

Einflußgrößen der Betriebsfestigkeit geschmiedeter Bauteile

Von Vatroslav Grubisic und Cetin Morris Sonsino,
Darmstadt

Bei der Bemessung von Bauteilen ist es erforderlich, daß die zutreffenden Festigkeitsdaten, die sowohl Werkstoffeigenschaften als auch die Einflüsse der Fertigung und der Bauteilgestaltung berücksichtigen, zugrunde gelegt werden. Die Art der maßgebenden Betriebsbelastungen ist dabei von ausschlaggebender Bedeutung für das Betriebsfestigkeitsverhalten. Die Fertigung und die Nachbehandlung der geschmiedeten Bauteile haben einen großen Einfluß auf das Schwingfestigkeitsverhalten. In diesem Beitrag wird eine Übersicht der Einflußgrößen gegeben, ihre Auswirkungen auf die Betriebsfestigkeit von geschmiedeten Bauteilen werden erörtert.

1 Einleitung

Für die Bemessung geschmiedeter Bauteile stehen meist an Werkstoffproben ermittelte Festigkeitskennwerte zur Verfügung. Diese Kennwerte werden überwiegend an spanend bearbeiteten Proben bestimmt, so daß sie bei der Bemessung von Bauteilen wegen möglicherweise unterschiedlicher Oberflächenzustände, Größen und Werkstoffeigenschaften in geeigneter Form übertragen werden müssen. Falls aufgrund einer unzureichenden Bemessung während der Erprobung oder beim Betriebseinsatz Schäden entstehen, wird oft auf die mangelnde Güte der Fertigung hingewiesen und dabei nicht berücksichtigt, daß die Güte jeder Fertigung aus wirtschaftlichen Gründen Grenzen aufweist und daß eine zutreffende Bemessung nicht allein vom Werkstoff und von der Fertigungsgüte abhängt. Es muß stets bedacht werden, daß das Betriebsfestigkeitsverhalten¹⁾ eines Bauteils vorrangig durch vier sich gegenseitig beeinflussende Parameter bestimmt wird:

- Belastung (insbesondere Höhe und Häufigkeit),
- Konstruktion (Formgebung),
- Werkstoff und
- Fertigung.

Die Betriebsbelastung kann in der Regel nicht beeinflusst werden, da sie sich aus dem bestimmungsgemäßen Einsatz einer Konstruktion ergibt. Dagegen lassen sich die für die Bemessung ausschlaggebenden örtlichen Beanspruchungen des Bauteils durch die konstruktive Formgebung und die ertragbaren Beanspruchungen durch die Auswahl geeigneter Werkstoffe und die Fertigung beeinflussen.

Für eine betriebsfeste Bemessung von Bauteilen reicht die Kenntnis konventioneller Werkstoffkennwerte wie Zugfestigkeit, Streckgrenze, Bruchdehnung, Brucheinschnürung, Schlagarbeit und Dauerfestigkeit nicht aus. Das Schwing-

festigkeitsverhalten eines Werkstoffs wird auch durch die konstruktive Formgebung (Spannungskonzentration) und die Fertigung bestimmt. In diesem Beitrag werden die Größen, die das Betriebsfestigkeitsverhalten von Bauteilen beeinflussen, erörtert.

2 Kriterien für die Bemessung

Vor der Auswahl eines Werkstoffs und des Fertigungsverfahrens muß der Konstrukteur sich Klarheit über die Lebensdauerforderung verschaffen. Handelt es sich zum Beispiel um Pleuel, Kurbelwelle, Ventil oder Zahnrad, so muß er gegen die Dauerfestigkeit ($N \geq 2 \cdot 10^6$), handelt es sich jedoch um eine begrenzte Anzahl von Schwingspielen, beispielsweise bei Pressenrahmen oder Druckbehältern, muß er je nach Höhe der aufzunehmenden Beanspruchungen gegen die Zeit- ($5 \cdot 10^4 < N < 2 \cdot 10^6$) oder Kurzzeitschwingfestigkeit ($N < 5 \cdot 10^4$) dimensionieren. Bei anderen Bauteilen wie Achsschenkeln, Schwenklagern oder Achsen, die zeitlich veränderlichen Belastungen mit mehr als 10^8 Schwingspielen ausgesetzt werden, muß er allerdings, wenn er wirtschaftlich konstruieren will, eine entsprechende Überschreitung der Dauerfestigkeit zulassen, deren Höhe von der Häufigkeitsverteilung der Betriebsbelastungen abhängt. Darüber hinaus muß er, wenn es sich um Sicherheitsteile handelt, auch Auswirkungen von möglichem Mißbrauch, zum Beispiel die schlagartige Belastung des Fahrzeug-Fahrwerks beim unbeabsichtigten Überfahren eines Hindernisses, berücksichtigen. Werkstoff und Fertigungsqualität müssen sich nach Art und Höhe dieser Belastungen richten.

2.1 Wiederholte Belastungen

2.1.1 Einfluß der Werkstoffeigenschaften und der konstruktiven Formgebung

Die Auswahl von Werkstoffen bei der Konstruktion von schwingbeanspruchten Bauteilen wird oft noch anhand von Dauerfestigkeitswerten [1] vorgenommen, die an ungekerbten Proben ermittelt wurden. Diese Kennwerte sind allerdings nur bedingt anwendbar, da die meisten Bauteile kritische Stellen mit erhöhter Spannungskonzentration aufweisen. Bild 1 zeigt den Zusammenhang zwischen der

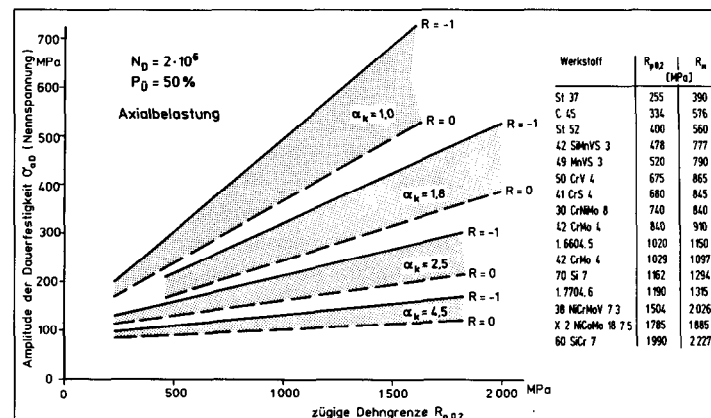


Bild 1. Dauerfestigkeit verschiedener Stähle in Abhängigkeit von der Formzahl α_k .

¹⁾ Die Betriebsfestigkeit ist die Festigkeit von Komponenten und Konstruktionen unter Betriebsbelastungen, die sowohl die Schwingfestigkeit wie auch das Festigkeitsverhalten unter einmaliger Überbeanspruchung (Überschreitung der Formdehngrenze und Gewaltbruch) beinhaltet.

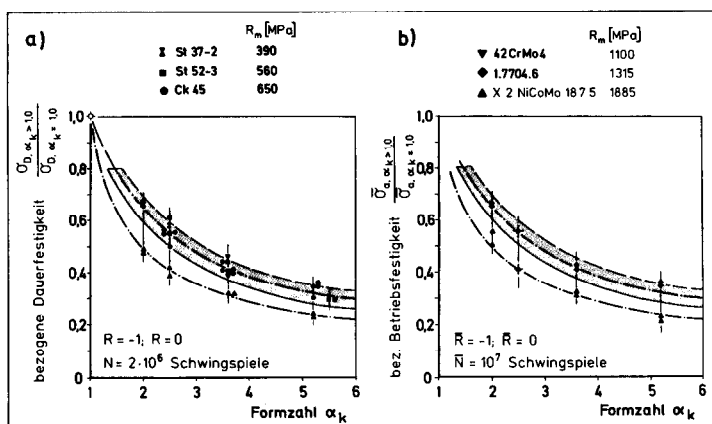


Bild 2. Dauer- und Betriebsfestigkeit in Abhängigkeit von der Formzahl.

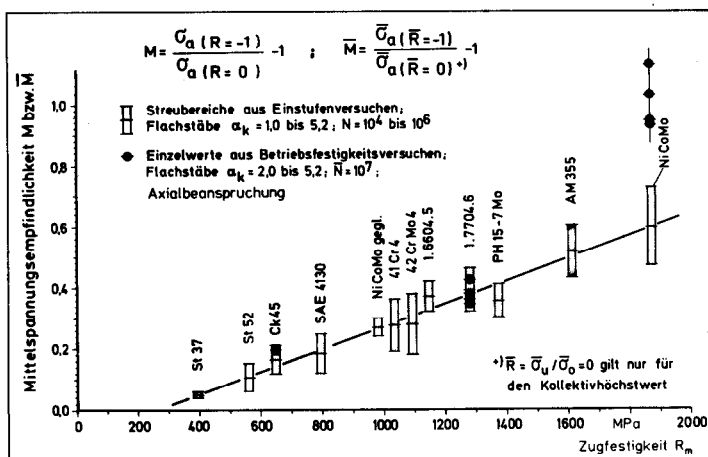


Bild 3. Mittelspannungsempfindlichkeit von Stählen im Einstufen- und Betriebsfestigkeitsversuch.

0,2%-Dehngrenze beziehungsweise Zugfestigkeit und Dauerfestigkeit in Abhängigkeit von der Formzahl (Spannungskonzentration, Kerben). Im Fall einer erhöhten Spannungskonzentration kann durch Verwenden eines höherfesten Werkstoffs die Dauerfestigkeit kaum mehr gesteigert werden. Durch eine solche Maßnahme würde man sich sogar Nachteile einhandeln, denn mit zunehmender Festigkeit werden sowohl die Mittelspannungs- als auch die Kerbempfindlichkeit infolge der Verformungsbehinderung in der Kerbe durch den mehrachsigen Spannungszustand gesteigert. Bei Anwendung eines hochfesten Werkstoffs wird zugleich die Empfindlichkeit gegen die Oberflächenrauheit erhöht. Auch muß bezüglich der Bearbeitbarkeit mit kürzeren Werkzeugstandzeiten gerechnet werden.

Bei einer dauerfesten Bemessung empfiehlt sich aus diesen Gründen ein Abbau von Spannungsspitzen durch konstruktive Maßnahmen wie größere Kerbradien, um durch eine bessere Ausnutzung eines weniger festen und zäheren Werkstoffs die genannten Nachteile zu vermeiden.

Auch wenn es sich um Beanspruchungen handelt, die die Dauerfestigkeit weit überschreiten, zum Beispiel im Bereich der Kurzzeitschwingfestigkeit oder bei zeitlich veränderlichen Belastungen, darf der Werkstoff nicht allein anhand seiner Dauerfestigkeit ausgewählt werden [2]. Zur Steigerung der Lebensdauer oder zur Gewichtsoptimierung ist eine höhere Werkstofffestigkeit allein nicht maßgebend. Wenn dieses Ziel beispielsweise durch Vergüten erreicht werden soll, muß durch eine geeignete chemische Zusammensetzung außer einer entsprechend hohen Streckgrenze auch eine ausreichend große Duktilität gewährleistet sein. Diese große Duktilität ist zur Verringerung der Kerb- und Mittelspannungsempfindlichkeit sowie zur Erhöhung des Werkstoff-

widerstandes gegen Rißbildung oder gegebenenfalls zur Reduzierung der Rißfortschrittsgeschwindigkeit wichtig. Die höhere Festigkeit ist auch im Fall einer höheren Vorspannung, zum Beispiel bei zusammengebauten Teilen oder Schrauben, erforderlich, oder bei Bauteilen, die seltenen hohen Überlastungen unterworfen sein können.

Eine zusammenfassende Darstellung der Veränderung der Dauer- und Betriebsfestigkeit durch Kerben, ermittelt an mittig gelochten, axial belasteten Flachstäben, gibt **Bild 2**. Ihm kann entnommen werden, daß die Betriebsfestigkeit ähnlich der Dauerfestigkeit infolge von Kerben beträchtlich verringert wird, wobei die Minderung mit der Erhöhung der Formzahl unabhängig vom Werkstoff einen degressiven Verlauf aufweist. Bei den höherfesten Werkstoffen ist mit einer größeren relativen Minderung zu rechnen als bei Werkstoffen geringerer Festigkeit.

Der Einfluß der Mittelspannung in Abhängigkeit von der Werkstofffestigkeit ist in **Bild 3** dargestellt. Dort kann entnommen werden, daß — wie bereits erwähnt — durch Erhöhung der Festigkeit des Werkstoffs auch die Mittelspannungsempfindlichkeit zunimmt.

2.1.2 Einfluß von Oberflächen- und Randschichtzustand

Bei der Fertigung durch Schmieden und der Nachbehandlung der Werkstücke durch Glühen oder Vergüten bildet sich an der Oberfläche eine Oxidschicht, durch die die Schwingfestigkeit gegenüber Prüfstäben mit bearbeiteter Oberfläche vermindert werden kann. Dies ist auf den Gefügestand und mögliche Inhomogenitäten in der Oberflächenschicht in Form von Riefen oder Narben zurückzuführen. Es gibt eine Vielzahl von Untersuchungen, die diesen Einfluß zu erfassen versuchten. Grundsätzlich wirkt sich die Struktur der un bearbeiteten Oberfläche in etwa ähnlich wie die Rauheit einer bearbeiteten Oberfläche aus. Dabei wirken sich Bearbeitungsriefen quer zur Belastungsrichtung wie geometrische Kerben aus; sie verringern die Schwingfestigkeit. Unbearbeitete Oberflächen haben keine in einer bestimmten Richtung orientierten Riefen, so daß bei gleicher Rauhtiefe vergleichsweise eine geringere Schwingfestigkeitsminderung zu erwarten ist. Je höher die Werkstofffestigkeit um so höher ist die Minderung der Schwingfestigkeit. Insbesondere bei niedrigem Spannungsniveau unter Einstufenbelastung, das heißt im Bereich der Dauerfestigkeit, ist die Minderung der Schwingfestigkeit am höchsten [2 bis 5]. Dies bedeutet einerseits, daß durch eine verbesserte Oberfläche unter solchen Beanspruchungen die höchsten Steigerungen der Schwingfestigkeit zu erzielen sind, und ist andererseits der Grund, daß bei der Untersuchung von geschmiedeten Bauteilen insbesondere im Bereich der Dauerfestigkeit relativ große Abweichungen im Vergleich zu den Schwingfestigkeitswerten, die üblicherweise mit polierten oder geschliffenen Probestäben ermittelt wurden, vorliegen.

Als Maß für die Rauheit der Oberfläche nach Bearbeitung eines Werkstoffs durch Zerspanen gilt die Rauhtiefe. In Abhängigkeit vom Werkstoff lassen sich den verschiedenen Bearbeitungsverfahren Rauhtiefen zuordnen. Grundsätzlich kann festgestellt werden: Je höher die Werkstofffestigkeit ist, um so höher ist die Empfindlichkeit gegenüber der Rauhtiefe.

Nach Untersuchungsergebnissen [2 bis 8] sowie bisher unveröffentlichten Unterlagen lassen sich durch eine bessere spannende Bearbeitung der Oberfläche in etwa folgende durchschnittliche Steigerungen der Schwingfestigkeit erzielen:

- Bei Einstufenbelastung im Bereich der Dauerfestigkeit kann, abhängig vom Werkstoff, durch Polieren ($R_z \approx 1 \mu\text{m}$) im Vergleich zum Schleifen ($R_z \approx 5 \mu\text{m}$), durch Schleifen im Vergleich zum Feindrehen ($R_z \approx 15 \mu\text{m}$) sowie durch Feindrehen gegenüber Grobdrehen ($R_z \approx 100 \mu\text{m}$) jeweils eine Steigerung um etwa 10% erzielt werden. Dies bedeutet, daß, wenn anstatt eines Grobdrehens die Bauteile poliert werden, sich eine resultierende Steigerung von etwa 30% bis 40% ergeben wird. Diese Steigerung hängt vom Werkstoff, vom Beanspruchungszustand und von der Bearbeitung ab. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse des Einflusses der Rauheit zeigt **Bild 4**.
- Im Zeitfestigkeitsbereich sowie bei zufallsartig veränderlicher Beanspruchung ist diese Steigerung geringer. Dementsprechend ist auch der Abfall der Schwingfestigkeit der unbearbeiteten Oberfläche im Vergleich zur bearbeiteten kleiner [6]. In **Bild 5** sind Ergebnisse aus Untersuchungen mit abgesetzten Probestäben als Wöhlerlinien wiedergegeben [7; 8]. Dem Bild kann entnommen werden, daß die Dauerfestigkeit der Probestäbe mit unbehandelter, nicht gestrahlter Oberfläche im Vergleich zur Dauerfestigkeit von geschliffenen oder gestrahlten Proben um 30% niedriger liegt. Dagegen beträgt der Unterschied der Zeitfestigkeit bei zum Beispiel 10^5 Schwingspielen nur noch etwa 10%. Dieser geringe Unterschied bei der Zeitfestigkeit läßt auch für die Betriebsfestigkeit eine erheblich geringere Minderung im Vergleich zur Dauerfestigkeit infolge einer Schmiedeoberfläche erwarten [9]. Aus **Bild 5** geht auch hervor, daß eine reinigungsgestrahlte Probe etwa die gleiche Schwingfestigkeit aufweist wie eine geschliffene.
- Bei der spanabhebenden Bearbeitung kann der Werkstoff unterschiedlich verfestigt werden, was von der Durchführung der Bearbeitung abhängt. Es wurde beispielsweise festgestellt, daß feingedrehte Bauteile (Achsschenkel, Radnaben) eine höhere Lebensdauer haben können als geschliffene, was auf die beim Feindrehen hervorgerufenen günstigen Druckeigenspannungen zurückzuführen ist, die den Einfluß der Rauheit kompensieren.

Eine beträchtliche Steigerung der Schwingfestigkeit von geschmiedeten Bauteilen kann durch eine Randschichtbehandlung [5 bis 10] erzielt werden. Voraussetzung dafür ist, daß die höchste Anstrengung²⁾ – und somit die Bruchausgangsstelle – an der Oberfläche oder zumindest im Randbereich liegt. Damit kann auch der schwingfestigkeitsmindernde Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit, insbesondere was die Dauerfestigkeit betrifft, voll kompensiert werden. Hierzu eignen sich sowohl mechanische Verfahren (Strahlen, Festwalzen, Hämmern) als auch thermische oder thermochemische Verfahren (Induktionshärten, Flammhärten, Einsatzhärten, Nitrieren, Nitrocarburieren). Bei allen Verfahren werden günstige Druckeigenspannungen sowie eine Verfestigung in oberflächennahen Schichten hervorgerufen. Die Erhöhung der Schwingfestigkeit an einem geschmiedeten Bauteil ist um so größer, je steiler der Spannungsgradient im kritischen Bereich ist (Spannungsverteilung im beanspruchten Querschnitt sowie Spannungskonzentration entlang der Oberfläche), und bei mechanischen Nachbehandlungsver-

²⁾ Nicht die höchste Beanspruchung, sondern die höchste Anstrengung (Relation zwischen örtlich wirkender und ertragbarer Beanspruchung) ist für die Entstehung eines Ermüdungsschadens maßgebend. Wenn in einzelnen Bereichen eines Bauteils eine geringere ertragbare Beanspruchung vorliegt (zum Beispiel im Inneren eines Bauteils infolge des Gefügezustands), können dort, auch bei niedrigerer Beanspruchung, die Ermüdungsschäden entstehen, so daß eine Verfestigung im höchstbeanspruchten Bereich nicht die erhoffte Lebensdauersteigerung bewirkt.

fahren, je höher die Werkstoffstreckgrenze ist. Grundsätzlich läßt sich durch Festwalzen oder Strahlen, abhängig von der Bauteilgestalt, der Beanspruchungsverteilung, dem Beanspruchungskollektiv und dem Werkstoff, eine Erhöhung der Schwingfestigkeit um den Faktor 1,3 bis etwa 2,5 erzielen. Die in [10] vorgestellten Untersuchungen zeigen, daß durch Kugelstrahlen von Pleueln sowohl eine beträchtliche Steigerung der Dauerfestigkeit erzielt als auch die Minderung der Schwingfestigkeit durch Oberflächenfehler bis zu einer Tiefe von 0,3 mm weitgehend kompensiert wird.

Mit thermischen und thermochemischen Verfahren lassen sich ähnliche und höhere Steigerungen der Schwingfestigkeit bewirken. Die Erhöhung der Festigkeit wird hierbei auch durch die erreichbare Tiefenwirkung, die durch die Härtebarkeit des Werkstoffs und durch die Verfahrensparameter bestimmt wird, beeinflusst.

Einige typische Ergebnisse von Untersuchungen zur Steigerung der Schwingfestigkeit durch Oberflächenbehandlung sind in **Bild 6** zusammengefaßt. Aus diesem Bild folgt, daß bei Einstufenversuchen durch Festwalzen die Dauerfestigkeit ($2 \cdot 10^6$ Schwingspiele) um den Faktor 1,7 gesteigert wird, wogegen bei veränderlicher Beanspruchung und einer Schwingspielzahl von $2 \cdot 10^7$ dieser Faktor nur 1,4 beträgt. Weiterhin wichtig für die Auswahl eines Verfahrens ist die Steigerung der Schwingfestigkeit durch Induktionshärten. Bei dieser Oberflächenbehandlung wird im Vergleich zur Basis-Variante sowohl bei Einstufenbelastung ($N = 2 \cdot 10^6$ Schwingspiele) wie auch bei veränderlicher Zufallsbelastung ($N = 2 \cdot 10^7$ Lastspiele) eine Steigerung um den Faktor 2,3

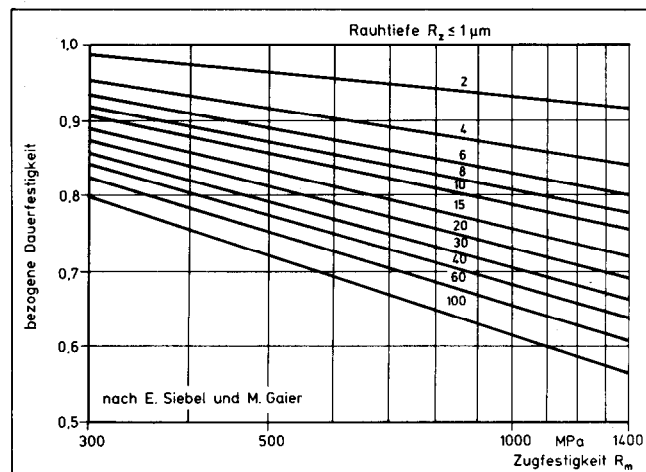


Bild 4. Minderung der Dauerfestigkeit in Abhängigkeit von Rauhtiefe und Zugfestigkeit.

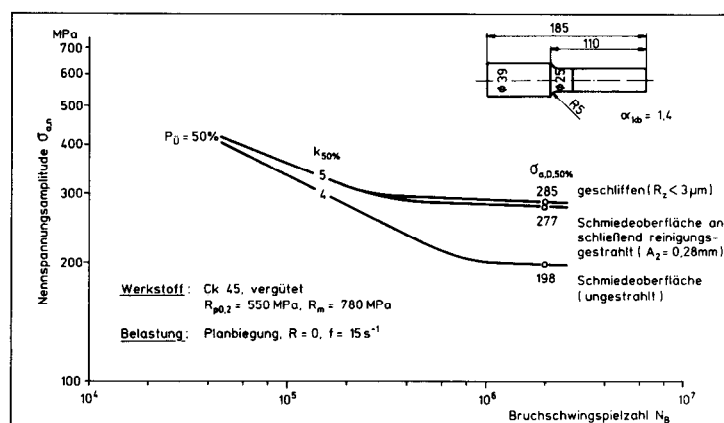


Bild 5. Einfluß einer Oberfläche im geschmiedeten Zustand auf die Schwingfestigkeit.

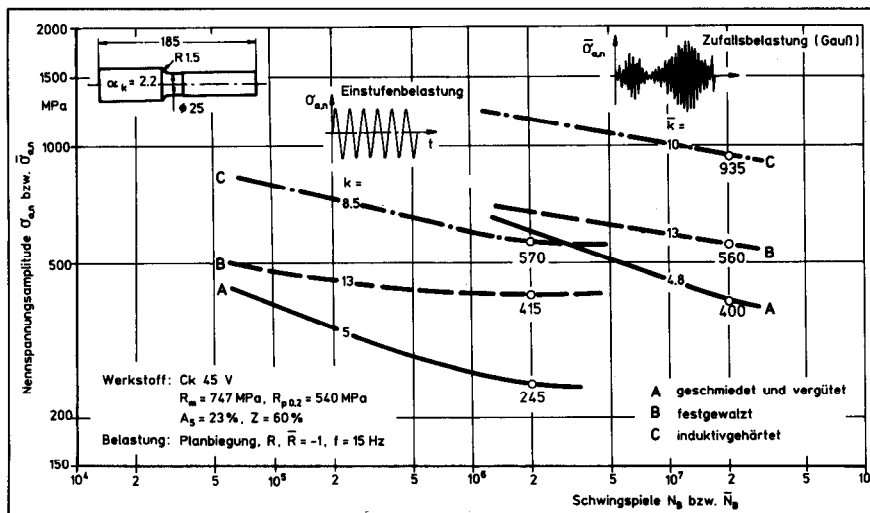


Bild 6. Einfluß verschiedener Nachbehandlungsverfahren auf die Schwingfestigkeit von Ck 45 V.

erreicht; dagegen beträgt der Faktor der Steigerung durch Induktivhärten gegenüber Festwalzen bei Einstufenbelastung nur etwa 1,4 und bei Zufallsbelastung 1,7.

2.2 Seltene Belastungen

Bei einer sicheren Auslegung von Bauteilen steht nicht allein die Vermeidung eines Schwingbruchs im Vordergrund, sondern auch die Vermeidung einer unzulässigen Verformung, die die Funktionstüchtigkeit des Bauteils gefährden kann, oder die Behinderung eines Bruchs infolge eines selten auftretenden Ereignisses, wie das bereits erwähnte Überfahren eines Hindernisses oder der Aufprall eines Fahrzeugs bei Glatteis gegen eine Bordsteinkante, die für die Auslegung von Fahrwerksteilen von Bedeutung sein können. Unter diesen Umständen sind andere Kriterien für Werkstoffauswahl und Konstruktion maßgebend als die der Schwingfestigkeit [11].

2.2.1 Formdehngrenze

Bauteile können aus der Sicht der Betriebsfestigkeit oft durch entsprechende oberflächentechnische Maßnahmen bezüglich der Dicke und Höhe der tragenden Querschnitte dünner gestaltet werden. Um jedoch mögliche Extrembelastungen, die im Betriebseinsatz entstehen können, abzudecken, so daß eine unzulässige Verformung vermieden wird, ist eine ausreichende Steifigkeit durch eine entsprechend hohe Formdehngrenze zu gewährleisten. Dies ist primär eine Frage der Abmessungen. Unterstützend kann die Auswahl eines höherfesten Werkstoffs mit ausreichender Zähigkeit hinzukommen. Durch eine solche konstruktive Maßnahme läßt sich das Spannungsniveau derart mindern, daß zum Beispiel eine niedrige ertragbare Schwingfestigkeit des Bauteils aufgrund einer nicht behandelten oder nicht ausreichend entzunderten Oberfläche keine Rolle mehr spielt, da diese ertragbare Schwingfestigkeit dann trotzdem höher ist als die im Betrieb auftretende Schwingbeanspruchung. Dies ist beispielsweise bei der Bemessung einer Nutzfahrzeug-Vorderachse weitgehend der Fall. Die Dauerfestigkeit unter Biege-Schwellbelastung (Spannungsverhältnis $R \approx 0$, Überlebenswahrscheinlichkeit $P_u = 90\%$) von untersuchten Nutzfahrzeug-Achsen [12; 13 sowie unveröffentlichte Untersuchungsergebnisse des LBF] liegt abhängig von Werkstoff und Fertigung bei etwa $\sigma_b \approx \pm 150$ bis 200 MPa. Dadurch ergibt sich ein Verhältnis $\sigma_b/R_m \approx 0,2$ bis $0,25$, was im Vergleich zu den ungekerbten, geschliffenen Proben sehr niedrig ist. Für diese Verhältnisse gilt das in Bild 7 wiedergegebene Betriebsfestigkeits-Bewertungsdiagramm [13], mit

dem nach der Ermittlung von Beanspruchungen der Konstrukteur eine schnelle Beurteilung und konstruktive Optimierung der Achse vornehmen kann. Da die Betriebsfestigkeit der Nutzfahrzeug-Vorderachsen hauptsächlich durch die bei Geradeausfahrt und Bremsen entstehenden Beanspruchungen bestimmt wird, werden in diesem Diagramm nur diese Lastfälle berücksichtigt. Die Bauteil-Formdehngrenze (definiert als örtliche Dehngrenze, bei der noch keine globale, unzulässige plastische Verformung des Achskörpers zu verzeichnen ist und bei der die örtliche plastische Dehnung üblicherweise den Wert von $\epsilon_{pl,zul} = 0,02\%$ nicht überschreitet [14]) liegt oberhalb oder an der Grenze der zulässigen maximalen Schwingbeanspruchungen. Falls durch Nachbehandlung der Oberfläche die Schwingfestigkeit verbessert wird, aber ansonsten die Formdehngrenze, die nur durch die konstruktive Formgebung und die Werkstofffestigkeit bestimmt ist, unverändert bleibt, werden schnell die Grenzen unzulässiger Verformungen, die Formdehngrenze und dadurch auch die Grenze der möglichen Gewichtsminderung infolge besserer Schwingfestigkeit erreicht. Bei vorliegenden Beanspruchungskollektiven solcher Achskonstruktionen kann eine Überschreitung der Dauerfestigkeit durch Kollektivhöchstwerte um etwa Faktor 2,1 noch erlaubt werden, ohne daß unzulässige Verformungen auftreten. Falls die Dauerfestigkeit durch eine geeignete mechanische Nachbehandlung zum Beispiel um 20% verbessert wird, bedeutet dies aber nicht, daß um den Faktor 2,1 größere Kollektivhöchstwerte zugelassen werden können, denn die Formdehngrenze bleibt bei gleicher Geometrie unverändert und darf somit nicht überschritten werden. Insofern kann im vorliegenden Fall eine mögliche Dauerfestigkeitserhöhung weder zur Verbesserung des Betriebsfestigkeitsverhaltens noch für eine mögliche Querschnittsverringering oder Gewichtseinsparung ausgenutzt werden, zumal bei einer Querschnittsverringering die Formdehngrenze herabgesetzt wird.

2.2.2 Bruchverhalten

Im Fall von seltenen Ereignissen muß bei Sicherheitsteilen, wie Achsschenkeln, ebenfalls ein Bruch unter einer schlagartigen Belastung, zum Beispiel Prallen gegen eine Bordsteinkante, ausgeschlossen werden. Die Werkstoffauswahl kann daher nicht nur nach bruchmechanischen Gesichtspunkten, wie bessere Bruchzähigkeit oder langsamer Rißfortschritt, vorgenommen werden, da diese Kennwerte das Werkstoffverhalten unter schlagartiger Belastung nicht abdecken können.

Die Bedeutung des Werkstoffverhaltens unter schlagartiger Belastung ist grundsätzlich bekannt. Bisherige Untersuchungen wurden vorwiegend an kleinen Kerbschlagproben durchgeführt. Für die Beurteilung einer komplex beanspruchten Komponente sind diese Angaben nicht geeignet, da bauteilbedingte Einflüsse, wie mehrachsiger Spannungszustand, Eigenspannungen, Gefügeinhomogenitäten und Versprödungen, vorliegen können, die sich nur durch Versuche am realen Bauteil erfassen lassen. Aufgrund der signifikanten Abhängigkeit des Formänderungswiderstandes von der Umformgeschwindigkeit Voraussetzung für eine Beurteilung des Werkstoffverhaltens. Der Einfluß des Werkstoffs bei der schlagartigen Beanspruchung ist beispielhaft an Nutzfahrzeug-Achsschenkeln [11] untersucht worden. Hierzu wurden die Achsschenkel zunächst einer zeitlich veränderlichen Betriebsbeanspruchung unterworfen, mit der Anrisse einer Tiefe von etwa 14 mm bis 18 mm eingeleitet wurden. Anschließend wurden die Achsschenkel in einem Fallhammer-Versuchsstand bei Raumtemperatur und bei -40°C schlagartig mit einer Aufprallgeschwindigkeit von etwa 7 ms^{-1} belastet. Der Werkstoff wurde variiert zwischen Ck 45V ($R_m = 800\text{ MPa}$, $R_{p0.2} = 550\text{ MPa}$, $A_5 = 0,20$ und $Z = 0,54$), 41 CrS4V ($R_m = 880\text{ MPa}$, $R_{p0.2} = 700\text{ MPa}$, $A_5 = 0,13$, $Z = 0,51$) und 42 CrMoS4V ($R_m = 910\text{ MPa}$, $R_{p0.2} = 770\text{ MPa}$, $A_5 = 0,14$, $Z = 0,54$). Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Bild 8 und 9 als Kraft-Verformungs-Verläufe zusammengefaßt. Aus diesen Bildern läßt sich folgendes entnehmen: Der niedrigste Werkstoff Ck 45 zeichnet sich durch einen sanften Kraftanstieg aus. Nach Erreichen der Maximalkraft fällt die Kraft relativ langsam ab. Die maximale Bruchenergie beträgt $E = 1212\text{ J}$.

Der höherfeste und weniger duktile Werkstoff 41CrS4V weist einen kontinuierlichen Kraftanstieg bis zu einer fast doppelt so hohen Maximallast und einen anschließenden steilen Abfall der Kraft infolge einer instabilen, schnellen Rißausbreitung auf. Die aufgebrauchte Bruchenergie ist mit $E = 2185\text{ J}$ höher als beim Werkstoff Ck 45V.

Beim Werkstoff 42 CrMoS4V mit der höchsten statischen Festigkeit und einer dem Werkstoff 41 CrS4V vergleichbaren Zähigkeit ergeben sich ein steiler Kraftanstieg zu noch höheren Werten und ein großer Verformungsweg bis zum Gewaltbruch. Nach Erreichen der Maximalkraft tritt auch hier eine schnelle Rißausbreitung auf. Die Bruchenergie liegt mit $E = 6550\text{ J}$ deutlich höher als bei anderen Werkstoffen. Die Kraft-Verformungs-Verläufe bei einer Temperatur von $T = -40^\circ\text{C}$ sind bei den Werkstoffen Ck 45V und 41 CrS4V durch einen kontinuierlichen Kraftanstieg und -abfall und nur beim Werkstoff 42 CrMoS4V durch eine schnelle Kraftabnahme nach Erreichen der Maximalkraft gekennzeichnet. Infolge der Versprödung liegen die erforderliche maximale Bruchkraft und die Bruchenergie deutlich niedriger als bei Raumtemperatur, da der Widerstand gegen Rißausbreitung durch mangelndes Plastifizierungsvermögen abgebaut ist. Grundsätzlich wirkt sich also eine höhere statische Festigkeit des Werkstoffs günstig auf das Bruchverhalten von Bauteilen unter schlagartiger Belastung aus.

3 Übertragbarkeit von Werkstoffkennwerten auf das Bauteil

Bei der konstruktiven Auslegung und der Bemessung eines Bauteils muß der Konstrukteur, wenn Erfahrungen mit entsprechenden Bauteilen nicht vorliegen [1; 12 bis 17], auf Kennwerte zurückgreifen, die in der Regel mit Proben ermit-

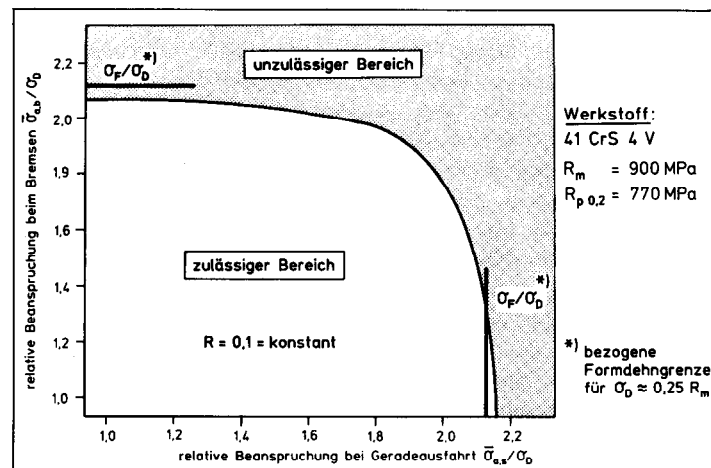


Bild 7. Betriebsfestigkeits-Bewertungsdiagramm für die konstruktive Optimierung von Lkw-Achsen.

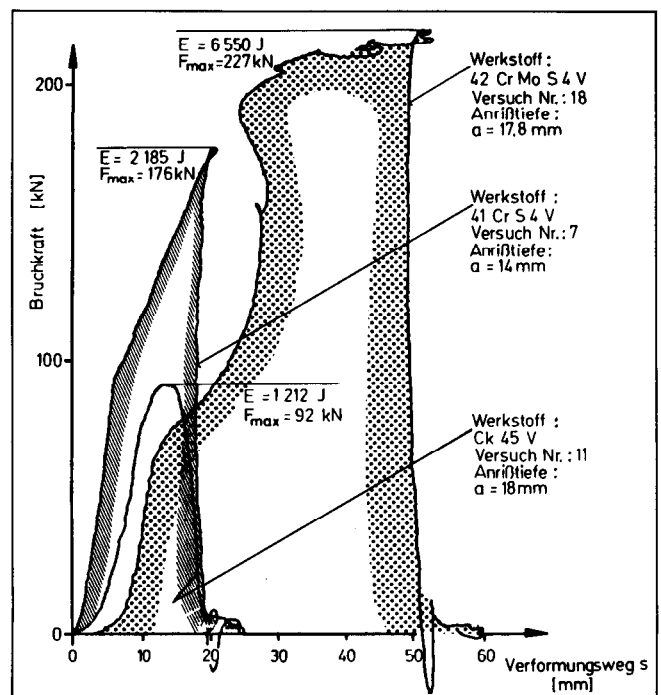


Bild 8. Kraft-Verformungs-Diagramme. Temperatur: Raumtemperatur.

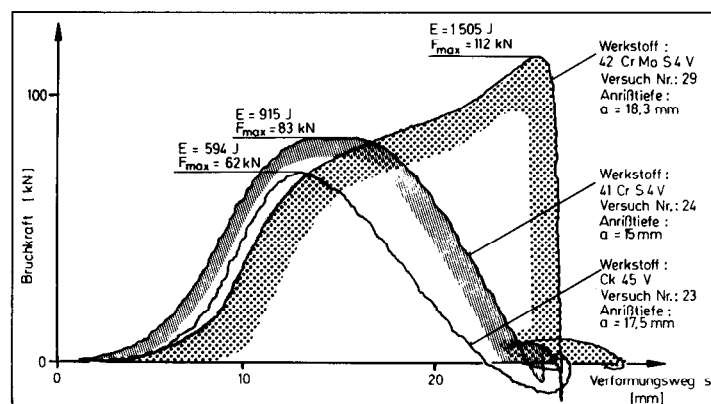


Bild 9. Kraft-Verformungs-Diagramme. Temperatur: -40°C .

telt worden sind. Bei der Übertragbarkeit dieser Kennwerte muß auf mögliche Unterschiede zwischen Probe und Bauteil gezielt eingegangen werden.

Schmiedeteile werden nach dem Schmieden und Wärmebehandeln entzundert, in der Regel durch Reinigungsstrahl-

len. Wenn hohe Anforderungen an die Genauigkeit und/oder die Oberflächengüte gestellt werden, schließt sich eine spanende Fertigbearbeitung an. Die Oberflächen von Schmiedeteilen sind demnach in der Regel teilweise reinigungsgestrahlt, teilweise spanend bearbeitet. Diese Oberflächenzustände sind maßgebend für das Schwingfestigkeitsverhalten von Schmiedeteilen. Der Strahlvorgang verfestigt die Randschicht, erzeugt Druckeigenspannungen und verursacht eine typische Oberflächenstruktur. Diese Eigenschaften sind zu berücksichtigen, wenn die Schwingfestigkeit eines Schmiedeteils beurteilt werden soll.

3.1 Versagenskriterium

Versagenskriterien im Hinblick auf unzulässige Verformungen oder Bruch unter schlagartiger Belastung wurden bereits zuvor diskutiert. Während eine Formdehngrenze für ein neues Bauteil, zum Beispiel durch eine Finite-Elemente-Berechnung — die die Kenntnis der Belastung vorausgesetzt —, rechnerisch ermittelt werden kann, lassen sich die an Proben festgestellten Zusammenhänge zwischen der Schlagbruchkraft und der Werkstofffestigkeit nur in der Tendenz übernehmen [11]. Hierzu ist eine experimentelle Überprüfung an einem Bauteil-Prototyp stets zu empfehlen.

Aus der Sicht der Schwingfestigkeit ist das wichtigste Versagenskriterium der erste mit technischen Mitteln feststellbare Anriß und nicht der Bruch. Für viele Bauteile, wie Kurbelwellen, Pleuel, Zahnräder, Achsschenkel, Schwenklager und Achsen, gilt es, durch eine zutreffende Dimensionierung den ersten technischen Anriß zu vermeiden, das heißt, für die Bemessung von solchen Bauteilen ist die Kenntnis einer Anrißwöhlerlinie erforderlich. Bei der Übertragbarkeit einer mit Proben ermittelten Anrißwöhlerlinie auf ein zu entwerfendes Bauteil müssen Einflüsse aus Belastungsart (Biegung, Axialbelastung, Torsion), Spannungsgradient, Oberflächenzustand und Bauteilgröße bei gegebenem Werkstoff berücksichtigt werden. Dagegen kann bei der Bemessung von Bauteilen, die im Betrieb zeitlich veränderlichen Beanspruchungen unterworfen sind, ein technischer Anriß zugelassen werden, falls er sich weder auf die Funktionstüchtigkeit noch auf das Bruchverhalten auswirkt.

Da die meisten in der Literatur verfügbaren Wöhlerlinien von bauteilähnlichen Proben die Bruchschwingspielzahl als Versagenskriterium enthalten, können diese Wöhlerlinien erst nach Bestimmung der Rißfortschrittsphase, die von der Probengröße, der Probengeometrie und der Art der Beanspruchung abhängt, auf das Bauteil übertragen werden.

3.2 Bauteilgröße

Der geometrische Unterschied zwischen Probe und Bauteil beeinflusst nicht nur die Anrißschwingspielzahl, sondern — wie bereits erörtert — auch die Rißfortschrittsdauer. Der mit zunehmender Bauteilgröße beobachtete Abfall der Schwingfestigkeit ist primär mit der Größe des höchstbeanspruchten Volumens korreliert: Je größer das höchstbeanspruchte Volumen, um so größer ist die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls aufgrund einer vergrößerten Anzahl von versagensauslösenden Werkstoffinhomogenitäten. Dieser Einfluß läßt sich für das größere Bauteil beim Vorliegen von an kleinen Proben ermittelten Ergebnissen, zum Beispiel durch Einführung einer niedrigeren Ausfallwahrscheinlichkeit [17], berücksichtigen. Sofern an einem Bauteil ein Rißfortschritt zugelassen ist, kann der geometrische Unterschied zwischen einer kleinen Probe und einem größeren Bauteil durch geeignete bruchmechanische Berechnungen berücksichtigt werden.

Um die Unterschiede zwischen der Betriebsfestigkeit von Bauteilen und Proben zu bestimmen, wurden vergleichende Untersuchungen an Nutzfahrzeug-Radnaben und -Achsschenkeln vorgenommen [18]. Hierzu wurden Proben aus den hochbeanspruchten Bereichen von Bauteilen entnommen, in denen bei Betriebsfestigkeitsversuchen Brüche entstehen, **Bild 10**. Die bei Versuchen auftretenden Beanspruchungsabläufe (Dehnungs-Zeit-Verläufe) unter für das jeweilige Bauteil gültigen betriebsähnlichen Belastungen [18] wurden mit Hilfe von Dehnungsmessstreifen ermittelt. Diese Beanspruchungsabläufe dienten als Grundlage für die Betriebsfestigkeitsversuche mit aus Bauteilen entnommenen Proben, wobei der Belastungsablauf mit dem der Bauteiluntersuchungen identisch war. In **Bild 11 und 12** sind die Ergebnisse der Versuche an Bauteilen und Proben zusammengefaßt. Als Versagenskriterium diente der erste technische Anriß, der mit einem an der Bruchausgangsstelle des untersuchten Bauteils angebrachten Reißdraht bestimmt wurde.

Die Ergebnisse (**Bild 11**) zeigen, daß die Unterschiede zwischen der an Bauteilen und der an Proben ermittelten Lebensdauer gering sind, obwohl an der Bruchstelle der Naben eine unbearbeitete reinigungsgestrahlte Schmiedeoberfläche vorlag, die Proben hingegen geschliffen waren.

Der Unterschied zwischen Achsschenkeln und zugehörigen Proben ist etwas größer (**Bild 12**). Im Mittel wurde eine um 40% kürzere Lebensdauer an Proben im Vergleich zu den Achsschenkeln ermittelt, obwohl in diesem Fall die Oberflächenrauheit ähnlich war. Die geringere Lebensdauer der Probe muß demzufolge primär auf Unterschiede in der Beanspruchungsverteilung zurückzuführen sein, die bei der axial beanspruchten Probe im Vergleich zum biegebeanspruchten Achsschenkel eine größere Schädigung bewirkt.

3.3 Qualitätssicherung

Erfahrungen zeigen, daß an kleinen Proben ermittelte Eigenschaften, zum Beispiel die Steigerung der Schwingfestigkeit durch Oberflächenbehandlung, am Bauteil nicht immer erzielt werden. Dies liegt primär an unterschiedlichen Parametern der technologischen Prozeßführung bei der Fertigung von Kleinproben und größeren Bauteilen. Um auch an Bauteilen die gewünschte Qualität zu erzielen, müssen nicht nur entsprechende Optimierungsversuche vorgeschaltet, sondern es muß später in der Produktion auch eine genaue Prozeßüberwachung [19; 20] gewährleistet werden. Bei der Fertigung von Gesenkschmiedeteilen spielt auch die Einhaltung der geometrischen Abmessungen eine große

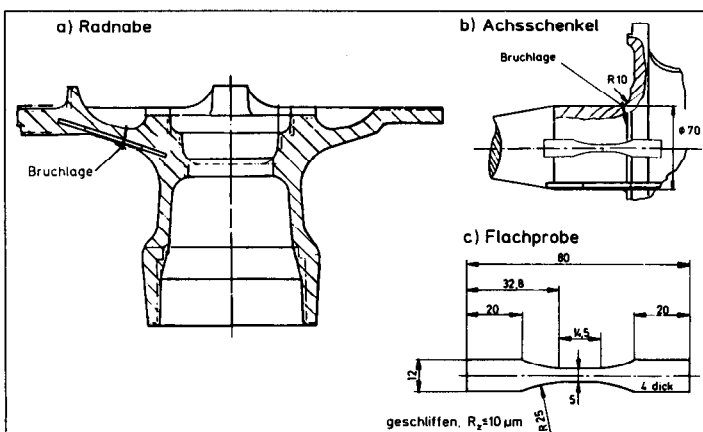


Bild 10. Entnahme der Versuchsproben.

Rolle. Sofern durch den Werkzeugverschleiß die Abmessungen der Bauteile größer und damit die Bauteilbeanspruchungen kleiner werden, wird zwar die Lebensdauer nicht gefährdet; wenn es sich aber um Bauteile wie Fahrzeugpleuel handelt, bei denen eine genauere Einhaltung von Gewichtstoleranzen zur Vermeidung von Unwuchten im Motor verlangt wird, bewirkt die Gewichtszunahme eine Kostensteigerung durch ein nachträgliches Auswuchten oder durch die Lagerhaltung.

Ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Qualitätssicherung für die Fertigung von Schmiedeteilen ist die kontrollierte Beschaffung des Vormaterials. Dieses Vormaterial muß – wenn hohe Ansprüche an Dauer- und Betriebsfestigkeit gestellt sind – einen großen Reinheitsgrad aufweisen, da Einschlüsse mit zunehmender Größe und Zeiligkeit die zuvor genannten Eigenschaften mindern können, falls sie in den beanspruchten Bauteilbereichen vorliegen. Daher wird von dem eingesetzten Vormaterial eine US-Prüfung auf Innenfehler gefordert. Weiterhin wird nur Vormaterial verwendet, das im Hinblick auf die Oberflächenbeschaffenheit durch geeignete Verfahren geprüft wurde. Hier ist eine erlaubte Fehlertiefe von nur maximal 0,3 mm zulässig.

Da, wie bereits detailliert erörtert, die Oberflächenbeschaffenheit, die Bauteilgeometrie und die Eigenspannungszustände von großer Bedeutung für die Schwingfestigkeit sind, sollen unter anderem folgende Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Herstellung von Schmiedeteilen durchgeführt werden:

- Überwachung der Bauteilgeometrie während der Fertigung zur Sicherstellung einer hohen Maßhaltigkeit, zum Beispiel durch statistische Prozeßregelung (SPC),
- regelmäßige Stichproben während der Schmiedung zur Absicherung der geforderten Bauteiloberflächenqualität,
- falls erforderlich, 100%ige Kontrolle auf Oberflächenfehler, zum Beispiel durch eine magnetische Rißprüfung von Sicherheitsbauteilen in der Endfertigung.

Zur Entfernung der durch Schmieden oder Wärmebehandlung den Bauteilen anhaftenden Zunderschichten werden die Schmiedeteile in der Regel reinigungsgestrahlt oder, bei definierten Anforderungen an den Oberflächen- oder Eigenspannungszustand, festigkeitsgestrahlt. Neben der Überwachung der Prozeßparameter beim Strahlen (zum Beispiel Strahlzeit, Strahlenergie, Strahlkorngrößenverteilung) sollen die eingebrachten Eigenspannungen der gestrahlten Bauteile durch Referenzproben, wie Almen-Teststreifen, sichergestellt werden.

Außer den Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Herstellung von Schmiedestücken ist aber auch die Qualitätsüberwachung bei der Bearbeitung oder der weiteren Behandlung der Bauteile von entscheidender Bedeutung. So sollten Dreh-, Schleif- oder Polieroperationen einer gezielten statistischen Prozeßregelung unterworfen sein. Dabei ist aber nicht nur beispielsweise die Oberflächenrauheit zu prüfen, sondern es sollten auch die eigenspannungsbestimmenden Prozeßparameter wie Vorschub, Spantiefe und Werkzeugverschleiß mit einbezogen werden. Ebenso müssen bei einer Oberflächenbehandlung wie Induktivhärten, Rollen oder Nitrieren die Prozeßparameter festgeschrieben und überwacht werden.

4 Schlußfolgerungen

Bei der Festigkeitsbeurteilung von geschmiedeten Bauteilen anhand der in der Literatur vorhandenen Kennwerte ist es

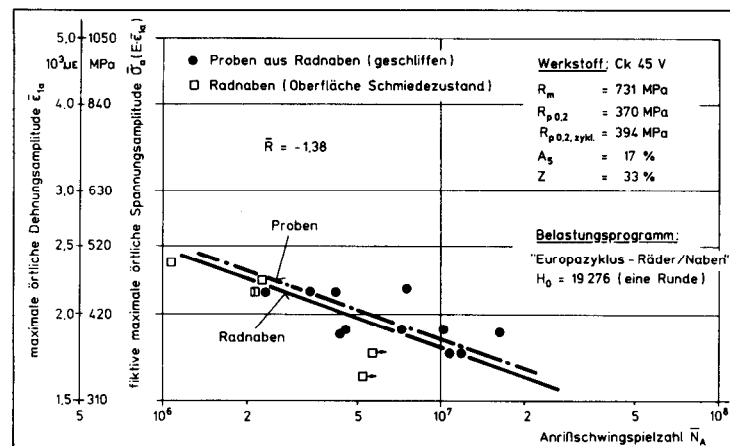


Bild 11. Betriebsfestigkeitsversuche an Radnaben und entnommenen Flachproben.

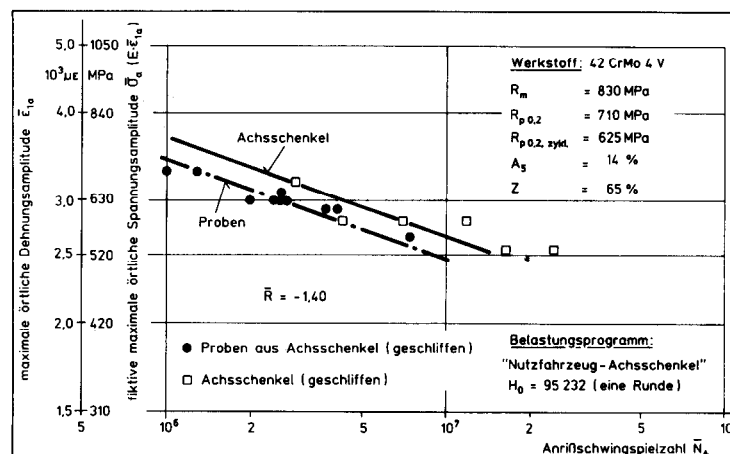


Bild 12. Betriebsfestigkeitsversuche an Achsschenkeln und entnommenen Flachproben.

unbedingt erforderlich, die Einflüsse der Fertigung in Abhängigkeit von den im Betriebseinsatz auftretenden Beanspruchungen zu berücksichtigen. Der Oberflächenzustand, die erreichbaren technologischen Eigenschaften in den hochbeanspruchten Bereichen sowie die Art der Betriebsbelastung sind dabei von maßgebender Bedeutung, sowohl für die Auswahl des Werkstoffs als auch zur Ableitung der zulässigen Beanspruchung. Nur durch eine sinnvolle Abstimmung und zutreffende Bewertung aller maßgebenden Parameter für die zu erreichende Schwingfestigkeit unter Einbeziehung zutreffender Qualitätssicherungsmaßnahmen kann eine optimale technische und wirtschaftliche Lösung gewährleistet werden.

Zusammenfassend lassen sich folgende Schlußfolgerungen ziehen:

- Die Betriebsfestigkeit von Bauteilen kann beträchtlich niedriger sein als die an bearbeiteten und unbearbeiteten Proben ermittelte. Der Hauptgrund dafür sind die durch konstruktive Formgebung und Fertigung entstehenden Unterschiede der Schwingfestigkeitseigenschaften und Eigenspannungszustände zwischen dem Bauteil und den Versuchsproben.
- Der mögliche Unterschied hängt stark von der Art der Betriebsbelastung ab. Die größten Unterschiede zwischen bearbeiteten Proben und Bauteilen sind bei der Dauerfestigkeit zu verzeichnen, wobei die Minderung im Extremfall bis etwa 40% betragen kann. Dagegen ist die Minde-

— rung der Zeit- oder Betriebsfestigkeit erheblich geringer und kann bis etwa 20% betragen.

- Die durch die konstruktive Formgebung sich ergebende Spannungskonzentration verringert die Schwingfestigkeit von geschmiedeten Bauteilen um so mehr, je höher die Werkstofffestigkeit ist. Deswegen ist es beim Einsatz hochfester Werkstoffe von großer Bedeutung, daß bei der Konstruktion und Fertigung scharfe Kerben vermieden werden.
- Durch die Rauheit der Oberfläche wird insbesondere die Dauerfestigkeit stark herabgesetzt (bis etwa 40%). Diese Minderung ist geringer bei der Zeit- und Betriebsfestigkeit.
- Eine beträchtliche Steigerung der Schwingfestigkeit von geschmiedeten Bauteilen kann durch eine Oberflächenbehandlung erzielt werden, vorausgesetzt, daß die höchste Anstrengung²⁾ an der Oberfläche oder im oberflächennahen Bereich liegt. Damit läßt sich auch der schwingfestigkeitsmindernde Einfluß einer unbehandelten Oberfläche insbesondere auf die Dauerfestigkeit kompensieren. Für die Oberflächenbehandlung eignen sich sowohl mechanische (Festwalzen, Strahlen, Hämmern) als auch thermische oder thermochemische (Induktionshärten, Flammhärten, Einsatzhärten, Nitrieren, Nitrocarburieren) Verfahren. Die Erhöhung der Schwingfestigkeit ist um so größer, je steiler der Spannungsgradient im kritischen Bereich ist, und bei mechanischen Nachbehandlungsverfahren, je höher die Werkstoffstreckgrenze ist. Grundsätzlich läßt sich durch diese Maßnahme, abhängig von Bauteilgestalt, Beanspruchungsverteilung, Beanspruchungskollektiv und Werkstoff, eine Erhöhung der Schwingfestigkeit von etwa 30% bis etwa 150% erzielen.
- Für die vergleichende Bewertung der Schwingfestigkeitswerte muß als Versagenskriterium der erste technische Anriß dienen, da die Bruchschwingungszahl bei den Untersuchungen stark von der Spannungsverteilung in der Rißausbreitungsebene abhängt und demzufolge von Proben auf Bauteile — oder zwischen unterschiedlich gestalteten und belasteten Bauteilen — nur mit Hilfe einer zutreffenden bruchmechanischen Betrachtung übertragbar ist.
- Für die Rißentstehung spielt die Größe der hochbeanspruchten Bereiche eine wichtige Rolle. Je größer dieser Bereich ist, um so größer ist die Wahrscheinlichkeit, daß eine Inhomogenität oder „schwächere“ Stelle erfaßt wird. Dadurch wird die Lebensdauer von Bauteilen mit großen beanspruchten Bereichen überwiegend an der unteren Grenze der mit Proben ermittelten Streuungen liegen.
- Für die Auswahl des Werkstoffs dürfen die möglichen seltenen extremen Belastungen nicht außer acht gelassen werden. Für die Sicherheitsteile, zum Beispiel eines Fahrzeugfahrwerks, können solche aus dem Mißbrauch entstehenden Überbeanspruchungen von entscheidender Bedeutung für das Versagen sein. Dabei gelten andere Kriterien als für eine Bewertung der Schwingfestigkeit, so daß eine Überprüfung der Überschreitung der Formdehngrenze oder sogar der Bauteilbruchfestigkeit in die Betrachtung einbezogen werden muß. Die hohe Werkstofffestigkeit und die Formgebung sind bei solchen Belastungen entscheidend.
- Der Qualitätssicherung während der Herstellung von Schmiedeteilen bei der spanenden Bearbeitung und der weiteren Behandlung der Bauteile kommt eine besondere Bedeutung zu, um die angestrebte Schwingfestigkeit sicherzustellen.

Literatur

- [1] Hora, P.: Einfluß der Oberfläche des Schmiedeteils auf die Dauerschwingfestigkeit am Beispiel Pleuelstange und Lenkhebel. In: VDI-Berichte Nr. 774, S. 269–274. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1989.
- [2] Ostermann, H.; Grubisic, V.: Einfluß des Werkstoffes auf die ertragbare Schwingbeanspruchung. In: Verhalten von Stahl bei schwingender Beanspruchung. Kontaktstudium Werkstoffkunde, Eisen und Stahl III. Hrsg.: Verein Deutscher Eisenhüttenleute, Düsseldorf, 1979, S. 243–260.
- [3] Siebel, E.; Gaier, M.: Untersuchungen über den Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit auf die Dauerschwingfestigkeit metallischer Bauteile. VDI-Z. 98 (1956), S. 1751–1774.
- [4] Wellinger, K.; Gimmel, P.: Einfluß der Oberflächenbeschaffenheit auf die Biegewechselfestigkeit. Metalloberfläche, Ausgabe A 6 (1952), Nr. 1, S. A4–A9.
- [5] Hertel, H.: Ermüdungsfestigkeit von Konstruktionen. New York/Heidelberg/Berlin: Springer-Verlag, 1969; S. 263–273.
- [6] Sonsino, C. M.; Kaufmann, H.: Einflüsse auf die Schwingfestigkeit von Gesenkschmiedeteilen. Konstruktions-, fertigungs- und werkstoffabhängige Parameter. VDI-Z. 133 (1991), Nr. 4, S. 131–143.
- [7] Kloos, K. H.; Kaiser, B.; Oppermann, Th.: Erhöhung der Schwingfestigkeit durch eine definierte Strahlbehandlung. Schlußbericht des AIF-Forschungsvorhabens Nr. 5997. Institut für Werkstoffkunde, TH Darmstadt, 1988.
- [8] Golze, N.; Silberbach, G.; Doege, E.: Einfluß der Oberflächenbehandlung auf die Schwingfestigkeit von Stahl unter Berücksichtigung vereinfachter Wärmebehandlungen. Schlußbericht des AIF-Forschungsvorhabens Nr. 5225. Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen, Universität Hannover, 1987.
- [9] Schmidek, B.; Klemz, R.: Einfluß der Gratnaht auf die Eigenschaften von Gesenkschmiedestücken. VDI-Z. 123 (1981), Nr. 5, S. 159–163.
- [10] Engelmohr, F.; Fiedler, B.: Erhöhung der Dauerfestigkeit geschmiedeter Pleuel durch Kugelstrahlen unter Vorspannung. Mat.-wiss. u. Werkstofftechnik 22 (1991), S. 211–216.
- [11] Fischer, G.; Grubisic, V.; Sonsino, C. M.: Das Bruchverhalten von Fahrwerkskomponenten. Materialprüfung 34 (1992), Nr. 3, S. 55–57, Nr. 4, S. 91–93.
- [12] Herberich, R.; Schlemper, C.-A.; Heinritz, M.: Gestaltoptimierung geschmiedeter Bauteile — dargestellt an einer Lkw-Vorderachse. ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 88 (1986), Nr. 6, S. 373–378.
- [13] Grubisic, V.; Neugebauer, J.; Schröder, W.: Vorgehen zur Bemessung und Gewichtsoptimierung von Nutzfahrzeug-Vorderachsen. Automobil-Industrie 34 (1989), Nr. 6, S. 793–799.
- [14] Buxbaum, O.: Betriebsfestigkeit. Düsseldorf: Verlag Stahleisen, 1986; S. 221–224.
- [15] Grubisic, V.; Fischer, G.: Gewichtsoptimierung geschmiedeter Radnaben für Nutzfahrzeuge. Automobil-Industrie 29 (1984), Nr. 4, S. 457–464.
- [16] Grubisic, V.; Fischer, G.: Gestaltoptimierung eines Nutzfahrzeug-Achsenkells. VDI-Z. 131 (1985), Nr. 8, S. 111–115.
- [17] Grubisic, V.; Sonsino, C. M.: Festigkeit von Hochdruckbehältern für neuartige Fertigungsverfahren. LBF-Bericht Nr. FB-148 (1979), S. 51–53. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (LBF), Darmstadt.
- [18] Grubisic, V.; Rupp, A.: Zur Bemessung geschmiedeter Bauteile mit Hilfe des örtlichen Dehnungskonzeptes. Forschungsbericht des Fraunhofer-Instituts für Betriebsfestigkeit (LBF), Darmstadt (erscheint demnächst).
- [19] Bräuer, G.: Die Qualität von Schmiedeteilen sichern. VDI-Z. 132 (1990), Nr. 4, S. 125–128.
- [20] Ziemann, M.: Schriftliche Mitteilung vom 7. April 1992 über Qualitätssicherungsmaßnahmen bei Thyssen Umformtechnik GmbH, Remscheid.

Die Autoren

Prof. Dr.-Ing. Vatroslav Grubisic, Jahrgang 1933, studierte Maschinenbau an der TU Zagreb und erwarb das Diplom 1958. 1970 promovierte er an der TU München. Von 1960 bis 1961 war er Berechnungsingenieur in der AEG-Gasturbinenfabrik in Essen. Seit 1961 ist er im Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (LBF) in Darmstadt tätig, bis 1970 als wissenschaftlicher Mitarbeiter und seit 1970 als Abteilungsleiter der Abteilung „Spannungsanalyse und Festigkeitsbeurteilung“. Seit 1990 hält er als Hochschullehrer Vorlesungen über „Betriebsfestigkeit von Konstruktionen und Systemen“ an der Universität Split.

Dr.-Ing. Cetin Morris Sonsino, Jahrgang 1946, studierte Maschinenbau an der TH Darmstadt. Seit 1973 ist er am Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (LBF) in Darmstadt tätig, seit 1985 als Leiter der Abteilung „Bauteilgebundenes Werkstoffverhalten“. 1981 Promotion auf dem Gebiet der Kaltverformung. Erhielt 1986 den erstmals verliehenen Ehrenpreis der Europäischen Föderation für Pulvermetallurgie als einer der beiden Projektleiter einer internationalen Gemeinschaftsarbeit zur Schwingfestigkeit von Sinterstählen. Seit 1990 hält er an der Universität Saarbrücken als Lehrbeauftragter eine Vorlesung über „Bauteilgebundenes Werkstoffverhalten unter Schwingbeanspruchungen mit konstanten und veränderlichen Amplituden — Betriebsfestigkeit“.