

Ausgekochter Stahl für das Auto von morgen

Besonders fest und zugleich dehnbar - dies zeichnet die Leichtbaustähle aus, die Wissenschaftler um GEORG FROMMEYER am Düsseldorfer MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EISENFORSCHUNG entwickelt haben. Das geringe spezifische Gewicht und die mechanischen Eigenschaften machen das Material zum idealen Werkstoff für die Fahrzeugindustrie. In verschiedenen Kooperationsprojekten mit Industrieunternehmen werden die Stähle jetzt zur Marktreife gebracht.

Wenn man ans Stahlkochen denkt, stellt man sich wohl für gewöhnlich mächtige Hochöfen vor, in denen rot glühende Metallschmelze vor sich hin brodelt. Hat sie die richtige Temperatur erreicht, wird sie einfach abgegossen und flugs in eine neue Form gebracht. So scheint es. Doch die Stahlproduktion ist mehr als überdimensioniertes Blei gießen. Sie ist im wahrsten Sinne des Wortes mit der hohen Schule des Kochens vergleichbar. Um einen Stahl mit bestimmten Eigenschaften herzustellen, bedarf es der richtigen Zutaten, des richtigen Rezepts und einer gehörigen Portion Kreativität.



Eisenforschung

Georg Frommeyer ist einer dieser findigen Stahlexperten. Am Düsseldorfer Max-Planck-Institut für Eisenforschung hat der Professor für Werkstofftechnik mit seinen Mitarbeitern einen neuen Stahltyp entwickelt, der von großen Konzernen als "deutlicher Entwicklungssprung" bezeichnet wird. Diese Stähle sind zugleich sehr leicht, extrem stabil und besonders dehnungsfähig. Damit eignen sich diese - wie es am Max-Planck-Institut heißt - "hochfesten supraduktilen TWIP/TRIP Leichtbaustähle" vor allem für die Fahrzeugindustrie. Ganz egal, ob Auto oder Eisenbahn, stets geht es darum, die Verkehrsmittel zugleich stabiler, leichter und sicherer zu machen. Zum einen sollen die Insassen bei Unfällen besser geschützt sein; zum anderen streben die Konstrukteure leichtere Karosserien an, um den Kraftstoffverbrauch und die Abgasemissionen zu senken.

Die Stahlhersteller haben längst erkannt, dass ihnen Aluminium und neue Materialien wie Magnesium oder Kunststoffe zunehmend Konkurrenz machen. Um im Rennen zu bleiben, müssen ihre Stähle leichter, fester und stabiler sein als die Produkte der Konkurrenten. Zudem wachsen die Ansprüche an Sicherheit und Crashstabilität - eine echte Herausforderung.

Stahl besteht zum großen Teil aus Eisen. Seine unterschiedlichen Eigenschaften erhält er unter anderem durch Zugabe (Legieren) verschiedener Metalle wie Mangan, Nickel und Chrom. So entstehen rostfreie Stähle, hoch- oder gar höchstfeste Stähle - eben der richtige Werkstoff für jede Anwendung. An Karosserien stellen die Autohersteller besondere Anforderungen. Sie sollen stabil genug sein, um das Gewicht des Fahrzeugs zu tragen, ohne sich zu verformen oder zu schwingen. Sie sollen starr genug sein, um die Insassen bei einer Kollision wie eine Schutzhülle zu umgeben; und bei einem Unfall sollen sie sich kalkulierbar verformen, um die Aufprallenergie zu schlucken. Freilich lassen sich nicht alle Eigenschaften mit einem einzigen Werkstoff erreichen.

Alter Werkstoff mit neuen Facetten

Der Stahl aus den Düsseldorfer Max-Planck-Laboren aber ist ein wahrer Multifunktionswerkstoff, der nicht alle, aber doch ganz verschiedene Funktionen übernehmen kann. "Vor wenigen Jahren noch ging die Fachwelt davon aus, dass die Eigenschaften von Stählen bereits weitgehend ausgereizt sind", sagt Georg Frommeyer. "Durch Zulegieren anderer Elemente ließen sich bereits eine Vielzahl von Funktio-

nen einstellen." Die Max-Planck-Forscher waren aber davon überzeugt, dass sich aus dem altbewährten Werkstoff noch mehr herausholen lässt - zunächst nur aufgrund theoretischer Überlegungen und langjähriger Erfahrung.



Kochen und Gießen von Stahlproben für Forschungszwecke

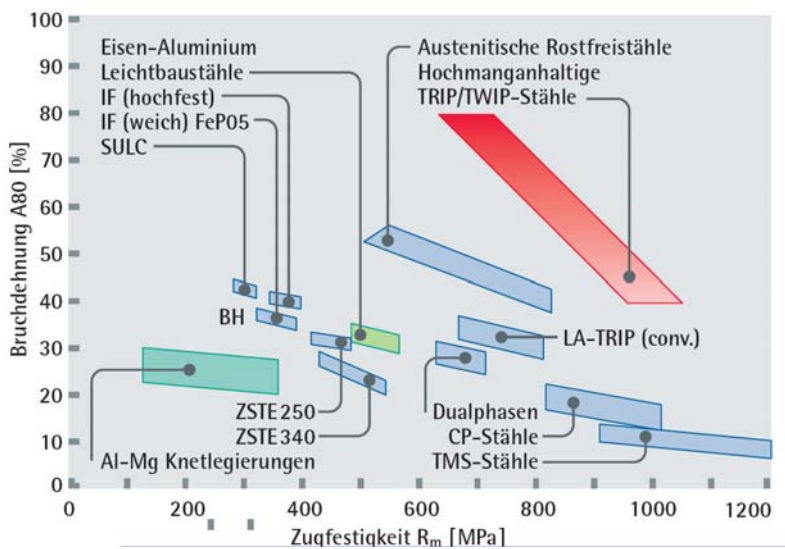
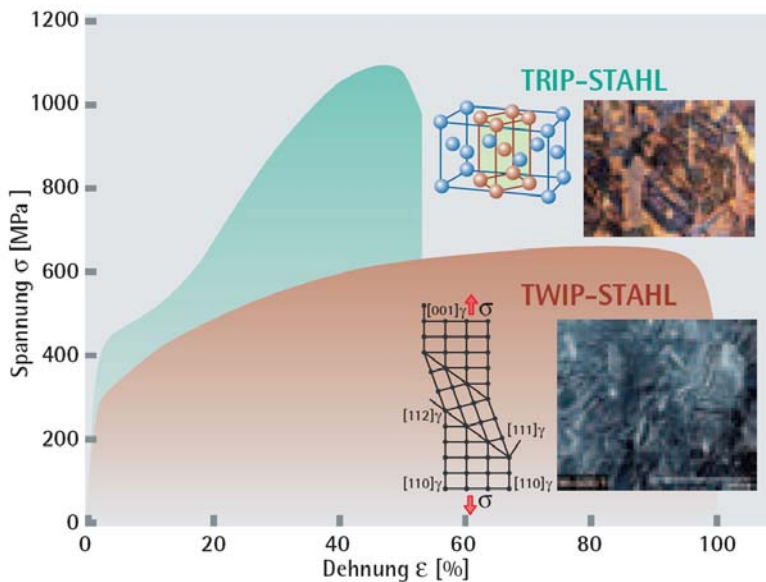
Die Eigenschaften verschiedener Stähle werden durch ihre Kristallgitterstrukturen bestimmt, also durch die räumliche Anordnung der Atome. Durch Zugabe der Legierungselemente bilden sich bestimmte Kristallstrukturen bevorzugt aus. Werkstoffforscher sprechen von energetisch begünstigten Kristallgitterstrukturen. So lässt sich der Charakter des Stahls fein justieren. Aus thermodynamischen Berechnungen folgerten die Wissenschaftler, dass sich für die Entwicklung der neuen Leichtbaustähle vor allem eine Kombination aus Mangan, Silizium und Aluminium eignen müsste. Zum einen sind diese Elemente leichter als Eisen, zum anderen zwingen sie das Kristallgitter in bestimmte Strukturen: Eisen kann zwischen verschiedenen Kristallanordnungen wechseln.

Fremdatome ändern den Charakter

So gibt es eine so genannte kubisch flächenzentrierte Anordnung, die Fachleute auch als Austenit bezeichnen. Die Eisenatome sitzen hier auf den Ecken des Kristallgitterwürfels, und zusätzlich befindet sich je ein Atom in der Mitte der Würfelflächen. Des Weiteren existiert die kubisch raumzentrierte Variante. Hier ordnen sich die Eisenatome wiederum auf den Würfecken an; außerdem sitzt eines im Zentrum des Würfels. Darüber hinaus gibt es einen hexagonalen Typ, in dem die Eisenatome in Sechseck-Form verteilt sind. Sowohl die kubisch raumzentrierte als auch die hexagonale Form werden traditionell auch als Martensit bezeichnet. Je nachdem, wie groß die Gehalte der einzelnen Legierungselemente (der fremden Atome im Kristallgitter) sind, verändert sich das Kristallgitter und somit der Charakter des Stahls.

In den großen Werkhallen des Max-Planck-Instituts kochten die Wissenschaftler ihre verschiedenen Stahlliegierungen und untersuchten verschiedene Varianten. Mannshohe Schmelzanlagen stehen dort. Mehr als zentnerschwere Gussblöcke lassen sich mit unterschiedlichen Schmelzverfahren herstellen und anschließend zu Blechen auswalzen. An anderen Maschinen testen Techniker fingerbreite Stahlproben; die werden in eine Art Schraubstock eingespannt und mit einer bestimmten Kraft gedehnt. Wie stark gibt der Stahl nach? Wann reißt er?

Die Messwerte, die die neu entwickelten Stähle lieferten, waren überwältigend. Die Stähle waren extrem fest und zugleich sehr dehnbar. Als besonders fest erwies sich Stahl mit einem Gehalt von **15 Prozent Mangan und jeweils 3 Prozent Aluminium und Silizium**: Er lässt sich um mehr als 50 Prozent dehnen. Zugleich verfestigt er sich stark, ohne zu zerreißen. Er widersteht Spannungen von bis zu 1100 Megapascal - entsprechend etwa dem Gewicht von zehn Elefantenbullen auf einer Briefmarke. Herkömmliche höherfeste Karosseriestähle reißen bereits bei etwa 700 Megapascal. Verblüffend war auch das Verhalten von Stahl mit einem Anteil von **25 Prozent Mangan und jeweils 3 Prozent Aluminium und Silizium (MnAlSi 25 3 3)**. Zwar verfestigte er sich nicht so stark, ließ sich aber um etwa 90 Prozent in die Länge ziehen, ohne zu zerreißen. Frommeyer: "Eine solche Duktilität, also Dehnbarkeit, erreicht nicht einmal Gold, das als ausgesprochen duktil gilt. Bei 60 Prozent Dehnung ist Schluss."



Das Spannungs-Dehnungs-Diagramm (oben) macht den unterschiedlichen Charakter von TRIP- und TWIP-Stahl deutlich. TRIP-Stahl kann doppelt so viel Spannung aufnehmen, dehnt aber nur um die Hälfte. TWIP-Stahl (A_5 ca. 90 % !). Das untere Diagramm zeigt im Vergleich mit herkömmlichen Stählen (blau), dass TRIP/TWIP-Stähle (rot) höchsten Kräften widerstehen können.

Beide Kurven mit Strukturzeichnungen und Mikroskopaufnahmen der Stahlarten ergänzt Diagramm unten: 13 unterschiedliche Stahlarten sind zwischen den Achsen für Bruchdehnung und Zugfestigkeit eingeordnet, am weitesten rechts oben (für hohe Dehnung und Zugfestigkeit) stehen die TWIP- und TRIP-Stähle

Die neue Legierung ähnelt den so genannten **TRIP-Stählen (Transformation Induced Plasticity - durch Kristallgitter-Transformation induzierte plastische Verformbarkeit)**, die seit etwa 10 Jahren auf dem Markt sind. Auch sie zeichnen sich durch eine hohe Festigkeit von bis zu 700 Megapascal aus. Ihre Dehnbarkeit hingegen ist mit rund 35 Prozent eher moderat. **Ihr Verhalten - Dehnung bei gleichzeitiger Verfestigung - ist auf Umformungen im Kristallgitter zurückzuführen. Werden Kräfte auf den Stahl ausgeübt, kippen die Kristallgitter aus der kubisch flächenzentrierten Austenit-Form in die kubisch raumzentrierte - den Martensit.** Diese kollektive Scherung der Kristallgitterebenen (die Transformation und nicht die Versetzungen) bewirkt letztlich die Dehnbarkeit im herkömmlichen TRIP-Stahl.

Für die Autoproduktion ist das von großer Bedeutung, denn Karosserie-Bleche werden zumeist mit dem so genannten Tief- oder Streckziehen umgeformt. Dabei wird ein Blech in eine Presse gelegt und in die richtige Form gedrückt. Je dehnbarer ein Stahl, desto eher macht er die Verformung mit, ohne zu

zerreißen. Allerdings wird beim herkömmlichen TRIP-Stahl bereits beim Tiefziehen eine gewisse Menge des Austenit-Anteils in seine martensitische Form verwandelt - jene feste Kristallstruktur, die sich kaum noch dehnen lässt. Für den Fall eines Crashes bleiben nur etwa fünf Prozent Dehnungsreserve übrig.

Auch der neue Stahl aus Düsseldorf hat TRIP-Eigenschaften. Dank der besonderen Legierungszusammensetzung der im Eisenkristall gelösten Mangan-, Silizium- und Aluminium- Atome verfügt dieser aber über einen doppelten TRIP-Effekt. Er besitzt also eine Art doppelte Dehnungsreserve. Der Grund: Die Legierungselemente ermöglichen zwei martensitische Umwandlungen - zunächst einen Wechsel vom Austenit zum hexagonalen Martensit und im zweiten Schritt von der hexagonalen Struktur zum kubisch raumzentrierten Martensit. Wirken Kräfte auf den Stahl, etwa beim Tiefziehen, wandelt sich der Austenit zunächst zum Teil in die erste martensitische Stufe um, in die hexagonale Kristallform. Wird der Stahl ein zweites Mal beansprucht, kippt das hexagonale Gitter in die endgültige kubisch raumzentrierte Form - wie beim herkömmlichen TRIP-Stahl. Auf diese Weise behält der Stahl auch nach dem Tiefziehen ein gute Portion Dehnungsvermögen. Bis zu 35 Prozent kann sich das Material bei einem Aufprall noch verformen, ehe es versagt.

So eignet sich Frommeyers TRIP-Stahl beispielsweise für den Seitenaufprall-Schutz. Das Material gibt nach und federt die Wucht des Aufpralls ab. Zugleich verfestigt es sich aber extrem stark - was verhindert, dass die Seitenteile zu sehr nachgeben und die Fahrzeuginsassen verletzt werden.



Ganz schön nachgiebig: Gezogene und verdrehte TRIP/TWIP-Stahl-Proben geben einen Eindruck ihrer guten Verformbarkeit. Die zweite Probe von unten wurde einmal, die untere Probe dreimal um ihre eigene Achse verdreht.

TRIP/TWIP-Stahl-Proben -- durch Zug und Torsion extrem verformbar

Die besondere Dehnbarkeit der Legierung mit einem Mangan-Gehalt von 25 Prozent lässt sich mit dem doppelten TRIP-Effekt indes nicht erklären. "Ursache sind hier kleine Fehler im Kristall - die sogenannten Stapelfehler", erläutert Georg Frommeyer. Stapelfehler kann man sich als Verschiebung in einem Raster aus säuberlich auf- und nebeneinander gestapelten Kristallwürfeln vorstellen. Schiebt man von oben einen zusätzlichen Würfelstapel in das Gitter hinein, werden die benachbarten Kristallwürfel zur Seite gedrängt. An einem solchen Stapelfehler kann eine Kristallstruktur umklappen. Da dieser Umklappmechanismus an einer Spiegelebene abläuft, entstehen regelmäßig gespiegelte Kristallbereiche. Experten sprechen von **Zwillingsbildung**. Und die macht sich von außen als extreme Dehnung bemerkbar.

Auf die Zündtemperatur kommt es an

Für die Werkstoffforscher bestand die Herausforderung darin, diesen Mechanismus zu erleichtern. Denn um die Zwillingsbildung zu starten, muss die so genannte Stapelfehler-Energie aufgebracht werden - eine Art Zündtemperatur. Ist die erforderliche [Stapelfehlerenergie](#) zu hoch, bleibt die Zwillingsbildung aus. Wird der Stahl gedehnt, verschiebt sich der Kristall stattdessen an [Versetzungen](#), ungeordneten mikroskopisch kleinen Kristallbaufehlern. So lässt sich der Stahl zwar ebenfalls verformen. Die Dehnung aber ist wesentlich geringer, da sich die Versetzungen nach kurzer Zeit blockieren und gegenseitig an der Ausbreitung hindern. Der Werkstoff reißt. Wie sich zeigte, ist die Stapelfehler-Energie in der MnAlSi-25-3-3-Legierung so weit herabgesetzt, dass die Zwillingsbildung rasch einsetzt. Bereits bei Kräften um die 300 Megapascal beginnt sich der Stahl plastisch zu verformen. Experten sprechen vom [TWIP-Effekt \(Twinning Induced Plasticity - durch Zwillingsbildung induzierte Plastizität\)](#).

"Auch der TWIP-Effekt ist für die Nutzung in Fahrzeugen von großer Bedeutung", betont Udo Brüx, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Düsseldorfer Max-Planck-Institut. "Ein Fahrzeug besitzt verschiedene Crashbauteile - zum Beispiel im Motorraum, die sich bei einem Aufprall gezielt zusammenfallen. Hier ist hohes Energieabsorptionsvermögen gefragt." Und genau das besitzen die TWIP-Stähle mit ihrer einzigartigen Dehnungsreserve. Beinahe noch wichtiger, sagt Brüx, ist ihre Fähigkeit, Kräfte extrem schnell aufzunehmen. Selbst bei einem Aufprall mit hoher Geschwindigkeit setzt der TWIP-Effekt ein. Die Bewegung von Versetzungen hingegen ist geschwindigkeitsabhängig: Je schockartiger der Aufprall, umso weniger setzen sie sich fort. Im Extremfall reißt der Stahl - das Energie-Aufnahmevermögen ist dahin. Für die Automobilhersteller ist gerade die schnelle Dehnungsfähigkeit des TWIP-Stahls von großem Interesse.

Frommeyers Arbeitsgruppe kooperiert seit längerer Zeit mit der BMW AG und dem Ford-Forschungszentrum in Aachen. An Prototypen und verschiedenen Karosseriebauteilen werden dort [Tiefziehfähigkeit](#) und andere Eigenschaften getestet. Zu den Partnern gehören auch die Salzgitter AG und die ThyssenKrupp Stahl AG. "Wir räumen den TWIP/ TRIP-Stählen große Chancen ein", sagt Volker Schwich, Vorstand Stahl und Verarbeitung bei der Salzgitter AG. Das Unternehmen hat im vergangenen Jahr ein Karosseriekonzept vorgestellt, etwa auf der Internationalen Automobilausstellung in Frankfurt, das leichter und zugleich stabiler war als alle Stahlvorgänger. Das Fachpublikum war positiv überrascht. TWIP/TRIP-Stähle würden hervorragend in dieses Konzept hineinpassen und Bauteile ermöglichen, die leichter als Aluminiumkomponenten sind. "Natürlich geben wir uns keinen Illusionen hin", sagt Schwich, "das Auto der Zukunft wird aus einem Multimaterialmix bestehen - aus ganz verschiedenen Werkstoffen, die vor allem leicht und zugleich stabil sein sollen. Doch die Stahlindustrie stelle sich der Herausforderung.

Aus dem Labor in die Fabrikhalle

Derzeit rollen indes noch keine TWIP/TRIP-Stähle vom Band. Zuvor müssen die Prozesse optimiert, die Produktion aus dem Labormaßstab in eine effiziente großtechnische Herstellung umgesetzt werden. So fließt die TWIP/TRIP-Stahlschmelze anders als vergleichbare Sorten, was die Verarbeitung beeinflusst. Das so genannte Bandgießen (DSC - Direct Strip Casting, s. auch SL-Vorlesung), bei dem die Schmelze auf eine Art Förderband gegossen wird, ist ein Verfahren, das besonders geeignet erscheint, um diese Werkstoffe herzustellen. Inzwischen ist die Entwicklung der Produktionsprozesse soweit fortgeschritten, dass die Einführung der TWIP/TRIP-Stähle im Automobilbau bei den neuen Fahrzeuggenerationen ab 2009 oder 2010 erste Anwendungen finden könnte.

Unter der Bezeichnung TRIP-Stahl sollen sie jedoch nicht ausgeliefert werden. Schließlich verhalten sie sich deutlich anders als herkömmliche TRIP-Stähle. Letztlich hat die neue Klasse hochfester TRIP-Stähle mit den klassischen TRIP-Qualitäten nur noch wenig gemein. Die Salzgitter AG wird sie deshalb unter der Bezeichnung [HSD-Stahl - High Strength and Ductility](#) - (hohe Festigkeit und Duktilität) auf den Markt bringen. "Ein kleiner Nachteil ist ihr im Vergleich mit höchstfesten Stählen etwas ge-

ringeres E-Modul - also eine geringere Steifigkeit. So müssen tragende Karosserieteile aus HSD eventuell konstruktiv anders gestaltet werden, um so steif zu sein wie Werkstücke aus hochfesten Stählen.

Die Karosserie macht gut ein Viertel des gesamten Fahrzeuggewichts aus. Unterm Strich wird sich durch den Einsatz von HSD-Stählen folglich deutlich Gewicht einsparen lassen. Denn zum einen sind diese Stähle dank der geringen Dichte ihrer Legierungselemente ausgesprochen leicht. Zum anderen sind sie zwar nicht so steif, aber immerhin etwa doppelt so fest wie die derzeit verwendeten höherfesten Karosseriestähle. Die TWIP/TRIP-Stähle lassen sich also in dünneren Blechstärken verbauen. Wie hoch die Gewichtseinsparung am Ende sein wird ist noch nicht genau zu sagen. Denn je nachdem, wo die Automobilproduzenten das Material einsetzen, liegt der Wert höher oder niedriger. Man geht derzeit von einer **Gewichtseinsparung zwischen 10 und 20 Prozent** aus, wobei für manche Bauteile auch bis zu 30 Prozent möglich sind.

HSD- Stähle (High Strength and Ductility)

HSD-Stähle sind hochmanganhaltig ($15\% < \text{Mn} < 25\%$) und enthalten ca. 3 % Al und ca. 3 % Si. Sie zeichnen sich durch ihre hohe Festigkeit bei gleichzeitig hoher Duktilität aus und sind damit konventionellen Stählen weit überlegen. So werden Festigkeitswerte von 600-1400 MPa bei Bruchdehnungen von 70-20 % erreicht !

Die neuen HSD®-Stähle werden auch TWIP (Twinning Induced Plasticity) -Stähle genannt. Sie werden für eine Vielzahl von Anwendungen entwickelt, bei denen insbesondere komplexe geometrische Formen mit Forderungen nach hoher Festigkeit verbunden sind. Beispielhaft seien aufwändige Maschinenbauteile genannt. Im Automobilbau lassen sich Gewichtseinsparungen sowie Verbesserungen im Crashverhalten realisieren. Darüber hinaus bietet der Werkstoff dem Automobilkonstrukteur erweiterte Designfreiheiten.

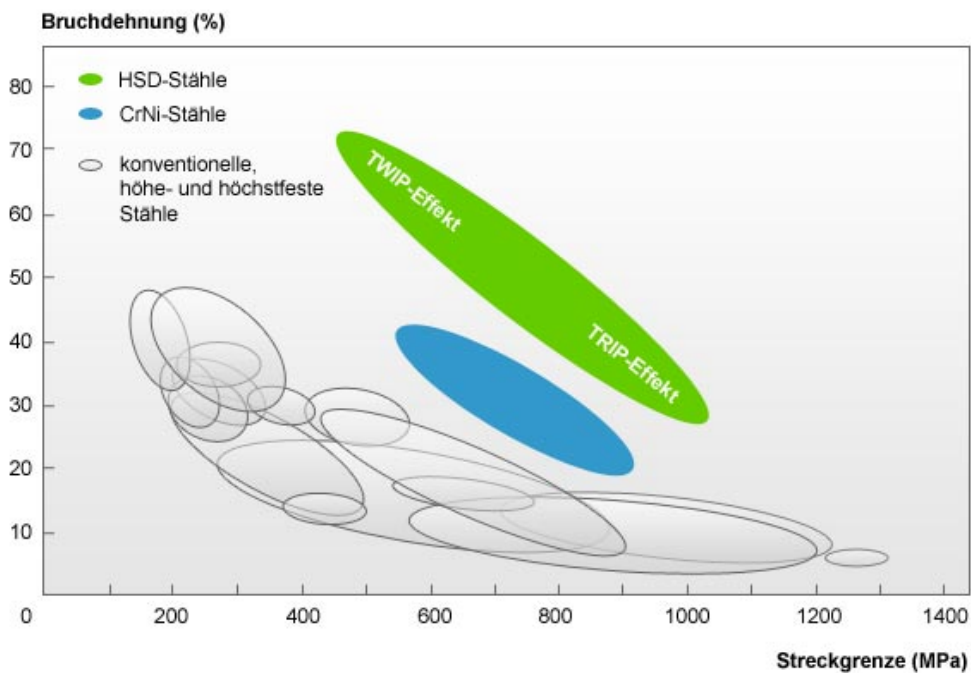


Abb. 1:
TRIP- und TWIP-
(HSD)-Stähle im Ver-
gleich zu konventio-
nellen Güten



Abb. 2:
HSD-Stahl, tordiert