

# Neue Erkenntnisse und Anwendungen der Puls-Plasma-Nitriertechnik im Bereich Getriebe- und Antriebstechnik

New advances and applications in pulsed-plasma nitriding of gear and power train systems

Volker Strobl, Andreas Gebeshuber, Thomas Müller, Olaf Irretier

Die Anforderungen des Motorenbaus, der Getriebe- und Antriebstechnik bezüglich Festigkeit und Korrosionswiderstand haben in den letzten Jahren stark zugenommen. Bislang bewährte thermische Prozesse, wie das Einsatzhärten und Gasnitrieren, stehen in einigen Bereichen ihren Grenzen gegenüber.

Das pulsierte Plasmanitrieren bietet hinsichtlich Bauteillebensdauer aufgrund der speziellen Schicht-Zusammensetzung eine Reihe von Vorteilen in diesem Anwendungsbereich. Auch unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit liefert dieses Verfahren interessante Möglichkeiten, da in bestimmten Fällen auf eine finale Hartbearbeitung verzichtet werden kann. Außerdem kann das Plasmanitrieren aufgrund seiner umwelt- und verfahrenstechnischen Vorteile in die Fertigungslinie integriert werden. Der Beitrag zeigt die wesentlichen Versuchsergebnisse der Firma Rübzig zu diesem Thema, die zusammen mit der Universität Wels und der Magna/Steyr erarbeitet wurden.

The demands of the engine, transmission and power train industry concerning wear and also corrosion resistance of their components have strongly increased in the last years. Conventional processes like carburizing and gas nitriding are facing to some extent their limits.

Pulsed plasma nitriding on the other side arouses more and more interest in this industry as especially the life-time of these components can be increased dramatically due to the special layer composition of this surface treatment process. Pulsed plasma nitriding is also a very interesting economical option as normally the final, very cost-intensive hard machining can be omitted. Furthermore, pulsed plasma nitriding has considerable advantages concerning the environment compared to the other heat treatment processes. It is the only surface heat treatment that can be easily integrated into mechanical manufacturing as there is no open flame and nearly no waste gas. The lecture will show the essential findings that company Ruebig has gained and tested in the past few years together with the University of Wels and the company Magna/Steyr.

## Einleitung

In den letzten 15 Jahren ist der Aufwand der nach dem Einsatzhärten notwendigen Hartfeinbearbeitung – vor allem ein Schleifen der Zahnflanken – signifikant gestiegen. Im Getriebewerk von VW in Kassel beispielsweise stieg der Anteil der Hartfeinbearbeitung von 2 % im

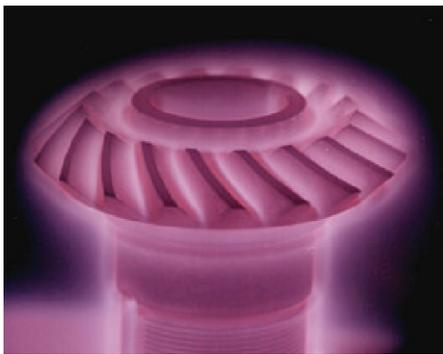
Jahre 1998 auf mehr als 14 % im Jahre 2005 [1]. Die Kosten einer solchen mechanischen Bearbeitung nach der Wärmebehandlung können bis zu 40 % der Gesamtbaukosten ausmachen.

Die Verzahnungsindustrie hat für dieses Problem in der Regel verschiedene Herangehensweisen. Der Kostendruck in der Zahnradfertigung beeinflusst nicht nur

den Prozess der mechanischen Bearbeitung, sondern zwingt zudem, neue Möglichkeiten der Wärmebehandlung zu prüfen, wie zum Beispiel neue Technologien im Bereich des klassischen Einsatzhärtens, wie das Unterdruckaufkohlen mit Gasabschreckung. Alle diese Technologien verlangen hohe Temperaturen und eine Martensitumwandlung als metallurgischen Mechanismus, um sowohl Härte als auch Dauerfestigkeit zu erhöhen. Beide Faktoren – hohe Temperaturen in Kombination mit Gasabschreckung und Volumenänderung aufgrund der Martensitumwandlung – führen zu erheblichen Bauteilverzügen und dadurch zu einer unumgänglichen Hartfeinbearbeitung, sobald hohe Form- und Oberflächenqualitäten sowie sehr genaue Geometrietoleranzen gefordert werden.

Nitrieren ist ein Wärmebehandlungsprozess der nicht auf der Martensitumformung beruht, sondern die Ausscheidungshärtung als Mechanismus benutzt. Des Weiteren werden Nitrierprozesse bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen im Bereich von 500 bis 600 °C durchgeführt; außerdem ist eine Abschreckung mit flüssigen Medien nicht notwendig. Plasmanitrieren ist eine spezielle Form des Nitrierens, in der der atomare Stickstoff durch einen physikalischen Prozess – dem Niederdruckplasma – erzeugt wird, während die Dissoziation der Cyanide beim Salzbadnitrieren sowie des Ammoniaks beim Gasnitrieren chemische Reaktionen sind. Dieser Unterschied beim Erzeugen des atomaren Stickstoffs hat einige zusätzliche Vorteile, wie

- Umweltfreundlichkeit
- einfache Integration in Produktionslinien



**Bild 1:** Plasmanitrieren (Werksfoto Rübzig)

**Fig. 1:** Plasma nitriding

- hohe Genauigkeit und Prozesssicherheit
- geringer Gasverbrauch
- Möglichkeit des partiellen Nitrierens durch mechanische Abdeckung

Der geringe Verzug beim Nitrierprozess im Allgemeinen sowie die oben angeführten zusätzlichen Vorteile machen den Plasmanitrierprozess zu einer der vielversprechendsten Alternativen als Wärmebehandlung für Hochleistungszahnräder, wenn geringe Gesamtkosten, hohe Qualität in der Produktion, Integration in Bearbeitungslinien und Umweltfreundlichkeit eine große Rolle spielen.

Bislang wurde das Nitrieren noch nicht in großer Serie in der Produktion von hochbelasteten Zahnrädern eingesetzt. Gründe dafür sind nicht nur der Nitrierprozess selbst, sondern auch die höheren Materialkosten für den fürs Nitrieren notwendigen Vergütungsstahl und der Hartbearbeitung der Zähne mit Festigkeiten von 1.500 MPa und mehr. In den letzten Jahren wurden neue Stähle und zusätzlich

**Bild 2:** Plasmanitrieranlage (Werksfoto Rübzig)

**Fig. 2:** Plasma nitriding plant



neue Werkzeuge und Bearbeitungsmethoden entwickelt, sodass die Verfügbarkeit von hochfesten, fürs Nitrieren geeigneten Stählen und die dazu notwendigen mechanischen Bearbeitungen keine Einschränkung mehr für den Einsatz des Nitrierens in der Verzahnungsindustrie darstellen. Aufgrund der kostenintensiven Hartfeinbearbeitung nach dem Einsatzhärten, die für Hochleistungszahnräder unumgänglich ist, und unter Berücksichtigung der fürs Nitrieren notwendigen höher legierten Stähle, dem Bearbeiten dieser härtesten Stähle und den längeren Prozesszeiten beim Nitrieren, können immer noch beträchtliche Kosteneinsparungen erzielt werden, wenn die teure Hartfeinbearbeitung nach der Wärmebehandlung vermieden werden kann.

Dieser Beitrag liefert neue Resultate eines systematischen Ansatzes um verlässliche Daten für plasmanitrierte, höherfeste Stähle für Getriebe- und Antriebsanwendungen zu generieren.

## Grundlagen Plasmanitrieren

Das Plasmanitrieren wird mit dem Ziel durchgeführt, die Verschleiß-, Ermüdungs- und Korrosionsverhaltens von Werkstücken zu verbessern. Im Gegensatz zu den sonstigen Methoden wie Gas-, Salz- und Pulvernitrieren besitzt das Plasmanitrieren eine Reihe von verfahrensspezifischen Vorteilen.

Das Plasmanitrieren wurde bereits vor dem zweiten Weltkrieg erfunden und immer weiter entwickelt. Ein wesentlicher Fortschritt gelang durch gepulste Entladung, wodurch der Energieeintrag gesenkt und die Temperaturgleichmäßigkeit verbessert werden konnte. Neben dem Aspekt der Umweltfreundlichkeit lassen sich mit dem Plasmanitrieren die Eigenschaften des Schichtaufbaues gezielt an das geforderte Beanspruchungsprofil anpassen. Die Nitriertemperatur ist werkstückabhängig und liegt zwischen 350°C und 570°C. Dabei entwickelt sich eine Verbindungsschicht mit einer Stärke von 0 bis 30 µm und eine Diffusionszone von 0,1 mm bis 0,7 mm. Die Behandlungszeit beim Plasmanitrieren beträgt zwischen 10 Minuten und 70 Stunden und richtet sich nach dem Werkstoff, dem gewünschten Schichtaufbau und der zu erreichenden Schichtdicke (**Bild 1**).

Zu den Hauptvorteilen des Plasmanitrierens zählen die Verbesserung der Reib- und Gleiteigenschaften, die Schaffung

korrosionsbeständiger Schichten und die große Verzugsarmut. In der Regel werden fertigtobearbeitete Bauteile plasmanitriert, die nach dieser thermochemischen Wärmebehandlung keiner weiteren mechanischen Fertigungsoperation wie z. B. Schleifen mehr unterzogen werden müssen.

Beim Plasmanitrieren werden zunächst die Werkstücke in Schutzgasatmosphäre mittels Ofenwandheizung auf Solltemperatur erhitzt. Durch Sputtern, d. h. Reinigung und Aktivierung der Werkstückoberflächen (Bombardement durch Ionenbeschuss) werden Passivschichten auf der Oberfläche entfernt, was das Nitrieren von korrosionsbeständigen Stählen und anderen passivschichtbildenden metallischen Werkstoffen erst ermöglicht (**Bild 2**).

Grundsätzlich eignen sich alle Stähle für eine Nitrierbehandlung. Das Ergebnis ist von Art und Gehalt der Legierungselemente und der Prozesstechnik abhängig. Maßgebend dafür sind die erreichbaren günstigen Randschicht- und Verbindungsschichteigenschaften. So werden Eisenwerkstoffe wie z. B. Einsatz-, Bau- und Vergütungsstähle, Werkzeugstähle, hochfeste und nichtrostende Stähle sowie auch Gusseisen mit Erfolg plasmanitriert. Durch die niedrige Behandlungstemperatur findet selbst bei hoher plastischer Verformung des Grundgefüges keine Rekristallisation statt. Folge: geringste Maßänderungen.

Die Vorteile des Plasmanitrierens sind:

- Flexibilität der Prozessführung, wodurch das Verfahren an unterschiedlichste Werkstoffe und Schichtanforderungen anpassbar ist
- partielle Behandlungen eröffnen wesentliche Möglichkeiten für Verbundkonstruktionen
- Optimierung des Schichtaufbaus hinsichtlich Beanspruchung. (z. B. dünne Verbindungsschichten bei großer Nitrierhärte-tiefe)
- hohe Reproduzierbarkeit und enge Toleranzen im Behandlungsergebnis
- geringere Rauigkeiten im Vergleich zu Salzbad und Gas
- kompakte Verbindungsschichten
- Integrierbarkeit in die Fertigung
- Prozesskombinationen Nitrieren und Beschichten oder Nitrieren und Oxidieren
- hohe Maß- und Formbeständigkeit bei Sinterteilen

- Temperaturmessung erfolgt direkt am Bauteil, dadurch ist eine präzise Temperaturführung möglich
- porenfreie bzw. porenarme Verbindungsschichten möglich
- geringe Maßänderungen und geringfügige Änderungen der Werkstückrauheit ermöglichen es, in vielen Fällen die Bauteile und Werkzeuge vor der Wärmebehandlung montagefertig zu bearbeiten
- effektive Nutzung des Prozessgases
- höchste Umweltverträglichkeit, im Vergleich zu alternativen thermochemischen Verfahren
- einfaches mechanisches Abdecken nicht zu nitrierender Stellen am Werkstück möglich.

Demgegenüber können als Nachteile genannt werden:

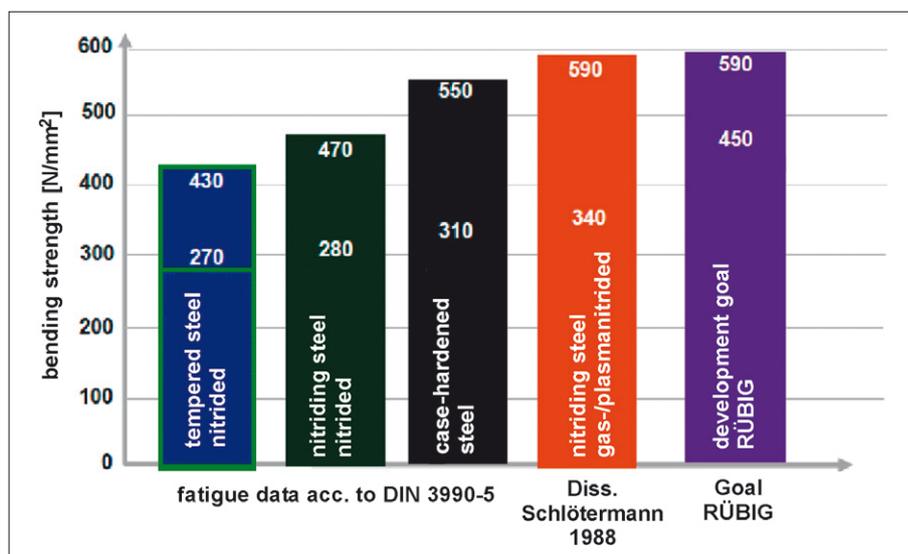
- definiertes Chargieren der zu behandelnden Teile
- Plasma dringt nicht in Spalte kleiner 0,6 bis 0,8 mm ein, daher ist die Behandlung von Schüttgut nicht möglich.

Neben dem Wegfall der Nacharbeit ist das Plasmanitrieren führend, wenn gleichzeitig Korrosions-, Verschleiß- sowie Festigkeitssteigerungen an Bauteilen erzielt werden sollen. Aufgrund der hohen Prozesssicherheit werden vor allem auch kritische Serien- und Normteile wie beispielsweise Synchronringe, Präzisionszahnrad für Hochleistungsgetriebe, Ventile, Werkzeuge und Gesenke, Auswerferstifte oder eng tolerierte Hydraulikkolben, die nach der Behandlung einbaufertig sind, heute plasmanitriert.

## Potenzial für plasmanitrierte Zähne

Das Potenzial des Plasmanitrierens bezüglich der Verwendung bei hochbelasteten Zahnradern kann aus den Ergebnissen der Untersuchungen von Schlötermann herausgelesen werden [2]. Ausgiebige Dauerfestigkeitstests mit gas- oder plasmanitrierten Zahnradern aus unterschiedlichsten Stählen und Materialbeschaffenheiten wurden durchgeführt und mit den entsprechenden Festigkeitsdaten der DIN 3990 verglichen [3]. Das Fazit dieser Tests ist, dass die Werte in der Norm im Vergleich zu den Testergebnissen sehr niedrig angesetzt sind.

Ein Versuch einsatzgehärtete und nitrierte Zahnradern zu vergleichen wurde von



**Bild 3:** Zahnfußbiegefestigkeit: Vergleich von Literaturdaten und Rübzig-Entwicklungsziel

**Fig. 3:** Bending strength of gear wheels: comparison of data from literature and Rübzig development objectives

H. Mallener durchgeführt [4]. Dieser Versuch zeigte, dass nitrierte Zahnradern speziell im Bereich niedriger Lastspielzahlen geringere Zahnfußfestigkeiten aufweisen. Eine weitere Untersuchung bezüglich der Tragfähigkeit nitrierter Zahnradern, durchgeführt von L. Albertin und H. Winter am FZG in München, führte zu ähnlichen Ergebnissen [5].

Ein kürzlich durchgeführtes Projekt bezüglich der Biegezugfestigkeit von einsatzgehärteten und nitrierten Stählen von Prof. Davoli [6] zeigte unterschiedliche Ergebnisse. Sein abschließendes Statement: „Die Schadenslinie der zwei Nitrierstähle ist sehr hoch, nicht weit entfernt von der Wöhlerlinie. Das lässt auf eine gute Überlastbarkeit für diese zwei Nitrierstähle schließen. Als Fazit kann gesagt werden, dass die gute Biegetragfähigkeit von richtig wärmebehandelten Nitrierstählen durch die Untersuchungen bestätigt worden ist.“

Durch die Kombination von richtigen Materialien mit den dazu passenden Wärmebehandlungen und einem optimierten Plasmanitrierprozess sollte es möglich sein, gute Festigkeitswerte auch im Bereich der Zeitstandsfestigkeit zu erreichen.

## Ergebnisse aus der Literatur

Ziel der Untersuchungen war die Bestimmung des Ermüdungsverhaltens verschiedener hochfester plasmanitrierter

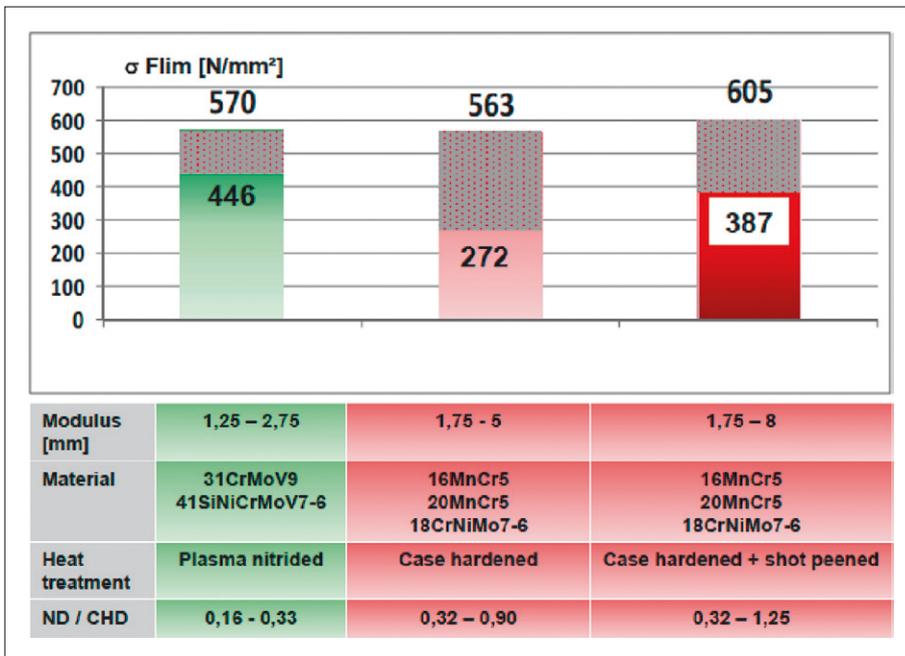
Stähle. In diesem Versuchsprogramm wurden verschiedene Kombinationen von Kernfestigkeit, Oberflächenhärte, Verbindungsschichtdicke, Nitrierhärte-tiefe und Druckeigenspannungsprofilen auf vier verschiedene hochfeste Stähle mittels speziell für solche Anwendungen entwickelten Plasmanitrierprozessen angewandt.

Entsprechend der DIN 3990-5 variiert die Zahnfußbiegefestigkeit von 270 bis 550 MPa (**Bild 3**), abhängig von Material und angewandter Oberflächenbehandlung (Nitrieren oder Einsatzhärten). Schlötermann zeigte schon 1988 [2], dass nitrierte Stähle im Gegensatz zu den Werten der DIN 3990-5 höhere Werte als einsatzgehärtete Stähle erreichen können.

In diesem Ergebnis lag die Motivation für Rübzig begründet, weitere Untersuchungen mit dem Ziel, das Streuband durch Anheben der unteren Grenze zu reduzieren (siehe **Bild 4**), durchzuführen.

In einem ersten Schritt, in dem der Einfluss der Materialwahl und des Plasmanitrierprozesses untersucht wurde, wurden alle Ermüdungsversuche am FZG in München an Zahnradern mit einem Modul von 2,75 durchgeführt. So war es möglich, die Zahnfußbiegefestigkeit an einer typischen Zahnradgeometrie zu untersuchen. Die Ergebnisse wurden mit denen einsatzgehärteter Teile verglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die richtige Kombination von Stahl und Plasma-



**Bild 4:** Biegefestigkeit: Vergleich von Rübig-Resultaten und Literaturdaten [8]

**Fig. 4:** Bending strength: comparison of Rübig-results and data from literature [8]

nitrierparametern zu Biegefestigkeiten führen, die denen einsatzgehärteter Stähle zumindest ebenbürtig sind (siehe Bild 4).

### Versuchsergebnisse

Aus den Untersuchungen ist zu sehen, dass in allen Fällen, in denen die Oberflächenhärte zwischen 700 und 1.000 HV1, sowie die Kernfestigkeit zwischen 1.000 und 1.600 MPa liegt, der Verlauf der Druckeigenspannungen der dominierende Faktor für die Dauerfestigkeit ist. Wie auch bei allen anderen Oberflächenhärteprozessen, wie Aufkohlen

und Induktivhärten, beeinflussen das Maximum der Druckeigenspannungen in Oberflächennähe sowie die Tiefe des Spannungsprofils die Dauerfestigkeitsgrenze positiv.

Generell gesagt, liegen die Dauerfestigkeitswerte für nitrierte Stähle im gleichen Bereich wie die von vergleichbaren aufgekohlten Stählen. Mit hohen Druckeigenspannungen übersteigen diese Werte sogar die der aufgekohlten Stähle.

Bei all den bisher durchgeführten Untersuchungen konnten keine Unterschiede in den Dauerfestigkeitswerten entdeckt werden, die auf eine Abhängigkeit von der Mikrostruktur der Verbindungs-

schicht bzw. der Diffusionszone hindeuten. Der Grund dafür kann aber auch der sein, dass – entsprechend den Literaturdaten – alle Proben mit einer dünnen bzw. keiner Verbindungsschicht sowie mit kaum sichtbaren Ausscheidungen in der Diffusionszone nitriert wurden.

Die nächsten Schritte in diesem Projekt sind:

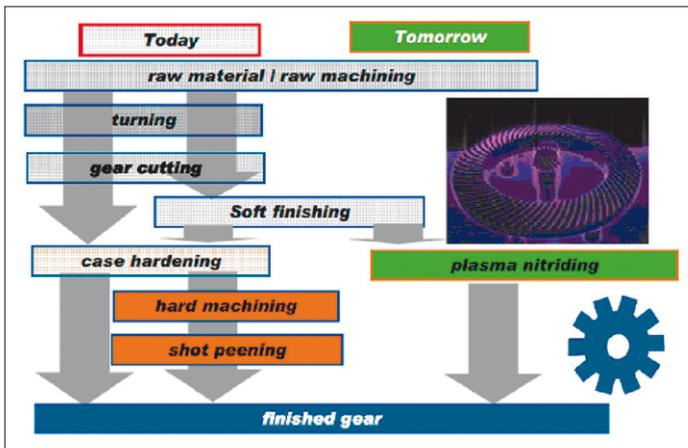
- Durchführung von Dauerfestigkeitstests an plasmanitrierten Hochleistungszahnradern, um die Flankentragfähigkeitseigenschaften im Vergleich zu einsatzgehärteten Zahnradern zu ermitteln (derzeit im Gange)
- Evaluierung des wirtschaftlichen Vorteils auf Grund des einfacheren, kürzeren Produktionsprozesses (**Bild 5**) plasmanitrierter Zahnradern im Vergleich zu einsatzgehärteten Zahnradern.

Der zweite Punkt ist von großem Interesse, da das Plasmanitrieren durch den Härtemechanismus der Ausscheidungshärtung sehr geringe Verzüge aufzuweisen hat. Zwischenresultate zeigen, dass es ein sehr großes Potenzial für den Ersatz der Einsatzhärtung durch das Plasmanitrieren gibt und dass dieser Umstieg zu einer Reduzierung der Gesamtkosten für die Zahnradherstellung führen kann.

An einem Beispiel soll hier gezeigt werden, wie sich der Umstieg von einem einsatzgehärteten auf ein plasmanitriertes Zahnrad rechnen kann. Die Firma Wilhelm Oberaigner GmbH mit Sitz in Nebelberg, Oberösterreich, ist einer der führenden Spezialisten in Entwicklung und Produktion von Automobil-Systemkomponenten. Ihr Leistungsangebot umfasst unter anderem komplette Antriebsachsen, Differentialsperren und Getriebe. Die Wilhelm Oberaigner GmbH zeichnet auch verantwortlich für die Entwicklung und Komponenten-Lieferung der Allradversionen von Mercedes Vito/Viano (NCV2) und Mercedes Sprinter (T1N & NCV3). Die Antriebskomponenten dieser Fahrzeuge werden bei Oberaigner produziert und direkt in die entsprechenden Werke ans Band geliefert.

Das Zahnrad, an dem hier exemplarisch der Vorteil des Plasmanitrierens gegenüber dem Einsatzhärten gezeigt werden soll, ist ein Hohlrad einer Allradvorderachse (**Bild 6**).

Seit zirka sieben Jahren ist dieses Hohlrad gerade verzahnt und dorneinsatzgehärtet im Einsatz. Die Dornhärtung



**Bild 5:** Produktionsprozess von Zahnradern: Einsatzhärten gegenüber Plasmanitrieren

**Fig. 5:** Production process of gear wheels: case hardening versus plasma nitriding

wird in diesem Fall verwendet, um den Verzug zu minimieren und dadurch die Qualität hinsichtlich gleichmäßiger Einsatzhärtetiefe zu erhöhen und die Hartbearbeitung nach dem Einsatzhärten zu reduzieren, die aber immer noch einen sehr hohen Aufwand bedeutet.

Zielsetzungen bei der Umstellung auf das Plasmanitrieren waren

- Vermeidung bzw. Reduktion der Hartbearbeitung,
- Geräuschminimierung,
- Kostenreduktion,

ohne Abstriche bei der Performance machen zu müssen.

Als Werkstoff wurde ein Nitrierstahl (31CrMoV9) gewählt. In **Bild 7** sind die Unterschiede zwischen den Vorgaben für das Einsatzhärten und denen für das Plasmanitrieren dargestellt: Die metallographischen Untersuchungen nach dem Plasmanitrieren wiesen eine Oberflächenhärte von 862 HV10, eine Nitrierhärtetiefe von 0,24 bis 0,27 mm sowie eine Verbindungsschichtdicke von 3 bis 7 µm auf. Zur Untersuchung des Verzugsverhaltens wurden jeweils 10 dorneinsatzgehärtete und 10 plasmanitrierte Zahnräder vor und nach der Wärmebehandlung vermessen. Bei jedem Zahnrad wurden an vier Zähnen sowohl linke als auch rechte Flanke vermessen. In **Bild 8** sind die durchschnittlichen Differenzwerte von Profil- und Flankenlinienabweichung, Teilung sowie der Rundheit am Bund dargestellt.

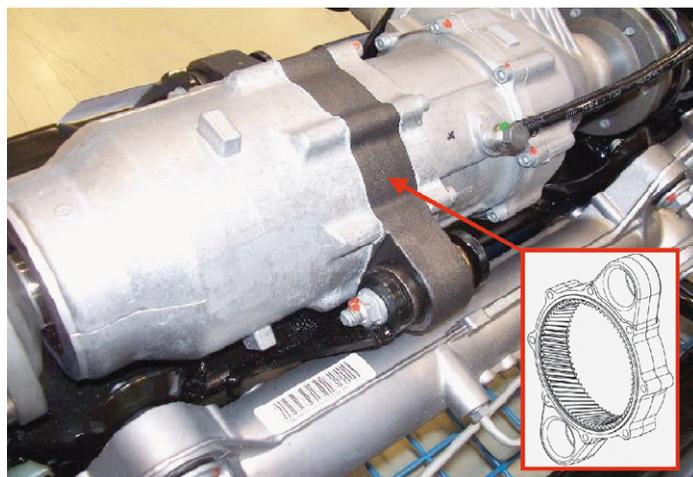
Die Ergebnisse zeigen, dass der Verzug beim Plasmanitrieren nur ein Bruchteil dessen beim Dorneinsatzhärten beträgt. Dadurch, dass der Verzug beim Plasmanitrieren dieses Hohlrades so gering ist, ergab sich keine Veränderung der Verzahnungsqualität, wodurch komplett auf eine nachträgliche Hartbearbeitung verzichtet werden kann. So ergibt sich trotz des etwas teureren Werkstoffes und den höheren Fertigungskosten vor der Wärmebehandlung ein Kostenvorteil gegenüber dem bisher verwendeten einsatzgehärteten Hohlrades von ca. 17 % (**Bild 9**).

### Fazit

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass mit der richtigen Material-Plasmanitrierkombination höchstmögliche Zahnradtragfähigkeiten für einen weiten Bereich von Standard- und Spezialzahnradan-

**Bild 6:** Hohlrad im Gehäuseverbund

**Fig. 6:** Hollow wheel in gear box



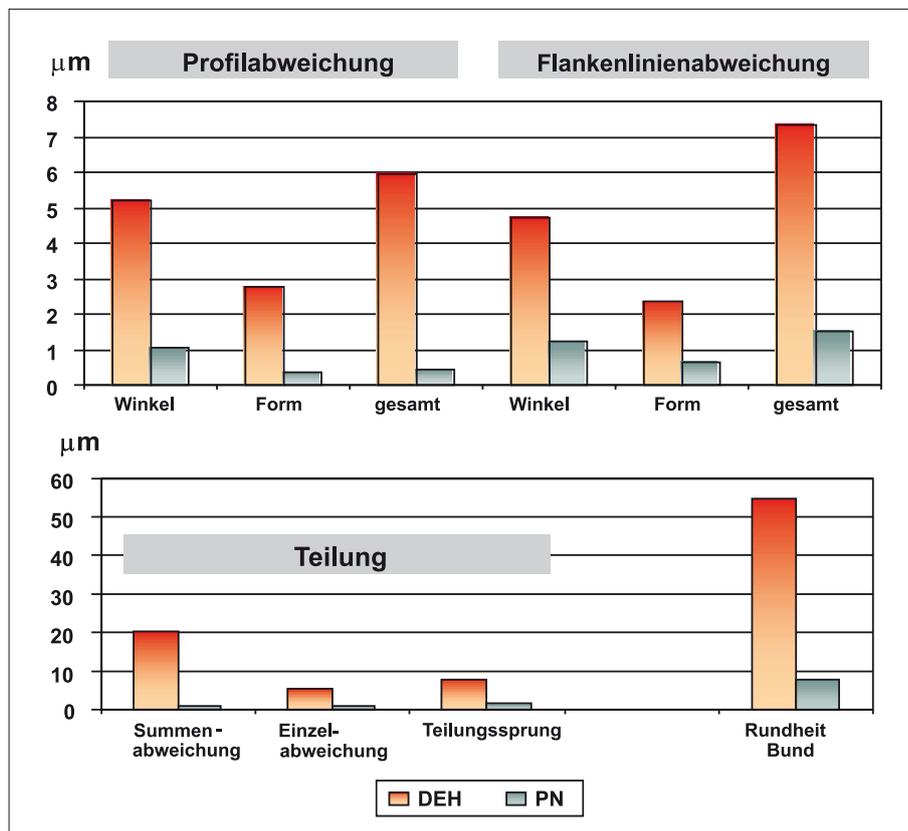
**Bild 7:** Hohlrad-Sollvorgaben

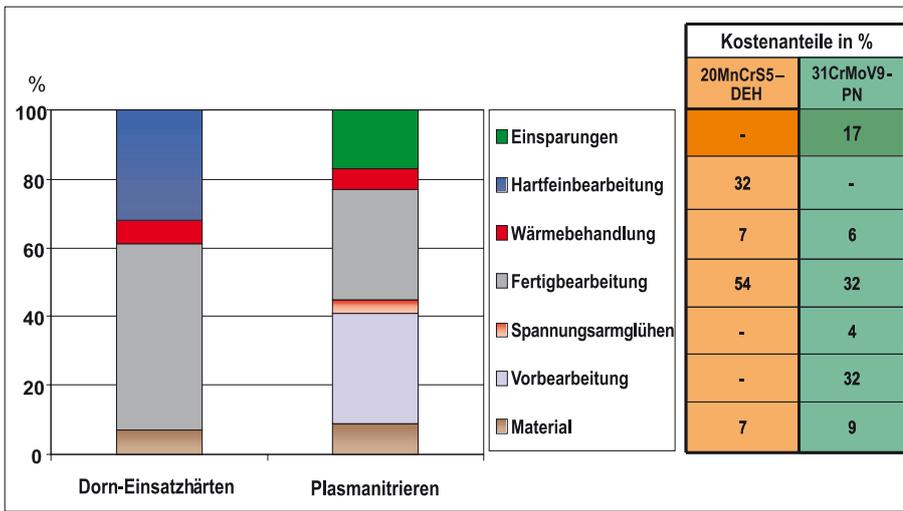
**Fig. 7:** Hollow wheel standards

Dorn-Einsatzhärten	Plasmanitrieren
Werkstoff: 20MnCrS5 (1.7149)	Werkstoff: 31CrMoV9 (1.8519)
Oberflächenhärte [ HRC ]: 58 + 4	Oberflächenhärte [HV10]: 750 + 150
Einsatzhärtetiefe [mm]: 0,65 + 0,2	Nitrierhärtetiefe [mm]: 0,2 + 0,2
Kernfestigkeit [MPa]: > 1000	Kernfestigkeit [MPa]: 1000 - 1200
Verzahnungsqualität: 6 - 7 (Automotive)	

**Bild 8:** Verzugsverhalten: Vergleich Plasmanitrieren und Dorneinsatzhärten

**Fig. 8:** Distortion: plasma nitriding versus case hardening





**Bild 9:** Kostenvergleich der beiden Herstellungsrouten

**Fig. 9:** Cost comparison: plasma nitriding versus case hardening

wendungen erreicht werden und dabei auch noch bedeutende Kosteneinsparungen erzielt werden können.

Zu den Hauptvorteilen des Plasmanitrierens zählen die Verbesserung der Reib- und Gleiteigenschaften, die Schaffung korrosionsbeständiger Schichten und die große Verzugsarmut. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass fertigbearbeitete und plasmanitrierte Zahnräder, unter speziellen Anwendungsgesichtspunkten nach dieser thermochemischen Wärmebehandlung keine weiteren mechanischen Fertigungsoperation wie z. B. Schleifen mehr erforderlich sind.

**Literatur**

[1] Weißner, R.; Fenstermann, J.: Anforderungen, Stand der Technik und Perspektiven von Verzahnungen im Automobilbau. Dresden; Germany: 2. Deutsch-Italienische Near-Net-Shape-Tagung, 2005

[2] Schlötermann, K.: Auslegung nitrierter Zahnradgetriebe, Untersuchungen zu den Auswirkungen unterschiedlicher Nitrierparameter auf den Werkstoffzustand und die Tragfähigkeit von Zahnrädern. Dissertation: RWTH Aachen, 1988.

[3] Norm DIN 3990 Teil 5 „Tragfähigkeitsberechnung von Stirnrädern, Dauerfestigkeitswerte und Werkstoffqualitäten“ (1984)

[4] Mallener, H.; Schulz, M.: Nitrieren von Zahnrädern als Alternative für das Einsatzhärten?. HTM Z : Werkst. Wärmebeh. Fertigung 48, 3 (1993), S. 166–171

[5] Albertin, L.; Frolich, R. L.; Winter, H.; Höhn B.-R.; Michaelis, K.: Load Carrying Capacity of Nitrided Gears. AGMA FTM; 94FTM4 (1993)

[6] Davoli, P.; Boniardi, M.; Longoni, C.: Bending Fatigue Resistance of Case Hardened and Nitrided Gears. München; Germany: International Conference on Gears, 2005

[7] Trubitz, P.; Kaminsky, T.; Brusky, U.; Kaiser, B.; Adelman, J.: Schwingfestigkeit nitrierter Proben. Vorhaben Nr.160, Le-

bendauervorhersage nitrierter bauteilähnlicher Proben mit Hilfe normierter Wöhlerstreubänder – Einfluss der Randschicht. Forschungsheft FKM; Heft 197 (1995)

[8] Stenico, A.: Werkstoffmechanische Untersuchungen zur Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder, Dissertation: TU München, 2007

**Dipl.-Ing. Volker Strobl,**  
Rübig GmbH & Co KG,  
Wels/Österreich



Tel.: +43 7242 29-383  
E-Mail: info@rubig.com

**Dipl.-Ing. Andreas Gebeshuber,**  
Rübig GmbH & Co KG,  
Wels/Österreich



Tel.: +43 7242 29-383  
E-Mail: info@rubig.com

**Dipl.-Ing. Thomas Müller,**  
Rübig GmbH & Co KG,  
Wels/Österreich



Tel.: +43 7242 29-383  
E-Mail: info@rubig.com

**Dr. Olaf Irretier,**  
Industrieberatung für Wärmebehandlungstechnik  
IBW Dr. Irretier, Kleve



Tel.: 02821 7153948  
E-Mail: info@ibw-irretier.de