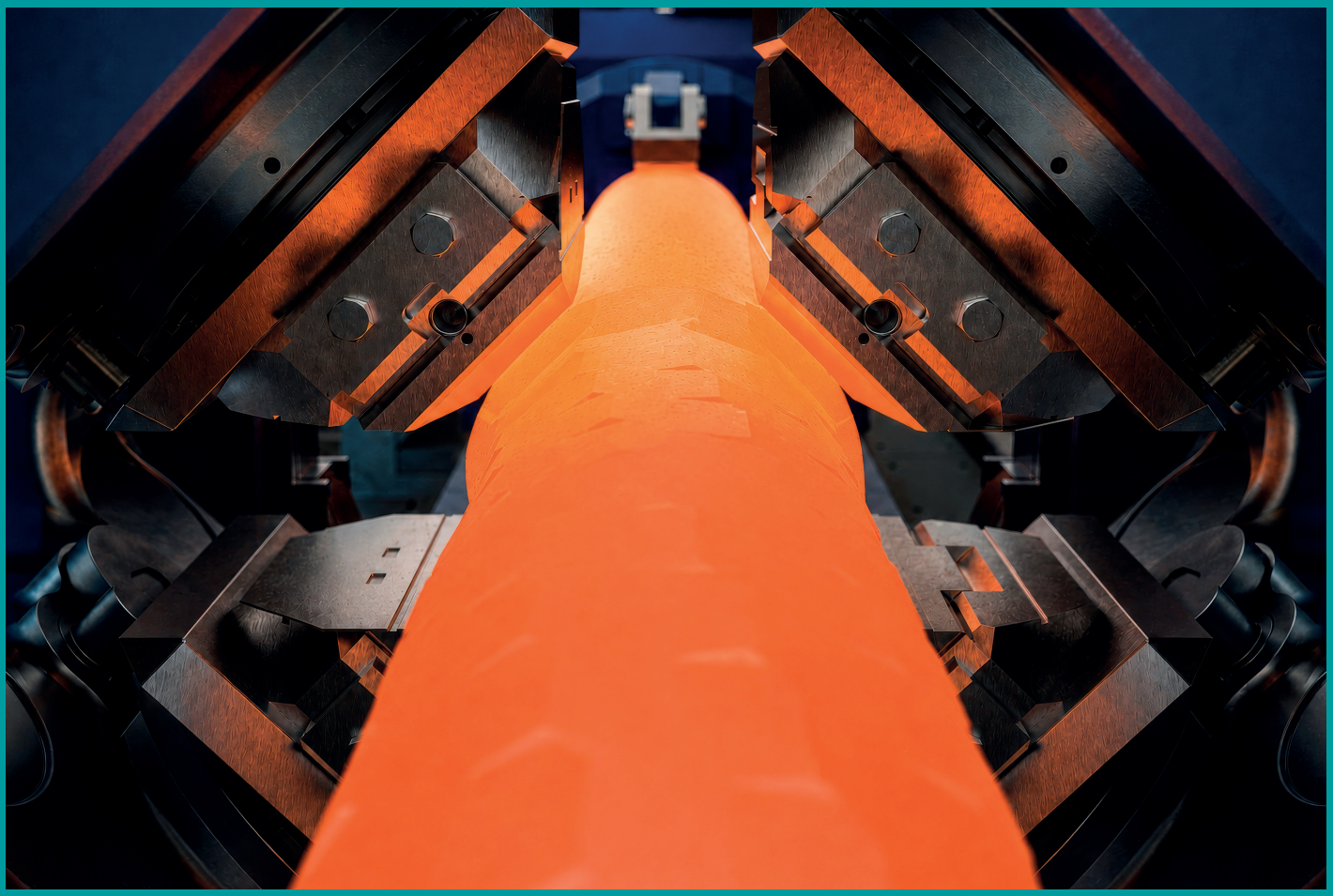


Sattel-Paar-Versatz-Schmieden (DPOF) – Ein neues Radialschmiedeverfahren zur gezielten Gefüge-Homogenisierung

Beim konventionellen Radialschmieden bleibt die plastische Dehnung im Bauteilzentrum häufig hinter den Randzonen zurück. Das Sattel-Paar-Versatz-Schmieden (DPOF) setzt genau hier an: Ein definierter Zeitversatz der Sattelpaare erhöht die Kernverformung, verbessert die Defektschließung und ermöglicht eine homogenere Gefügestruktur über den gesamten Querschnitt. Simulationen und Versuche auf einer RX-40 bestätigen die Wirkung.

AUTOREN



Dipl.-Ing.
Robert Koppensteiner

ist Executive Vice President
bei der Gesellschaft für
Fertigungstechnik und Maschinenbau (GFM)
in Steyr (Österreich)



Ing.
Martin Auer

ist Vice President Project and Technology
bei der Gesellschaft für
Fertigungstechnik und Maschinenbau (GFM)
in Steyr (Österreich)

> Pressen und Radialschmieden: Das Beste aus beiden Welten frei kombinierbar.
> **Robert Koppensteiner**

> Am Ende entscheidet nicht der stärkste Hub, sondern der richtige – am richtigen Ort, im richtigen Moment und mit genau der Wirkung, die der Werkstoff braucht.
> **Martin Auer**

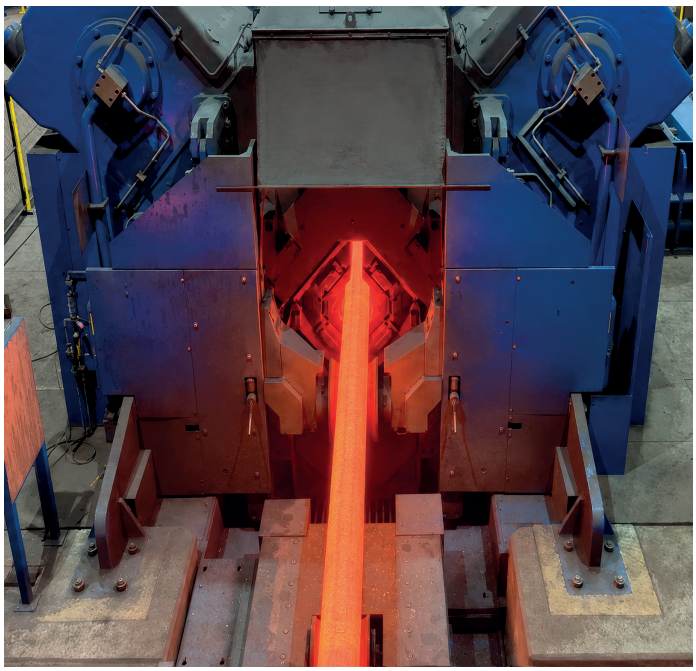


Bild 1: Radialschmiedemaschine in Produktion

Das Radialschmieden mittels vier Sätteln stellt ein etabliertes Verfahren zur Umformung langgestreckter, rotationssymmetrischer Bauteile dar. Insbesondere mechanische Radialschmiedemaschinen zeichnen sich durch kurze Kontaktzeiten, hohe Hubfrequenzen und eine vorteilhafte thermomechanische Prozessführung aus. Dennoch weist das Verfahren eine prozessbedingte Limitierung auf: Beim synchronen Betrieb aller vier Werkzeuge ist die plastische Dehnung im Bauteilzentrum häufig signifikant geringer ausgeprägt als in den randnahen Bereichen.

Gerade bei hochbeanspruchten Werkstoffen wie Nickelbasis-Superlegierungen (zum Beispiel Alloy 718 / 2.4668), hochlegierten Werkzeugstählen oder austenitischen nichtrostenden Stählen ist jedoch das Erreichen einer Mindestdehnung im Kern zwingend erforderlich, um die diskontinuierliche dynamische Rekristallisation (DDRX) zu initiieren. Wird diese kritische Dehnung unterschritten, verbleiben grobkörnige Gefüge-Inhomogenitäten im Bauteilkern, welche insbesondere die zyklische Festigkeit (Ermüdungsverhalten) drastisch reduzieren. Vor diesem Hintergrund verfolgt die vorliegende Arbeit den Ansatz, die Kernbeanspruchung nicht über eine Steigerung des geometrischen Umformgrads zu erhöhen, sondern über eine gezielte Modifikation des kinematischen Ablaufs der Sattelsegmente.

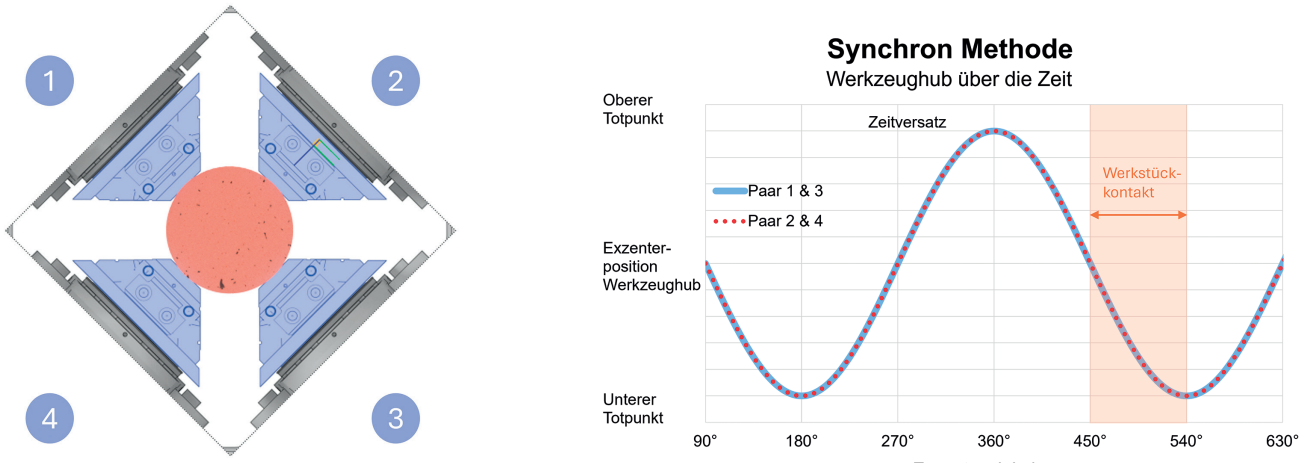


Bild 2: Sattelposition: Konventionelles Synchronschmieden (links) und Schema: Konventionelles Synchronschmieden (rechts)

PRINZIP DES SATTEL-PAAR-VERSATZ-SCHMIEDENS

– Konventionelles Synchronschmieden

Beim konventionellen Radialschmieden treffen beide Sattelpaare zeitgleich auf das Werkstück. Dieser synchrone Werkzeugeingriff induziert (Bild 2)

- einen überwiegend radial ausgerichteten Werkstofffluss,
- ausgeprägt hohe hydrostatische Druckspannungen im Bauteilzentrum sowie
- einen vergleichsweise geringen Anteil an Schubspannungen und Scherdehnungen.
- Der resultierende Dehnungsverlauf über den Werkstückquerschnitt ist folglich durch ein Maximum in den randnahen Zonen und ein ausgeprägtes Minimum im Zentrum charakterisiert.

– Sattel-Paar-Versatz-Schmieden (zeitversetztes Schmieden)

Das Sattel-Paar-Versatz-Schmieden wird durch einen definierten Phasenversatz der Sattelachsen charakterisiert, der mechanisch über einen Exzenterversatz in der Kinematik realisiert wird (Bild 3). Die Untersuchungen zeigen, dass ein Phasenversatz von 30° zu einem Zeitversatz von 28 ms und einem vertikalen Höhenversatz von 4,8 mm führt.

Die Folge dieser prozesskinematischen Modifikation ist eine sequenzielle anstelle einer simultanen Belastung des Werkstücks:

- Sattelpaar A initiiert die primäre plastische Deformation des Werkstoffs,
- Sattelpaar B greift zeitlich verzögert ein,
- der Werkstoff erfährt eine oszillierende, durch Scherung dominierte Wechselbeanspruchung.

Infolgedessen steigt der Scherdehnungsanteil signifikant an, was zu einer gezielten Erhöhung des Umformgrads insbesondere im Zentrum des Querschnitts führt.

NUMERISCHE SIMULATIONEN

Die mit der herstellereigenen Simulationssoftware FemForge (GFM) durchgeführten Finite-Elemente-Analysen (FEA) des Umformprozesses erlauben für identische geometrische Querschnittsabnahmen folgende Rückschlüsse (Bild 4):

– eine annähernde Verdopplung der akkumulierten plastischen Dehnung im Bauteilzentrum,
– eine signifikant homogenere Dehnungsverteilung über den gesamten Werkstückquerschnitt sowie
– das Ausbleiben einer nennenswerten Erhöhung der Randdehnungen.

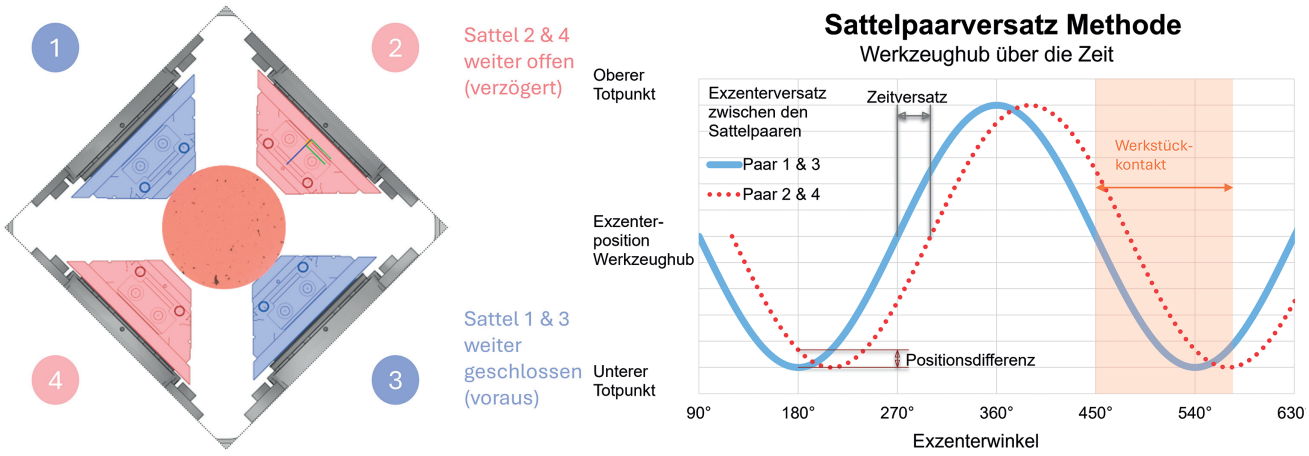


Bild 3: Sattelposition: Sattel-Paar-Versatz-Schmieden (DPOF), links, und Schema: Sattel-Paar-Versatz-Schmieden (DPOF), rechts

	Fall #1 Konventionelles Schmieden	
	1. Stich	2. Stich
Durchmesser [mm]	345	250
Hübe pro Minute [1/min]	180	180
Einlaufgeschwindigkeit [mm/s]	41	42
Drehschritt [°]	25	25
Versatzwinkel [°]	0	0

Bild 4: Schema: Ergebnisse des Vergleichs mit FEM



Bild 5: Rohlinge nach dem Bohren

Im betrachteten Anwendungsbeispiel (Ausgangsdurchmesser 450 mm, Enddurchmesser 250 mm) stieg die akkumulierte effektive Dehnung im Zentrum von zirka 1,0 beim synchronen Schmieden auf circa 2,25 unter Anwendung des Sattel-Paar-Versatzes. Diese Dehnungswerte liegen deutlich über dem für viele Werkstoffe kritischen Schwellenwert zur Initiierung einer vollständigen Rekristallisation.

EXPERIMENTELLE VERIFIKATION

– Versuchsaufbau

Zur experimentellen Validierung der numerischen Ergebnisse wurden industrielle Schmiedeversuche auf einer Radialschmiedemaschine des Typs RX-40 durchgeführt (Bild 1).

Als Versuchswerkstoff kam der Vergütungsstahl 42CrMo4 zum Einsatz, da dieser aufgrund seines charakteristischen Umform- und Fließverhaltens eine präzise und reproduzierbare Analyse des Defektschließverhaltens erlaubt.

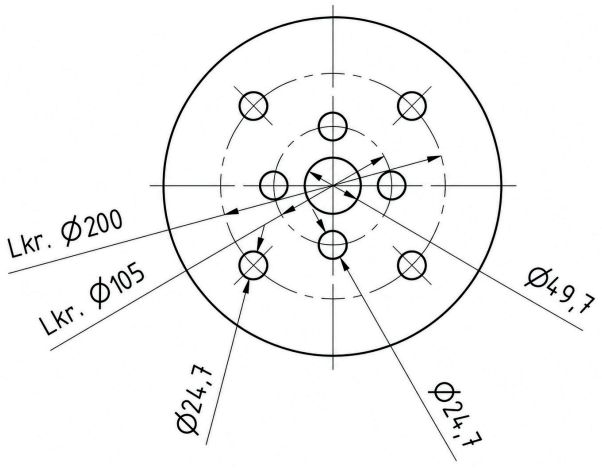
Für die Versuchsreihen wurden sechs zylindrische Rohteile mit einem Durchmesser von 300 mm und einer Länge von 1.680 mm vorbereitet und mit definierten Bohrungen zur Simulation künstlicher innerer Defekte gemäß den Bildern 5 und 6 versehen. Um eine oxidative Zunderbildung innerhalb der Defekte während der Erwärmung zu minimieren, wurden die Probenkörper stirnseitig mit aufgeschweißten Abdeckplatten gasdicht verschlossen (Bild 7):

Die anschließende Umformung erfolgte zu gleichen Teilen: Drei Rohteile wurden mittels des konventionellen synchronen Radialschmiedeprozesses (ohne Exzenterversatz) umgeformt, während die verbleibenden drei Proben unter Anwendung eines Exzenterversatzes von 30° geschmiedet wurden. Alle weiteren kinematischen und thermomechanischen Prozessparameter wie Hubfrequenz, Vorschubgeschwindigkeit, Drehwinkel und Querschnittsabnahmen wurden hierbei strikt konstant gehalten.

Die Hubfrequenz wurde konstant auf 180 min-1 und der Drehschritt auf 20,4° eingestellt. Aus dem gewählten Exzenterversatz resultiert im konkreten Prozessgefüge ein zeitlicher Versatz der Sattelachsen von 28 ms und damit ein vertikaler Höhenversatz von 4,82 mm. Die Details der Stiche (Stichfolge und Werkzeuglänge) zeigt Bild 8.

– Probenpräparation

Nach Abschluss des Schmiedeprozesses wurden die Probenkörper segmentiert und gemäß einem vordefinierten Schnitt-



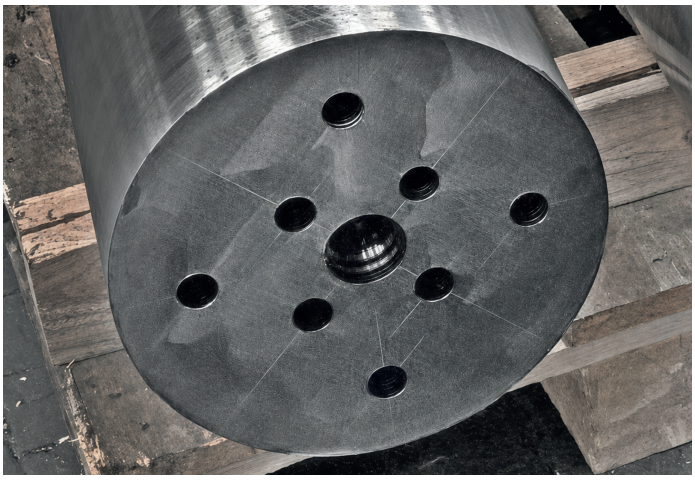


Bild 6: Bohrskizze (links) und Stirnseite des Rohlings nach dem Bohren (rechts)



Bild 7: Rohlinge vor dem Erwärmen

Querschnitt	Durch-messer [mm]	Längung	Reduktion [%]	Gesamt-längung	Gesamt-Reduktion	Länge [mm]
1 (Rohteil)	300,0					1680
2 (nach erstem Stich)	259,8	1,33	25,0			2240
3 (nach zweitem/ letztem Stich)	225,0	1,33	25,0	1,78	43,75	2987

Bild 8: Stichfolge und Werkstücklänge

schema nach Bild 9 aufgetrennt. Die werkstoffkundliche und geometrische Bewertung der umgeformten Proben basierte auf folgenden Untersuchungsmethoden:
- der optischen Vermessung und Digitalisierung der verbleibenden Defektquerschnittsflächen,
- der vergleichenden statistischen Auswertung der Defektgeometrien sowie
- komplementären Härteprüfungen (nach Vickers) entlang des gesamten Bauteildurchmessers.

– Ergebnisse der Härtemessungen

Zur vergleichenden Analyse wurde für die Proben 1 bis 3 (mit Exzenterversatz) sowie für die Proben 4 bis 6 (konventionelle Fahrweise) jeweils der arithmetische Mittelwert der Härtewerte gebildet (Bild 10). Zwischen den beiden Schmiedestrategien konnte kein statistisch signifikanter Unterschied im Härteniveau nachgewiesen werden. Auch der radiale Härteverlauf zeigte sich über den gesamten Querschnitt hinweg konstant. Infolgedessen ließ sich über die makroskopische Härteprüfung im vorliegenden Zustand keine direkte Korrelation zur lokalen Korngrößenverteilung ableiten.

– Ergebnisse der Defektgrößen

Die quantitative Analyse umfasste sowohl die Evaluierung der globalen Defektgeometrie als auch die planimetrische Bestimmung der zentralen Bohrungsfläche.

Exemplarisch für diese Auswertemethodik sind die Ergebnisse der Probe 6.2 nachfolgend dargestellt (Bild 11) und für alle Werkstücke in Bild 12 zusammengefasst.

Zusammenfassend dokumentieren die Ergebnisse folgende Kernerkenntnisse:
- Bei allen unter Anwendung des Sattel-Paar-Versatz-Schmiedens gefertigten Proben reduzierte sich die verbleibende Defektfläche maßgeblich.
- Die Defektkonsolidierung im Bauteilzentrum ist im Vergleich zum konventionellen Synchronschmieden signifikant gesteigert.
- Die gemessenen radialen Härteverläufe weisen keine statistisch signifikanten Abweichungen auf. Dies bestätigt die Hypothese, dass der beobachtete Effekt primär auf den modifizierten Dehnungszustand und nicht auf thermisch induzierte Gefügeänderungen infolge veränderter Abkühlbedingungen zurückzuführen ist. Die empirischen Befunde validieren somit direkt die Prädiktionen der vorangegangenen FEM-Simulationen.

WERKSTOFFTECHNOLOGISCHE ANWENDUNGSPOTENZIALE

– Nickelbasis Superlegierungen (zum Beispiel Inconel 718)

Nickelbasis-Superlegierungen stellen die anspruchsvollste Werkstoffklasse dar und fungierten als primärer Entwicklungstreiber für das Sattel-Paar-Versatz-Schmieden. Diese Werkstoffe weisen eine niedrige Stapelfehlerenergie auf und rekristallisieren im relevanten Schmiedefenster nahezu aus-

Restlänge	L = 30	L = 800	L = 30	L = 800
1.5	1.4	1.3	1.2	1.1
2.5	2.4	2.3	2.2	2.1
3.5	3.4	3.3	3.2	3.1
4.5	4.4	4.3	4.2	4.1
5.5	5.4	5.3	5.2	5.1
6.5	6.4	6.3	6.2	6.1

Proben für Analyse

Bild 9: Schnitt- und Bezeichnungsschema

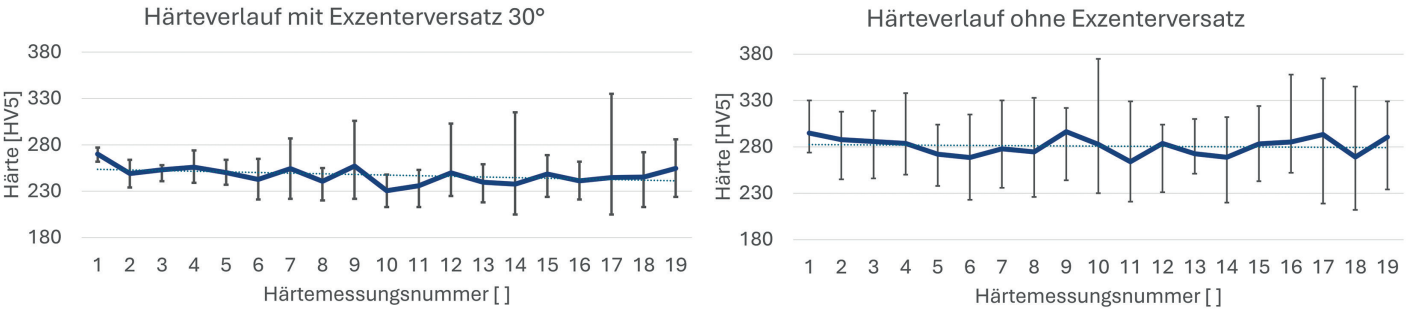


Bild 10: Härteverlauf von innen nach außen – mit DPOF (links) und Härteverlauf von innen nach außen – Synchronmodus (rechts)

schließlich über diskontinuierliche dynamische Rekristallisation (DDRX). Hierfür ist – insbesondere im Subsolvus-Bereich – eine lokale Mindestdehnung im Bereich von $\varepsilon \approx 0{,}3$ bis 0,4 erforderlich.

Die FEM-Simulationen zeigen, dass diese kritische Dehnung beim konventionellen Synchronschmieden im Zentrum großer Querschnitte häufig unterschritten wird. Durch das Sattel-Paar-Versatz-Schmieden steigt die akkumulierte effektive Dehnung im Zentrum hingegen signifikant an (im dargestellten Fall um mehr als das Zweifache von $\varepsilon \approx 1{,}0$ auf $\varepsilon \approx 2{,}25$). Damit wird der kritische Schwellenwert sicher überschritten, was eine vollständige Rekristallisation auch im Bauteilkern gewährleistet.

Der wesentliche technologische Vorteil resultiert folglich in:
- der Eliminierung thermodynamisch inaktiver Gefügezonen („tote Zonen") im Zentrum,
- einer homogenen ASTM-Korngröße über den gesamten Querschnitt sowie
- reproduzierbaren mechanischen Eigenschaften, insbesondere unter Ermüdungs- und Kriechbeanspruchung.

Speziell für rotierende Luftfahrtkomponenten wie Wellen, Scheiben oder Verdichterstufen ist dieser Effekt von fundamentaler Bedeutung.

– Rostfreie Stähle (austenitisch und martensitisch)
Austenitische rostfreie Stähle (zum Beispiel AISI 304/316) weisen eine vergleichsweise hohe Rekristallisationsneigung auf, neigen jedoch bei großen Bauteildurchmessern ebenfalls zu inhomogenen Dehnungsverteilungen. Im konventionellen Radialschmiedeprozess resultiert dies häufig in stark umgeformten Randzonen bei gleichzeitig unzureichend plastisch deformiertem Bauteilkern.

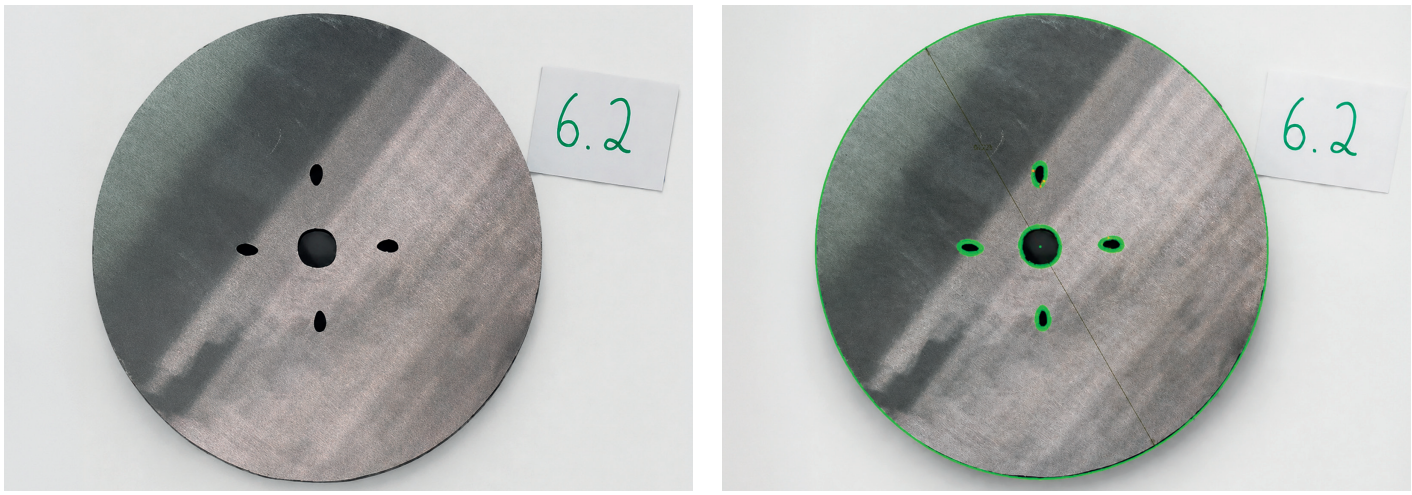


Bild 11: Probe für Defektgrößenauswertung (links) und grafische Auswertung der Defektgrößen (rechts)

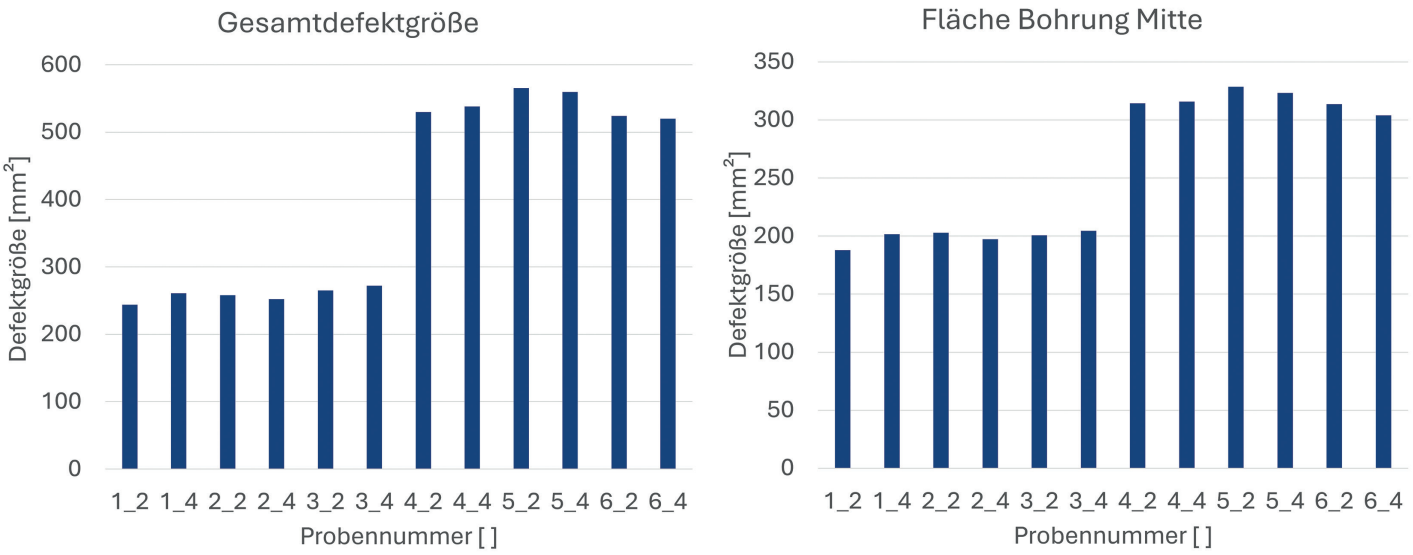


Bild 12: Unterschiede in den Defektgrößen – gesamt (links) und Unterschiede in den Defektgrößen – Bohrung Mitte (rechts)

Durch den erhöhten Scherdehnungsanteil beim Sattel-Paar-Versatz-Schmieden wird:
– der Versetzungsaufbau im Kernzentrum intensiviert,
– die Rekristallisation homogen über den gesamten Querschnitt aktiviert sowie
– eine uniforme Korngrößenverteilung erzielt.

Für martensitische rostfreie Stähle ergibt sich additiv der Vorteil einer effizienteren Schließung von Mikrolunkern und Seigerungszonen bereits während der Warmumformung, was die Zähigkeitseigenschaften und die Bruchdehnung signifikant verbessert.

– Warmarbeitsstähle (zum Beispiel H13/1.2344/1.2367)
Warmarbeitsstähle weisen aufgrund ihres hohen Legierungs- und Karbidgehalts einen erhöhten Rekristallisationswiderstand auf. Gleichzeitig reagieren diese Werkstoffe empfindlich auf inhomogene Umformbedingungen, da grobe Karbidcluster und ausgeprägte Seigerungsbänder die Standzeit der daraus gefertigten Werkzeuge drastisch limitieren.

Das Sattel-Paar-Versatz-Schmieden bewirkt in dieser Werkstoffklasse:
– eine intensivere plastische Durcharbeitung des Bauteilzentrums,
– eine effizientere Fragmentierung und homogenere Verteilung der primären Karbidphasen sowie
– eine Reduzierung der Anisotropie (Richtungsabhängigkeit) der mechanischen Eigenschaften.

Dies führt folglich zu einer gesteigerten Warmrissbeständigkeit und einer signifikant erhöhten Lebensdauer von Druck- und Umformwerkzeugen.

– Kaltarbeitsstähle (zum Beispiel D2 / 1.2379)
Kaltarbeitsstähle stellen aufgrund ihres sehr hohen Volumenanteils an Primärkarbiden eine besondere werkstofftechnologische Herausforderung dar. Die thermomechanische Rekristallisation wird hierdurch maßgeblich gehemmt, sodass eine unzureichende Verformung des Bauteilkerns zu ausgeprägten mikrostrukturellen Inhomogenitäten führt.

Der erhöhte Schubspannungsanteil beim Sattel-Paar-Versatz-Schmieden begünstigt in diesem Kontext:
– das Aufbrechen primärkarbidreicher Phasen und Cluster,
– die verbesserte Schließung innerer Defekte und Poren sowie
– die Ausbildung einer homogener verteilten Karbidmorphologie bereits im as-forged-Zustand.

Dies wirkt sich unmittelbar positiv auf die Maßhaltigkeit nach der abschließenden Wärmebehandlung sowie auf die Verschleißfestigkeit der finalen Komponente aus.

– Defektschließung – quantitative Auswertung
Die experimentellen Untersuchungen am Vergütungsstahl 42CrMo4 liefern einen quantitativen Nachweis des verfahrenstechnischen Effekts. In Bild 13 (Versuchsreihe RX-40) ist die verbleibende Defektfläche der künstlich eingebrachten Kernbohrungen vergleichend gegenübergestellt. Die messtechnische Auswertung dokumentiert folgende Charakteristika:
– Beim konventionellen Synchronschmieden verbleiben signifikante Defektflächen in einer Größenordnung von 500 mm² bis 560 mm².
– Durch den Einsatz des Sattel-Paar-Versatz-Schmiedens reduziert sich die verbleibende Defektfläche auf ein Intervall von 240 mm² bis 270 mm².



Bild 13: Defektgrößen mit DPOF(links), sowie Defektgrößen ohne DPOF (rechts), Bilder: Autoren

Dies entspricht einer Defektreduktion um circa 50 Prozent bei identischen geometrischen Abmessungen und Prozessparametern. Die metallografische Auswertung der Schliffbilder zeigt darüber hinaus eine signifikant stärker geschlossene und kompaktere Defektkontur im Zentrum der versetzt geschmiedeten Proben. Diese Ergebnisse korrelieren in hohem Maße mit den mittels FEM prognostizierten höheren Kerndehnungen.

DISKUSSION

Das Sattel-Paar-Versatz-Schmieden stellt keinen rein inkrementellen, sondern einen paradigmatischen Entwicklungsschritt im Radialschmieden dar. Anstatt den Prozess ausschließlich über die klassischen Parameter wie Temperatur, Querschnittsabnahme oder Hubfrequenz zu optimieren, wird erstmals die zeitliche Sequenzierung der Umformung als gezielte Prozessvariable genutzt. Ein wesentlicher Vorteil liegt darin, dass keine konstruktiven Modifikationen der Maschinenmechanik erforderlich sind; der Effekt wird rein über die gezielte Steuerung der bestehenden Kinematik realisiert. Dies begründet die hohe industrielle Relevanz und unmittelbare wirtschaftliche Implementierbarkeit des Verfahrens.

SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

Mit dem Sattel-Paar-Versatz-Schmieden wurde ein neuartiges Radialschmiedeverfahren entwickelt und erfolgreich validiert. Die wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeit lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Steigerung der Kernbeanspruchung: Das Verfahren erhöht die effektive plastische Dehnung im Werkstückzentrum signifikant um etwa das Zweifache.
- Verbessertes Defektschließverhalten: Anhand künstlich eingebrachter Defekte wurde eine Reduzierung der Defektgröße um zirka 50 Prozent sowie eine kompaktere Konsolidierung der Kernzone nachgewiesen.
- Gefügehomogenisierung: Das DPOF-Verfahren ermöglicht erstmals eine reproduzierbare, vollständige Rekristallisation im Bauteilkern und somit ein homogenes Gefüge über den gesamten Querschnitt.

Die erfolgreiche Kombination aus numerischer Simulation und industrieller Verifikation demonstriert das erhebliche Potenzial dieses Ansatzes zur Effizienzsteigerung und Qualitätsoptimierung in der Massivumformung. Zukünftige Arbeiten werden sich auf folgende Schwerpunkte konzentrieren:

- Die detaillierte, quantitative Gefügeanalyse an realen Bauteilen aus Nickelbasis-Superlegierungen,
- die Skalierung und Übertragung des DPOF-Prinzips auf weitere Maschinentypen und größere Bauteildimensionen sowie
- die Entwicklung und Optimierung adaptiver, prozessgesteuerter Versatzstrategien.

GFM GmbH
Ennser Straße 14
A-4403 Steyr
Telefon: +43 7252 898 0
E-Mail: info@gfm.at
Internet: www.gfm.at