

Sabrina Vogt

Lokale Laserentfestigung von Halbzeugen und Bauteilen aus hochfesten Stählen

Lokale Laserentfestigung von Halbzeugen und Bauteilen aus hochfesten Stählen

Local Laser Softening of Semi-finished Products and Components of High Strength Steels

Von der Fakultät für Maschinenwesen
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades einer
Doktorin der Ingenieurwissenschaften
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Sabrina Vogt

Berichter:

Univ.-Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Bernd Engel

Tag der mündlichen Prüfung: 28. Mai 2019

ERGEBNISSE AUS DER LASERTECHNIK

Sabrina Vogt

Lokale Laserentfestigung von Halbzeugen und Bauteilen aus hochfesten Stählen

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://portal.dnb.de> abrufbar.

Sabrina Vogt:

Lokale Laserentfestigung von Halbzeugen und Bauteilen aus hochfesten Stählen

1. Auflage, 2019

Apprimus Verlag, Aachen, 2019

Wissenschaftsverlag des Instituts für Industriekommunikation und Fachmedien
an der RWTH Aachen

Steinbachstr. 25, 52074 Aachen

Internet: www.apprimus-verlag.de, E-Mail: info@apprimus-verlag.de

ISBN 978-3-86359-797-9

D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2019)

Danksagung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit am Fraunhofer-Institut für Lasertechnik in Aachen. An dieser Stelle möchte ich mich bei all denen bedanken, die direkt oder indirekt zur Fertigstellung dieser Arbeit beigetragen haben.

Ein großer Teil der Arbeiten wurde innerhalb des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Forschungsprojekts „KLASSE“ (Projektnummer 13N12914) unter Beteiligung von insgesamt neun Firmen und Forschungseinrichtungen durchgeführt. Mein besonderer Dank gilt an dieser Stelle allen beteiligten Projektpartnern, insbesondere Markus Löcker, Martin Flaischerowitz, Janko Banik, Michael Ölscher, Markus Baumann, Arndt Kösters und Mario Schmidt, die mich auch neben der eigentlichen Projektarbeit unterstützt haben.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Reinhart Poprawe danke ich für die Überlassung des Themas und die Betreuung der Arbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Broeckmann danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. rer. nat. Konrad Wissenbach, in dessen Abteilung ich als wissenschaftliche Mitarbeiterin tätig war, und Herrn Dr.-Ing. Andreas Weisheit, meinem Gruppenleiter während dieser Zeit. Beiden danke ich für ihre Unterstützung, Diskussionsbereitschaft sowie die kritischen Anregungen.

Weiterhin möchte ich mich bei meinen Arbeitskollegen für das angenehme Arbeitsklima, die gegenseitige Unterstützung sowie fachliche Diskussion bedanken. Besonders danke ich Annika Völl, Dr. Oliver Pütsch, Daniel Meyer, Markus Wilms und Dr. Frank Schneider für die Unterstützung meiner Projekte sowie für die freundschaftliche und diskussionsfreundige Arbeitsatmosphäre.

Darüber hinaus gilt mein besonderer Dank meinen Bachelor- und Masterarbeitern sowie studentische Hilfskräften, insbesondere Lukas Bechheim, Janos Bisasso, Thomas Freese, Rebar Hama-Saleh Abdullah, Peter Drosner, Joschka Schwarz, Matthias Brucki und Annika Krause, ohne deren wertvolle Arbeit die Erstellung der vorliegenden Dissertation weder in diesem Zeitrahmen noch in dieser Qualität möglich gewesen wäre.

Meinen Eltern Kathrin und Matthias Vogt danke ich für die Unterstützung beim Verfolgen meiner Ziele nicht nur während der Studien- und Promotionszeit.

Renningen, Oktober 2019

Sabrina Vogt

Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund des Klimawandels, der als eine Folge des durch den Menschen verursachten Ausstoßes von Treibhausgasen, u. a. im Straßenverkehr, angesehen wird, ist die Automobilindustrie bestrebt, den Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch ihrer Fahrzeuge zu reduzieren. Ein Hebel dazu ist die Reduzierung der Gesamtmasse des Fahrzeugs durch neue Leichtbaustrategien. Die Entwicklung von neuen hochfesten Stählen für den Einsatz im Automobilbereich hat neue Leichtbaupotenziale hervorgebracht. Durch hochfeste Stähle können kleinere Bauteildicken und somit geringes Gewicht bei gleichzeitigem Erfüllen hoher Anforderungen an Crashesicherheit sowie Steifigkeit realisiert werden. Den Festigkeitsvorteilen steht auf der anderen Seite aber eine Vielzahl neuer Herausforderungen hinsichtlich der Fügbarkeit, des Trennens und der Umformung sowie der Crashperformance gegenüber. Bei der Kaltumformung von Kaltbandgütern können lokale Umformgrade entstehen, die bei der Umformung zu Rissen führen. Bei Presshärstählen können das Widerstandspunktschweißen sowie der Laserbeschnitt die Crashperformance beeinträchtigen. Bei einer schlagartigen Beanspruchung kann die Wärmeeinflusszone des Schweißpunktes oder die spröde Aufhärtungszone an der Schneidkante eine Rissinitiation begünstigen. Die genannten Nachteile haben dazu geführt, dass hochfeste Stähle bisher nicht in dem Maße genutzt werden können, wie es sich die Konstrukteure von Karosserien wünschen. Die Laserwärmebehandlung bietet die Möglichkeit, Bereiche gezielt und lokal zu bearbeiten und dadurch Bereiche mit definierten Festigkeitsprofilen zu erzeugen. Durch lokal entfestigte Bereiche im Bauteil lassen sich zum einen die Umformeigenschaften bei der Kaltumformung bei der Bauteilfertigung verbessern und zum anderen kann die Bildung metallurgischer Kerben beim Punktschweißen und beim Laserschneiden vermieden und dadurch die Crashperformance verbessert werden.

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Weiterentwicklung der lokalen Laserentfestigung von Kaltbandgütern und Presshärstählen. Dafür werden einerseits grundlegende Erkenntnisse zum Werkstoffverhalten bei der Laserentfestigung der Kaltbandgüte ZE 1000 und des Presshärstahls MBW[®] 1900 erarbeitet. Zudem wird der Einfluss von Vorschubgeschwindigkeiten größer 1000 mm/min beim Laserentfestigen auf die mechanischen Eigenschaften der Kaltbandgüte ZE 1100 und des Presshärstahls MBW[®] 1500 + AS untersucht. Um homogenere Entfestigungen über die Platinendicke bei der Laserentfestigung bei großen Vorschubgeschwindigkeiten (> 1000 mm/min) zu realisieren, werden in der vorliegenden Arbeit zwei Ansätze (beidseitige Bearbeitung, angepasstes Strahlprofil) zur Prozessanpassung der Laserentfestigung untersucht. Für einen simultanen Prozess des Laserschneidens und des Laserentfestigens wird ein Bearbeitungskopf, eine sog. Hybridoptik, entwickelt, um damit die Verfahrensentwicklung für eine 2D- und 3D-Bearbeitung zu ermöglichen. Die Auswirkungen von laserentfestigten Bereichen in den Fügezonen für das Widerstandspunktschweißen auf die Crashperformance werden in der Arbeit am Beispiel einer B-Säule an einem 3-Punkt-Biegeversuch durch ein Simulationsmodell vorhergesagt und an einem B-Säulenprüfstand verifiziert. Abschließend wird die Integration der Laserentfestigung in bestehende Prozessketten betrachtet.

Abstract

Considering climate change as a result of human malpractice through greenhouse gas emissions, amongst others in road traffic, the automotive industry is striving to reduce the fuel and power consumption of cars. A lever to reduce power consumption is the total mass reduction of a car through new lightweight construction strategies. The development of new high-strength steels used in the automotive sector has created new potentials for the implementation of lightweight construction. It is possible to realise reduced component thickness and therefore a reduced weight, thus fulfilling high standards concerning crash safety and stiffness. On the other hand, there are a number of new challenges awaiting the strength benefits, such as joinability, separation, and formability as well as the crash performance. During cold forming of cold-rolled grades, critical, locally caused degrees of deformation can lead to cracks. Regarding press hardened steels, the resistance spot welding as well as the laser trimming can interfere with the crash performance. At an abrupt stress situation, the heat-affected zone of the welding spot or the brittle hard zone at the cutting edge can possibly enhance a crack initiation. The aforementioned disadvantages prevented the use of highly durable steel to the extent which engineers of cars wished for. Laser heat treatment makes it possible to process areas in a targeted and local manner and thus generate areas with defined strength profiles. On the one hand, locally deformed areas in the part can improve the forming properties during cold forming of part production and, on the other hand, the formation of metallurgical notches during spot welding and laser cutting can be avoided, thereby improving the crash performance.

The subject of this thesis is the further development of the local laser softening of cold strip grades and press hardened steels. On the one hand, fundamental findings on the material behaviour and laser softening of the cold-rolled quality ZE 1000 and the hard pressed steel MBW[®] 1900 are developed. In addition, the influence of feed rates greater than 1000 mm/min on the mechanical properties of the cold strip quality ZE 1100 and the press hardened steel MBW[®] 1500 + AS during laser softening is investigated. In order to achieve more homogeneous softening over the board thickness during laser softening at high feed rates (> 1000 mm/min), two approaches (both-sided processing, adapted intensity distribution) for process adaptation are investigated in the present work. For a simultaneous process of laser cutting and laser softening, a processing head, a so-called hybrid optics, is developed in order to enable the processing of 2D- and 3D-parts. The implications of laser-softened parts in the joining zones for resistance spot welding on crash performance are demonstrated in the work using the example of a B-pillar on a 3-point bending test on a B-pillar test rig using a simulation model and verified on a test rig. Finally, the integration of the laser softening into existing process chains is considered.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Stand der Forschung und Technik	3
2.1	Stahleinsatz im Automobil	3
2.1.1	Kaltbandgüten	4
2.1.1.1	Umformen von Kaltbandgüten	6
2.1.2	Presshärstähle	7
2.1.2.1	Trennverfahren für pressgehärtete Stähle	9
2.1.2.2	Fügeverfahren für pressgehärtete Stähle	11
2.2	Einstellung von lokalen Eigenschaften durch „Tailored Blanks“	13
2.3	Lokale Laserentfestigung von hochfesten Stählen	14
2.4	Laserwärmebehandlung mit angepasstem Strahlprofil	19
2.5	Zwischenfazit – Stand der Forschung und Technik	20
3	Zielsetzung	23
4	Werkstoff	25
4.1	Kaltbandgüten	25
4.2	Presshärstähle	27
5	Anlagentechnik und Analysemethoden	31
5.1	Anlagentechnik und Versuchsaufbau	31
5.2	Laserstrahlquellen	33
5.3	Bearbeitungsköpfe	35
5.4	Übersicht der eingesetzten Laserstrahlquellen und Bearbeitungsköpfe	41
5.5	Temperaturregelung bei der Laserwärmebehandlung	42
5.6	Analysemethoden	49
5.6.1	Härtemessung und Gefügeanalyse der wärmebehandelten Platinen	49
5.6.2	Rauheit und Bartbildung	51
5.6.3	Zugversuch und Plättchen-Biegeversuch	52
5.6.3.1	Zugversuch	52
5.6.3.2	Plättchen-Biegeversuch	54
6	Verfahrensentwicklung der lokalen Laserentfestigung von hochfesten Stählen	57
6.1	Verfahrensentwicklung der lokalen Laserentfestigung von hochfesten Stählen mit Vorschubgeschwindigkeiten bis 1000 mm/min	57
6.1.1	Kaltbandgüte ZE 1100	59
6.1.2	Presshärstahl MBW [®] 1900	64
6.1.3	Zwischenfazit – Verfahrensentwicklung der lokalen Laserentfestigung mit Vorschubgeschwindigkeiten bis 1000 mm/min	68

6.2	Einfluss der lokalen Laserentfestigung mit Vorschubgeschwindigkeiten größer 1000 mm/min auf Gefüge und mechanische Eigenschaften	71
6.2.1	Einfluss von großen Vorschubgeschwindigkeiten auf die Temperaturverteilung über die Platinendicke	72
6.2.2	Einfluss von großen Vorschubgeschwindigkeiten auf Härte und Gefüge über die Platinendicke	74
6.2.3	Einfluss von großen Vorschubgeschwindigkeiten auf die mechanischen Eigenschaften	77
6.2.3.1	Kaltbandgüten	77
6.2.3.2	Presshärtestahl MBW® 1500 + AS	87
6.2.4	Zwischenfazit – Einfluss der Vorschubgeschwindigkeiten größer 1000 mm/min auf die Eigenschaften	96
6.3	Zwischenfazit – Verfahrensentwicklung der lokalen Laserentfestigung von hochfesten Stählen	98
7	Verfahrensentwicklung der lokalen Laserentfestigung für beidseitige Bearbeitung und mit angepasstem Strahlprofil	101
7.1	Laserentfestigung mit simultaner beidseitiger Bearbeitung	101
7.2	Laserentfestigung mit angepasstem Strahlprofil	105
7.2.1	Bearbeitungskopf 3	108
7.2.2	Bearbeitungskopf 4	112
7.3	Zwischenfazit – Verfahrensentwicklung für beidseitige Bearbeitung und mit angepasstem Strahlprofil	116
8	Verfahrensentwicklung zum simultanen Laserschneiden und Laserwärmebehandeln	119
8.1	Zielsetzung und Vorgehensweise	119
8.2	Vorgaben	120
8.3	Prozessauslegung des Laserschneidens für den Kombinationsprozess	123
8.4	Prozessauslegung der Laserwärmebehandlung für den Kombinationsprozess	126
8.5	Prozessauslegung des Kombinationsprozesses Laserschneiden und Laserwärmebehandlung	131
8.6	Ausführung des optischen Systems	134
8.7	Ausführung der Konzeptionierung und der Konstruktion	135
8.8	Fertigung und Montage	139
8.9	Messung der Strahleigenschaften und Erprobung	140
8.10	Zwischenfazit – Verfahrensentwicklung der simultanen Bearbeitung	145
9	Einfluss der lokalen Laserentfestigung auf die Fügbarkeit und das Crashverhalten	147
10	Integration der Laserentfestigung von hochfesten Stählen in die Prozesskette	155
10.1	Integration der Laserentfestigung von Kaltbandgüten in die Prozesskette	155
10.2	Integration der Laserentfestigung von Presshärtestählen in die Prozesskette	157
10.3	Fazit – Integration der Laserentfestigung in die Prozesskette	160

11	Zusammenfassung und Ausblick	161
12	Literaturverzeichnis	165
	Formelzeichen und Abkürzungen	175
	Anhang	179
A1	Ergänzungen zum Abschnitt 5.5 – Reflexionsgradmessung und Absorptionsgrad	179
A2	Ergänzungen zu den Abschnitten 5.5 und 6.2.1 – FEM-Wärmeleitungssimulation	181
A3	Ergänzungen zum Abschnitt 6.2.1 – Verfahrensparameter	182
A4	Ergänzungen zum Abschnitt 6.2.3.1 – Härteverläufe	182
A5	Ergänzungen zum Abschnitt 6.2.3 – Verfahrensentwicklung der Laserentfestigung mit großen Vorschubgeschwindigkeiten	185
A6	Ergänzungen zum Abschnitt 7.2.2 – Gefüge	186
A7	Ergänzungen zum Abschnitt 7.3 – Härteverläufe und Verfahrensparameter	188
A8	Ergänzungen zum Abschnitt 8.6 – Anforderungen an die Beschichtungen der Optikkomponenten in der Hybridoptik	188
A9	Ergänzungen zum Abschnitt 8.7 – Spezifikationen der Komponenten der Hybridoptik	189
A10	Ergänzungen zum Abschnitt 8.9 – Strahlvermessung	190
A11	Ergänzungen zu Kapitel 9 – Verfahrensparameter und Ergebnisse der Entfestigungsstufen	192
A12	Verzeichnis betreuter studentischer Arbeiten	194

1 Einleitung

Der Klimawandel ist in den letzten zehn Jahren zur Realität geworden. Er wird als eine Folge des durch den Menschen verursachten Ausstoßes von Treibhausgasen angesehen. Weltweit werden ca. 23% der CO₂-Emissionen durch den Gesamtverkehr verursacht. Im Jahr 2005 betrug der Ausstoß von CO₂ ca. 6 Mrd. Tonnen [1]. Davon entfallen ca. 17% auf den Straßenverkehr [1]. Vor dem Hintergrund der gesetzlichen Vorgaben zur Verringerung der CO₂-Emission von Neufahrzeugen (bis 2020 95 g/km pro PKW [2]) und der wachsenden Nachfrage nach einer ressourceneffizienten Mobilität hat die Automobilindustrie ein großes Interesse daran, den Kraftstoff- bzw. Energieverbrauch ihrer Fahrzeuge – trotz steigender Kundenanforderungen an Komfort und Sicherheit – zu reduzieren. Zwischen dem Fahrzeuggewicht, dem Kraftstoffverbrauch und der CO₂-Emission besteht ein klarer physikalischer Zusammenhang: Eine Verringerung des Gewichts um 100 kg führt auf einer Strecke von 100 km zu einer Kraftstoffeinsparung von 0,3 l und einer CO₂-Reduzierung von bis zu 10 g CO₂/km [3–10].

„Die Fahrzeugkarosserie hat mit ca. 40% den größten Anteil am Gesamtgewicht eines Pkws“[5]. Somit kommt im Pkw-Bau der Gewichtsreduzierung der Karosserie eine bedeutende Rolle zu [5]. Eine Gewichtsreduzierung lässt sich unter anderem durch den belastungsgerechten Einsatz von Leichtbauwerkstoffen herbeiführen. Vor dem Hintergrund stetig steigender Crash- und Leichtbauanforderungen kommen vermehrt neue hochfeste Stahlwerkstoffe zum Einsatz [11]. Den Festigkeitsvorteilen stehen jedoch neue Herausforderungen hinsichtlich der Fügbarkeit, des Trennens und der Umformung sowie der Crashperformance gegenüber [5, 7, 12, 13].

Einerseits lassen sich Kaltbandgüten durch Kaltwalzen stark verfestigen – Zugfestigkeiten bis zu 1200 MPa werden erzielt. Ein Hindernis für ihre Weiterverarbeitung besteht jedoch in ihrem geringen Umformvermögen im Vergleich zu Tiefziehstählen. Bei der Kaltumformung von kaltverfestigtem Stahlband können lokal kritische Umformgrade entstehen, die bei der Umformung zu Rissen führen. Mit maximal verfestigten Stählen lassen sich deshalb nur Bauteile mit einer geringen geometrischen Komplexität herstellen, bei denen der Umformgrad hinreichend klein ist – oder es müssen weniger feste Stahlsorten verwendet werden.

Andererseits werden Presshärtstähle immer häufiger im Bereich der Fahrgastzelle – beispielsweise bei der A- und B-Säule, bei den Schwellern und beim Tunnelverstärker – eingesetzt, weil diese Stahlwerkstoffe mit ihren großen Zugfestigkeiten von bis zu 1650 MPa ein großes Leichtbaupotenzial bei gleichzeitiger ausgezeichneter Formbarkeit bieten. Mit diesen Stählen sind gegenüber den konventionellen Stählen - wie DP 800 - kleinere Platinendicken möglich, weil sie ein großes Verhältnis der Festigkeit zum spezifischen Gewicht aufweisen. Durch die Verwendung pressgehärteter Stähle lässt sich bei einem Fahrzeug ein Gewicht von 25 kg einsparen [14]. Die große Festigkeit dieser Bauteile erfordert jedoch auch Veränderungen ihres Eigenschaftsprofils oder bei der Weiterverarbeitung, um ihre Fügbarkeit und das Trennen sowie die Crashperformance zu gewährleisten [5, 7, 12, 13]. Ein wichtiger Aspekt in diesen Zusammenhang ist das Verhalten der Fügeverbindungen von pressgehärteten Bauteilen mit angrenzenden Karosseriekomponenten. Beim

Punktschweißen entsteht im Bereich des Schweißpunktes eine entfestigte Wärmeeinflusszone im Presshärtstahl, die im Crashfall ein frühzeitiges Ausknöpfen des Schweißpunktes begünstigt [7, 15–17]. Die konventionellen mechanischen Fügeverfahren – beispielsweise das Stanzen und Clinchen – lassen sich aufgrund der großen Festigkeit und der geringen Duktilität im pressgehärteten Zustand entweder nicht anwenden oder zumindest nicht prozesssicher einsetzen [5, 13, 18]. Infolge der großen Festigkeit tritt beim Trennen ein weiteres Problem auf: Ein Beschnitt wird überwiegend durch das Laserschneiden ausgeübt, weil die mechanischen Verfahren – wie das Stanzen – zu einem hohen Werkzeugverschleiß führen. Beim Laserschneiden entstehen jedoch in der Randzone der Schnittkante große Aufhärtungen, die zu einer Beeinträchtigung der Crashesicherheit des Bauteils führen können. Bei einer schlagartigen Beanspruchung kann die spröde Aufhärtungszone an der Schnittkante eine Rissinitiierung begünstigen [19].

Die genannten Nachteile haben dazu geführt, dass hochfeste Stähle bisher nicht in dem Maße genutzt werden können, wie es sich die Konstrukteure von Karosserien wünschen. Die Laserwärmebehandlung bietet die Möglichkeit, Bereiche gezielt und lokal zu bearbeiten und dadurch Bereiche mit definierten Festigkeitsprofilen zu erzeugen. Durch lokal entfestigte Bereiche im Bauteil lassen sich zum einen die Umformeigenschaften bei der Kaltumformung bei der Bauteilfertigung verbessern und zum anderen kann die Bildung metallurgischer Kerben beim Punktschweißen und beim Laserschneiden vermieden und dadurch die Crashperformance verbessert werden.

In der vorliegenden Arbeit werden die Einfluss-Wirk-Zusammenhänge zwischen den Verfahrensparametern, den entstehenden Gefügen und den mechanischen Eigenschaften untersucht. Weiterhin werden zwei Ansätze zur Prozessanpassung der Laserentfestigung für homogenere Entfestigungen über der Platinendicke bei großen Vorschubgeschwindigkeiten (> 1000 mm/min) verfolgt. Ein anderer Schwerpunkt der Arbeit ist die Entwicklung eines simultanen Kombinationsprozesses aus Laserschneiden und Laserentfestigen. Weiterhin wird die Integration der Laserentfestigung in Prozessketten am Beispiel von Kaltbandgütern für die Coil- bzw. Platinenbearbeitung und am fertigen pressgehärteten Bauteil betrachtet. Ebenso wird der Einfluss der lokalen Entfestigung auf das Widerstandspunktschweißen untersucht sowie die Crashperformance von laserentfestigten, punktgeschweißten Bauteilen analysiert.

2 Stand der Forschung und Technik

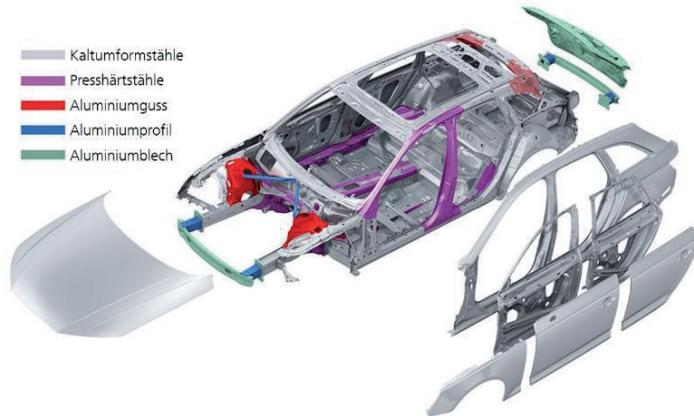
In diesem Kapitel wird der gegenwärtig aktuelle Stand in der Forschung und Technik zum Einsatz von Stahl im Automobilbereich – insbesondere Kaltbandgüten und Presshärstähle – und deren Eigenschaften und Anwendungsgebiete dargestellt. Dabei werden die große Festigkeit dieser Stähle und ihre Auswirkungen auf die Funktionseigenschaften beleuchtet. Anschließend wird die lokale Wärmebehandlung mit Laserstrahlung für die Entfestigung hochfester Stähle vorgestellt und die Laserwärmebehandlung mit einem angepassten Strahlprofil zum Erreichen einer besseren Prozesseffizienz betrachtet.

2.1 Stahleinsatz im Automobil

In einer Marktstudie von McKinsey & Company [20] wird im Bereich „Automotive“ für die Jahre 2010 bis 2030 ein Anstieg der Nutzung von Leichtbaumaterialien im Fahrzeug von 29% auf 67% erwartet. Demnach werden sich die Anteile der Werkstoffe Kunststoff (Glasfaser, Kohlefaser, Polymere), Aluminium und Magnesium nur geringfügig erhöhen, während sich der Anteil von Stahl mit einer Festigkeit unter 550 MPa bis 2030 stärker verringern wird. Andererseits wird erwartet, dass sich der Anteil von Stahl mit einer Festigkeit über 550 MPa von 15% in 2010 auf 38% in 2030 erhöhen wird. Stahl ist zu 100% recycelbar, aus diesem Grund ist Stahl unter gesamtwirtschaftlichen und ökologischen Gesichtspunkten unverzichtbar. *Deshalb wird für die Automobilbranche hochfester Stahl der wichtigste Leichtbauwerkstoff bleiben.* [20, 21]

Die stetige Erhöhung der Anforderungen an die globale und lokale Steifigkeit und an die passive Insassensicherheit führen zu einer beanspruchsgerechten Auslegung der Karosseriestruktur im Sinne des geometrischen Leichtbaus. Dies betrifft sowohl Querschnitte als auch Knoten und Lastenpfade. Im Bereich des Vorder- und des Hinterwagens werden deshalb überwiegend duktile Werkstoffe eingesetzt, die der Energieaufnahme, d.h. der Umwandlung der Crashenergie in Verformungsenergie, dienen (Abbildung 1). Vor diesem Hintergrund wurden Stähle entwickelt, die bei geringfügigen Legierungszusätzen zu einer vergrößerten Festigkeit führen. So entstanden Kaltbandgüten – beispielsweise Mehrphasenstähle und mikrolegierte Stähle – die sich trotz einer großen Kaltverfestigung durch gute Umformeigenschaften auszeichnen. Im Bereich der Fahrgastzelle werden hochfeste Werkstoffe verbaut, damit im Crashfall nur geringe plastische Verformungen auftreten. Dafür sind pressgehärtete Stähle besonders gut geeignet. [9, 22, 23]

Abbildung 1:
Einsatz der Stahl- und
Aluminiumgüten in
der Karosserie am
Beispiel des Audi A4
Avant [24], Freigabe
durch Audi



2.1.1 Kaltbandgüten

Die Stahlkonzepte mit ihren jeweiligen mechanischen Eigenschaften werden gemäß dem „International Iron and Steel Institute“ in folgende Gruppen unterteilt [25, 26]:

- Stähle mit geringer Festigkeit: Streckgrenze unter 210 MPa,
- hochfeste Stähle: Streckgrenze zwischen 210 und 550 MPa,
- ultrahochfeste Stähle: Streckgrenze über 550 MPa.

Neue, hochfeste Kaltbandgüten werden insbesondere für Anwendungen im Automobilbereich entwickelt. Dabei wird das Ziel verfolgt, eine höhere Festigkeit mit einer besseren Bruchdehnung bzw. guter Kaltumformbarkeit zu verbinden. Als Basiswerkstoff dienen weiche, unlegierte Stähle, die aufgrund ihrer ferritischen Matrix ein gutes Umformvermögen – allerdings bei mäßigen Festigkeitswerten – aufweisen. Ein Beispiel für Kaltbandgüten sind die IF-Stähle (interstitielfrei). Die Entwicklung geht über verschiedene Zwischenstufen bis hin zu den ferritischen Mehrphasenstählen (üblicher Begriff in der Literatur: AHSS (Advanced High Strength Steels)), die aufgrund ihrer Kombination von weichen und harten Phasen deutlich höhere Festigkeiten bei einem annähernd gleichbleibenden Umformvermögen aufweisen. [26–28]

Die Festigkeit von Stählen lässt sich durch verschiedene Maßnahmen vergrößern [26, 27]:

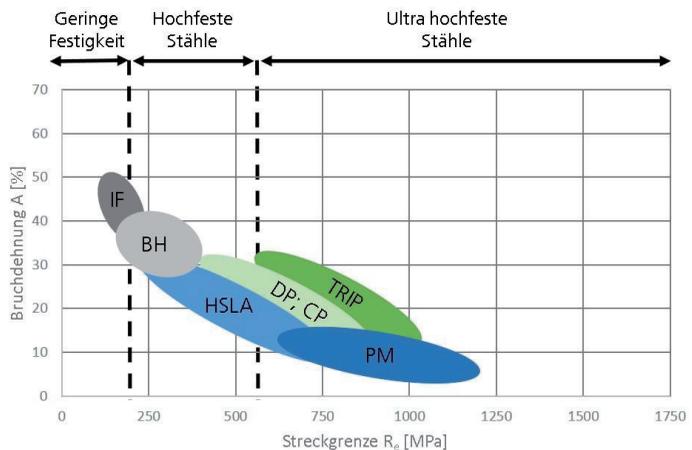
- Mischkristallhärtung durch Legieren von festigkeitssteigernden Elementen,
- Kornfeinung,
- Ausscheidungshärtung beispielsweise durch Carbonitride (bei ferritischen Stählen) der Legierungselemente Titan, Niob, Vanadium,
- Kombination unterschiedlich fester Phasen in einem Gefüge.

Neben diesen Grundkonzepten kann eine weitere Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Stahlwerkstoffen realisiert werden [26, 28]:

- Kaltverfestigung beim Umformvorgang,
- „Bake Hardening“-Effekt bei der Einbrennlackierung.

In Abbildung 2 sind die verschiedenen Stahlsorten bzw. -gruppen der Kaltbandgüten in Abhängigkeit von ihrer Bruchdehnung über der Streckgrenze aufgeführt [26].

Abbildung 2:
Klassifizierung der Kaltbandgüten in Abhängigkeit der Bruchdehnung über der Streckgrenze [25, 26]



„Der ‚Bake Hardening‘-Effekt ist die durch die Alterung hervorgerufene Wiederkehr einer ausgeprägten Streckgrenze“ [26]. Die Besonderheit der ‚Bake-Hardening‘-Stähle (BH) besteht darin, dass sich durch eine Verformung mit anschließender 20 minütiger Wärmebehandlung – z. B. beim Lackeinbrennen der Karosserie bei einer Temperatur von 150 – 200 °C – die Streckgrenze um etwa 40 bis 60 MPa vergrößern lässt. Durch die Verformung werden neue Versetzungen eingebracht, an die sich bei der anschließenden Wärmebehandlung Kohlenstoffatome anlagern. Die dadurch beobachtbare Bildung von Cottrell-Wolken erschweren eine weitere Versetzungsbewegung, sodass der Werkstoff – zusätzlich zur Kaltverfestigung – einen weiteren Streckgrenzenanstieg infolge der Versetzungsblockierung erhält. [26–28]

Stähle werden als mikrolegierte Stähle (HSLA-Stähle; engl.: High Strength Low Alloy) bezeichnet, wenn ihnen 0,01 bis 0,1 Massen-% an Titan, Niob und/oder Aluminium hinzulegiert werden. Beim warmgewalzten Stahl wird – zusätzlich zu den genannten Legierungselementen – oftmals Vanadium und bei kaltgewalztem Stahl Phosphor hinzulegiert [26, 29]. Die Legierungselemente führen in Verbindung mit Kohlenstoff oder Stickstoff dazu, dass es an den Ferritkorngrenzen zu Anlagerungen bzw. zu Ausscheidungen von Karbiden und Nitriden oder Carbonitriden kommt. Schon geringe Mengen an Legierungselementen führen zu einer Vergrößerung der Streckgrenze bzw. Zugfestigkeit. Eine Mischkristallverfestigung wird durch die Elemente Mangan und Silizium erreicht. Auch der bei kaltgewalztem, mikrolegiertem Stahl in der Regel hinzulegierte Phosphor führt zu einer Mischkristallverfestigung. Parallel zur Festigkeitszunahme verringert sich jedoch tendenziell die Umformbarkeit durch Korngrenzenversprödung. [26, 30]

Bei den Dualphasen-Stählen (DP-Stählen) handelt es sich um zweiphasige Stähle, die aus einer ferritischen und einer martensitischen Phase bestehen. Die Martensitphase, die einen Volumenanteil von 10 bis 30% ausmacht, liegt inselförmig an den Ferritkorngrenzen vor. Die DP-Stähle haben aufgrund der weichen Ferritphase eine kleine Streckgrenze und durch die harte Martensitphase eine hohe Zugfestigkeit. Die hohe Festigkeit des Stahls wird sowohl durch die Martensitumwandlung als auch durch eine Erhöhung der Versetzungsdichte infolge einer Volumenänderung bewirkt. [26, 31] Die mechanischen Eigenschaften, insbesondere die hohe Festigkeit bei einer kleinen Streckgrenze, stellen einen guten Kompromiss zwischen Festigkeit und Verformbarkeit dar. Bezogen auf die Zugfestigkeit, weisen DP-Stähle ein kleines Streckgrenzenverhältnis (Verhältnis aus Streckgrenze und Zugfestigkeit) und eine große Kaltverfestigung auf [26–28].

Der TRIP-Effekt (umwandlungsbewirkte Plastizität; engl.: Transformation Induced Plasticity) setzt bei einer verformungsinduzierten Martensitbildung bei Umformung ein. Infolge dieser Umwandlung verbessert sich das Umformvermögen bei der Formgebung, verbunden mit einer Festigkeitssteigerung. Die wichtigsten Legierungselemente sind Mangan und Silizium. Sie verhindern die Carbidbildung und verzögern die Bainitbildung. Mangan dient auch zur Stabilisierung des Restaustenits. Diese Stähle weisen ein großes Kaltverfestigungsvermögen auf und erreichen dadurch eine große Gleichmaßdehnung und eine hohe Zugfestigkeit. [26–28]

Die Komplexphasen-Stähle (CP-Stähle), die im Wesentlichen aus bainitischen Gefügekomponenten aufgebaut sind, zeichnen sich durch ein Mischgefüge aus. Aufgrund der feinen Gefügestruktur lässt sich eine gute Kaltumformbarkeit bei hoher Festigkeit erreichen. [26–28]

Die PM-Stähle (teilmartensitische Stähle) besitzen einen großen Anteil an Martensit in einer mehrphasigen Struktur. Neben Martensit kann auch Bainit vorliegen. Im Vergleich zu den DP-Stählen weisen sie ein größeres Streckgrenzenverhältnis und eine höhere Zugfestigkeit auf. [26–28]

2.1.1.1 Umformen von Kaltbandgütern

In der Unterteilung der Fertigungsverfahren gemäß DIN EN ISO 8580 [32] sind die „Zusammenhalt beibehalten“-Fertigungsverfahren in der zweiten Hauptgruppe unter dem Sammelbegriff

„Umformen“ zusammengefasst. Unter einer Kaltumformung versteht man ein Umformverfahren, bei dem der Werkstoff nicht angewärmt wird. Dadurch soll die Qualität der Umformbarkeit erhöht werden. Eine durch den Umformprozess selbst bewirkte Temperaturvergrößerung wird dabei außer Acht gelassen. Infolge der kurzen Taktzeiten für die Stahlplattenverarbeitung in großer Stückzahl ist die Kaltumformung ein kostengünstiges Fertigungsverfahren [33]. Verfahren für Kaltumformungen von Platinen sind u. a. das Tiefziehen, das Streckziehen und das Pressen. Ein Merkmal der Kaltumformung besteht in der Veränderung der Werkstoffeigenschaften, insbesondere in einer Erhöhung der Festigkeit, die auch nach der Umformung erhalten bleibt. Wichtige Parameter für die Kaltumformbarkeit sind die Fließspannung (Formänderungsfestigkeit) und das Formänderungsvermögen. Infolge der Erhöhung der Zugfestigkeit der Stähle sind bei den konventionellen Blechumform-Verfahren die Umformbarkeit und die Möglichkeiten der Formgebung begrenzt. Bei der Kaltumformung von kaltverfestigtem Stahlband können lokal kritische Umformgrade auftreten, die bei der Umformung zu Rissen führen. Deshalb lassen sich mit maximal verfestigten Stählen nur Bauteile mit einer geringen geometrischen Komplexität herstellen, bei denen der Umformgrad hinreichend klein ist. Alternativ besteht die Möglichkeit weniger feste Stahlsorten zu verwenden. [26, 34]

2.1.2 Presshärstähle

Beim Fertigungsverfahren Presshärten, das auch als Warmumformen oder Formhärten bezeichnet wird, werden Stähle mit erhöhter Temperatur umgeformt (Warmumformung). Beim Presshärten von Mangan-Bor-Stählen wird die Platine bzw. das Halbzeug durch Aufheizen in einem Ofen bei einer Temperatur von ca. 900 bis 950 °C austenitisiert. Die Temperatur wird ca. 5 Minuten lang gehalten. Danach wird die Platine bzw. das Halbzeug in ein wassergekühltes Presshärtewerkzeug eingelegt und dort gleichzeitig umgeformt und abgekühlt. Um durch die Kühlung eine vollständige Umwandlung in Martensit und dadurch die gewünschten hohen Festigkeitswerte zu erhalten, darf die kritische Abkühlgeschwindigkeit von 27 K/s (bei 22MnB5) nicht unterschritten werden [35, 36]. Dies wird durch die Verwendung von gekühlten Werkzeugen gewährleistet [37]. Die Umwandlung des kubisch flächenzentrierten Gitters des Austenits in das raumzentrierte Gitter des Martensits ist ein diffusionsloser Umklappvorgang [38]. Der zwangsgelöste Kohlenstoff im Martensit führt zu einer tetragonalen Verzerrung. Im Prozess der temperierten Umformung lassen sich Bauteile mit einer großen geometrischen Gestaltungsfreiheit, einer hohen Maßgenauigkeit und einer guten Reproduzierbarkeit in einem wirtschaftlichen Großserienprozess herstellen. [22, 36, 39–44].

Vor dem Presshärten werden die Platinen auf die gewünschte Platinenform mit konventionellen Werkzeugen zugeschnitten. Beim Presshärten wird zwischen direkten und indirekten Verfahren unterschieden, die in Abhängigkeit von der Beschichtung verwendet werden. Beim direkten Verfahren werden die erwärmten Platinen in einer einzigen Warmstufe umgeformt und gehärtet, während beim indirekten Warmumformen die in einer Kaltumformstufe vorgeformten Bauteile durch eine anschließende Warmumformung fertig geformt und gehärtet werden. Dieses Verfahren wird immer dann angewendet, wenn große Umformgrade realisiert werden sollen. Beim direkten Verfahren wird in der Regel eine Aluminium-Silizium-Beschichtung (AS) als Zunderschicht verwendet. Bei der Kaltumformung reißt die AS-Beschichtung auf, dadurch verschlechtert sich die