

---

# Wärmebehandlung von Verbindungselementen

White Paper

# Wärmebehandlung von Verbindungselementen

---

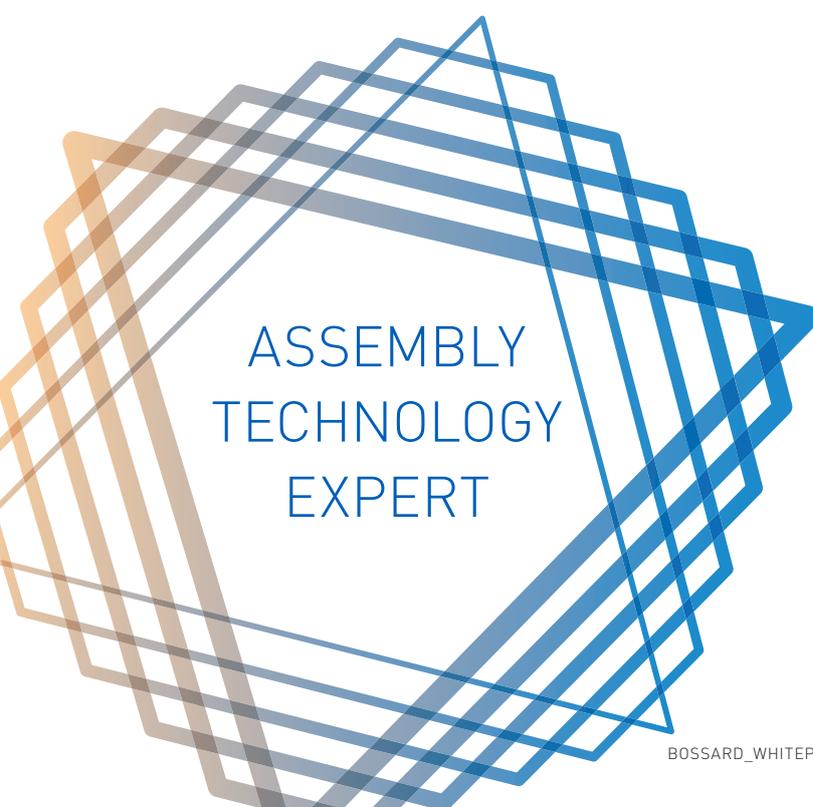
von Fadi Saliby

Bossard Expert Team  
Bossard Kanada

[www.bossard.com](http://www.bossard.com)

Alle Rechte vorbehalten © 2024 Bossard

Die erwähnten Empfehlungen und Hinweise sind im praktischen Einsatz durch den Leser hinreichend zu überprüfen und für deren Anwendung als geeignet zu erklären. Änderungen vorbehalten.



ASSEMBLY  
TECHNOLOGY  
EXPERT

## WÄRMEBEHANDLUNG VON VERBINDUNGSELEMENTEN

# Einleitung

Verbindungselemente werden aus einer Vielzahl von Werkstoffen gefertigt. Entscheidend für die Wahl des jeweils richtigen Werkstoffs sind Anwendungsbereich und Einsatzumgebung. Stähle und nicht rostende Stähle werden am häufigsten verwendet, Aluminium und andere Nichteisenlegierungen werden ebenfalls eingesetzt. Abhängig vom gewählten Werkstoff sind unterschiedliche Prozesse erforderlich, um die richtigen mechanischen Eigenschaften zu erzielen. Durch eine Wärmebehandlung werden die mechanische Festigkeit, die Duktilität und, bei manchen Legierungen, die

Korrosionsbeständigkeit gesteigert. Im Folgenden werden einige Beispiele von Werkstoffen besprochen, die einer Wärmebehandlung unterzogen werden müssen, bevor sie eingesetzt werden können.

### Stähle

Unlegierte und legierte Stähle werden am häufigsten für die Herstellung von Verbindungselementen verwendet. Die Stähle sind folgendermaßen klassifiziert:

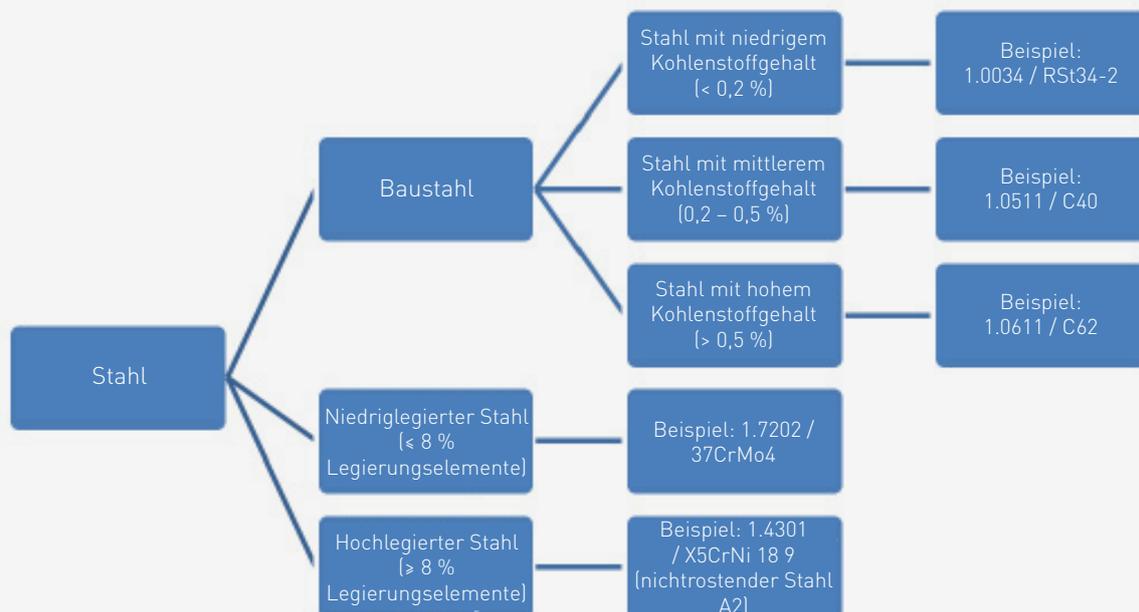


Abb. 1: Stahlklassen

Vor der Herstellung der Verbindungselemente wird der dafür eingesetzte Stahldraht einer Wärmebehandlung unterzogen, um die Kaltumformung zu ermöglichen. Diese Art der Wärmebehandlung wird Weichglühen genannt. Dabei wird die Festigkeit des Stahls reduziert, die Kaltumformbarkeit verbessert und somit die Werkzeugkosten verringert. Nach der Umformung des Drahtabschnittes zum Verbindungselement weist der Stahl aufgrund der mechanischen Verformung abschnittsweise eine leicht erhöhte Festigkeit auf, erfüllt jedoch noch nicht die Standards der Festigkeitsklassen und -güten für hochfeste Verbindungselemente (Festigkeitsklasse 8.8 / 10.9 / 12.9).

Daher werden die Verbindungselemente nach der Umformung einer weiteren Wärmebehandlung unterzogen, der sogenannten Vergütung. Diese besteht aus den Schritten Härten und Anlassen.

## Vergütung: Härten und Anlassen

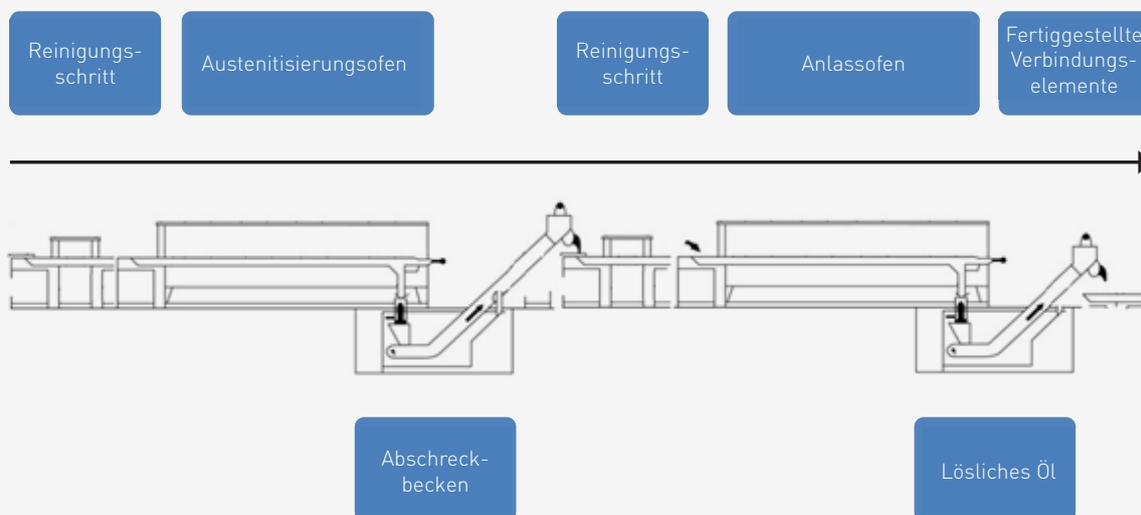


Abb. 2: Vergütungsprozess: Härten (Austenitisieren + Abschrecken) und Anlassen

Hierbei handelt es sich um das in der Industrie am häufigsten verwendete Wärmebehandlungsverfahren. Beim Austenitisieren werden die Verbindungselemente normalerweise eine bestimmte Zeit lang bis auf 815 – 870°C erhitzt und dann abgeschreckt. Dabei entsteht durch Gefügeumwandlung eine extrem harte und spröde Mikrostruktur, der sogenannte Martensit. Das geläufigste Abschreckmittel dabei ist ein temperiertes Öl. Der gebildete Martensit ist gekennzeichnet durch:

- eine sehr hohe Festigkeit / Härte
- Eigenspannungen
- geringe Duktilität und
- niedrigere Zähigkeit

Daher wird unmittelbar im Anschluss eine weitere Wärmebehandlung durchgeführt, das sogenannte Anlassen. Durch das Anlassen werden Festigkeit und Härte des Verbindungselements leicht reduziert, die Duktilität gesteigert sowie Zähigkeit und Formbeständigkeit verbessert. Durch Regelung von Temperatur und Dauer des Anlassprozesses kann die gewünschte Festigkeit eingestellt werden. In Abbildung 3 sehen sie einige Beispiele dafür, wie die Vergütungstemperatur die endgültige Härte von 4 verschiedenen Stählen beeinflusst.

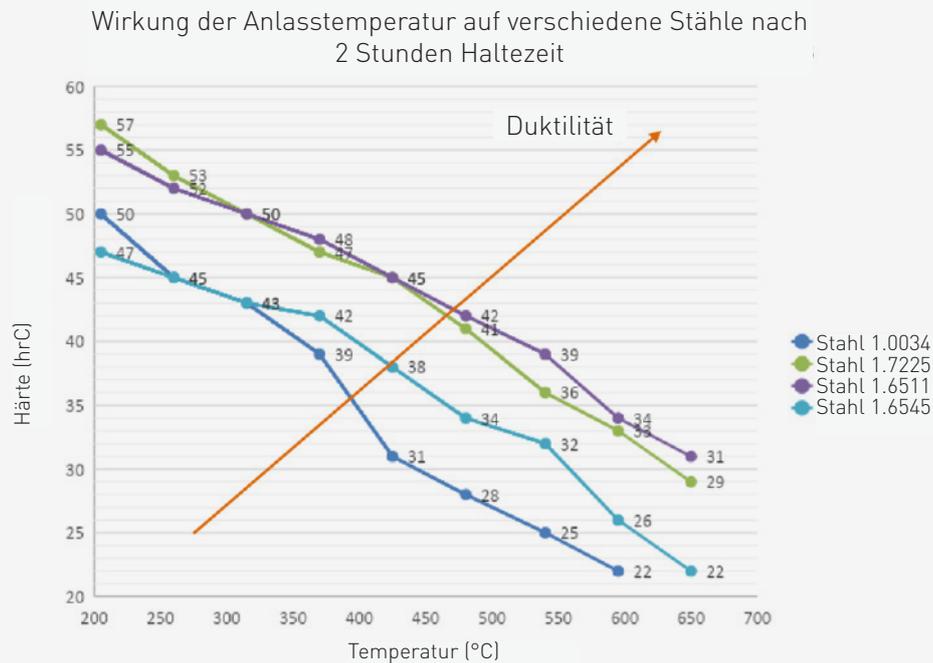


Abb. 4: Wirkung der Anlasstemperatur (Quelle: ASM Handbook: Band 4 – „Heat Treating“)

## Nichtrostende Stähle

Nichtrostende Stähle sind als eisenbasierte Legierungen mit mindestens 10,5 % Chrom klassifiziert. Sie können in die folgenden 5 Gruppen eingeteilt werden:

Arten	Chemische Zusammensetzung	Allgemeine Eigenschaften
Austenitisch	Min. 16% Chrom und 6% Nickel	Mittlere Temperatur- und Korrosionsbeständigkeit
Ferritisch	15 bis 18% Chrom / geringer Kohlenstoffgehalt	Mittlere Korrosionsbeständigkeit
Martensitisch	10,5 bis 18% Chrom / bis 2,5% Nickel hoher Kohlenstoffgehalt	Hohe Festigkeit und mittlere Korrosionsbeständigkeit
Duplex	19 bis 26% Chrom / 1 bis 8% Nickel / bis 4,5% Molybdän	Höhere Festigkeit und Korrosionsbeständigkeit als austenitische Stahlgüten
Ausscheidungshärtend	Chrom zwischen 11,75 und 17% / hoher Nickel- und oder Aluminiumgehalt	Hohe Festigkeit und gute Korrosionsbeständigkeit

### Austenitische Stähle

**Austenitische Stähle** wie 1.4301 (A2) und 1.4401 (A4) können nicht durch eine Wärmebehandlung gehärtet werden. Diese Art von Edelstahl erhält seine mechanischen Eigenschaften ausschliesslich durch die Kaltverfestigung während der Herstellung (Umformung, Gewindewalzen). In einigen Fällen wird jedoch eine Wärmebehandlung durchgeführt, um Korrosionseigenschaften zu verbessern und Eigenspannungen aus anderen Herstellungsprozessen wie z.B. Schweißen zu entfernen. Durch die Kaltverfestigung wird aber auch die magnetische Permeabilität gesteigert – daher kann eine zusätzliche Wärmebehandlung auch durchgeführt werden, um bei Gegenständen, die eine niedrige magnetische Permeabilität erfordern, die Effekte der Kaltverfestigung zu entfernen.

### Ferritische Stähle

**Ferritische Stähle** wie 1.4003 können nur geringfügig durch Kaltverfestigung gehärtet werden. Durch Wärmebehandlungen kann die Festigkeit dieser Art von Stahl nicht erhöht werden. Die Verfestigung während der Kaltumformung verringert jedoch die Duktilität und macht damit eine vollständige Glühbehandlung notwendig, um diese zurückzugewinnen.

### Martensitische Stähle

**Martensitische Stähle** wie 1.4005, 1.4057 oder 1.4104 können wie unlegierte und legierte Stähle vergütet werden. Diese Güten werden entweder in Öl oder Luft abgeschreckt.

### Duplex Stähle

**Duplex Stähle** wie SAF 2205 ® (UNS S31803) werden verwendet, wenn eine hohe Festigkeit (doppelt so hohe Streckgrenze wie bei normalen austenitischen Edelstählen) und eine höhere Korrosionsbeständigkeit im Hinblick auf eine chloridinduzierte Spannungsrisskorrosion gefordert ist. Diese Stähle bestehen aus einer Mischung von zwei parallel vorliegenden Mikrostrukturen: Ferrit und Austenit, welche durch einen gesteuerten Vergütungsprozess eingestellt wird.

### Ausscheidungshärtbare Stähle

**Ausscheidungshärtbare Stähle** gibt es in drei Varianten: martensitisch mit niedrigem Kohlenstoffgehalt, semiaustenitisch und austenitisch. Jede Art muss ganz spezifisch wärmebehandelt werden, um die gewünschten mechanischen und Korrosionseigenschaften zu erzielen. Die Ausscheidungshärtung ist dabei ein Wärmebehandlungsprozess, bei dem ebenfalls die Werkstofffestigkeit durch Bildung inkohärenter intermetallischer Phasen erhöht wird. Diese Art der Wärmebehandlung kann auch Legierungen von Nichteisenmetallen wie Aluminium, Titan und Kupfer durchgeführt.

## Aluminiumlegierung

Aluminiumlegierungen können in nichtaushärtbare und aushärtbare Legierungsgruppen eingeteilt werden. Die nichtaushärtbaren Aluminiumlegierungen entsprechen den Serien 1XXX, 3XXX, 4XXX und 5XXX. Diese erhalten ihre Festigkeit durch den Anteil zugegebener Legierungselemente und die Kaltverfestigung beim Umformen und Gewindeformen. Je höher der Umformgrad, umso grösser die Festigkeit.

Die aushärtbaren Aluminiumlegierungsgruppen 2XXX, 6XXX und 7XXX erfordern ein Lösungsglühen, Abschrecken und Auslagern (warm oder kalt), um die gewünschten mechanischen Eigenschaften zu erhalten. Bei dieser Ausscheidungshärtung werden intermetallische Phasen aus Aluminium- und Legierungselementen gebildet, die in der richtigen Grösse die Festigkeit signifikant erhöhen. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die gängigsten Aluminiumlegierungen und Wärmebehandlungszustände:

Legierung und Zustand	Wärmebehandlung <sup>1</sup>	Härte (HRB) <sup>2</sup>	Zugfestigkeit (MPa) / Streckgrenze (MPa) / Dehnung (%) Min. – Probestab <sup>2</sup>
2024-T4	Lösungsglühen bei 495°C mit anschl. Kaltauslagerung bei Raumtemperatur	70-85	427 / 275 / 10
6061-T6	Lösungsglühen bei 530°C mit anschl. Warmauslagerung bei 160°C	40-50	290 / 241 / 10
7075-T73	Lösungsglühen bei 490°C mit anschl. 2-Stufen Warmauslagerung bei 107°C + 177°C	80-90	469 / 386 / 10

## Titanlegierungen

Titanlegierungen werden verwendet, wenn maximaler Korrosionsschutz, Festigkeit und Gewichtseinsparungen von Bedeutung sind. Je nach Legierung können bei gleicher Festigkeit im Vergleich zu hochfestem Stahl bis zu 40 % an Gewicht eingespart werden. Angesichts der Eigenschaften dieser Legierung fällt die Wahl nicht schwer, insbesondere in weniger kostengetriebenen Industrien wie der Luft- und Raumfahrt und im Autorennsport. Bei der Herstellung von Verbindungselementen wird hauptsächlich Titanlegierung TiAl6V4 (Grade 5) verwendet. In der folgenden Tabelle finden sie die Wärmebehandlungen und die mechanischen Eigenschaften:

Legierung	Wärmebehandlung <sup>1</sup>	Härte <sup>2</sup>	Zugfestigkeit (MPa) / Streckgrenze (MPa) / Dehnung (%) Min. – Probestab <sup>2</sup>
TiAl6V4 (Grade 5)	Lösungsglühen bei 955 – 970°C (1 Std.), Abschrecken in Wasser und Warmauslagern (z.B. 4 – 8 h bei 480 - 595°C oder 2 – 4 h bei 705 - 760°C)	30-39 HRC	896 / 827 / 10

<sup>1</sup> ASM Handbook – Volume 4

<sup>2</sup> ASTM F468

## Nickellegierungen

Nickelbasislegierungen werden immer dann verwendet, wenn eine hohe Korrosions- und hitzebeständigkeit erforderlich ist. Anwendungsbeispiele sind Flugzeug- und Gasturbinen sowie Kryotanks.<sup>3</sup> Ein Beispiel für eine Legierung, die bei der Fertigung von Verbindungselementen eingesetzt wird, ist Inconel® 718. Dieser Werkstoff kann für Anwendungen bei -250 – 700°C verwendet werden.

Legierung	Wärmebehandlung <sup>1</sup>	Härte (HRB) <sup>2</sup>	Zugfestigkeit (MPa) / Streckgrenze (MPa) / Dehnung (%) Min. – bearbeitete Probe <sup>2</sup>
Inconel® 718 (AMS 5662)	Lösungsglühen bei 980°C (1h) mit Luftabkühlung und anschl. Warmauslagerung bei 720°C, Abkühlen auf 620°C und Halten bis insgesamt 18h, Luftabkühlung	331 HBW	1275 / 1034 / 12

<sup>1</sup> ASM Handbook – Volume 4

<sup>2</sup> ASTM F468

<sup>3</sup> <http://www.specialmetals.com/documents/Inconel%20alloy%20718.pdf>

In der folgenden Grafik werden die Mindest-Festigkeitsbereiche der einzelnen Legierungen dargestellt:

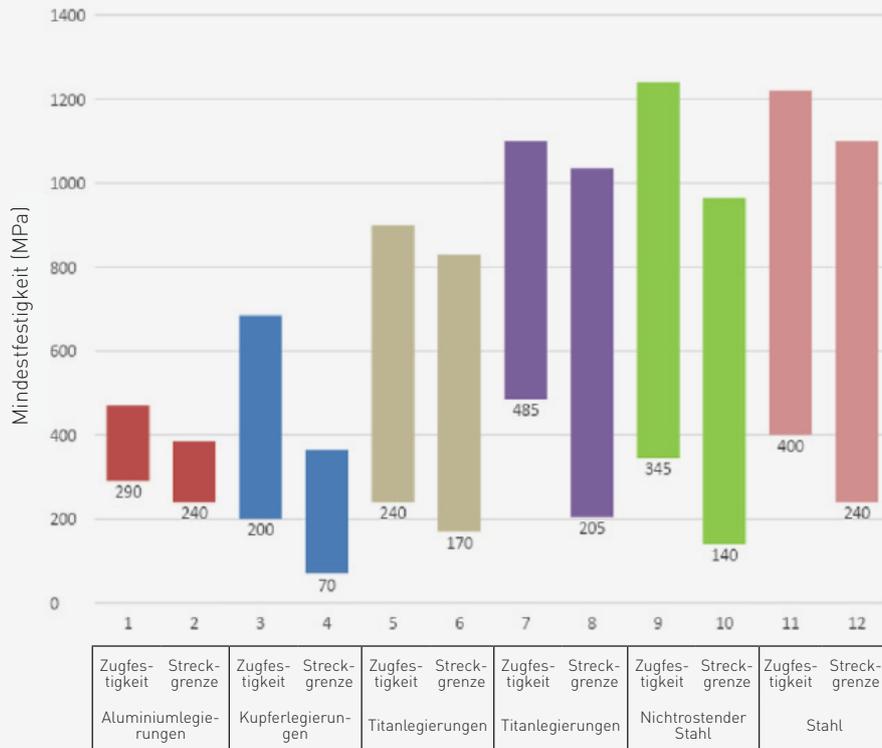


Abb. 5: Mindestfestigkeitsbereiche verschiedener Legierungen

Die einzelnen Legierungen erfordern unterschiedliche Wärmebehandlungen, um die gewünschten Eigenschaften zu erzielen. Einige Legierungen eignen sich für die Fertigung von Verbindungselementen ohne zusätzliche Wärmebehandlung. Sind für die Anwendung jedoch hochfeste Eigenschaften erforderlich, so muss eine angemessene Wärmebehandlung durchgeführt werden. Wenn sie an weiteren Informationen zu den Wärmebehandlungen von Verbindungselementen interessiert sind, steht Ihnen Bossard jederzeit zur Verfügung.

Literaturangaben:

1. ASM Handbook – Band 4
2. ASTM F468
3. ASTM F593
4. ISO 898-1
5. www.specialmetals.com



Wenn Sie weitere Unterstützung benötigen oder spezielle Anforderungen an die Wärmebehandlung von Verbindungselementen haben, besuchen Sie bitte unsere Kontaktseite unter [www.bossard.com](http://www.bossard.com) und sprechen Sie mit dem Bossard-Kundendienstmitarbeiter.