

Industrie 4.0 – Wärmebehandlungsansätze für Liefer- und Prozessketteneinflüsse

von **Thomas Waldenmaier, Hermann Autenrieth**

Mittels der Wärmebehandlung metallischer Bauteile werden maßgeblich deren Gebrauchseigenschaften festgelegt, wie z. B. Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit oder Festigkeit und Schwingfestigkeit. Wie bei vielen Prozessschritten entlang der Fertigungskette eines Bauteils hängt der Erfolg einer Wärmebehandlung auch stark von den vorangegangenen Prozessen und der Materialherstellung ab. Erste Industrie 4.0 Ansätze zeigen ein hohes Potenzial, um Einflüsse der Liefer- und der Prozessketten auf die Wärmebehandlung zu verstehen und damit Handlungsempfehlungen abzuleiten. Es werden im Folgenden drei Anwendungsfelder exemplarisch vorgestellt. Das erste Beispiel stellt Möglichkeiten vor, wie mit geeigneter Sensorik bei Nitrier- und Nitrocarburierprozessen Prozessabweichungen frühzeitig erkannt werden, um rechtzeitig qualitätssichernde Maßnahmen einleiten zu können. Das zweite Beispiel zeigt den Einfluss von Lagerbedingungen auf das Nitrierverhalten des Warmarbeitsstahls X40CrMoV5-1. Statistisch eindeutig nachgewiesen, können kühle und trockene Lagerbedingungen empfohlen werden, um eine negative Beeinflussung zu minimieren. Das dritte Beispiel präsentiert einen ersten erfolgreichen Einsatz von künstlichen Intelligenzmodellen, um resultierende Oberflächenhärten an Halbzeugen basierend auf Lieferzeugnisse unterschiedlicher Halbzeuglieferanten vorhersagen zu können.

Industry 4.0 – Influences of supply and manufacturing chain on heat treatment

The performance characteristics of metal parts, e. g. wear and corrosion resistance or strength and fatigue strength, is decisive defined by their heat treatment. As for many process steps along the manufacturing chain the success of a given heat treatment depends strongly on previous process steps and material production. First Industry 4.0 approaches show high potentials to understand the influence of supply and manufacturing chains on heat treatment and to derive recommended actions. In the following three application fields are exemplarily presented. The first example identifies options to recognise early process deviations and to initiate counter measurements on time for nitriding and nitrocarburising processes with appropriate sensor systems. The second example shows the influence of storage conditions on the nitriding behaviour of the hot working tool steel X40CrMoV5-1. Statistically clear proven cool and dry storage conditions are effective to minimise the negative influence. The third example presents a first successful usage of artificial intelligence models to predict the resulting surface hardness of semi-finished parts from different suppliers on basis of the material certificates.

In zunehmendem Maße werden Ansätze von Industrie 4.0 erfolgreich in der industriellen Praxis umgesetzt. Dabei stehen stets kostenoptimierte und robuste Produktionsabläufe im Vordergrund, um qualitativ hochwertige Produkte nachhaltig und nachvollziehbar zu erzeugen. Aufgrund der Flexibilität und Vielseitigkeit von Wärmebe-

handlungsprozessen und -anlagen sowie der guten Verfügbarkeit wichtiger Prozessgrößen, wie z. B. Temperatur, Druck oder Prozessgaszusammensetzung, zeigt auch die Wärmebehandlung von Metallen ein großes Potenzial für diese modernen Produktionsansätze. Darüber hinaus ist dies von besonderer Bedeutung, da die Wärmebehandlung

in vielen Anwendungen der entscheidende Prozessschritt zum Einstellen der Funktions- und Gebrauchseigenschaften eines Bauteils ist. Im Rahmen der vorliegenden Studie sollen dazu Beispiele und Anregungen gegeben werden.

Signalverarbeitung

In **Bild 1** ist beispielhaft eine Prozesskette dargestellt, welche im Wesentlichen aus einer Weichbearbeitung, einem Reinigungsschritt, der eigentlichen Wärmebehandlung, einer erneuten Reinigung, einer Qualitätsprüfung und einer Hartfeinbearbeitung von Bauteilen besteht. Die Anlage zur Wärmebehandlung selbst besteht aus dem Ofen sowie einem Regler und einer Steuerung.

Die dargestellte Signal- und Informationsverarbeitung ermöglicht Ansätze von Industrie 4.0 für die Wärmebehandlung, wie z. B.:

- Erkennen von Trends, verändertes Anlagenverhalten, z. B. Evakuierdauer bei Vakuumanlagen oder Beeinflussung des C-Pegels beim Einfahren einer Charge
- Adaptive Prozessanpassungen, beispielsweise in Abhängigkeit von Ausgangsgrößen der Weichbearbeitung oder Legierungszusammensetzung
- Prozessoptimierung, wie z. B. hinsichtlich der Qualitätsprüfung mit robusteren Prozessfenstern oder Berücksichtigen der Bauteilvorgeschichte
- Verknüpfen von Prozessen, etwa zwischen Reinigungsprozess und Wärmebehandlung oder Wärmebehandlung und Hartfeinbearbeitung
- Vorhersehen von Wartungsfenstern mit Anlageninformation zum frühzeitigen Einplanen von z. B. Ersatzteilbeschaffung und Monteurereinsatz.

Zur Verdeutlichung der möglichen Einsatzgebiete der Signalverarbeitung beim Nitrieren und Nitrocarburieren wurden in einem Nitrierofen Versuchsreihen durchgeführt, bei denen Prozessabweichungen simuliert wurden. Ziel war dabei, die Sensorinformationen mit den Prozessabweichungen zu korrelieren. Als Proben wurden einfache Zylinder mit einem Durchmesser von 13 mm und einer Höhe von 10 mm aus dem Warmarbeitsstahl X40CrMoV5-1 (1.2344) verwendet.

Aus **Tabelle 1** ist der Versuchsplan ersichtlich. Aufgrund von Vorversuchen wurde deutlich, dass ein vorangegangener Prozess auf den jeweils durchzuführenden Versuch einen signifikanten Einfluss hat. Aus diesem Grund wurde der Referenzversuch (T0) lediglich zum Konditionieren des

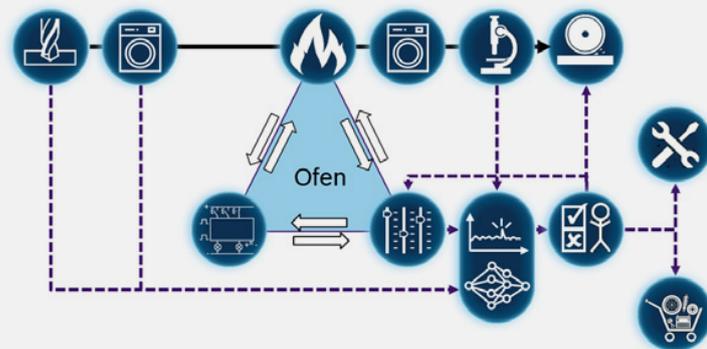
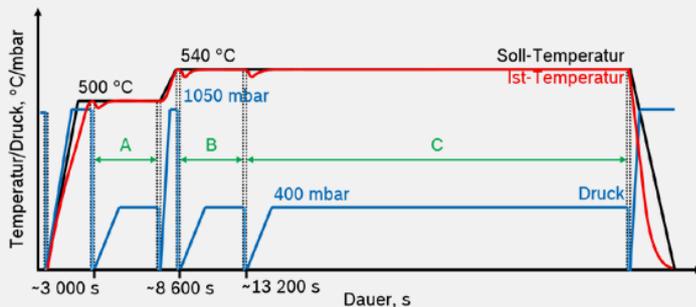


Bild 1: Beispielhafte Prozesskette mit Wärmebehandlung sowie einer Signal- und Informationsverarbeitung entlang der Prozesskette

Ofens durchgeführt und erst die Referenzversuche T1 bis T4 als solche gewertet. Der Versuch T4b war ein Nitrocarburierversuch, welcher ein abschließendes Nachoxidieren beinhaltet. Der Einfluss dieses Nachoxidierens auf das Sen-

Tabelle 1: Versuchsplan zur Signalverarbeitung beim Nitrieren und Nitrocarburieren

Bezeichnung	Beschreibung
T0	Ofen konditionieren mit Referenzprozess
T1	Referenzprozess
T2-4	Referenzprozess wiederholen
T4b	Ofen konditionieren mit Nitrocarburierprozess und Nachoxidieren (letzter Prozessschritt)
T5	Prozessabfolge: Einfluss eines Vorprozesses mit Nachoxidieren
T6	Prozessabweichung: 20 % Reduzierter Gesamtgasdurchsatz
T7	Prozessabweichung: 20 % Reduzierter Ammoniakdurchsatz (ersetzt durch Stickstoff)
T8	Prozessabweichung: Erhöhte Bauteiloberfläche (5 → 400 Proben)
T9	Prozessabweichung: Werkstoffverwechslung (50CrV4, 400 Proben)
T10	Prozessabweichung: 20 °C Höhere Behandlungstemperatur
T11	Prozessabweichung: Frisch gereinigter Ofenraum



- A: 1 h Oxi-Nitrieren (99 % NH₃, 1 % synthetische Luft), Soll-Gesamtgasdurchsatz 50 l/min
 B: 1 h Nitrocarburieren (97 % NH₃, 3 % CO₂), Soll-Gesamtgasdurchsatz 50 l/min
 C: 6 h Nitrieren (50 % NH₃, 50 % N₂), Soll-Gesamtgasdurchsatz 50 l/min

Bild 2: Prozesseinstellungen des Referenzversuchs

sorverhalten wurde mit dem Versuch T5 untersucht. Bei den Versuchen T6 bis T10 wurden verschiedene Einstellungen zur Simulation von Prozessabweichungen untersucht, wobei die je restlichen Versuchseinstellungen dem Referenzversuch entsprachen. Vor dem Versuch T11 wurde der Nitrierofen gründlich mit einem Vakuumstaubsauger gereinigt.

Die Einstellungen des Referenzversuchs können **Bild 2** entnommen werden. Die blau gestrichelten Bereiche stellen Prozessschritte dar, in denen der Ofen vor dem ersten Aufheizen, dem zweiten Aufheizen von 500 auf 540 °C, bei jedem Gaswechsel und vor dem erneuten Abkühlen auf Raumtemperatur auf einen Druck $< 1,0 \times 10^{-1}$ mbar evakuiert wurde. Aufheizen und Abkühlen erfolgten mit 1.050 mbar Stickstoff. Die Prozessschritte Oxi-Nitrieren (A), Nitrocarburieren (B) und das Nitrieren (C) wurden jeweils bei einem Absolutdruck von 400 mbar durchgeführt. Der dargestellte leichte Abfall der Ist-Temperatur zu Beginn der Prozessschritte A, B und C während des Füllvorgangs mit der Prozessgaszu-

sammensetzung ist durch die anlagenbedingte Deaktivierung der Heizung bei Prozessdrücken kleiner 270 mbar zu erklären. Die verschiedenen Prozessgaszusammensetzungen und -durchsätze sind ebenfalls in Bild 2 angegeben.

Der schematische Aufbau des Nitrierofens (Hersteller Fa. BMI) ist in **Bild 3** dargestellt. Während der Sauerstoffsensoren der Fa. Ziros und der Wasserstoffsensoren der Fa. Stange im Zwischenbereich des inneren und äußeren Mantels installiert sind, entnimmt das Messsystem Daten der Fa. SCR das Prozessgas direkt aus der Behandlungskammer. Das Messsystem Daten wird zum Schutz der Sensorik nur bei Drücken > 200 mbar betrieben. Des Weiteren ist zu bemerken, dass sich bei diesem Nitrierofen

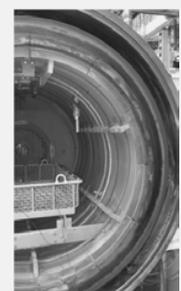
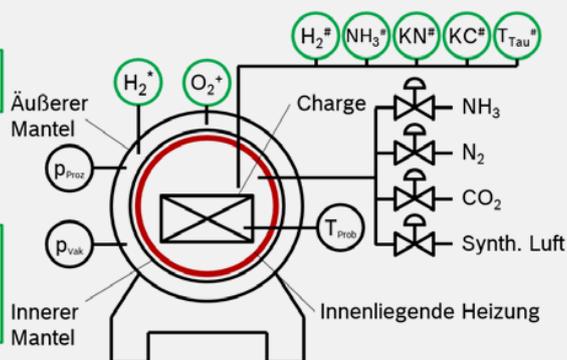
die Heizungen vor der Retorte innerhalb der Behandlungskammer befinden. Dadurch sind stets aktive Oberflächen verfügbar und das Nitrierergebnis wird nur geringfügig durch die Probenanzahl bzw. Probenoberfläche beeinflusst.

Aufgrund der erwähnten durchgeführten Vorversuche konnten bereits die signifikanten Sensorsignale identifiziert werden. Diese sind in Bild 3 grün markiert.

Wie aus Tabelle 1 zu entnehmen ist, wurde der Referenzversuch viermal wiederholt. Die Ergebnisse der aufgezeichneten Signale sind in **Bild 4**, **Bild 5** und **Bild 6** für die drei verschiedenen Prozessschritte Oxi-Nitrieren (A), Nitrocarburieren (B) und Nitrieren (C) dargestellt. Für alle drei Prozessschritte ist die Reproduzierbarkeit der Sensorsignale Wasserstoff (Stange), Wasserstoff (SCR), Ammoniak (SCR) und Taupunkt (SCR) gut. Die Werte der Nitrierkennzahl (SCR) unterliegen einer etwas größeren Streuung, da sich die Abweichungen des Wasserstoffs und des Ammoniaks bei der Ermittlung der Nitrierkennzahl (SCR) verstärken können. Die Streuungen beim

▶ Proben temperatur	°C
▶ Vakuum	mbar
▶ Druck	mbar
▶ Wasserstoff*	Vol.-%
▶ Sauerstoff*	mA
▶ Durchsatz Stickstoff	l/min
▶ Durchsatz Ammoniak	l/min
▶ Durchsatz synth. Luft	l/min
▶ Durchsatz Kohlenstoffdioxid	l/min
▶ Wasserstoff#	Vol.-%
▶ Ammoniak#	Vol.-%
▶ Nitrierkennzahl#	bar ^{-1/2}
▶ Taupunkt#	°C
▶ Kohlenskennzahl	bar

* Hersteller Fa. Stange
 # Hersteller Fa. Ziros
 # Hersteller Fa. SCR



Behandlungskammer

Bild 3: Schematischer Ofenaufbau sowie installierte Sensoren und deren Positionen

Sauerstoffsignal (Zirox) sind größer, wodurch eine Verwendung zur Identifikation von Prozessabweichung limitierter sein wird.

Aus **Bild 7**, **Bild 8** und **Bild 9** wird der Einfluss der verschiedenen Prozessabweichungen auf die Sensorsignale ersichtlich. Bezogen auf die eingebrachten Prozessabweichungen lassen sich die Auswirkungen beim ersten Nitrierschritt, dem Oxi-Nitrieren (Bild 7), wie folgt zusammenfassen:

- Das Nachoxidieren als vorangegangener Prozess wirkt sich bei fast allen Sensorsignalen stark aus, beim O₂-Sensor aufgrund der schlechteren Reproduzierbarkeit ist es weniger gut zu erkennen.
- Der reduzierte Gesamtgasdurchsatz führt zu längeren Füllzeiten des Ofens, wodurch der Start des anschließenden Prozessschrittes (A, B oder C) verzögert beginnt und dadurch auch erst später endet.
- Der reduzierte Ammoniakgasdurchsatz ist anhand der Nitrierkennzahl nicht sichtbar (liegt im Streubereich der Referenzversuche), ist aber bei den Einzelwerten der H₂- und NH₃-Sensoren gut zu erkennen.
- Die erhöhte Oberfläche zeigt einen verstärkten Ammoniakumsatz und höhere Wasserstoffanteile, wodurch die Nitrierkennzahlen geringer ausfallen.
- Der andere Werkstoff ist nur indirekt sichtbar, da 400 Proben aus 50CrV4 sich ähnlich wie fünf Proben aus X40CrMoV5-1 (Referenzversuche T1-T4) hinsichtlich der H₂-/NH₃-Anteile & Nitrierkennzahl auswirken.
- Die erhöhte Behandlungstemperatur ist bei allen Sensoren gut sichtbar, wobei das Wasserstoffsignal bei der SCR Sonde (direkte Messung in der Behandlungskammer) noch deutlicher ist.
- Der frisch gereinigte Ofen zeigt nur geringfügige Abweichungen zu den Ergebnissen der Referenzversuche.

Die Auswirkungen der Prozessabweichungen auf die Sensorsignale beim Prozessschritt Nitrocarburieren (Bild 8) sind:

- Das Nachoxidieren aus dem vorangegangenen Prozess ist immer noch gut bei den H₂- und NH₃-Sensorsignalen sichtbar.
- Der reduzierte Gesamtgasdurchsatz

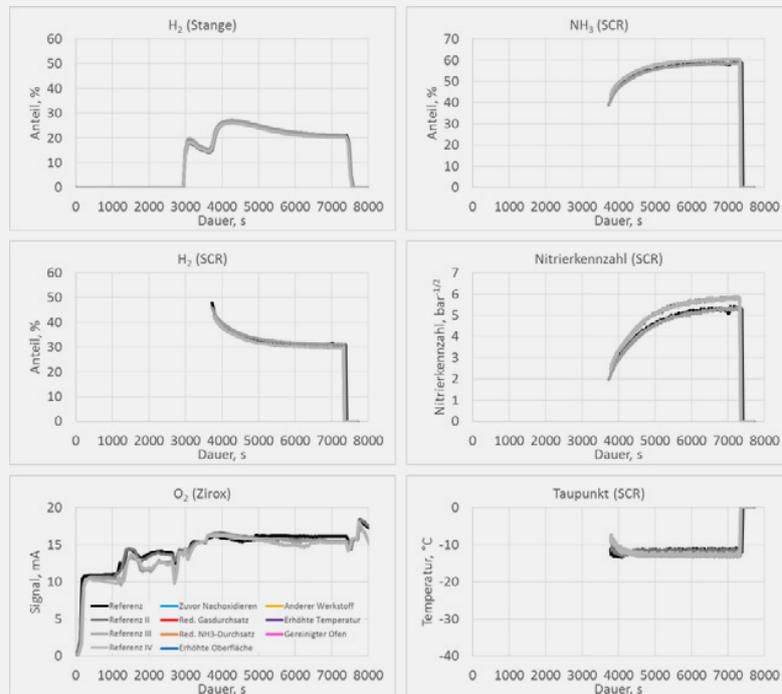


Bild 4: Oxi-Nitrieren (A): Streuung der Sensorsignale innerhalb der Referenzversuche 1 bis 4

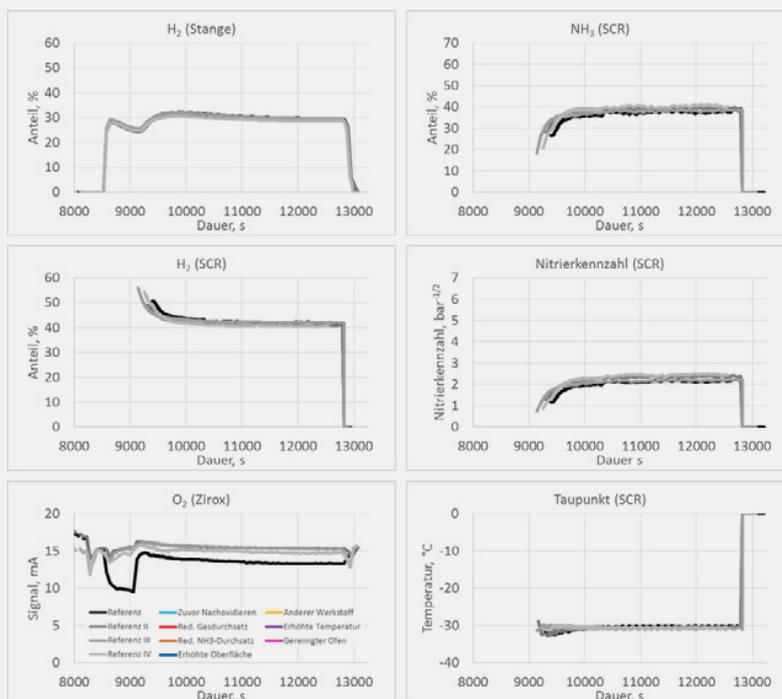


Bild 5: Nitrocarburieren (B): Streuung der Sensorsignale innerhalb der Referenzversuche 1 bis 4

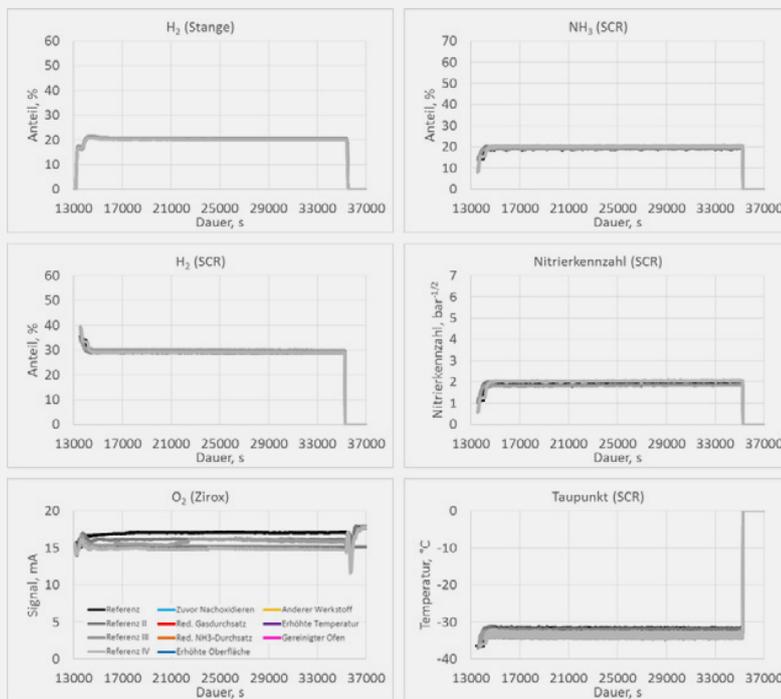


Bild 6: Nitrieren (C): Streuung der Sensorsignale innerhalb der Referenzversuche 1 bis 4

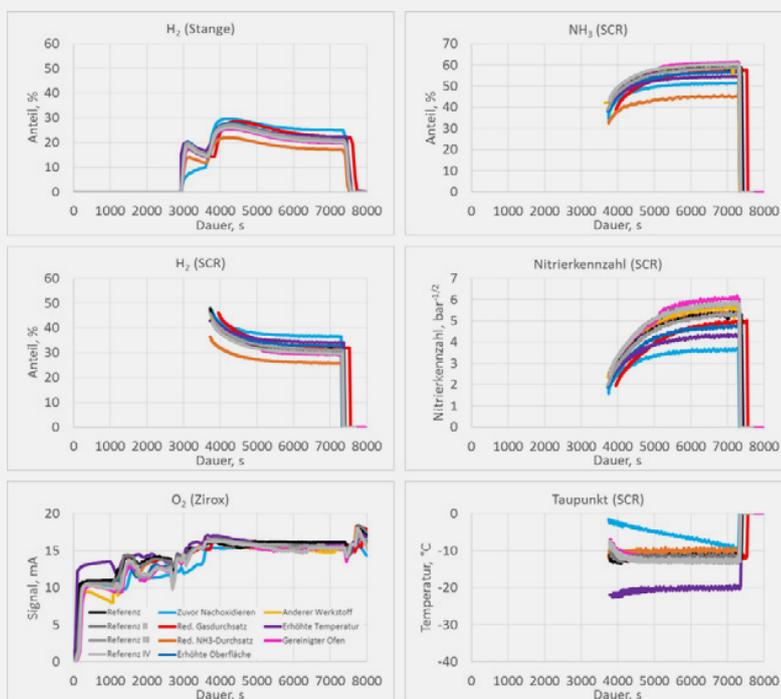


Bild 7: Oxi-Nitrieren (A): Einfluss der Prozessabweichungen auf die Sensorsignale

führt wiederum zu längeren Füllzeiten des Ofens und damit einer Verlängerung des Nitrocarburierschrittes.

- Die Reduzierung des Ammoniakgasdurchsatzes ist auch bei diesem Schritt durch die H_2 - und NH_3 -Sensoren zu erkennen.
- Die erhöhte Oberfläche zeigt im Nitrocarburierschritt nur einen geringfügig erhöhten Ammoniakumsatz.
- Wie beim Oxi-Nitrieren zeigen 400 Proben des anderen Werkstoffs 50CrV4 ein ähnliches Verhalten wie fünf Proben aus X40CrMoV5-1 (Referenzversuche T1-T4).
- Eine erhöhte Behandlungstemperatur ist ebenfalls gut beim Nitrocarburiere (nicht durch den Sauerstoffsensor) sichtbar.
- Der frisch gereinigte Ofen ist bei diesem Prozessschritt etwas deutlicher als beim Nitrieren zu erkennen und zeigt etwas geringeren Ammoniakumsatz und damit etwas weniger H_2 und etwas mehr NH_3 .

Zusammenfassend können die Auswirkungen der Prozessabweichungen beim Nitrieren (Bild 9) wie folgt wiedergegeben werden:

- Das Nachoxidieren aus dem vorangegangenen Prozess ist nur noch geringfügig von der Referenz zu unterscheiden.
- Auch beim Nitrieren ist die verlängerte Prozessdauer durch den reduzierten Gesamtgasdurchsatz gut sichtbar.
- Der reduzierte Ammoniakgasdurchsatz wird wieder am besten durch die H_2 -Sensoren und den NH_3 -Sensor identifiziert.
- Die erhöhte Oberfläche kann beim Nitrieren nicht von der Referenz unterschieden werden.
- Wiederum kann der Einfluss des anderen Werkstoffs mit 400 Proben aus 50CrV4 nicht von der Referenz mit fünf Proben aus X40CrMoV5-1 unterschieden werden.
- Die erhöhte Behandlungstemperatur ist mit den meisten Sensoren gut zu erkennen (nicht durch den Sauerstoffsensor).
- Der frisch gereinigte Ofen zeigt wieder etwas weniger Ammoniakumsatz, damit etwas weniger H_2 und etwas mehr NH_3 .

Zur Untersuchung der Nitrierwirkung der verschiedenen Prozessabweichungen

wurden mithilfe von Glimmentladungsspektroskopie die Tiefenprofile der Stickstoffanteile an den Probenkörpern aufgenommen (**Bild 10**). Dabei ist zu bemerken, dass die Tiefenprofile bei einem Randabstand von 60 µm normiert wurden, um die Ungenauigkeit des Messverfahrens auszugleichen. Einzige Ausnahme ist das Tiefenprofil des Versuchs bei erhöhter Behandlungstemperatur (570 statt 550 °C), welches nicht normiert dargestellt ist. Die Kurvenverläufe der normierten Tiefenprofile zeigen nur sehr geringe Unterschiede. Die erhöhte Behandlungstemperatur resultierte bei vergleichbarer Dicke der Verbindungsschicht in geringeren Stickstoffanteilen in diesem Bereich. Obwohl die anderen Prozessabweichungen mithilfe der Sensorik erkannt werden können, wirken sich diese noch nicht auf das Nitrierverhalten aus. Damit kann postuliert werden, dass solche Prozessabweichungen (im Rahmen der gewählten Prozessparameter) früh genug erkannt werden können, bevor die Bauteilqualität stärker beeinflusst wird.

Zusammenfassend können folgende Aussagen zum untersuchten Nitrierofen und seiner Sensorik getroffen werden:

- Der Sauerstoffsensor ist nur bedingt verwendbar.
- Prozessabläufe (Einfluss vorangegangener Prozess): Prozesse mit und ohne Nachoxidieren sind gut erkennbar, besonders mit dem Wasserstoffsensoren (Stange) und dem Taupunktsensoren (SCR). Anwendbarkeit ggf. auch für Einflüsse beim Niederdruck-Aufkohlen, wie z. B. Beladezeit Ofen, Leckage, Lösemittel des Acetylens, weitere Kontaminationen, ist möglich.
- Fehlfunktion Massendurchflussregler: Es sind veränderte Prozessdauern bei verschiedenen Gesamtgasdurchsätzen, auch frühzeitig über veränderten Druckanstieg beim Befüllen des Ofens, erkennbar. Veränderte Ammoniakzugabe durch abweichende Wasserstoff- und Ammoniakkonzentrationen sind erkennbar.
- Fehlfunktion Temperatursensoren: Erkennbar, auch im Wärmebehandlungsergebnis, z. B. Tiefenprofil des Stickstoffanteils.

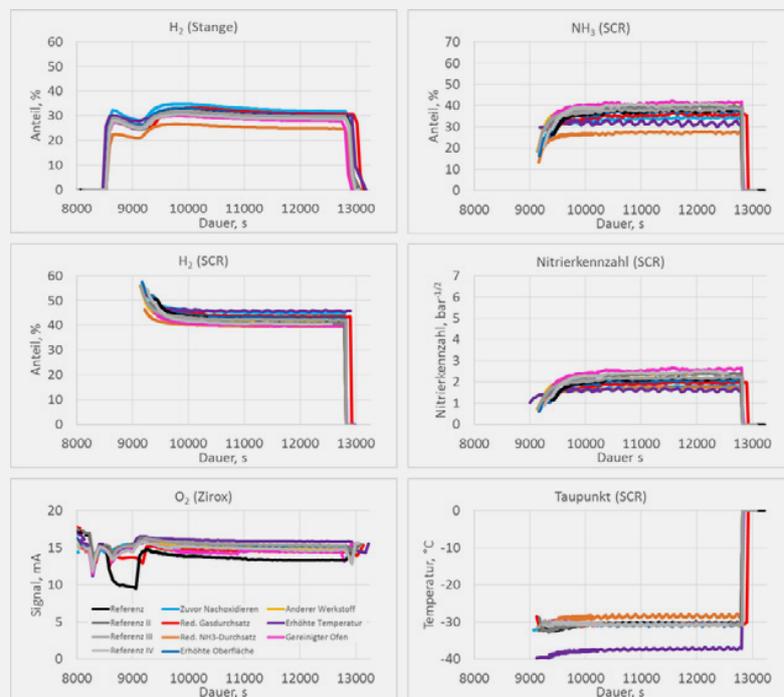


Bild 8: Nitrocarburieren (B): Einfluss der Prozessabweichungen auf die Sensorsignale

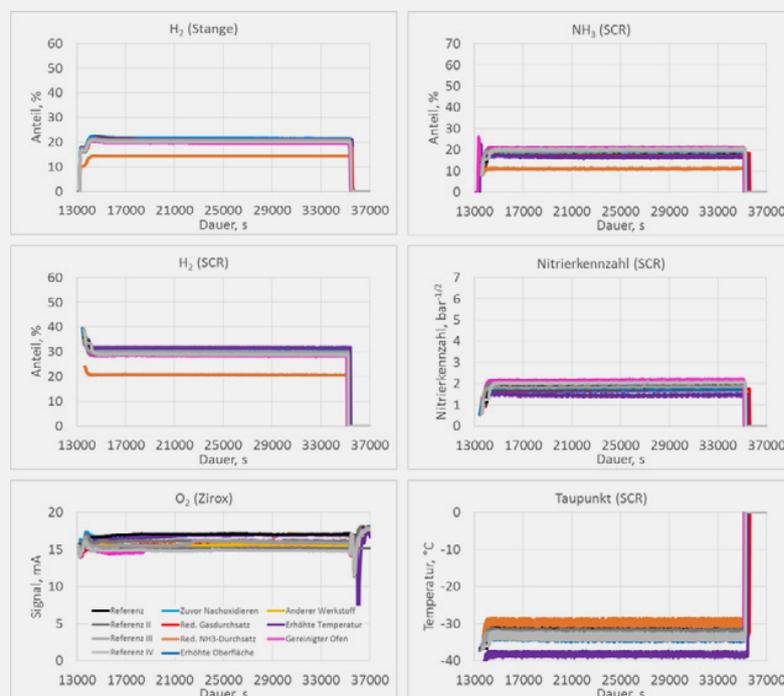


Bild 9: Nitrieren (C): Einfluss der Prozessabweichungen auf die Sensorsignale

Tabelle 2: Minimal- und Maximalwerte der Klimakammereinstellungen

Einflussgröße	Minimalwert	Maximalwert
Dauer, d	1	4
Temperatur, °C	18	40
Relative Luftfeuchtigkeit, %	25	75

hinsichtlich Dauer, Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit vor dem Vergüten. Da diese Umwelteinflüsse an vielen Stellen entlang der Prozesskette auf die Bauteiloberflächen vor dem Nitrieren einwirken können, wurde dieser Umwelteinfluss mithilfe einer statistischen Versuchsplanung untersucht. In **Bild 11** ist eine schematische Prozesskette mit einer Lagerung des Halbzeuges beim Hersteller und beim Abnehmer sowie eine Lagerung der Bauteile vor der eigentlichen Wärmebehandlung dargestellt.

Aus **Bild 12** ist die Versuchsdurchführung ersichtlich. Nach der Herstellung von zylindrischen Proben wurden diese nicht gereinigt. Vor jedem Versuch wurden die jeweils verwendeten Probekörper trocken einseitig mit Schleifpapier (Körnung 320) geschliffen. Im direkten Anschluss wurden die Probekörper in einer Klimakammer ausgelagert. Die Versuchseinstellungen der Klimakammer wurden für einen vollfaktoriellen Ansatz mit maximalen und minimalen Werten für die Einflussgrößen Dauer, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit gewählt (**Tabelle 2**). Nach der Auslagerung erfolgte direkt das Vergüten und Nitrieren der Proben.

Um die Umwelteinflüsse möglichst leicht zu erfassen, wurde ein sensibler Niederdruck-Nitrierprozess bei 400 mbar mit folgenden Versuchseinstellungen gewählt:

- Voroxidieren: 1 h bei 470 °C, mit 100 % synthetischer Luft (20 % Sauerstoff mit Rest Stickstoff)
- Oxi-Nitrieren: 3 h bei 470 °C, mit 20 % Ammoniak, 79 % Stickstoff und 1 % synthetischer Luft
- Nitrieren: 5 h bei 470 °C, mit 20 % Ammoniak und 80 % Stickstoff.

Beispielhaft sind in **Bild 13** Tiefenprofile der Stickstoffanteile wiedergegeben. Dabei fällt auf, dass die bei minimaler Temperatur und minimaler relativer Luftfeuchtigkeit ausgelagerte Probe (blaue Färbung) keinen signifikanten Unterschied zwischen der frisch trocken abgeschliffenen Seite und der noch aus der Weichbearbeitung stammenden Originalseite zeigt. Im Gegensatz dazu zeigt die untersuchte Probe, die bei maximaler Temperatur und maximaler relativer Luftfeuchtigkeit ausgelagert wurde, einen deutlichen Unterschied zwischen den beiden Seiten. Die frisch trocken abgeschliffene Seite zeigt eine höhere Stickstoffaufnahme, wobei auch das Tiefenprofil des Stickstoffanteils deutlich niedriger liegt als die beiden blauen Tiefenprofile.

Von allen Proben wurden anhand der gemessenen Tiefenprofile die integrale Stickstoffmenge unter den Kurven zwischen 5 und 35 µm ermittelt und als Maß für die Nitrierwirkung verwendet. Die damit ermittelten Daten wurden hinsichtlich ihrer statistischen Eignung anhand eines Wahrscheinlichkeitsnetzes für eine Normalverteilung geprüft und können als valide angesehen werden (**Bild 14**).

In **Bild 15** ist das Pareto-Diagramm der standardi-

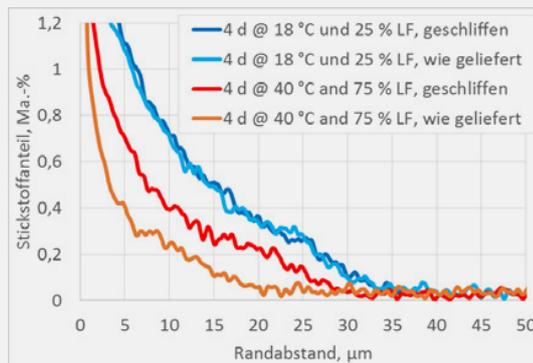


Bild 13: Beispielhafte Tiefenprofile der Stickstoffanteile

sierten Effekte dargestellt, aus dem die Signifikanz der Haupteinflussgrößen und deren Wechselwirkungen zweiter Ordnung untereinander ersichtlich sind. Als Signifikanzniveau wurde ein Wert von 5 % angesetzt. Damit ist statistisch eindeutig, dass die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur der Auslagerung die Haupteinflussgrößen sind, aber auch deren Wechselwirkung einen signifikanten Einfluss auf das Nitrierverhalten des Werkstoffs zeigt. An vierter und fünfter Stelle zeigen auch die Wechsel-

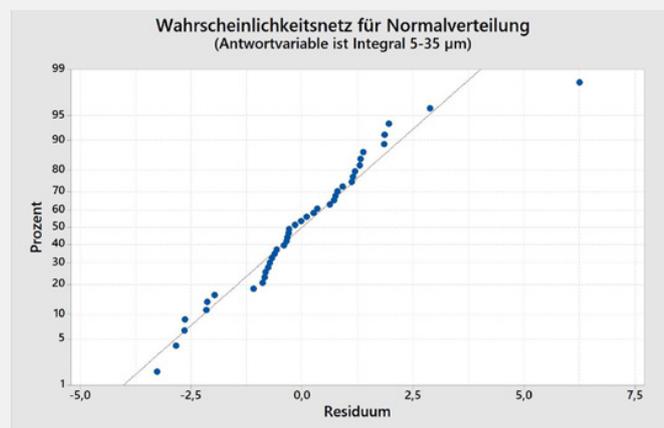


Bild 14: Wahrscheinlichkeitsnetz für die Normalverteilung der integralen Stickstoffaufnahme zwischen 5 und 35 µm der untersuchten Proben

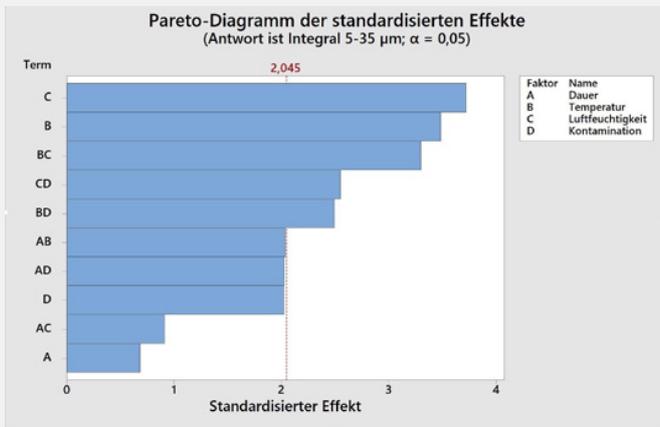


Bild 15: Pareto-Diagramm der Haupteinflussgrößen und deren Wechselwirkungen auf das Nitrierverhalten von Proben aus dem Werkstoff X40CrMoV5-1

wirkungen dieser beiden Auslagerungsbedingungen in Kombination mit der Kontamination (Unterschied zwischen der frisch trocken abgeschliffenen Seite und der Originalseite aus der Weichbearbeitung der Proben) einen signifikanten Einfluss auf das Nitrierverhalten der Proben. Auf der Grenze zur Signifikanz liegen noch die Wechselwirkungen zwischen der Auslagerungsdauer und der Auslagerungstemperatur sowie der Auslagerungsdauer und der Kontamination. Die Kontamination selbst zeigt ebenfalls einen nahezu signifikanten Einfluss auf das Nitrierverhalten.

Auf Basis dieser Ergebnisse ist eine generelle Handlungsempfehlung für eine kühle, trockene und möglichst kurze Lagerung von Bauteilen vor der Wärmebehandlung auszusprechen.

Des Weiteren legt das Beispiel nahe, dass der Infor-

mationsaustausch auch hinsichtlich Lagerbedingungen von Halbzeug oder Bauteilen zwischen Lieferanten und Kunden entlang der Prozesskette intensiviert werden muss. Darüber hinaus sollten weiterführende Untersuchungen das Verständnis der Wirkzusammenhänge verbessern, da es auch aus der industriellen Praxis bekannt ist, dass andere Werkstoffe und Prozessketten solche Auffälligkeiten beim Nitrieren zeigen.

Liegen genügend Informationen und das Verständnis zu den Umwelteinflüssen und ihren Auswirkungen vor, können auch bereits vor einer Wärmebehandlung Gegenmaßnahmen zur Qualitätssicherung definiert werden oder sogar im Extremfall eine nicht sinnvoll durchführbare Wärmebehandlung vermieden werden (**Bild 16**).

Einen anderen Ansatz zum Verwerten von bereits üblicherweise zur Verfügung gestellten Lieferinformationen bei Halbzeugen soll das letzte Beispiel zeigen.

Variierende Eingangsgrößen

Meistens stehen mehrere Halbzeug-Hersteller zur Sicherstellung von Lieferketten zur Verfügung (**Bild 17**). Dabei werden von den Halbzeug-Herstellern üblicherweise unterschiedliche Anlagen und Prozesse zur Produktion des gewünschten Halbzeugs eingesetzt. Dadurch ergeben sich variierende Eingangsgrößen, wie z. B.:

- Verschiedene Materialchargen des Grundwerkstoffs beispielsweise mit unterschiedlicher Legierungszusammensetzung und Reinheit
- Unterschiedliche Härte- und Eigenspannungsverteilungen.

Darüber hinaus werden die Halbzeuge oft auf verschiedenen Produktionslinien oder auch in verschiedenen Werken zwar mit vergleichbaren Anlagen und Prozessen weiterbearbeitet, aber Einflüsse, wie Werkzeugstandzeiten, Wartungsintervalle

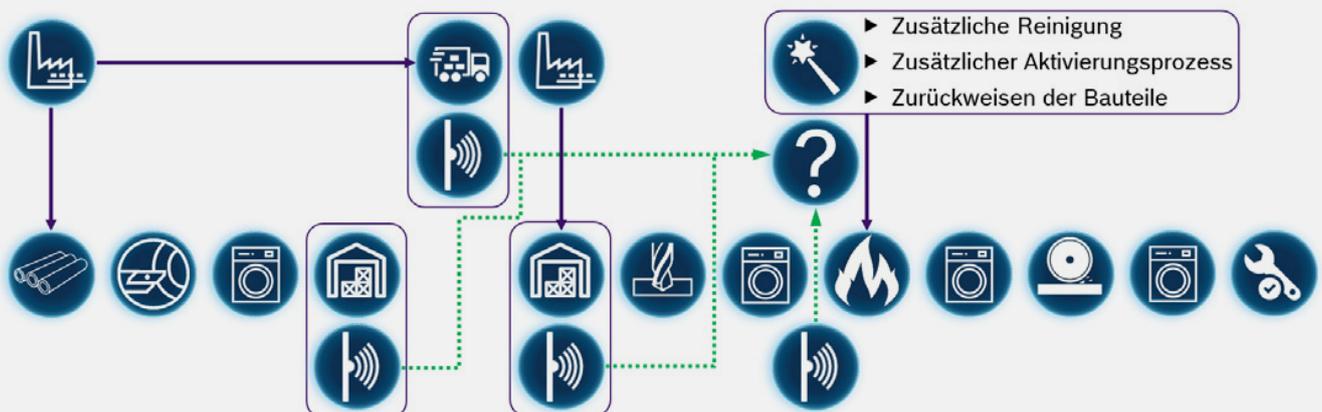


Bild 16: Beispielhafte Weitergabe von Umweltinformationen, um rechtzeitig vor einer anstehenden Wärmebehandlung Gegenmaßnahmen ergreifen zu können

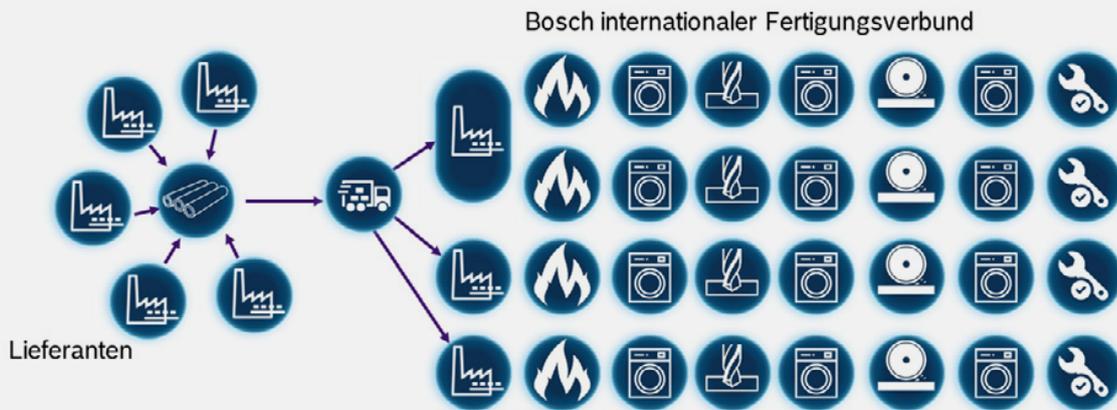


Bild 17: Schematische Lieferkette von der Erzeugung eines Halbzeugs bei mehreren Herstellern und Fertigstellung eines Bauteils bei einem Weiterverarbeiter in mehreren Werken und Produktionslinien

oder auch die leichte Variation der über den Produktlebenszyklus eines Bauteils angeschafften weiter entwickelte Anlagentechnik, führen zu einer weiteren Varianz hinsichtlich der resultierenden Bauteileigenschaften.

Um die benötigte Bauteilqualität innerhalb der Spezifikation zu halten, müssen aufgrund der variierenden Halbzeugeigenschaften oft aufwendige Maschineneinstellungen und Rüstzeiten vorgesehen werden. Ein Maß, z. B. für ein streuendes Verzugsverhalten bei der Kurzzeit-Wärmebehandlung mit induktiver Erwärmung, kann die Härte des Grundwerkstoffs sein. In dieser Eigenschaft sind die Einflüsse der unterschiedlichen Vorprozesse und Lieferanten enthalten. Insofern ist es naheliegend, die von Lieferanten üblicherweise zur Verfügung gestellten Informationen, wie Legierungszusammensetzung und Mikrostrukturparameter, weiter zu verarbeiten. In **Bild 18** ist der Vergleich der mithilfe von Künstlichen Intelligenz Modellen vorhergesagten Oberflächenhärte zur experimentell ermittelten Oberflächenhärte dargestellt. Dabei wurden sechs Modelle der scikit-learn Bibliothek von Python mit der Legierungszusammensetzung sowie dem Anteil an Ferrit und Perlit des Halbzeugs trainiert. Es ist zu bemerken, dass die Modelle ohne jegliche Informationen zur jeweiligen Anlagentechnik oder der eingesetzten Prozesse beim Halbzeuglieferanten ausgekommen sind. Eine gute Vorhersage der Oberflächenhärte wurde mit dem sogenannten Modell „K-Nearest Neighbors“ erreicht und damit ist auch indirekt eine Einschätzung des Verzugsverhalten möglich.

In diesem Beispiel konnte gezeigt werden, dass moderne Machine Learning Ansätze ohne Kenntnis der genauen prozesstechnischen Zusammenhänge in der Lage sind, komplexe Korrelationen mathematisch zu beschreiben. Dabei müssen jedoch aus der Vielzahl der verfügbaren Modelle die geeigneten identifiziert werden und deren Hyper-Parameter angepasst werden.

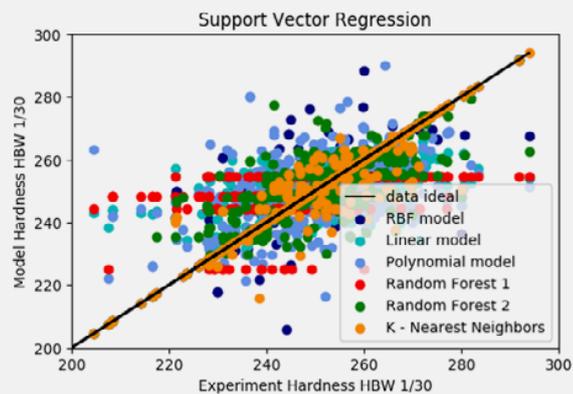


Bild 18: Darstellung der modellierten Härte über der experimentell gemessenen Härte für sechs datenbasierte Ansätze

AUTOREN



Dr. Thomas Waldenmaier
 Robert Bosch GmbH
 Renningen
 0711 / 811-10476
 thomas.waldenmaier@de.bosch.com



Dr. Hermann Autenrieth
 Robert Bosch GmbH
 Renningen
 hermann.autenrieth@de.bosch.com