

3.1 Form- und Maßstabilität beim Nitrieren

von Marco Jost

Einleitung

Eine Wärmebehandlung führt je nach angewandtem Verfahren aufgrund vielfältiger Einflussgrößen zu einem mehr oder weniger starken Verzug eines Werkstückes. Der Begriff Verzug steht in diesem Kontext für die Änderung der Maße und der Form. Unter dem Begriff Maßänderung wird die ausschließliche Änderung der Abmessung des Werkstückes ohne Formänderung verstanden. Formänderungen beschreiben die Änderungen der Winkel und Krümmungen von Kanten und Flächen. Meist überlagern sich bei der Wärmebehandlung die Maßänderungen mit Formänderungen (**Bild 1**).

Der Verzug bei der Wärmebehandlung ist aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten sehr bedeutend für die Herstellung von Bauteilen. Maß- und Formänderungen haben einen großen negativen Einfluss auf die Fertigungskosten eines Bauteils. Beispielsweise müssen Werkstücke vor einer Härtung mit Aufmaßen gefertigt werden, um Verzüge durch eine nachträgliche Hartbearbeitung beseitigen zu können. Auf eine kostenintensive Hartbearbeitung kann in den meisten Fällen nicht verzichtet werden. Zudem können Verzüge auch die Notwendigkeit von Richtvorgängen mit sich bringen, die neben einem zusätzlichen Arbeitsaufwand einen großen Einfluss auf den Eigenspannungszustand der Bauteile haben. Richtvorgänge sollten gerade nach einer Nitrierbehandlung aufgrund der erhöhten Rissgefahr, verursacht durch die spröde Verbindungsschicht, möglichst vermieden werden. Im Extremfall können unerwartete Verzüge zum Ausschuss von Bauteilen führen.

In der modernen Fertigung ist das Verzugspotenzial bei der Wärmebehandlung von hoher Bedeutung. Für die Realisierung eines kostenoptimierten und gleichzeitig prozesssicheren Herstellungsprozesses ist die Erfahrung und das Wissen hinsichtlich des Verzugsverhaltens von Werkstücken bei Wärmebehandlungsprozessen wesentlich – Distortion Engineering bekommt einen immer größeren Stellenwert. Das Distortion Engineering hat zum Ziel, bei der Wärmebehandlung auftretende Maß- und Formänderungen im Vorhinein zu quantifizieren und die Erkenntnisse in die Konstruktion und Fertigungsplanung einfließen zu lassen, um letztendlich den Verzug und seine Ursachen zu beherrschen. Diese Vorgehensweise unterstützt eine verzugsgerechte Konstruktion und Fertigung von Bauteilen. Unvermeidbare Verzüge werden in in die Bemaßung mit einbezogen. Im Extremfall

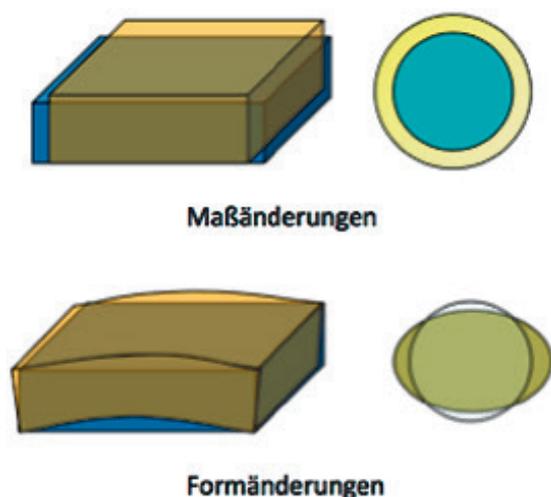


Bild 1: Maß- und Formänderungen (Quelle: Müller)

wird ein Werkstück „krumm“ gefertigt, um nach der Wärmebehandlung ein innerhalb der notwendigen Toleranzen maßgenaues Bauteil zu erhalten. Auch wenn dieses Ziel nicht immer realistisch ist, kann die Kenntnis des Verzugsverhaltens im hohen Maße zu einer Optimierung der Fertigungsschritte und der Kosten beitragen.

3.1.1 Form- und Maßänderung durch Wärmebehandlung

Maß- und Formänderungen bei der Wärmebehandlung sind nicht gänzlich zu vermeiden, können aber in Grenzen beeinflusst werden. Mögliche Ursachen für einen Verzug sind vielfältig und stehen miteinander in Wechselwirkung – hierzu zählen:

- Einwirkung äußerer Kräfte
- Wärmespannungen
- Volumenänderung
- Umwandlungsspannungen
- Abbau von Eigenspannungen
- Aufbau von Druck- und Zugspannungen.

Bei den meisten Stählen sinkt die Streckgrenze mit zunehmender Temperatur. Einwirkende äußere Kräfte können bei geringer Warmfestigkeit Maß- und Formänderungen verursachen. Durch thermische Aktivierung werden Versetzungsbewegungen und das Abgleiten von Gleitebenen erleichtert, wodurch sich bei einem „unbeabsichtigten“ Lastfall, verursacht durch eine unsachgemäße Chargierung der Bauteile, unbeabsichtigte Verzüge einstellen können. Wird die temperaturbedingte Ausdehnung und Schrumpfung von Bauteilen durch den Chargenaufbau zudem partiell behindert, z. B. durch Stapelung (partielles Beschweren von Bauteilen) oder bei ungünstiger Anordnung von Bauteilen in Chargierkörben oder Gestellen, sind Maß- und Formänderung vorprogrammiert – auch wenn sich diese meist innerhalb der akzeptablen Toleranzen bewegen.

Die temperaturabhängige Ausdehnung und Schrumpfung von Werkstücken bei der Erwärmung und Abkühlung initiiert infolge von Temperaturunterschieden zwischen Rand und Kern Wärmespannungen, die ebenfalls ein erhebliches Verzugspotenzial mit sich bringen können. Solange der Werkstoff thermische Spannungen elastisch aufnehmen kann, verursachen sie keinen Verzug. Überschreiten innere Spannungen die Warmfließgrenze des Werkstoffes treten Formänderungen mit der Tendenz zur Kugel- oder Faßformbildung auf (**Bild 2**).

Wärmespannungen können durch eine Reduzierung der Erwärmungs- und Abkühlgeschwindigkeit minimiert, aber nicht in Gänze vermieden werden. Beim klassischen Härten sowie beim Einsatz- oder Randschichthärten ist eine hohe Abkühlgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Legierungsgehalt des Werkstoffes die technologische Voraussetzung für eine erwünschte martensitische

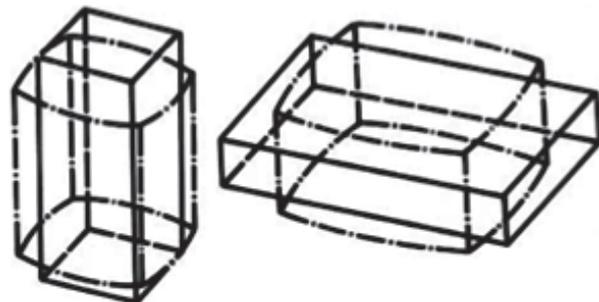


Bild 2: Formänderung durch Wärmespannungen

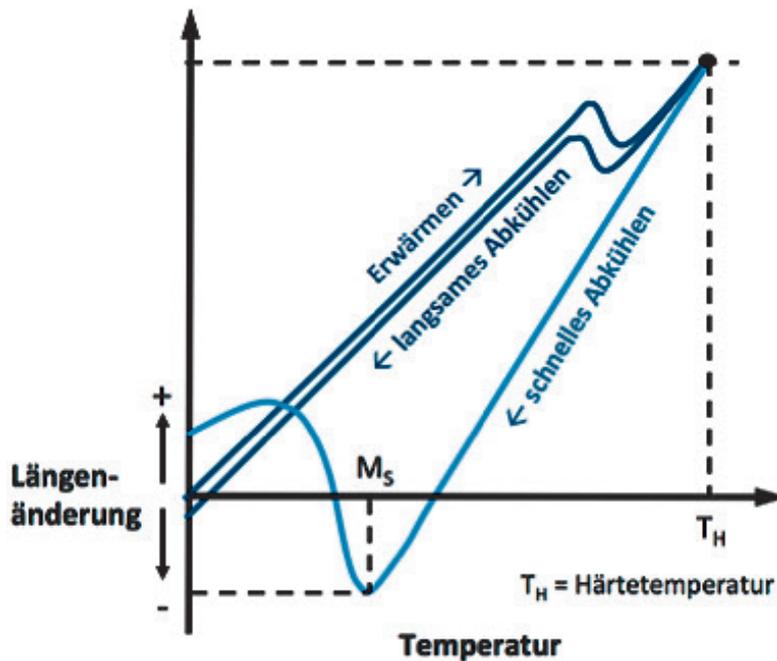


Bild 3: Dilatometerkurve von Stahl beim martensitischen Härten

Gefügeumwandlung. Bei Glühbehandlungen sowie beim Nitrieren sind die Abkühlgeschwindigkeiten hingegen vergleichsweise niedrig. Da eine Verlängerung der Prozesszeit mit einer Kostensteigerung einhergeht, sind auch hier einer Reduzierung der Abkühlgeschwindigkeit in den meisten Fällen aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten enge Grenzen gesetzt.

Unvermeidbar ist die Volumenänderung infolge von einer martensitischen Gefügeumwandlung beim Härten. Die Dilatometerkurve von Stahl gemäß **Bild 3** verdeutlicht, dass der beim Härten unterkühlte Austenit nach Abschreckung von Austenitisierungstemperatur ein geringeres Volumen als das Ausgangsgefüge besitzt. Der Martensit, der sich dann infolge einer weitgehend diffusionslosen Gefügeumwandlung bildet, weist hingegen ein signifikant größeres Volumen auf.

Bei der Härtung eines Bauteils setzt die Martensitbildung am Rand eher ein als im Kern. Das Beispiel der Abschreckung eines zylindrischen Körpers veranschaulicht, dass die resultierenden Druckspannungen im Randbereich und die Zugspannungen im Kern zu einer Längung führen. Da die Ecken des Zylinders die Formänderung aufgrund schnellerer Abkühlung nur bedingt mitmachen, tendiert der zylindrische Körper zur Spulenform (**Bild 4**).

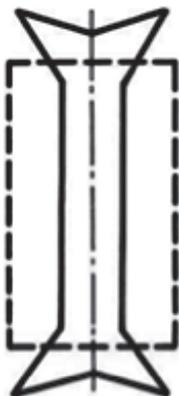


Bild 4: Formänderung eines Zylinders durch Umwandlungsspannungen

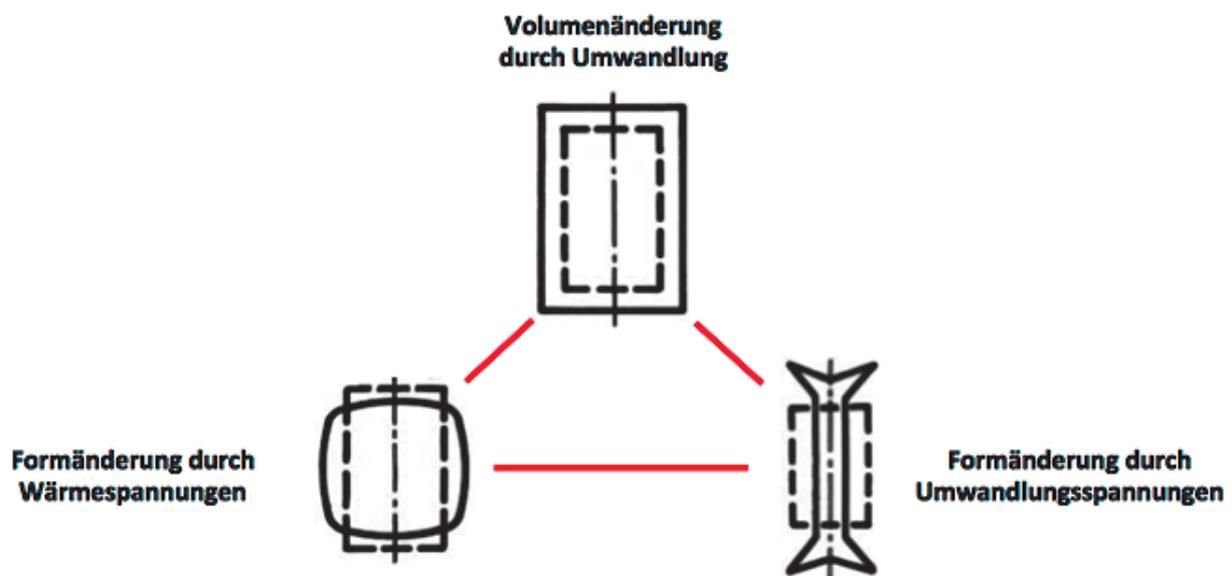


Bild 5: Wechselspiel von Volumenvergrößerung, Wärme- und Umwandlungsspannungen beim Härten

Die Umwandlungsspannungen sind bei einer Härtung in ihrer Auswirkung auf den Verzug den Wärmespannungen entgegengesetzt. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Maß- und Formänderungen durch Volumenänderung, Wärme- und Umwandlungsspannungen sich gegenseitig beeinflussen – verstärkend oder kompensierend wirken (**Bild 5**).

Je nach Zeitpunkt der martensitischen Umwandlung im Rand und Kern und der Größe der Wärmespannungen überwiegt die Fass- oder Spulenform.

Aufgrund des geringen Temperaturniveaus findet bei einer Nitrierung keine Gefügeumwandlung statt, was sich positiv auf die Maß- und Formstabilität auswirkt. Der Spannungszustand vor der Nitrierung, der sich unter anderen durch vorgelagerte Wärmebehandlungsprozesse einstellt, ist jedoch von Bedeutung für das Verzugsverhalten bei der Nitrierbehandlung.

3.1.2 Eigenspannungen

Die grundlegende Betrachtung der Ursachen und Auswirkungen von Maß- und Formänderungen bei der Wärmebehandlung gemäß Kapitel 3.1.1 lässt aus Gründen der Vereinfachung den Eigenspannungszustand der Bauteile vor der Wärmebehandlung unberücksichtigt. Eigenspannungen sind Spannungen, die in einem Werkstück vorhanden sind, ohne dass äußere Kräfte und Momente einwirken. Sie stehen im mechanischen Gleichgewicht. Der Aufbau fertigungsbedingter Eigenspannungen kann zwar in Grenzen reduziert, aber nicht gänzlich vermieden werden. So führen beispielsweise eine ungleichmäßige Abkühlung nach einer Warmformgebung, Wärmebehandlung oder Schweißung, eine Kaltverformung, eine spanende Bearbeitung durch Drehen oder Fräsen, Schleif- und Bohrprozesse sowie Gefügeunterschiede und Inhomogenitäten über den Querschnitt des Werkstückes zu einem hohen Eigenspannungszustand im Bauteil. Eine Minimierung durch angepasste Fertigungsparameter ist zwar grundsätzlich möglich, muss aber in Einklang zu den Fertigungskosten gebracht werden. So erhöhen sich die Kosten durch Maßnahmen wie z. B. geringere Vorschübe und Schnittgeschwindigkeiten, langsamere Abkühlung bei Glühbehandlungen, Verwendung von ESU-Gütern, Zwischenglühen usw. oftmals in einem nicht akzeptablen Maße.

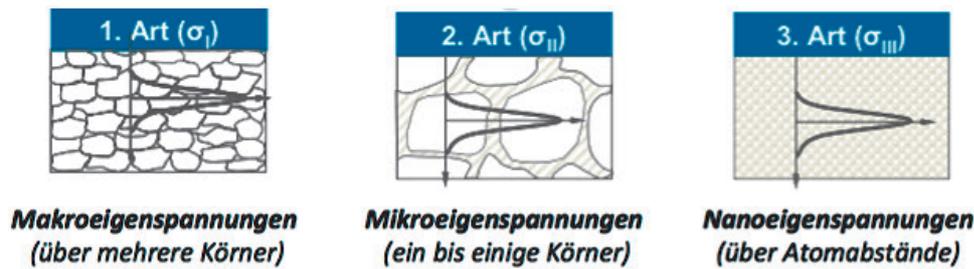


Bild 6: Eigenspannungen erster, zweiter und dritter Art

Unterschieden werden Eigenspannungen nach ihrem räumlichen Wirkungsbereich in Eigenspannungen erster bis dritter Art (**Bild 6**).

Eigenspannungen erster und zweiter Art sind für das Verzugspotenzial eines Werkstückes maßgebend. Eine ausreichend hohe Temperatur führt bei der Wärmebehandlung zum Abbau innerer Spannungen durch plastische Verformung. Ein ungünstiger Eigenspannungszustand kann bei der Erwärmung aufgrund des Spannungsabbaus bei geringer Warmfließgrenze zu erheblichem Verzug führen. Die fertigungsbedingten Eigenspannungen im Werkstück vor der Wärmebehandlung überlagern sich mit den beschriebenen Vorgängen bei der Wärmebehandlung. Hieraus resultiert die hohe Komplexität des zu betrachtenden Systems. Zusammenfassend ist festzustellen, dass fertigungsbedingte Eigenspannungen selbst einen großen Einfluss auf Maß- und Formänderungen bei der Wärmebehandlung ausüben.

3.1.3 Oberflächenhärtung durch Nitrieren

Nitrierbehandlungen unterscheiden sich wesentlich von nahezu allen anderen Oberflächenhärteverfahren. Die Härtung beruht nicht auf der Bildung von Martensit, sondern auf den Härtmechanismen Ausscheidungshärtung und Mischkristallverfestigung. **Bild 7** veranschaulicht die Unterschiede in der Temperaturführung bei einem Nitrierprozess im Vergleich zu einem Oberflächenhärteverfahren, dessen Wirkungsweise auf der Martensitbildung beruht.

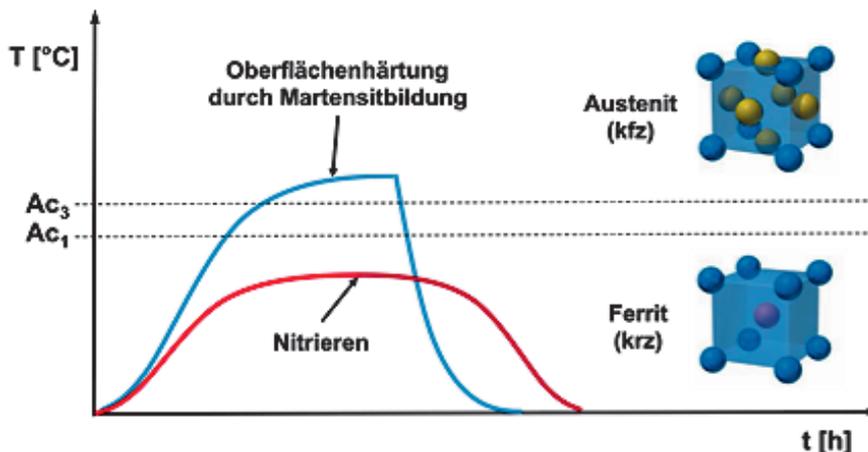


Bild 7: Zeit-Temperaturverlauf eines Oberflächenhärteverfahrens mit Martensitbildung vs. Nitrieren

Bei einer martensitischen Härtung erfolgt die Erwärmung in der Regel möglichst schnell. Die relativ hohe Behandlungstemperatur führt zur Austenitisierung, die anschließende schroffe Abkühlung zur Martensitbildung bei der Gefügeumwandlung.

Für eine Nitrierbehandlung sind die vergleichsweise geringe Behandlungstemperatur – üblicherweise zwischen 500 und 550 °C – und die diffusionsbedingte lange Haltezeit charakteristisch. Durch eine relativ langsame Abkühlung (Ofenabkühlung) wird der Aufbau von Wärmespannungen reduziert. Die geringe Behandlungstemperatur, die eine Härtung ohne Gefügeumwandlung ermöglicht, sowie die verfahrensbedingt geringen Härtetiefen machen das Nitrieren in Verbindung mit einer moderaten Erwärmungs- und Abkühlgeschwindigkeit zu einem verzugsarmen Härteverfahren. Die Maß- und Formänderungen sind beim Nitrieren in der Regel so gering, dass auf ein Hartbearbeitung durch Schleifen verzichtet werden kann.

Unzulässiger Verzug kann beim Nitrieren hingegen schnell zu Ausschuss führen. Eine Nacharbeit ist aufgrund fehlender Aufmaße und geringer Härtetiefen oftmals nicht möglich. Zudem bringen Richtprozesse die Gefahr der Rissbildung mit sich. Die einzelnen Fertigungsschritte müssen somit an einen Nitrierprozess angepasst werden. Ziel des Distortion Engineering ist die Einhaltung der erforderlichen Toleranzen durch geeignete Maßnahmen wie eine angepasste Konstruktion, eine optimierte Fertigungsplanung, eine sachgemäße Wärmebehandlung und die Festlegung geeigneter Toleranzen.

3.1.4 Maßnahmen zur Verzugsminimierung beim Nitrieren

Maß- und Formänderungen infolge einer Nitrierbehandlung werden durch die verfahrensbedingte Volumenzunahme und durch Änderungen des Eigenspannungszustandes verursacht.

3.1.4.1 Volumenzunahme infolge einer Nitrierbehandlung

Beim Nitrieren bildet sich im äußeren Randbereich die sogenannte Verbindungsschicht aus, die in der Regel in Abhängigkeit vom Werkstoff, dem Nitrierverfahren und den Verfahrensparametern in einer Dicke von 5 bis 30 µm vorliegt. Die Volumenzunahme aller nitrierten Bauteilflächen geht mit

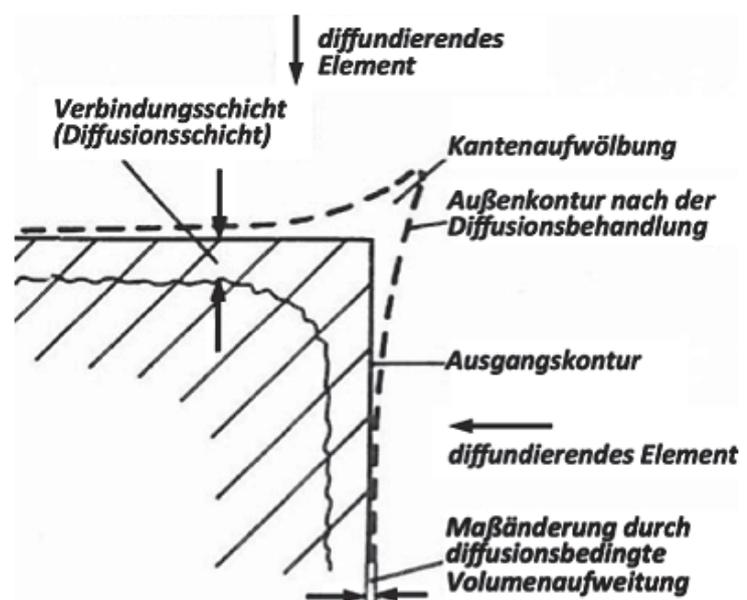


Bild 8: Phänomen der Kantenaufwölbung beim Nitrieren (Quelle: Liedtke)

dem Wachstum der Verbindungsschicht einher, da die Verbindungsschicht zum Teil auf der Oberfläche aufwächst. An scharfen Kanten des Werkstückes kann die Nitrierung durch die beidseitige Stickstoffaufnahme zum Phänomen der Kantenaufwölbung führen (**Bild 8**).

Die Durchmesserzunahme eines nitrierten zylindrischen Körpers liegt in einer Größenordnung von 30 bis 40 % der Verbindungsschichtdicke. Bei sehr eng tolerierten Bauteilen kann die Volumenzunahme beim Nitrieren bereits zu Maßproblemen führen. Insbesondere wenn bei einzelnen Chargen eine hohe Schwankungsbreite hinsichtlich der Ausbildung der Verbindungsschicht vorliegt, kann sich die mechanische Fertigung hierauf kaum einstellen. Eine Fertigung „unter Maß“ und ein „Hineinwachsen ins Maß“ ist nur bei einer hohen Reproduzierbarkeit möglich, die aufgrund vielfältiger Einflüsse insbesondere bei der Behandlung von Mischchargen nicht immer gewährleistet werden kann.

3.1.4.2 Maßnahmen zur Verringerung der Volumenzunahme

Der Einsatz moderner Regelungen kann beim Nitrieren im Gas wie im Plasma die Verbindungsschichtdicke minimieren – im Plasma teils sogar vermeiden. Die Dicke der Verbindungsschicht kann beim Gasnitrieren durch die verwendete Nitrierkennzahl in weiten Grenzen beeinflusst werden. Je höher die Nitrierkennzahl K_N und je länger die Nitrierzeit sind, umso dicker fällt die Verbindungsschicht aus (**Bild 9**).

Bild 10 verdeutlicht den Einfluss der Nitriertemperatur auf die Ausbildung der Verbindungsschicht. Bei konstanter Nitrierkennzahl und Behandlungsdauer nimmt die Verbindungsschichtdicke mit steigender Nitriertemperatur zu.

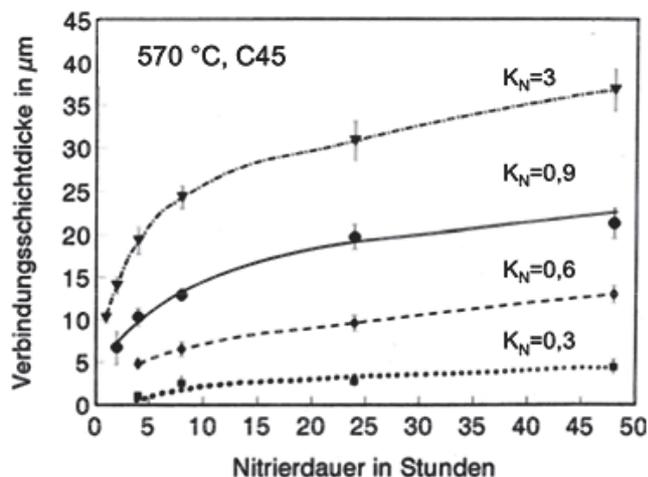


Bild 9: Verbindungsschichtdicke in Abhängigkeit von der Nitrierkennzahl und der Nitrierdauer (Quelle: Klümper-Westkamp / IWT Bremen)

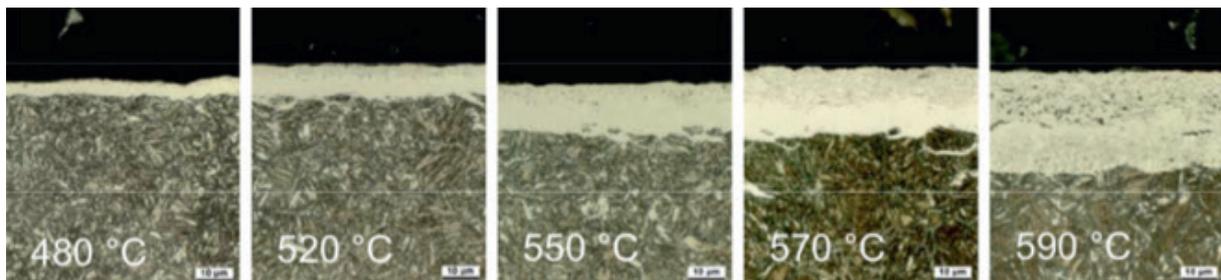


Bild 10: Verbindungsschichtdicke in Abhängigkeit von der Nitriertemperatur (Quelle: Hoja / IWT Bremen)

Tabelle 1: Verbindungsschichtdicke in Abhängigkeit vom Gasverhältnis N₂:H₂ (werkstoffabhängig)

N ₂ :H ₂	Verbindungsschichtdicke	Modifikation
10:90	(nahezu) keine Verbindungsschicht	falls vorhanden, γ'-Nitrid
25:75	dünne Verbindungsschicht	vorrangig γ'-Nitrid (Fe ₄ N)
70:30	dicke Verbindungsschicht	vorrangig ε-Nitrid (Fe ₂₋₃ N)

**Bild 11:** Ausbildung des Plasmas in Abhängigkeit vom Behandlungsdruck

Eine angepasste Nitrierkennzahl und eine Reduzierung der Nitriertemperatur führen somit zu geringeren Verbindungsschichtdicken. Eine Verringerung der Nitrierhärte tiefe durch kürzere Nitrierzeiten kann ggf. ein weiterer Lösungsansatz sein, die Volumenzunahme zu reduzieren.

Ein Verfahrenswechsel vom Gas- zum Plasmanitrieren kann eine weitere Möglichkeit zur Reduzierung von Maßproblemen darstellen, da bei einer Plasmanitrierung die Verbindungsschichtdicke aufgrund der verfahrensbedingten Abstäubung durch den Ionenbeschuss der Oberfläche während der Behandlung tendenziell geringer ausfällt. Durch die Einstellung des Gasverhältnisses N₂:H₂ kann die Verbindungsschichtbildung bei einer Plasmanitrierung beeinflusst werden (**Tabelle 1**).

Die Variation des Druckes bietet bei einer Plasmanitrierung die Möglichkeit, die Ausbildung des Plasmasaums zu beeinflussen. Ein vergleichsweise hoher Druck ermöglicht eine Nitrierung enger Spalte und Bohrungen. Handelt es sich um sehr eng tolerierte Bohrungen, empfiehlt es sich, sofern die Fixierung von Stiften als Festabdeckung aufgrund der Geometrie und Lage des Bauteils im Ofen schwierig ist, durch die Einstellung von einem relativ geringem Behandlungsdruck die „Bohrung zu überfahren“. Hierdurch kann eine Nitrierung sowie die damit einhergehende Volumenzunahme vermieden werden (**Bild 11**).

Bei einer Nitrierung im Gas- oder Plasma kann unter Umständen auch ein partielles Weichhalten die Volumenzunahme an eng tolerierten Bauteilbereichen reduzieren, wenn diese unter Einsatzbedingungen keinem Verschleiß unterliegen und nicht zwingend gehärtet werden müssen. Das partielle Weichhalten von Kanten, insbesondere wenn diese nicht direkt an den Funktionsbereich angrenzen, kann eine Kantenaufwölbung verhindern. In den meisten Fällen kann die Aufwölbung der Kanten aber durch einfache konstruktive Maßnahmen, wie das Vorsehen einer Phase oder eines Radius, vermieden werden.

3.1.4.3 Maß- und Formänderungen durch Eigenspannungen

Grundsätzlich ist das Nitrieren wie vorgestellt ein relativ verzugsarmes Verfahren, da aufgrund der niedrigen Behandlungstemperaturen keine Umwandlungsspannungen auftreten. Durch eine gezielte Temperaturführung bei der Erwärmung und Abkühlung kann die Erzeugung von Wärme-

spannungen minimiert werden. Moderaten Erwärmungs- und Abkühlgeschwindigkeiten, die idealerweise 50 °C/h nicht überschreiten, reduzieren die Temperaturunterschiede zwischen Rand- und Kernbereich des Werkstückes. Ein gestuftes Aufheizen der Charge mit Haltezeiten auf unterschiedlichen Temperaturniveaus kann Temperaturunterschiede innerhalb der Bauteile weiter verringern und zu einer hohen Maß- und Formstabilität beitragen.

Der Eigenspannungszustand der Bauteile vor einer Nitrierbehandlung ist hinsichtlich des Verzugs- und Formstabilitätspotenzials von wesentlicher Bedeutung, da das Nitrieren im Temperaturbereich der Spannungsarmglühtemperaturen der meisten Stahlgüten über recht lange Haltezeiten durchgeführt wird. Eigenspannungen bauen sich hier wie beschrieben bis zur Warmfließgrenze bei der entsprechenden Behandlungstemperatur durch plastische Verformung ab. Eine hohe Warmfestigkeit wirkt somit dem Eigenspannungsabbau entgegen.

3.1.4.4 Maßnahmen zur Reduzierung eines ungünstigen Eigenspannungsprofils

Es gibt eine ganze Reihe Maßnahmen, die in Erwägung gezogen werden können, um den Eigenspannungszustand der Werkstücke vor der Nitrierbehandlung positiv zu beeinflussen. In den meisten Fällen ist ein Spannungsarmglühen die erste Wahl. Bei formkomplizierten, insbesondere bei asymmetrischen Bauteilen, sowie bei Werkstücken mit einem ungünstigen Längen-Durchmesser-Verhältnis kann zur Gewährleistung einer hohen Prozesssicherheit auf ein Spannungsarmglühen als Zwischenschritt in der Fertigungsplanung kaum verzichtet werden.

Geglüht wird in der Regel zwischen 550 und 650 °C (**Bild 12**), wobei die Behandlungstemperatur mindestens 30 °C über der Nitriertemperatur und gleichzeitig mindestens 30 °C unter der Anlass-temperatur liegen sollte. Hierdurch werden ein Abbau weiterer Eigenspannungen auf der einen sowie ein Anlasseffekt auf der anderen Seite während der Nitrierbehandlung vermieden. Übliche Haltezeiten liegen in Abhängigkeit von der Wandstärke der Werkstücke zwischen 1 und 8 h . Eine angepasste Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeit sowie eine gestufte Erwärmung minimieren hier ebenfalls den Aufbau von Wärmespannungen. Die Aufmaße zum Spannungsarmglühen sollten so gering wie möglich und so groß wie nötig vorgesehen werden. Bei der Festlegung des Aufmaßes ist das Ziel, zum einen den auftretenden Verzug ohne zusätzliche Richtvorgänge prozesssicher durch eine mechanische Nacharbeit nivellieren zu können und zum anderen durch die erforderliche Nacharbeit selbst möglichst wenig neue Spannungen in den Werkstoff einzubringen.

Richtvorgänge sollten während der Herstellung der Bauteile im Hinblick auf die Formstabilität beim Nitrieren grundsätzlich vermieden werden, da diese einen ungünstigen Eigenspannungszustand des Werkstückes zur Folge haben. Sind Richtvorgänge unumgänglich, ist im Anschluss ein Spannungsarmglühen vorzusehen.

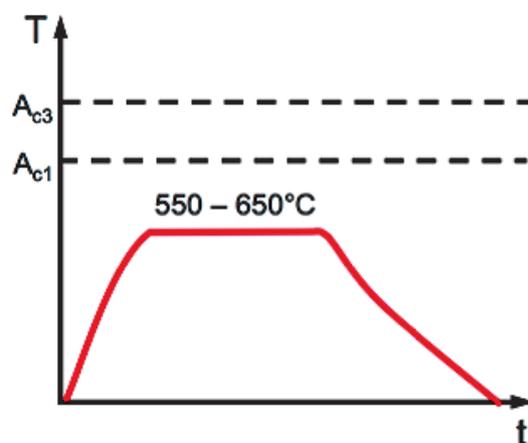


Bild 12: Temperaturführung beim Spannungsarmglühen

In vielen Fällen, kann auch eine geeignete Werkstoffauswahl bzw. ein Werkstoffwechsel eine signifikant höhere Maß- und Formstabilität mit sich bringen. Zum einen ist die plastische Verformung durch einen Eigenspannungsabbau bei Stählen mit einer höheren Warmfestigkeit geringer, zum anderen trägt eine verbesserte Härbarkeit zu einem homogeneren Gefüge über den Querschnitt bei, was sich ebenfalls positiv auf das Verzugsverhalten der Bauteile auswirken kann. Die Verwendung von geeigneten Vergütungs- oder Nitrierstählen anstelle von Einsatzstählen bringt hier beispielsweise einen bedeutenden Vorteil.

Zu einer weiteren Erhöhung der Maß- und Formstabilität kann bei verzugempfindlichen Bauteilen ggf. eine Anpassung der Konstruktion beitragen. Zur Vermeidung von unzulässigen Verzügen ist zu prüfen, ob die geforderten, oftmals sehr engen Toleranzen ausgeweitet werden können, ohne die Funktion des Bauteils zu beeinträchtigen. Unter Umständen ist es konstruktiv möglich, die Symmetrie der Werkstücke zu erhöhen, eine günstigere Masseverteilung vorzusehen oder von partiell sehr geringen Wandstärken Abstand zu nehmen. Auch die Anpassung der fertigungstechnischen Parameter, wie beispielsweise die Schnittgeschwindigkeit und der Vorschub bei der Zerspaltung, können zu einer Verbesserung des Verzugsverhaltens führen. Auch wenn sich hierdurch die Produktivität an der einzelnen Bearbeitungsmaschine verschlechtert, kann sich bei einer Gesamtkostenbetrachtung diese Maßnahme unter Umständen als sehr sinnvoll herausstellen.

3.1.4.5 Optimierung der Chargierung

Treten unzulässige Verzüge bei einer Nitrierbehandlung auf, sind die sachgemäße Chargierung sowie die Möglichkeiten einer Optimierung zu prüfen. Eine Minimierung von Maß- und Formänderungen verzugempfindlicher Bauteile kann unter Umständen schon durch eine Verwendung planer Auflageflächen, die Vermeidung von unvorteilhafter Stapelung sowie durch eine verbesserte Platzierung der Bauteile in Gestellen und Körben erzielt werden. Das hängende Nitrieren kann sich bei dünnen Ringen vorteilhaft erweisen, wie auch eine senkrechte, hängende oder stehende Chargierung langer schlanker Bauteile (**Bild 13**).

Ein Verspannen von Bauteilen kann im Spezialfall eine Maßnahme darstellen, die plastische Verformung durch einen Eigenspannungsabbau bei der Nitrierung einzugrenzen. Insbesondere bei recht großen und zugleich dünnwandigen Bauteilen wird die Verwendung einer relativ massiven Spannvorrichtung in Einzelfällen angewandt, um dem Verzug entgegenzuwirken. So ist dies beispielsweise bei einer einseitig verzahnten Zahnstange denkbar, das Bauteil aus Gründen der



Bild 13: Senkrecht Nitrieren verzugempfindlicher Ausgleichsbolzen aus 31CrMoV9

Verzugsminimierung auf einen Doppel T Träger zu spannen. Dies ist sicherlich eine Maßnahme, die sich wirtschaftlich nur im Ausnahmefall darstellen lässt. In der Praxis werden eher gleichartige Bauteile miteinander ohne weitere Vorrichtungen, die zu einer Erhöhung der Stabilität dienen, verspannt – z. B. Zahnstangen „Rücken an Rücken“ paarweise nebeneinander zu kleinen Paketen von beispielsweise vier bis acht Stück.

3.1.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend ist festzustellen, dass bei verzugsempfindlichen Bauteilen der Einfluss der Chargierung auf den Verzug aufgrund der hohen Komplexität der Einflussfaktoren oft individuell sehr unterschiedlich ausfällt. Somit ist in der Praxis bei auftretenden Problemen eine empirische Vorgehensweise in Form von Nitrierversuchen mit begleitenden Messungen meist der praktikabelste Ansatz für eine Optimierung.

3.1.5.1 Verzug durch eingebrachte Druckspannungen im Randbereich

Die Stickstoffaufnahme führt beim Nitrieren zu einer Mischkristallverfestigung und Ausscheidungshärtung durch Nitridbildung. Aus den im Randbereich der Bauteile erzeugten Druckspannungen resultiert letztendlich die messbare Härtesteigerung der Oberfläche. Auch wenn die erzielbaren Nitrierhärte-tiefen vergleichsweise gering ausfallen, können die Druckspannungen aufgrund ihrer Höhe insbesondere bei asymmetrischen und dünnwandigen Bauteilen zu Verzug führen. Bevorzugt tritt ein solcher Verzug bei weicheren Werkstoffen bzw. bei hohen Nitrierhärten und -tiefen auf.

3.1.5.2 Maßnahmen zur Verringerung von Druckspannungen

Neben einer optimierten Werkstoffauswahl hinsichtlich Vergütbarkeit und erzielbaren Nitrierhärten führt bei verzugsempfindlichen Bauteilen die Überprüfung und Anpassung der erforderlichen Nitrierhärte-tiefe nach dem Motto „weniger ist hin und wieder mehr“ oftmals zum Erfolg. Treten aus technologischer Sicht im Einsatz des Bauteils vergleichsweise geringe Flächenpressungen auf und wird die Nitrierschicht hauptsächlich als Schutz gegen abrasiven Verschleiß benötigt, kann eine Verringerung der Nitrierhärte-tiefe zur Erhöhung der Maßstabilität beitragen. Auch ein Verfahrenswechsel hin zum Nitrocarburieren bringt hier unter Umständen eine wesentliche Verbesserung des Verzugsverhaltens mit sich.

Neben konstruktiven Anpassungen (Symmetrie, Wandstärke) bietet ggf. auch ein partielles Weichhalten die Möglichkeit, das Verzugsverhalten positiv zu beeinflussen. Dünnwandige Ringe neigen zum „Aufgehen“ wenn die Druckeigenstressungen im Randbereich des Außen- und Innendurchmessers die Streckgrenze des Werkstoffes übersteigen. Ein Weichhalten des Außen- oder des Innendurchmessers, sofern dies aus funktionaler Sicht möglich ist, halbiert etwa die eingebrachten Druckeigenstressungen und verringert somit die Neigung zum Wachsen erheblich. Eine weitere Optimierungsmöglichkeit ist unter Umständen, Bauteilbereiche für den Nitrierprozess aus Gründen der Formstabilität stärker auszulegen, beim Nitrieren dann partiell weichzuhalten und später auf das Endmaß nachzuarbeiten.

3.1.5.3 Praxisbeispiel für Maßnahmen zur Verzugsminimierung

Bild 14 zeigt anschaulich, welche individuellen Maßnahmen zu einer formstabilen Nitrierung von relativ dünnwandigen Ringen bei einer Plasmanitrierung beitragen können.

Die Problematik bei der Nitrierung der verzugsempfindlichen Ringe ist die Vermeidung eines unzulässigen Planschlags und Rundlauffehlers. Die Anforderung an die Nitrierung ist lediglich eine Härtesteigerung im Bereich des Außendurchmessers. Durch die Stapelung und die Verwendung von Abdeckplatten als Festabdeckung wird der Aufbau von Druckspannungen im Innenbereich des

Bild 14: Plasmanitrieren von Ringen aus 42CrMo4
(Quelle: Hanomag)



Stapels sowie auf den Planflächen der Ringe vermieden. Zur Minimierung der Rundlauffehler der unteren Ringe trägt eine plane Auflageplatte bei, die bei Verzug für die Verwendung in einer Folgecharge nachgearbeitet werden muss. Die Stapelung der Ringe bewirkt zum einen eine gewisse verzugsminimierende Einspannung der Bauteile und ermöglicht zum anderen eine gleichmäßige, temperaturabhängige Volumenausdehnung und Schrumpfung während der Behandlung.