

# 1 Nachbehandlungsverfahren von Schweißnähten

Unter Schweißnahtnachbehandlung versteht man im Allgemeinen eine Behandlung der Schweißnähte nach Beendigung der Schweißarbeiten zur Verbesserung der Eigenschaften von Schweißverbindungen.

## *Kategorien von Nachbehandlungsverfahren*

Man kann hier die Nachbehandlungsverfahren grob in drei Kategorien einteilen:

1. Qualitätsverbesserung der Schweißverbindung bei Oberflächenfehlern
2. Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit bei CrNi-Stählen
3. Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit bei Schweißkonstruktionen

## **Verbesserung der Oberflächenqualität bei Schweißverbindungen**

Zu schlechten Schweißverbindungen aufgrund von Oberflächenfehlern zählen neben den herkömmlichen Schweißnahtmängeln die am häufigsten sichtbaren Fehler wie unterschiedliche Grobheit der Schuppung, Einschlüsse der Oberflächenschlacke, konkave/konvexe Nahtausbildung sowie Schweißspritzer.

Einige dieser Fehler sind in der Wahl des Schweißverfahrens begründet oder haben ihre Ursache in der Handfertigkeit des Schweißers.

## **Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit bei CrNi-Stählen**

Die Korrosionsbeständigkeit von Schweißverbindungen wird neben dem Grundwerkstoff, dem Schweißzusatz und dem Schweißverfahren auch sehr stark von der Schweißnahtnachbehandlung beeinflusst. Je nach zukünftigem Anwendungsbereich, geforderter Optik und Korrosionsbeständigkeit wird die Schweißnaht geschliffen, gebeizt, elektropoliert oder gestrahlt, um die beim Schweißen entstehenden Anlaufarben zu entfernen.

Gestrahlte Oberflächen sind in der industriellen Praxis häufig anzutreffen, da sie deutlich schneller und kostengünstiger herzustellen sind als geschliffene, gebeizte oder polierte Oberflächen.

### **Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit bei Schweißkonstruktionen**

Da aufgrund der praktischen Erfahrungen von Dipl.-Ing. Peter Gerster in seiner Funktion als Gerichtssachverständiger für Schweißnahtschäden die meisten Schadensfälle (bis zu 75 %) auf Ermüdungsversagen speziell bei Schweißkonstruktionen zurückzuführen sind, wurde es immer wichtiger, entsprechende Nachbehandlungsverfahren einzusetzen.

Schadensfälle stellen einen erheblichen Verlust für die Wirtschaft dar. Die Ursachenfindung bzw. Ursachenerforschung und die Mängelbeseitigung sind daher von großer Bedeutung.

Bereits in vielen Untersuchungen wurde festgestellt, dass die meisten Schadensfälle trotz erheblicher Qualitätssicherungsmaßnahmen auf grobe Fehler bei der Planung, der Herstellung oder beim Betrieb von Maschinen und Anlagen zurückzuführen sind, wobei sowohl auf das konstruktive als auch auf das fertigungstechnische Gebiet gleiche Fehleranteile entfallen. Auswertungen von Schadensfällen zeigen, dass Schäden häufig durch eine Überlagerung gleichzeitig vorhandener Mängel, bei der schweißgerechten Gestaltung, der fach- und qualitätsgerechten Fertigung, durch Abweichungen vom planmäßigen Betrieb, durch Überlastungen und/oder durch menschliches Versagen ausgelöst werden.

#### *Häufige Schadensfälle*

Obwohl das technische Wissen über die von vielen Einflüssen geprägte Eigenschaft „Tragfähigkeit von geschweißten Metallkonstruktionen“ heute im Wesentlichen als gesichert gilt, nehmen Schäden an geschweißten Konstruktionen in fast allen Anwendungsbereichen leider nicht ab. Die Ursachen dafür sind vielfältig.

#### *Zunahme an Ermüdungsschäden*

Es nehmen Schäden zu, die vor allem durch ungenügende schweißtechnische Vorgaben der Konstruktion entstanden sind. Solche unzureichenden Vorgaben ziehen häufig eine mangelhafte Ausführung und grobe Missachtung technischer Regeln nach sich.

Wie erwähnt nehmen die Ermüdungsschäden immer größere Ausmaße an. Durch die oft nicht beachteten zyklisch schwingenden Belastungen der Bauteile treten Risse bereits bei Spannungen deutlich unter der Streckgrenze auf.

**Aus Schweißnahtnachbehandlung - Mehr Infos unter [weka.de/6852](http://weka.de/6852)**

### *Ursachen von Ermüdungsschäden*

Die Ursachen lassen sich häufig zurückführen:

- ▶ auf konstruktive Mängel (Spannungsspitzen, Steifigkeitssprünge usw.)
- ▶ auf Fertigungsmängel (Einbrandkerben, ungenügende Durchschweißung usw.)
- ▶ auf die Überschreitung der kalkulierten Lastzyklen (Lebensdauer)

Da gerade bei Schweißkonstruktionen häufig der Riss am Nahtübergang zum Grundwerkstoff beginnt, gewinnt die Nachbehandlung von Schweißnähten eine immer größere Bedeutung. Auch die Nachbehandlungsverfahren haben sich immer weiter verbessert. Diese müssen jedoch bei Neukonstruktionen bzw. bei Reparaturen entsprechend vorgegeben werden. Lediglich die höherfrequente Hämmer-Verfahren können sowohl bei Neukonstruktionen, als auch präventiv bei bestehenden und somit vorbelasteten Konstruktionen eingesetzt werden.

### *Forschungen über Nachbehandlungsverfahren*

National und international wurden viele Forschungsarbeiten über effiziente und leicht beherrschbare Verfahren zur Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit und somit der Lebensdauer von Schweißkonstruktionen durchgeführt.

In den folgenden Kapiteln werden die verschiedenen Nachbehandlungsverfahren zu Verbesserung der Ermüdungsfestigkeit beschrieben. Dort finden Sie einen aktuellen Überblick der diversen Methoden und Technologien sowie zu deren Vor- und Nachteilen.

### 3 Grundlagen der Ermüdungsfestigkeit

#### Das Wöhlerdiagramm

Materialermüdung entsteht u.a. durch schwingende, dynamische Belastung. Allerdings liegt die Spannung, bei der ein dynamisch belastetes Bauteil bricht, deutlich unterhalb der Zugfestigkeit und meist auch unterhalb der Streckgrenze des verwendeten Werkstoffs. Wie schwingfest Werkstoffe oder Bauteile sind, wird im Wöhlerversuch ermittelt. Dafür sind Versuchskörper nötig, die zyklisch, meist unter einer sinusförmigen Beanspruchungs-Zeit-Funktion, belastet werden. Der Versuch läuft so lange, bis eine festgelegte Grenzwahrschwingungszahl erreicht wird oder ein definiertes Versagen (Bruch, Anriss) eintritt. Erreicht ein Versuchskörper die Grenzwahrschwingungszahl ohne erkennbares Versagen, so wird er als Durchläufer bezeichnet.

#### Erklärung der Wöhlerlinie

Die Versuchsergebnisse werden in einem doppellogarithmischen Diagramm festgehalten. In diesem Wöhlerdiagramm wird üblicherweise die Nennspannungsamplitude über der ertragbaren Schwingungszahl aufgetragen. Daraus ergibt sich ein Kurvenzug: die Wöhlerkurve oder Wöhlerlinie. Im Wöhlerdiagramm in Abbildung 11 sind die drei Bereiche K, Z und D eingetragen.

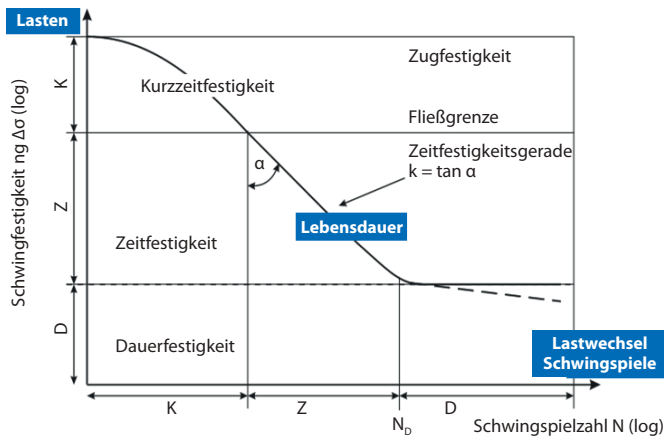


Abb. 11: Wöhlerdiagramm

### *Legende*

K ist der Bereich der Kurzzeitfestigkeit bzw. Kurzzeitschwingfestigkeit unterhalb von ca.  $10^4$  bis  $10^5$  Schwingspielen. Diese Art der Ermüdung tritt bei hohen plastischen Dehnamplituden auf, die zu frühem Versagen führen.

Z ist der Bereich der Zeitfestigkeit bzw. Zeitschwingfestigkeit zwischen  $10^4$  und materialabhängig etwa  $2 \times 10^6$  Schwingspielen. Hier verläuft die Wöhlerkurve bei doppellogarithmischer Darstellung nahezu gerade.

D ist der Bereich der sogenannten Dauerfestigkeit. Dieser beginnt bei ferritisch-perlitischen Stählen bei ca.  $1$  bis  $5 \times 10^6$ . Bei austenitischen Stählen und Kfz-Basiswerkstoffen (z.B. Aluminium, Gold, Kupfer) fällt die ertragbare Amplitude weiter ab – hier gibt es keine „echte“ Dauerfestigkeit. Daher wird bei diesen Werkstoffen meist die ertragbare Amplitude bei  $10^7$  Lastwechseln als Dauerfestigkeit bezeichnet.

Unterhalb der Dauerfestigkeit kann ein Bauteil grundsätzlich beliebig viele Schwingspiele ertragen. Bei Belastungen oberhalb der Dauerfestigkeit versagt das Bauteil nach einer bestimmten Zahl an Schwingspielen. Wie viele Schwingspiele ein Bauteil unter Betriebsbelastung (variable Belastungsamplituden) bis zum Ausfall erträgt, kann im Rahmen statistischer Genauigkeit mithilfe der Wöhlerlinie vorausgesagt werden. Dies nennt man auch betriebsfeste Bemessung eines Bauteils. In nahezu allen technischen Bereichen wird Betriebsfestigkeit zum Zweck des Leichtbaus eingesetzt.

## **Ermüdungsfestigkeit bei Schweißnähten**

### ***Ursachen für Ermüdungsfestigkeit bei Schweißnähten***

Geschweißte Verbindungen müssen bei zyklisch belasteten Konstruktionen mit besonderer Aufmerksamkeit untersucht werden. Die Ermüdungsfestigkeit von Schweißverbindungen ist im Vergleich zu ungeschweißten Bauteilen deutlich niedriger, da hier mehrere Einflussfaktoren zusammenkommen, die eine festigkeitsmindernde Wirkung auf die Schwingfestigkeit haben.

### *Eigenspannungen oder Verzug bei Schweißverbindungen*

Bei Schweißverbindungen treten infolge des erhöhten Wärmeeintrags durch den Fügeprozess Eigenspannungen oder Verzug auf, die davon abhängig sind,

inwieweit die Wärmeverformungen durch den angrenzenden Werkstoff behindert werden.

Das Ermüdungsverhalten von Schweißkonstruktionen hängt im Wesentlichen von zwei Hauptfaktoren ab, nämlich von

- ▶ der Kerbwirkung und
- ▶ den Eigenspannungen.

### *Kerbwirkung*

Bisher war man der Meinung, dass die Ermüdungsfestigkeit hauptsächlich von den geometrischen Faktoren wie Schärfe vorhandener Makro- und Mikrokerben, den inhomogenen Werkstoffzuständen in Naht und Wärmeeinflusszone (WEZ) sowie fehlerhaften Schwachstellen abhängt. Abbildung 12 zeigt einen Nahtübergang mit relativ hoher Kerbschärfe, von der auch der Schwingungsriss ausgeht, wie auf der rechten Seite der Abbildung deutlich zu erkennen ist.



**Abb. 12:** Kerbwirkung am Nahtübergang – Anriss im Nahtübergang

Deshalb konzentrierte man sich häufig auf Nachbehandlungsverfahren, die eine Verbesserung der Kerbwirkung zum Ziel haben wie z.B. Schleifen oder WIG-Nachbehandlung (siehe auch Kap. „Methoden zur Verbesserung der Nahtgeometrie“).

### *Eigenspannungen*

In Schweißverbindungen treten verfahrensbedingt verschiedene Werkstoffzustände in Verbindung mit teilweise erheblichen Eigenspannungen nebeneinander auf.

**Aus Schweißnahtnachbehandlung - Mehr Infos unter [weka.de/6852](http://weka.de/6852)**

einander auf, die das Ermüdungsverhalten des gesamten Bauwerks bestimmen können. Mittlerweile ist bereits durch viele Forschungsvorhaben festgestellt worden, dass gerade im kritischen Nahtübergangsbereich enorm hohe Zugeigenspannungen entstehen. Hierbei wurden durch umfangreiche Messungen von Eigenspannungen im Nahtübergang von Schweißnähten verfahrensbedingt recht hohe Zugeigenspannungen ermittelt, die durch die Schrumpfwirkung beim Schweißen entstehen. Diese können teilweise bis zur Höhe der Streckgrenze entstehen.

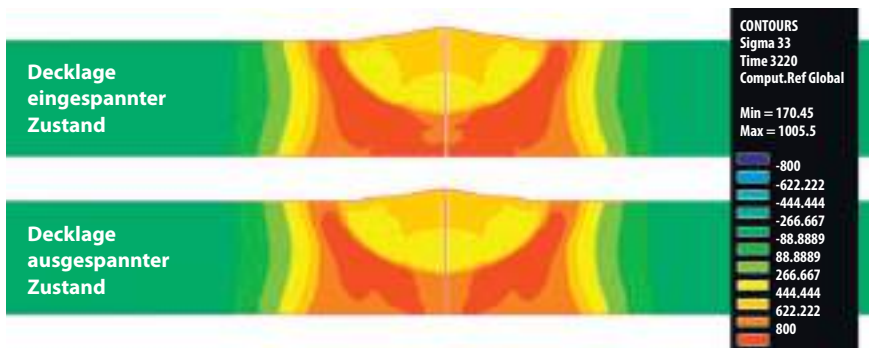


Abb. 13: Simulation von Eigenspannungen im Nahtübergang (TU Graz)

Das IWS der TU Graz hat zusätzlich zu den Messungen auch durch entsprechende Rechenverfahren die Eigenspannungen simuliert. Abbildung 13 zeigt die durch das Schweißen entstehenden hohen Zugeigenspannungen im Nahtübergangsbereich eines hochfesten Feinkornstahls S700MC sowohl im eingespannten als auch im ausgespannten Zustand.

### Gründe für den Schädigungsprozess

Beide Ursachen, die Kerbschärfe und die hohen Zugeigenspannungen im Nahtübergang, bewirken den Rissbeginn bei zyklisch schwingender Beanspruchung der Konstruktion (siehe Abb. 14). Nach dem technischen Anriss beginnt ein stabiles Risswachstum, das in Phase III zu einem instabilen Risswachstum führt, bis es zum Totalausfall (Bruch) der Konstruktion führt.

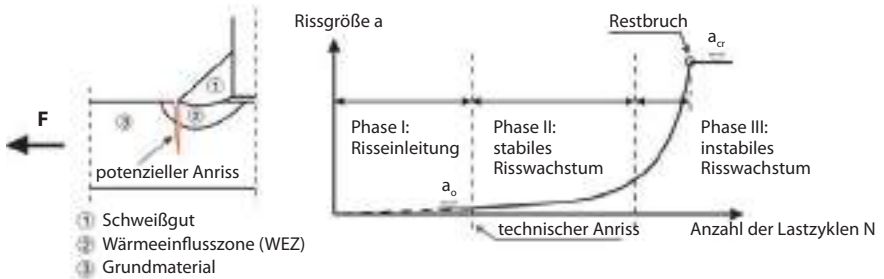


Abb. 14: Schädigungsprozess einer Schweißnaht unter zyklischer Beanspruchung

Dies kann je nach Belastungsart und -höhe sowie Anzahl der Schwingspiele bereits zu einem relativ frühen Zeitpunkt geschehen. Dieses zeitliche Risswachstum kann man sehr gut an den sogenannten Rastlinien im Bruchbild erkennen (siehe auch Abb. 2, 3 und 5).



Abb. 15: Typischer Rissverlauf, im Nahtübergang beginnend





**Abb. 16:** *Typischer Rissverlauf im Auslauf einer Versteifungsrippe*

Die Abbildungen 15 und 16 zeigen einen typischen Ermüdungsrissverlauf, der im Nahtübergang in der kritischen Zone beginnt und weiter in das Grundmaterial laufen kann. Wenn Sie also einen solchen Rissverlauf sehen, dann können Sie sicher sein, dass es sich hier um einen Schwingungsriss handelt. Das Gute daran ist, dass die Rissfortschrittsgeschwindigkeit in der Regel je nach Belastung immer eine gewisse Zeit dauert, sodass man rechtzeitig eine Sanierung planen kann, ohne dass es zu einem Totalausfall kommt (siehe auch Abb. 14).

### ***Ermüdungsfestigkeit bei höherfesten Stählen***

Nach dem bisherigen Kenntnisstand (Eurocode 3) haben geschweißte höherfeste Stähle die gleiche Ermüdungsfestigkeit wie geschweißte niedrigfeste Stähle. Um höherfeste Stähle auch in ermüdungsbeanspruchten Konstruktionen effektiv einsetzen zu können, bedarf es daher zusätzlicher Anstrengungen, um die Ermüdungsfestigkeit zu erhöhen, z.B. durch Anwendung von Schweißnahtnachbehandlungsverfahren. Im Stahlbau besteht jedoch bis heute noch nicht die Möglichkeit, die positiven Effekte einer Schweißnahtnachbehandlung normativ zu berücksichtigen.

Der Stahlindustrie ist es in den letzten Jahren gelungen, wettbewerbsfähige höherfeste Stähle (Streckgrenze  $> 400 \text{ N/mm}^2$  bis  $1.300 \text{ N/mm}^2$ ) zu entwickeln,

**Aus Schweißnahtnachbehandlung - Mehr Infos unter [weka.de/6852](http://weka.de/6852)**