

## Designing Efficient Machining Operations for Processing Forged Parts made of Higher-Strength Bainitic Steels

Steels with a bainitic microstructure have a number of advantages which render them suitable as a material for the production of highly stressed parts. Due to isothermal transformation, the grain structure, which is characterised by a favourable combination of strength and toughness [1, 2], may be achieved at a temperature range above the martensite starting temperature and below pearlite formation.

The high strengths achieved with bainite may be used, for example, to increase the maximum stress of forged parts in the automotive industry. Furthermore, it is possible to achieve favourable material properties with suitable process design by means of direct cooling from the forging heat. This saves on cost-incurring and energy-intensive heat treatment processes. As forged parts are often machined in subsequent operations, the influence of the higher material strength of bainitic steels on separating processes needs to be analysed and machining must be designed in such a way that a negative impact on the cost-efficiency of the entire production chain is prevented.

# Gestaltung effizienter Zerspanprozesse für die Bearbeitung von Schmiedebauteilen aus höherfesten bainitischen Stählen

Dipl.-Wirt.-Ing. Henning Hartmann und Prof. Dr.-Ing. Dirk Biermann, Dortmund

Stähle mit bainitischem Werkstoffgefüge eignen sich aufgrund verschiedener Vorteile als Werkstoff für die Fertigung hochbelasteter Bauteile. Das Gefüge, welches durch isotherme Umwandlung in einem Temperaturbereich oberhalb der Martensitstarttemperatur und unterhalb der Perlitbildung eingestellt werden kann, zeichnet sich durch eine günstige Kombination aus Festigkeit und Zähigkeit aus [1, 2]. Die beim Bainit erreichbaren hohen Festigkeiten können beispielsweise dazu genutzt werden, die maximale Belastungsgrenze von Schmiedebauteilen der Auto-

mobilität zu erhöhen. Darüber hinaus ist es möglich, die günstigen Werkstoffeigenschaften bei geeigneter Prozessführung durch unmittelbare Abkühlung aus der Schmiedewärme einzustellen, was die Ersparnis von kostenverursachenden und energiebedürftigen Wärmebehandlungsprozessen ermöglicht. Da Schmiedebauteile in Folgeprozessen häufig noch spanend bearbeitet werden, gilt es den Einfluss der höheren Werkstofffestigkeit bainitischer Stähle auf trennende Verfahren zu untersuchen und Zerspanungsprozesse derart zu gestalten, dass eine negative Beeinflussung der Wirtschaftlichkeit der gesamten Herstellungskette vermieden wird.

### Einleitung

Die Zerspanung von höherfesten Werkstoffen mit bainitischen Gefügeanteilen wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens IGF 16939 N am Institut für Spanende Fertigung und in Kooperation mit 24 Partnern der Bereiche Anwendung, Stahl- und Werkzeugherstellung sowie Forschung untersucht (Bild 1). Hierbei erfolgte die Bearbeitung der industriell häufig eingesetzten Stähle 42CrMo4+QT und 38MnVS6mod. Diese Materialien dienten als Referenzwerkstoffe, um die spanende Bearbeitbarkeit der betrachteten höherfesten bai-

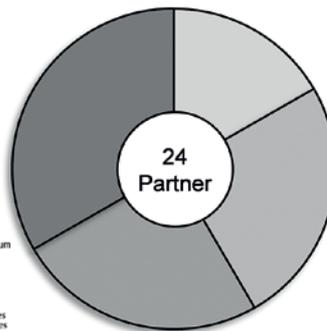
nitischen Stähle 20MnCrMo7+BY und HDB einschätzen zu können. Ebenfalls betrachtet wurde ein hinsichtlich der Festigkeit mit den bainitischen Werkstoffen vergleichbarer Vergütungsstahl vom Typ 50CrMo4+QT. Für alle Werkstoffe wurde eine vergleichende Analyse der Drehbearbeitung durchgeführt. Hierdurch war ein negativer Einfluss der höherfesten Stähle auf den Verschleiß der verwendeten Werkzeuge nachweisbar. Mithilfe einer durchgeführten Werkzeug- und Schnittwertoptimierung konnte diesem Effekt erfolgreich

entgegengewirkt und eine wirtschaftliche Bearbeitung der anspruchsvollen bainitischen Stähle ermöglicht werden [3]. Für die drei höherfesten Werkstoffe wurden darüber hinaus das Tiefbohren, Fräsen sowie die Gewindebearbeitung betrachtet. Beim Eckfräsen ließen sich die bei der Drehbearbeitung gewonnenen Erkenntnisse bestätigen [4]. Mithilfe der Entwicklung und des Einsatzes leistungsfähiger Bohrwerkzeuge ließ sich auch die anspruchsvolle Tiefbohrbearbeitung effizient gestalten [5].

**Vorhaben IGF-16939 N: Untersuchungen zur Zerspaltung hochfester bainitischer Stähle**

Prozess- und Werkzeugauslegung zur spanenden Bearbeitung höherfester Stähle mit bainitischem Gefüge

- Werkstoffe:
  - Referenzwerkstoffe
    - 42CrMo4+QT
    - 38MnVS6mod.
    - HDB+A
  - Höherfeste Stähle
    - 20MnCrMo7+BY
    - HDB
    - 50CrMo4+QT
- Prozesse:
  - Außenlängsdrehen
  - Einlippentiefbohren
  - Wendeltiefbohren
  - Eckfräsen
  - Gewindebohren
  - Gewindeformen



Gefördert durch:  
  
 Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie  
 aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages

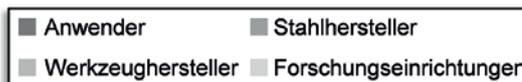


Bild 1: Projektbeschreibung.

**Gewindebohren höherfester Stähle**

Bei der Fertigung von M8-Gewindebohrungen in einem bainitischen und einem Vergütungsstahl fielen Unterschiede im Verschleißverhalten und dementsprechend in der Gewindequalität auf. Während bei dem bainitischen Werkstoff die Ziel-Standzahl von  $Z_S = 1.000$  erreicht wurde, kam es beim Vergütungsstahl zu verstärkten Materialanhäufungen und infolgedessen zu adhäsivem Verschleiß in Form von Schneidstoffausbrüchen nach einer Standzahl von  $Z_S = 885$ . Dieser Werkzeugverschleiß konnte optisch direkt an den gefertigten Gewindeflanken nachvollzogen werden.

Bei den in Bild 2 dargestellten lichtmikroskopischen Aufnahmen fällt die Oberflächenqualität beim Vergütungsstahl 50CrMo4+QT deutlich schlechter aus als bei dem Ver-

gleichsprozess mit dem bainitischen Stahl 20MnCrMo7+BY. Um zu überprüfen, ob sich der Werkzeugverschleiß negativ auf die Leistungsfähigkeit der Gewinde auswirkt, wurden Auszugsversuche durchgeführt, bei denen die bearbeiteten Proben durch eine Prüfschraube über eine definierte Einschraubtiefe mit einer Universalprüfmaschine verbunden wurden. Anschließend erfolgte ein Auszug der Schraube mit konstanter Geschwindigkeit bis zum Riss der Schraube oder des Gewindes unter Detektion der maximal anliegenden Auszugskraft. Hierbei war kein Einfluss des bearbeiteten Materials festzustellen. Die im Prozess festgestellten Einflüsse des Vergütungsstahls auf den Werkzeugverschleiß und die Oberflächenqualität besaßen noch keinen Einfluss auf die Gewindequalität. Bei allen Auszugsversuchen riss jeweils die verwendete Schraube, die Auszugskräfte liegen unterhalb

der theoretischen Schraubenfestigkeit infolge von Kerbwirkungen, die sich aufgrund der Verwendung von Schrauben mit durchgehendem Gewinde anstatt mit Schaft ergaben. Ein Einfluss des bearbeiteten Materials auf die Gewindefestigkeit konnte nicht nachgewiesen werden, es ist aber festzustellen, dass sich der bainitische Stahl im betrachteten Prozess bei vergleichbarer Festigkeit günstiger in der Zerspaltung verhält als der Vergütungsstahl.

**Zerspaltungsuntersuchungen unter industriellen Maßstäben**

Um zu überprüfen, ob die in den Laborversuchen generierten Ergebnisse auf einen industriellen Maßstab übertragbar sind, wurden bei einem Zulieferer der Automobilindustrie weitere Zerspaltungsversuche unter den Bedingungen eines vorhandenen Serienprozesses durchgeführt. Die Laborergebnisse sind nicht zwingend mit der Zerspaltung von Schmiedeteilen unter Serienbedingungen vergleichbar, da durch den Schmiedeprozess weitere Einflussgrößen auftreten können. Bei dem betrachteten Prozess handelt es sich um die Herstellung von Common-Rails aus dem Werkstoff 38MnVS6 ( $R_m \approx 960$  MPa) mit einer Stückzahl von bis zu 3 Mio. Stück p. a. Die Werkstücke liegen dabei als Schmiederohling vor und werden bis zum Fertigteil mit verschiedenen Fertigungsverfahren spanend bearbeitet. Für die Zerspaltungsversuche im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden Schmiederohlinge aus dem Werkstoff 20MnCrMo7+BY gefertigt, wobei die Zugfestigkeit des hierfür verwendeten Stabmaterials mit  $R_m = 1.253$  MPa deutlich höher ausfällt. Da nach Erkenntnis der Laborversuche bei Einsatz der Serienwerkzeuge Standzeitminderungen zu erwarten gewesen wären, wurden zur Bearbeitung der härtesten bainitischen Schmiederohlinge angepasste Werkzeuge ausgelegt. Für die in der Common-Rail-Fertigung benötigten Verfahren Drehen, Tiefbohren und Fräsen fand eine Anpassung der Serienwerkzeuge auf Basis der Ergebnisse der Untersuchungen am Institut für Spanende Fertigung für die Zerspaltung bainitischer Stähle statt. In Bild 3 sind vergleichende Verschleißaufnahmen für die Drehbearbeitung der Anschlüsse sowie die Fertigung der Durchgangsbohrung dargestellt. Neben einem Einsatz der in der realen Fertigung verwendeten Kombination aus Werkzeug und Werkstoff wurden die bainitischen Schmiederohlinge mit den angepassten Werkzeugen bei gleichen Schnittwerten bearbeitet. Die in der Abbildung dargestellten Verschleißaufnahmen sind nach einer identischen Einsatzzeit der Werkzeuge aufgenommen worden und exemplarisch für die durchgeführten Wiederholversuche.

Der Vergleich der Tiefbohroperation zur Fertigung der Durchgangsbohrung verdeutlicht, dass der härteste bainitische Werkstoff durch die Verwendung des angepassten Werkzeugs vergleichbar gut bearbeitet werden kann wie der Werkstoff 38MnVS6 mit dem

Werkzeug:	M8x1 Gewindebohrer	Schnittgeschw.:	$v_c = 10$ m/min
Werkstoff:	Variiert	Gewindelänge:	$l_G = 16$ mm
KSS:	Emulsion	Schraubenfest.:	8.8
Standzahl:	$Z_S = 885 \dots 1000$	Einschraubtiefe:	$l_E = 10$ mm

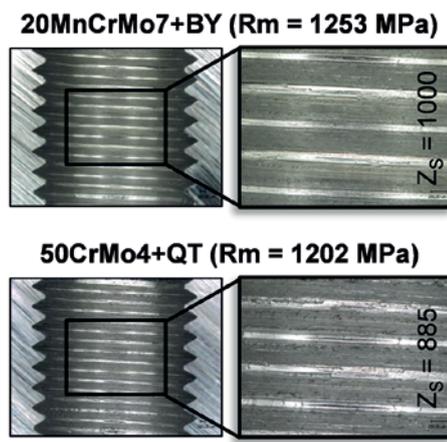
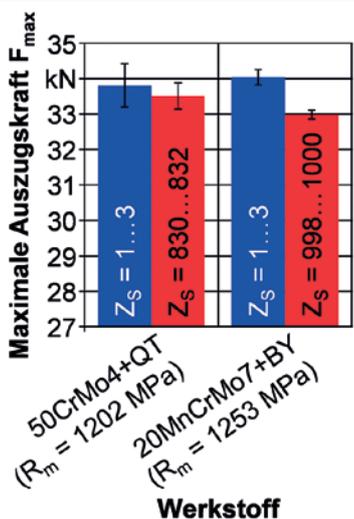


Bild 2: Gewindebohren der härtesten Werkstoffe 20MnCrMo7+BY (Bainit) und 50CrMo4+QT (Vergütungsstahl).

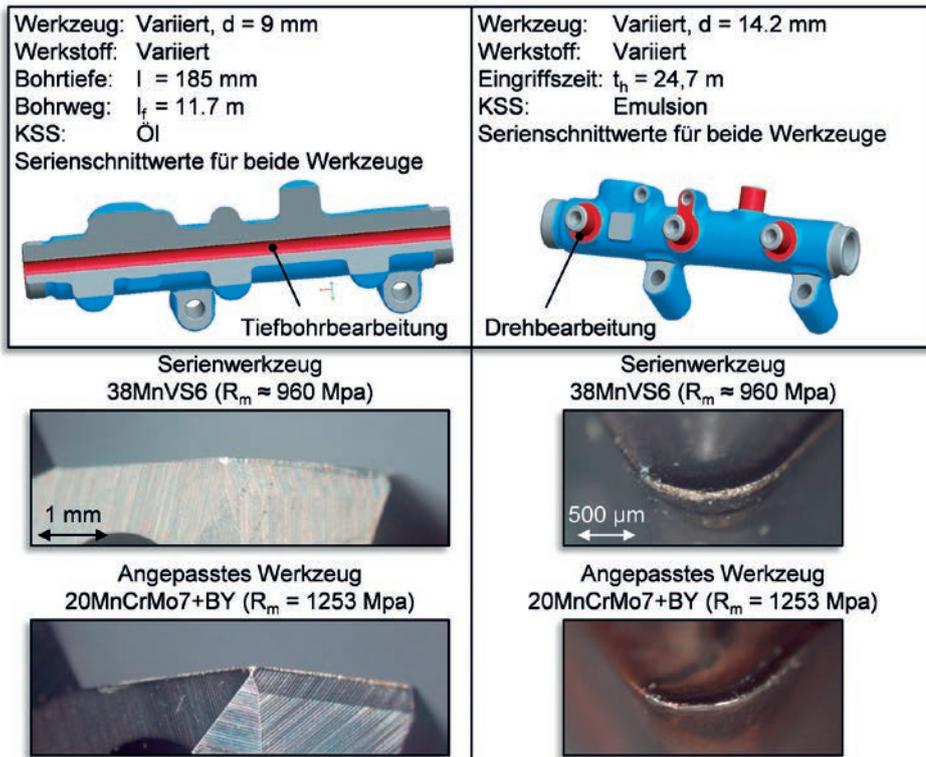


Bild 3: Übertragung der Forschungsergebnisse auf einen industriellen Serienprozess.

Bilder: Autoren

Serienwerkzeug. Beide Werkzeuge weisen nach einem Bohrweg von l<sub>f</sub> = 11,7 m intakte Schneidkanten sowie einen moderaten Freiflächenverschleiß auf. Die Verschleißmarkenbreite scheint beim angepassten Werkzeug sogar geringer auszufallen als bei dem im weicheren Werkstoff eingesetzten Einlippenbohrer. Auch die besonders stark belastete Schneidspitze unterliegt einem geringeren Verschleiß. Die Ergebnisse wurden durch die durchgeführten Wiederholversuche bestätigt. Ähnliche Erkenntnisse ergaben sich auch für die betrachtete Drehoperation. Das speziell für die anspruchsvollere Bearbeitungsaufgabe ausgelegte Werkzeug weist einen eindeutig geringeren Verschleiß auf als das Serienwerkzeug. Die Verschleißmarkenbreite fällt geringer aus und die Schneidkante ist intakt. Die Zerspanungsversuche unter Serienbedingungen haben gezeigt, dass sich die im Forschungsvorhaben im Labormaßstab generierten Erkenntnisse auf industrielle Maßstäbe übertragen lassen. Die speziell angepassten Werkzeuge führten trotz der um ein Drittel höheren Zugfestigkeit des bainitischen Stahls im Vergleich zum Serienwerkstoff zu einem vergleichbaren oder besseren Verschleißverhalten. Da die Schnittwerte in den Untersuchungen denen des industriellen Prozesses entsprechen, war dies ohne eine Minderung der Produktivität möglich.

### Zusammenfassung

Im Forschungsvorhaben IGF 16939 N konnte eine Prozess- und Werkzeugauslegung zur spanenden Bearbeitung höherfester Stähle mit bainitischen Gefügeanteilen durchgeführt werden.

Da im direkten Vergleich zu den Referenzstählen mit einer geringeren Zugfestigkeit die Zerspanbarkeit infolge eines höheren Werkzeugverschleißes zunächst ungünstiger ausfiel, wurden in Abhängigkeit des betrachteten Bearbeitungsverfahrens Optimierungsmaßnahmen getroffen. Nach einer grundlegenden Analyse der Drehbearbeitung, bei der durch eine Werkzeug- und Parameteranpassung eine zum Referenzwerkstoff vergleichbare Produktivität erreicht werden konnte, wurden weitere wichtige spanende Verfahren betrachtet. Bei einem Eckfräsprozess war es möglich, die Ergebnisse der Drehbearbeitung zu bestätigen und auch beim Tiefbohren verfahrensbedingt günstige Prozesse auszulegen. Für die Einlippenbohrbearbeitung waren Hochleistungsbohrer zur wirtschaftlichen Bearbeitung bainitischer Stähle einsetzbar, wohingegen beim Wendelbohren Anpassungen der Werkzeuggeometrie notwendig waren. Für die Gewindefertigung konnte eine höhere Standzahl bei Bearbeitung eines bainitischen Stahls im Vergleich zu einem Vergütungsstahl ähnlicher



Dipl.-Wirt.-Ing.  
Henning Hartmann



Prof. Dr.-Ing.  
Dirk Biermann

Festigkeit realisiert werden. Zur Verifizierung der Übertragbarkeit der Ergebnisse in die industrielle Fertigung wurden weiterhin Untersuchungen zur Zerspanung eines Schmiedebauteils unter Serienbedingungen durchgeführt. Hierbei konnte ein bainitischer Stahl mit einer Festigkeitssteigerung von 30 Prozent im Vergleich zum Serienmaterial mit der gleichen Produktivität bearbeitet werden. Die hierfür nötigen Werkzeuganpassungen beruhen auf dem im Forschungsvorhaben durchgeführten Versuchen. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die spanende Bearbeitung von höherfesten bainitischen Stählen zwar im Einzelfall angepasst werden muss, aber grundsätzlich wirtschaftlich realisierbar ist.

### Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben 16939 N der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichts kann nach Projektende bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.

### Literatur

- [1] Langner, H.; Beyer, C.; Engineer, S.; Franke, A.; Hölzl, H.; Janßen, P.: A new high strength steel 20MnCrMo7. SCT, International Conference on Steels in Cars and Trucks, 2008, Düsseldorf, Verlag Stahleisen.
- [2] Bargel, H.-J.; Hilbarns, H.; Hübner, K.-H.; Krüger, O.; Schulze, G.: Werkstoffkunde. 9. bearbeitete Auflage, 2005, Berlin, Springer-Verlag.
- [3] Biermann, D.; Hartmann, H.; Terwey, I.; Merkel, C.; Kehl, D.: Turning of High-strength Bainitic and Quenched and Tempered Steels. Procedia CIRP, 7 (2013), pp. 276-281.
- [4] Biermann, D.; Hartmann, H.: Herausforderungen bei der Zerspanung höherfester Stähle. In: Stahl- und Gusszerspanung 2013 – Innovative Bearbeitungsverfahren für die wirtschaftliche Fertigung, 12.11.-13.11. 2013, Kassel, S. 129-138.
- [5] Hartmann, H.; Biermann, D.; Wenzelburger, J.; Merkel, C.: Prozessgestaltung für das Hochleistungstiefbohren von bainitischen Stählen. Werkstoffe in der Fertigung, 4 (2013), S. 4-6.