

A large offshore oil and gas platform is situated in the middle of a deep blue ocean under a clear blue sky with scattered white clouds. The platform is a complex of steel structures, including a tall derrick, various cranes, and a network of pipes and walkways. The water is a deep, vibrant blue, and the sky is a bright, clear blue.

Werkstoffe der nächsten Generation für Hochenergiepumpen

Wassereinjektionspumpen unterstützen die Förderung von Öl und Gas aus Offshore-Feldern. Je tiefer die Lagerstätte, desto höher ist der Arbeitsdruck dieser Pumpen. Dabei müssen die Laufräder einem Druck von 1'000 bar und 60'000 Lastzyklen pro Minute standhalten. Um die Zuverlässigkeit der Pumpen zu verbessern, sind die Spezialisten von Sulzer kontinuierlich auf der Suche nach den am besten geeigneten Werkstoffen und Prozesstechnologien für die Zukunft.

Es sind die nicht sichtbaren Unterschiede zwischen Pumpen, die über die mögliche Einsatzdauer in kritischen Anwendungen entscheiden. So hat der für das Laufrad oder das Gehäuse verwendete Werkstoff einen grossen Einfluss auf die Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit. Täglich stehen weitere Werkstoffe für additive Fertigungsverfahren zur Verfügung, die es Herstellern erlauben, neue Wege in der Fertigung zu beschreiten.

Die intelligente Nutzung von Prozesstechnologien und Werkstoffen ist ein wichtiger Schlüssel für die Entwicklung wettbewerbsfähiger Produkte. Dabei ist nicht der beste Werkstoff entscheidend – vielmehr kommt es darauf an, den geeigneten Werkstoff mit dem am besten geeigneten Verfahren zu kombinieren. Spielt die Lieferzeit die wichtigste Rolle, gewinnt ein schnellerer Produktionsprozess. Bei korrosiven oder abrasiven Medien sind verbesserte Werkstoffe oder Beschichtungen die erste Wahl.

Steigende Anforderungen an Wasserinjektionspumpen

Die Exploration und Förderung von Öl und Gas aus Offshore-Lagerstätten zwingt die Öl- und Gasindustrie dazu, ihre Grenzen zu erweitern. Immer mehr Wasserinjektionspumpen werden im Tief- und Tiefstwasser eingesetzt. Je tiefer die Öl- und Gasressourcen liegen, desto höher ist die Temperatur der gepumpten Fluide – ein geothermischer Effekt. Und je grösser die Tiefe, in der die Pumpe arbeitet, desto mehr korrosive Stoffe befinden sich im eingepressten Wasser.

Anfang der 1970er-Jahre lag der Förderdruck von Injektionspumpen bei rund 350 bar. Im Jahr 2001 stellte Sulzer mit der Installation von vier HPcP-Pumpen im Golf von Mexiko mit einem Förderdruck von 605 bar einen neuen Weltrekord auf. In Erwartung steigender Anforderungen startete Sulzer 2009 eine Konzeptstudie zur Entwicklung einer Injektionspumpe mit einem Arbeitsdruck von 800 bar. Aufgrund von Kundenrückmeldungen wurde die Messlatte für die Entwicklung noch einmal höher gelegt, und Sulzer entwickelte eine Pumpe mit einem Arbeitsdruck von 1'000 bar.

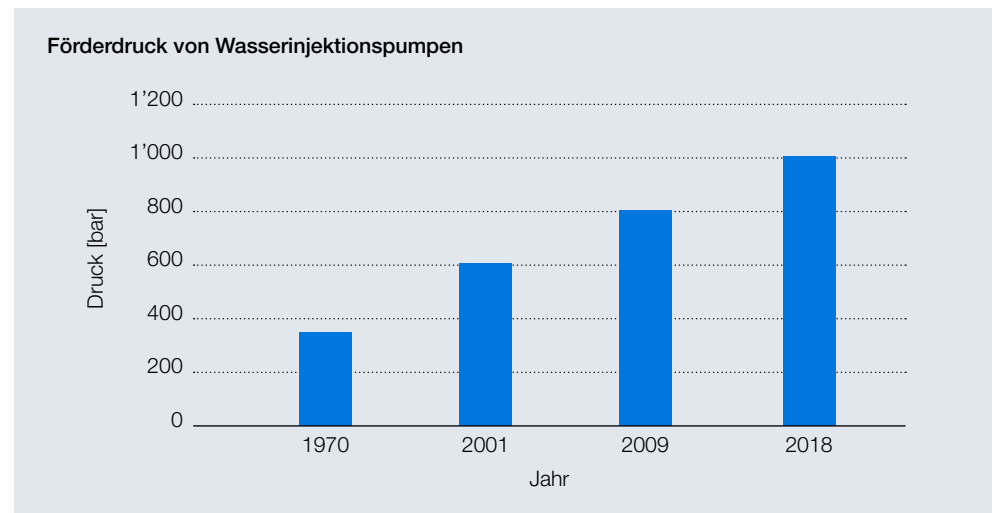


Abb. 1 Entwicklung des Förderdrucks von Wasserinjektionspumpen seit 1970.

Wie kann ein solch hoher Druckanstieg erreicht werden? Zum Teil durch Hinzufügen weiterer Pumpenstufen, aber hauptsächlich durch die Erhöhung der Förderhöhe pro Stufe. Dadurch steigt allerdings die mechanische Belastung der in den Pumpen verwendeten Werkstoffe. Normalerweise wird rostfreier Super-Duplex-Stahl für Hochdruckpumpen verwendet, doch bei einem Druck von 1'000 bar kommt auch dieser Stahl an seine mechanischen Grenzen.

Neben intelligenten technischen Lösungen erfordern zukünftige Pumpenentwicklungen deshalb verbesserte Werkstoffe, die eine höhere Festigkeit bei gleicher oder sogar verbesserter Korrosionsbeständigkeit bieten. Allerdings sind diese Werkstoffe nicht leicht zu finden, da Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit grundsätzlich im Gegensatz zueinander stehen.

Die Herausforderung besteht darin, geeignete Werkstoffe für die Laufräder zu finden, da diese nicht wie ein Pumpengehäuse aus hochfesten, niedrig legierten Stählen mit einer korrosions- und verschleissfesten Beschichtung gefertigt werden können. Neben der Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit spielt die Dauerfestigkeit des Laufradmateri als eine entscheidende Rolle, da diese Komponenten einer sehr grossen Zahl von Lastzyklen ausgesetzt sind.

Lastzyklen einer Pumpe

In einer gewöhnlichen Pumpe mit Diffusor passiert jede Laufradschaufel pro Umdrehung etwa zehn Diffusorschaukeln. Dabei entsteht jedes Mal eine Druckspitze am Laufrad, die zu einer kleinen elastischen Verformung des Bauteils führt (Abb. 2).



Simulationsvideo einer Laufradverformung ansehen.

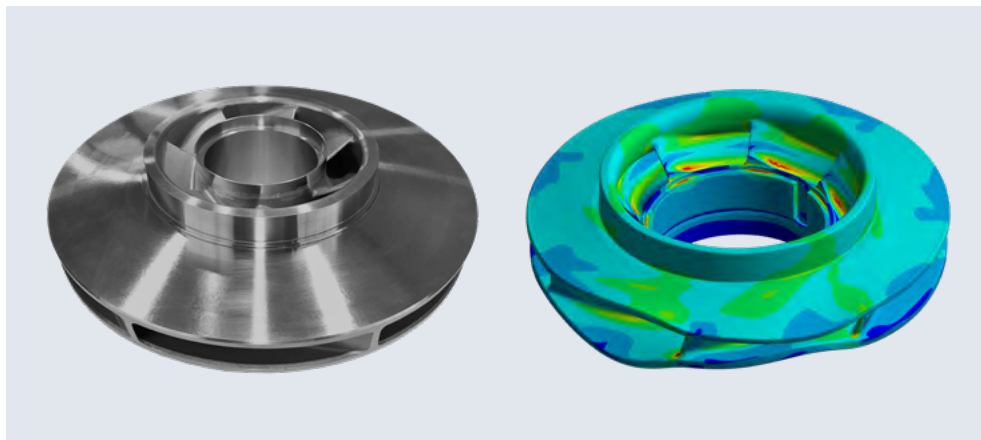


Abb. 2 Simulation einer Laufradverformung unter Teillastbedingungen durch FE-Analyse.

Bei einer Pumpendrehzahl von $6'000 \text{ min}^{-1}$ unterliegt das Laufrad $60'000$ Lastzyklen in der Minute. Zum Vergleich: Ein durchschnittliches Herz schlägt 90 Mal in der Minute, und der Motor eines Autos läuft mit einer Drehzahl von etwa $3'000 \text{ min}^{-1}$. Bei einem Dauerbetrieb von einem Jahr (bzw. $525'600$ Minuten) macht dies für die Pumpe $31,5$ Milliarden ($3,15 \times 10^{10}$) Zyklen (Abb. 3).

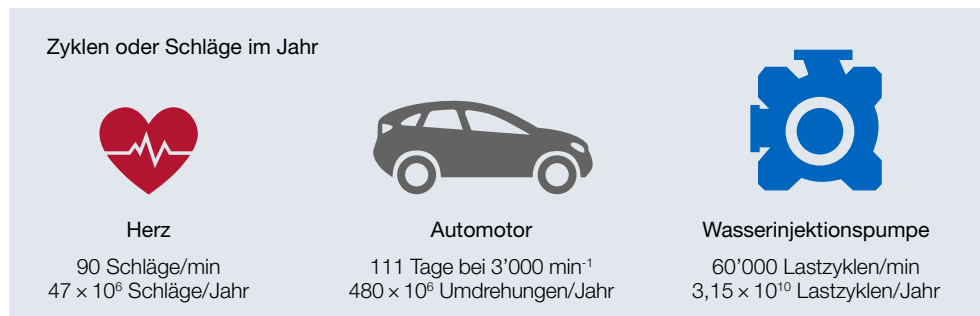


Abb. 3 Vergleich der Zyklen bzw. Schläge im Jahr in verschiedenen Bereichen.

Neue Werkstoffe erforderlich

Um den zukünftigen Anforderungen an Hochenergiepumpen gerecht zu werden, agiert Sulzer vorausschauend und prüft ständig neue Werkstoffe und Prozesstechnologien. Das Unternehmen ist sich der entscheidenden Bedeutung des Pumpenwerkstoffs bewusst und beschäftigt ein global aufgestelltes Team von 18 Werkstoffspezialisten.

„Potenzielle neue Laufradmaterialien für die nächste Generation von Wasserinjektionspumpen zu finden, ist eine Herausforderung“, erklärt Thomas Kränzler, Leiter Global Core Technology Materials. „Eine Verbesserung der mechanischen und Korrosionseigenschaften beeinflusst häufig die Fertigungsmethoden oder erhöht die Produktionskosten unverhältnismässig. Daher beschränkt sich unsere Evaluierung nicht auf Werkstoffspezialisten. Wir arbeiten bei der Wahl und Qualifizierung neuer Werkstoffe auch eng mit Fertigungsexperten zusammen.“

Werkstoffwahl

Eine zeitgemäße Werkstoffauswahl ist objektiv – dies zeigt sich bei der quantifizierten Auswahl eines Laufradwerkstoffs, der fester, aber mindestens genauso korrosionsbeständig sein muss wie gegossener rostfreier Super-Duplex-Stahl. Die Quantifizierung der beiden entscheidenden Werkstoffeigenschaften Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit wird durch den Einsatz einer Datenbank erleichtert. Eine hohe Festigkeit steht im Zusammenhang mit einer guten Beständigkeit gegen die Bildung von Ermüdungsrissen. Dennoch sind weitere Korrelationen notwendig, da mehr Materialdaten für Schmiede- als für Gussvarianten vorliegen. Zur Einschätzung und Beurteilung der Beständigkeit gegen Lochfrasskorrosion nutzen die Werkstoffingenieure den sogenannten PREN-Wert (Pitting Resistance Equivalent Number). Der PREN-Wert errechnet sich aus den Gewichtsprozentanteilen wichtiger chemischer Elemente ($\text{PREN} = 1 \times \%Cr + 3,3 \times \%Mo + 16 \times \%N$). Klar erkennt man in einem Diagramm die Optimierung des Leistungsvermögens mithilfe der beiden Haupteigenschaften quer durch alle Werkstoffe in der Datenbank. Die Kreisflächen in Abb. 4 stellen die Eigenschaften eines bestimmten Werkstoffs dar, wobei Super-Duplex-Stahl als Nr. 1 gekennzeichnet ist. Die Lage der Flächen gibt das relative Leistungsvermögen an, wobei gleichwertige Werkstoffe entlang einer diagonalen Linie liegen und das Leistungsvermögen nach oben rechts im Diagramm zunimmt. Der vielversprechendste Werkstoff ist hier eine spezielle Legierung auf Nickelbasis (Nr. 2). Die quantifizierte Werkstoffwahl zeigt somit, dass es nur eine begrenzte Zahl von Legierungen gibt, die ein besseres Leistungsvermögen als rostfreier Super-Duplex-Stahl aufweisen, von denen nur eine besonders vielversprechend ist.

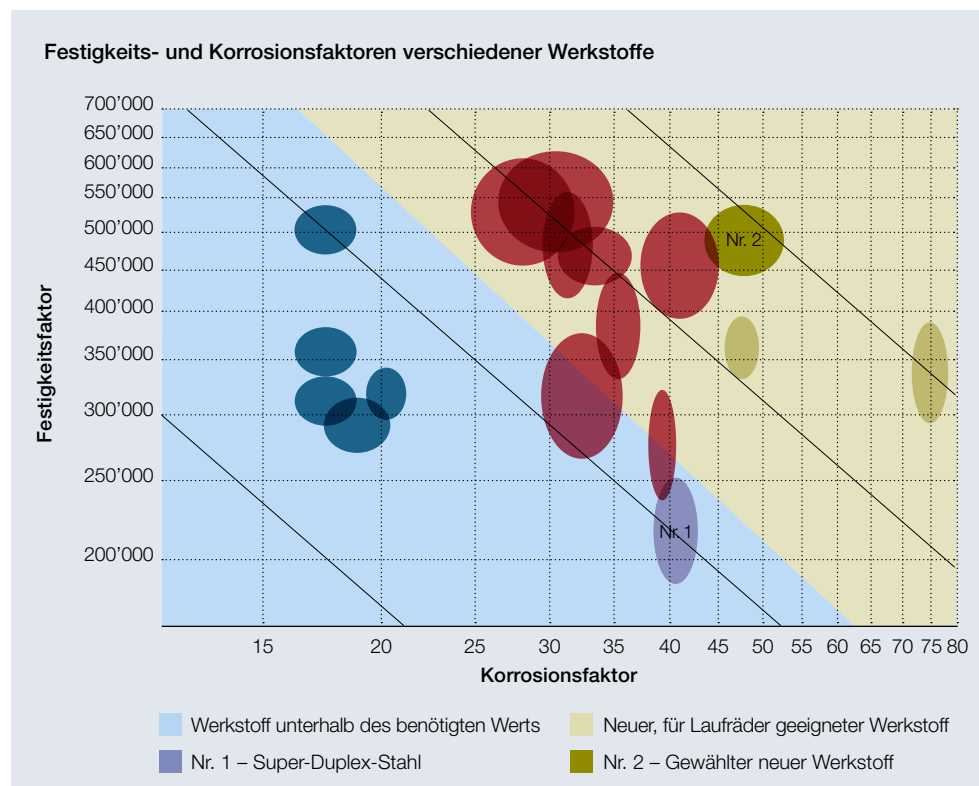


Abb. 4 Auswahldiagramm zur Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit.

Prozessauswahl

Die Auswahl der Verfahren zur Verarbeitung der Werkstoffe ist rein qualitativ und einfacher als die Werkstoffwahl. Geschmiedete oder bearbeitete Werkstoffe sind zwar bekannt für ihre relativ günstigen mechanischen Eigenschaften, doch eine Tatsache schliesst sie sofort aus der Wahl aus: Es gibt keine Werkzeuge, mit denen die komplexen Hohlräume eines geschlossenen Laufrads

hergestellt werden können. Das Zusammenfügen mehrerer geschmiedeter Teile mittels Schweißen oder Löten würde wiederum die Dauerfestigkeit ernsthaft gefährden. Die meisten verbleibenden modernen und traditionellen Verfahren bieten sowohl Vor- als auch Nachteile. Diese sind in einer Übersicht in Abb. 5 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass beim 3-D-Druck durch Laserschmelzen Teile praktisch aus mehreren kleinen Gussteilen aufgebaut werden, was unweigerlich zu Störstellen bei der Erstarrung und zu Restspannungen führt. Daher ist der Vakuum-Feinguss aufgrund der Verfügbarkeit und der günstigen Kosten vorzuziehen. Hierbei handelt es sich um einen bewährten Produktionsweg für ausscheidungsgehärtete, nickelbasierte Superlegierungen.

Vorteilhafte Eigenschaften		Nicht-Schmiedeverfahren im Vergleich			
		Vakuum-Feinguss	Laser-schmelzen (3-D-Druck)*	Binder Jetting (3-D-Druck)*	Pulver-metallurgie
Werkstoff-eigenschaften	Richtungsunabhängige Eigenschaften	+	--	+	+
	Kleine Kristallgrösse	-	+	+	+
	Geringe Restspannung	+/-	---	+	+
	Hohe Dichte	--	-	--	--
	Gleichmässige Zusammensetzung	-	+	+	+
Werkstoff-flexibilität	Geeignet für reaktive Legierungen	+	-	-	-
	Legierungsflexibilität	+	-	-	+
	Mehrere Werkstoffe / Umhüllung	-	-	-	+
Konstruktion/ Abmessungen	Komplexe Formen	+	+++	++	-
	Grosse Teilegrössen	+	-	-	-
	Nahe an endgültiger Form	+	++	+	+
	Geringe Schrumpfung	--	+	-	-
	Hohe Oberflächengüte	+	+/-	+/-	+/-
Kosten	Kostengünstige Ausgangsmaterialien	+	-	-	-
	Geringer Arbeitsaufwand	-	+	+	-
	Weniger Abfall (Speiser/Stützen)	--	-	+	+
Verarbei-tungszeit	Kurze Produktionszeit	+	+++	++	-
	Behälterlose Verarbeitung	-	+	+	-
Wiederholbar-keit	Einstufige Schmelzsequenz	+	-	+	+
	Niedrige Entropie (Schritte)	+	-	-	+

Abb. 5 Vergleich verschiedener Verfahren für die Laufradfertigung.

* Siehe auch STR 2/2018 – Additive Fertigung

Vakuum-Feinguss

Vakuum-Feinguss ist ein dreidimensionales Reproduktionsverfahren, das vor der eigentlichen Herstellung des Metalllaufrads einige Schritte erfordert. Zunächst wird ein sogenanntes verlorenes Modell, eine Kopie des Laufrads aus einem niedrigschmelzenden Kunststoff, per 3-D-Druck hergestellt und mit mehreren Schichten Keramikschlicker umhüllt. Anschliessend wird das Modell in einem Ofen erhitzt, wobei der Kunststoff verbrennt und der Keramikschlicker eine feste, aber brüchige hohle Form bildet. Im dritten Schritt wird das geschmolzene reaktive Metall in die warme Keramikform gegossen. Dies geschieht unter Vakuum, um Verschmutzungen zu verhindern. Nachdem sich das Metall in der Form verfestigt hat, wird das gegossene Laufrad durch Zerstoren der brüchigen Keramikform freigelegt. Diese Grundzüge des Feingusses haben eine lange Geschichte. Laut Archäologen ist die Verwendung von Modellen aus Bienenwachs und Tonformen bereits Tausende Jahre alt. Das aktuelle Vakuum-Feingussverfahren ist verschmutzungsresistent und nutzt sogar moderne Methoden wie die Fertigung von Kunststoffmodellen per 3-D-Druck.

Wärmebehandlung und Zuverlässigkeit

Durch Wärmebehandlung werden zwei spezifische Faktoren in der statistischen Verteilung der Werkstofffestigkeit beeinflusst. Das Ergebnis ist eine verbesserte Zuverlässigkeit im Hinblick auf die Verteilung angelegter Spannungen. Wichtig zu wissen ist, dass anstelle von Einzelwerten eine natürliche Streuung – oder Verteilung – der Festigkeits- und Spannungswerte vorliegt. Wie in Abb. 6 dargestellt, beeinflusst heissisostatisches Pressen (HIP) die Streuung der Dauerfestigkeit. Nach dem heissisostatischen Pressen ist die Streuung der Dauerfestigkeiten geringer, was die Zuverlässigkeit erhöht (Abb. 7). HIP funktioniert wie ein grosser Dampfkochtopf. Das Verfahren findet bei 1'200 °C nahe am Schmelzpunkt des Metalls statt und dauert mindestens drei Stunden. Dabei wird mithilfe von inertem Argon ein Druck von 1'000 bar aufgebaut, durch den Hohlräume im Gussteil geschlossen werden, die sonst die Beständigkeit gegen Ermüdungsrissbildung beeinträchtigen würden. Dies entspricht nahezu dem Druck, der im Marianengraben, dem tiefsten bekannten natürlichen Punkt der Erde, ca. 11 km unter der Meeresoberfläche herrscht. Ein zweites Wärmebehandlungsverfahren verbessert die Zuverlässigkeit durch Erhöhung der durchschnittlichen Dauerfestigkeit. Angesichts der steigenden Beanspruchungen durch immer tiefere Ölfelder wird die durchschnittliche Werkstofffestigkeit durch Lösungsglühen und Ausscheidungshärten unter Vakuum erhöht, um die Gefahr eines Versagens zu reduzieren (siehe Abb. 8). Darüber hinaus gibt es weitere Massnahmen, um die Festigkeitsverteilung zu beeinflussen. Durch kontinuierliche Regelung der inneren Spannungen bzw. Restspannungen während des gesamten Prozesses wird die Streuung der Festigkeit reduziert. Da sich die Legierung für ein langsames Abkühlen eignet, werden die Teile bei Sulzer nicht abgeschreckt, sondern unter Schutzgas kontrolliert abgekühlt. Heissisostatisches Pressen und kontrolliertes Ausscheidungshärten tragen also zur Verbesserung der Zuverlässigkeit bei, indem sie sowohl die Verteilung der Festigkeit verringern als auch deren Durchschnittswert erhöhen.

Vorteile von HIP	Nachteile von HIP
<ul style="list-style-type: none"> ■ Minderung von Restspannungen ■ Reduzierung der Variation in der Dauerfestigkeitsverteilung ■ Minderung der richtungsabhängigen Eigenschaften ■ Minderung der Einschränkungen bei der zerstörungsfreien Prüfung ■ Minderung der Frühausfallraten ■ Verdichtung des Materials, Schliessen von inneren Hohlräumen 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Gefahr von grossen Kristallen und Schmelzen ■ Schrumpfen des Teils bei zu geringer vorheriger Dichte ■ Begrenzte Grösse des Druckgefässes ■ Begrenzte Abkühlgeschwindigkeit ■ Zusätzliche Kosten

Abb. 6 Vor- und Nachteile von heissisostatischem Pressen (HIP).

Auswirkung von heissisostatischem Pressen auf die Festigkeitsverteilung

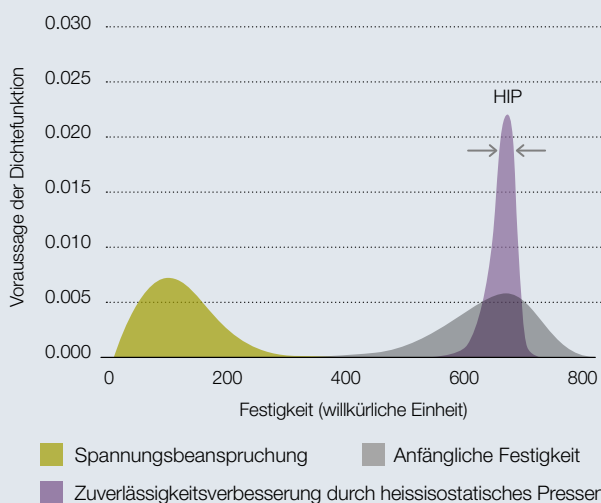


Abb. 7 Verringerung der Festigkeitsstreuung durch heissisostatisches Pressen (HIP) und Minderung innerer Spannungen.

Auswirkung von Ausscheidungshärten auf die Festigkeitsverteilung

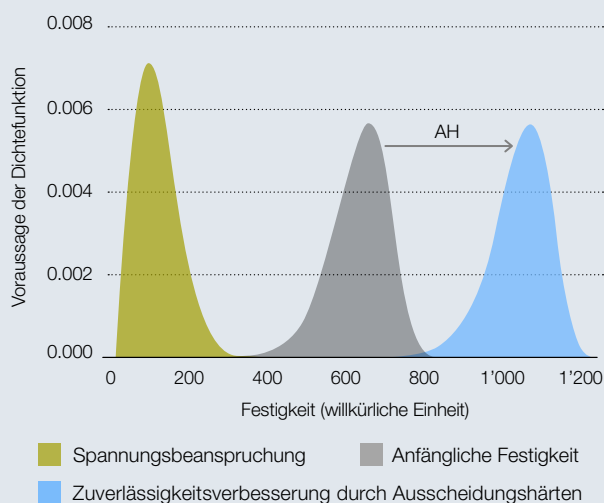


Abb. 8 Durchschnittliche Erhöhung der Festigkeit durch Ausscheidungshärten (AH).