

GRUNDLAGEN UND ANWENDUNGEN THERMISCHER VERFAHREN:

In regelmäßiger Folge stellen wir Ihnen physikalische und verfahrenstechnische Grundlagen sowie aktuelle Anwendungsbeispiele industrieller thermischer Verfahren vor.

Folge 5: Nitrieren in Gas und im Plasma

Nitrieren in Gas und im Plasma

Oberflächen- und Randschichthärtungen sind von hoher, wertschöpfender Bedeutung für die moderne Fertigung. Eine Steigerung der Randhärte bietet dem Konstrukteur die Möglichkeit, Verschleiß zu minimieren, die Performance der Bauteile entscheidend zu verbessern sowie Gewichte bei gleicher Leistungsfähigkeit zu reduzieren.

Das Nitrieren ist ein etabliertes Oberflächenhärteverfahren für Stahlbauteile. Eine große Vielfalt von Bauteilen aus unterschiedlichsten Werkstoffen wird heute für verschiedenste Anwendungsbereiche im Maschinen- und Anlagenbau, Automobilbau, Werkzeug- und Getriebebau nitriert.

Der vorliegende Beitrag stellt das Nitrieren in seinen Grundzügen vor und erläutert die beiden Verfahrensvarianten Gas- und Plasmanitrieren. Zudem werden die relevanten Aspekte für die Verfahrensauswahl erläutert, um dem Anwender individuell die Auswahl zu erleichtern.

Oberflächenhärteverfahren Nitrieren

In **Tabelle 1** sind die industriell bedeutendsten Oberflächenhärteverfahren zusammengestellt – unterteilt in Randschichthärteverfahren und thermochemische Diffusionsverfahren.

Zu den thermochemischen Verfahren gehören das Einsatzhärten und Carbonitrieren sowie das Nitrieren und Nitrocarburieren. Gemessen am Marktvolumen hat das Einsatzhärten den weitaus größten Anteil an den Verfahren der Oberflächen- und Randschichthärtung. Nitrierverfahren haben in den vergangenen Jahren stetig an Bedeutung

zugenommen, auch wenn die weltweite Tonnage nitrierter Bauteile im Vergleich zu den Anwendungen des Einsatzhärtens deutlich geringer ist.

Mit Ausnahme des Nitrierens und Nitrocarburierens beruht die Härtung bei allen in Tabelle 1 aufgeführten Oberflächenverfahren auf dem Mechanismus der Martensitbildung. Bei diesem Verfahren wird der Kohlenstoff nach Erwärmung des Bauteils oberhalb der A_{c3} -Temperatur interstitiell in Lösung gebracht. Beim nachfolgenden Abschreckvorgang bildet sich der Martensit durch „Umklappen“ der Gitterstruktur vom kubisch flächenzentrierten Austenit in die kubisch raumzentrierte Gefügestruktur. Der Kohlenstoff hat aufgrund der relativ hohen Abschreckgeschwindigkeit nicht genügend Zeit aus dem Gitter heraus zu diffundieren. Die damit einhergehende Verzerrung der Gitterstruktur führt zur erhöhten Druckeigenspannung im Gefüge, die ursächlich für die Härtesteigerung bei diesen Oberflächenhärteverfahren ist.

Für die Härtesteigerung beim Nitrieren ist hingegen nicht die Martensitbildung, sondern der Mechanismus der Ausscheidungshärtung verantwortlich. Der „Härteträger“ ist nicht der Kohlenstoff, sondern der Stickstoff. Die Härtung erfolgt dabei durch Diffusion von Stickstoff in die Randschicht und anschließender Nitridbildung mit den Legierungselementen des Stahls, z. B. mit Aluminium, Chrom, Molybdän, Vanadium, Mangan oder Silizium. Der Ausscheidungsvorgang der Nitride und Carbonitride wird durch die abnehmende Löslichkeit des Stickstoffs bei der Abkühlung noch unterstützt.

Das Nitrieren erfolgt bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen im Bereich des Ferrits unterhalb der A_{c1} -Temperatur. Übliche Nitriertemperaturen bewegen sich im Bereich von etwa 500–530 °C. Die Aufheiz- und Abkühlraten sind sehr moderat und liegen normalerweise nicht über 50 °C/h (Ofenabkühlung). Da die Behandlung nicht mit einer Phasenumwandlung einhergeht und in der Regel eine schnelle Abkühlung (Abschreckung) vermieden wird, tritt auch kein „Abschreckverzug“ auf. Die Nitrierhärtung ist daher ein sehr verzugsarmes Oberflächenhärteverfahren; auch die Gefahr von Härterissen ist durch die fehlende Abschreckung nicht gegeben. **Tabelle 2** fasst die Eigenschaften von Nitrierschichten zusammen.

Tabelle 1: Einteilung der wichtigsten Oberflächenhärteverfahren

Oberflächenhärteverfahren	
Randschichthärteverfahren	Thermochemische Diffusionsverfahren
Induktionshärten	Einsatzhärten
Flammhärten	Carbonitrieren
Laserstrahlhärten	Nitrieren
Elektronenstrahlhärten	Nitrocarburieren

Tabelle 2: Eigenschaften von Nitrierschichten

Nitrierschicht	
Vorteile	Nachteile
hohe Härte und Festigkeit	relativ dünne Schichten
hohe Dauerschwingfestigkeit	
gute Gleiteigenschaften	geringe Zähigkeit und hohe Empfindlichkeit bei Stoßbelastung
hohe Temperaturbeständigkeit	

Durch die nitrierte, verschleißfeste Oberfläche verbessern sich die Gleiteigenschaften und die Dauerschwingfestigkeit der Bauteile. Die Oberflächenhärten sind sehr stark werkstoffabhängig und können bei höher legierten Stählen mehr als 1.000 HV erreichen. Nitrierschichten sind zudem bis etwa 400 °C dauerhaft temperaturbeständig. Die vergleichsweise geringe Behandlungstemperatur, die einerseits die Verzugsarmut bedingt, wirkt sich nachteilig auf die Behandlungszeiten und die einstellbaren Härtetiefen aus. Da die Diffusionsgeschwindigkeit des Stickstoffs langsam ist, sind die Haltezeiten relativ lang und die erreichbaren Nitrierhärtetiefen begrenzt. Übliche Haltezeiten betragen einige Stunden bis zu mehreren Tagen. **Bild 1** veranschaulicht den Aufbau einer Nitrierschicht.

Eine Nitrierschicht besteht aus einer Verbindungsschicht an der Oberfläche, die in der Regel nicht über 25 µm stark ist, und aus der Diffusionszone, in der sich die Nitride auscheiden. Die einstellbare Nitrierhärtetiefe ist stark werk-

stoffabhängig und beträgt in der Regel einige Zehntel bis maximal 1 mm. Die Duktilität der Nitrierschicht, insbesondere der Verbindungsschicht, ist relativ gering – die Stoß- sowie die Thermoschockempfindlichkeit ist recht hoch, wodurch bei entsprechender Beanspruchung die Neigung zur Rissbildung ausgehend von der Oberfläche ansteigt.

Werkstoffkennwerte

Eine Nitrierschicht wird in erster Linie durch die Oberflächenhärte und die Nitrierhärtetiefe/ Nitriding Hardness Depth (NHD) charakterisiert. Die Oberflächenhärteprüfung an den Bauteilen erfolgt dabei mit einer Härteprüfung nach Vickers. Zu empfehlen ist hier in der Regel eine Prüfkraft von 5 daN (HV 5), bei sehr dünnen Schichten auch darunter, um den Einfluss der Kernhärte bei der Messung möglichst klein zu halten.

Die NHD wird ebenfalls mithilfe der Vickersprüfung (HV 0,5) bestimmt (**Bild 2**). Die Prüfung erfolgt zerstörend an einem Querschliff, der üblicherweise aus einer Mitlaufprobe, die entweder aus dem Bauteil stammt oder dem Bauteil hinsichtlich Analyse und Vergütungsfestigkeit sehr ähnlich ist, gefertigt wird. Alternativ kann die Probe natürlich auch einem Bauteil der Charge entnommen werden, z. B. bei kleineren Serienteilen.

Die Grenzhärte für die Nitrierhärtetiefe ist nach DIN 50 190 Teil 3 definiert als Kernhärte plus 50 HV. Der Schnittpunkt der Härteverlaufskurve mit dem Wert der Grenzhärte ist maßgebend für die Ermittlung der Nitrierhärtetiefe.

Die Einflussgrößen auf den Härteverlauf auf die Oberflächenhärte und Nitrierhärtetiefe werden in Bild 3 bis 6 schematisch dargestellt.

Mit zunehmender Behandlungstemperatur und -zeit steigt die Nitrierhärtetiefe an, wobei sich eine Erhöhung der Temperatur stark überproportional auf die Diffusionsgeschwindigkeit auswirkt (**Bild 3**). Die NHD-Zunahme sinkt allerdings mit der Behandlungszeit proportional zur \sqrt{t} , wodurch sinnvoll und wirtschaftlich einstellbare Nitrierhärtetiefen begrenzt sind (**Bild 4**).

Der Gehalt an Legierungselementen (Nitridbildner) wirkt sich entscheidend auf die erzielbaren Oberflächenhärten aus. Allerdings hemmen die Legierungselemente sowie der Kohlenstoffgehalt die Diffusion des Stickstoffs in die Bauteiltiefe. **Bild 5** verdeutlicht die Auswirkung des Legierungsgehaltes auf die erreichbare Oberflächenhärte und Nitrierhärtetiefe.

Die Vergütungsfestigkeit hat ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf den Härteverlauf (**Bild 6**).

Mit Zunahme der Vergütungsfestigkeit wird der Verlauf stabiler und verschiebt sich zu höheren Härtewerten. Die NHD nimmt aufgrund ihrer Definition gleichzeitig tendenziell ab, da ihre Grenzhärte nach DIN 50 190 nicht wie z. B. beim Einsatzhärten von einem festen Wert, sondern von

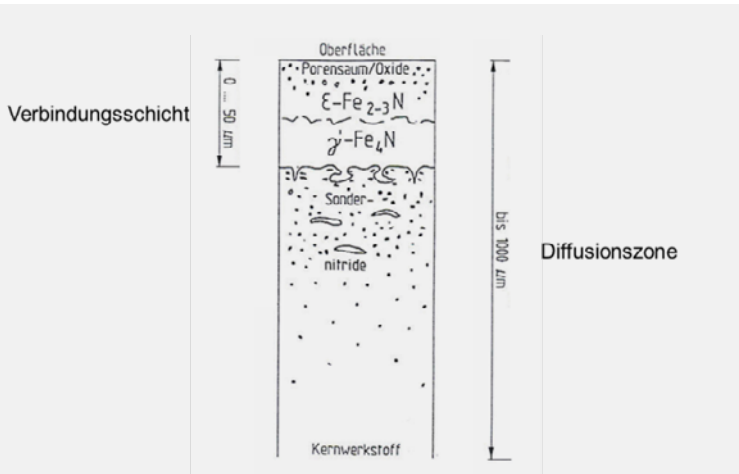


Bild 1: Aufbau einer Nitrierschicht (W. Lerche)

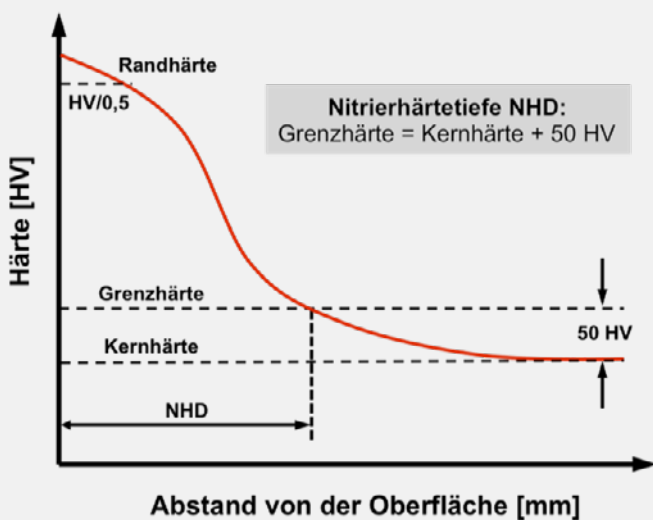


Bild 2: Ermittlung der Nitrierhärtetiefe (NHD) [1]

der Kernhärte ($GH = KH + 50 \text{ HV}$) abhängt. Dies kann in der Praxis zu einer falschen Einschätzung der Qualität des Härteverlaufs und zu der damit einhergehenden Belastbarkeit der Nitrierschicht führen.

Nitrierbare Werkstoffe

Grundsätzlich eignen sich alle Eisenwerkstoffe, die einen ausreichend hohen Gehalt an Nitridbildnern aufweisen, für eine Nitrierbehandlung. So werden heute Bauteile aus Bau-, Nitrier-, Einsatz-, Vergütungs- und Werkzeugstählen sowie aus hochfesten und nichtrostenden Stählen sowie auch Gusseisen mit Erfolg nitriert.

Unlegierte Stähle

Unlegierte Stähle verfügen über keinen nennenswerten Anteil an Legierungselementen. Nur in geringem Maße sind die Nitridbildner Mangan, Silizium und ggf. geringe Mengen Aluminium vorhanden. Eine bedeutende Härtesteigerung ist bei diesen Stählen nur durch eine Variante des Nitrierens, dem Nitrocarburieren, zu erzeugen. Beim Nitrocarburieren wird dem NH_3 bzw. N_2 ein Kohlenstoffspendegas wie CO_2 oder CH_4 zugesetzt. Die Behandlungstemperatur liegt mit ca. 580°C höher als beim Nitrieren. Die Haltezeiten betragen üblicherweise nur einige Stunden.

Ziel der Nitrocarburierung ist die Bildung einer weitgehend monphasigen ϵ -Verbindungsschicht ($\text{Fe}_{2,3}\text{N}$), die eine hohe Härte, gute Gleit- und Korrosionseigenschaften aufweist. Die Dicke der Verbindungsschicht ist in Grenzen einstellbar und liegt normalerweise je nach Anwendungsfall und Werkstoff bei 5 bis $25 \mu\text{m}$. In vielen Fällen wird das Nitrocarburieren zur Verbesserung der Korrosionsbeständigkeit durchgeführt, wobei die Korrosionsbeständigkeit der ϵ -Verbindungsschicht noch durch eine Nachoxidationsbehandlung verbessert werden kann. Die Ausbildung der Diffusionszone ist beim Nitrocarburieren eher von untergeordneter Bedeutung.

Das Nitrocarburieren stammt ursprünglich aus der Salzbadtechnologie und kann sowohl im Gas als auch im Plasma durchgeführt werden.

Legierte und hochlegierte Stähle ($\text{Cr} < 12\%$)

Grundsätzlich ist eine Nitrierung im Gas wie im Plasma möglich. Mit beiden Verfahren können in der Regel die geforderten Bauteileigenschaften eingestellt werden. Bei vergleichbaren Behandlungstemperaturen und Haltezeiten werden äquivalente Ergebnisse erzielt. Neben dem wirtschaftlichen Aspekt können bauteilspezifische Gründe die Auswahl des Nitrierverfahrens einschränken.

Hochlegierte Stähle ($\text{Cr} > 12\%$)

Hochlegierte, nichtrostende Stähle werden bevorzugt plasmanitriert. Sie bilden mit dem Luftsauerstoff eine Chromoxidschicht an der Oberfläche aus, die für ihre Kor-

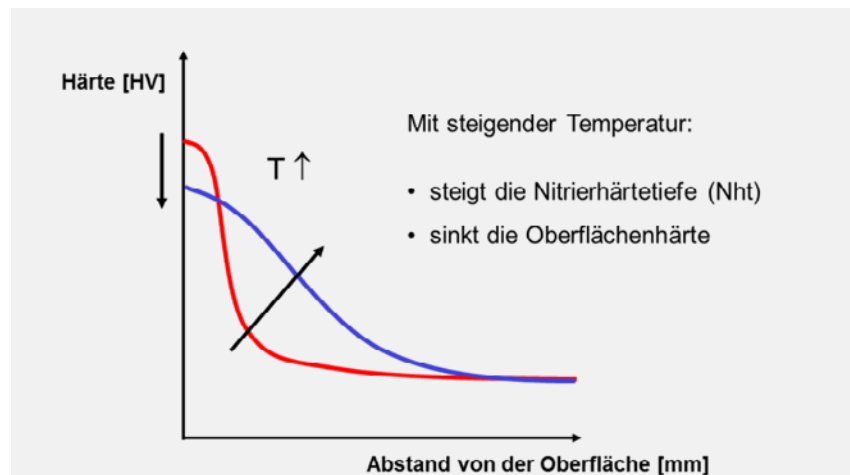


Bild 3: Einfluss der Behandlungstemperatur auf den Härteverlauf

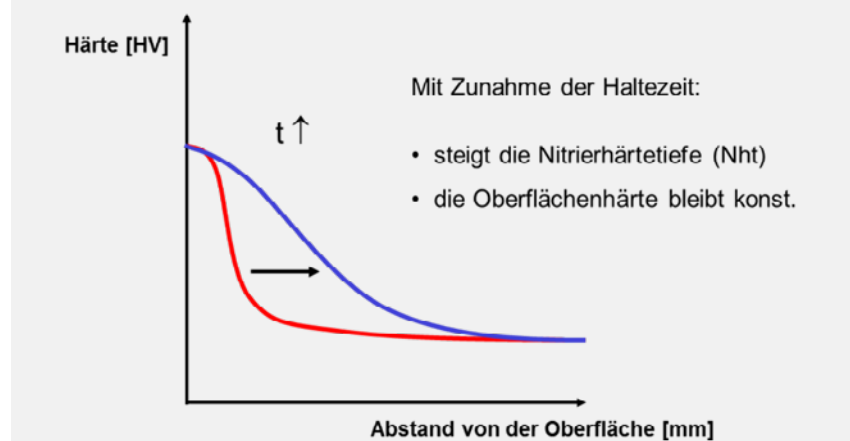


Bild 4: Einfluss der Behandlungszeit auf den Härteverlauf

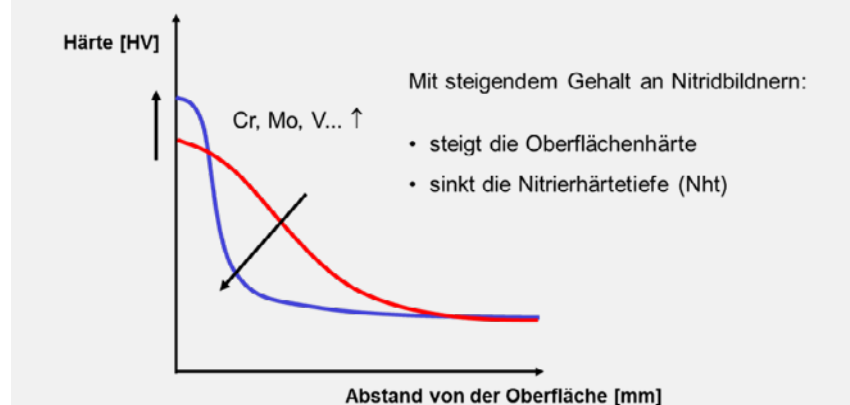


Bild 5: Einfluss des Legierungsgehaltes auf den Härteverlauf

rosionsbeständigkeit ursächlich ist. Diese Oxidschicht muss aufgebrochen werden, damit die Oberfläche Stickstoff aufnehmen kann und nitrierbar wird (Endpassivierung). Verfahrensbedingt ist dies im Plasma durch den „Ionenbeschuss“ der Bauteiloberfläche gegeben (Sputtereffekt).

Zu beachten ist, dass sich durch die Nitrierung dieser Stähle ihre Korrosionsbeständigkeit deutlich verschlech-

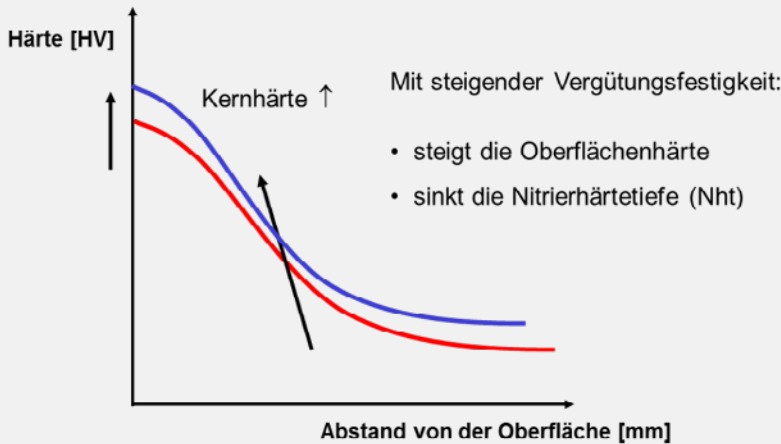


Bild 6: Einfluss der Vergütungsfestigkeit auf den Härteverlauf

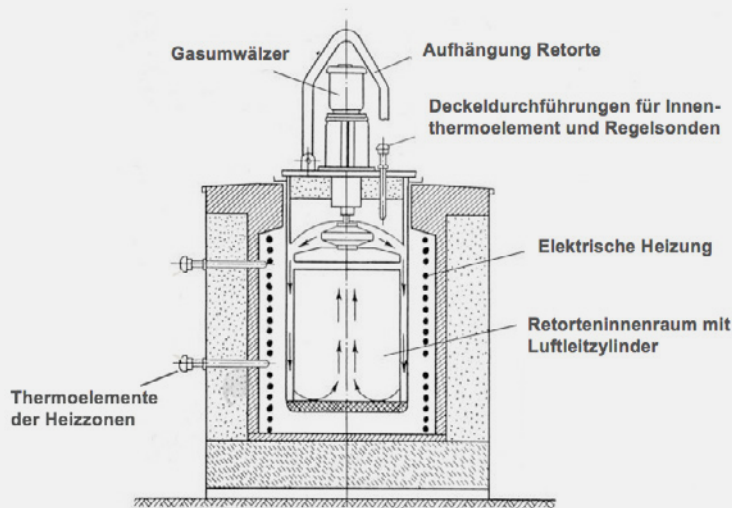


Bild 7: Aufbau einer Gasnitrieranlage (gasumgewälzter Schachtofen) [2]

tert. Durch eine Absenkung der Behandlungstemperatur auf etwa 390 bis 430 °C kann die Korrosionsbeständigkeit zwar erhalten werden, die Folge sind jedoch sehr dünne Härteschichten, die nur sehr begrenzt verschleißhemmend wirken.

Beim Nitrieren von nichtrostenden Stählen werden aufgrund des hohen Legierungsgehaltes sehr hohe Härten von mehr als 950 HV erzielt. Dies ist insbesondere bei Austeniten aufgrund des weichen Kerngefüges bedenklich. Der sogenannte „Eierschaleneffekt“ führt bei zu hoher Flächenpressung beim Einsatz der Bauteile schnell zu einem Einbrechen bzw. Abplatzen der harten Schicht.

Verfahren Gasnitrieren und Plasmanitrieren

In der Praxis werden Bauteile im Salz, Gas und Plasma nitriert. Das Nitrieren im Salzbad hat in den vergangenen Jahren immer weiter an Bedeutung verloren, sodass heute zumeist die Nitrierung im Gas oder im Plasma durchgeführt wird. Der gasförmige Stickstoff liegt im Temperaturbereich

des Nitrierens als Molekül N_2 vor und ist nicht reaktiv (Inertgas). Beim Nitrieren muss somit der molekulare Stickstoff in die atomare Form überführt werden. Die Verfahren Gasnitrieren und Plasmanitrieren unterscheiden sich in erster Linie hinsichtlich der Gewinnung des atomaren Stickstoffes. Beim Gasnitrieren wird der atomare Stickstoff aus Ammoniakgas (NH_3) bei leichtem Ofenüberdruck, beim Plasmanitrieren aus molekularem Stickstoff (N_2) unter Vakuumbedingungen gewonnen.

Nitrieren im Gas

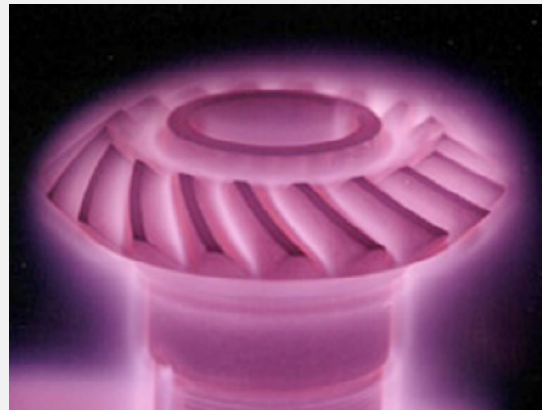
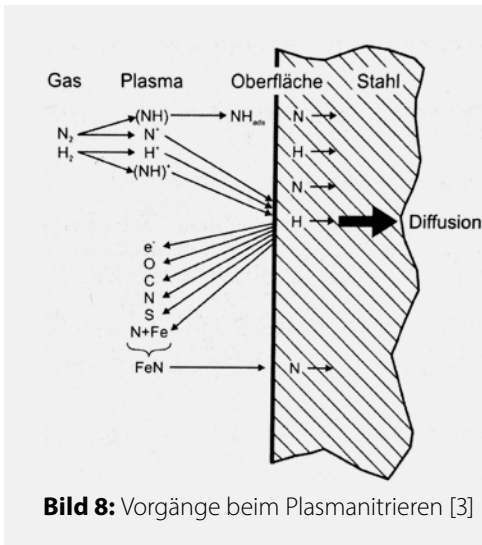
Oberhalb von 450 °C beginnt sich Ammoniak nennenswert in seine Bestandteile Stickstoff und Wasserstoff aufzuspalten. Die Spaltung findet an der katalytisch wirkenden Bauteiloberfläche statt. Im Moment der Spaltung entsteht atomarer Stickstoff, der mit dem Eisen die Verbindungsschicht an der Oberfläche ausbildet. Die Diffusion in die Bauteiltiefe erfolgt dann aufgrund des Konzentrationsgefälles gemäß der Fick'schen Gesetze. Im Gefüge verbindet sich der Stickstoff mit den gelösten nitridbildenden Legierungselementen wie z. B. Chrom, Aluminium, Mangan, Silizium, Molybdän oder Vanadium. Es kommt zur Ausscheidung von Nitriden und Carbonitriden. Nitrierbehandlungen werden aufgrund der verhältnismäßig langen Behandlungszeiten meist in Chargenanlagen (Kammer- oder Schachtofen) und selten in Durchlaufanlagen durchgeführt. **Bild 7** zeigt schematisch den Aufbau eines gasumgewälzten Schacht- und Kammerofens, wie er üblicherweise beim Nitrieren verwendet wird.

Beim Gasnitrieren erfolgt der Wärmeübergang auf die Bauteile in erster Linie über Konvektion; der Strahlungsanteil ist aufgrund des relativ niedrigen Temperaturniveaus gering. Die Behandlungsgase werden mittels eines Umwälzlüfters im Kreislauf zwischen beheizter Retortenwandung und Gasführungszyllinder gerichtet geführt und strömen anschließend an der Charge vorbei. Sofern ausreichend lange durchwärmt wird, kann während der Haltezeit selbst bei Mischchargen von einer sehr gleichmäßigen Temperaturverteilung innerhalb der Charge und über die gesamte Oberfläche der einzelnen Bauteile ausgegangen werden. Die Temperaturgenauigkeit bewegt sich in modernen Anlagen üblicherweise im Bereich von +/- 5 °C.

Nitrieren im Plasma

Beim Plasmanitrieren werden anstelle des Ammoniaks Wasserstoff und Stickstoff als Behandlungsgase eingesetzt. Der für die Nitrierung erforderliche atomare Stickstoff wird aus dem molekularen Stickstoff durch das Anlegen einer Spannung zwischen Bauteil und Retortenwand unter Vakuum bei einem Druck von 2–5 mbar gewonnen (**Bild 8**).

Der Elektronenfluss, der von der kathodisch geschalteten Bauteiloberfläche hin zur anodischen Retortenwand fließt,



führt zur Ionisierung des Stickstoffs. Die positiv geladenen Stickstoffionen werden von der Bauteiloberfläche angezogen und prallen mit hoher kinetischer Energie auf diese auf. Aufgrund der hohen Affinität des Eisens zum Stickstoff bildet sich eine Verbindungsschicht aus. Der Stickstoff diffundiert dann äquivalent zum Gasnitrieren aus der Verbindungsschicht in das Bauteilinnere gemäß der Fick'schen Gesetze und führt zur Ausscheidung von Nitriden und Carbonitriden.

Bild 9 zeigt die Ausbildung des Plasmas im oberflächennahen Bereich eines Getriebeteils bei der Nitrierung.

Plasmanitrieranlagen sind meist als Haubenofenanlagen, seltener als Kammerofen- oder Schachtofenanlagen, ausgeführt. Der Haubenofen bietet eine gute Zugänglichkeit zum Ofennutzraum, ermöglicht eine Einzelteilchargierung und eine einfache Platzierung von Thermoelementen in der Charge. **Bild 10** zeigt den Aufbau einer modernen Plasmanitrieranlage mit Generator und Vakuumpumpenstand.

Beim Plasmanitrieren spielen der Chargenaufbau und die Geometrie der einzelnen Bauteile für die Temperaturverteilung eine entscheidende Rolle. Da es sich um einen Vakuumprozess handelt, erfolgt die Erwärmung nicht wie beim Gasnitrieren über Konvektion, sondern nur durch Strahlung. Daher beeinflussen sich die Bauteile insbesondere bei Mischchargen mit unterschiedlichen Gewichten und Abmessungen hinsichtlich der Temperaturverteilung im Ofen gegenseitig, wodurch sich relativ große Unterschiede einstellen können. Die Geometrie des einzelnen Bauteils ist zudem bedeutend. Enge Schlitz, Spalte oder Radien werden z. B. wärmer als die übrigen Flächen.

Ein wesentlicher anlagentechnischer Entwicklungsschritt gelang durch die gepulste Entladung des Plasmas, wodurch der Energieeintrag gesenkt und die Temperaturgleichmäßigkeit verbessert werden konnte. Die Wärmezufuhr erfolgt über das Plasma und über die Wandheizung, die in modernen Anlagen in mehreren Zonen geregelt wird. Durch die Regelung der Heizung im Zusammen-

spiel mit Kühlgebläsen, die einzelne Zonen zudem durch das Anblasen der Retorte mit Hallenluft kühlen, wurde die Temperaturgleichmäßigkeit zudem deutlich verbessert. Für die Regelung müssen die Thermoelemente der einzelnen Zonen in der Charge, im Idealfall an den Bauteilen selbst, platziert werden. Zur Optimierung der Temperaturgleichmäßigkeit sind somit gute Kenntnisse und viel Erfahrung bei der Chargierung notwendig.

Partielles Nitrieren

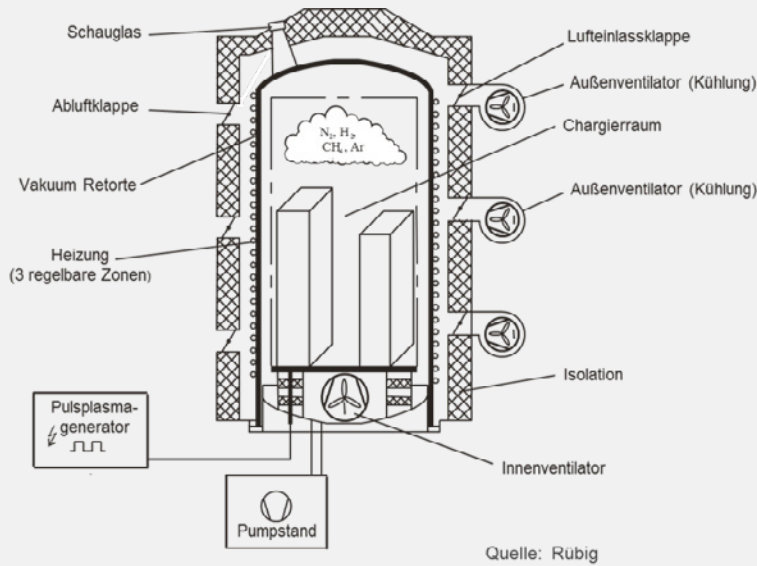
Je nach Bauteilanforderungen und nachfolgenden Arbeitsgängen können oder müssen Bereiche der Oberfläche partiell weichgehalten werden. Sie müssen somit durch ein geeignetes Mittel vor der Aufhärtung geschützt werden.

Beim Gasnitrieren wird dies durch ein manuelles Auftragen von zinnhaltigen Schutzpasten ermöglicht. Schutzpasten sind beim Plasmanitrieren nur für kleine Flächen zu empfehlen.

Beim Plasmanitrieren bleiben alle Berührungsflächen und Aufstellflächen verfahrensbedingt weich. Dies ermöglicht auf der anderen Seite die Verwendung von Festabdeckungen. **Bild 11** zeigt ein Beispiel für speziell an das Bauteil angepasste Festabdeckungen für kleine Zahnräder, die durch einen Ring außen und einem Bolzen innen partiell weichgehalten werden.

Die Fertigung solcher Festabdeckungen ist sehr aufwendig, bietet sich jedoch insbesondere bei Serienteilen an, um den Handlingsaufwand bei der Chargierung zu reduzieren. Ein zusätzlicher Vorteil gegenüber dem Auftragen von Nitrierschutzpasten besteht darin, dass die Bauteile im Anschluss an die Behandlung nicht mehr aufwendig gesäubert werden müssen. Um Pastenrückstände nach einer Nitrierung im Gas zu beseitigen, werden Bauteile z. B. durch eine Glasperlenstrahlbehandlung gesäubert.

Auch universal einsetzbare Festabdeckungen finden beim Plasmanitrieren Verwendung. Gewindegänge können



Quelle: Rübzig



Bild 10: Aufbau einer Plasmanitrieranlage als Haubenofenanlage (© RÜBIG GmbH & Co KG)

leicht mit Schrauben geschützt werden. Durch das Auflegen von Platten können beispielsweise Innendurchmesser bei zylindrischen Bauteilen einfach geschützt werden.

Nitrieren von Schüttgut

Das Nitrieren von Schüttgut ist im Gas problemlos möglich, sofern eine ausreichende Durchströmung der Charge mit dem Behandlungsgas gewährleistet ist. Diese hängt von der Umwälzleistung des Ofenlüfters sowie von der Chargierung an sich ab. Beim Plasmanitrieren ist eine Behandlung von Schüttgut nicht möglich, da alle Berührungsflächen verfahrensbedingt weich bleiben.

Fazit

Das Nitrieren hat sich als Oberflächenhärteverfahren für eine Vielzahl von Bauteilen aus unterschiedlichen Stahlqualitäten industriell etabliert und wird für verschiedenste Anwendungsbereiche eingesetzt.

Durch eine Nitrierbehandlung werden verschiedenste Bauteileigenschaften wesentlich verbessert. Die erzielbaren

Oberflächenhärten und Nitrierhärte-tiefen sind werkstoffabhängig. Aufgrund der relativ geringen Behandlungstemperatur und der moderaten Aufheiz- und Abkühlgeschwindigkeiten ist das Verfahren sehr verzugsarm, sodass auf eine umfangreiche mechanische Nacharbeit üblicherweise verzichtet werden kann.

Der Fertigungsablauf muss an den Nitrierprozess angepasst werden. Die Wahl des geeigneten Verfahrens muss bauteilbezogen getroffen werden. Sie ist abhängig von dem verwendeten Werkstoff, der Verfahrenstechnik und den Kosten.

LITERATUR

- [1] DIN 50190-3: Härtetiefe wärmebehandelter Teile, Ermittlung der Nitrierhärte-tiefe, März 1979
- [2] Merkblatt 447 Wärmebehandlung von Stahl – Nitrieren und Nitrocarburieren, Ausgabe 2005, ISSN 0175-2006, Herausgeber: Stahl-Information-Zentrum, Dr.-Ing. D. Liedtke
- [3] AWT-Fachausschuss 4: Thermochemische Behandlung von Eisenwerkstoffen im Gas. W. Gräfen, F. Hoffmann, D. Liedtke, K.-H. Weissohn, K.-M. Winter. Renningen: Expert Verlag, 2014

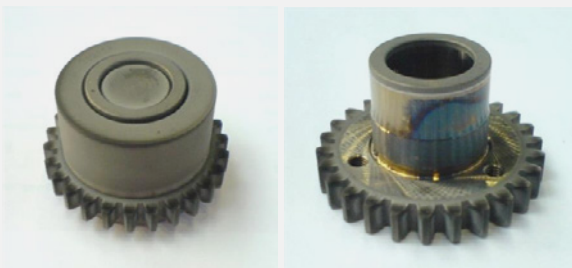


Bild 11: Beispiel für Festabdeckungen bei kleinen Zahnrädern

AUTOR



Dipl.-Ing. **Marco Jost**
 IBW Dr. Irretier GmbH
 Düsseldorf
 Tel.: 0177 / 2359536
 marco.jost@ibw-irretier.de