

Info-Reihe Massivumformung, Extraausgabe

*Leichtbau
durch Massivumformung*



**Info
EXTRA**

Leichtbau

**durch
Massivumformung**

Herausgeber:

Infostelle Industrieverband Massivumformung e. V.

Telefon: +49 (0) 23 31 / 95 88 28

Telefax: +49 (0) 23 31 / 95 87 28

Internet: www.metalform.de

E-Mail: orders@metalform.de

Goldene Pforte 1

58093 Hagen, Deutschland

Impressum

Manuskript: Dr.-Ing. Hans-Willi Raedt

Bilder: Hirschvogel Automotive Group

Redaktion: **Infostelle** Industrieverband Massivumformung e. V.

Verantwortlich für die Gesamtherstellung: Ing. Werner W. Adlof
Infostelle Industrieverband Massivumformung e. V.

Titelbild: Hirschvogel Automotive Group

Layout und Satz: Grafik Design Peter Kanthak, Arnsberg-Neheim

Druckschriften-Nr.: EI-LB-0604-30DOM

Ausgabe: Juni 2004

ISBN: 3-928726-20-X

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die der Übersetzung und der Vervielfältigung, vorbehalten. Auszugsweise Wiedergabe des Inhalts nur nach Rückfrage bei der **Infostelle** Industrieverband Massivumformung e. V. mit Quellenangabe gestattet.

Printed in Germany

Den Veröffentlichungen der **Infostelle** Industrieverband Massivumformung e. V. liegen die Ergebnisse der Gemeinschaftsforschung der im Industrieverband Massivumformung e. V. zusammen geschlossenen Industrierwerke zu Grunde.

In dieser Druckschrift werden die Potenziale der Massivumformung für gewichtsoptimale Bauteile beschrieben. Das optimale massivumgeformte Leichtbau-Werkstück erfordert, dass die Gestaltung, die Werkstoffauswahl und die Fertigung in engster Verzahnung aufeinander abgestimmt sind. Dafür ist es notwendig, schon in frühen Konstruktionsphasen den Zulieferer mit in den Produktentstehungsprozess einzubinden.

Leichtbau durch Massivumformung

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die überarbeitete Fassung eines Vortrags, den der Autor, Dr.-Ing. Hans-Willi Raedt am 24. September 2003 anlässlich der von der **Infostelle** Industrieverband Massivumformung e. V., Hagen gemeinsam mit der VDI-Gesellschaft Produktionstechnik, Düsseldorf veranstalteten Tagung „Massivumformung heute: Produkte • Partner • Perspektiven“ in Kassel gehalten hat.

Inhalt

	Seite
Leichtbau im Automobil	7
Konstruktiver Leichtbau	9
Topologieoptimierung	9
Gestaltoptimierung	10
Stofflicher Leichtbau mit massivumgeformten Bauteilen	11
Anforderungen an Werkstoffe	11
Stand der Technik	12
Neuere Entwicklungen für den stofflichen Leichtbau	14
Fertigungstechnische Leichtbaumaßnahmen	16
Beanspruchungsgerechte Auslegung des Faserverlaufs	16
Mechanische Oberflächenbehandlung	17
Thermische und/oder chemische Oberflächenbehandlung	18
Kombinationen von Oberflächenbehandlungsverfahren	19
Zusammenfassung und Ausblick	20
Literaturverzeichnis	21

Leichtbau im Automobil

Der Leichtbau wird im Automobilbau seit langer Zeit diskutiert und inzwischen an vielen Stellen angewendet. Treibende Faktoren für den Leichtbau sind einerseits der Wunsch nach der Gewichtsreduzierung einzelner Komponenten und Systeme, um das Gesamtgewicht des Fahrzeugs zu reduzieren [1], oder um bei steigendem Ausstattungsumfang das Gewicht des Fahrzeugs nicht zu stark ansteigen zu lassen. Eine möglichst geringe Masse führt einerseits zu reduziertem Treibstoffverbrauch und zu besserer Fahrdynamik. Andererseits kann durch die Reduktion der ungefederten Massen in bestimmten Bereichen des Fahrzeugs der Fahrkomfort deutlich gesteigert werden.

Leichtbau kann durch mehrere Stoßrichtungen erreicht werden, die jeweils miteinander verknüpft sein sollten: Stofflicher und konstruktiver Leichtbau. Beim stofflichen Leichtbau wird auf der Basis der auftretenden Belastungen ein Werkstoff ausgewählt, der diesen Belastungen besser widerstehen kann. Damit kann an einigen Stellen Werkstoff und damit Masse eingespart werden, indem z.B. der tragende Querschnitt verringert wird. Alternativ soll beim stofflichen Leichtbau durch den Einsatz eines Werkstoffs mit reduzierter Dichte die Masse des Bauteils sinken. Beim konstruktiven Leichtbau wird die Topologie oder die Feingestalt des



Hohe
wechselnde
Bauteil-
belastung

Fahrdynamik

Ressourcenschonung

Fahrkomfort

Bild 1: Leichtbau und seine Randbedingungen im Automobilbau

Bauteils angepasst. Durch Wegnahme von unbelasteten Werkstoffbereichen kann die Masse wesentlich verringert werden, ohne die Funktion des Werkstücks zu beeinträchtigen. Durch die geringfügige Änderung geometrischer Details von hochbelasteten Bereichen des Werkstücks können lokale Überlasten reduziert werden und auch hier Werkstoff eingespart werden. Dies wird im Folgenden noch im Detail dargestellt.

Basis jeder Leichtbauanstrengung ist die Analyse der Bauteilbelastung im Betrieb und der zu erfüllenden Funktion.

Anbindungspunkte: Zum einen besteht die Funktionserfüllung darin, die Anbindungspunkte zu erreichen, aber auch den gegebenen Bauraum nicht zu überschreiten. Zusätzliche Anforderungen können in der Abdicht-

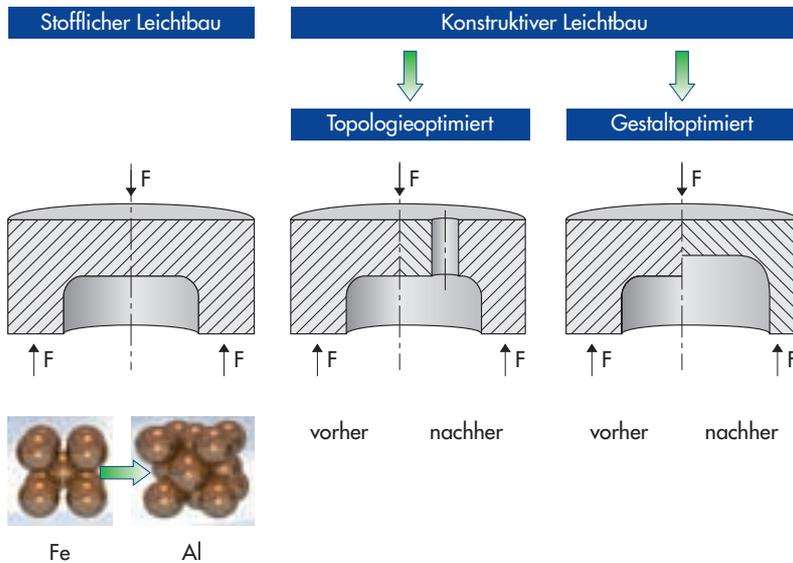


Bild 2: Formen des Leichtbaus

funktion einiger Bauteile liegen. Dies führt dazu, dass Werkstoff an Stellen vorgehalten werden muss, wo aus der Sicht der Belastung eine Lochung denkbar wäre, z. B. in der Mitte eines Dreilochflanschs, der neben der Drehmomentübertragung aber den Innenraum einer Welle abdichten soll.

Steifigkeit: Des Weiteren werden an ein Bauteil Forderungen bezüglich der Elastizität gestellt. Unter den gegebenen Lasten darf eine maximale elastische Verformung nicht überschritten werden. Zur optimalen Funktionserfüllung kann hier einerseits stofflicher Leichtbau betrieben werden, indem ein Werkstoff mit ho-

hem E-Modul ausgewählt wird. Der konstruktive Leichtbau konzentriert sich bei dieser Problemstellung darauf, unter den gegebenen Randbedingungen ein möglichst hohes Widerstandsmoment zu erzeugen.

Festigkeit: Eine weitere Forderung ist die Erfüllung der Sicherheit gegen plastische Überlastung des Bauteils. Bleibende Verformung durch Betriebslasten sind an Bauteilen des Automobilbaus außer im Missbrauchfall nicht zulässig. Hier bieten wiederum stofflicher und konstruktiver Leichtbau einen Ansatzpunkt: Einerseits kann ein Werkstoff mit hoher Streckgrenze gewählt werden, an-

dererseits kann durch eine optimale Gestaltung die lokale Überlastung von Werkstoffbereichen minimiert werden. Grenzen sind dem stofflichen Leichtbau dadurch gesetzt, dass der schwingenden Betriebsbelastung durch eine einfache Erhöhung der Streckgrenze ab einem bestimmten Niveau, je nach Geometrie, kein zusätzlicher Widerstand geboten werden kann. Dies gilt besonders bei gekerbten Bauteilen [2]. In einigen Fällen ist es möglich, dass die Erfüllung der Forderungen an die elastischen Eigenschaften des Bauteils oder an die Überlastbeständigkeit aber auch schon die Betriebsfestigkeit gewährleistet [3].

Die Hertzische Belastung muss auch als Festigkeitsproblem betrachtet werden. Diese kann nach dem derzeitigen Stand der Technik die Substitution eines geeigneten Stahlwerkstoffs durch einen anderen Werkstoff unmöglich machen. Hier könnten sich Kombinationsbauteile ergeben, die im Volumen mit Leichtmetallen realisiert werden und an den wälzbelasteten Flächen gefügte Stahlwerkstoffe aufweisen.

Es wird deutlich, dass den gegebenen Anforderungen am besten mit einer sinnvollen Kombination von Leichtbaumaßnahmen begegnet wird, um ein technisch optimales und wirtschaftliches Bauteil zu erzeugen. Es wird aber ebenso deutlich, dass das gewichtsoptimale Bauteil nicht immer mit Leichtmetallen zu realisieren ist. Für viele Anwendungen stellt Stahl den geeigneten Werkstoff dar, und dies nicht nur aufgrund des Widerstands bei Hertzscher Belastung.

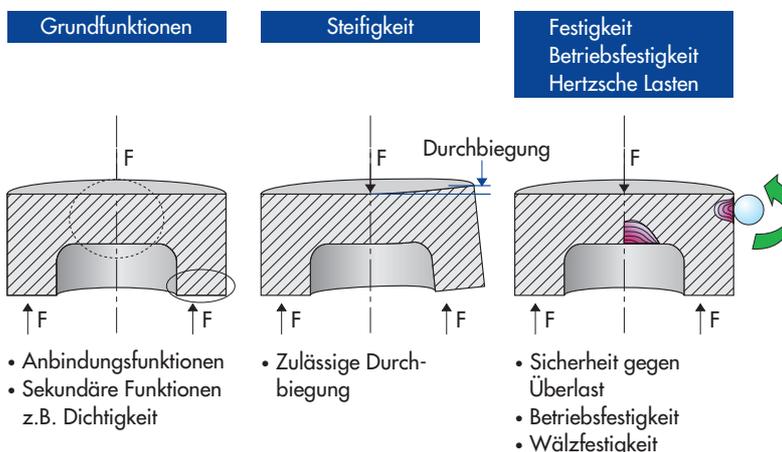


Bild 3: Forderungen an Bauteile

Konstruktiver Leichtbau

Der konstruktive Leichtbau setzt darauf, im Rahmen der gegebenen Randbedingungen die optimale Form des Bauteils zu finden. Dabei läuft die Geometriefindung am sinnvollsten in zwei Stufen ab: Topologie- und Gestaltoptimierung. Dieser Ablauf wird im Folgenden dargestellt.

Topologieoptimierung

Das Verfahren der rechnergestützten automatischen Topologieoptimierung wurde mit steigender Rechnerleistung möglich. Zu dem Zeitpunkt, als eine einzelne linear-elastische Bauteilberechnung mit genügender Diskretisierung in vergleichsweise kurzer Zeit möglich wurde, wurde es praktikabel, auch die automatische Topologieoptimierung durchzuführen, da diese zahlreiche einzelne Belastungsrechnungen erfordert. Als Ausgangspunkt der Optimierung wird ein Bauteil aus finiten Elementen aufgebaut, welches die Anbindungsbedingungen erfüllt und den möglichen Bauraum weitgehend ausfüllt (Bild 4). In den folgenden Optimierungsschleifen wird das Bauteil sukzessive mit den vorgeschriebenen Belastungen beaufschlagt und die daraus resultierende Spannungsverteilung in einer FEM-Simulation berechnet. In den Bauteilbereichen, in denen nur geringe Spannungen herrschen, werden dann die Elemente für die folgende Berechnung deaktiviert. Diese Vorgehensweise wird wiederholt, bis eine gleichmäßige Spannungsverteilung über große Teile des Werkstückvolumens erreicht wird: Der im Bauteil noch vorhandene Werkstoff wird an allen Stellen optimal ausge-

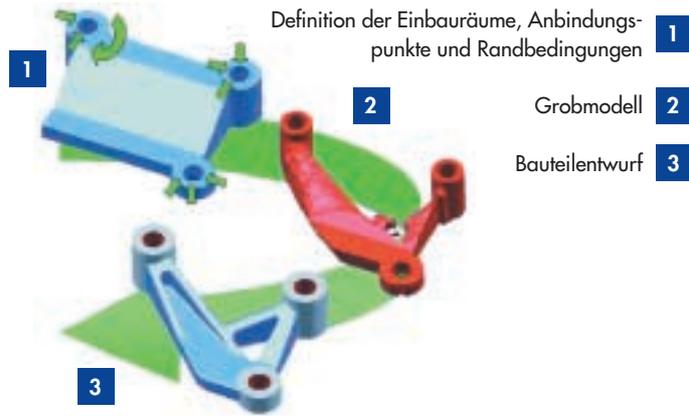


Bild 4: Schematischer Ablauf einer Topologieoptimierung eines Bauteils

nutzt. In den modernen Topologieoptimierungsprogrammen ist es inzwischen möglich, auch fertigungstechnische Randbedingungen berücksichtigen zu lassen. So können im Programm Ausstoßschrägen vorgesehen werden und Hinterschneidungen, die sich schmiedetechnisch nicht darstellen lassen, werden vermieden.

Das so berechnete Finite Elemente Modell muss für die weitere Bearbeitung dann in ein CAD-Modell zurückgeführt werden. Dabei kann der Schmiedekonstrukteur weitere

fertigungstechnische Details berücksichtigen (Stegbreiten, Radien). Die für die CAM-Kette notwendige geschlossene Volumenbeschreibung im Gegensatz zur Modellierung des Berechnungsmodells mit finiten Elementen wird in diesem Schritt auch wieder erzeugt.

Der Ablauf einer Topologieoptimierung an einem konkreten Serienbauteil ist in Bild 5 dargestellt. Der anfängliche Entwurf berücksichtigte im Wesentlichen nur die rein funktionalen Aspekte. Mit Hilfe der Topologieoptimierung wurde vor

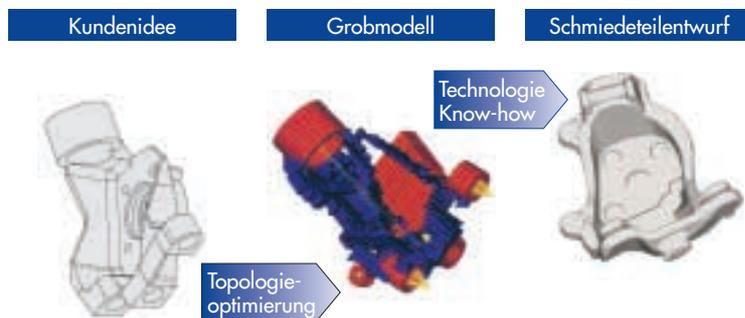


Bild 5: Durchführung einer Topologieoptimierung an einem Aluminiumradträger

allem gezeigt, dass das im Bild oben liegende Anbindungselement auch auf der rechten Seite durch einen Steg angebunden werden musste. Einige fertigungstechnische Notwendigkeiten wurden aber durch die hier dargestellte Topologieoptimierung noch nicht hinreichend berücksichtigt. Erst der erfahrene Schmiedekonstrukteur entwickelte aus diesem Bauteil ein fertigbares Aluminium-Warmschmiedeteil.

Gestaltoptimierung

Das durch die Konstruktion auf Basis der topologieoptimierten Geometrie gewonnene Modell weist noch einige Verbesserungsmöglichkeiten auf. So ist zwar der Werkstoff weitgehend optimal im Bauteil verteilt, aber bestimmte Geometrieelemente können noch mit Sicht auf die lokal entstehenden Spannungsverläufe hin gestaltet werden. Dabei lassen sich wesentliche Verringerungen der Spannungswerte erzielen [4, 5]. Einige CAD-Systeme bieten inzwischen automatische Gestaltoptimierungen auf Basis parametrisch aufgebauter Modelle. Die optimale Lösung hängt aber sehr stark von dem durch die Parameter erreichbaren Lösungsraum ab. Auch eine Gestaltoptimierung in einigen iterativen manuellen Schritten kann deshalb die Bauteilqualität schon entscheidend verbessern.

Die Mindestforderung der Gestaltoptimierung ist, dass werkstofflich gegebene Maximalspannungen nicht überschritten werden und dass elastische Bauteilverformungen innerhalb der Grenzen sind. Der grundsätzliche Aufbau einer solchen

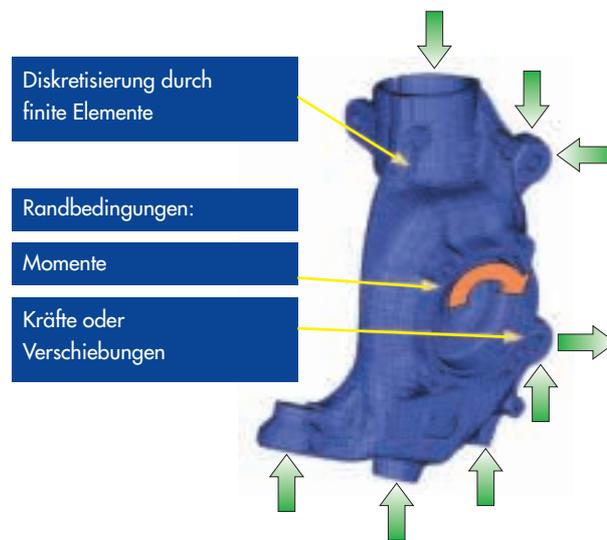


Bild 6: Aufbau einer FEM-Rechnung zur Kontrolle der Bauteileigenschaften und als Basis für eine Gestaltoptimierung

Rechnung ist in Bild 6 dargestellt. Das Bauteil wird mit finiten Elementen diskretisiert und als Randbedingungen werden die vorgegebenen Lasten aufgegeben.

Das Ergebnis einer solchen Berechnung ist in Bild 7 gezeigt. Sämtliche Dehnungs- und Spannungs-

werte sind zur Auswertung verfügbar. Fortgeschrittene Optimierungsansätze verwenden Konzepte der Betriebsfestigkeit [6], um eine Bauteilgestalt zu erzielen, die unter den wechselnden Lasten im tatsächlichen Betrieb die erforderliche Lebensdauer erreichen.

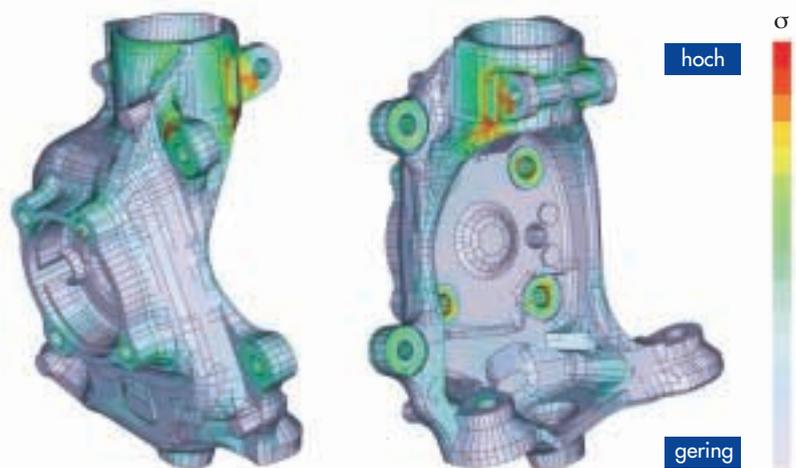


Bild 7: Ergebnis einer linearelastischen Spannungs- und Verformungsberechnung

Stofflicher Leichtbau mit massivumgeformten Bauteilen

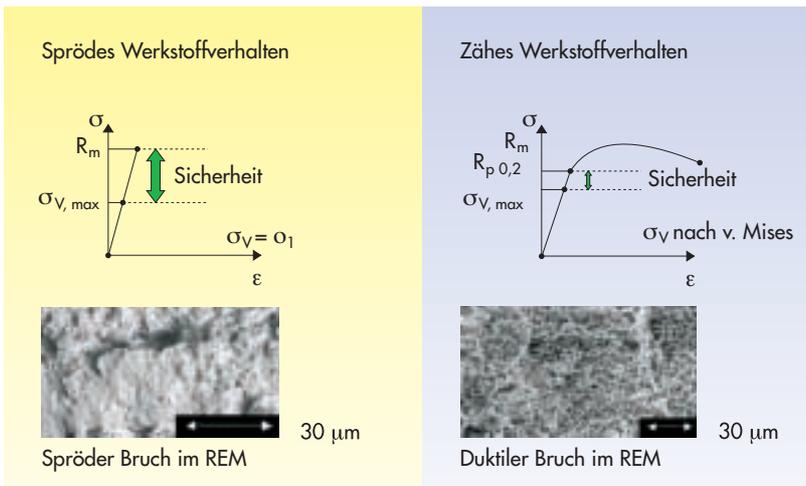


Bild 8: Sicherheiten bei Bauteilauslegung in Abhängigkeit des Zähigkeitsverhaltens

Anforderungen an Werkstoffe

Bauteile werden auf Steifigkeit sowie auf statische Festigkeit und/oder wechselnde Belastung, je nach Einsatzfall, ausgelegt. Wie im Abschnitt „Leichtbau im Automobil“ schon ausgeführt, muss dabei die Werkstoffauswahl in geeigneter Weise zusammen mit der Bauteilgestalt gesehen werden. Werden bestimmte Randbedingungen des Bauteils (Masse, Bau- raum, Fertigungsmöglichkeiten, ...) überschritten, kann die Änderung der

Werkstoffeigenschaften zum Erreichen des gewünschten Ergebnisses führen.

Der E-Modul eines Werkstoffs ist in der Regel invariant gegenüber kleineren Veränderungen des Legierungs- gehalts. Erst größere Zugaben eines Legierungselements, z. B. Aluminium in Stahl [7] oder Lithium in Aluminium- Legierungen [8] verändern den E- Modul wesentlich. Diese Legierungs- techniken werden aber bisher aus Kosten- und Recyclinggründen nicht im Automobilbau eingesetzt.

Die Beeinflussung der Festigkeit ist durch legierungstechnische Maß- nahmen mit angepasster Wärmebe- handlung allerdings deutlich wirksa- mer. Die Erhöhung der Festigkeit muss aber immer im Zusammenhang mit der Zähigkeit des Werkstoffs gesehen werden. Für die Sicherheits- nachweise bei statischer Beanspru- chung gilt: Je spröder der Werkstoff, desto größer muss der Sicherheits- faktor sein, mit dem die auftretende Belastung gegen die Belastbarkeit des Werkstoffs abgesichert wird [9]. Dabei werden spröde Werkstoffe ge- gen die Zugfestigkeit R_m ausgelegt, wobei die maximale Hauptspannung σ_{max} die Belastung im Werkstück be- schreibt. Bei zähen Werkstoffen cha- rakterisiert die Dehngrenze $R_{p0,2}$ die Belastbarkeit des Werkstoffs. Dabei wird die Vergleichsspannung aus der Gestaltänderungsenergiehypothese berechnet. Bei gleicher Zugfestigkeit R_m kann also für einen zäheren Werk- stoff eine höhere Belastung zuge- lassen werden.

Bei Bauteilen, die mit Kerben behaftet sind, muss bei Steigerung der Werkstofffestigkeit bei der stati- schen Auslegung noch ein weiterer Aspekt beachtet werden. Dies wird am Zugversuch gezeigt, der aus ver- gütetem C45 hergestellt wird (Bild 9). Durch abgestufte Anlasstempera- turen werden Härten von 200 HV 10 bis ca. 700 HV 10 eingestellt. Der Zug- versuch liefert als Ergebnisse die Zug- festigkeit R_m , die Dehngrenze $R_{p0,2}$, sowie die Bruchdehnung A_5 und die Brucheinschnürung Z . Während beim ungekerbten Zugstab die Dehngrenze und die Zugfestigkeit mit steigender Härte ansteigen, wobei die Zähig-

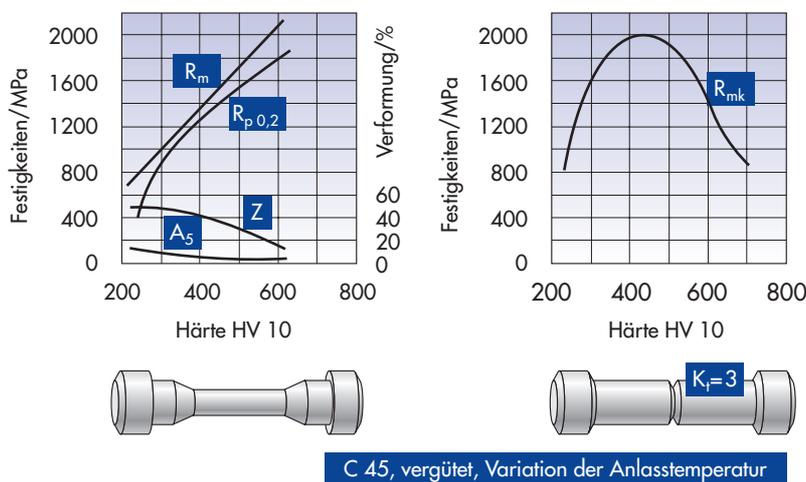


Bild 9: Einfluss von Kerben auf das Festigkeitsverhalten unter Last

(Quelle: Issler, Ruoff, Häfele)

keitskennwerte abnehmen, zeigt sich beim gekerbten Zugstab ein deutlich unterschiedliches Verhalten. Hier zeigt sich, dass die Kerbzugfestigkeit für die Härte 450 HV 10 ein Maximum annimmt, danach aber mit steigender Härte des Werkstoffs wieder abnimmt [9]. Mit steigender Härte versagt der Zugstab spröde und kann der Belastung insgesamt weniger Widerstand entgegensetzen. Im Kerbgrund wirkt einerseits eine Spannungsüberhöhung, die den Werkstoff stärker belastet. Zudem wird aus dem einachsigen Spannungszustand des glatten Zugstabs ein dreiachsiger, im Zugspannungsbereich liegender Spannungszustand, der zusätzlich zu einer Werkstoffversprödung beiträgt. Bei Steigerung der Festigkeit von Werkstoffen muss also die konstruktive Gestaltung immer sorgfältiger durchgeführt werden, um die werkstofftechnischen Weiterentwicklungen auch optimal auszunutzen.

Bei einer schwingenden Belastung gelten im Grundsatz die gleichen Zusammenhänge.

Während an einem ungekerbten Zugstab aus Stahlwerkstoffen die Zug-Druckwechselfestigkeit weitgehend proportional mit der Festigkeit ansteigt, ist die Steigung der Wechselfestigkeit bei gekerbten Proben deutlich kleiner (Bild 10) [9]. Bei der Problematik der kerbarmen Gestaltung hilft ein Umstand der umformenden Fer-

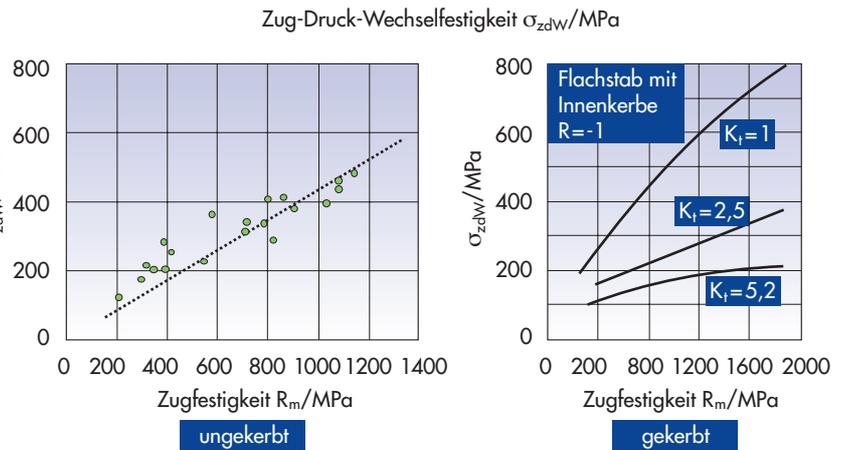


Bild 10: Wechselfestigkeitsverhalten von Stählen ohne und mit Kerben

(Quelle: Issler, Ruoff, Häfele)

tigung, der oft als fertigungstechnische Einschränkung wahrgenommen wird, aber tatsächlich, vermutlich oft unbewusst, zum besseren Bauteil führt: Scharfe Ecken verbieten sich bei umformend hergestellten Bauteilen aufgrund der im Umformvorgang auftretenden Probleme. Konvexe Kanten an Bauteilen führen während des Umformvorgangs zu hoher Kerbwirkung im Werkzeug, die zu geringer Werkzeugstandzeit führt. Konkave Ecken (= Kerben) im Werkstück führen im Umformwerkzeug entweder zu hohen Kantenbelastungen und Ausbrüchen, oder zu hohen abrasiven Verschleißvorgängen. Eine gute Auslegung der Bauteilgestalt aus Sicht der Umformwerkzeuge führt also, sofern dem Umformbetrieb diese Gestaltungsfreiheit eingeräumt wird, zu einem Bauteil, in dem lokale Werkstoffüberlastungen in den umformtechnisch hergestellten Geometrieelementen weitgehend vermieden werden.

Eine Reihe weiterer Faktoren trägt, je nach Ausprägung, zusätzlich zur Bauteilgestalt in ähnlicher negativer Weise zur Dauerfestigkeit bei. Zu diesen gehören der Eigenspannungs-

zustand, die Oberflächenqualität (Zustand, Rauheit) und der Umgebungseinfluss. Diese Einflüsse können sich, wenn sie in ungünstiger Kombination auftreten, in einer Weise so aufaddieren, dass eine Festigkeitssteigerung des Werkstoffs sogar zu einer Verringerung der Wechselfestigkeit führt (vgl. Bild 9). Trotzdem steckt in der Festigkeitssteigerung ein wesentliches Optimierungspotential. Aus diesem Grund sollen auf Basis der aktuellen Lösungen die werkstofftechnischen Entwicklungen, die zu höherer Festigkeit führen, im Folgenden aufgezeigt werden.

Stand der Technik

Bei Schmiedeteilen aus Stahlwerkstoffen für den Automobilbau haben sich auf breiter Front die mikrolegierten, ausscheidungshärtenden ferritisch-perlitischen (AFP) Stähle durchgesetzt. Der Grund dafür liegt zum Teil in den günstigen Kosten, da diese Stähle direkt aus der Schmiedehitze durch eine gesteuerte Abkühlung ihre finalen Werkstoffeigenschaften erhalten. Je nach verwendeter Legierung werden Zugfestigkeiten

von 600 MPa (19MnVS6) bis 1050 MPa (46MnVS6) erreicht [2,10]. Im Zugfestigkeitsbereich um 900 MPa entspricht dies einer Streckgrenze von 600 MPa bis 650 MPa. Eine Warmbehandlung, wie sie bei Vergütungsstählen in Form des Härstens und nachfolgenden Anlassens durchgeführt wird, ist nicht notwendig. Voraussetzung für die breite Substitution der Vergütungsstähle war aber, dass die durch die AFP-Stähle erreichbaren Dehngrenzen-, Zugfestigkeits- und Zähigkeitskennwerte (Bruchdehnung, Einschnürung) den Anforderungen genügten oder diese sogar übertrafen [2]. Trotzdem werden des Weiteren in einigen Anwendungen Vergütungsstähle eingesetzt.

Der Einsatz von Aluminiumwerkstoffen umfasst ausscheidungshärtende Legierungen, wie z.B. EN AW-6082/ AlSi1MgMn (früher: AlMgSi1), bei denen eine mittlere Festigkeit mit guter Duktilität und Korrosionsbeständigkeit verbunden ist. Nach dem Schmieden bei Temperaturen über

der Rekristallisationstemperatur werden diese Legierungen lösungsgeglüht und in einer nachfolgenden Auslagerungsbehandlung auf die Einsatzfestigkeit eingestellt. Der Einsatz von geschmiedeten Magnesiumwerkstoffen wird im Automobilbau derzeit intensiv diskutiert [11]. Serienanwendungen sind bisher aber nicht bekannt.

Bild 11 vergleicht verschiedene Werkstoffe im Hinblick auf ihr Leichtbaupotential. Gewicht und Preis sind dabei jeweils auf den Werkstoff C45V bezogen. Die Werkstoffe werden am Beispiel eines Zugstabs verglichen, der mit gleicher Last beaufschlagt einerseits auf gleiche elastische Dehnung, andererseits auf Fließbeginn ausgelegt wird. Der Durchmesser des Datenpunkts gibt zusätzlich einen Vergleich der relativen Zugstabdurchmesser an.

Stahlwerkstoffe weisen eindeutig einen Vorteil bei elastischer Belastung auf. Preis und Gewicht zeigen hier die günstigsten Ergebnisse. Die anderen

Werkstoffe sind aber maximal 8% schwerer, bei allerdings deutlich höherem Preis und Bauraum. Bei der Festigkeit gibt sich ein anderes Bild: Während Stahlwerkstoffe hier vom Gewicht her mit Aluminium und einer weniger festen Magnesiumlegierung, bei niedrigeren Preisen, mithalten können, ist eine höherfeste Magnesiumlegierung oder eine Titanlegierung weniger schwer, allerdings bei höheren Preisen.

Umgeformte Bauteile stehen schon immer im Wettbewerb mit Bauteilen, die durch gusstechnische Verfahren hergestellt sind. Gegossene Bauteile spielen ihre Vorzüge aus, wenn besonders feingliedrige Konstruktionen zu realisieren sind, die sich aus geometrisch geforderten Randbedingungen ergeben: Dem Erreichen von Anbindungsfunktionen oder z. B. Dichtfunktionen. Das Dämpfungsverhalten von Gusswerkstoffen ist bei einigen Anwendungen vorteilhaft. Des Weiteren können sich, je nach Bauteil, Kostenvorteile bei

gegossenen Bauteilen ergeben. Diese sind aber offenbar wiederum in einigen Anwendungen nicht ausschlaggebend:

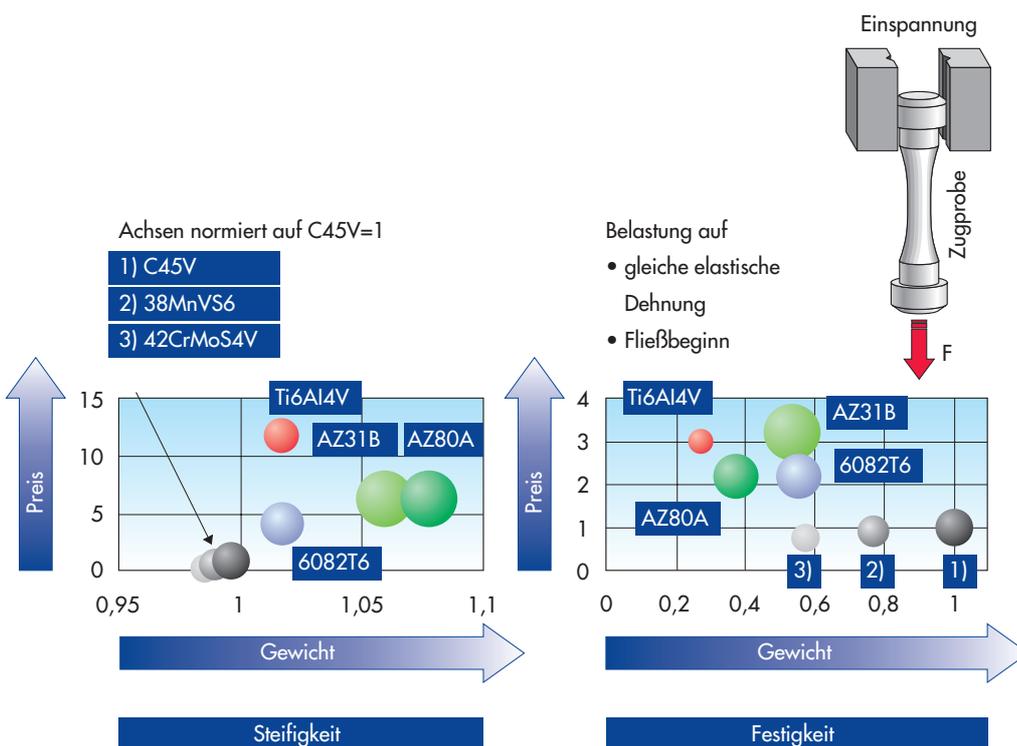


Bild 11: Vergleich von Werkstoffen im Hinblick auf Steifigkeit und Festigkeit

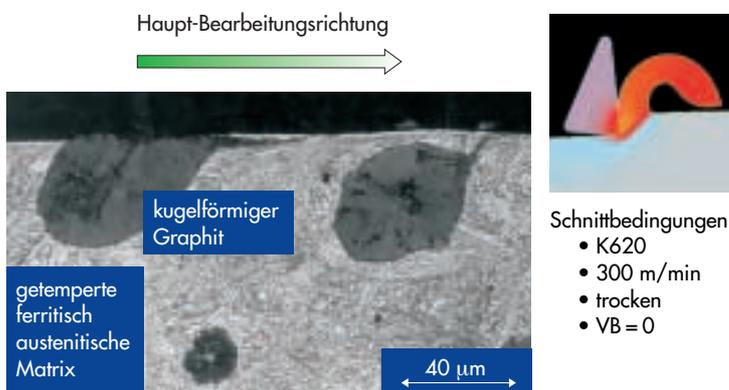


Bild 12: Gefügeaufnahme von bearbeitetem ADI-Gusswerkstoff
(Quelle: WZL, RWTH Aachen)

So kann immer schon bei höherwertigen Anwendungen ein klarer Trend hin zum umformtechnisch erzeugten Bauteil erkannt werden. Hier stehen offenbar die technischen Vorteile der Schmiedelösung im Vordergrund.

Für fortgeschrittene Leichtbauanwendungen eignen sich die Gusswerkstoffe nur sehr eingeschränkt. Aus zahlreichen Untersuchungen ist bekannt, dass die Schwingfestigkeit der Gusswerkstoffe in weitaus geringerem Maß mit der Zugfestigkeit des Werkstoffs steigt, als bei geschmiedeten Bauteilen [12]. Hier macht sich die „innere Kerbwirkung“ durch die

Grafiteinschlüsse bemerkbar. Dies gilt in nur leicht eingeschränktem Maße auch für neuere Entwicklungen, bei denen eine höhere Duktilität bei gesteigerter Festigkeit eingestellt wird [13], die aber auch eine aufwendigere, und damit verteuerte Wärmebehandlung gegenüber konventionellen Gusswerkstoffen erfordern. Erklärbar ist dies durch die Mikrostruktur dieses Werkstoffs (Bild 12).

Die perlitfreie Matrix erhält, bedingt durch die schnelle Abkühlung nach dem Austenitisieren, eine nadelige Ferritstruktur in einer austenitischen Grundmatrix, die durch

den hohen Kohlenstoffgehalt stabilisiert wird. Der hohe Kohlenstoffgehalt des Werkstoffs bildet sich beim Guss als Sphärolite aus, sofern die Magnesiumbehandlung und der Impfvorgang optimal abgelaufen sind. Die Graphitkugeln sind gleichmäßig im Werkstoff verteilt, und damit auch in den Bereichen, die bei der Fertigbearbeitung eine Spanabnahme erfahren vorhanden. Dabei werden die Graphitkugeln scharf abgeschnitten. An den Rändern bilden sich scharfe Überlappungen oder kerbartige Öffnungen zur Bauteiloberfläche hin, die sich durch jegliche weitere Oberflächenbehandlungen nicht mehr schließen lassen. Wenngleich also bei diesen Werkstoffen deutliche Verbesserungen der Werkstoffeigenschaften mit entsprechendem Aufwand erzielt wurden, so bleiben die fortgeschrittensten werkstofflichen Eigenschaften den umgeformten Werkstoffen vorbehalten.

Neuere Entwicklungen für den stofflichen Leichtbau

Verschiedenste Entwicklungen sind im Gange, sowohl bekannte Werkstoffkonzepte zu optimieren, als auch mit neuen Legierungs- und Verarbeitungsansätzen verbesserte Gebrauchseigenschaften der Werkstoffe einzustellen. Im Bereich der massivumgeformten Werkstoffe sind seit der Einführung der AFP-Stähle keine „revolutionären“ Entwicklungen umgesetzt worden, wie sie im Flachbereich beobachtet werden [14]. Dennoch sind eine Reihe von werkstofflichen Verbesserungen schon am Markt erhältlich, die im Folgenden diskutiert werden sollen.

Bei den AFP-Stählen werden durch bestimmte Entwicklungen inzwischen Dehngrenzen von 780 MPa erreicht, wobei Zugfestigkeiten um

1050 MPa gemessen werden. Dabei haben sich die Bruchdehnung und Brucheinschnürung nicht verschlechtert [15]. Nur die Kerbschlagarbeit weist gegenüber Vergütungsstählen einen geringeren Wert auf. Wie bei allen Stahlgüten führen Legierungen mit erhöhtem Reinheitsgrad zu höher belastbaren Werkstoffen, vor allem, wenn der Werkstoff schwingenden Belastungen im Zugbereich ausgesetzt ist. Völlig andere Werkstoffkonzepte setzen auf die Verfestigung durch Kaltumformung. Bei einem untersuchten Beispielumformgrad von 0,56 können lanzettmartensitische Werkstoffe Dehngrenzen von 1080 MPa und Zugfestigkeiten von 1100 MPa erreichen, wobei noch gute Zähigkeitskennwerte dargestellt werden [16]. Es sind zudem noch weit höhere Umformgrade realisierbar. Eine Problematik bei diesen Stählen könnte bauteilabhängig die hohe Werkzeugbelastung sein, die sich aus den hohen Fließspannungen dieser Stähle ergibt. Dies kann aber mit einer FEM-Prozesssimulation vorausberechnet werden, um die Herstellbarkeit zu überprüfen. Inwieweit sich aus den genannten gesteigerten Festigkeitskennwerten gesteigerte Wechselfestigkeiten, auch unter Kerbwirkung, ergeben, ist bisher noch nicht umfassend bekannt. Die hier genannten Entwicklungen erscheinen aus derzeitiger Sicht, sowohl von den Werkstoffkosten, als auch von der umform- und wärmebehandlungsseitigen Prozesskette als die mit dem höchsten Potential. Sicherlich sind noch weitere interessante Werkstoffkonzepte auf Stahlbasis in der Entwicklung oder schon im Angebot [17, 18].

Auch die Aluminiumlegierungen unterliegen ständigen Weiterentwicklungen. So weist die Legierung EN AW-6082 (AlSi1MgMn) nach Norm

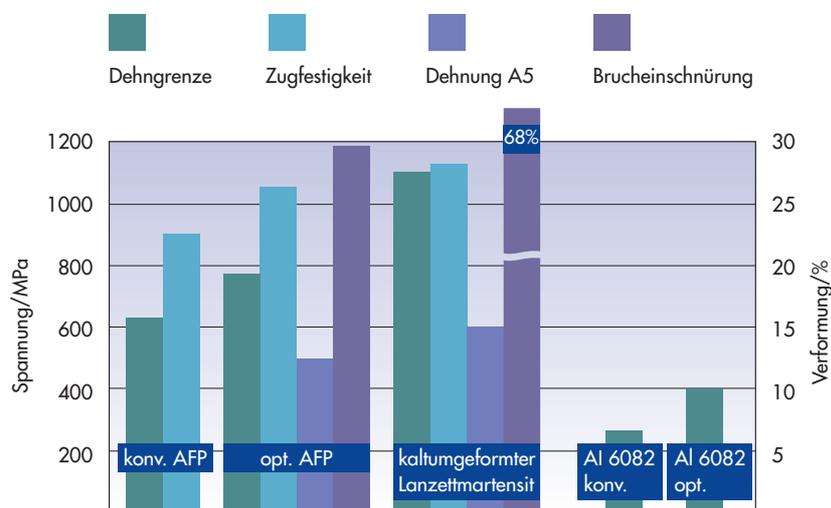


Bild 13: Weiterentwicklungen bei massivumgeformten Werkstoffen

eine Dehngrenze $R_{p0,2} \geq 260$ MPa bei einer Zugfestigkeit von $R_m \geq 310$ MPa auf. Eine bessere Abstimmung von Legierungslage, Umformtechnologie und der Prozessführung in der Wärmebehandlung verspricht eine Erhöhung der Dehngrenze $R_{p0,2}$ auf Werte um 400 MPa. Eine entsprechende Steigerung der Wechselfestigkeit wird mit der Erhöhung der Dehngrenze erwartet. Zudem kann durch geeignete Maßnahmen eine bessere Feinkörnigkeit des Werkstoffs garantiert werden [19, 20].

Magnesiumwerkstoffe werden derzeit intensiv diskutiert. Hier müssen aber für den Einsatz als massiv-

umgeformte Werkstoffe noch einige Vorarbeiten geleistet werden, die sie für den Einsatz im Automobilbau qualifizieren, während u. a. in der Luft- und Raumfahrttechnik einige Anwendungen existieren [21]. Hier geht es einerseits um Fragen der Verarbeitbarkeit [22], der erzielbaren Festigkeiten sowie der Erfüllung weiterer Randbedingungen, wie z. B. der Korrosionsfestigkeit. Andererseits muss geklärt werden, wie sich bei deutlich gesteigertem Werkstoffumsatz die Rohmaterialkosten entwickeln.

Fertigungstechnische Leichtbaumaßnahmen

Es ist Stand der Technik, dass umgeformte Bauteile im Vergleich zu anderweitig hergestellten Werkstücken hervorragende Werkstoffeigenschaften besitzen [12, 23]. Als Gründe dafür werden ein günstiger Eigenspannungszustand nach dem Reinigungsstrahlen, der beanspruchungsgerechte Faserverlauf, die absolute Porenfreiheit im Vergleich zu Gusswerkstoffen sowie das durch Umformung und dynamische oder statische Rekristallisation feinkörnige Gefüge angegeben (Bild 14). Diese Eigenschaften garantieren, dass die umformtechnisch verarbeiteten Werkstoffe höchste Belastungen mit großer Sicherheit ertragen können. Zukünftige Zielrichtungen für das optimale massivumgeformte Leichtbauteil sollten deshalb, neben der Berücksichtigung der in Abschnitt „Neuere Entwicklungen für den stofflichen Leichtbau“ genannten Tendenzen, die Möglichkeiten, die auch heute schon umgeformten Bauteile ihre hohe Leistungsfähigkeit verleihen (Bild 14), noch gezielter nutzen. Dazu müssen Werkstoffauswahl, Bauteilgestalt und die Prozessschritte der Fertigung bestens aufeinander abgestimmt werden.

Beanspruchungsgerechte Auslegung des Faserverlaufs

Es ist bekannt, dass Bauteile, deren Faserverlauf in Richtung der



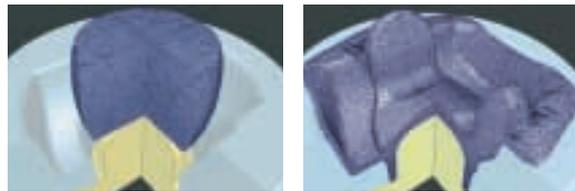
Bild 14: Vorteile umformtechnisch verarbeiteter Werkstoffe

maximalen Belastungen verläuft, diesen besonders hohen Widerstand bieten können. Dieser positive Zustand konnte bisher schon in vielen Schmiedeteilen ausgenutzt werden. Der sich durch den Stofffluss ergebende Faserverlauf lag in Richtung der maximalen Belastung, da der Werkstofffluss sich in gewissen Grenzen durch die Bauteilgestalt ergibt. Dieser Bezug gilt ebenfalls für Aluminiumlegierungen: Hier zeigt sich, dass Belastungen in Richtung der nach der Warmumformung gestreckten Körner besser aufgenommen werden können.

Inzwischen hat die FEM-Simulation ihren Einzug in den Ablauf der Umformprozessauslegung gefunden. Dies gilt im Übrigen nicht mehr nur für 2D-Simulation rotations-symmetrischer Bauteile [24], sondern inzwischen uneingeschränkt auch für komplexe dreidimensionale Umformvorgänge. Mit der Berechnung des Geschwindigkeitsfelds, aus dem Umformgrade, Spannungsverteilung und Temperaturentwicklungen abgeleitet werden, ergibt sich auch die Berechnung des Werkstoffflusses und damit die Möglichkeit, die Bewegung der Fasern innerhalb des Werkstoffs zu verfolgen. Dies ist in Bild 15 an einem Beispiel gezeigt. Die Abschmiedung eines Kreuzgelenk-Gabelstücks erfolgt in mehreren Stufen auf automatisierten Warmumformmaschinen. Es entsteht ein Grat, der in der letzten Stufe entfernt wird. Bei diesem Bauteil ergibt sich die Möglichkeit, das Teil liegend oder stehend (je nach Achsrichtung des Scherlings) zu schmieden. Wie Bild 15 zeigt, ergeben sich entsprechend sehr unterschiedliche Faserverläufe. Hier böte sich die Möglichkeit, die Auswahl der Schmiedart im Hinblick auf die Dauerfestigkeit des Werkstücks zu treffen. Genauso ist es denkbar, auch bei der Stadienauslegung die entstehende Faserrichtung unter Berücksichtigung der späteren Bauteilbelastung zu optimieren. Die

Stoffflusssimulation

Beginn Ende



Faserverlauf stehende Schmiedung Liegende Schmiedung

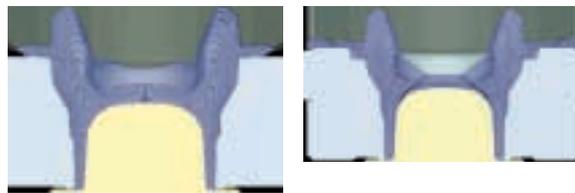


Bild 15. Auswertung des Faserverlaufs in einem Schmiedeteil mit Hilfe der Umform-FEM-Prozesssimulation

Werkzeuge dazu stehen heute in Form der 2- und 3D-Stoffflusssimulation für den tagesgeschäftlichen Einsatz zur Verfügung.

Ein Beispiel für den negativen Einfluss einer ungünstigen Prozesskette auf den Faserverlauf zeigt Bild 16. Hier wurde an einer Welle ein Flansch angestaucht, durch

den sich ein charakteristischer Faserverlauf im Bauteil ergibt. Der Kunde hatte allerdings die Auslegung des Umformprozesses und die nachfolgende Zerspanoperation in der Art ausgeführt, dass der Flansch auf einer Seite sehr wenig, auf der anderen Seite hingegen stark abgedreht wurde. Dadurch wurden im schaftnahen Bereich auf der Oberseite des Flanschs die Fasern so angeschnitten, dass sie senkrecht aus dem Schaft austraten. Das Bauteil erlitt schon innerhalb der Fertigungskette beim thermischen Entgraten eine starke Rissbildung in genau diesem Bereich, die zu Ausschuss führte. Durch Abstimmung der Zerspanoperation mit dem durch die FEM-berechneten Faserver-

lauf konnte aber inzwischen eine einwandfreie Prozesskette realisiert werden.

Mechanische Oberflächenbehandlung

Wie in Abschnitt „Anforderungen an Werkstoffe“ dargestellt, führt eine Erhöhung der Festigkeit nicht unbedingt zu besseren Schwingfestigkeiten von Bauteilen. Dies gilt besonders für Bauteile, die Kerben aufweisen. Einige Kerben lassen sich sicherlich

konstruktiv vermeiden, andere sind aber durch die Bauteilfunktion unumgänglich. Kerben vermindern die Schwingfestigkeit unter anderem durch den sich ausbildenden ungünstigen, dreiachsigen Zugspannungszustand. Diese führen zu einer Versprödung des Werkstoffs und erfordern in der Auslegung die Berücksichtigung höherer Sicherheiten.

Dieses Dilemma lässt sich durch eine mechanische Oberflächenbehandlung entschärfen. Bei warm und halbwarm umgeformten Produkten wird seit jeher ein Reinigungsstrahlen eingesetzt. Dieses führt sowohl zur Verfestigung der Oberfläche durch eine Kaltumformung, als auch durch die eingebrachte inhomogene plastische Verformung, zur Ausbildung eines Druckspannungszustands an der

Oberfläche. Auf separaten Anlagen lässt sich auch das Verfestigungsstrahlen durchführen, welches mit dem Ziel der positiven Beeinflussung der Bauteileigenschaften, zu meist als letzter Bearbeitungsschritt, durchgeführt wird [25].

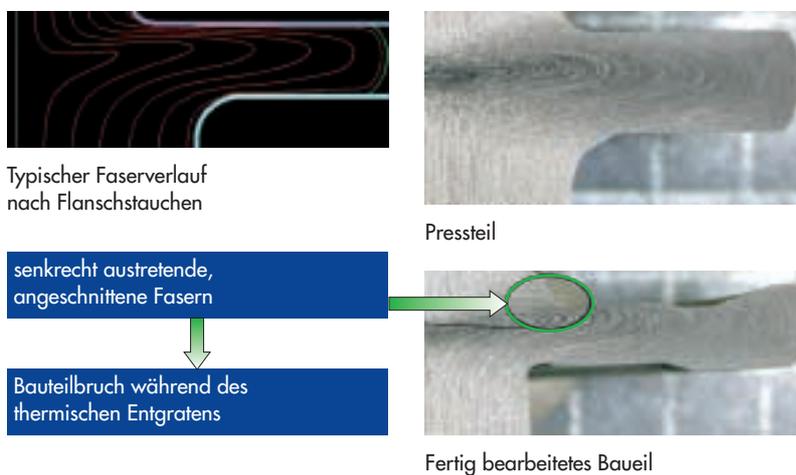
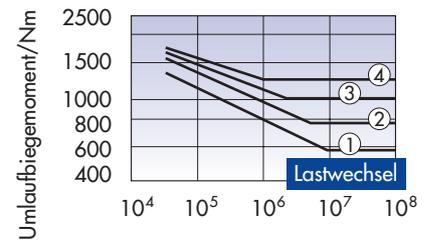
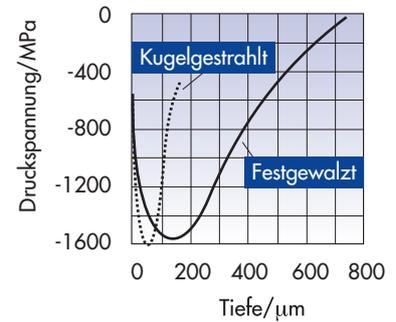


Bild 16: Bauteilausfall während der Prozesskette durch ungünstige Abstimmung des umgeformten Faserverlaufs mit der nachfolgenden Zerspanoperation



Bild 17: Festwalzen von Oberflächen

(Quelle: Ecorol)



Ein effektiverer Prozess zur mechanischen Oberflächenbehandlung, der sogar in die spanende Bearbeitungsfolge integriert werden kann, stellt das Festwalzen dar. Hierbei wird mit einer Walze oder einer Kugel die Oberfläche durch einen Walzprozess in geringem Maße kaltumgeformt. Es entsteht, wie beim Kugelstrahlen, ein geringer plastischer Umformgrad sowie ein Druckspannungsaufbau. Die Wirkung des Festwalzens ist allerdings durchgreifender, als die des Kugelstrahlens: Die Druckspannungen sind etwas größer und vor allem tiefer in die Oberfläche eingebracht (Bild 17). Dies äußert sich in einer Vergrößerung der Schwingfestigkeit: Bei optimalen Festwalzparametern kann, wie in Bild 17 dargestellt, ein doppelt so großes Umlaufbiegemoment vom Bauteil ertragen werden, wobei die Dauerfestigkeit bei geringerer Lastwechselzahl erreicht wird.

Die Verfahren der mechanischen Oberflächenbehandlung sind dabei sowohl für relativ weiche, als auch für härtere Werkstoffe interessant. Die Wirkmechanismen unterscheiden sich allerdings. Bei weichen Werkstoffen ist die Lebensdauererhöhung vor allem auf die Erhöhung der Werkstofffestigkeit durch die Kaltumformung der Oberfläche zurückzuführen. Bei festeren Werkstoffen sind es in vermehrtem Maße die durch die inhomogene Kaltumformung eingebrachten Druckeigenspannungen, die zur Lebensdauererhöhung beitragen [23].

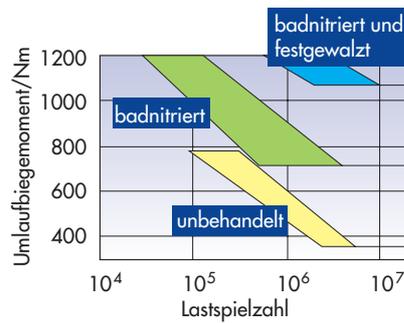
Thermische und/oder chemische Oberflächenbehandlung

Die Verfahren der chemischen und/oder thermischen Oberflächenbehandlung nutzen im Grunde die gleichen Wirkmechanismen zur Lebensdauererhöhung, wie die mechanischen Verfahren der Oberflächenbehandlung. Sie führen zu einer Randschicht mit einer höheren Festigkeit und erzielen günstigerweise einen Druckspannungszustand in der

Oberfläche, die der Versprödung entsprechenden Widerstand entgegengesetzt. Beispielhaft ist dies für das Badnitrieren einer Kurbelwelle in Bild 18 dargestellt. Im Vergleich zum unbehandelten Werkstoff steigt die Wechselfestigkeit des Bauteils stark an.

Ähnliche Werte für die Verbesserung der Dauerfestigkeitseigenschaften werden für das Induktionshärten und das Nitrieren erreicht. All diesen Verfahren ist gemein, dass der Werkstoff in der Randschicht, in der in der Regel die größten Belastungen vorliegen, eine höhere Festigkeit erhält. Der Kern des Bauteils verbleibt in der Grundfestigkeit und bietet damit die für gewisse Verwendungen benötigte Zähigkeitsreserve. Natürlich beeinflusst alleine schon die Prozessführung der Oberflächenbehandlung die erreichbaren Wechselfestigkeitsverbesserungen [26]. In Kombination mit der umformenden Prozessroute sowie der Nachbearbeitung dürften sich noch weitere Freiheitsgrade in der Gestaltung der gesamten Prozesskette ergeben.

Wechselbiegemoment an Kurbelwelle, Ck45N



FEM-Simulation eines Kugelstrahlvorgangs

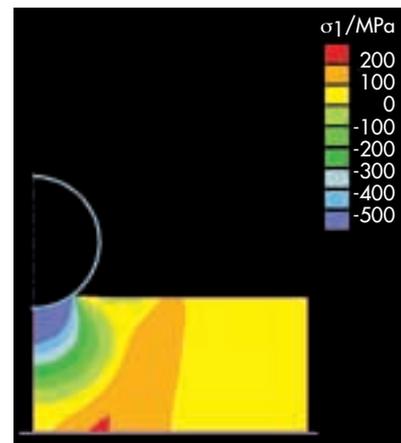


Bild 18: Wirkung von Oberflächenbehandlungsverfahren (Quelle: Infostelle IMU)

Kombinationen von Oberflächenbehandlungsverfahren

Die chemisch/thermischen Verfahren der Oberflächenbehandlung lassen sich, wie in Bild 18 schon dargestellt, des Weiteren noch mit den mechanischen Oberflächenbehandlungen kombinieren. Dies ist auch an Randschichten mit höherer Festigkeit möglich: Die Verfahren der mechanischen Oberflächenbehandlung führen zu einer randschichtnahen Umformung, die weitgehend im Druckspannungsbereich abläuft (Bild 18). Dies unterbindet eine Schädigung der Randschicht. Die sich einstellenden Druck-Eigenspannungen nach der mechanischen Oberflächenbehandlung wirken sich hingegen positiv auf die tendenziell sprödere Randschicht aus und erhöhen in der Summe die Dauerfestigkeiten der Bauteile.

Die Einbeziehung von Randschichteigenschaften durch Induktionshärten oder Nitrieren in die Bauteilauslegung wird durch überschlägige Faktoren schon in der Praxis ausgeführt [27]. Die Einbeziehung von Eigenspannungszuständen, die nach mechanischer Oberflächenbehandlung eine definierte Lage besitzen, in die Bauteilauslegung, ist dem Autor im Bereich des Automobilbaus bisher nicht bekannt. Die mechanische Oberflächenbehandlung wird entweder in Problemfällen zusätzlich eingesetzt, oder sie erhöht die Sicherheitsspannen der Auslegung.

Zur gezielten Nutzung aller leistungsfördernden Möglichkeiten müssen sicherlich noch die Methoden der Werkstoffcharakterisierung, als auch die Einbeziehung dieser Daten in Dauer- oder Betriebsfestigkeitsrechnungen weiterentwickelt werden. Hier bietet sich eine Zusammenarbeit zwischen den Herstellern und Anwendern der Produkte an.

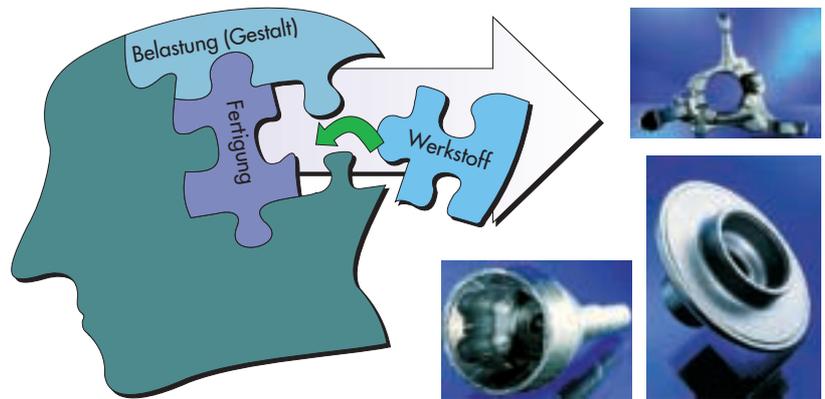


Bild 19: Integrativer Ansatz für die Realisierung massivumgeformter Leichtbaukomponenten

Zusammenfassung und Ausblick

Das optimale massivumgeformte Leichtbau-Werkstück erfordert, dass die Gestaltung, die Werkstoffauswahl und die Fertigung in enger Verzahnung aufeinander abgestimmt sind (Bild 19). Dafür ist es notwendig, schon in frühen Konstruktionsphasen den Zulieferer mit in den Produktentstehungsprozess einzubinden. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den Hersteller des massivumgeformten Bauteils auf Basis des Pflichtenhefts mit der Bauteilkonstruktion zu beauftragen, wie dies in zunehmendem Maße von der Massivumformindustrie angeboten wird.

Es ist zu erwarten, dass auch auf längere Zeit die Definition des Lastkollektivs und die Bauteilfreigabe in der Verantwortung des OEMs liegen wird. Die Daten, die erst in

Kombination zur Auslegung und Fertigung des optimalen Bauteils führen, liegen also an mehreren Orten. Umso wichtiger wird es sein, hier in partnerschaftlicher Zusammenarbeit ein Produkt zu erzeugen, welches schließlich dem Endkunden im Automobil als wirtschaftlich vertretbare Lösung mit maximalem Nutzen angeboten werden kann [2]. Nur dies garantiert auch für die Zukunft den Erfolg der Automobilhersteller und der Zulieferindustrie.

Literaturverzeichnis

- [1] www.volkswagen.de/lupo/3ltdi.htm
- [2] Mäscher, G., Schmidt, J.: Schmiedeteile aus AFP-Stählen, VDI-Z, Band 133 (1991), Nr. 4
- [3] Grubisic, V., Sonsino, C.M. : Einflussgrößen der Betriebsfestigkeit geschmiedeter Bauteile, VDI-Z 134 (1992) Nr. 11, Seite 105-112
- [4] Bubenhausen, H., Harzheim, L.: Einsatz der Formoptimierung zur Lebensdauerverbesserung von Bauteilen, Konstruktion 50 (1998) H. 11/12
- [5] Troska, A., Fees, H.: Steigerung der Tragfähigkeit von Kegelrädern für Differentialgetriebe durch Schmieden, DVM-Bericht 128, ISSN 0944-5242, Fertigungsverfahren und Betriebsfestigkeit, 28. Tagung des DVM-Arbeitskreises Betriebsfestigkeit, Schaffhausen, CH, 2001
- [6] Haibach, E.: Betriebsfestigkeit, 2. Auflage, Springer 2002
- [7] Frommeyer, G.: Jahresbericht 2001 der Abteilung Werkstofftechnik, Max-Planck-Institut für Eisenforschung GmbH, www.mpie-duesseldorf.mpg.de, 28. Juli 2003
- [8] Kammer, C.: Aluminium Taschenbuch, 15. Auflage 1995, überarbeitet 1998, Aluminium-Verlag
- [9] Issler, L., Ruoß, H., Häfele, P.: Festigkeitslehre – Grundlagen, 2. Auflage, Springer 1997
- [10] DIN EN 10267, Von Warmformgebungstemperatur ausscheidungshärtende ferritisch-perlitische Stähle, Beuth Verlag
- [11] N.N.: Pressemitteilung TU Cottbus zur Beantragung des Projektes „Magnesium im Automobilbau“, www.tu-cottbus.de/BTU/TU-Profil/Nr44/A031.html, 30. Juli 2003
- [12] Kaufmann, H.: Schwingfestigkeit von Schmiedestahl und höherfesten Gußeisenwerkstoffen in gekerbtem Zustand, konstruieren+gießen 24 (1999) Nr. 2
- [13] Hasse, H.-H., Bartels, C., Schliephake, U.: Guss-eisen verdoppelt seine Festigkeiten, Industrie-anzeiger 24-25/2003
- [14] N.N.: Höherfester Stahl für den Automobil-Leichtbau, ThyssenKrupp Stahl Firmenbroschüre, Best.-Nr. 2045, Aug. 1999
- [15] Moldenhauer, F.: 40% höhere Streckgrenze durch Werkstoffwechsel, Industrieanzeiger 27/2000
- [16] Hünecke, V., Schulz-Beenken, A.: Die Eignung von Lanzettmartensit für hochfeste Verbindungselemente, Stahl 2001, Nr. 2
- [17] Ollilainen, V., Hocksell, E.: New Low-Carbon Steel for Hot, Warm, or Cold Forging, Advanced Engineering Materials 2000, 2, No. 5
- [18] Weber, H.R.: Marvac 125, a New High Strength Stainless Maraging Steel with Isotropic Shaping Capability, European Stainless Steel Congress, June 10-13, 2002, Paris, France
- [19] Otte, A.: Das Potenzial der Aluminiumlegierung AlSi1MgMn für Schmiedeteile, Schmiede-Journal September 2002
- [20] Leiber, R.: Gesenkschmieden mit Aluminiumlegierungen, Berichtsband „Neuere Entwicklungen in der Massivumformung“, 3./4. Juni 2003, MAT INFO Werkstoff-Informationsgesellschaft, 2003
- [21] <http://www.otto-fuchs.com/deutsch/4werk/2magn/rechts1.html>, 3. Aug. 2003
- [22] Janssen, S.: Umformung von Magnesiumknetlegierungen auf Aluminium-Zink-Basis im geschlossenen Gesenk, Dissertation Universität Hannover, 2002

Literaturverzeichnis

- [23] VDI/ADB-Ausschuss Schmieden, Adlof, W.:
Schmiedeteile - Gestaltung, Anwendung, Beispiele,
Kapitel: Dynamische Festigkeitswerte von
Schmiedeteilen; Informationsstelle Schmiedestück-
Verwendung, Industrieverband Deutscher
Schmieden, ISBN 3-9800891-0-X
- [24] Walters, J., Kurtz, S., Wu, W.-T., Tang, J.: The
„State of the art“ in cold forging simulation, Journal of
Materials Processing Technology 71 (1997) 64-70
- [25] www.metalimprovement.com, 6. Aug. 2003
- [26] Kaufmann, H., Sonsino, C.M., Wetter, E.: Einfluss
von Härtingparametern auf die Schwingfestigkeit
von Gesenkschmiedeteilen, VDI-Z 134 (1992) Nr. 11,
Seite 113-117
- [27] Autorengruppe: Rechnerischer Festigkeitsnachweis
für Maschinenbauteile aus Stahl, Eisenguss- und
Aluminiumwerkstoffen, 4., erweiterte Ausgabe 2002,
Forschungskuratorium Maschinenbau,
VDMA Verlag, 2002

Infostelle

Industrieverband
Massivumformung e. V.

Goldene Pforte 1
58093 Hagen, Deutschland
Telefon +49 (0) 23 31 / 95 88 28
Telefax +49 (0) 23 31 / 95 87 28

E-Mail: orders@metalform.de

Weitere Informationen unter:
www.metalform.de

ISBN 3-928726-20-X

Den Veröffentlichungen
der **Infostelle**
liegen die Ergebnisse
der Gemeinschaftsforschung
der im Industrieverband
Massivumformung e. V.
zusammengeschlossenen
Industriewerke zugrunde.

Stand: Juni 2004
EI - LB - 0604 - 30 DOM