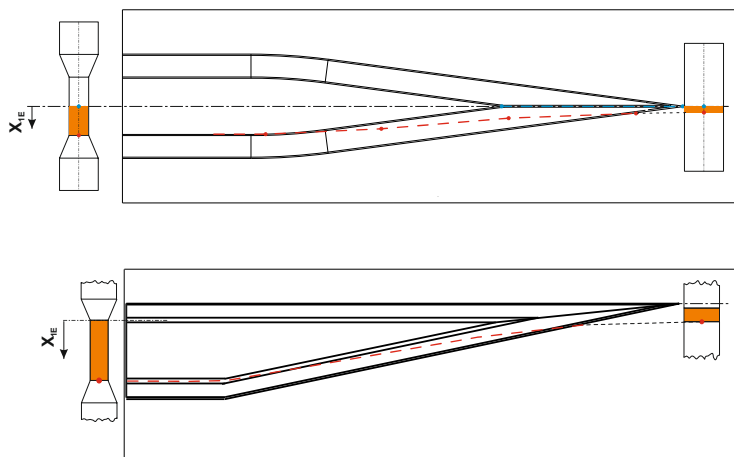


Bild 27: Definition von x_{1E}

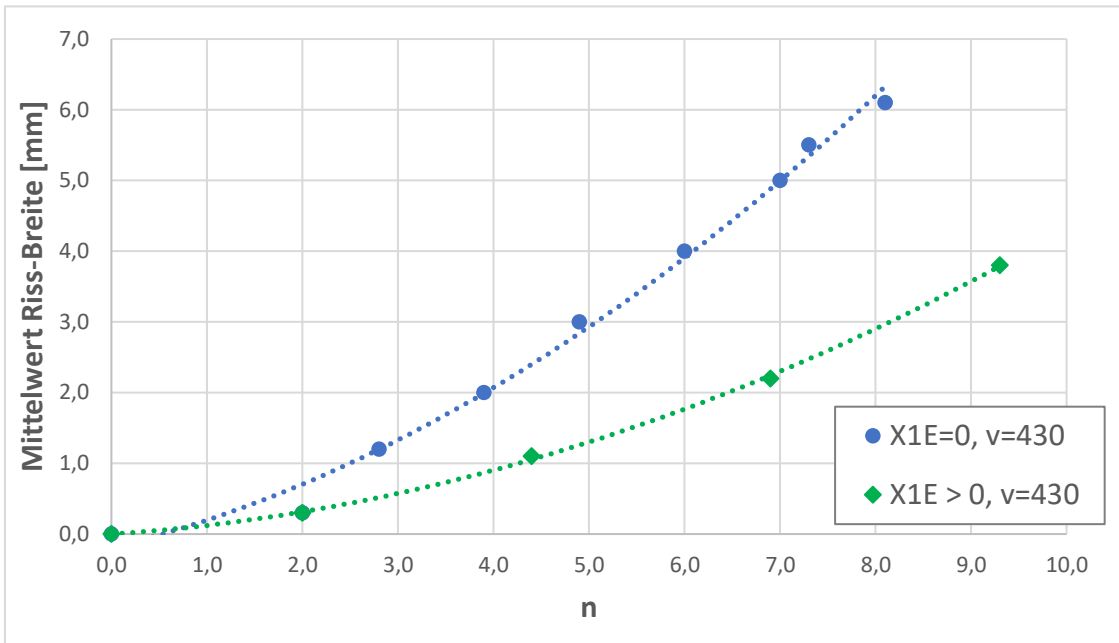


Bild 28: Arbeitskennfeld

Beispiel zur Vorgehensweise zur Erstellung von Arbeitskennfeldern

Ausgangssituation

- Bauteilgeometrie

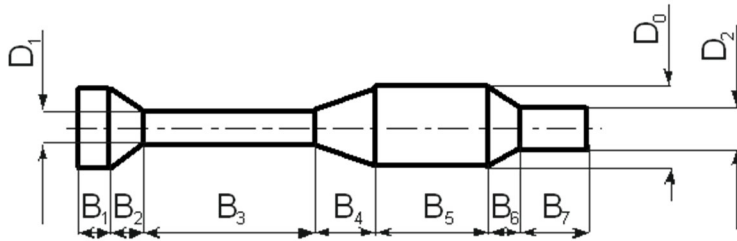


Bild 29: Beispiel Bauteilgeometrie

- $D_0 = 45$
- $D_1 = 20$ ($\varepsilon_D = 56\%$)
- $D_2 = 25$ ($\varepsilon_D = 44\%$)
- $B_3 = 80$ ($\lambda = 4,0$)
- $B_7 = 40$ ($\lambda = 1,6$)
- 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:

Versuchsplan A:

Ermittlung der Kennlinie für für $x_{1E} = 0$

Bauteilgeometrie						Werkzeugparameter		Prozessparameter		Ergebnis		Parameter Prüfvorrichtung Versuchswerkzeug I (Gratlinie)			
Eingabewerte			ε_D	Längenfaktor λ	Schulterwinkel α (Streckzone)	β	Walzen- (Werkzeug-) geschwindigkeit v_{Wz}	n für $x_{1E} = 0$ (Gratlinie)	Eingabewerte						
D_0	D_1	B_3 (reduz. Länge)							Weg h vertikal	v_{vertikal}	Weg L horizontal	$v_{\text{horizontal}}$			
[mm]	[mm]	[mm]	[]	[]	[°]	[°]	[mm/s]		[mm]	[mm/s]	[mm]	[mm/s]			
45,0	20,0	80,00	0,56	4,0	20,0	7,0	430,0	2,8	25,0	38,24	281,1	430,0			
45,0	16,0	80,00	0,64	5,0	20,0	7,0	430,0	3,4	29,0	38,24	326,1	430,0			
45,0	18,0	80,00	0,60	4,4	20,0	7,0	430,0	3,1	27,0	38,24	303,6	430,0			
45,0	22,0	80,00	0,51	3,6	20,0	7,0	430,0	2,5	23,0	38,24	258,6	430,0			
45,0	28,0	80,00	0,38	2,9	20,0	7,0	430,0	1,7	17,0	38,24	191,2	430,0			

Ermittlung von n_{IST}

Schrittweite für n durch Variation von D_1 bestimmen

Bild 30: Beispiel Versuchsplan A

Versuchsplan B:
Ermittlung der Kennlinie für für $x_{1E} > 0$

Bauteilgeometrie					Werkzeugparameter			Prozessparameter		Ergebnis	
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 x_{1E} n_{max} (Schulterfläche)		Parameter Prüfvorrichtung Versuchswerkzeug II (Schulterfläche)	
[mm]	[mm]	[mm]	[]	[]	[°]	[°]	[mm/s]	[]		Weg L horizontal [mm]	$v_{Horizontal}$ [mm/s]
45,0	20,0	80,00	0,56	4,0	20,0	7,0	430,0	7,9		802,6	430,0
45,0	20,0	120,00	0,56	6,0	20,0	7,0	430,0	10,4		1064,0	430,0
45,0	20,0	100,00	0,56	5,0	20,0	7,0	430,0	9,1		933,3	430,0
45,0	20,0	80,00	0,56	4,0	20,0	7,0	430,0	7,9		802,6	430,0
45,0	20,0	60,00	0,56	3,0	20,0	7,0	430,0	6,6		671,8	430,0
45,0	20,0	40,00	0,56	2,0	20,0	7,0	430,0	5,3		541,1	430,0
45,0	20,0	20,00	0,56	1,0	20,0	7,0	430,0	4,0		410,4	430,0
45,0	20,0	5,00	0,56	0,3	20,0	7,0	430,0	3,1		312,4	430,0

Ermittlung von n_{IST}

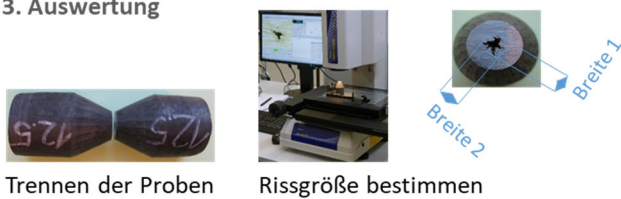
Schrittweite für n durch Variation von B_3 bestimmen.

Bild 31: Beispiel Versuchsplan B

Auswertung

Beispiel

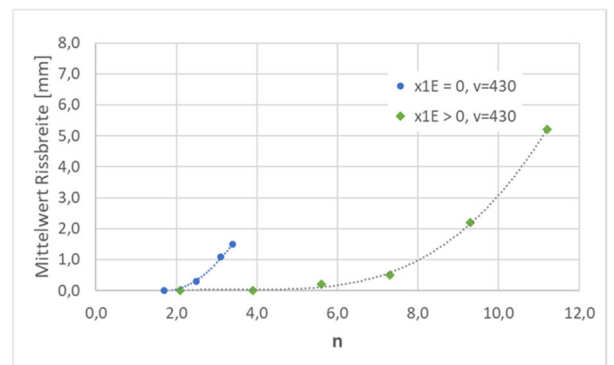
3. Auswertung



Trennen der Proben

Rissgröße bestimmen

n	n _{max}	n _{IST}	Geometrie						Werkzeug		Prozess		Ergebnis
			D_0	D_1	B_3	ϵ_D	λ	α	β	v_{Wz}	n	n_{max}	
11,2	11	11	45,0	20,0	80,00	0,56	4,0	20,0	7,0	430,0	7,9	10,4	27,8
9,3	9	9	45,0	20,0	100,00	0,56	5,0	20,0	7,0	430,0	9,1	10,4	27,8
7,5	7	7	45,0	20,0	80,00	0,56	4,0	20,0	7,0	430,0	7,9	10,4	27,8
5,8	5	5	45,0	20,0	60,00	0,56	3,0	20,0	7,0	430,0	6,6	10,4	27,8
3,9	3	3	45,0	20,0	40,00	0,56	2,0	20,0	7,0	430,0	5,3	10,4	27,8
2,1	1	1	45,0	20,0	20,00	0,56	1,0	20,0	7,0	430,0	4,0	10,4	27,8
0,3	0	0	45,0	20,0	5,00	0,56	0,3	20,0	7,0	430,0	3,1	10,4	27,8



Arbeitskennfeld

Bild 32: Beispiel Auswertung und Arbeitskennfeld

4 Verbreitung der Vorhabensergebnisse

Die Verbreitung des Vorgängerprojektes erfolgte 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
- VDI-Fachtagung Feb.2020, Düsseldorf

In 2023 ist die Verbreitung der Vorhabensergebnisse in nachfolgender Weise vorgesehen:

- Fachaufsatz in der Zeitschrift massivUMFORMUNG

5 Fazit

Das Vorhaben muss in Kombination mit dem Vorgängerprojekt, dem DBU-Projekt "Steigerung der Ressourceneffizienz in der Massivumformung durch Absicherung und Erweiterung der Verfahrensgrenzen beim Querkeilwalzen, Az: 33234/01-24" betrachtet werden. In dem Vorgängerprojekt wurde ersichtlich, dass die dort erarbeitete Vorgehensweise zu Ermittlung von Arbeitskennfeldern um eine signifikante Einflussgröße, dem „Umformenden Werkzeugbereich“ ergänzt werden muss. Diese Ergänzung ist in dem vorliegenden Vorhaben erfolgt.

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 infolgedessen, 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.

Mit der erarbeiteten Vorgehensweise, dem erprobten Versuchsstand und Versuchswerkzeugen und der ergänzten Einflussgröße 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.

Die Arbeitskennfelder bilden damit ein sicheres Auslegungskriteriums für Querkeilwalzwerkzeuge, ermöglichen die vollständigen Ausnutzung der Verfahrensgrenzen und damit Optimierung der gewichtsrelevanten Walzteilgeometrie.

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.

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 und grundlegende Kenntnisse, die für die Ausnutzung der Ressourcenpotentiale des Querkeilwalzens genutzt werden können.

6 Literaturverzeichnis

- /IMU19/ Industrieverband Massivumformung e. V., Auswertung der amtlichen Produktionsstatistik für die Schmiedeindustrie in Deutschland, I. – IV. Quartal 2018, April 2019
- /maFo17/ massiverFOKUS, Massivumformung in Deutschland, Eine energieintensive energieeffiziente Branche, Industrieverband Massivumformung e. V., Dez. 2017
- /WSV17/ Fakten zur Stahlindustrie in Deutschland, Wirtschaftsvereinigung Stahl, 2017
- /WD17/ Primärenergiefaktoren, Wissenschaftliche Dienste, Deutscher Bundestag, 2017
- /IMU2011/ Systematische Identifikation von Möglichkeiten zur Energieeffizienzsteigerung in Betrieben der Massivumformung, DBU-Projekt (Az: 26966) 2011
- /Kom2019/ Komischke, Tim, u. a.: Voraussage der Kernrissinitiierung in Querwalzprozessen mit Hilfe experimenteller und virtueller Methoden, massivumformung (September 2019)