



*FÜHRER FÜR DIE  
VERWENDUNG DES  
TENASTEEL®*

		<u>Seiten des Kapitels</u>
1.	EINLEITUNG.....	1/1
2.	HERSTELLUNG .....	1/1
3.	MERKMALE	
	Struktur - Chemische Analyse.....	1/5
	Härte .....	3/5
	Zähigkeit .....	3/5
	Abnutzungsfestigkeit .....	4/5
	Physikalische Eigenschaften .....	5/5
4.	BEARBEITUNG	
	Verbessern der Leistungen .....	1/3
	Empfohlene Schneidparameter .....	3/3
5.	WÄRMEBEHANDLUNGEN	
	Allgemeines .....	1/16
	Phasenwechsel .....	2/16
	Bilden und Verteilen der Karbide .....	5/16
	Wärmebehandlungen je nach Sorte.....	
	Weichglühen .....	6/16
	Härten und Anlassen.....	7/16
	Erforderliche Härtebedingungen....	10/16
	Erforderliche Anlassbedingungen	12/16
	Kältebehandlungen.....	15/16

6.	FUNKENEROSION	
	Allgemeines .....	1/4
	Konzept .....	1/4
	Das Funkenerosionsverfahren .....	2/4
	Der Werkstoff .....	3/4
	Die Gefahren .....	3/4
	Abhilfen .....	3/4
7.	POLIEREN	
	Allgemeines .....	1/4
	Erfolgsfaktoren	
	Metallurgische Güte .....	1/4
	Bearbeitungstypen und -bedingungen	3/4
	Schleif- und Poliertechnik .....	3/4
8.	OBERFLÄCHENBEHANDLUNGEN	
	Thermo-chemische Oberflächenbehandlung (Nitrieren)	
	Allgemeines Konzept .....	1/15
	Salzbadnitrieren .....	4/15
	Gasnitrieren .....	6/15
	Ionitrieren .....	9/15
	Oberflächenbeschichtungen durch Metallablagerungen..	
	PVD-Verfahren .....	12/15
	CVD-Verfahren .....	13/15
9.	SCHWEISSEN	
	Vorbereitung der Oberflächen .....	1/2
	Auswahl der Zusatzprodukte .....	1/2
	Auswahl der Schweißparameter .....	2/2



Bei der Kaltbearbeitung haben sich Stähle für herkömmliches Werkzeug sehr oft als beschränkt erwiesen.

Auch wenn die leistungsfähigsten von ihnen (Typ X160 Cr Mo V12<sup>①</sup>) sehr akzeptable Abnutzungsfestigkeiten bieten, erweisen sie sich dennoch als übermäßig bruchanfällig. Dieser chronische Mangel an Festigkeit wird umso bedeutender, als man versucht, Stähle mit großen Härten (58/62 HRC) zu bearbeiten.

Die üblichen Folgen dieser Schwäche sind jedem gut bekannt: Gesenkbrüche, Abschuppen usw.

Die übermäßige Größe sowie die schlechte Verteilung der Karbide, die in diesen Stahlsorten vorkommen, können auch zu anderen Problemen führen, wie zum Beispiel schlechte Oberflächenzustände bei der Funkenerosion (durch Haftung bruchempfindlicheres Werkzeug), Polierschwierigkeit, schlechtes Haften von Beschichtungen.

Im Bereich der herkömmlichen genormten Stähle liegt die einzige verfügbare Alternative in weniger legierten Stählen (X100 Cr Mo V5, X38 Cr Mo V5), deren feinere Struktur eine signifikante Steigerung der Festigkeit ergibt. Diese Verbesserung geht jedoch leider auf Kosten der Abnutzungsfestigkeit, die in diesem Fall auf ein drastisch niedrigeres Niveau fällt als die eines Stahls des Typs X160 Cr Mo V12.

Ferner werden diese Werkzeug immer häufiger oberflächenbehandelt oder beschichtet, was bedingt, dass die Stähle Wärmezyklen in der Größenordnung von 500/580 °C ohne größere Beeinträchtigung ihrer mechanischen Eigenschaften standhalten.

Die Chemie der Stähle des Typs X160 Cr Mo V12 verleiht ihnen keine besondere Veranlagung hinsichtlich der Festigkeit beim Weichmachen.

Insgesamt greifen die Umsetzungen ausgehend von herkömmlichen Nuancen sehr oft auf einen schlechten Kompromiss zwischen Abnutzungsfestigkeit / Zähigkeit / Anlasstemperatur zurück.

Es besteht daher auf dem Markt ein echter Bedarf für eine neue Generation von Stahlsorten, die den derzeitigen Erwartungen der Werkzeughersteller viel besser entsprechen.

Die neue Sorte TENASTEEL<sup>®</sup> wurde mit diesem Ziel entwickelt und weist alle angestrebten Eigenschaften auf:

- Abnutzungsfestigkeit, die dem X160 Cr Mo V12 entspricht
- Feine Struktur ohne grobe Karbide
- Zähigkeit größer als bei X160 Cr Mo V12
- Anlasstemperatur im Bereich von 550/580 °C

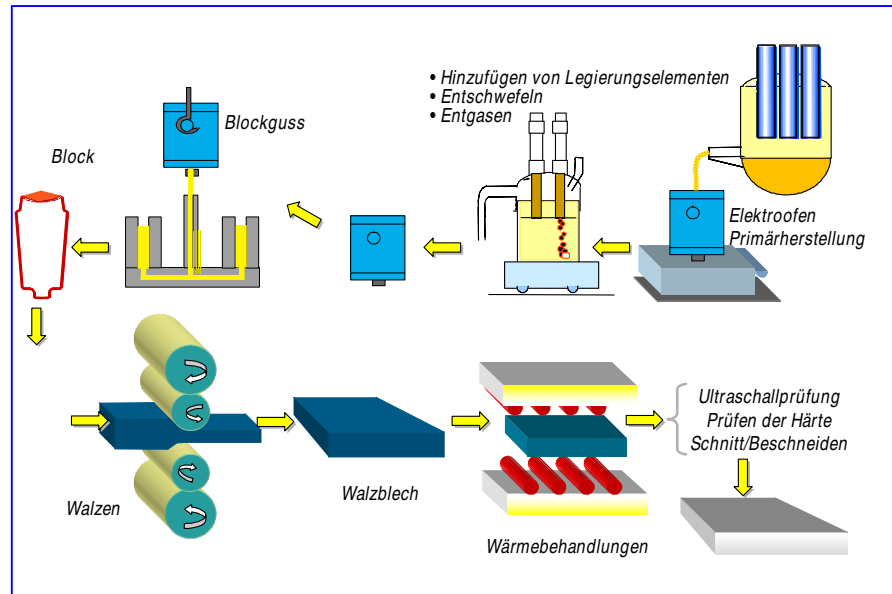
Gemeinsam bewirken diese Eigenschaften, dass diese Stahlsorte sehr vielseitig einsetzbar ist und leistungsfähig bei einer Vielzahl von Anwendungen, so dass die Arbeit der Designer bei der Auswahl der geeigneten Werkstoffe enorm vereinfacht wird.

Der signifikanteste Gewinn liegt jedoch in einer Verbesserung der Lebensdauer des Werkzeugs sowie in der Verringerung der Störungsrate sowohl während der Herstellung des Werkzeugs als auch bei der Produktion.

Der Zweck dieses Dokuments besteht darin, die Merkmale dieses Stahls detailliert zu beschreiben, es ist aber in erster Linie ein Unterstützungs- und Beratungstool für alle herkömmlichen Vorgänge der Umformung, Bearbeitung, Wärmebehandlung, usw.

<sup>①</sup> X160 Cr Mo V12 ist die EURONORM-Bezeichnung der Sorte AFNOR Z160 CDV12

Das aus sorgfältig sortiertem Schrott hergestellte Metall wird in einem Lichtbogenofen geschmolzen und dann desoxidiert und entschwefelt. Danach wird es unter Vakuum gefrischt, wonach man seine Analyse durch Hinzufügen der erforderlichen Legierungselemente genau anpasst.



Anschließend wird entgast, um ein Einschlusssauberkeitsniveau nahe dem von ESR (unter Schlacke umgeschmolzen) zu erreichen. Ferner gewährleistet dieser Vorgang ein sehr niedriges Wasserstoffniveau, das einen guten inneren Zustand des Fertigprodukts sicherstellt.

Systematische Kontrollen in allen Herstellungsschritten sorgen für die Übereinstimmung der chemischen Zusammensetzung und der Gießtemperatur. Die Form der Kokillen, Formen, in welchen der Stahl gegossen wird, ist ebenfalls optimiert, um die Gleichförmigkeit des Werkstoffs zu verbessern.

Die Blöcke folgen dann einem computeroptimierten Walzschema, um eine gute Kompaktheit im Herzen der Bleche sowie einen guten Oberflächenzustand sicherzustellen.

Die Bleche werden einem Wärmebehandlungszyklus unterzogen, der im Wesentlichen aus einem Weichglühen und Entspannen im Endstadium besteht, um die Restspannungen maximal abzubauen.

## CHEMISCHE ANALYSE DER STRUKTUR

	C	Mn	Cr	Mo	V	Sonstige
1.2379 X155CrVMo12-1	1.55	0.35	11.75	0.75	0.95	-
TENASTEEL®	1.0	0.35	7.5	2.6	0.3	Ti

Der 79/X155CrVMo12-1<sup>①</sup> in 3 wesentlich Punkten:

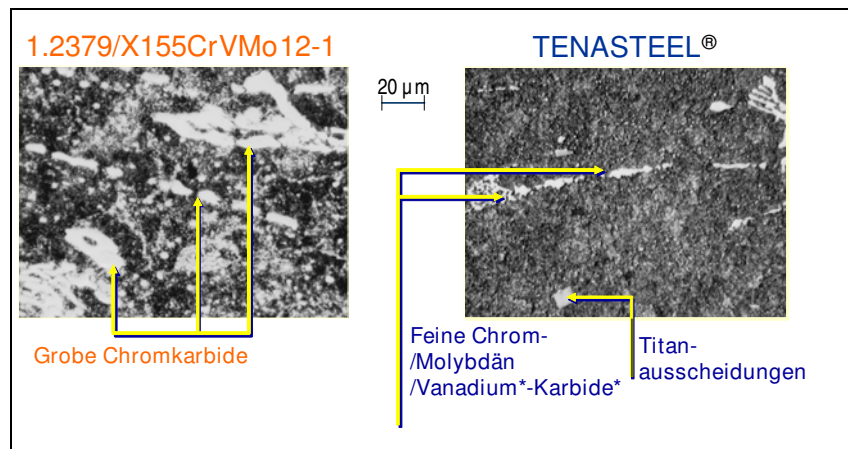
#### ① Niedriger Kohlenstoffgehalt - Niedriger Chromgehalt

Die hohen Gehalte an Chrom und Kohlenstoff führen immer zum Bilden grober Chromkarbide, die für die Abnutzungsfestigkeit günstig sind, die jedoch auch die Hauptursache für die Brüchigkeit der Stähle des Typs 1.2379/X155CrVMo12-1 sind.

Die Konzentration an diesen groben Karbiden ist auf halber Stärke der Produkte (abgesonderte Bänder) noch stärker.

Umgekehrt garantiert der schwache Gehalt an Kohlenstoff und Stahl

- eine stärker verteilte, viel feinere Karbidstruktur, die daher zäher ist,
- eine bessere Gleichförmigkeit in der Stärke.

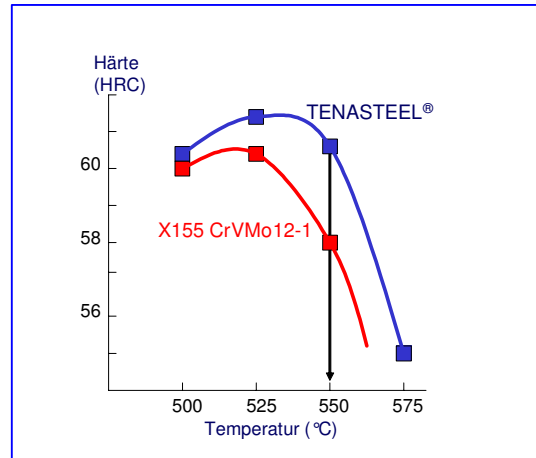


#### ② Verstärkter Molybdängehalt

Der Molybdängehalt des TENASTEEL® hat eine zweifache Zielsetzung

- Ausgleichen des verringerten Chroms durch Bilden von sehr harten Molybdänkarbiden (1800 HV), die viel feiner und besser verteilt sind als die Chromkarbide des 1.2379/X155CrVMo12-1.
- Steigern der Erweichungsfestigkeit des Stahls. Bei der Wärmebehandlung ist die Härte des TENASTEEL® bei einer gleichen Anlasstemperatur von 550 °C größer als die des 1.2379/X155CrVMo12-1.

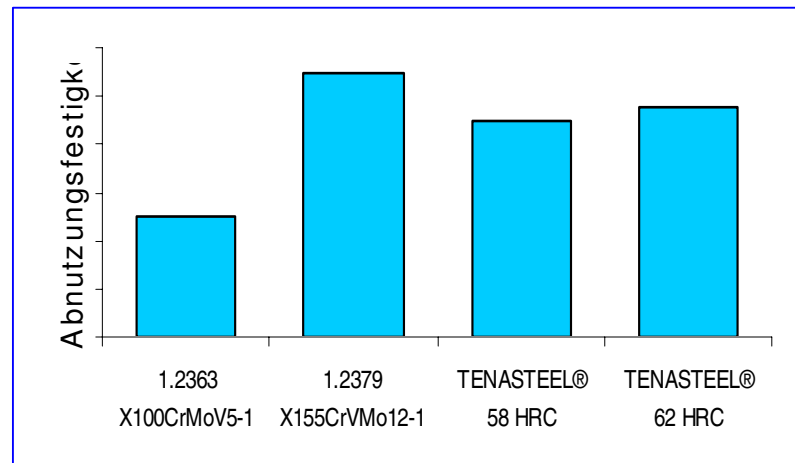
<sup>①</sup> 1.2363/X155CrVMo12-1 ist die EURONORM-Bezeichnung der Sorte AFNOR Z160 CDV12



Diese Eigenschaft bewirkt, dass diese Sorte viel besser für Beschichtungen und Oberflächenbehandlungen geeignet ist als die herkömmlichen Sorten des Typs 1.2379/X155CrVMo12-1.

Der TENASTEEL® erlaubt das Erzielen großer Härten mit Anlasstemperaturen von 550 °C

#### ③ Hinzufügen von Titan



Abnutzungstest gemäß ASTM G64

Das Hinzufügen von Titan erlaubt das Bilden von sehr harten Titankarbidern (3200 HV), die für optimale Abnutzungsefestigkeit sorgen, die der der Sorte 1.2379/X155CrVMo12-1 entspricht.

#### ZUSAMMEN-FASSUNG

Verglichen mit dem 1.2379/X155CrVMo12-1, gewährleistet die chemische Analyse des TENASTEEL®

- gleichwertige Abnutzungsefestigkeit,
- viel höhere Zähigkeit,
- bessere Eignung für Oberflächenbehandlungen und -beschichtungen.

## HÄRTE

### ① Im Lieferzustand

Die Sorte wird in einem auf eine Härte von maximal 250 HB geglähten Zustand geliefert.

### ② Im behandelten Zustand

Der TENASTEEL® kann durch Härten und Anlassen auf eine Härte im Bereich 58/62 HRC mit Austenitisierungstemperaturen zwischen 1000 und 1050 °C und Anlasstemperaturen über oder gleich 550 °C behandelt werden.

Genauer zu den Behandlungsparametern finden Sie im Kapitel Wärmebehandlung.

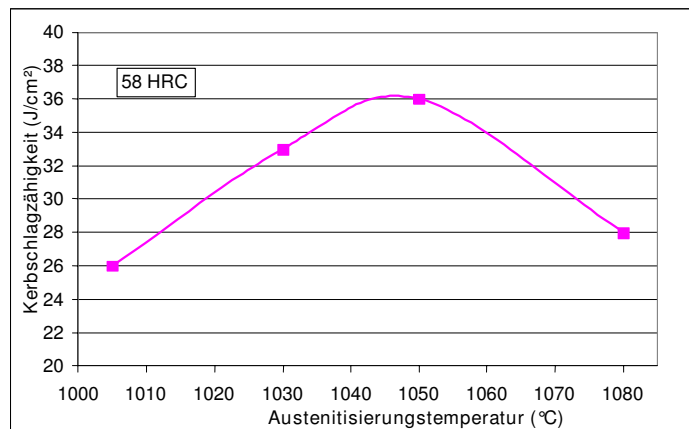
## ZÄHIGKEIT

Die Struktur mit einer gleichförmigen Verteilung feiner Karbide ist insbesondere für das Erzielen eines hohen Kerbschlagzähigkeitsniveaus nach der Behandlung günstig.

Das erzielte Kerbschlagzähigkeitsniveau hängt natürlich von einer Anzahl von Parametern ab, wie zum Beispiel der erzielten Härte, oder von den Bedingungen der Wärmebehandlung.

Die folgenden Daten sind Richtwerte, die bei 20 °C an nicht eingeschnittenen Proben unter den verschiedenen beschriebenen Bedingungen erzielt werden.

### ① Einfluss der Austenitisierungstemperatur

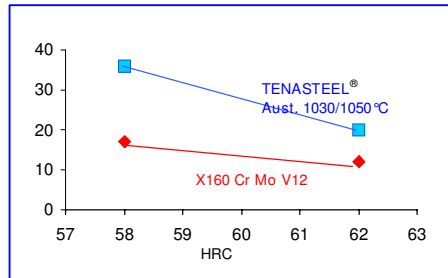


Es wird empfohlen, zu hohe Austenitisierungstemperaturen zu vermeiden (Verdicken der Körnung) oder zu niedrige (ungenügendes Auflösen der Karbide), wenn man die Kerbschlagzähigkeit des TENASTEEL® optimieren will.

In diesem Fall erlaubt der Bereich 1030 °C/1050 °C die bestmögliche Optimierung.



#### ⊗ Einfluss der Härte

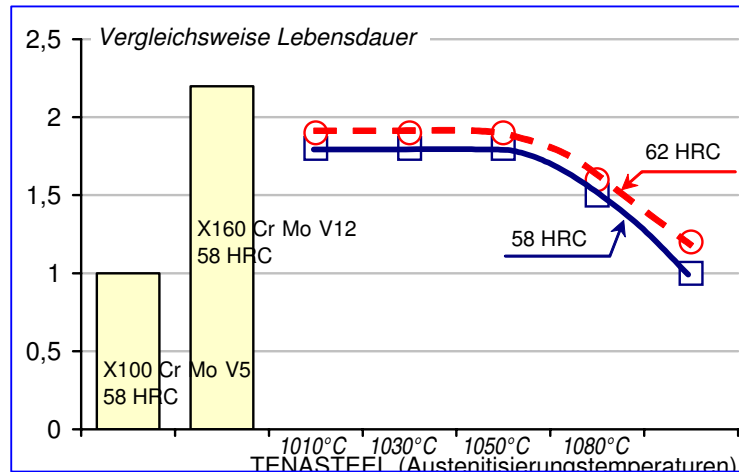


Der Parameter mit dem größten Einfluss auf die Zähigkeit ist die Härte, die nach der Behandlung erzielt wird.

Ungeachtet des Härteniveaus, ist die Zähigkeit des TENASTEEL® immer etwa doppelt so groß wie die des 1.2363/X155CrMo12-1.

#### ABNUTZUNGS- FESTIGKEIT

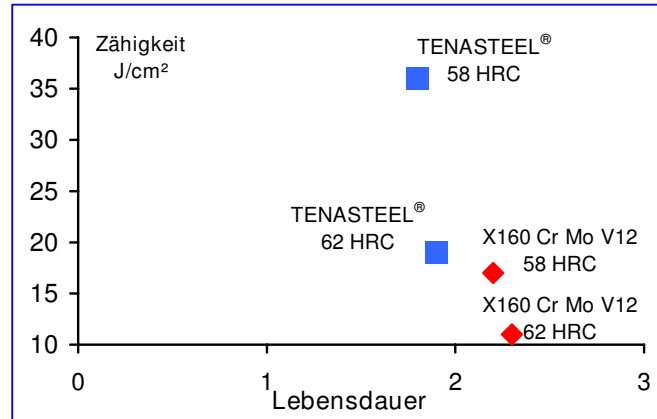
Die unten stehenden Daten wurden an Proben gemessen, die gemäß der Norm ASTM G65.94 Methode D behandelt wurden. Es handelt sich um relative Abnutzungen in Bezug auf eine Referenz 1, die dem Stahl Z100 CDV5 entspricht.



Die Abriebfestigkeit des TENASTEEL® ist der des 1.2363/X155CrVMo12-1 sehr nahe und hebt sich sehr deutlich von Sorten des Typs Z100 CDV5 ab.

Das Härteniveau hat einen bescheidenen Einfluss auf die Abnutzungsfestigkeit des TENASTEEL®. Ferner bemerkt man ein Sinken der Abnutzungsfestigkeit bei hohen Austenitisierungstemperaturen (1080 °C), was bestätigt, dass der Bereich 1030/1050 °C optimal ist.

#### Optimierung Zähigkeit / Lebensdauer



Dank des TENASTEEL®, kann man die Lebensdauer nahe der des 1.2363/X155CrVMo12-1 mit einem doppelt so hohen Zähigkeitsniveau optimieren.

#### PHYSIKALISCHE KENNDATEN

- Dichte bei 20 °C: 7,75
- Elastizitätsmodul: 205 000 N/mm<sup>2</sup>
- Wärmeleitfähigkeit bei 20 °C: 21 W.m<sup>-1</sup>.°K<sup>-1</sup>
- Mittlerer Dehnungskoeffizient zwischen
 

20 - 100 °C	10,2.10 <sup>-6</sup> .°K <sup>-1</sup>
20 - 200 °C	11,3.10 <sup>-6</sup> .°K <sup>-1</sup>
20 - 300 °C	11,9.10 <sup>-6</sup> .°K <sup>-1</sup>
20 - 400 °C	12,8.10 <sup>-6</sup> .°K <sup>-1</sup>
- Wärmekapazität bei 20 °C
 

460	J.Kg <sup>-1</sup> .°K <sup>-1</sup>
-----	--------------------------------------

#### ZUSAMMENFASSUNG

- Das Optimum der Kenndaten erhält man bei einer Austenitisierung im Bereich 1030/1050 °C.
- Ungeachtet des Härteniveaus, ist die Zähigkeit des TENASTEEL® immer mindestens doppelt so hoch wie die des X160 Cr Mo V12.
- Die Abriebfestigkeit des TENASTEEL® ist der des X160 Cr Mo V12 sehr nahe.

VERBESSERN DER  
LEISTUNGEN

Die Kaltbearbeitung von Arbeitstählen ist ein wichtiger Vorgang, und dies sowohl hinsichtlich der Kosten als auch der Vorfälle, die dabei auftreten können. Für diese Vorfälle gibt es Lösungen, sie zeichnen sich oft durch Werkzeugbruch oder anormal kurze Lebensdauer, ja sogar lokal gestörte Oberflächenzustände aus.

Meistens lassen sich diese Anomalien auf einen metallurgischen Ursprung zurückführen: grobe Karbide mit großen lokalen Konzentrationen.

Diese Karbide bewirken eine starke Abnutzung der Schneidwerkzeuge. Streifen, in welchen man maximale Größen und Konzentrationen findet, oft „harte Stellen“ genannt, können zu starkem Abschuppen, ja sogar zum Werkzeugbruch führen, vor allem bei anfälligen Vorgängen wie dem Bohren.

Die feine Struktur der Karbide in kleinen Größen, die gut verteilt sind, spielt beim Verbessern der Bearbeitungsleistungen des TENASTEEL® im Vergleich zu Sorten des Typs 1.2379/X155CrVMo12-1<sup>①</sup> eine vorrangige Rolle.

Da die bearbeiteten Volumina klein sind, ist es nutzlos, große Spandurchsätze anzustreben.

Die Bearbeitungseignung des TENASTEEL® zeigt sich vielmehr in einer Verlängerung der Lebensdauer des Schneidwerkzeugs und in einer Verringerung der Vorfallsrate.

Bearbeitungsversuche des TENASTEEL® und des 1.2379/X155CrVMo12-1 wurden in Zusammenarbeit mit der Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (ENSAM) von Cluny durchgeführt.

Dieser Vergleich erfolgte im geglähten Zustand und nach einer Härtungswärmebehandlung

Die Versuche erfolgten alle mit einem SECO-Werkzeug:

- Fräse Octomill R220.43-0063-07W
- Karbidplatten OFEN 070405TN-F30M-D18



<sup>①</sup> X160 Cr Mo V12 ist die EURONORM-Bezeichnung der Sorte AFNOR Z160 CDV12

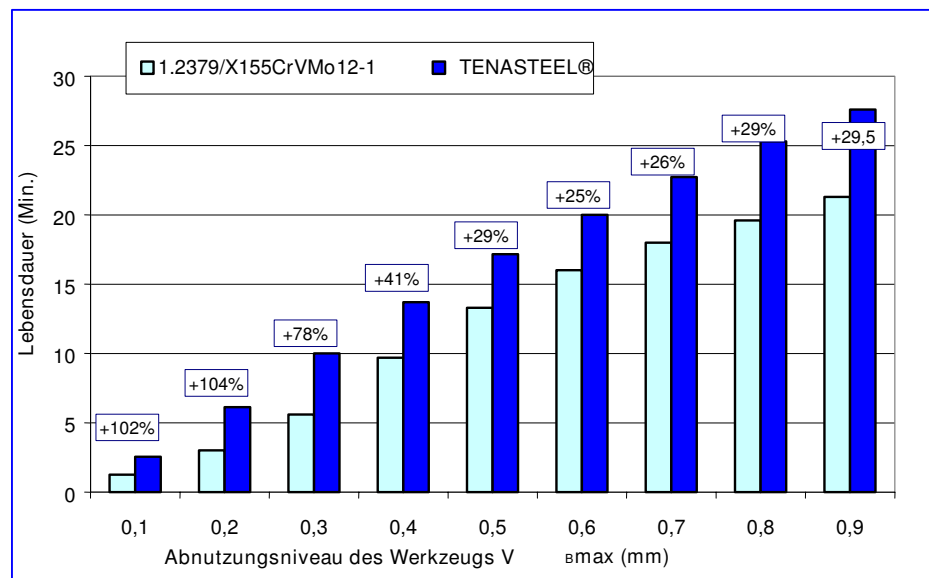
##### ■ Versuche im geglähten Zustand

Die Versuche bestanden darin, die Lebensdauer der Schneidwerkzeuge zu vergleichen, die unter gleichen Bedingungen verwendet werden, mit den gleichen Schneidparametern, für die 2 Sorten TENASTEEL® und 1.2379/X155CrVMo12-1.

Der Versuch erfolgte unter den folgenden Schneidbedingungen:

Schneidgeschwindigkeit	Vc = 100 m/Min.
Vorschub	fz = 0.15 mm/Zahn
Radiales Einfügen	ae = 45 mm
Axiales Einfügen	ap = 2.5 mm

Die unten stehenden Ergebnisse bestätigen die Verlängerung der Lebensdauer der Werkzeuge um mindestens 25 % in Abhängigkeit von der an dem Werkzeug



zulässigen maximalen Abnutzung.

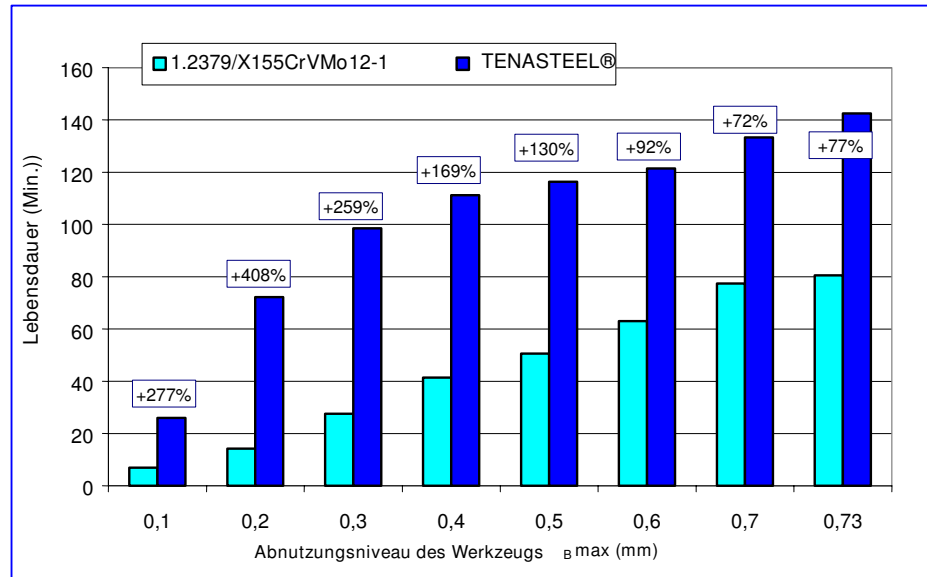
##### ■ Versuch im behandelten Zustand

Die gleiche Versuchsvorgehensweise wurde angewandt. Vor dem Bearbeiten wurden die zwei Sorten durch Härten und doppeltes Glühen behandelt, um an beiden Sorten 60 HRC zu erzielen.

Natürlich wurden die Bearbeitungsparameter verringert:

Schneidgeschwindigkeit	Vc = 30 m/Min.
Vorschub	fz = 0.2 mm/Zahn
Radiales Einfügen	ae = 45 mm
Axiales Einfügen	ap = 0.3 mm

Im behandelten Zustand ist die Steigerung der Lebensdauer noch signifikanter als im geglähten Zustand, denn man erzielt Steigerungen der Lebensdauer über 70 % zugunsten des TENASTEEL®.



### EMPFOHLENE SCHNEID-PARAMETER

Die verschiedenen an TENASTEEL® vorgenommenen Schneidversuche haben es erlaubt, die folgenden Schneidparameter festzulegen:

Fräsen im geglähten Zustand ( $\approx 230$ HB)	Karbidgeplattens	
	Vorbearbeiten	Endfertigung
Schneidgeschwindigkeit - $V_c$ (m/Min.)	130 / 190	170 / 210
Vorschub - $f_z$ (mm/Zahn)	0.15 / 0.4	0.1 / 0.2
Axiales Einfügen - $a_p$ (mm)	2 - 5	$\leq 2$

Fräsen im behandelten Zustand (60 HRC)	Karbidgeplattens
Schneidgeschwindigkeit - $V_c$ (m/Min.)	25 / 40
Vorschub - $f_z$ (mm/Zahn)	0.2
Axiales Einfügen - $a_p$ (mm)	$\leq 2$

Bohren im geglähten Zustand ( $\approx 230$ HB)	Werkzeug aus Schnelldrehstahl		Werkzeug mit angebautem Karbid
	$\varnothing < 10$ mm	$\varnothing 10/20$ mm	
Schneidgeschwindigkeit - $V_c$ (m/Min.)	15	15	130 / 160
Vorschub pro Umdrehung - (mm/U)	0.05 / 0.2	0.2 / 0.3	0.05 / 0.15

### ZUSAMMEN-FASSUNG

Im Vergleich zu den Sorten des Typs 1.2379/X155CrVMo12-1 erlaubt der TENASTEEL® ein Verlängern der Lebensdauer von Bearbeitungswerkzeugen:

- $\geq 25$  % im geglähten Zustand
- $\geq 70$  % im behandelten Zustand

### ALLGEMEINES

Um die mechanischen Merkmale an einem gegebenen Stahl zu erhalten, und dies mit einem guten Kompromiss zwischen Zähigkeit und Festigkeit, ist es unerlässlich, seine Metallstruktur sowie die Größe, Verteilung, die Dichte, Homogenität der Karbide, die er enthält, zu optimieren.

Diese doppelte Zielsetzung kann nur durch eine entsprechende Zusammensetzung erreicht werden, wie das der Fall für den TENASTEEL® ist, bei dem die Gehalte an Kohlenstoff, Chrom, Molybdän und Titan insbesondere angepasst wurden, um gleichzeitig eine sehr gute Festigkeit und eine hohe Zähigkeit zu erzielen. Aber das reicht nicht, denn die mechanischen Eigenschaften eines gegebenen zusammengesetzten Stahls können weitgehend durch die Wärmebehandlungen, welchen er unterzogen wird, verbessert werden. Durch Beeinflussen seiner Struktur erlauben sie es, die Festigkeit des Metalls zu steigern oder zu verringern und seine Brüchigkeit zu reduzieren.

Eine Wärmebehandlung modifiziert die chemische Zusammensetzung des Metalls nicht, sie wirkt sich jedoch aus auf

- seine Struktur, indem das Ausscheiden der Karbide gesteuert wird (Größe, Verteilung usw.) sowie die Beschaffenheit und der Anteil der Bestandteile (Ferrit, Austenit, Martensit usw.),
- den mechanischen Zustand im Inneren des Metalls (interne Spannungen, Dehnung usw.)

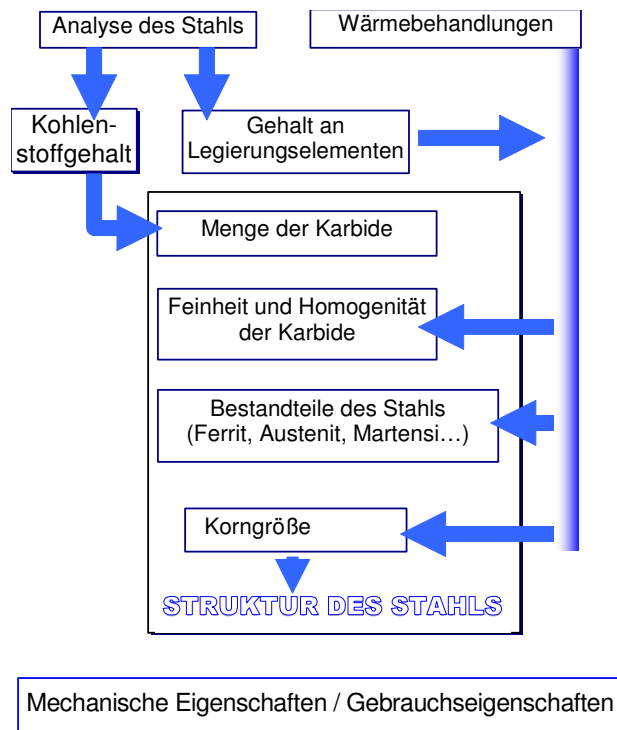


Abbildung 1 – Einfluss der Struktur auf die Gebrauchseigenschaften

### WECHSEL DER PHASEN

Technisch definiert man eine Wärmebehandlung durch eine Temperaturvariation in Abhängigkeit von der Zeit. Der Stahl wird einem Wärmezyklus unterzogen, der in drei separate Schritte geteilt werden kann:

- Ein Erhitzen bis zu der gewünschten Temperatur;
- Ein Halten bei der Temperatur, die in Abhängigkeit von der durchgeführten Wärmebehandlung definiert wird, auferlegt von dem angestrebten Ziel (Homogenisierung, Härten, Erweichen, Steigern der Formbarkeit, Abbauen interner Spannungen usw.);
- Ein Abkühlen, dessen Geschwindigkeit die Struktur des Metalls hinsichtlich der Bestandteile und der Ausscheidung erstarren lässt. Mehrere Abkühlgeschwindigkeiten können aufeinander folgen, bevor die Behandlungsendtemperatur erreicht wird.

Das Umsetzen der Wärmebehandlungen fordert daher das Verstehen der Hapterscheinungen, die dabei auftreten, das heißt im Wesentlichen für die Werkzeugstähle, die Anbringung und Lösung der Karbide sowie die Entwicklung der Strukturen, ihre Umformungen und die Bedingungen, unter welchen sie auftreten.

Eisen hat die Besonderheit, dass es in zwei unterschiedlichen kristallinen Formen je nach Temperatur existiert:

- unter 910 °C weist Eisen  $\alpha$  einen zentrierter Elementarwürfel, der zwei Eisenatome enthält (eines in der Mitte und  $8 \times \frac{1}{8}$  an jedem Würfelgipfel);
- über 910 °C weist das Eisen  $\gamma$  einen Elementarwürfel mit zentrierten Flächen auf, der vier Eisenatome enthält ( $6 \times \frac{1}{2}$  in der Mitte der Seiten des Würfels und  $8 \times \frac{1}{8}$  an jedem Gipfel)

Da die  $\gamma$ -Phase dichter ist als die  $\alpha$ -Phase, ist die allotrope Umformung von einem Volumenwechsel begleitet, der die Zusammenzieh-Dehnungserscheinungen der Stahlteile im Laufe der Wärmebehandlungen erklärt. Zu bemerken ist eine weitere allotrope Umformung bei 1400 °C, die es erlaubt, eine zentrierte Würfelstruktur mit Erscheinen des Eisens  $\delta$  wiederzufinden.

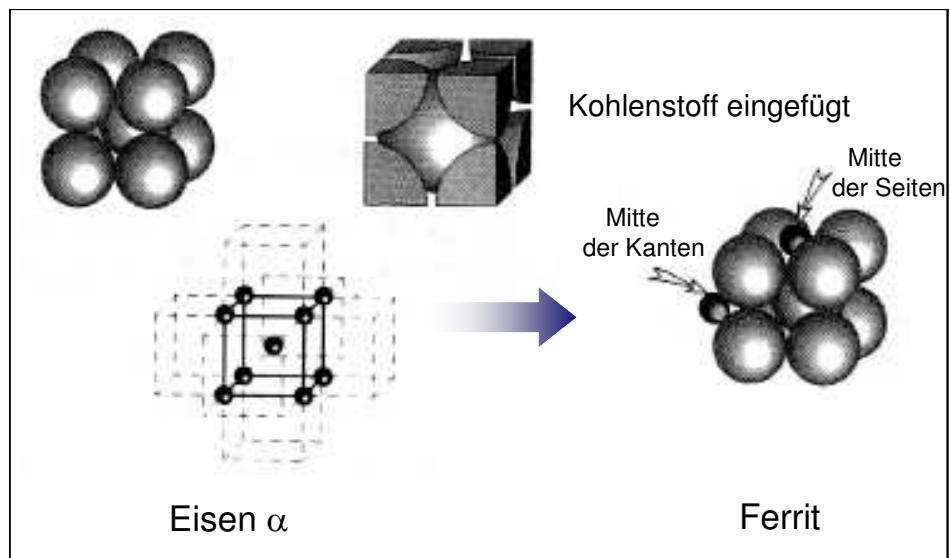


Abbildung 2 – Kristalliner Elementarwürfel des  $\alpha$ -Eisens und des Ferrits

Stahl ist im Wesentlichen eine Eisen- und Kohlenstofflegierung, in der die Kohlenstoffatome mit Durchmesser (1,54 Å), deutlich kleiner sind als die des Eisens (2,5 Å), sich in sein Netz einfügen. Die solide Kohlenstoffeinfügelung in  $\alpha$ -Eisen heißt Ferrit. Sie kann bei Raumtemperatur nur 0,02 % Kohlenstoff enthalten und bei 720 °C maximal 0,045 %.

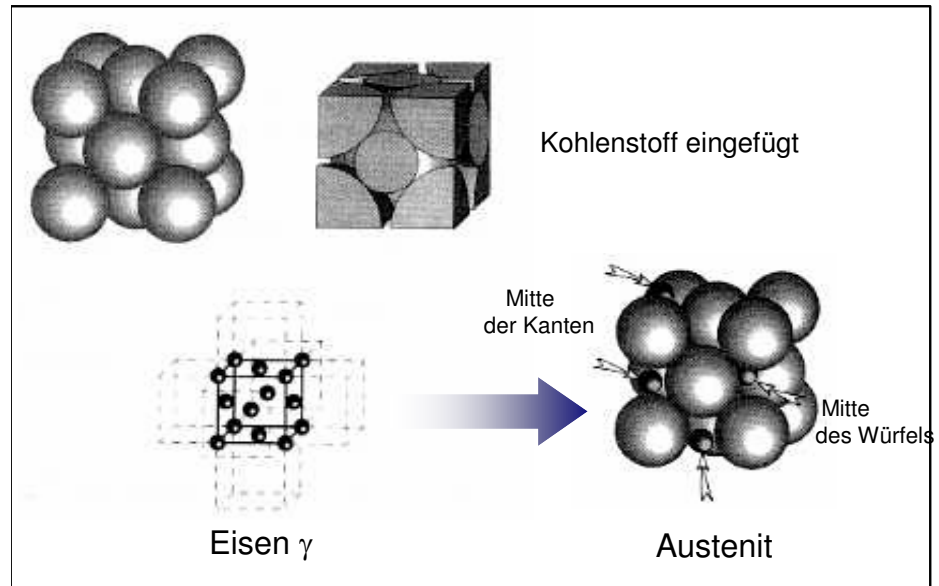


Abbildung 3 – Kristalliner Elementarwürfel des  $\gamma$ -Eisens und des Austenits

Die solide Einfügelung von Kohlenstoff in das  $\gamma$ -Eisen heißt Austenit. Die Auflösung des Kohlenstoffs ist dort deutlich größer, denn sie kann 1,7 % erreichen.

Bei der Umformung des Austenits im Laufe des Abkühlens wird daher Kohlenstoff aus dem Ferrit in Form von Zementit ausgeworfen (Eisenkarbid  $\text{Fe}_3\text{C}$ ) oder in Form von komplexen Karbiden mit den Legierungselementen. Obwohl Austenit dichter ist, kann er mehr Kohlenstoff auflösen, denn die potenziellen Aufnahmesitze des Elementarwürfels mit zentrierter Seite sind größer (Mitte des Würfels und Mitte der Kanten) als die des zentrierten Elementarwürfels (kleinere Maschenparameter → zum Beispiel Kanten des Würfels kleiner (2,9 gegenüber 3,6 Å)). Die Energie, die zum Lösen des Kohlenstoffs in dem  $\gamma$ -Eisen umgesetzt werden muss, ist daher kleiner, und das kristalline Netz wird weniger verformt als in dem Fall des Ferrits.

Bei einer Temperatur unter 720 °C kombiniert sich Zementit mit dem Ferrit, um eine neue Struktur zu ergeben, die aus abwechselnden Lamellen dieser zwei Bestandteile besteht. Es ist Perlit, der 0,83 % Kohlenstoff enthält. Dies ist eine mittelharte Phase (200 bis 250 HB), die ziemlich fest und formbar ist. Die industrielle Behandlung, die zu dieser perlitischen Umformung führt, wird Weichglühen genannt.



Das unten stehende Diagramm Eisen Kohlenstoff zeigt die Entwicklung dieser Strukturen im Laufe eines langsamen Abkühlens (oder Erhitzens).

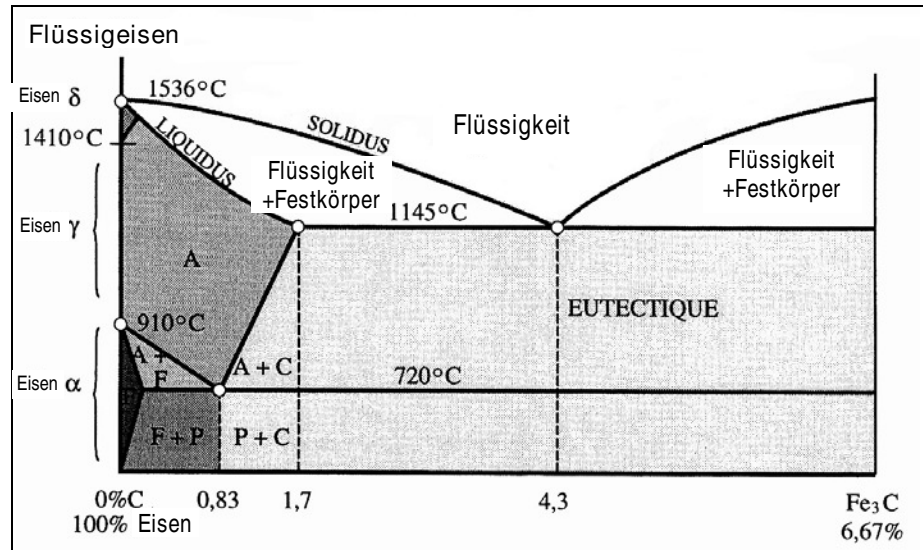


Abbildung 4 – Diagramm Eisen - Kohlenstoff

Die Temperaturen zu Beginn und am Ende der Umformung Austenit – Ferrit und die Existenzbereiche der verschiedenen Phasen, die in das Diagramm Eisen – Kohlenstoff eingetragen sind, werden durch die Gegenwart von Legierungselementen in den Stählen modifiziert. Die Umformungstemperaturen werden dann AC1 und AC3 genannt, wenn die Umformung beim Erhitzen stattfindet (Ferrit → Austenit) und AR1, AR3, wenn sie während des Abkühlens eintritt (Austenit → Ferrit).

Diese Umformung Austenit – Ferrit – Perlit – Zementit, wie sie das Diagramm Eisen – Kohlenstoff beschreibt, ist möglich, wenn die Atome Zeit haben, um sich neu zu organisieren, das heißt im Laufe eines langsamen Abkühlens. Wenn die Umformungszeit jedoch verringert wird, das heißt wenn das Abkühlen rasch erfolgt, tritt bei niedrigen Temperaturen eine andere Umformung ein. Der Austenit wandelt sich in Martensit um, eine unausgewogene Struktur, die mit Kohlenstoff übersättigt ist. Bei der Umformung  $\gamma \rightarrow \alpha$  konnte sich der Kohlenstoff nämlich nicht außerhalb der Masche verbreiten, um Zementit zu bilden. Die Gegenwart dieser Übersättigung mit Kohlenstoff in der ferritischen Masche erzeugt starke Spannungen, die die sehr große Härte des Martensits erklären (bis zu 65 HRC), aber auch seine große Brüchigkeit. Die Wärmebehandlung, die es erlaubt, diese martensitische Struktur zu erzielen, ist das Härten. Aufgrund seiner sehr großen Brüchigkeit kann Martensit nie verwendet werden so wie er ist. Daher folgt auf ein Härten immer eine Anlassbehandlung.

Für Zwischenabkühlgeschwindigkeiten ergibt Austenit ein Gemisch aus Perlit und Zementit: den Bainit, der die Form sehr feiner Nadeln hat. Bainit ist gleichzeitig ein weniger harter aber auch weniger brüchiger Bestandteil als Martensit. Die Verteilung dieser verschiedenen Bestandteile in Abhängigkeit von der Abkühlgeschwindigkeit wird von den Umformdiagrammen bei kontinuierlicher Kühlung (TRC) gegeben. Die des TENASTEEL® ist in *Abbildung 5* dargestellt.

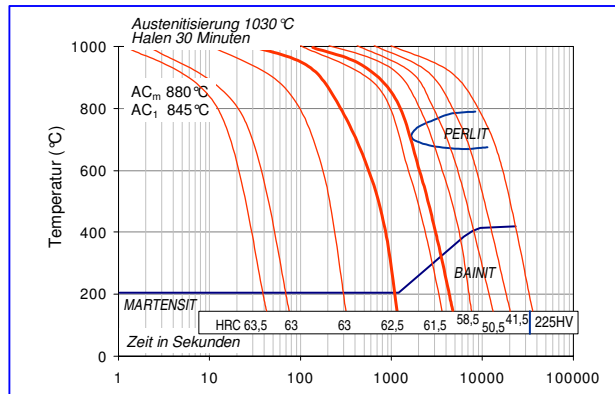


Abbildung 5 – TRC-Diagramm des TENASTEEL

### BILDEN UND VERTEILEN DER KARBIDE

Wie *Abbildung 1* zeigt, hängen die mechanischen Eigenschaften eines legierten Stahls eng von den vorhandenen Phasen ab, aber auch von der Größe, der Dichte, der Verteilung und der Beschaffenheit der Karbide, die in der Struktur vorhanden sind. Diese Abbildung zeigt insbesondere die große Bedeutung der Homogenität der Verteilung der Karbide. Eine der wesentlichen Zielsetzungen der Wärmebehandlungen ist daher das Verteilen der Karbide.

Beim Verfestigen fallen die Karbide nämlich vorzugsweise in privilegierten Zonen aus, die zum Beispiel den Fugen von Körnern entsprechen. Die Wärmebehandlungen erlauben es, die Verteilung der Karbide teilweise neu zu organisieren. Die Karbide müssen zuerst gelöst werden, indem der Stahl auf hohe Temperatur gebracht wird. Das tritt bei der Wiederaustenitisierung ein, die dem Härten der Teile vorausgeht. Die Karbide, darunter Zementit, verschwinden, weil sich der Kohlenstoff leichter in der  $\gamma$ -Struktur des Eisens (*Abbildung 4*) auflöst. Zu bemerken ist jedoch, dass die primären, in der flüssigen Phase gebildeten Karbide bei der Verfestigung nicht gelöst werden. Sobald der Kohlenstoff gelöst ist, kann er sich im Laufe des gesteuerten Abkühlens des Produkts ausfällen.

Bei einem langsamen Abkühlen, wie das der Fall in dem Diagramm Eisen – Kohlenstoff ist, erzielt man Gleichgewichtsstrukturen zum Beispiel mit Bildung von Zementit. Das Wiedererscheinen der Karbide (Eisen aber auch Chrom und andere Legierungselemente) beginnt bei hoher Temperatur. Die Keime sind dabei nicht sehr zahlreich und teilen sich den verfügbaren Kohlenstoff, um zu wachsen, umso mehr als die Verteilung des Kohlenstoffs zu den Karbiden bei hoher Temperatur schnell eintritt.

Zusammenfassend gesagt sind Karbide, die bei hoher Temperatur entstehen (langsame Abkühlgeschwindigkeit des Produkts) grob, nicht sehr zahlreich und nicht gut verteilt. Sie wirken daher nur wenig härtend.

Wenn das Abkühlen jedoch schnell erfolgt, bilden sich die Karbide später, bei niedrigerer Temperatur. Ihre Tendenz zum Ausfällen ist dabei stärker, denn der Temperaturunterschied bei der Lösung ist größer. Die Keime sind daher zahlreicher, sie haben aber nicht mehr genug verfügbaren Kohlenstoff, den sie sich teilen können. Sie wachsen daher nicht und bleiben fein. Feiner und zahlreicher werden sie auch besser verteilt, was einen gewissen Vorteil darstellt. Zusammenfassend gesagt sind die bei niedrigerer Temperatur gebildeten Karbide (hohe Abkühlgeschwindigkeit des Produkts) feiner, zahlreicher und besser verteilt. Sie führen zu einem starken Härten des Stahls.

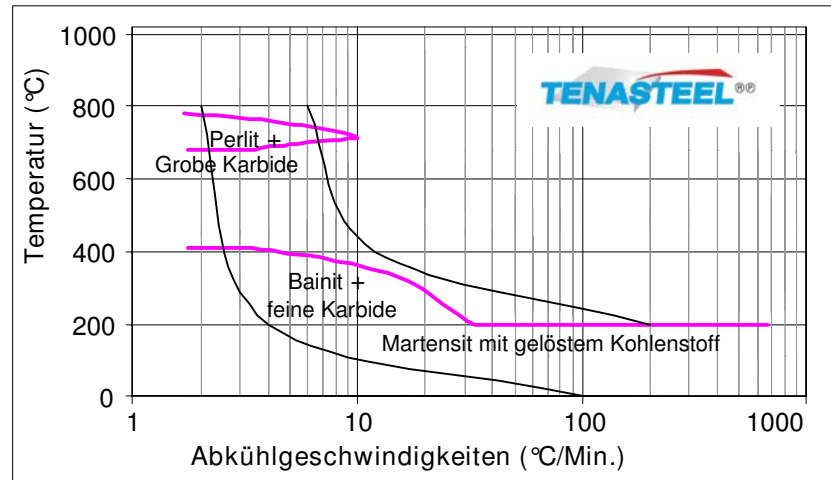


Abbildung 6 – Entwicklung des Ausfallens der Karbide mit der Abkühlgeschwindigkeit

Bei sehr schnellen Abkühlungen beim Härten bleibt ein Teil des Kohlenstoffs in dem Martensit gefangen, was es ihm erlaubt, beim späteren Anlassen auszufallen. *Abbildung 6* stellt diese Verhaltensweise des Kohlenstoffs in Abhängigkeit von der Temperatur und der Abkühlgeschwindigkeit dar. Die Morphologie der speziellen Karbide, die mit den Legierungselementen gebildet werden, sowie die gegenwärtigen Metallphasen sind dort zusammengefasst.

Schließlich rufen wir in Erinnerung, dass beim Härten das Abkühlen ausreichend schnell ist, damit ein Teil der Struktur keine Zeit hat, um sich umzuformen, was die Gegenwart von Restaustenit nach dieser Behandlung erklärt.

WÄRMEBEHAND-  
LUNGEN  
ANGEWANDT  
AN DIE SORTE

Um seine Bearbeitung zu erleichtern wird TENASTEEL® im geglühten Zustand geliefert, um eine Struktur mit geringer Härte zu ergeben. Die Teile werden danach vom Kunden vergütet.

### ① Das Weichglühen

Diese Behandlung besteht in einem Erhitzen auf hohe Temperatur gefolgt von einem Halten und dann einem langsamen Abkühlen und erlaubt es, den Stahl auf einen physikalisch-chemisch und mechanisch ausgeglichenen Zustand zu bringen. Sie bewirkt daher das Verschwinden der unausgewogenen Zustände, die sich aus den vorausgehenden Wärmebehandlungen oder mechanischen Behandlungen ergeben. Das Weichglühen verleiht dem Stahl eine geringe mechanische Festigkeit und hohe Formbarkeit, die für seine Umsetzung günstig ist. In diesem Zustand wird TENASTEEL® üblicherweise geliefert.

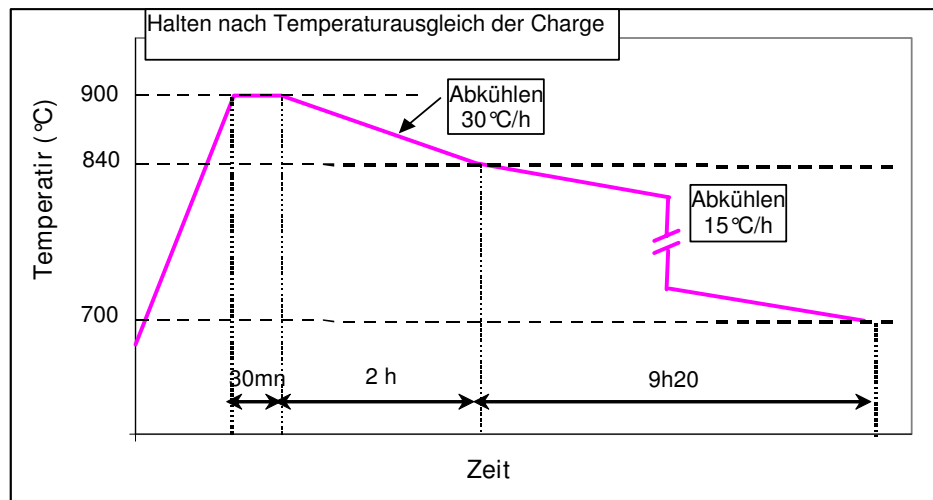


Abbildung 7 – Wärmezyklus des Weichglühens am TENASTEEL®

Um die erwünschte ferrito-perlitische Struktur zu erzielen, wird das Abkühlen des Produkts komplett gesteuert. Der Wärmezyklus für das Weichglühen, der am TENASTEEL® durchgeführt wird, umfasst daher (Abbildung 7) :

- Einen Temperaturanstieg über AC3 ( $\approx 900\text{ °C}$ ), um die Struktur in Austenit umzuformen,
- Eine Haltephase bei dieser Temperatur, um die Struktur zwischen Haut und Herz zu homogenisieren. Die Haltezeit ist relativ kurz, um ein übermäßiges Vergrößern des Korns zu vermeiden,
- Eine langsame Abkühlphase im Ofen bei  $30\text{ °C/Std}$  bis  $15\text{ °C/Std}$  bis zu einer Temperatur von  $700\text{ °C}$ , bei der der ganze Austenit in Ferrit und Perlit umgewandelt ist. Danach wird die Charge aus dem Ofen genommen und das Abkühlen kann an der freien Luft beendet werden, denn es ergibt sich keine Strukturumformung mehr.

Diese Art von Behandlung erlaubt es, eine Härte in der Größenordnung von 230 HB zu erzielen.

### ② Vergütungsbehandlung

Der erweichte Stahl kann geformt werden, aber danach ist eine Wärmebehandlung erforderlich, um dem Teil seine endgültigen mechanischen Eigenschaften zu verleihen. Es handelt sich um ein Härten, um das Metall härter zu machen, gefolgt von Anlassvorgängen um seine Brüchigkeit zu eliminieren und seine Zähigkeit zu steigern.

Die Härtbehandlung besteht aus Folgendem:

- einem langsamen Erwärmen, um die Verformung einzuschränken und zu vermeiden, dass sich aufgrund von Spannungen Risse bilden, und dies bis zu einer Temperatur gleich unter AC1, wo es ein Halten (in Abhängigkeit von der Stärke des Teils) erlaubt, das Produkt in seiner ganzen Stärke zu homogenisieren. Danach wird weiter bis zur Austenitisierungstemperatur ( $> AC3$ ) weiter erhitzt.
- Das Halten bei dieser Temperatur, um eine thermische Homogenität in dem Produkt zu erzielen, um einerseits den Stahl in Austenit umzuwandeln und andererseits ein Maximum an Karbiden, die zuvor gebildet wurden, aufzulösen.

- Schließlich ein ausreichend schnelles Abkühlen in einer angepassten Umgebung, um eine martensitische Struktur zu erzielen. Damit das Härten zu dem Bilden von Martensit führt, ist es erforderlich, dass die Abkühlgeschwindigkeit größer ist als die kritische Härtgeschwindigkeit des Stahls.

Je kleiner die kritische Härtgeschwindigkeit ist, desto härter ist der Stahl und desto mehr kann er in Tiefe aushärten. Die Härtfähigkeit eines Stahls hängt im Wesentlichen von seiner chemischen Zusammensetzung ab. Alle Legierungselemente mit Ausnahme von Kobalt tendieren zum Steigern der Härtfähigkeit. Das TRC-Diagramm des TENASTEEL® (Abbildung 5) zeigt eine relativ niedrige kritische Härtgeschwindigkeit. Seine Härtfähigkeit ist mit der des Stahls 1.2379/x155CrVMo12-1 vergleichbar.

Die Austenitisierungsbedingungen, die eigentlich die effektive Zusammensetzung des Austenits steuern (mehr oder minder großes Lösen der Karbide, Legierungselemente gegenwärtig in den Karbiden und daher hinsichtlich der Härtfähigkeit inaktiv usw.) und die Größe des austenitischen Korns, stellen ebenfalls einen wichtigen Parameter der Härtbehandlung dar.

Nach dem Härten ist die Struktur des Stahls nicht komplett martensitisch, es bleibt ein gewisser Anteil an Austenit, Restaustenit genannt, und daneben verbleiben Karbide. Der Restaustenitanteil ist umso größer als der Stahl legiert ist und die Temperatur und die Dauer der Wiederaustenitisierung hoch sind. Diese komplexe Struktur enthält innere Spannungen, die die Brüchigkeit des Stahls steigern.

Um diese schädlichen Auswirkungen des Härten zu lindern, müssen die Teile erneut einer Wärmebehandlung unterzogen werden: dem Anlassen, das darin besteht, sie während einer gewissen Zeit auf eine Temperatur kleiner als AC1 zu erhitzen, um zu vermeiden, dass die kristalline Struktur ( $\alpha$ ) des Eisens modifiziert wird, und sie dann schnell abzukühlen.

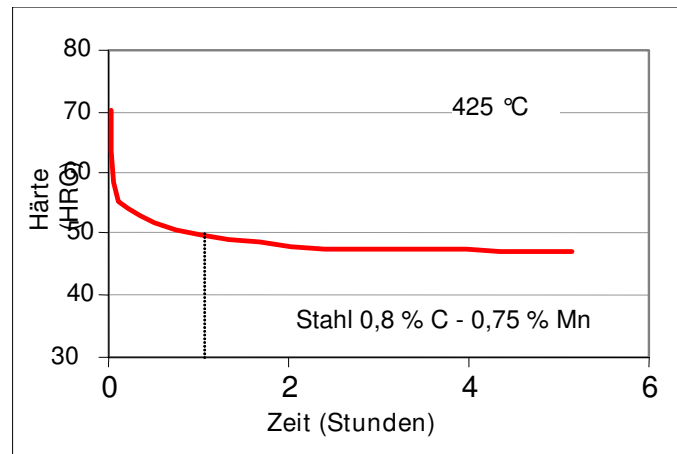


Abbildung 8 – Einfluss der Haltezeit auf die Entwicklung der Härte im Laufe des Anlassens

Da der Martensit ein metastabiler Zustand ist, tendiert sein Wiedererhitzen dazu, ihn in einen Ausgleichszustand durch Abgabe von Kohlenstoff zu bringen, der in Form von Eisenkarbid  $\epsilon$  ( $\text{Fe}_2\text{C}$ ) und Zementit ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) ausgefällt wird. Dieses Ausfällen ist von einem Zusammenziehen des Metalls begleitet (Austreten des Kohlenstoffs  $\rightarrow$  martensitisches Netz nähert sich dem würfelförmigen Netz) und von einer Verringerung der Härte (Abbau der internen Spannungen).

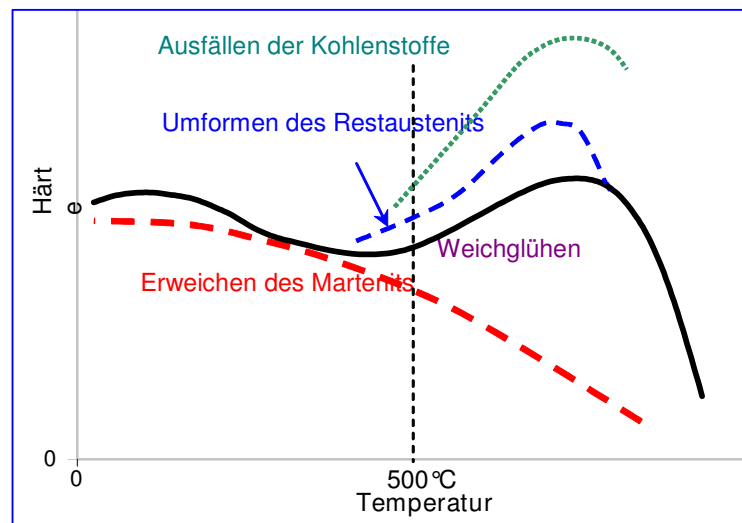
Wie es *Abbildung 8* zeigt, ist die Verringerung der Härte während der ersten Minuten der Behandlung sehr schnell (umso mehr als die Haltetemperatur hoch ist), es ist daher nicht erforderlich, sie zu verlängern, denn die Eigenschaftenänderungen werden anschließend sehr langsam.

Dieses Erweichen aufgrund der Umformung des Martensits wird von einem Härten gelindert, das durch die Umformung des Restaustenits in Bainit oder Sekundärmartensit während des Abkühlens verursacht wird. Diese Reaktion ist von einem Dehnen des Metalls begleitet. Ein zweites Anlassen wird im Allgemeinen vorgenommen, um diesen neuen Martensit umzuwandeln.

Schließlich ergibt sich im Laufe der Anlassvorgänge bei hoher Temperatur (ab 500 °C) ein Sekundärhärten durch Ausfällen von speziellen Karbiden, im Fall des TENASTEEL® Molybdän- Vanadiumkarbide. Dieses erneute Härten ist auch von einem Dehnen des Metalls begleitet.

Zusammenfassend gesagt ergibt das Anlassglühen mehrere gleichzeitige Erscheinungen (*Abbildung 9*):

- Erweichend es Martensits (primär danach sekundär)
- Umformen des Restaustenits
- Ausfällen spezieller Karbide, wenn das Anlassen bei hoher Temperatur erfolgt.



*Abbildung 9* – Verschiedene metallurgische Erscheinungen führen zu einem Erweichen beim Anlassen

Der Wärmezyklus des Härtens – Anlassens, der an den TENASTEEL® anzuwenden ist, berücksichtigt diese metallurgischen Betrachtungen und ist in *Abbildung 10* schematisch dargestellt.

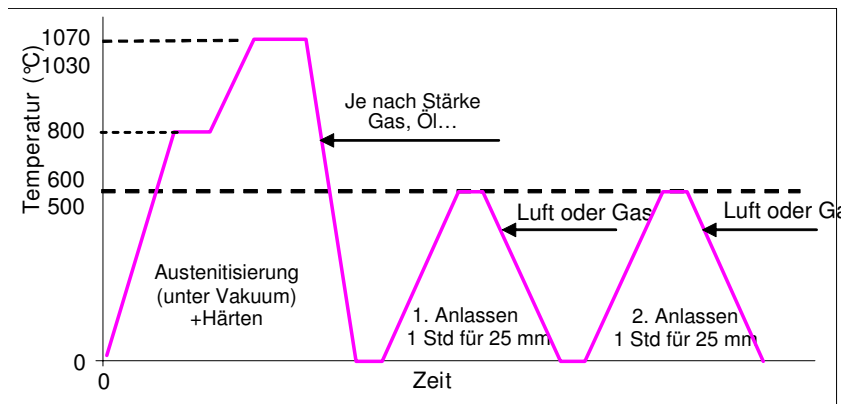


Abbildung 10 – Wärmezyklen des Härstens und Anlassens, die am TENASTEEL® durchgeführt werden

### Für den TENASTEEL® erforderliche Härtebedingungen

Das Austenitisierungswiedererhitzen erfolgt unter Vakuum oder zumindest unter kontrollierter Atmosphäre, um dem Entkohlen des Stahls vorzubeugen. Die Wiederaustenitisierungstemperatur kann zwischen 1000 und 1100 °C ausgewählt werden. Die optimale Temperatur wird in Abhängigkeit von den angestrebten Merkmalen ausgewählt. Die Dauer kann 30 Minuten betragen, sobald die ganze Stärke des Produkts die Temperatur erreicht hat. Schließlich erfolgen zwei Anlassvorgänge zwischen 500 und 600 °C, um voll von dem Sekundärhärten zu profitieren. Eine Dauer von einer Stunde pro 25 mm Produktstärke wird empfohlen.

Die Entwicklung der Härte des TENASTEEL® nach der Endwärmebehandlung ist in *Abbildung 11* in Abhängigkeit von den Wiederaustenitisierungstemperaturen und dem doppelten Anlassen dargestellt, dass alle zuvor definierten Bereiche deckt. Zu bemerken ist, dass das sehr große akzeptable Austenitisierungstemperaturintervall es erlaubt, mit Temperaturen vereinbar zu sein, die gewöhnlich bei einer großen Anzahl anderer Stähle verwendet werden (insbesondere 1.2379/x155CrVMo12-1). Das macht eine Optimierung des Füllens der Öfen und daher eine Kostenverringerung der Wärmebehandlung möglich und daneben auch eine Verringerung der Fehlergefahren in Zusammenhang mit dem Nichteinhalten der Austenitisierungstemperaturen.

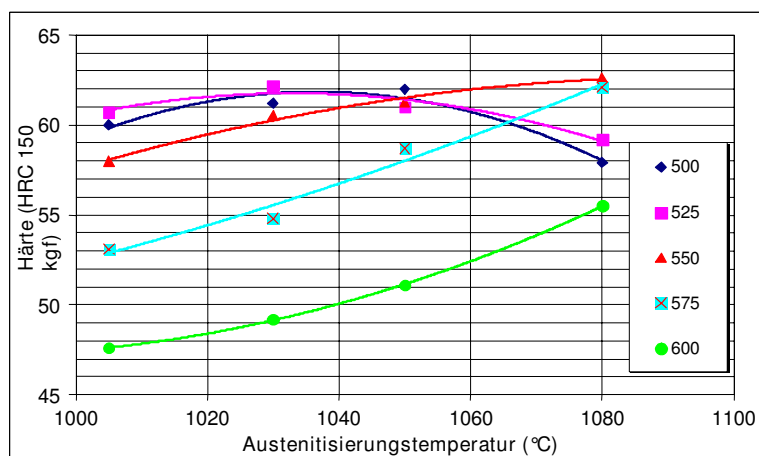


Abbildung 11 – Entwicklung der Härte des TENASTEEL® bei den Wiederaustenitisierungs- und Anlasstemperaturen

Ungeachtet der Austenitisierungstemperatur kann eine Härte zwischen 58 und 62 HRC erzielt werden (Gebrauchsstandard für diese Art von Stahl), wenn TENASTEEL® zwei Anlassvorgängen zwischen 500 und 550 bis 575 °C unterzogen wird. Ein doppeltes Anlassen bei 600 °C muss ganz bestimmten Anwendungen vorbehalten werden, bei welchen ein maximales Erweichen erforderlich ist, zum Beispiel wenn eine extrem hohe Kerbschlagzähigkeit angestrebt wird. Obwohl eine Austenitisierung zwischen 1000 und 1100 °C zu einer guten Härte unseres Stahls führt, werden die besten Merkmale nach dem Wiedererwärmen zwischen 1030 – 1050 °C erzielt. Es ist in diesem Temperaturbereich, dass die Kerbschlagzähigkeit bei einer gegebenen Härte maximal ist, wie aus Abbildung 12 ersichtlich ist.

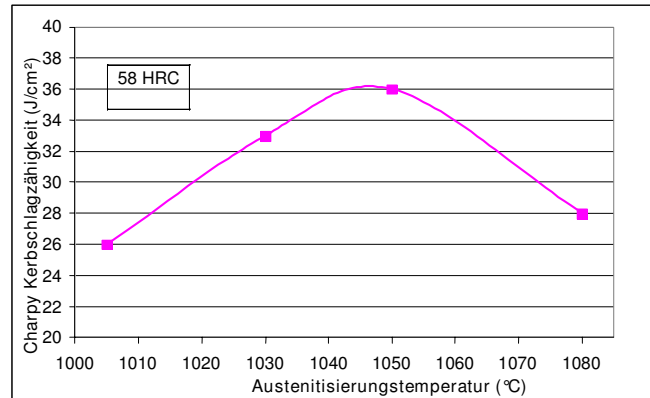


Abbildung 12 –  
Auswirkung der  
Austenitisierungstemper-  
atur auf die Zähigkeit

Wenn die Austenitisierungstemperatur nämlich zu gering ist, wird ein nicht vernachlässigbarer Teil der Chromkarbide nämlich nicht gelöst. Diese bleiben grob und erlauben es nicht, die Härte und die Abnutzungsfestigkeit des Stahls ausreichend zu steigern. Andererseits wird bei höheren Wiedererhitzungstemperaturen das durch das Frischen der Karbide erzielte Härten durch das Erweichen ausgeglichen, das auf das Steigern des Restaustenitprozentsatzes zurückzuführen ist, der nach dem Härten noch vorhanden ist. Ein drittes Anlassen wäre daher erforderlich, um diesen Restaustenit komplett zu destabilisieren.

Was das Härten betrifft, zeigt das TRC-Diagramm der Abbildung 5, dass V2, die kritische untere Härtgeschwindigkeit (Abkühlgeschwindigkeit, ausgehend von welcher der Austenit in Bainit und Martensit umgewandelt wird, ohne Perlit zu ergeben, oder Geschwindigkeit ab welcher die martensitische Struktur erscheint) 10 °C/Min. beträgt, während V1, die obere kritische Härtgeschwindigkeit (ab welcher der Austenit nur in Martensit umgewandelt wird) in der Nähe von 33 °C/Min. liegt. Diese Abkühlgeschwindigkeiten können durch Härten an der Luft für Teile bis zu 25 mm Stärke gehen. Darüber hinaus erfolgt das Härten mit Öl.

### ZUSAMMEN-FASSUNG

Die Wiederaustenitisierungsbehandlungen und das Standardhärten des TENASTEEL® erfolgen mit den folgenden Parametern:

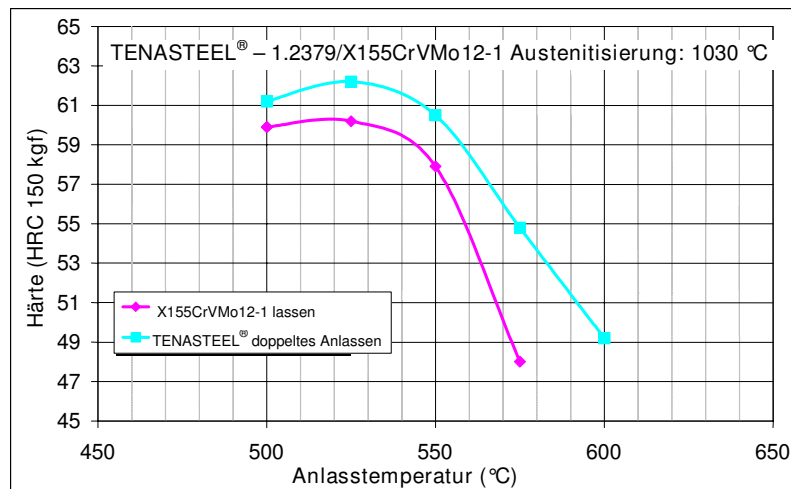
- Austenitisierung unter Vakuum zwischen 1020 und 1050 °C ;
- Halten 1 Stunde pro 25 mm Stärke;
- Härten an der Luft für Teile über 25 mm Stärke und darüber hinaus mit Öl.



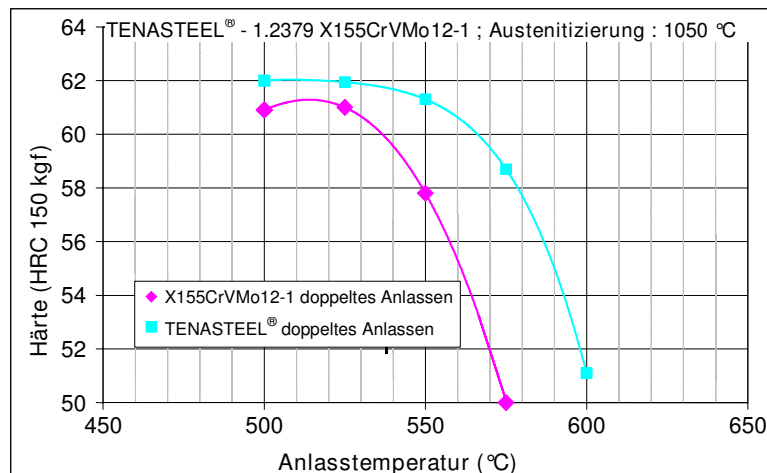
### Für den TENASTEEL<sup>®</sup> erforderliche Anlassbedingungen

Die Anzahl und die Temperatur der durchgeführten Anlassbehandlungen zum Erweichen der martensitischen Struktur, die nach dem Härten erzielt wurde, erlauben es dem TENASTEEL<sup>®</sup>, seine mechanischen Eigenschaften und seine endgültigen Gebrauchseigenschaften zu erhalten.

Die Anlasserweichungskurven des TENASTEEL<sup>®</sup> sind mit denen des X155CrMo12-1 in *Abbildung 13* für eine Austenitisierung bei 1030 °C zu vergleichen und *Abbildung 14* nach dem Wiedererhitzen auf 1050 °C.



*Abbildung 13* – Erweichungskurve beim Anlassen des TENASTEEL<sup>®</sup> austenitisiert bei 1030 °C im Vergleich zu dem des 1.2379/x155CrMo12-1



*Abbildung 14* – Erweichungskurve beim Anlassen TENASTEEL<sup>®</sup> austenitisiert bei 1050 °C verglichen mit dem des 1.2379/x155CrMo12-1

Diese Erweichungskurven beim Anlassen des TENASTEEL<sup>®</sup> erlauben einige interessante Schlussfolgerungen:

- Die TENASTEEL<sup>®</sup>-Sorten und 1.2379/x155CrMo12-1 werden in den gleichen Temperaturbereichen behandelt;
- Bei einer identischen Anlassstemperatur ist der TENASTEEL<sup>®</sup> härter als der 1.2379/x155CrMo12-1,

- Schließlich erlaubt es der TENASTEEL<sup>®</sup>, hohe Härten (> 60 HRC) zu erzielen, indem Anlassvorgänge bei hohen Temperaturen ( $\geq 550$  °C) durchgeführt werden.

Diese letzte Möglichkeit stellt einen beträchtlichen Vorteil für die Beschichtungseignung dar, die für das Nitrieren (Gasnitrieren, Salzbad, Ionitrieren usw.) oder das PVD-Ablagern zum Beispiel relativ lange Haltezeiten bei hohen Temperaturen erfordert. Diese Erweichungskurven zeigen, dass der TENASTEEL<sup>®</sup> für Behandlungen zwischen 550 und 575 °C ganz und gar in der Lage ist, eine Matrixhärte größer als 60 HRC zu wahren, während der 1.2379/x155CrVMo12-1 einen Einbruch seiner Härte (50 – 58 HRC) in diesem Temperaturbereich erfährt. Weitere Präzisionen zu der Beschichtungseignung der Oberfläche des TENASTEEL<sup>®</sup> werden in Kapitel 8 gegeben.

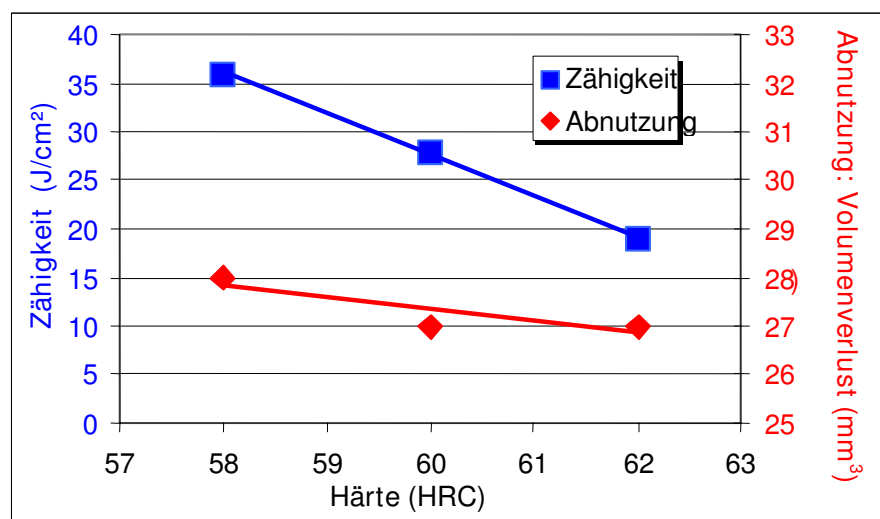


Abbildung 15 – Entwicklung der mechanischen Eigenschaften des TENASTEEL<sup>®</sup> in Abhängigkeit von seiner Härte, die nach der Wärmebehandlung erzielt wird

Die Entwicklung der mechanischen Merkmale, die nach der Wärmebehandlung erzielt wird, ist in *Abbildung 15* eingetragen. Die Härte des TENASTEEL<sup>®</sup> steigt stark mit der Verringerung der Härte des Stahls, während seine Abnutzungsfestigkeit schwach mit der Härte zunimmt. Der beste Kompromiss für eine Standardanwendung wird nach zwei Anlassvorgängen zwischen 525 und 575 °C erzielt, wobei die Dauer auf 1 Stunde für 25 mm Produktstärke festgelegt wird.

Da die verwendbaren Temperaturbereiche sowohl für die Austenitisierung als auch für das Anlassen des TENASTEEL<sup>®</sup> sehr groß sind, ist es daher leicht, die Wärmebehandlung in Abhängigkeit von den angestrebten Endmerkmalen anzupassen. *Abbildung 16* fasst eine gewisse Anzahl optimaler Behandlungen für die gut definierten üblichen Anwendungen dieser Sorte zusammen.

Weitere Behandlungen sind bei besonderen Anwendungen ganz und gar vorstellbar. Eine Härte von 50 – 55 HRC, die zu einer maximalen Kerbschlagzähigkeit führt, kann durch Anlassvorgänge bei 600 °C erzielt werden. Weitere spezifische Anwendungen sind der *Abbildung 15* zu entnehmen, um die anzustrebende Härte je nach den angestrebten Merkmalen zu bestimmen, wonach man die *Abbildungen 13 und 14* heranzieht, um die optimale Wärmebehandlung zu bestimmen.

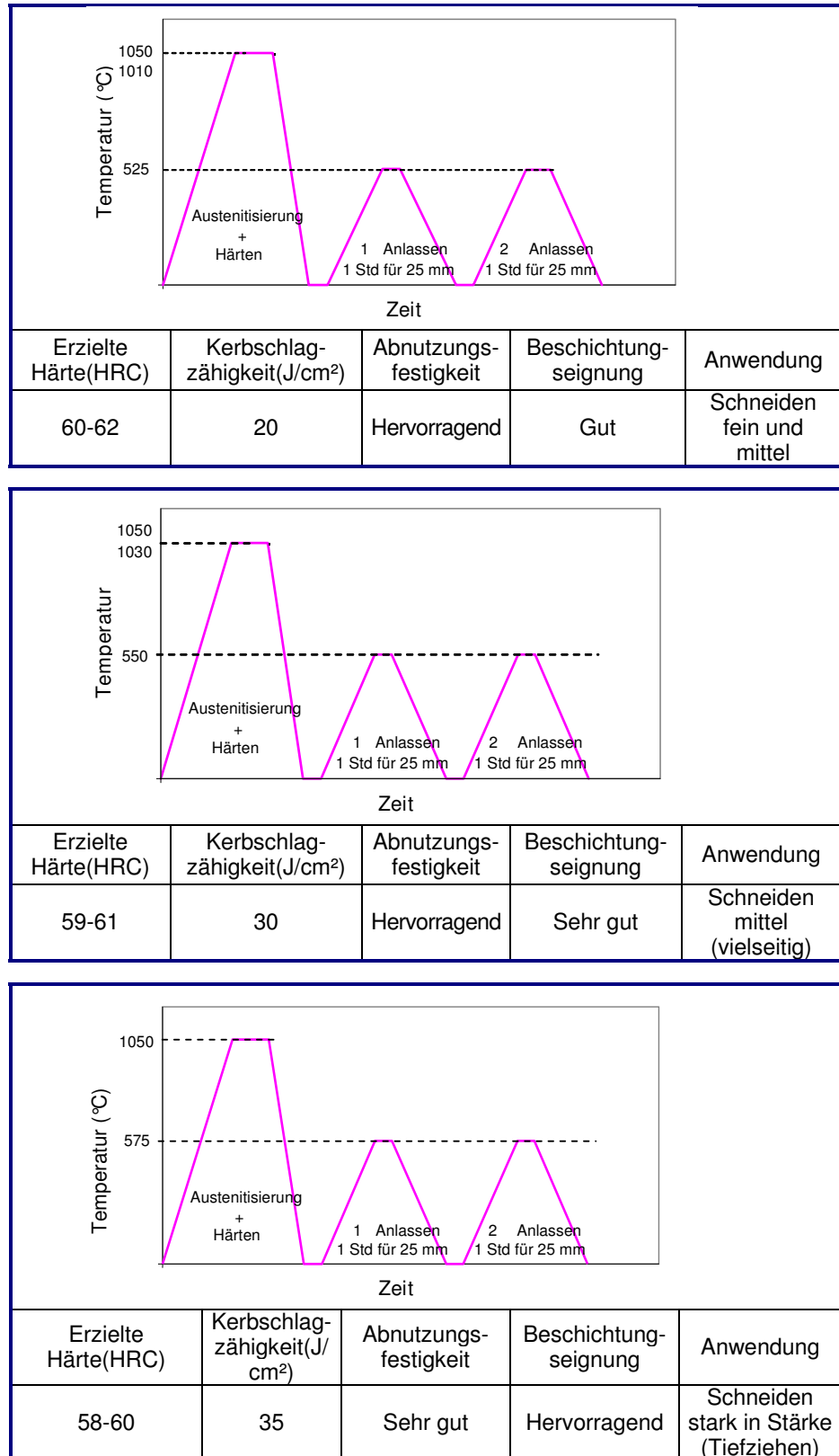


Abbildung 16 – Wärmebehandlungsbeispiele, die für TENASTEEL® empfohlen werden

### KRYOGENE BEHANDLUNGEN

Für die meisten Werkzeugstähle ist die Endtemperatur der martensitischen Umformung geringer als die Raumtemperatur. Daraus ergibt sich, dass, wenn ein herkömmliches Härten durchgeführt wird, das bis zur Raumtemperatur geht, es noch Restaustenit gibt, der sich zum Teil während der Härtvorgänge umformt, wenn diese bei hoher Temperatur erfolgen. Außer wenn man die Anzahl der Härtvorgänge (4 oder 5) anheben will, bleibt immer ein geringer Prozentsatz im Metall.

Abbildung 17 zeigt, dass doppelte Anlassvorgänge bei mindestens 550 °C durchgeführt werden müssen, damit der Restaustenitgehalt nach der Austenitisierung des TENASTEEL® bei 1050 °C kleiner ist als 1 %.

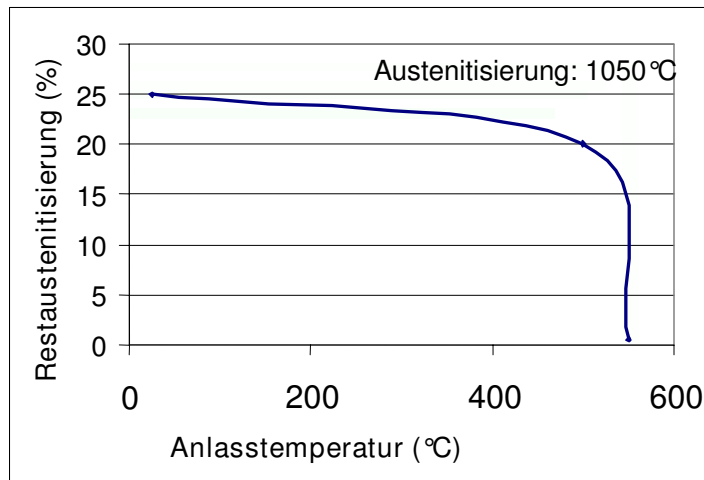


Abbildung 17 – Entwicklung des Restaustenitgehalts in Abhängigkeit von der Temperatur des doppelten Anlassens.

Diese geringe Menge an Restaustenit verwandelt sich dann sehr langsam bei Raumtemperatur und führt zu einer mäßlichen Instabilität der Teile in den Wochen nach ihrer Behandlung.

Um die mäßliche Stabilität der Teile zu steigern, kann es vorteilhaft sein, diesen Austenit durch eine Kältebehandlung zu eliminieren, die es erlaubt, unter die Temperatur des Endes der martensitischen Umformung zu gehen.

Mehrere Vorsichtsmaßnahmen müssen getroffen werden:

- Das Abkühlen muss sofort nach dem Härten erfolgen, ein Halten bei Raumtemperatur stabilisiert dabei den Austenit.
- Die optimale Kühltemperatur liegt zwischen -60 und -100 °C. Bei diesen Temperaturen erfolgt die martensitische Umformung nicht sofort, wie das über 0 °C der Fall ist. Eine gewisse Haltezeit ist daher erforderlich, typisch 2 bis 3 Stunden.
- Das Wiedererwärmen nach dem Kühlen muss langsam erfolgen, um es zu erlauben, den Austenit, der während des Haltens nicht umgeformt wurde, umzuformen, und um die Spannungen, die Bruchgefahren einzuschränken (100% martensitische Struktur, also sehr bruchanfällig).

Die für den TENASTEEL® empfohlene Behandlung berücksichtigt diese Empfehlungen, sie ist unten in (Abbildung 18) dargestellt:

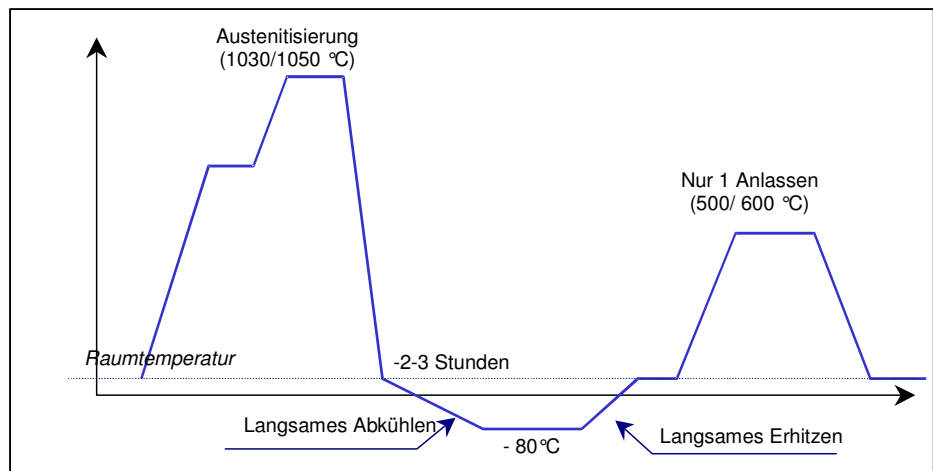


Abbildung 18 – Kryogene Behandlung für TENASTEEL

Die Umformung des größten Teils des Restaustenits führt zu einem zusätzlichen Steigern der Härte nach dem einzigen erforderlichen Anlassen. *Abbildung 19* unten zeigt diese größere Härte, wenn das Metall eine kryogene Behandlung erhalten hat. In diesem Fall können Härten von 64 HRC nach einem Anlassen bei 500 °C erzielt werden, ob der Stahl nun bei 1030 oder 1050 °C austenitisiert wurde.

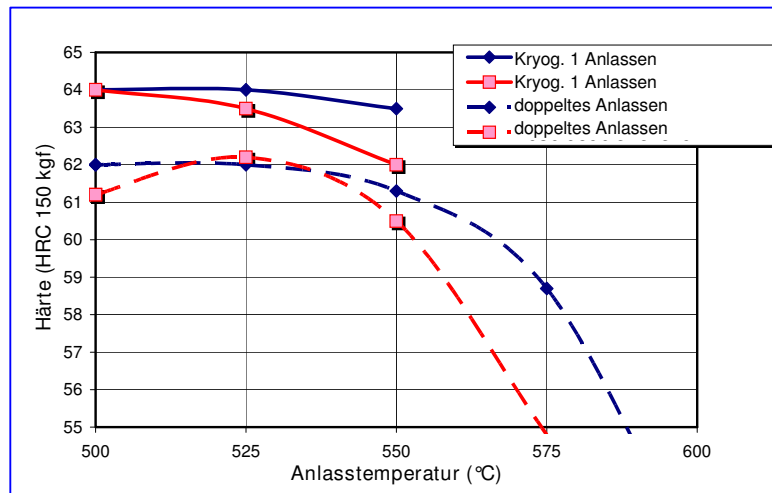


Abbildung 19 – Entwicklung der Härte gemessen an TENASTEEL® nach der Wärmebehandlung

Die Schneidparameter des TENASTEEL<sup>®</sup> sind ähnlich denen des 1.2379/x155CrVMo12-1.

Aber der TENASTEEL<sup>®</sup> - Stahl

- erlaubt es, eine Anzahl von Nachteilen durch seine bessere Gleichförmigkeit in der Struktur und größere Feinheit seiner Karbide zu umgehen
- verringert die Rissbildungsgefahren

### ALLGEMEINES

Die Funkenerosion ist ein sehr interessantes Verfahren, das es erlaubt:

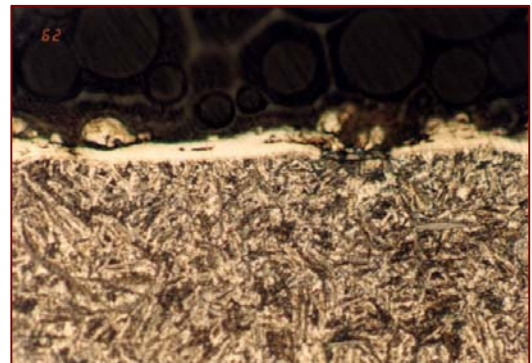
- Werkzeugstelle im behandelten Zustand zu schneiden,
- weniger Spannungen in den Werkstoff einzubringen,
- sehr präzise Maße zu erzielen und sehr komplexe Formen, die beim traditionellen Bearbeiten nicht durchführbar sind.

### KONZEPT

Die Funkenerosion beruht auf dem Erosionseffekt elektrischer Funken, die zwischen einem leitenden Draht in Bewegung und dem Teil erzeugt werden, das die Rolle der Kathode spielt, die voneinander durch ein dielektrische Medium getrennt sind.

Unter der Einwirkung der elektrischen Entladung kann die Oberflächentemperatur auf 8000 bis 12000 °C steigen. Aufgrund der Höhe dieser Temperaturen wird die Morphologie der extremen Oberfläche stark modifiziert wie folgt:

1. Geschmolzenes und wiederaufgebrachtes Metall, Zone bestehend aus einer Ansammlung mikroskopischer Metallteilchen, wieder verfestigt auf der darunter liegenden weißen Schicht,
2. Sehr harte weiße Schicht bestehend aus wiedergeschmolzenem und wiederaufgekohltem und danach sehr rasch abgekühltem Metall (ihre Struktur reagiert nicht auf das herkömmliche metallografische Reagens, daher ihr Name).
3. Von der Wärme betroffene Zone



Die Stärken der von der Funkenerosion beeinträchtigten Oberflächenschichten ist sehr veränderlich und kann je nach Arbeitsbedingungen von einigen Mikrometern bis zu einigen Hundertstel Millimeter reichen.

In bestimmten Fällen können Risse auftreten. Im Allgemeinen werden die Oberflächeneigenschaften des Werkstoffes komplett modifiziert, und dies sowohl hinsichtlich der Struktur als auch der Härte oder der inneren Spannungen.

Interessant ist es festzustellen, dass eine gewisse Anzahl von Parametern eine ausschlaggebende Rolle für den Erfolg der Funkenerosion spielt, denn wenn ein Werkstoff mit schlechter Qualität systematische Schwierigkeiten verursacht, ist es offensichtlich, dass ein perfekt homogener Stahl ein schlechtes Funkenerosionsverhalten zeigen wird, wenn bestimmte Regeln nicht eingehalten werden. Zum Beispiel steigt die Schneidgeschwindigkeit umso mehr als die an der Oberfläche des Teils freigesetzte Energie groß ist. Wenn man aber ein bestimmtes Limit überschreitet, beeinträchtigt man den Oberflächenzustand des Teils. Daher scheinen zwei Parameter besonders wichtig:

- die Qualität des zu behandelnden Werkstoffes: Homogenitätsniveau, Einschlusssauberkeit usw.
- die Funkenerosionsparameter: die Stromstärke, Anlegezeit und Pause usw.

### ① Das Funkenerosionsverfahren

In diesem Absatz rufen wir bestimmte Vorsichtsmaßnahmen in Erinnerung, die zu treffen sind, um den Erfolg eines Funkenerosionsvorgangs zu garantieren. Dazu ziehen wir Studienergebnisse heran, die von Fachleuten erzielt wurden. Zuerst zählen wir die verschiedenen Parameter auf, die bei einer Funken- oder Senkerosion eingreifen:

- Auswahl des Werkstoffes der Drähte
- Auswahl des Dielektrikums
- elektrische Leistung (Stromstärke oder Spannung)
- Entladezeit: Dauer des Funkens
- Pausezeit: Zeit zwischen zwei Funken
- Einstellen der Entfernung Draht/Werkstück

Die Auswahl dieser Parameter wirkt sich in der Endqualität des bearbeiteten Werkstücks hinsichtlich der Einhaltung der geometrischen Maße, der Oberflächenrauheit und der Stärke der weißen Schichten stark aus.

Für einen guten Oberflächenzustand muss zum Beispiel die Stromstärke verringert werden. Wenn man gleichzeitig die Entladungsdauer verlängert, muss man auf eine größere Stärke der weißen Zonen mit Wärmebeeinträchtigung gefasst sein.

Insgesamt besitzen die Bearbeitungsfachleute die Erfahrung, die es ihnen erlaubt, die erforderlichen Oberflächenzustände in Abhängigkeit von den Stärke- und Dauerparametern der elektrischen Impulse zu erzielen.

### ② Der Werkstoff

Welche Vorzüge hat TENASTEEL®?

Auch wenn es nicht erforderlich ist, die Funkenerosionsgeschwindigkeit bei TENASTEEL® zu erhöhen, muss man die Zeitreduzierungen und Wechselfälle in Zusammenhang mit der Gleichförmigkeit der Struktur und der Feinheit der Karbide dieses Stahls (im Vergleich zum 1.2379/x155CrVMo12-1) berücksichtigen, die es erlauben, eine Anzahl von Nebenkomplikaationen zu vermeiden.

Ferner wirkt sich die Verringerung des Kohlenstoffgehalts des TENASTEEL® wie folgt aus

- Verringerung der Rissbildungsgefahren in Zusammenhang mit der Wärmebeeinträchtigung durch Funkenerosion (gleiche Gründe wie beim Schweißen),
- Verringerung der Tiefe der von der Funkenerosion beeinträchtigten Zone, die ihr eventuelles späteres Entfernen durch Polieren vereinfachen,
- Verbesserung des Oberflächenzustands des Schnitts (Verringerung der Heterogenitäten in Zusammenhang mit Karbidabsonderungen).

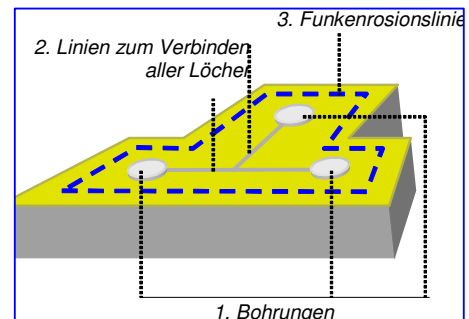
### ③ Gefahren in Zusammenhang mit der Funkenerosion an Werkzeugstählen

- von der Hitze beeinträchtigte Zone/wiedergeschmolzene Zone  
→ harte Stellen und Gefahr von Mikrorissen
- Abbau der Entspannungen  
→ Verformungen  
→ Risse an empfindlichen Zonen, wie zum Beispiel plötzlicher Querschnittwechsel, rückspringende Winkel usw.

### ④ Abhilfen

#### ■ *Interne Spannungen vor dem Schneiden einschränken*

- Durch Anpassen der Härtebedingungen an die Werkzeugstärke; keine übermäßige Abkühlgeschwindigkeit.
- Langsamens Erhitzen vor dem Härten mit einer Zwischenstufe gegen 700/800 °C zur Homogenisierung der Temperatur vor dem Durchlaufen der Umformungspunkte des Stahls.
- Zwingend ein doppeltes Anlassen mit der höchst möglichen Temperatur, die mit der angestrebten Lebensdauer vereinbar ist, durchführen.
- In dem Fall von Teilen mit starkem Querschnitt, kann man vor der Wärmebehandlung die internen Spannungen des Teils abbauen, indem man Löcher bohrt, die untereinander durch einen Einschnitt mit der Säge oder Funkenerosion verbunden sind. Das erlaubt es, die Funkenerosion der Innenformen später und in aller Sicherheit durchzuführen.





■ *Nach der Funkenerosion*

- Wenn das Schneiden vor Wärmebehandlungen erfolgt, die Funkenerosionsflächen polieren, um die ganze weiße Schicht (gehärtet) zu eliminieren, die von der Funkenerosion erzeugt wird.
- Wenn das Schneiden nach den Wärmebehandlungen erfolgt (empfohlen):
  - mit Endfertigungsgeschwindigkeit arbeiten,
  - die Funkenerosionsflächen polieren und/oder ein Entspannungsglühen sofort bei einer Temperatur durchführen, die 15 bis 20 °C niedriger ist als die des Qualitätsanlassens.

**ZUSAMMENFASSUNG**

- Die Funkenerosionsparameter sind für TENASTEEL® und 1.2379/x155CrVMo12-1 gleich.
- Es ist wichtig, die weiße Schicht durch Polieren zu eliminieren, um Bruchgefahren beim Gebrauch zu vermeiden.
- Die feine Struktur des TENASTEEL® erlaubt es, den Oberflächenzustand der Schnitte zu verbessern und die Rissbildungsgefahr zu verringern.

## ALLGEMEINES

Das Polieren von Werkzeugen zum Kaltbearbeiten, Stanzen, Schneiden entspricht mehrfachen Erfordernissen:

- Garantieren eines feinen Oberflächenzustands vor dem Oberflächenbeschichten (PVD, CVD), so dass die Qualität der Ablagerungen verbessert und ihr Haften an dem Träger begünstigt wird.
- Verbessern des Reibungskoeffizienten
  - Begünstigen des Gleitens der Werkstoffe in dem Stanzwerkzeug
  - Verringern der Abnutzung durch Haften beim Schneiden von weichen Werkstoffen (Kupfer, Aluminium, austenitische nicht rostende Stähle usw.)
- Eliminieren der weißen Funkenerosionsschicht, die besonders für Rissbildung durch mechanische Beanspruchung besonders anfällig ist.

Die nach dem Polieren erzielte Oberflächenqualität hat daher einen rein funktionalen Aspekt, denn sie wirkt sich direkt auf die Leistungen des Werkzeugs aus. Die Beurteilung des Ergebnisses beruht daher auf einem messbaren Kriterium, der Rautiefe, wobei das Aussehen bei dieser Art von Anwendung keine Rechtfertigung hat.

Die Polierqualität hängt natürlich von dem Polierverfahren ab, sie wird jedoch auch stark von der Feinheit und Homogenität in der Mikrostruktur des Stahls beeinflusst. Dank seiner feinen Struktur im Vergleich zu einem X160 Cr Mo V12 gewährleistet TENASTEEL® Folgendes:

- schnelleres Polieren
- besseres Aussehen der Oberfläche

Die Leistung der Werkzeuge im Betrieb wird daher verbessert, vor allem in den Fällen einer Abnutzung durch Haften.

## ERFOLGSFAKTOREN

Unter den verschiedenen Faktoren, die sich auf die Qualität des erzielten Polierens auswirken, sind die 3 folgenden Punkte zu berücksichtigen:

- die metallurgische Qualität des Stahls,
- die Typen und Zustände der Bearbeitungen, die bei der Herstellung des zu polierenden Stahls verwendet werden,
- die Poliervorgehensweise.

Die beim Polieren erzielte Oberflächenqualität, also die Leistungen des Werkzeuges, hängen von der Optimierung dieser 3 Faktoren ab.

■ Die metallurgische Güte

Es ist dies die Struktur des Stahls, die die wichtigste Rolle beim Erzielen eines guten Oberflächenzustands spielt.

Bei den meisten Werkzeugstählen für die Kaltbearbeitung, die stark kohlenstofflegiert sind, beobachtet man die Gegenwart primärer Karbide, die bei ihrer Verfestigung entstanden sind.

Die Anzahl und die Größe dieser Karbide sind direkt proportional zum Kohlenstoffgehalt des Stahls.

Wenn die Karbide auch eine günstige Rolle für die Abnutzungsfestigkeit spielen können, bewirken sie dennoch eine gewisse Anzahl von Nachteilen:

- sehr harte Partikel (1500/3500 Hv) in einer weicheren Matrix, die leicht aus der Matrix beim Polieren abgerissen werden und Hohlräume sowie Kratzer auf den polierten Oberflächen verursachen (Steigern der Polierzeit). Das Abreißen ist umso leichter, die Mängel sind umso größer als die Karbide groß sind.

Dank seines schwachen Kohlenstoffgehalts sind die Karbide des TENASTEEL® fein und gewährleisten ein schnelles und zuverlässiges Polieren.

- Stark legierte Stähle weisen häufig in der Mitte ihrer Stärke Karbidkonzentrationen in Form von so genannten „abgesonderten Adern“ auf. In diesen Zonen sind die Karbide noch gröber. Die polierten Oberflächen, die von diesen Adern durchquert werden, weisen daher an dieser Stelle ein heterogenes Aussehen mit einer größeren Rauheit als im Rest der Matrix auf, ja sogar geometrische Mängel des Typs „Wellungen“, die sich aus einer lokal höheren Härte ergeben.

TENASTEEL® ist daher im Vergleich zum X160 Cr Mo V12 wieder weniger anfällig für diese Art von Mangel, und dies dank seines niedrigeren Kohlenstoffgehalts.

- Die Gegenwart grober Karbide, in der Hauptsache in abgesonderten Adern kann manchmal auch zum Entdecken von Mikroporositäten bei einem Feinpolieren führen. Diese kleinen Hohlräume ergeben sich aus Dislozierungen, die zwischen den Karbiden und der Matrix bei Schmiede- oder Walzvorgängen auftreten.

Der TENASTEEL®, der sich von den Stählen des Typs X160 Cr Mo V12 durch einen niedrigeren Kohlenstoffgehalt und daher durch feinere Karbide unterscheidet, bietet eine bessere Eignung für das Polieren, die sich wie folgt zeigt:

- Verringerung der Polierzeiten,
- niedrige Rautiefe (für ein Schleifmittel mit gleichwertiger Granulometrie),
- einen gleichförmigeren Oberflächenzustand in der Stärke,
- weniger Gefahr von Mikroporositäten auf halber Stärke.

Ferner wirken sich weitere Parameter auf den Oberflächenzustand polierter Werkzeuge aus:

- die Einschlussauberkeit des Stahls: der Oberflächenzustand verbessert sich, wenn die Anzahl und die Größe der Einschlüsse sinken,
- die Härte des Stahls: eine größere Härte steigert die Polierzeit, erlaubt aber das Erzielen eines besseren Oberflächenzustands.

### ■ Bearbeitungstypen und Bedingungen

Das mechanische Bearbeiten unter schwierigen Bedingungen kann manchmal zu Strukturveränderungen auf der Oberfläche führen. Die Wärmebehandlungen nach dem Bearbeiten regenerieren jedoch die Struktur, es können sich daraus für das Polieren keine Probleme ergeben.

Eigentlich kann sich nur die Rautiefe nach dem Bearbeiten auf das Polieren auswirken: ein grobes Bearbeiten verhindert das Erzielen eines guten Polierzustands nicht, steigert jedoch die Polierzeit beachtlich.

Die Funkenerosion (nach einer Wärmebehandlung) hat einen größeren Einfluss. Dieser Vorgang bildet eine oberflächliche Schicht, „weiße Schicht genannt“, auf der Oberfläche, die sehr hart, sehr empfindlich ist, und Mikrorisse aufweisen kann. Diese Schicht muss zwingend durch Schleifen und/oder Polieren entfernt werden. Der Einsatz niedriger Funkenerosionssysteme erlaubt das Erzielen einer weißen Schicht mit geringer Stärke, was die Polierzeit einschränkt.

### ■ Schleif- und Poliertechniken

Die erzielte Rautiefe ist nicht optimal, aber das Schleifen zielt ja nicht auf die Optimierung der Reibungseigenschaften des Stahls ab.

Beim Schleifvorgang muss ein übermäßiges Erhitzen der Teile vermieden werden, das die Struktur des Stahls verändern kann.

Man schränkt daher den Druck ein und besprüht die Teile.

Das Schleifen des TENASTEEL® kann mit Aluminiumoxidschleifscheiben, ja sogar Bornitridschleifscheiben bei einem Schleifen im behandelten Zustand erfolgen.

*Das Polieren* kann manuell oder automatisch durchgeführt werden. Wenn immer möglich, wird das automatische Polieren dem manuellen vorgezogen.

Man unterscheidet zwei Hauptschritte:

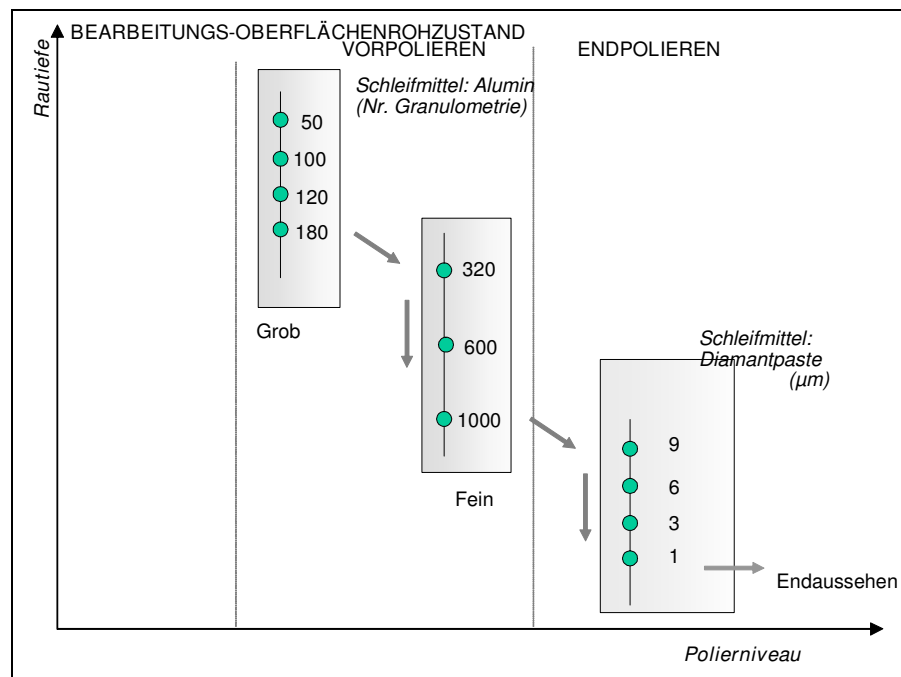
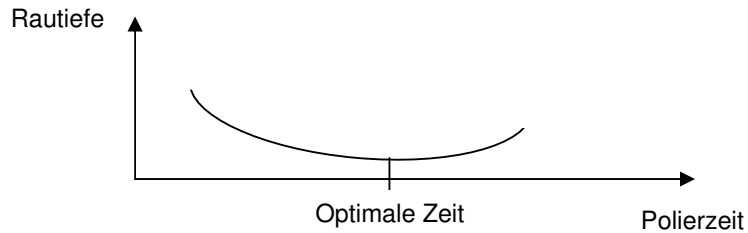
- Das Vorpolieren, das darin besteht, nacheinander die Polierspuren eines Papiers mit einer gegebenen Granulometrie durch neue Spuren des Papiers mit der darauf folgenden sinkenden Granulometrie zu eliminieren. Bei jedem Granulometriewechsel wird das Teil gewaschen und dann im Allgemeinen mit Druckluft getrocknet. Ferner muss bei jedem Granulometriewechsel das Polieren um 90° gedreht werden, so dass die neuen Polierriefen zu den vorhergehenden senkrecht stehen.

Das benutzte Schleifpapier hat eine sinkende Granulometrie des Typs 100 – 180 – 320 – 600 dann 1000 unter Wasser.

- Das Endfertigunspolieren hingegen verwendet Scheiben aus Filz, die mit Diamantpaste mit einer Granulometrie von 9 µm bis 1 µm versetzt sind. Danach wird der Teil mit Äther, Alkohol entfettet und sofort getrocknet, um jede Korrosionsgefahr auf der polierten Seite zu vermeiden.

Ein zu hoher Polierdruck, ob er nun vom Bediener oder von der Maschine ausgeübt wird, kann ein starkes Verfestigen bewirken, ja sogar ein lokales Erhitzen. Je weiter man in den Endfertigunsschritten fortschreitet, desto geringer muss der angewandte Druck sein.

Was die Polierzeiten betrifft, besagt die allgemeine Regel, dass ausgehend von dem Zeitpunkt, in dem die Stärke des Schleifkorns zu dem Eliminieren aller Kratzer geführt hat, die von der vorhergehenden Körnung erzeugt wurden, man auf den nächsten Schritt übergeht. Es ist allgemein bekannt, dass es eine optimale Polierzeit gibt, über welche hinaus man den Zustand des Polierens verschlechtert.



**ZUSAMMEN-FASSUNG**

Die Poliertechniken des TENASTEEL® sind identisch mit denen des 1.2379/X155CrVMo12-1.

Die feine Struktur des TENASTEEL® erlaubt ein schnelleres Polieren und das Erzielen eines besseren Oberflächenzustands.

### THERMOCHEMISCHE OBERFLÄCHEN- BEHANDLUNG: NITRIEREN

Um ihre Reibfestigkeit zu steigern und zum Minimieren der Abnutzung beim Gebrauch, werden Werkzeugstähle immer häufiger oberflächlich durch Nitrieren behandelt oder mit metallischen Ablagerungen beschichtet. Diese Oberflächenbehandlung erlaubt es auch, die Oberflächenhärte der Teile deutlich zu steigern und ihr Halten beim Gebrauch, bei dem sie scheuernder Abnutzung oder Haftungsabnutzung ausgesetzt sind, zu steigern.

Das Nitrieren ist eine thermochemische Behandlung zum Oberflächenhärten durch atomare Stickstoffdiffusion auf der Oberfläche der zuvor durch Härten und Anlassen behandelten Teile. Das Einfügen von Stickstoffatomen und Bilden von Nitriden mit den Legierungselementen des Stahls bewirken ein Härten der Oberfläche (750 à 1400 HV) was die angestrebten Eigenschaften ergibt:

- Verbesserung des Abnutzungs- und Reibfestigkeit der Werkstoffe;
- Steigern der Dauerfestigkeit des Werkstoffs dank der Druckspannungen, die durch diese Behandlung geschaffen werden;
- Wahren der metallurgischen Strukturen des Werkstoffs und daher ihrer mechanischen Maßmerkmale, wenn das Anlassen bei einer Temperatur erfolgte, die größer ist als die der Oberflächenbehandlung.

Da diese Behandlung außerdem nach der Diffusion kein Härten erfordert, bewirkt sie nur eine begrenzte Verformung der Teile. Ein systematisches Anschwellen, das durch Zufuhr von Stickstoff in das kristalline Netz des Werkstoffs verursacht wird, wird allerdings festgestellt. Eine Änderung der Position der Bearbeitungstoleranz ist daher eventuell vorzusehen.

#### ■ Allgemeines Prinzip

Bei Berührung der kristallografischen würfelförmigen zentrierten Struktur des über 450 °C erhitzten Stahls dringen die sehr kleinen Stickstoffionen leicht in das Netz (①) ein, welches sie schnell sättigen, indem sie leere Stellen belegen. Sie bilden dann Nitride, indem sie sich mit den Eisenatomen der Oberfläche kombinieren (②), um eine sehr harte Kombinationsschicht zu bilden. Danach dringt der Stickstoff in das Innere des Stahls ein, um eine Diffusionsschicht zu ergeben, deren Stärke von der Temperatur und der Behandlungszeit abhängt (③).

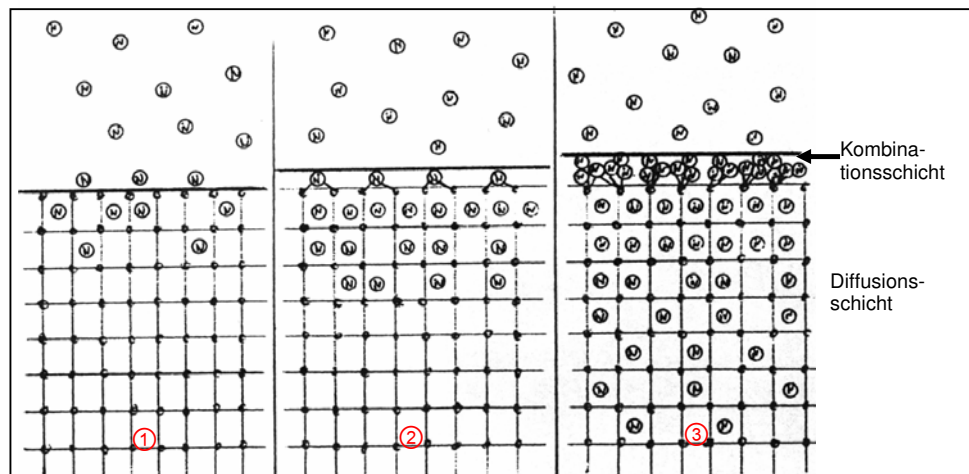


Abbildung 1 – Nitrierungsmechanismus eines Stahls

Abbildung 1 stellt schematisch den Verteilungsmechanismus des Stickstoffs im Stahl dar, *Abbildung 2* zeigt die verschiedenen Schichten, die auf dem gasnitrierten TENASTEEL® gebildet werden.

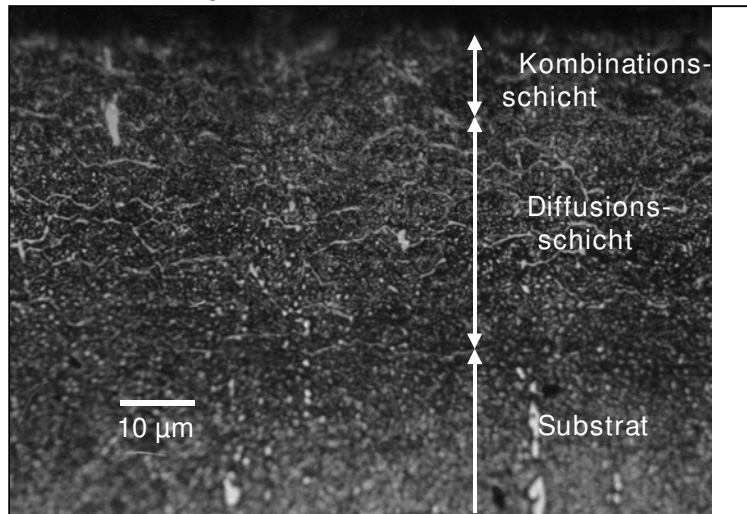


Abbildung 2 – Mikrographie einer Probe TENASTEEL® nach Gasnitrierung

Durch Eindringen in die Netze stößt der Stickstoff den Kohlenstoff des Stahls ab, was es erlaubt, die Diffusionsschicht aufzuzeigen. Die Stärke der Diffusionsschicht kann auch ausgehend von einer Filiationsschätzung von der Oberfläche zum Inneren des Stahls geschätzt werden. *Abbildung 3* zeigt, dass diese Stärke sehr schwer genau zu messen ist.

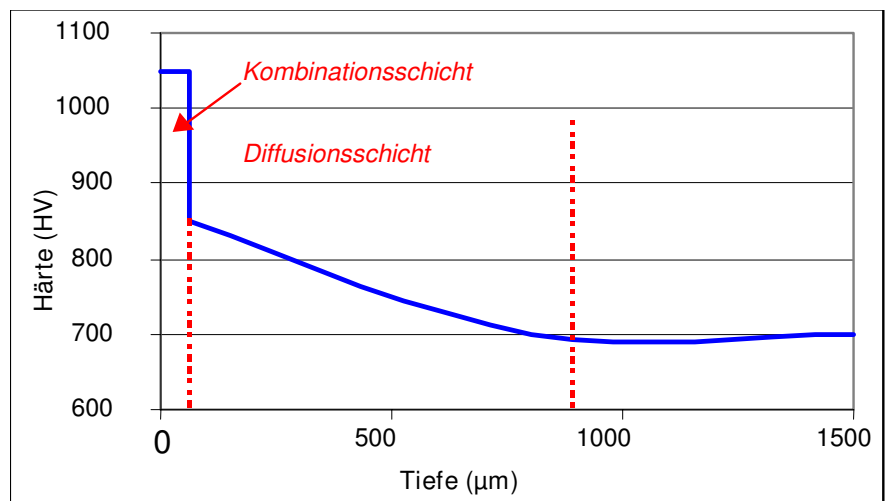
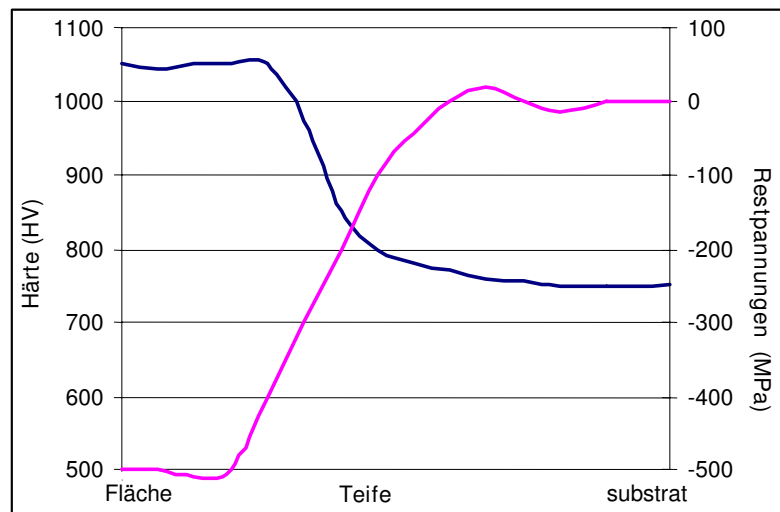


Abbildung 3 – Mikrohärtefiliation ausgehend von der Oberfläche einer nitrierten Schicht

Die von den Eisennitriden geformte oberflächliche Kombinationsschicht ist sehr hart. Sie begünstigt das Gleiten und steigert die Abnutzungs- und Reibfestigkeit. Die darunter liegende Diffusionsschicht gewährleistet ein gutes Dauerbelastungsverhalten und verstärkt ebenfalls die Abnutzungsfestigkeit.

Die Härte der Nitrierungsschicht ist auf die Restspannungen zurückzuführen, die in die Struktur durch Einfügen der Stickstoffatome und Bilden der Nitride eingeführt werden (*Abbildung 4*), wobei letztere zwei kristalline Formen annehmen können:

- *Hexagonal für die  $\epsilon$ -Phase*  
(Maschenparameter  $a = 5,53 \text{ \AA}$ ,  $b = 4,83 \text{ \AA}$  und  $c = 4,42 \text{ \AA}$ ) für das Eisennitrid  $\text{Fe}_{2,3}\text{N}$
- *Würfelförmig für die  $\gamma$ -Phase*  
(mit zentrierten Seiten mit einem Maschenparameter von  $3,79 \text{ \AA}$ ) für das Nitrid  $\text{Fe}_4\text{N}$



*Abbildung 4* – Einfluss der Restspannungen in der nitrierten Schicht auf die Entwicklung ihrer Härte

Die Merkmale und die Stärke dieser verschiedenen Bestandteile der nitrierten Schicht hängen von der Stahlsorte, der Temperatur, der Dauer und der Art der Behandlung ab, denn die Nitrierung kann erzielt werden:

- im Salzbad,
- durch Gasnitrieren,
- durch Ionitrieren.

Die folgende Tabelle fasst einige der Vorteile und Nachteile der verschiedenen Nitrierungstechniken zusammen.

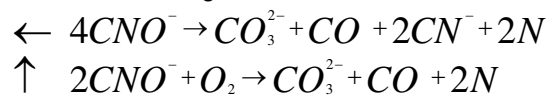


Nitrierung	Vorteile	Nachteile
Salzbäder	<ul style="list-style-type: none"> <li>- wirtschaftlich</li> <li>- alle Größen und Formen von Teilen</li> <li>- Kombinationsschicht: Porig, dann kompakt und hart → die Poren können als Schmiermittelaufnahmen dienen → Verbesserung des Reibungskoeffizienten.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aufbereitung und Eliminierung der Salze</li> <li>- immer weniger verwendetes Verfahren</li> <li>- Oberfläche: gesteigerte Rautiefe</li> <li>- eventuelles Nacharbeiten durch Schleifen, um die empfindliche Kombinationsschicht zu entfernen</li> </ul>
Gasnitrieren	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tiefenbehandlung (harte und kompakte Kombinationsschicht)</li> <li>- Leichtigkeit des Umsetzens</li> <li>- kostengünstige Behandlung</li> <li>- Behandlung großer Teile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mangel an Anpassungsfähigkeit des Verfahrens</li> <li>- toxische Gase</li> <li>- eventuelles Nacharbeiten durch Schleifen zum Eliminieren der empfindlichen Kombinationsschicht</li> </ul>
Ionitrieren	<ul style="list-style-type: none"> <li>- anpassungsfähiges Verfahren</li> <li>- Möglichkeit der Behandlung bei niedriger Temperatur (ausgehend von 450 °C)</li> <li>- kein Nacharbeiten durch Schleifen</li> <li>- schnelles, nicht verschmutzendes und sehr sauberes Verfahren</li> <li>- Zähigkeit der nitrierten Schichten</li> <li>- unveränderte Oberflächenmorphologie</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- kostspielige Behandlung</li> <li>- Behandlung nach Teilefamilien mit ähnlicher Geometrie</li> <li>- Schwierigkeit der Behandlung kleiner Bohrungen</li> </ul>

Einige Aspekte der verschiedenen Nitrierungsmethoden

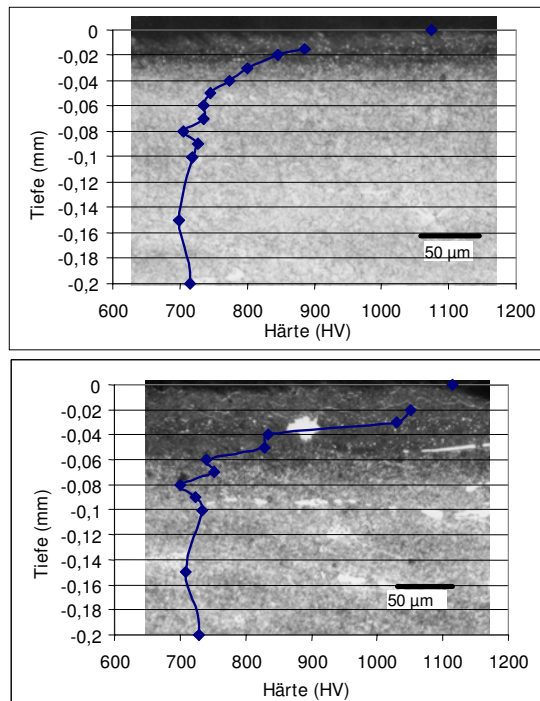
### ■ Nitrieren im Salzbad

Bei diesem Verfahren werden die Stickstoffatome durch Dekomposition und Oxidation der in den Bädern, in die die Teile getaucht werden, vorhandenen Cyanate, gemäß den Gleichungen  $\leftarrow$  und  $\uparrow$  erzielt:



Die gebildeten Zyanide (CN<sup>-</sup>) werden von Sulfiden bei den Verfahren Sursulf und Sulfinuz sowie durch die harnstoffähnlichen Regenerierungssalze bei den Tenifer-Verfahren eliminiert.

Dank des starken Nitrierungspotenzials der Salzbäder erlaubt es dieses Verfahren, Nitrierungsschichten mit einer relativ kurzen Behandlungszeit zu erzielen: typisch 30 Minuten bis 2 Stunden Tenifer in unseren Versuchen am TENASTEEL®. *Abbildung 5* zeigt die unter diesen Bedingungen erzielten Ergebnisse.



*Figure 5*  
Morphologie und Merkmale von nitrierten Schichten des TENASTEEL<sup>®</sup> erzielt durch Tenifer-Behandlung (30 Minuten und 2 Stunden)

Nach 30 Behandlungsminuten bei 570 °C weist die Kombinationsschicht von 15 bis 20 µm eine Härte von 1050 HV auf. Die Diffusionsschicht kann auf 20 µm geschätzt werden. Wird die Behandlung bis zu 2 Stunden fortgesetzt, können die Kombinations- und Diffusionsschichten 30 und 30 bis 35 µm erreichen. Die oberflächliche Härte steigt dabei bis zu 1115 HV.

Diese Stärken können ausgehend von Mikrographien und Härteentwicklungen, die in *Abbildung 5* dargestellt sind, geschätzt werden.

Schließlich zeigt *Abbildung 6* weiter unten die Entwicklung der Härte der Matrix des TENASTEEL<sup>®</sup> unter der nitrierten Schicht. Nach 30 Minuten Tenifer-Behandlung wird ein Durchschnitt von 675 HV, der 59 HRC entspricht, bis ins Herz des Teils bewahrt.

Hingegen beobachtet man einen leichten Härteverlust nach 2 Stunden Behandlung im Salzbad zu 570 °C, denn der mittlere Messwert in dem Teil beträgt 645 HV. Diese Härte ist immer noch ganz und gar akzeptabel, denn sie liegt bei 58 HRC in einem Gebrauchsbereich dieses Typs von Stahl. Zu bemerken ist, dass die Härte des 1.2379/X155CrVMo12-1 bei gleichen Behandlungsbedingungen auf etwa 52 HRC gefallen wäre.

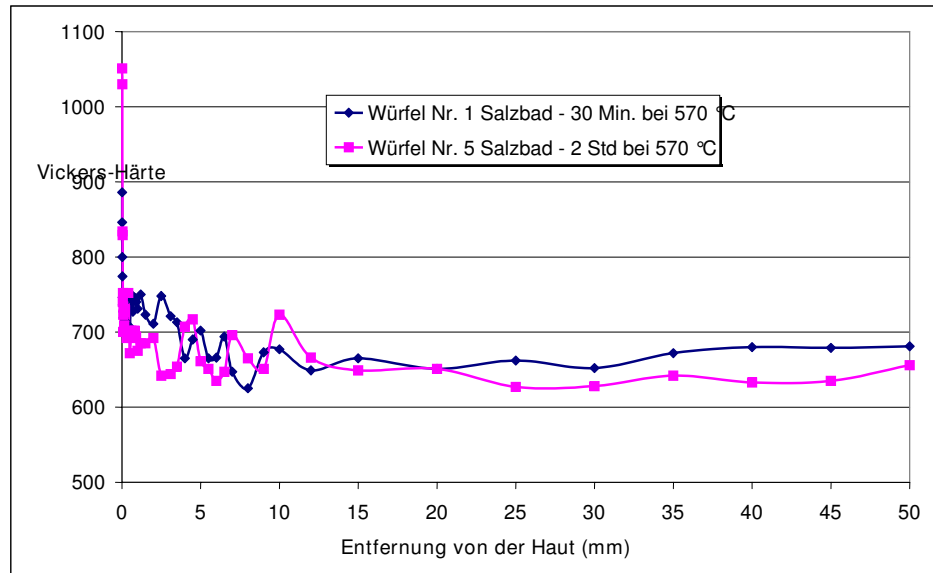
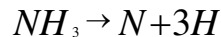


Abbildung 6 – Härte der Matrix von TENASTEEL® unter 0,5 kgf, nach Tenifer-Nitrieren bei 570 °C

### ■ Gasnitrierung

Bei der Gasnitrierung werden die Stickstoffatome von der Dekomposition des gasförmigen Ammoniaks bei Berühren einer eisenhaltigen Fläche geliefert.



Die Behandlung wird bei einer Temperatur zwischen 500 und 570 °C in einem dichten zwangsbelüfteten Ofen durchgeführt, in den ein aktives Gasgemisch eingespritzt wird (NH<sub>3</sub> + CH<sub>4</sub> oder NH<sub>3</sub> + N<sub>2</sub> oder auch NH<sub>3</sub> + NO<sub>2</sub> (Aktivierungsoxidans) + N<sub>2</sub> gemäß dem ausgewählten Verfahren: Nitemper, Trinding, Nitroc oder Alnat N).

Die Art und die Zusammenhang der Nitrierungsschicht hängen je nach Stahlsorte von der Behandlungszeit, der Temperatur, der Oberfläche des Teils sowie von der Atmosphäre und dem Gasdurchsatz, der in dem Ofen eingeführt wird, ab.

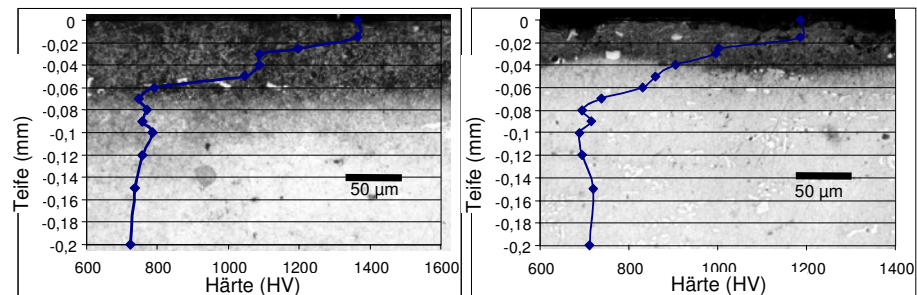
Eine vergleichende Studie der Nitrierung des TENASTEEL® und des 1.2379/X155CrVMo12-1 wurde an auf 60 HRC behandelten Werkstoffen durchgeführt. Drei Proben jeder Sorte wurden bei 525 °C in dem gleichen Ofen durch TBI nitriert. Die erzielten Ergebnisse nach 4, 8 und 16 Behandlungsstunden sind in *Abbildung 7* zusammengefasst.

Die nitrierten Schichten an der Oberfläche des TENASTEEL® erscheinen homogen in der Stärke und Morphologie. Hingegen enthalten die, die den 1.2379/X155CrVMo12-1 bedecken, zahlreiche Karbide und weisen eine sehr ungleichförmige Stärke auf, wie es die Mikrographien des rechten Teils der *Abbildung 7* zeigen. Wenn es daher auch relativ leicht ist, die Stärken der nitrierten Schichten am TENASTEEL® zu bestimmen, gilt das nicht für den 1.2379/X155CrVMo12-1, bei dem die unten gegebenen Messwerte in den stärksten Zonen bestimmt wurden (die nicht unbedingt den dargestellten Mikrographien entsprechen).

Für den TENASTEEL® sind die Messungen der Stärke der erzielten nitrierten Schichten an den Mikrographien oder durch Filiation der Mikrohärtigkeit kohärent und führen zu Werten in der Nähe von 60, 80 und 120 µm für jeweilige Behandlungszeiten von 4, 8 und 16 Stunden.

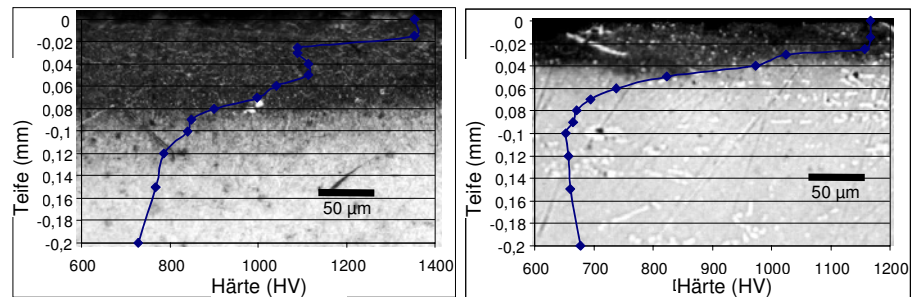
Hingegen können für den 1.2379/X155CrVMo12-1 die maximalen Stärken nur 60, 70 und 80 µm für die gleichen Behandlungszeiten erzielen. Die Mikrographien der *Abbildung 7* zeigen, dass diese nitrierte Schicht in bestimmten Zonen und bis zu 20 µm nach 4 Stunden Behandlung oder 40 µm nach 8 Stunden Behandlung sinkt (jeweils 60 und 80 µm für TENASTEEL®).

Ferner weisen wir darauf hin, dass die Gegenwart zahlreicher großer Karbide in der nitrierten Schicht und auf ihrer Schnittstelle mit dem Substrat ihr Haften verringert, was zum Abschuppen dieser Schicht im Fall des 1.2379/X155CrVMo12-1 führt.



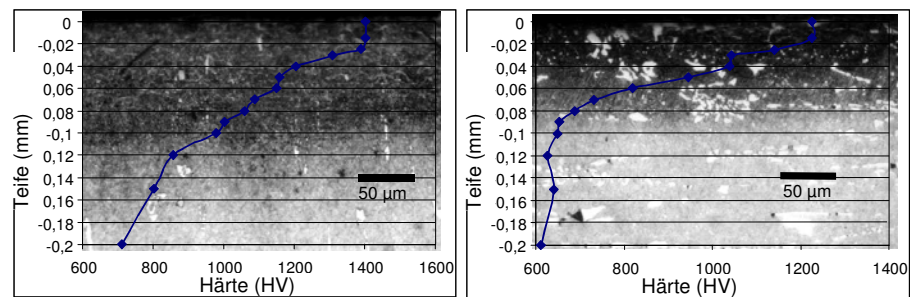
TENASTEEL® – 4 h 00

1.2379/X155CrVMo12-1 – 4 h 00



TENASTEEL® – 8 h 00

1.2379/X155CrVMo12-1 – 8 h 00



TENASTEEL® – 16 h 00

1.2379/X155CrVMo12-1 – 16 h 00

*Abbildung 7* - Morphologie und Merkmale nitrierter Schichten, die durch Gasnitrieren erzielt werden – Vergleich TENASTEEL® – 1.2379/X155CrVMo12-1

Der zweite wichtige Punkt, der hervorzuheben ist, ist die Entwicklung der Härte der Matrix im Laufe der Wärmebehandlung.

Abbildung 8 zeigt die in den Matrizen des TENASTEEL® und 1.2379/X155CrVMo12-1 nach 4, 8 und 16 Stunden Gasnitrieren bei 525 °C erzielten Härten. Die zwei Stähle waren vor dem Nitrieren auf 60 HRC behandelt worden.

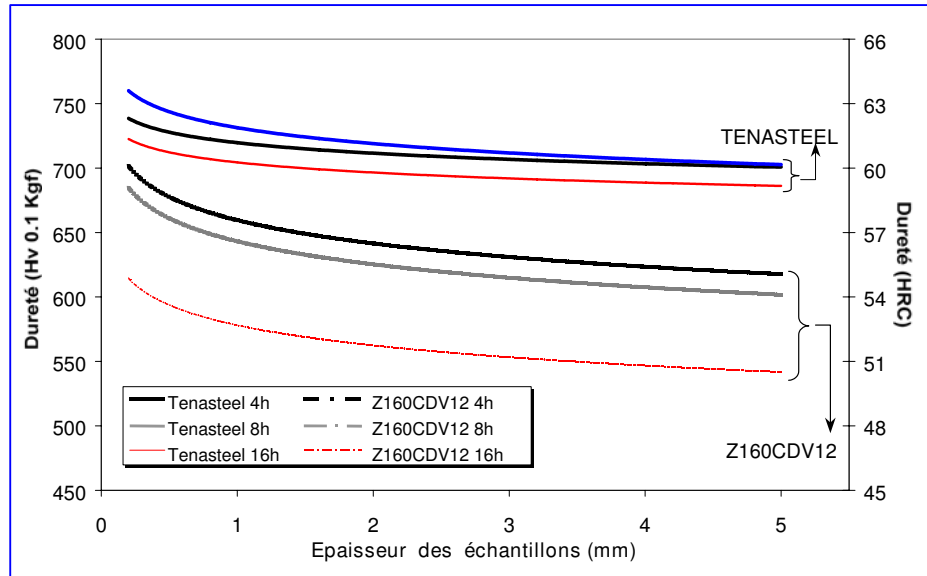


Abbildung 8 – Vergleich der Härten der Matrix von TENASTEEL® und 1.2379/X155CrVMo12-1 nach Gasnitrieren bei 525 °C

TENASTEEL® behält seine Härte nach dem Gasnitrieren, wobei eine Behandlung von 16 Stunden nur zu einer Verringerung von 1 HRC mit Übergang von 60 auf 59 HRC führt. Hingegen ergibt sich ein Einbruch der Härte des 1.2379/X155CrVMo12-1, denn sie geht von 60 HRC vor der Behandlung auf 55, 56 und sogar 51 HRC nach jeweils 4, 8 und 16 Stunden Gasnitrierung zurück. Dieses Erweichen der Matrix ist angesichts der *Abbildung 8* nicht überraschend, welche die Entwicklung der Härte dieses Stahls im Laufe der Wärmebehandlungen beschreibt.

### ■ Ionitrierung

Dieses in der Gruppe Usinor von den Aciéries de Pompey, deren Werkstatt in eine Gesellschaft mit der Bezeichnung NITRUVID umgewandelt wurde, entwickelte Verfahren weist zwei wesentliche Vorteile im Vergleich zu den anderen Nitrierungstechniken auf:

- Wiederherstellen der Geometrie und des Oberflächenzustands
- Erlaubt es, das übermäßige Brüchigwerden der nitrierten Schichten zu vermeiden, wie das oft bei den anderen Verfahren der Fall ist.

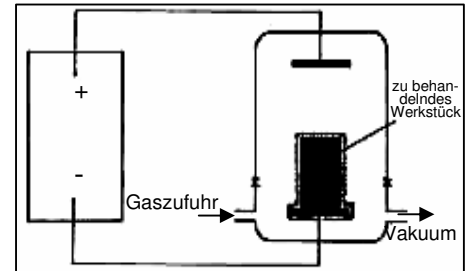


Abbildung 9 – Wirkbild der Ionitrierung

Das Konzept der Behandlung ist in *Abbildung 9* dargestellt. Ein Druck von 1 bis 5 Torr des Gases ( $N_2 + H_2 +$  eventuell  $CH_4$  oder  $H_2S...$ ) wird in dem Einschluss erstellt. Ein Potenzialunterschied von 300 bis 1000 V wird zwischen den zwei Elektroden angelegt, was das Ausbilden eines leuchtenden Plasmas bewirkt, das aktive Ionen  $N^+$  enthält. Unter der Einwirkung des starken Potenzialgefälles werden die positiven Ionen auf der Oberfläche der Teile, die an der Katode angeordnet sind, beschossen, was eine dreifache Aktion ergibt:

- Erhitzen der Teile durch Verteilen der kinetischen Energie der Ionen in Wärmeenergie,
- Beizen der Oberfläche der Teile durch Kathodensprühen → sehr große Oberflächenreaktivität,
- Implantieren der für das Bilden metallischer Nitride erforderlichen Stickstoffionen.

Die Zusammenhang und die Stärke der nitrierten Schichten hängen von der Behandlungstemperatur, der Zusammensetzung des gasförmigen Gemischs und von ihrem Druck ab. Die Beherrschung dieser Parameter erlaubt es, die Stärke der Kombinationsschicht perfekt zu steuern, die minimiert werden kann, um das Abschuppen zu verhindern oder sogar zu eliminieren.

Zu bemerken ist schließlich, dass diese schnelle Behandlung das Erzielen nitrierter Schichten erlaubt, die eine viel größere Zähigkeit aufweisen als die, die man bei den anderen Verfahren mit Gas oder Salzbad erzielt.

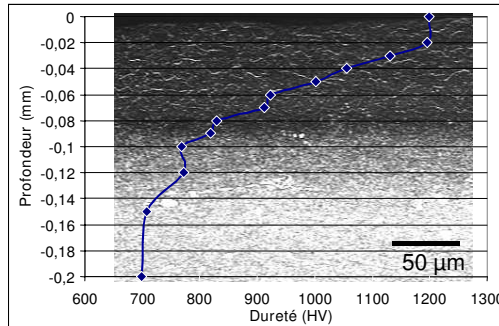
Versuche am TENASTEEL® wurden bei METATHERM durchgeführt. Zwei Proben jeder Sorte wurden unter gleichen Bedingungen bei 525 °C nitriert. Die nach 6 und 24 Behandlungsstunden erzielten Ergebnisse sind in *Abbildung 10* zusammengefasst.

Die auf der Oberfläche des TENASTEEL® nitrierten Schichten erscheinen in der Stärke und Morphologie homogen. Hingegen enthalten wie bereits zuvor die, welche den 1.2379/X155CrVMo12-1 bedecken, zahlreiche Karbide und weisen eine sehr ungleichförmige Stärke auf.

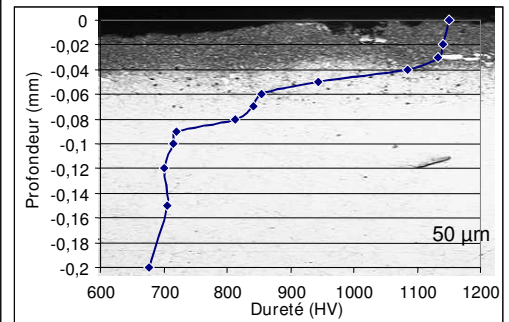
Für den TENASTEEL® sind die Messwerte der Stärke der erzielten nitrierten Schichten an den Mikrographien oder durch Filiation der Mikrohärte kohärent und führen zu Werten in der Nähe von 100 und 140  $\mu m$  für jeweils Behandlungszeiten von 6 und 24 Stunden.

Für den 1.2379/X155CrVMo12-1 überschreiten die Stärken für die gleichen Behandlungszeiten 50 und 100 µm nicht.

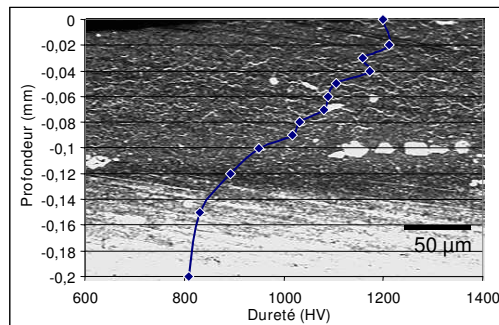
Der Gebrauch des TENASTEEL® erlaubt es daher, die Nitrierungszeiten zu verringern und eine Schicht mit konstanter Stärke auf der ganzen Oberfläche des Teils zu erzielen. Ferner weisen wir darauf hin, dass die Gegenwart zahlreicher großer Karbide in der nitrierten Schicht und an ihrer Schnittstelle mit dem Substrat ihrer Haftung beschränkt und daher zum Abschuppen dieser Schicht im Fall des 1.2379/X155CrVMo12-1 führt.



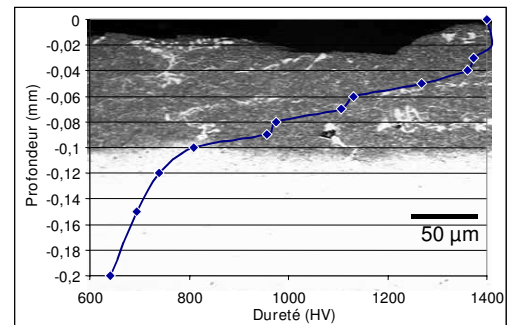
TENASTEEL® – 6 h 00



1.2379/X155CrVMo12-1 – 6 H 00



TENASTEEL® – 24 h 00



1.2379/X155CrVMo12-1 – 24 H 00

Abbildung 10 - Morphologie und Merkmale der durch Ionitrieren erzielten nitrierten Schichten – Vergleich TENASTEEL® – 1.2379/X155CrVMo12-1

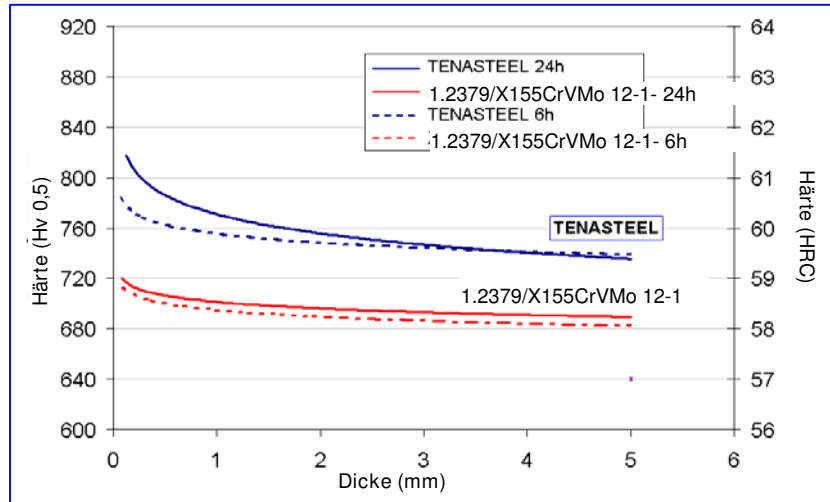


Abbildung 11 – Vergleich der Härten der Matrix des TENASTEEL® und des 1.2379/X155CrVMo12-1 nach Ionitrieren bei 525 °C

Da die Teile bei dieser Behandlung nur auf 500 °C erhitzt werden, behalten TENASTEEL® und auch 1.2379/X155CrVMo12-1 eine unveränderte Matrixhärte (etwa 60 und 59 HRC), wie aus *Abbildung 11* zu entnehmen ist.

### ZUSAMMEN-FASSUNG

Die Nitrierungseignung des TENASTEEL® ist deutlich größer als die des 1.2379/X155CrVMo12-1, denn sie erlaubt:

- das Erzielen in der Stärke und Morphologie homogener Schichten,
- das Verringern der Behandlungszeit,
- das Vermeiden von Abschuppen der nitrierten Schicht,
- das Aufrechterhalten der Härte der Matrix.



### OBERFLÄCHEN- BESCHICHTUNGEN DURCH METALLABLAGERUNGEN IN DAMPFFHASE

Schneid-, Formwerkzeuge sowie Formen und Kunststoff- und Aluminiumspritzgüsselemente sind häufig mit Titanitrid beschichtet, das den Reibungskoeffizienten signifikant verringert und die Scheuer- und Haftungsabnutzungsfestigkeit weitgehend verbessert.

Diese durch Kondensation metallischer Dämpfe an der Oberfläche des Substrats erzielten Beschichtungen erlauben es, eine metallische Ablagerung zu bilden, die an den behandelten Teilen haftet. Für diese Art von Beschichtung ist die Vorbereitung der Oberfläche des Substrats ein wesentlicher Schritt. Sie erlaubt es, eventuelle Haftungsprobleme durch ein Reinigen und Aktivieren der Oberfläche zu lösen.

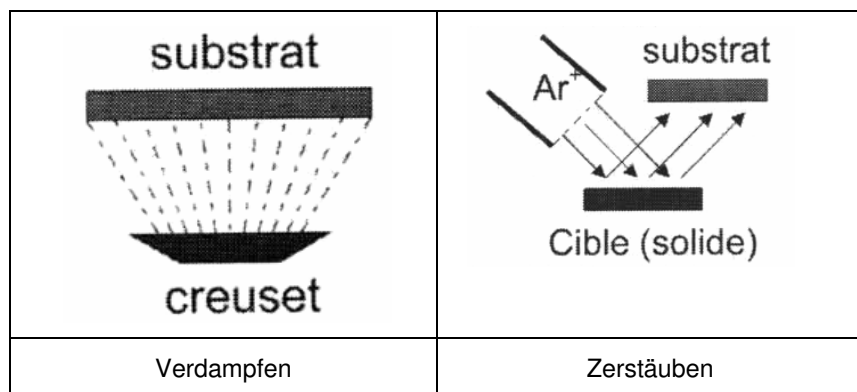
#### ■ Das PVD-Verfahren (Physical Vapour Deposition)

PVD-Beschichtungen werden durch Sublimation unter geringem Druck eines Feststoffmetalls (Ti, Cr zum Beispiel) in einer gashaltigen Umgebung (N zum Beispiel) erzielt. Die gebildete Verbindung (TiN, CrN, ...) legt sich in Form einer dünnen haftenden Schicht auf die zu beschichtenden Teile, die ihnen neue physikalische und chemische Eigenschaften verleiht.

Bei diesem Verfahren lagern sich die Metallatome, die von einem Ziel oder einer Ladung kommen, auf der Oberfläche der Substrat ab. Diese Atome können entweder durch Verdampfen oder durch Sprühen produziert werden, siehe *Abbildung 12*. Ungeachtet des angewandten Verfahrens erfolgt die Behandlung jedoch bei einer Temperatur unter 500 °C, die keine Wärmebehandlung der Teile nach dem Beschichten erforderlich macht.

Die Verdampfungstechnik umfasst drei Schritte:

- Verdampfen des Werkstoffs durch Erhitzen einer Charge, die in einem Schmelztiegel enthalten ist
- Transfer der verdampften Partikel der Charge zu dem Substrat
- Kondensieren eben dieser Partikel auf der Oberfläche des Substrats



*Abbildung 12* – Wirkbild der Techniken zum Herstellen von Metallatomen zur PVD-Beschichtung

Das Zerstäuben ist eine physikalische Technik zum Ablagern unter Vakuum, die Ionen verwendet, die Atome eines Ziels zerstäuben, damit sie sich auf einer Substrat ablagerung, die diesem Ziel gegenüberliegt (*Abbildung 12*).

Aus der Sicht der Leistungen erlauben es beide Techniken, alle Typen von Metallablagerungen durchzuführen und sie unterscheiden sich durch die Geschwindigkeit der Ablagerung ( $> 1 \mu\text{m/s}$  beim Verdampfen und  $< 0,1 \mu\text{m/s}$  beim Zerstäuben), durch die Beschaffenheit des Ziels (das ein beim Verdampfen ein Feststoff oder flüssig sein kann und beim Zerstäuben obligatorisch ein Feststoff ist), in erster Linie jedoch durch das Deckvermögen und die Kompaktheit der Ablagerung, die beim Zerstäuben deutlich größer sind.

Aus der Sicht der Industrie sind die geläufig verwendeten Verfahren zum Ablagern von TiN oder TiCN auf Werkzeugen der elektrische Lichtbogen (ein elektrischer Lichtbogen wirkt auf das Ziel ein, indem er dessen Atome zerstäubt) und das Magnetronsprühen (das Ziel ist mit einer Magnetpiste versehen, um die Leistung des Sprühens zu steigern). Um zum Beispiel TiN abzulagern, braucht man nur ein Titanziel und spritzt Stickstoff während des Zerstäubens ein. Beim dynamischen Modus werden die Werkzeuge auf Substratträger gegeben, die drehen, um eine gute Homogenität der Ablagerung sicherzustellen.

PVD-Ablagerungsversuche an TENASTEEL<sup>®</sup> wurden bei Balzers durchgeführt. Die Titanitridstärke beträgt 3 bis 4  $\mu\text{m}$  und die oberflächliche Härte ist größer als 1500 HV.

### ■ CVD-Verfahren (Chemical Vapour Deposition)

Das CVD-Verfahren erlaubt es, durch chemische Reaktionen zwischen Sorten in Dampfphase auf der Oberfläche des Substrats feste Ablagerungen auf verschiedenen Metallsubstraten herzustellen. Das CVD-Beschichten erzielt man durch chemische Reaktion eines aktiven gasförmigen Gemischs, das thermisch bei Temperaturen zwischen 800 und 1000 °C und Drücken von 10 bis 100 mbar gespalten wird.

Der feste Werkstoff wird ausgehend von mehreren gasförmigen Vorgängern abgelagert, die auf dem Substrat reagieren. Letzteres wird im Allgemeinen erhitzt, um Aktivierungsenergie zu liefern, die für das Auslösen der chemischen Reaktion erforderlich ist (die eine einfache Zersetzungsreaktion oder eine Kombinationsreaktion sein kann), und um eine ausreichende Mobilität der Atome zu erlauben, so dass sie die gewünschte Struktur bilden können). Die Dämpfe der Vorläufer werden im Allgemeinen von einem Vektorgas getragen (das selbst reaktiv sein kann). Für TiN-, TiC- und TiCN-Ablagerungen ist das reaktive Gas zum Beispiel  $\text{TiCl}_4$  in kontrolliertem Gemisch mit  $\text{N}_2$  und/oder  $\text{CH}_4$ .

Die für die chemische Reaktion erforderliche Energie kann durch ausgefeiltere Techniken geliefert werden, wie zum Beispiel:

- *Plasma* in dem Fall des PACVD. Die Energie wird den reaktiven Gasen entweder zugeführt, indem sie durch eine elektrische Entladung erregt werden, oder indem das Vektorgas (Ar) erregt wird, dessen beschleunigte Ionen ihre Energie auf die reaktiven Sorten (Plasma) übertragen. Die Substrat muss dennoch erhitzt werden, wenn auch weniger stark als beim herkömmlichen Verfahren, um eine ausreichende Mobilität und Reaktivität der Atome sicherzustellen.
- *Der Laser* für das LACVD. Die Energie der Laserstrahlung wird entweder zum Aktivieren (oder Brechen) der gasförmigen Sorten (Photolyse) verwendet oder zum Erhitzen des Substrats, um die Oberflächenreaktion zu fördern. Ferner erhitzt die Laserstrahlung des Substrats nur die Oberfläche, wodurch eventuelle Schäden der Masse vermieden werden.

Eine große Entfernung der Substratfläche, die Konzentration gasförmiger Vorläufer variiert nicht in Abhängigkeit von der Entfernung zur Oberfläche. In der Nähe der Oberfläche verringert sich diese Konzentration jedoch aufgrund des Reagenzmittelverbrauchs. Die Konzentration des Zerfallsprodukts (Gasrest der chemischen Reaktion) erfährt eine umgekehrte Variation. Die Gasschicht, in der die Konzentrationen variieren, heißt hier Grenzschicht.

Abbildung 13 zeigt, dass die Kinetik des Verfahrens von mehreren Schritten abhängt:

- (1) Konvektion des gasförmigen Reagens (dynamischer Fluss)
- (2) Diffusion des Reagens zu dem Substrat
- (3) Adsorption des Reagens auf dem Substrat
- (4) chemische Reaktion der adsorbierten Art
- (5) Desorption der gasförmigen Produkte der Reaktion
- (6) Diffusion dieser Produkte durch die Grenzschicht
- (7) Ableiten der Gase des Systems

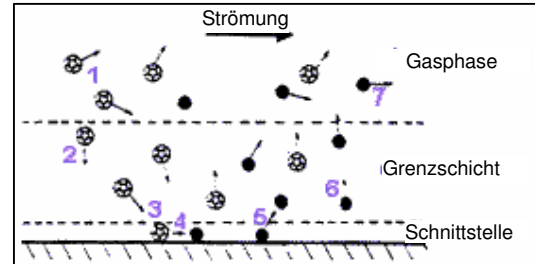


Abbildung 13 – Verschiedene Schritte des CVD-Verfahrens

Zusätzlich zu der sehr guten Haftung der Beschichtung (weit höher als die, die durch PVD-Ablagerungen erzielt wird, aufgrund der intimen Diffusion zwischen dem Substrat und der Ablagerung dank der hohen Temperatur der Behandlungsausführung), weisen wir auf die folgenden der verschiedenen Vorteile dieser Technik hin:

- große Ablagerungsgeschwindigkeit: kann 1000 bis 10 000 Angström pro Minute erreichen;
- Steuerung der Stöchiometrie, der Morphologie, der Kristallstruktur und der Ausrichtung des Wachstums, die durch Steuern der Ablagerungsparameter angepasst werden können,
- gleichförmiges Beschichten komplexer und hohler Formen,
- Möglichkeit des Erzielens hoch reiner Ablagerungen dank einer weitgehenden Reinigung der Vorgänger.

Der Hauptnachteil dieser Technik ist natürlich die Arbeitstemperatur zwischen 800 und 1000 °C, die das Durchführen einer Vakuumhärtungsbehandlung und eines Anlassens der Teile nach dem CVD-Beschichten bedingt. Die Kenntnis der maßlichen Stabilität des Substrats im Laufe der Wärmebehandlungen ist daher unerlässlich, um die Endmaße der Teile zu erzielen. Die an TENASTEEL® Platten zu 100 x 100 x 25 mm durchgeführten Messungen sind in *Abbildung 14* eingetragen.

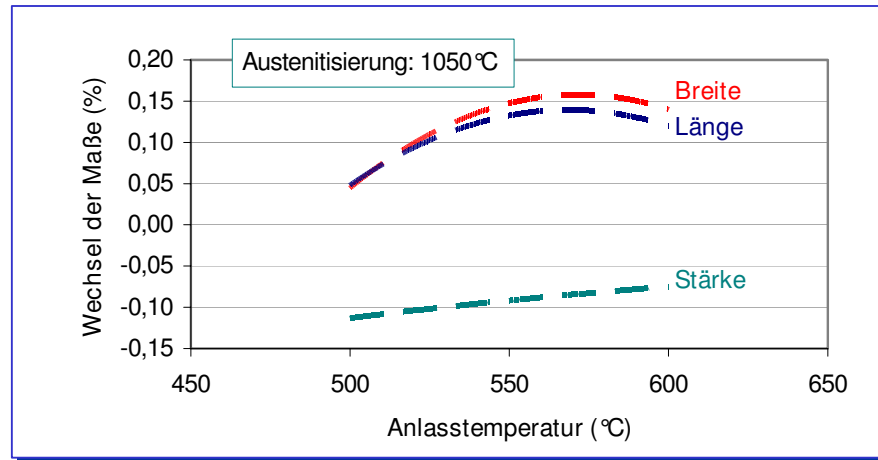


Abbildung 14

Maßliche Änderungen im Laufe des Härtens und doppelten Anlassens des TENASTEEL®

CVD-Ablagerungsversuche auf TENASTEEL® worden von VST in Deutschland durchgeführt. Die Mischbeschichtung TiCTiN wurde mit Stärken von jeweils 3 bis 5 µm aufgebracht. Die erste Schicht aus TiC erlaubt ein ausgezeichnetes Haften der Beschichtung durch Migration des Kohlenstoffs in das Substrat, danach wird eine Zwischenschicht bestehend aus TiCN gebildet, bevor die sehr harte TiN-Schicht aufgebracht wird. Die Gesamtstärke der Beschichtung betrug 10 bis 12 µm und ihre Oberflächenhärte lag in der Nähe von 2400 HV.

Für diese Art von Beschichtung liegt der große Vorteil des TENASTEEL® im Vergleich zum 1.2379/X155CrVMo12-1 in der Feinheit und Verteilung der Karbide. Die Gegenwart grober Chromkarbide an der Schnittstelle zwischen dem Substrat und der Beschichtung verringert nämlich das Haften der Beschichtung.

### ZUSAMMENFASSUNG

Das Haften der Beschichtung wird auf dem Stahl TENASTEEL® dank der Verringerung der Größe der Karbide deutlich verbessert.

### VORBEREITUNG DER FLÄCHEN

Was die chemische Analyse betrifft, bietet der Stahl TENASTEEL® im Vergleich zum herkömmlichen 1.2379/X155CrVMo12-1 eine deutliche Verbesserung der Schweißbarkeit an. Die starke Verringerung des Kohlenstoffs dieser neuen Sorte bietet viel größere Schweißreparaturmöglichkeiten.

Um dieses Merkmal zu beurteilen, hat unser Labor das Füllen von Einschnitten oder Auftragsschweißen simuliert.

A priori stellt dieser Vorgang den größten Teil der in Betracht gezogenen Eingriffe dar, und als Referenz wurde dazu das TIG-Schweißen verwendet.

Die folgenden Hauptparameter gehen aus diesen Experimenten hervor:

- die Vorbereitung der zu schweißenden Flächen,
- die Auswahl der Zusatzstoffe,
- die Auswahl der Schweißparameter,
- die Heizbedingungen der Teile.

### AUSWAHL DER ZUSATZPRODUKTE

■ Die zu schweißende Fläche muss natürlich sauber, ganz und rissfrei sein. Eine Vorab-Farbeindringprüfung ist wünschenswert.

■ Wenn das Verhältnis P/I zwischen Einschnitttiefe und Breite größer ist als 1, ist es sehr wahrscheinlich, dass eine Rissbildungserscheinung im warmen Zustand in der Nahtmitte beginnt.

Um das zu vermeiden, sollte die Zone der Auftragsschweißung durch Schleifen verbreitert oder der Einschnittgrund gut mit leicht legiertem ferritischem Zusatzstoff gefüllt werden.

Die Auswahl muss die erwarteten Eigenschaften der geschweißten Zone berücksichtigen:

▪ *Fall einer homogenen Reparatur (Erfordernis, äquivalente Härten zu garantieren):*

Referenz	Hersteller	Erzielte Härte
UTP A696	BTW	60-64 HRC
UTP A 73 G2	BTW	53-58 HRC
DURANIT M10	BTW	60 HRC

- Fall einer heterogenen Reparatur  
(die das Vermindern der Gefahren erlaubt)

Auftragsschweißen mit INOX-Draht: beschränkte Vorwärmen

Referenz	Hersteller	Erzielte Härte
ER 307	Nach Wahl	nicht signifikant
ER 312	Nach Wahl	

Wie im Abschnitt „Vorbereitung der Flächen“ erwähnt, besteht eine Lösung darin, mit einem Flusstahl zu füllen und die letzten Schichten mit einem harten Auftragsschweißstahl zu beenden.

Die für eine homogene Reparatur angegebenen Werkstoffe gelten hier, man kann aber auch die folgenden Werkstoffe verwenden:

Referenz	Hersteller	Erzielte Härte
UTP A DUR 600	BTW	55-60 HRC
ROBODUR K 600	Autogenes Schweißen	60 HRC
R 600 B	FP-Schweißen	60 HRC

## AUSWAHL DER SCHWEISS-PARAMETER

Das TIG-Verfahren ist für eine Reparatur am TENASTEEL® am besten, denn es weist einen schwachen Wasserstoffeintrag auf.

Eine Schweißenergie in der Nähe von 1,5 kJ/mm bietet ferner einen guten Kompromiss für die Abkühlbedingungen des Schmelzbads und der ZAT.

Zu hohe Energie könnte zu große Restspannungen ergeben.

Die Bogenlänge muss kurz gehalten werden, wodurch man ein Verschmutzen des Schmelzbads vermeidet und einen effizienten Gasschutz sowie konstante Parameter während des ganzen Vorgangs garantiert.

Reines Argon ist für diese Anwendung ideal.

### Heizbedingungen der Teile:

Das Vorheizen und Nachheizen der Teile sind unerlässlich, um einer eventuellen Kaltrissbildung vorzubeugen.

Unsere Tests haben die folgenden Bedingungen ergeben:

Vorheizen: min. 250 °C

Nachheizen: min. 250 °C

Natürlich müssen diese Bedingungen im Fall des Gebrauchs spezieller Zusatzstoffe (Chromguss, Stellite usw.) korrigiert werden.

Zum Durchführen thermischer Vorgänge empfehlen wir den Gebrauch eines Keramikwiderstands. Der Gebrauch eines Gasbrenners muss besonders strikt sein, denn die Temperaturhomogenität muss perfekt sein.