

Qualitätsvorteile der Schmiedestücke

Von Dipl.-Ing. Dirk-M. Rupp, Hannover

Um eine hohe Lebensdauer einer Konstruktion zu gewährleisten, müssen Bauteile nicht nur in ihrer Gestalt, sondern auch im Hinblick auf Werkstoff, Wärmebehandlung sowie Oberflächenbehandlung auf die zu erwartenden Beanspruchungen abgestimmt sein. Von den ca. eine Million Tonnen Schmiedestücken, die in der Bundesrepublik pro Jahr produziert werden, deckt ein großer Teil den Bedarf des Maschinenbaus. Zahnräder, Hebel, Wellen, Turbinenschaukeln sind hier nur Beispiele, die beliebig erweitert werden können. Die Vielfalt der Schmiedestücke im Maschinenbau kommt nicht von ungefähr. Konstrukteure sind sich der Vorteile bewußt, die der Einsatz geschmiedeter Bauteile bietet. Wie mannigfaltig diese Vorteile sind, soll im folgenden dargestellt werden.

Werkstoff und Wärmebehandlung

Ein großer Vorteil, den das Schmieden gegenüber anderen Verfahren besitzt, liegt bereits in der breiten Palette der zur Verfügung stehenden schmiedbaren Werkstoffe. Diese reicht — angefangen von den hauptsächlich verwendeten Stahlgruppen wie Baustähle, Vergütungsstähle, Einsatz- und Nitrierstähle — weiter über die hochwarmfesten, mikrolegierten und austenitischen Stähle bis hin zu den NE-Metallegierungen wie z. B. aus Al, Cu, Ti und Ni. Der Werkstoff, der zusammen mit der Wärmebehandlung die „Grundfestigkeit“ eines Bauteiles ausmacht, bestimmt bereits zum großen Teil die Eigenschaften des eingesetzten Bauteils. Werkstoffe und Wärmebehandlung zusammen führen bei Stählen zu einer hohen Zähigkeit. Diese ermöglicht es, daß Spannungsspitzen durch plastisches Fließen des Werkstoffes abgebaut werden. Ribbildung bzw. Ribausbreitung werden hierdurch stark behindert.

Ein weiterer Vorteil der Duktilität des Stahles liegt darin, daß schlagartig überbeanspruchte Bauteile durch plastische Verformung ihre Überbelastung anzeigen und nicht wie bei spröden Werkstoffen ohne Vorwarnung zu Bruch gehen. War hier zunächst von statischer Belastung die Rede, so wirkt die Zähigkeit

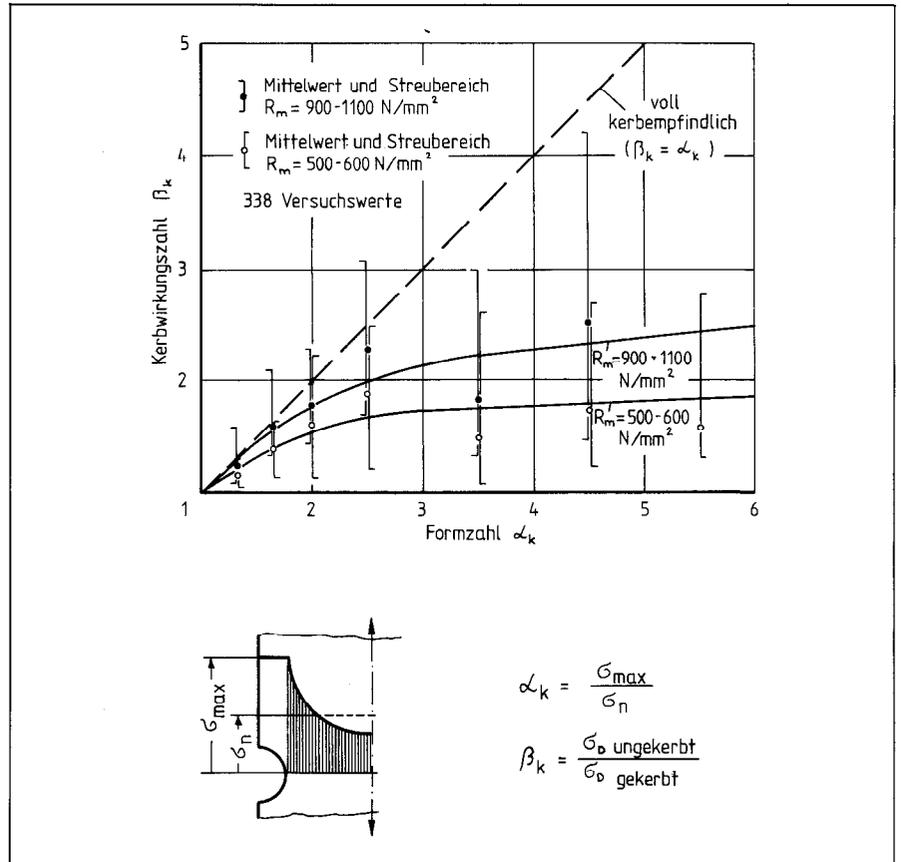


Bild 1: Kerbempfindlichkeit von Stahl für zwei Zugfestigkeitsbereiche [2].

keit des Werkstoffes auch auf dynamische Kennwerte, wie z. B. auf die Biege-wechselfestigkeit. Obwohl jede mathematische Beziehung die Vorgänge im Werkstoff nur ungenau wiedergibt, ermöglicht doch die von Just gefundene Beziehung $\sigma_{bw} = (0,24 + 0,4Z) R_m$ für Vergütungsstähle eine annähernd genaue Berechnung der Biege-wechselfestigkeit aus den Werten des Zugversuches [1]. Bei gleicher Zugfestigkeit besitzt derjenige Werkstoff die höhere Biege-wechselfestigkeit, der die größere Zähigkeit aufweist.

Im allgemeinen wirken sich Kerben auf die Bauteilfestigkeit nachteilig aus. Die Konstruktion läßt es nicht immer zu, Kerben an stark beanspruchten Zonen des Bauteils zu vermeiden. Bild 1 zeigt deutlich, daß geschmiedete Bauteile aus Stahl wenig kerbempfindlich sind,

da die Kerbwirkungszahl β_k deutlich niedriger liegt als die Formzahl α_k [2]. Dabei ist α_k das errechnete Verhältnis der Spannung im Kerbgrund zur Nennspannung, während β_k das gemessene Verhältnis der Dauerfestigkeit ohne Kerbe zur Dauerfestigkeit mit Kerbe darstellt. Das Verhältnis α_k zu β_k gibt also die Reaktion des Werkstoffes auf die Kerbe an.

Bei der Wärmebehandlung stehen für geschmiedete Bauteile eine Reihe von Möglichkeiten zur Verfügung:

- das Vergüten
- das Vergüten aus der Schmiedewärme
- das gesteuerte Abkühlen aus der Schmiedewärme.

Während bei den ersten beiden Verfahren über die Härtung und dem sich anschließenden Anlassen hohe Festigkei-

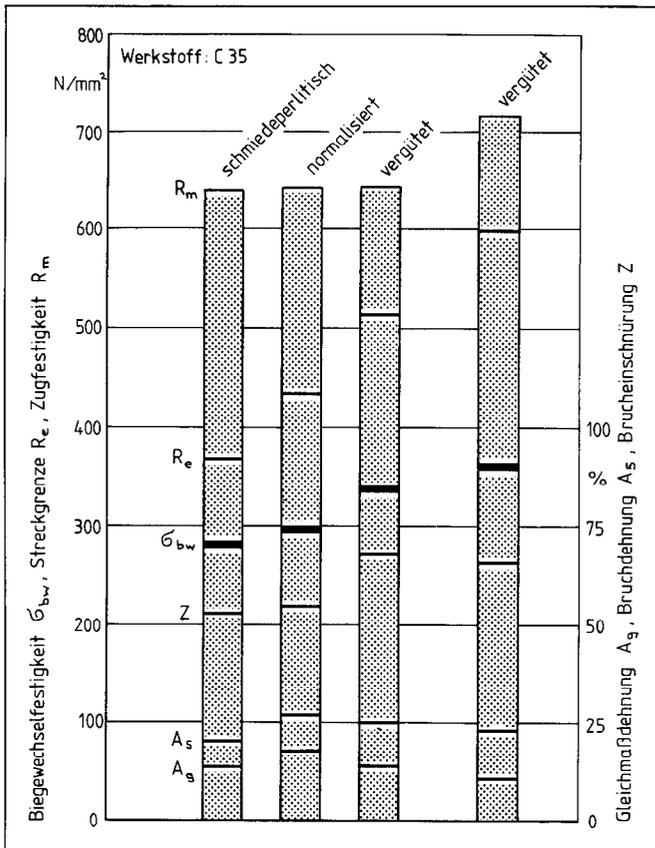


Bild 2: Biegewechselfestigkeit ($\alpha_k = 1$) und Kennwerte des Zugversuchs für unterschiedliche Wärmebehandlungszustände [3].

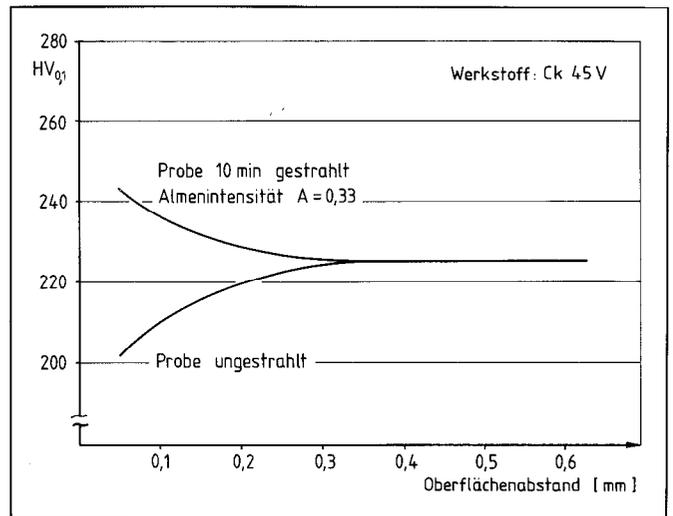


Bild 4: Kleinlasthärteverlauf eines randentkohlten Bauteiles vor und nach dem Reinigungsstrahlen.

ten bei hohen Zähigkeiten erreicht werden, führt das gesteuerte Abkühlen aus der Schmiedewärme, insbesondere bei mikrolegierten Edelbaustählen wie z. B. dem 49 MnVS 3, ohne eine kostenintensive Vergütungsbehandlung zu ebenfalls hohen Festigkeiten bei noch respektabler Duktilität (schmiedeperlitischer Zustand). Das letztgenannte Verfahren hat den Vorteil, das kostengünstigste zu sein, da durch den Verzicht

auf eine Wärmebehandlung, insbesondere bei den ständig steigenden Energiekosten, nicht unerhebliche Einsparungen erzielt werden können. Die hohe Festigkeit wird durch die Ausscheidungshärtung verursacht, wobei es sich hierbei hauptsächlich um die Bildung von feinverteilten Vanadinkarbidern handelt. Aber selbst unlegierte Vergütungsstähle können bei gesteuerter Abkühlung aus der Schmiedewärme

hohe Festigkeiten erreichen, wie *Bild 2* am Beispiel des C 35 zeigt. In dem Bild sind die Werkstoffkennwerte des Zugversuchs und die Biegewechselfestigkeit für unterschiedliche Wärmebehandlungszustände dargestellt, wobei die Zugfestigkeit der einen vergüteten Variante auf dem Niveau des schmiedeperlitischen sowie des normalisierten Zustandes und der anderen vergüteten Variante auf dem für diesen Werkstoff üblichen Festigkeitsniveau lag. Neuere Untersuchungen (*Bild 3*) zeigen, daß die Eigenschaften noch weiter verbessert werden können, wenn man Schmiedetemperaturen und Abkühlbedingungen genau auf Werkstoff und Bauteil abstimmt [4].

Oberflächennachbehandlung

Entscheidenden Einfluß auf die Bauteilfestigkeit hat bei dynamisch beanspruchten Bauteilen der Zustand der Oberfläche. Da die am stärksten beanspruchten Stellen eines Bauteiles im allgemeinen in seiner Randzone liegen, werden Anrisse überwiegend dort entstehen. Um dies zu verhindern, kann das Schmiedestück — falls erforderlich — einer Oberflächennachbehandlung unterworfen werden. Hierzu bieten sich folgende Möglichkeiten an:

- Strahlen
- Nitrieren
- Oberflächenhärten
- Rollen.

Das Strahlen ist bei praktisch allen Schmiedestücken obligatorisch. Es wird primär angewandt, um die Schmiedestücke nach dem Schmieden oder nach der Wärmebehandlung zu entzundern. Gleichzeitig wird dabei eine dünne Oberflächenzone kaltverfestigt und es werden Druckeigenspannungen erzeugt. Beide Mechanismen führen zu einer Steigerung der dynamischen Festigkeitswerte. Untersuchungen in

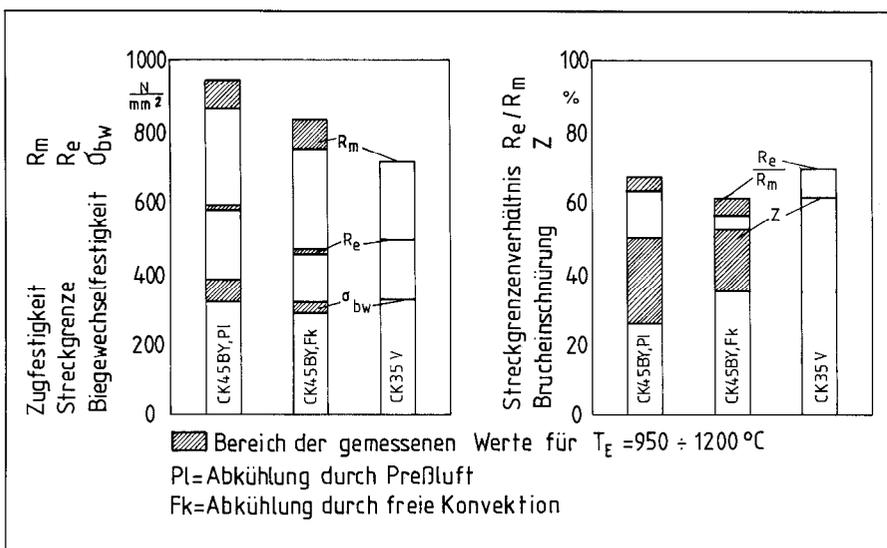


Bild 3: Vergleich der statischen und dynamischen Werkstoffkennwerte von Ck 45 und Ck 35 [4].

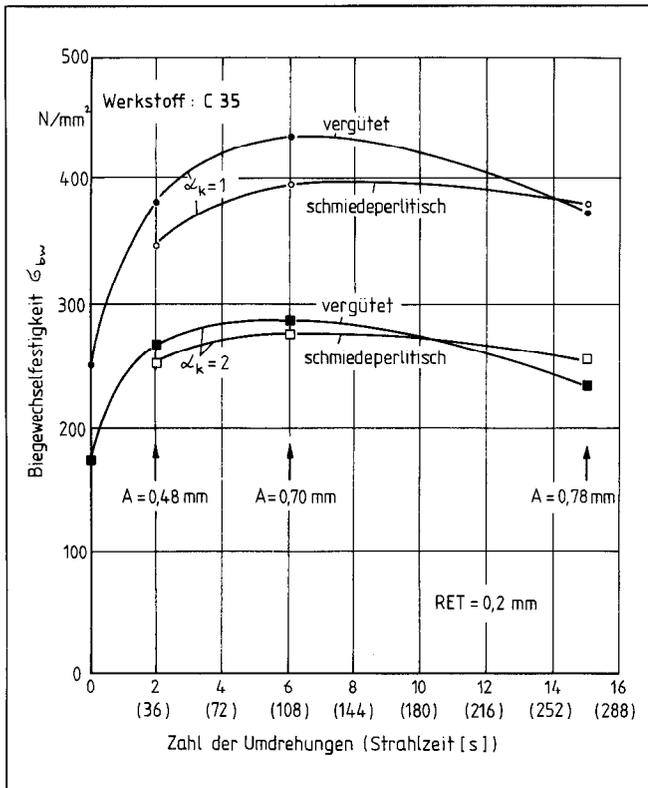


Bild 5: Biege-wechselfestigkeit als Funktion der Strahlzeit [3].

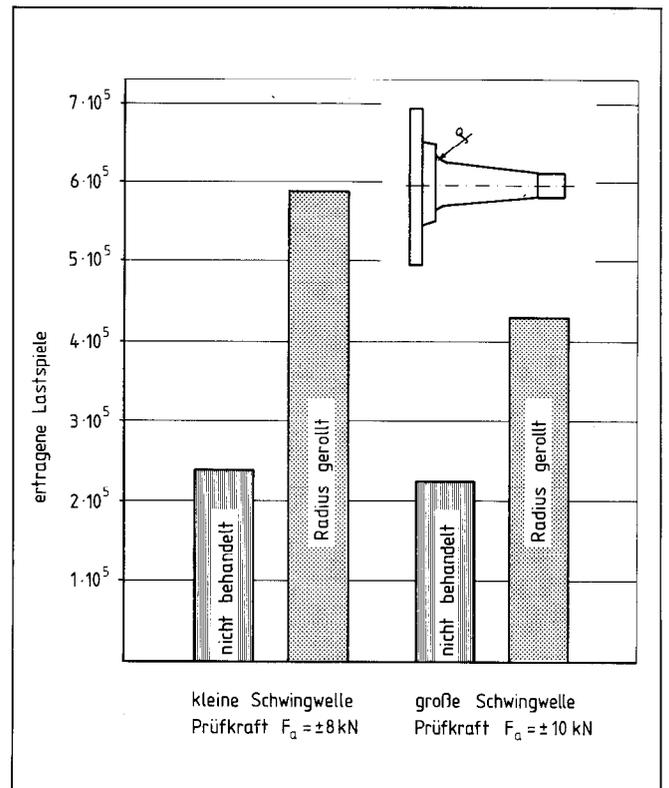


Bild 6: Steigerung der Dauerfestigkeit an Schwingwellen durch Rollen.

Schmiedebetrieben haben ergeben, daß bereits beim sog. „Reinigungsstrahlen“ die Randhärte erheblich angehoben wird und die negativen Auswirkungen einer etwa vorhandenen geringen Randentkohlung beseitigt werden können (Bild 4).

Nutzt man den Strahlvorgang, um die Dauerfestigkeit gezielt anzuheben, so spricht man vom „Festigkeitsstrahlen“. Bei stetig steigender Strahlintensität, die mit dem sog. Almentest¹⁾ bestimmt wird, durchläuft die Biege-wechselfestigkeit ein Maximum (Bild 5).

Die Verbesserung der dynamischen Kennwerte durch Nitrieren, Einsatz- und Oberflächenhärten sind in der Literatur oft beschrieben worden [5–7]. Auch das Rollen von Radien ist ein Verfahren, mit dem hohe Festigkeitswerte erreicht werden können [8–9].

Bild 6 zeigt die durch Rollen erzielte Steigerung im Zeitfestigkeitsbereich bei einer Biegebelastung an zwei verschiedenen Schwingwellen.

Gestaltungsfreiheit

Ein weiterer Vorteil des geschmiedeten Bauteils ist seine große Gestaltungsfreiheit. So können sehr kompliziert gestaltete Teile mit Hinterschneidungen oder Hohlteile durch Einsatz von mehrfach

geteilten Gesenken hergestellt werden. Bei den Gesamtkosten eines Bauteiles spielen die Aufwendungen für die Zerspanung eine wesentliche Rolle. Durch geringere Maß- und Gewichtstoleranzen und durch die Verkleinerung von Gesenkschrägen kann das zu spanen-

de Volumen bei Schmiedeteilen erheblich gesenkt und es können Kosten eingespart werden. Beim restlichen noch verbleibenden Zerspanvolumen bieten die hohen Standzeiten der Schneidwerkstoffe bei der Stahlzerspannung einen weiteren Kostenvorteil (Bild 7).

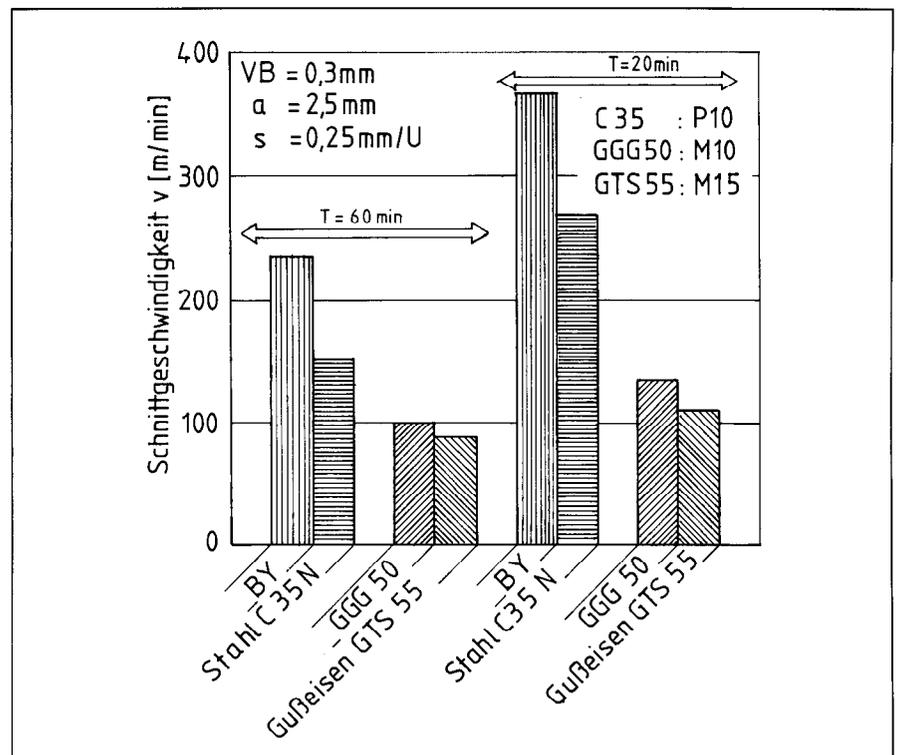


Bild 7: Vergleich der Standzeit-Schnittgeschwindigkeiten [10].

¹⁾ Beim Almentest verwendet man ein Federstahlplättchen, das dem Strahlvorgang einseitig ausgesetzt wird. Die entstehenden Druckeigenstressungen bewirken eine Aufwölbung des Plättchens, die ein Maß für die Strahlintensität darstellt.

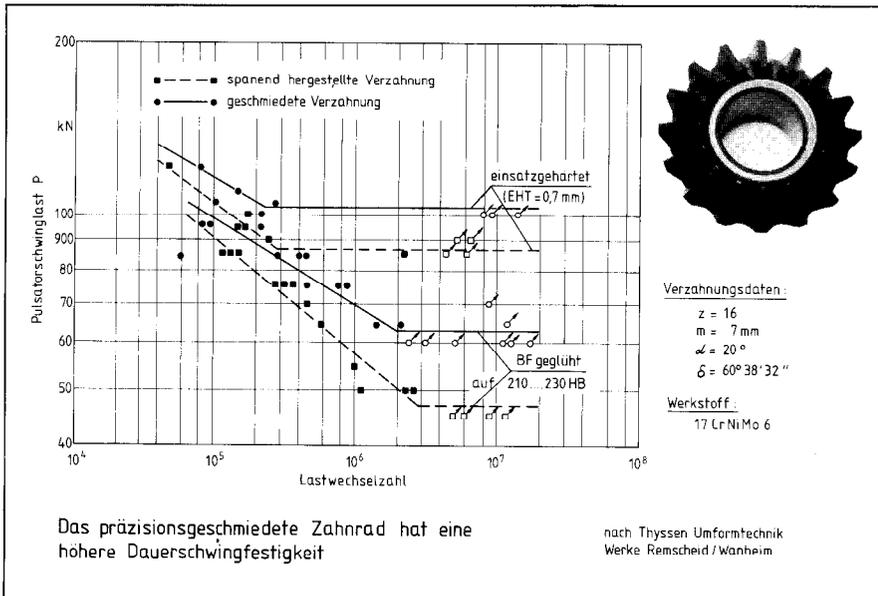


Bild 8: Wöhlerkurven von präzisionsgeschmiedeten und spanend hergestellten Zahnrädern.

Die Zerspanbarkeit höherfester Stähle kann durch geringe Zugaben von Schwefel verbessert werden, ohne daß der erhöhte Schwefelgehalt einen merklichen Einfluß auf die Dauerfestigkeit hat [10].

Neben Bauteilen mit sehr geringem Zerspanvolumen wächst die Zahl der einbaufertig geschmiedeten Teile, die sich durch höchste Maßgenauigkeit und Oberflächengüte auszeichnen. *Bild 8* zeigt als Beispiel ein an den wesentlichen Funktionsflächen einbaufertig geschmiedetes Zahnrad. Positiv auf seine Dauerfestigkeit wirkt sich hier insbesondere der günstige Faserverlauf in der Verzahnung aus. Als weiteres Beispiel für das „Präzisionsschmieden“ können Turbinenschaufeln genannt werden.

Im Zusammenhang mit der Vielzahl der zur Verfügung stehenden Werkstoffe ist der Leichtbau durch Schmiedestücke überall dort möglich, wo eine Verteuerung durch die Wahl eines höherfesten Werkstoffes über eine Einsparung an Betriebskosten wettgemacht wird. Auch eine Verbesserung der Handhabung durch eine leichtere Konstruktion läßt die geringe Verteuerung durch den Werkstoff rechtfertigen. In der Automobilindustrie wird der Leichtbau aufgrund der notwendigen Kraftstoffeinsparung im Zeichen der Energieverknappung und -verteuerung immer aktueller. Das Schmiedeteil leistet hier seinen Beitrag zum Thema Energieeinsparung.

Einfluß der Fertigung

Die hohe Qualität von geschmiedeten Bauteilen wird auch durch das Fertigungsverfahren selbst positiv beeinflusst. Üblicherweise wird beim Gesenk-

schmieden gewalztes Halbzeug verwendet. Die Gußstruktur des Blockes ist bereits durch den Walzvorgang bei der Herstellung des Vormaterials beseitigt, gleichzeitig verschweißten Mikrolunker, so daß die innere Kerbwirkung vermindert wird und die Schwingfestigkeit ansteigt.

Bild 9 zeigt links für Stahl und Stahlguß bei jeweils gleicher chemischer Zusammensetzung die Biegewechselfestigkeit in Abhängigkeit von der Zugfestigkeit. Der geschmiedete Stahl weist bereits bei einem Verschmiedungsgrad von 5 eine etwa 20 bis 30% höhere Biegewechselfestigkeit gegenüber dem gegossenen Werkstoff auf (*Bild 9b*). Da bereits das Vormaterial — der Knüppel — hohen Verformungen unterzogen

wird, wird dieser Verschmiedungsgrad von geschmiedeten Bauteilen weit überschritten.

Durch den Walz- und Schmiedevorgang werden im Stahl befindliche Schlackeneinschlüsse und Seigerungen längs der Umformrichtung gestreckt. Es bildet sich je nach Reinheitsgrad des Einsatzmaterials eine mehr oder weniger ausgeprägte Zeiligkeit aus, die als Faserverlauf bezeichnet wird. Da auch die Kristalle der Matrix trotz stattfindender Rekristallisation nicht mehr regellos, sondern ebenfalls zeilig gestreckt sind, ergeben sich aufgrund der Anisotropie der Kristalle richtungsabhängige Eigenschaften des Bauteils. Diese führen zu einer Verbesserung der mechanischen Eigenschaften in Faserrichtung. Da diese meistens mit der Richtung höchster Beanspruchungen übereinstimmt, erfährt das Bauteil durch den Umformgang eine weitere Qualitätsverbesserung.

Die üblichen Schmiedetemperaturen liegen zwischen 1100 und 1250 °C. Neben der Kaltmassivumformung, bei der die maximal erzielbaren Umformgrade ohne Zwischenglühung aufgrund der hohen Kaltverfestigung begrenzt sind, ist das Halbwarmschmieden bei Temperaturen zwischen 600 und 800 °C ein Verfahren, bei dem Schmiedestücke mit noch größerer Maßgenauigkeit und besserer Oberflächenbeschaffenheit gefertigt werden. Bei entsprechender Schmierung beträgt die Rauhtiefe nur 4 bis 12 µm [11]. Hierbei sind die Umformkräfte etwa 2 bis 2,5 mal so groß wie beim Schmieden mit üblichen Temperaturen, betragen jedoch nur 1/3 des Wertes bei Raumtemperatur. Die bei Schmiedestücken übliche hohe Dauer-schwingfestigkeit wird durch halbwarm gefertigte Bauteile noch gesteigert.

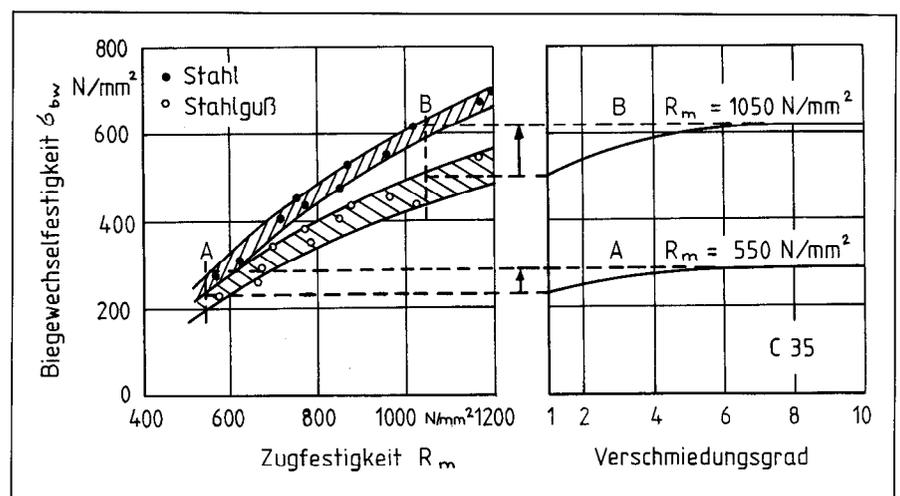


Bild 9: Biegewechselfestigkeit von Stahl und Stahlguß in Abhängigkeit von Zugfestigkeit und vom Verschmiedungsgrad [3].

Bild 10 zeigt an Probestäben für verschiedene Oberflächenzustände die Biegewechselfestigkeit von bei 600 bzw. 800 °C umgeformten Proben. Ein weiterer Vorteil von Schmiedestücken ist ihre im Fertigungsgang bedingte hohe Qualitätssicherheit. Das Schmiedestück ist in seinem Herstellungsweg, angefangen vom Rohmaterial (dem Stahlknüppel) über den Schmiedevorgang, die Wärmebehandlung, die Nachbehandlung bis hin zum einbaufertigen Teil, einer Vielzahl von Qualitätskontrollen unterworfen. Diese Kontrollen in den einzelnen Bearbeitungsstufen ergeben die große Sicherheit der geschmiedeten Bauteile. Da das Schmiedeteil aufgrund seines hohen Verschmiedungsgrades praktisch frei von inneren Fehlern ist, ergibt sich zusätzlich noch ein geringerer Prüfaufwand als bei Bauteilen, die durch andere Fertigungsverfahren hergestellt worden sind.

Zusammenfassung

Es wurden einige Qualitätsvorteile geschmiedeter Bauteile erörtert. Angefangen bei der Werkstoffauswahl und der richtigen Wärmebehandlung über die Möglichkeiten der Oberflächenbehandlung, die große Gestaltungsfreiheit bis hin zu den verschiedensten Einflüssen der Fertigung kann der Maschinenbau-Konstrukteur die Vorteile ausnutzen, die ihm geschmiedete Bauteile bieten.

Es wird immer andere Fertigungsverfahren geben, die es ermöglichen, ein Bauteil gegebener Gestalt u. U. kostengünstiger zu fertigen. Es besteht dann jedoch immer die Gefahr, daß dies auf Kosten der Sicherheit geht. Konstrukteure und Kaufleute sind gut beraten, den nicht nur in der Luftfahrt gültigen Ausdruck „Safety first“ durch die Verwendung von Schmiedestücken konsequent in die Tat umzusetzen.

Bildnachweis:

Alle Bilder: Forschungsstelle Gesenkschmieden an der Universität Hannover (Leiter: Prof. Dr.-Ing. E. Doege).

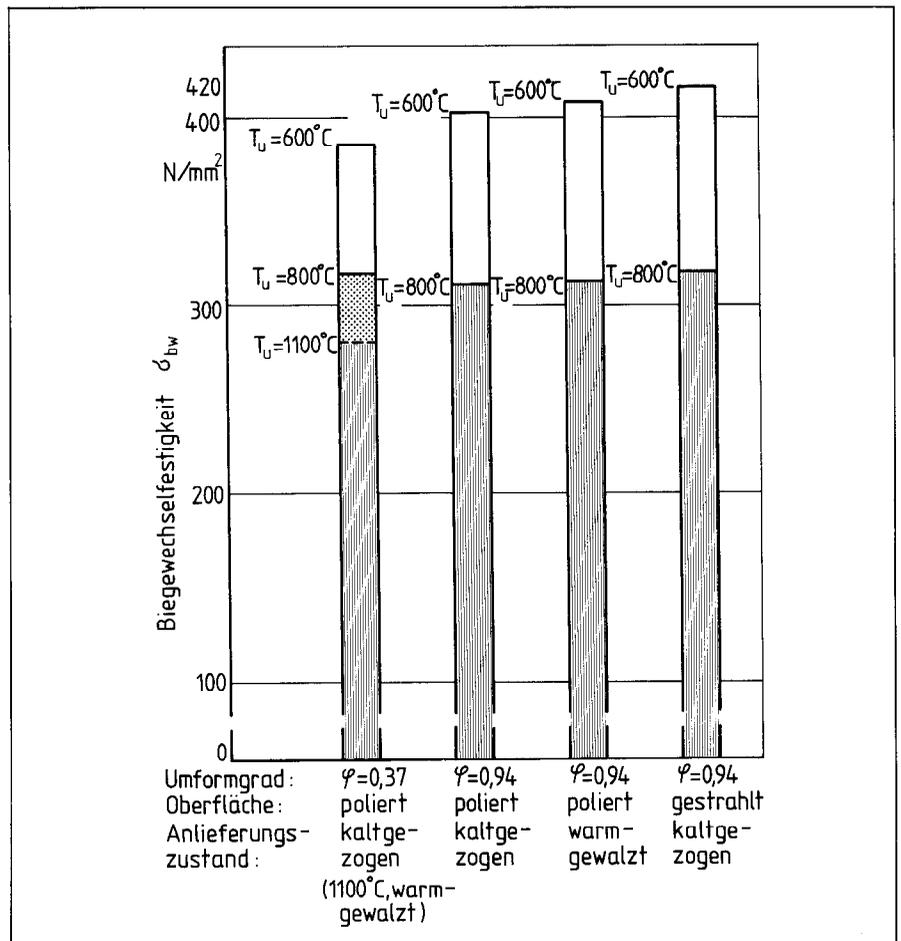


Bild 10: Biegewechselfestigkeit in Abhängigkeit von Schmiedeeendtemperatur und Umformgrad.

Literaturnachweis:

- [1] Just, E.: Bruchinschnürung und Schwingfestigkeit. VDI-Z 118 (1976), S. 1127.
- [2] Hempel, M.: Erörterung zu F. C. Althoff u. G. Wirth: Zur Frage der Beziehungen zwischen der Kerbwirkungszahl und der Kerbformzahl bei Flachproben metallischer Werkstoffe. VDI-Berichte Nr. 129 (1968), S. 31–32.
- [3] Knolle, B.: Untersuchung über die Schwingfestigkeit von Schmiedeteilen aus unlegierten Vergütungsstählen und ihre Beeinflussung durch kostenreduzierende Maßnahmen. Dr.-Ing.-Diss. TU Hannover, 1978.
- [4] Fascher, P.: Untersuchung über das gesteuerte Abkühlen aus der Schmiedewärme an unlegierten Kohlenstoffstählen. Dr.-Ing.-Diss. Uni Hannover, 1980.
- [5] Macherauch, E.: Neuere Untersuchungen zur Ausbildung und Auswirkung von Eigenspannungen in metallischen Werkstoffen. Z. Werkstoff-Techn. 10 (1979) 3, S. 97–111.
- [6] Schreiber, R.: Untersuchungen zum Dauerschwingverhalten kugelgestrahlter Einsatzstähle. FVA-Informationstagung Forschungsvereinigung Antriebstechnik, München 1974.
- [7] Jonck, R.: Oberflächenbehandlung durch Nitrieren. VDI-Berichte (1975), S. 15–20.
- [8] Wiegand, H. u. P. Strigens: Die Steigerung der Dauerfestigkeit durch Oberflächenverfestigung in Abhängigkeit von Werkstoff und Vergütungszustand. Draht 20 (1969), S. 189–194, S. 302–308.
- [9] Gassner, E. u. W. Schütz: Evaluating Vital Vehicle Components by Programme Fatigue Tests. Proc. 9th Intern. Automobile Techn. Congr., London: The Institution of Mechanical Engineers (1962), S. 195–205.
- [10] Tönshoff, K. und G. Warnecke: Über die Zerspanbarkeit von Stahl und Gußeisen. VDI-Z 120 (1978) Nr. 7, S. 311–318.
- [11] Kowallick, G.: Formpressen von Stahl im Bereich mittlerer Umformtemperaturen – „Halbwarm-schmieden“. Dr.-Ing.-Diss. Uni Hannover, 1979.
- [12] Engineer, S., Frodl, D. und D.-M. Rupp: Entwicklungen auf dem Gebiet der Stähle für Gesenkschmiedestücke. VDI-Z (1980) Nr. 17, S. 705–711.