

Texturanalyse zur Ermittlung von Werkstoffeigenschaften aus Gefügebildern

Diplomarbeit

durchgeführt von

Alexander Fuchs

FH Aalen

Studiengang Oberflächentechnik / Werkstoffkunde



Fachhochschule Aalen
HOCHSCHULE FÜR TECHNIK UND WIRTSCHAFT

Studiengang Oberflächentechnik / Werkstoffkunde

Betreuer: Prof. Dr. rer. nat. Gerhard Schneider,
Studiengang Werkstoffkunde/Oberflächentechnik

Prof. Dr. rer. nat. Ulrich Klauck,
Fachbereich Elektronik/Technische Informatik

Abgabetermin: 03.11.2000

Diese Arbeit wurde an der FH Aalen im Studiengang Oberflächentechnik und Werkstoffkunde innerhalb des Bereiches Metallographie vom April bis Oktober 2000 durchgeführt.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Gerhard Schneider für die Ermöglichung und Durchführung dieser Arbeit. Seine stetige Unterstützung und Diskussionsbereitschaft, sowie seine Vorschläge zu Problemlösungen, trugen sehr zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Herrn Prof. Dr. Ulrich Klauck vom Fachbereich Elektronik/Technische Informatik danke ich für die Unterstützung in Fragen der Informatik.

Bei Herrn Dipl.-Ing. Timo Bernthaler möchte ich mich für die hervorragende Unterstützung und speziell für die Hilfe bei der Quantitativen Gefügeanalyse bedanken.

Frau Brigitte Stahl von der FH Aalen danke ich für die hervorragende metallographische Präparation der Proben.

Für die Bereitstellung des Elektropoliergerätes Lectropol-5 danke ich Herrn Gerolymos von der Firma Struers.

Ich danke der Firma Carl Zeiss für die Leihgabe des Mikrohärteprüfers MHT-4.

Herrn Prof. Dr. Vito Smolej von der Fa. Carl Zeiss Vision GmbH danke ich für die Unterstützung in softwaretechnischen Problemen.

Den Herren Dipl.-Ing. Arndt Lüdtke, Dipl.-Ing. Jörg Müller und Dipl.-Ing. Florian Groß gilt mein Dank in Fragen wissenschaftlicher und sozialer Kompetenz.

Bei allen Mitarbeitern des Studiengangs Oberflächentechnik und Werkstoffkunde möchte ich mich für die Zusammenarbeit bedanken.

1 Einleitung	1-1
2 Grundlagen	2-3
2.1 Heutiger Stand in der Quantitativen Gefügeanalyse	2-3
2.2 Texturanalyse.....	2-5
2.2.1 Bildung der Coocurrence-Matrix	2-6
2.2.2 Haralick-Parameter	2-11
2.3 Neuronale Netzwerke.....	2-14
2.3.1 Analogie zur Neurophysiologie und Umsetzung in der Neuronalen Informationsverarbeitung	2-16
2.3.2 Kombination einzelner Zellen zu Neuronalen Netzwerken	2-17
2.3.3 Vorteile Neuronaler Netzwerke	2-19
2.3.4 Ablauf der Erstellung eines Neuronalen Netzwerks.....	2-20
2.4 Verwendete Werkstoffe	2-21
3 Experimentelle Durchführung	3-26
3.1 Probenerstellung	3-26
3.1.1 Verwendete Werkstoffe	3-26
3.1.2 Wärmebehandlung	3-27
3.1.2.1 Proben mit definierter Wärmebehandlung.....	3-27
3.1.2.2 Stirnabschreckversuch nach DIN 50191	3-27
3.2 Metallographische Präparation.....	3-28
3.2.1 Mechanische Präparation	3-28
3.2.1.1 Elektrolytische Präparation	3-30
3.2.2 Ätzen	3-32
3.2.2.1 Elektrolytisches Ätzen	3-32
3.2.2.2 Chemisches Ätzen	3-32
3.3 Metallographische Untersuchungen	3-33
3.3.1 Untersuchungen der Proben aus dem Werkstoff C45	3-33
3.3.2 Untersuchung der Proben aus dem Werkstoff 100Cr6	3-35
3.4 Bestimmung der Mikrohärtigkeit	3-37
3.5 Simulator des Neuronalen Netzwerks	3-39
3.5.1 Struktur der im SNNS verwendeten Datensätze.....	3-42
4 Ergebnisse	4-44
4.1 Proben aus dem Werkstoff C45	4-44
4.1.1 Einfluß der Präparation auf die Messung der Texturparameter	4-44
4.1.2 Vergleich der Haralick-Parameter bei Proben mit unterschiedlicher Wärmebehandlung	4-47
4.1.3 Verteilung der Haralick-Parameter über die Oberfläche	4-48
4.1.4 Zusammenhang zwischen den Texturparametern und der Mikrohärtigkeit.....	4-52

4.2	Proben aus dem Werkstoff 100Cr6	4-55
4.2.1	Bestimmung der optimalen Mikroskopeinstellungen	4-55
4.2.2	Einfluß der Abkühlgeschwindigkeit auf die Haralick-Parameter	4-60
4.2.3	Verteilung der Texturparameter über die Oberfläche	4-61
4.2.4	Korrelation der Haralick-Parameter mit der Mikrohärtigkeit	4-63
4.2.5	Einfluß der Präparation auf die Messung der Texturparameter	4-68
5	Diskussion	5-71
5.1	Problem der Zeiligkeit	5-71
5.2	Einfluß der metallographischen Präparation	5-72
5.3	Einfluß der Mikroskopeinstellungen auf die Texturanalyse	5-75
5.4	Korrelation der Texturparameter mit dem Gefüge	5-77
5.5	Bestimmung der Härte einer 100Cr6-Stirnabschreckprobe über ein Neuronales Netzwerk	5-84
6	Zusammenfassung	6-86
7	Literatur	7-88
8	Anhang	8-89
8.1	Makro zur Messung der Texturparameter nach Haralick im KS400	8-89
8.2	Makro zur Messung der Haralick-Parameter und der Härte im KS400	8-91

1 Einleitung

Der Werkstoff Stahl ist mit einer Weltjahresproduktion von 800 Mio. [Wel00] einer der wichtigsten Werkstoffe. Die große Flexibilität in den Eigenschaften ist ausschlaggebend für seine große Verbreitung. Die gewünschten Eigenschaften lassen sich beim Werkstoff Stahl durch entsprechende Werkstoffwahl und gezielte Wärmebehandlung in weiten Grenzen einstellen.

Die Charakterisierung des Gefüges spielt hierbei eine sehr wichtige Rolle, da man aus ihm wichtige Rückschlüsse auf die Legierung und die Vorbehandlung schließen kann. Mit Hilfe dieser Informationen ist es möglich, Aussagen über die Qualität und die Eignung für einen bestimmten Einsatzzweck zu machen.

Zur zahlenmäßigen Erfassung des Gefüges dient die Quantitative Gefügeanalyse (QGA), die auch aufgrund der ständig wachsenden Rechnerunterstützung immer mehr an Bedeutung in der Werkstofftechnik, insbesondere in der Metallographie gewinnt. Durch solche Analysen wird es möglich, objektive Entscheidungen zu treffen, die im Idealfall auf reproduzierbaren Ergebnissen beruhen.

Jedoch gibt es gerade beim Werkstoff Stahl mitunter große Probleme bei der Auswertung der Gefüge durch die QGA, da die Kontrastunterschiede verschiedener Phasen zu gering sind oder das Gefüge für das Lichtmikroskop zu fein ist. Die Gefügestände gehärteter Stähle, Martensit, Bainit oder Ferrit/Perlit gehören zu den über konventionelle Methoden der Erkennung verschiedener Phasen nicht auswertbaren Gefügetypen.

Dieser Mangel führte zur Entwicklung anderer Verfahren. So hat sich bereits in Vorgängerarbeiten gezeigt, daß diese Gefüge mittels einer Beurteilung der Nachbarschaftsverhältnisse der Grauwerte von Bildpunkten quantitativ beurteilt werden können. Hierzu werden aus der Matrix, die die Grauwertverteilung des Bildes repräsentiert, verschiedene Texturparameter nach Haralick [Har73] berechnet. Durch Verarbeitung dieser Daten in einem Neuronalen Netzwerk soll eine Korrelation der Texturparameter mit mechanischen Eigenschaften des Gefüges hergestellt werden.

Das Verfahren wurde hierzu an den gängigen Stählen C45 und 100Cr6 mit definierten Wärmebehandlungszuständen untersucht. In vorangegangenen Arbeiten konnte beim

Stahl C45 mit Hilfe der Texturanalyse eine sehr gute Korrelation zwischen Gefüge und mechanischen Eigenschaften festgestellt werden [Sch99, Sch00]. Von besonderem Interesse war deshalb, inwieweit dieses Verfahren auf den Wälzlagerstahl 100Cr6 anwendbar ist und ob sich vergleichbare Korrelationen feststellen lassen.

Ein Problem dieses Verfahrens ist jedoch, daß die Ergebnisse der quantitativen Gefügeanalyse stark von äußeren Einflüssen wie Ätzung, Mikroskopeinstellungen etc. abhängen. Um diese Einflüsse zu untersuchen, wurden Proben entsprechend präpariert bzw. die Texturanalyse mehrfach mit verschiedenen Mikroskopeinstellungen durchgeführt.

2 Grundlagen

2.1 Heutiger Stand in der Quantitativen Gefügeanalyse

Die Metallographie ist eine äußerst wichtige Hilfe zur Charakterisierung und Beurteilung von Werkstoffzuständen. Ein Teilgebiet hiervon ist die Quantitative Gefügeanalyse (QGA). Mit ihrer Hilfe wird es möglich, die durch metallographische Methoden ermöglichte Visualisierung von Gefügezuständen quantifizierbar zu machen, wodurch Vergleiche zwischen verschiedenen Proben bzw. differenziertere Unterscheidungen von Merkmalen erreichbar sind. Einige wichtige Gefügekenngrößen, die mittels der QGA untersucht werden können, sind z.B.

- Korngrößenverteilung
- Verhältnis des Umfangs zum Radius (Rundheit) von Gefügebestandteilen (Form)
- Orientierung (z.B. Walztexturen)
- Porositätsverteilung über den Querschnitt von pulvermetallurgisch hergestellten Bauteilen (Homogenität)

Hier ist es wünschenswert, mit Hilfe der elektronischen Datenverarbeitung eine gewisse Automatisierung einzuführen. Dieses Vorgehen ist heute in der Metallographie weit verbreitet und bietet eine gute Möglichkeit zur quantifizierbaren, objektiven Beurteilung. Hierzu wird das Mikroskopbild des Gefüges in einen Computer eingezogen und dort mittels entsprechender Bildanalysesoftware ausgewertet. Mit solchen Systemen sind heute schon Quantitative Gefügeanalysen möglich, was eine schnelle und großflächige Analyse von Gefügeeigenschaften über den Probenquerschnitt verteilt erlaubt. Das Gefügebild wird hierzu im Computer mittels einer Segmentierung in ein Binärbild umgewandelt, das die gewünschten Bereiche enthält (siehe Bild 2-1a). Dies geschieht durch setzen der Bildpunkte eines bestimmten Grauwertbereichs auf einen einheitlichen Wert, z.B. schwarz. Alle übrigen Bildpunkte werden dann mit einem anderen Grauwert, z.B. weiß, dargestellt. Dadurch kommt es zur Abgrenzung von Objekten in einem bestimmten Grauwertbereich gegen den Rest des Bildes. In solchen Bildern können nun z.B. durch Bestimmung von Abständen zwischen den detektierten Bereichen Korngrößen o.ä. bestimmt werden.

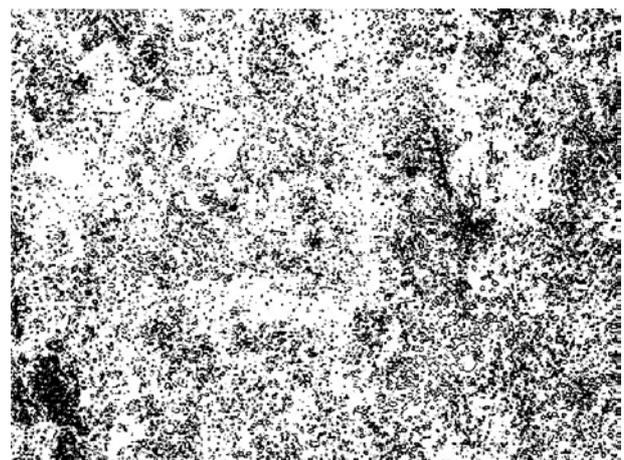
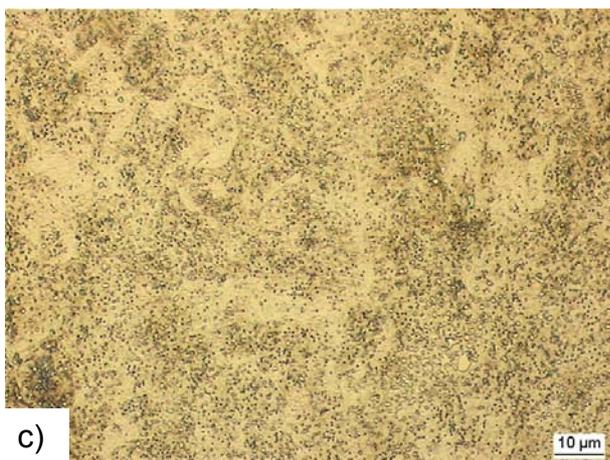
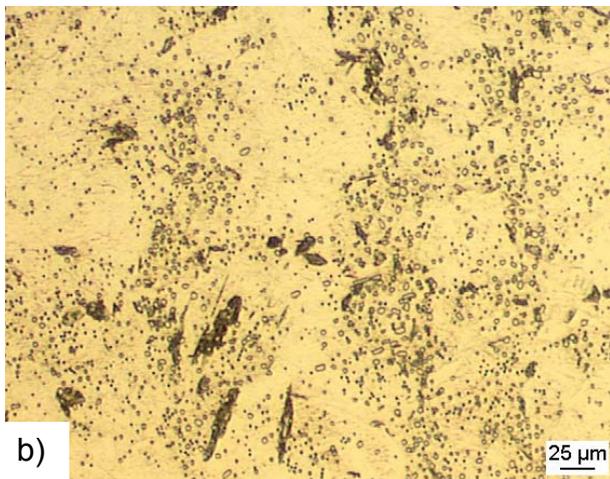
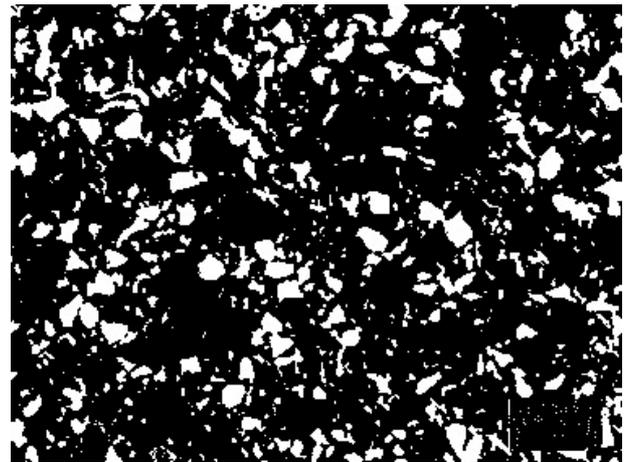
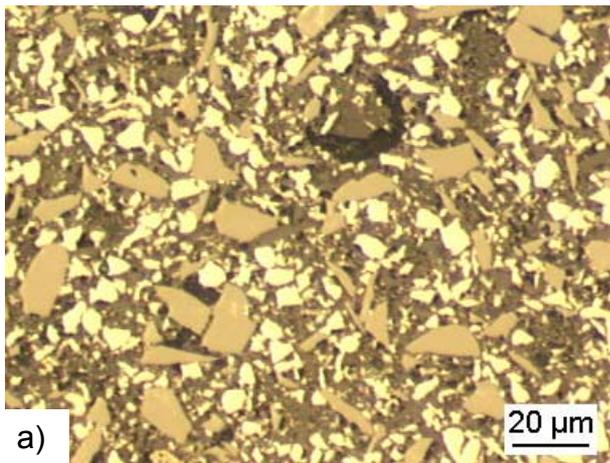


Bild 2-1 Originalbild (links) und daraus detektiertes Binärbild (rechts)
 a) Verbundwerkstoff (MMC)
 b) Bainit aus kontinuierlicher Abkühlung in martensitischer Matrix an einem 100Cr6 (00AF_00630)
 c) martensitisches Gefüge eines gehärteten 100Cr6 (00AF_00699)

Die Methode scheitert jedoch spätestens an Werkstoffgefügen, die nur einen unzureichenden Kontrast liefern, bzw. mikroskopisch aufgrund zu feiner Strukturen nicht aufgelöst werden können, da hier keine Segmentierung in die einzelnen Gefügebestandteile bewerkstelligt werden kann (siehe Bild 2-1c). Die Gefügezustände gehärteter Stähle, Martensit, Bainit oder Ferrit/Perlit gehören beispielsweise zu den über konventionelle Methoden der QGA nicht auswertbaren Gefügetypen.

Gerade hier besteht jedoch der Bedarf, die durch die Härtung erreichten Gefügezustände zu quantifizieren, um Aussagen über die Qualität der Wärmebehandlung machen zu können. Die Eigenschaften gehärteter Stahlbauteile werden stark von der Mikrostruktur beeinflusst und bedürfen daher einer genauen Überwachung in einer Serienproduktion. Der konventionellen Untersuchung durch die QGA war diese Aufgabenstellung aufgrund des feinen, meist kontrastarmen Gefüges bisher verschlossen.

Eine Möglichkeit, solche Gefüge trotzdem mit Hilfe der QGA zu beurteilen bietet die Texturanalyse, die eingesetzt werden kann, um solche Gefüge zu quantifizieren. Mit Hilfe dieser Methode wird die Grauwertverteilung im vorliegenden Bild bestimmt, woraus dann verschiedene Texturparameter bestimmt werden können. Der Vorteil dieses Vorgehens ist, daß kein Binärbild durch Segmentierung erstellt werden muß, sondern die unterschiedlichen Nachbarschaftsverhältnisse zwischen den Bildpunkten mit in die Auswertung eingehen.

2.2 Texturanalyse

Der Begriff Textur bezeichnet in der Bildverarbeitung komplexe Grauwertmuster und ist durch deren räumliche Verteilung gegeben. Die Textur ist die Eigenschaft einer Region einer bestimmten Mindestgröße, wodurch ein Bild in Regionen oder Segmente gleicher Textur unterteilt werden kann. So kann in Bild 2-2 beispielsweise zwischen Regionen mit Savannengras oder Gepardenfell unterschieden werden.

Durch die Texturanalyse werden Bilder anhand von globalen Merkmalen, sog. Texturparametern, charakterisiert, die aus dem Bild mittels spezieller Methoden berechnet werden. Grundlage hierfür sind Bilder der zu untersuchenden Gefüge, die in digitalisierter Form in einem Computer vorliegen.



Bild 2-2 Beispiel zum Begriff Textur (aus [Jäh95])

Die Auflösung des Bildes ist durch die Zahl N_x der Bildpunkte in x-Richtung, bzw. durch die Zahl N_y der Bildpunkte in y-Richtung gegeben [Har73]. Das digitalisierte Bild entsteht durch das Vektorprodukt $I: L_x \times L_y$, wobei $L_x = \{1; 2; \dots; N_x\}$ der Vektor der Bildpunkte in x-Richtung darstellt, $L_y = \{1; 2; \dots; N_y\}$ entsprechend in y-Richtung. Auf diese Matrix wird der dem Bildpunkt entsprechende Grauwert $G \in \{1; 2; \dots; N_g\}$ durch die Funktion $I: L_x \times L_y \rightarrow G$ abgebildet. Die Weiterverarbeitung der Daten erfolgt nun anhand mathematischer Operationen, die sich auf die Felder dieser Matrix beziehen. Jedes einzelne Feld repräsentiert hierbei einen Bildpunkt, wobei der Inhalt des Feldes die Information über den Grauwert enthält.

2.2.1 Bildung der Cooccurrence-Matrix

Die Cooccurrence-Matrix (gray-tone spatial-dependence matrix) [Har73, Kla00] enthält die Informationen über die Nachbarschaftsverhältnisse der Grauwerte der Bildpunkte. In einer Statistik 2. Ordnung wird gezählt, wie häufig Grauwertpaarungen unter definierten Nachbarschaftsverhältnissen im Bild vorkommen. Daraus ergibt sich ein zweidimensionales Histogramm der Grauwertabhängigkeiten.

Auf die Farbinformationen wird verzichtet, wodurch es nötig wird, das vorliegende Bild ggf. in ein Grauwertbild umzuwandeln. Diese Art von Bild weist jedem Bildpunkt (Pixel) einen

Wert zwischen 0 und 255 zu, der den Grauwert repräsentiert. Nun wird jeder Bildpunkt der Reihe nach betrachtet: in einer Matrix werden die auftretenden Kombinationen der Grauwerte des aktuellen Bildpunktes mit dem Grauwert des Nachbarbildpunktes aufsummiert und in Abhängigkeit des Grauwertes i des betrachteten Bildpunktes und des Grauwertes j des benachbarten Bildpunktes im Element $P(i, j)$ der Coocurrence-Matrix aufsummiert. Der allgemeine Aufbau solch einer Matrix ist in Tabelle 2-1 wiedergegeben. In anderen Worten heißt das, daß die Kombinationen, bei denen der betrachtete Bildpunkt z.B. schwarz und dessen Nachbar weiß ist, über das ganze Bild hinweg aufsummiert werden.

Dies hat zur Folge, daß für ein Grauwertbild mit $N_g=256$ Grauwerten eine Matrix mit $N_g \times N_g$, d.h. mit $256 \times 256 = 65536$ Elementen erstellt werden muß, um alle Grauwertkombinationen berücksichtigen zu können.

		Grauwert i des betrachteten Bildpunktes			
		1	2	...	N_g
Grauwert j des benachbarten Bildpunktes	1	$P(1, 1)$	$P(2, 1)$...	$P(N_g, 1)$
	2	$P(1, 2)$	$P(2, 2)$...	$P(N_g, 2)$

	N_g	$P(1, N_g)$	$P(2, N_g)$...	$P(N_g, N_g)$

Tabelle 2-1 Allgemeiner Aufbau und Bezeichnungen in einer Coocurrence-Matrix

Die Coocurrence-Matrix kann unter verschiedenen Winkeln erstellt werden, so wird bei einem Winkel von $\alpha=0^\circ$ der horizontale Nachbar des Bildpunktes betrachtet. In Bild 2-3 bedeutet dies, daß die Verhältnisse des Bildpunktes X mit seinen Nachbarn 1 und 5 untersucht wird. Die weiteren Verhältnisse für die Winkel 45° , 90° und 135° werden in Bild 2-3 dargestellt.

Des weiteren läßt sich der Abstand zwischen dem betrachteten Bildpunkt und dem Nachbarn variieren. Der Abstand $d=1$ bedeutet, daß der direkte Nachbar für die Bildung der Coocurrence-Matrix herangezogen wird.

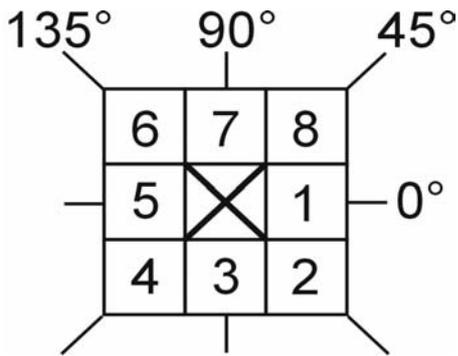


Bild 2-3 Winkelverhältnisse für die Erstellung einer Coocurrence-Matrix

In Tabelle 2-2 ist ein einfaches Grauwertbild mit 2 Grauwerten (schwarz und weiß) sowie dessen zugehörige Coocurrence-Matrix unter dem Winkel $\alpha=0^\circ$ im Abstand $d=1$ dargestellt.

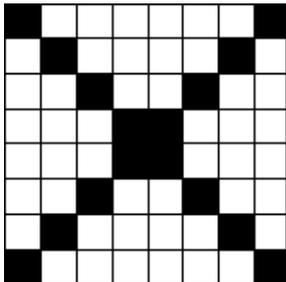
	Grauwert i des betrachteten Bildpunktes		
	Weiß	schwarz	
	weiß	schwarz	
Grauwert j des benachbarten Bildpunktes	weiß	60	24
	schwarz	24	4

Tabelle 2-2 einfaches Grauwertbild und zugehörige Coocurrence-Matrix ($\alpha=0^\circ$, $d=1$), nicht normalisiert

In Tabelle 2-3 ist ein Grauwertbild mit 4 verschiedenen Grauwerten 0 bis 3 dargestellt, für das die Coocurrence-Matrix des direkten, rechten Nachbarbildpunktes erstellt wurde. Die Werte in der Coocurrence-Matrix sind entsprechend der Nachbarschaftsverhältnisse im zugehörigen Bild farblich markiert. In diesem Beispiel wurden der Einfachheit halber nur die Verhältnisse zum rechten Nachbar betrachtet. Für die weiteren Auswertungen wurden jedoch Coocurrence-Matrizen erstellt, die für den Winkel $\alpha=0^\circ$ die Nachbarschaftsverhältnisse zum rechten und zum linken Nachbarn berücksichtigen.

0	0	1	1	2	3	Grauwert i des betrachteten Bildpunktes				
0	0	0	1	2	3					
0	0	1	2	3	3	0	1	2	3	
0	1	1	2	3	3	Grauwert j des benachbarten Bildpunktes	0	1	2	3
1	2	2	3	3	3	1	4	2	0	0
2	2	3	3	3	3	2	0	5	2	0
						3	0	0	6	7

Tabelle 2-3 Grauwertbild mit 4 Grauwerten und zugehörige Coourrence-Matrix des direkten, rechten Nachbars ($\alpha=0^\circ$, $d=1$), nicht normalisiert (aus [Kla00])

Zur besseren Verarbeitung wird die vorliegende Coourrence-Matrix normalisiert. Dadurch soll der Einfluß der Bildgröße bzw. der Auflösung eliminiert werden. Bei diesem Vorgang wird die Zahl der vorkommenden Grauwertkombinationen auf die Gesamtzahl der Bildpunkte bezogen.

Hierzu wird jedes Element $P(i, j)$ der Matrix durch die Gesamtzahl R der in dieser Matrix betrachteten Nachbarschaftsverhältnisse geteilt. Der Wert für R ist von dem der Coourrence-Matrix zugrundeliegenden Winkel α abhängig. Man erhält dadurch die normalisierte Coourrence-Matrix mit den Elementen $p(i, j) = P(i, j) / R$. Die entsprechenden Werte für die Anzahl der direkten Nachbarn ($d=1$) sind in Tabelle 2-4 in Abhängigkeit des Winkels dargestellt.

Winkel α	Anzahl R der Nachbarschaften
0°	$2N_y(N_x-1)$
45°	$2(N_y-1)(N_x-1)$
90°	$2N_x(N_y-1)$
135°	$2(N_x-1)(N_y-1)$

Tabelle 2-4 Anzahl R der Nachbarschaften für den Abstand $d=1$ in einem Grauwertbild mit N_x mal N_y Bildpunkten unter verschiedenen Winkeln

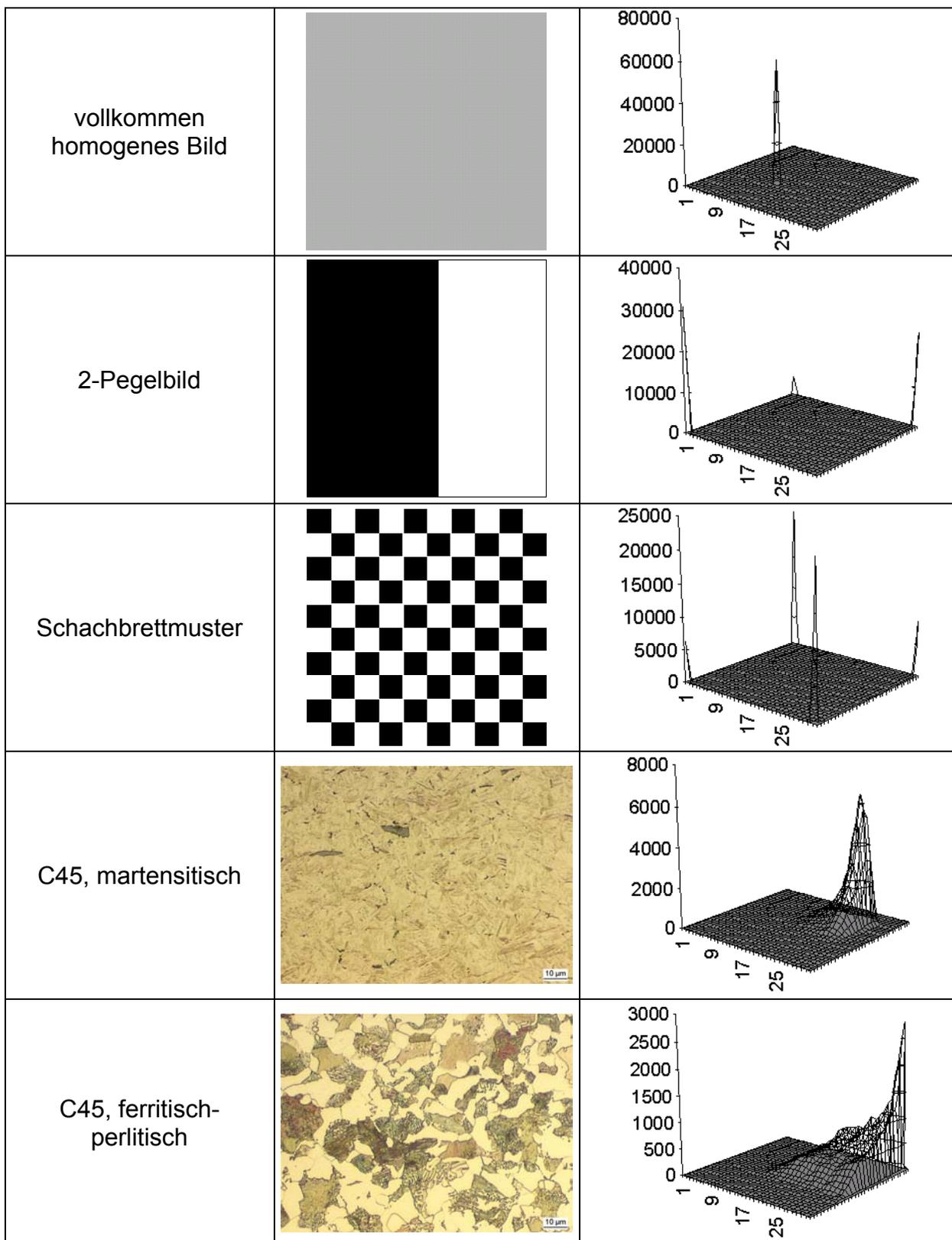


Bild 2-4 Beispiele für Cooccurrence-Matrizen (rechts), die aus unterschiedlichen Bildern (links) erstellt wurden (aus [Kla00])

2.2.2 Haralick-Parameter

Aus solch einer Grauwertverteilung werden nach Robert M. Haralick verschiedene skalare Größen (sog. Haralick-Parameter) errechnet [Har73]. Die so ermittelten Zahlenwerte geben z. B. Auskunft über die Textur, Helligkeit oder den Kontrast des Bildes.

1) Haralick1 = Angular Second Moment

$$f_1 = \sum_i \sum_j [p(i, j)]^2$$

2) Haralick2 = Contrast

$$f_2 = \sum_{n=0}^{N_g-1} n^2 \left[\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{\substack{j=1 \\ |i-j|=n}}^{N_g} p(i, j) \right]$$

3) Haralick3 = Correlation

$$f_3 = \frac{\sum_i \sum_j (i \cdot j) \cdot p(i, j) - \mu_x \cdot \mu_y}{\sigma_x \cdot \sigma_y}$$

4) Haralick 4 = Sum of Squares: Variance

$$f_4 = \sum_i \sum_j (i - \mu)^2 \cdot p(i, j)$$

5) Haralick 5 = Inverse Difference Moment:

$$f_5 = \sum_i \sum_j \frac{1}{1 + (i - j)^2} \cdot p(i, j)$$

6) Haralick 6 = Sum Average:

$$f_6 = \sum_{i=2}^{2N_g} i \cdot p_{x+y}(i)$$

7) Haralick 7 = Sum Variance:

$$f_7 = \sum_{i=2}^{2N_g} (i - f_6)^2 \cdot p_{x+y}(i)$$

8) Haralick 8 = Sum Entropy:

$$f_8 = -\sum_{i=2}^{2N_g} p_{x+y}(i) \cdot \log[p_{x+y}(i)]$$

9) Haralick 9 = Entropy:

$$f_9 = -\sum_i \sum_j p(i, j) \cdot \log(p(i, j))$$

10) Haralick 10 = Difference Variance:

$$f_{10} = \text{variance of } p_{x-y}$$

11) Haralick 11 = Difference Entropy:

$$f_{11} = -\sum_{i=0}^{N_g-1} p_{x-y}(i) \cdot \log[p_{x-y}(i)]$$

12) Haralick 12 = Information Measures of Correlation:

$$f_{12} = \frac{H_{XY} - H_{XY1}}{\max(H_X, H_Y)}$$

13) Haralick 13 = Information Measures of Correlation:

$$f_{13} = (1 - \exp[-2 \cdot (HXY^2 - HXY)])^{1/2}$$

14) Haralick 14 = Maximal Correlation Coefficient:

$$f_{14} = (\text{second largest eigenvalue of } Q)^{1/2}$$

Hierbei bedeuten

$$p_x(i) \quad \text{Summe der } i\text{-ten Spalte der Matrix mit } p_x(i) = \sum_{j=1}^{N_g} p(i, j)$$

$$p_y(j) \quad \text{Summe der } j\text{-ten Zeile der Matrix } p_y(j) = \sum_{i=1}^{N_g} p(i, j)$$

$$p_{x+y}(k) \quad p_{x+y}(k) = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{\substack{j=1 \\ i+j=k}}^{N_g} p(i, j) \quad k = 2, 3, \dots, 2N_g$$

$$p_{x-y}(k) \quad p_{x-y}(k) = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{\substack{j=1 \\ |i-j|=k}}^{N_g} p(i, j) \quad k = 0, 1, \dots, N_g-1$$

μ_x Mittelwert einer Zeile der Cooccurrence-Matrix

μ_y Mittelwert einer Spalte der Cooccurrence-Matrix

σ_x Standardabweichung einer Zeile der Cooccurrence-Matrix

σ_y Standardabweichung einer Spalte der Cooccurrence-Matrix

$$\sum_i \quad \sum_{i=1}^{N_g}$$

$$\sum_j \quad \sum_{j=1}^{N_g}$$

HX Entropie von p_x

HY Entropie von p_y

$$\begin{aligned} \text{HXY} \quad HXY &= -\sum_i \sum_j p(i, j) \cdot \log(p(i, j)) \\ \text{HXY1} \quad HXY1 &= -\sum_i \sum_j p(i, j) \cdot \log(p_x(i) \cdot p_y(j)) \\ \text{HXY2} \quad HXY2 &= -\sum_i \sum_j p_x(i) \cdot p_y(j) \cdot \log(p_x(i)p_y(j)) \\ \text{Q} \quad Q(i, j) &= \sum_k \frac{p(i, k) \cdot p(j, k)}{p_x(i) \cdot p_y(k)} \end{aligned}$$

Die entscheidende Aussage über das Muster des Bildes liefern die Parameter mit der Bezeichnung Haram. Sie berechnen sich aus dem Mittelwert der Haralick-Parameter aus den 4 Coocurrence-Matrizen unter den Winkeln 0° , 45° , 90° und 135° . Der so errechnete Parameter erfasst aufgrund der unter verschiedenen Winkelbeziehungen positionierten Nachbarn das Muster des gesamten Bildes unter jedem beliebigen Winkel. Einzelne Haralick-Parameter würden nur die Situation unter dem Winkel wiedergeben, der für die zugrundeliegende Coocurrence-Matrix als Basis diente. Die Orientierungsabhängigkeit der Haralick-Parameter geht beim Übergang auf die Haram-Parameter somit verloren.

2.3 Neuronale Netzwerke

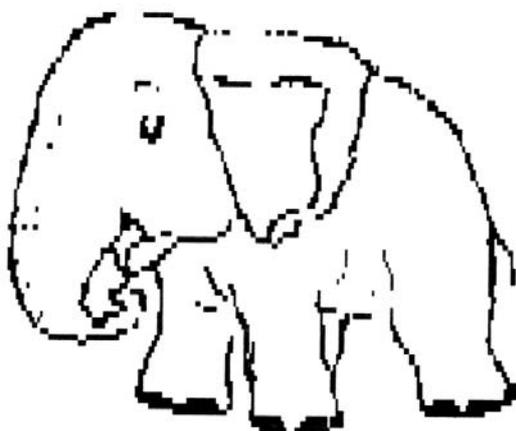


Bild 2-5 Beispiel für ein Objekt, das vom menschliche Gehirn als Elefant erkannt wird, aus [Kra90]

In der konventionellen Informationsverarbeitung laufen Entscheidungen meist regelbasiert ab. So kann ein Elefant beispielsweise durch große Ohren und den Rüssel von einer Giraffe abgegrenzt werden (Bild 2-5). Diese Vorgehensweise ist allerdings nicht in jedem Fall ausreichend. So wäre es wohl voreilig, das Objekt in Bild 2-6 als Elefant zu bezeichnen. Das menschliche Gehirn charakterisiert Objekte nicht nur anhand weniger Eigenschaften. Neuronale Netzwerke bieten die Möglichkeit, ähnliche Assoziationen durch Computer herzustellen, die nicht auf sturen Regeln basieren. Durch dieses Hilfsmittel ist es möglich, Objekte aufgrund von Ähnlichkeiten zu erkennen, die sprachlich nicht trivial zu beschreiben sind. Daher wäre die Entscheidung durch ein Computerprogramm auf konventionellem Wege kaum möglich. Neuronale Netzwerke können durch ein Training auf eine bestimmte Situation ausgerichtet werden. Hierzu werden dem Netzwerk Objekte und die damit verbundenen Assoziationen präsentiert, woraufhin dieses versucht, ein Muster zu erstellen, mit Hilfe dessen es in Zukunft die gewünschte Assoziation einem gleichen oder ähnlichen Objekt zuordnen kann.



Bild 2-6 Beispiel für ein Objekt, das trotz gewisser Merkmale vom menschlichen Gehirn nicht als Elefant interpretiert wird, aus [Kra90]

Um dieses menschliche Denkmodell nachzubilden, werden Neuronale Netzwerke verwendet. Sie sollen ein mathematisches Hilfsmittel sein, menschliches Denken und Verhalten maschinell zu simulieren. Hierbei wird versucht, der maschinellen Informationsverarbeitung Denkweisen wie Kreativität, Phantasie, Assoziation, Interpolation oder sogar Lernen zugänglich zu machen. Diese Eigenschaften sind charakteristisch für die Funktion des menschlichen Gehirns und für sein Verhalten ausschlaggebend. Um dies

umzusetzen wird ein Objekt zur Auswertung im Neuronalen Netzwerk wie auch im Gehirn in Symbole zerlegt. Diese primitiven Bausteinen werden durch Konglomerate von Gehirnzellen (Neuronen) zu einem Komplex verdichtet, der dann als Beschreibung dient. Dadurch wird eine Einsortierung in eine bestimmte Klasse ermöglicht, wodurch eine Reaktion auf die entsprechende Situation veranlaßt werden kann.

2.3.1 Analogie zur Neurophysiologie und Umsetzung in der Neuronalen Informationsverarbeitung

Neuronale Netzwerke stellen mathematische Modelle analog der Neurophysiologie dar. Hierzu werden Gehirnfunktionen durch entsprechende Datenverarbeitungsanlagen nachgebildet. Aus physiologischer Sicht setzt sich ein Gehirn aus folgenden Strukturelementen zusammen [Kra90] (siehe Bild 2-7):

- Zellkörper, der als Informationsträger dient, im einfachsten Fall durch die Zustände erregt bzw. nicht erregt charakterisiert
- Axon, das zur Weitervermittlung des Erregungszustands eines Zellkörpers dient
- Synapsen, die bestimmen, wie sich die über ein Axon vermittelte Erregung auf eine andere Zelle auswirken soll
- Rezeptoren, die die synaptisch gefilterten Eingangserregungen von anderen Zellen auf den Zellkörper übertragen

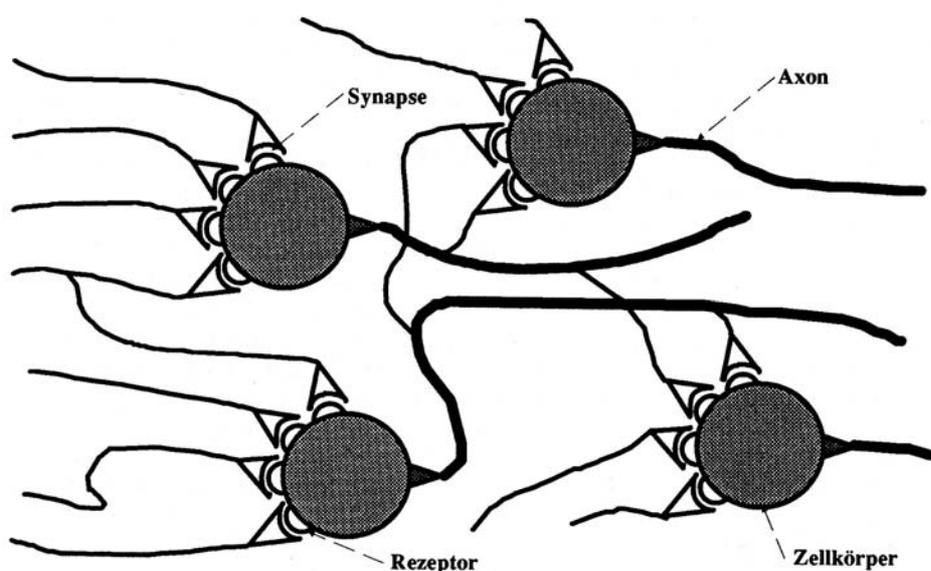


Bild 2-7 Abstraktes Modell eines Neuronenkomplexes [Kra90]

Diese Strukturelemente werden in der neuronalen Informationsverarbeitung durch folgende Komponenten simuliert:

- **Aktivierungszustand**
Er gibt den „Inhalt“ des Neurons, auch Zelle genannt, an, der meist durch eine skalare Größe repräsentiert wird. Hier können verschiedene Wertebereiche zur Anwendung kommen:
 - diskrete binäre Aktivierungszustände zur Kennzeichnung der Zustände aktiv oder inaktiv, darstellbar z.B. durch die Wertepaare $\{0, 1\}$ oder $\{-1, 1\}$
 - nichtbinäre diskrete Aktivierungen, z.B. zur Kennzeichnung der Zustände ja, nein und indifferent, darstellbar z.B. durch die Wertemenge $\{-1, 0, 1\}$
 - kontinuierliche Aktivierungszustände, die durch eine obere und eine untere Schranke im Wertebereich limitiert sind, so z.B. die Sigmoidfunktion mit dem Wertebereich $]0, 1[$
- **Aktivierungsregel**
Sie bestimmt den Aktivierungszustand der Zelle, sofern diese nicht der Eingabeschicht angehört. Sie liefert die Aktivierung in Abhängigkeit der Netzaktivitäten, d.h. anhand der Aktivierung anderer Neuronen, die aufgrund der Verbindungsstruktur an dieses herangetragen werden.
- **Ausgaberegeln**
Sie liefert den angeschlossenen Neuronen mit Hilfe einer Transformation aus der Aktivierung des Neurons die Netzaktivität. Im einfachsten Fall gibt die Ausgabefunktion die Aktivierung der Zelle in Form der Netzaktivität weiter.
- **Fehlermaß**
Es stellt eine Art Maß für das Fehlverhalten einzelner Neuronen dar, indem ein Soll/Ist-Abgleich durchgeführt wird. Es dient im weiteren der Modifikation der Verbindungsstruktur und damit der Verbesserung des Verhaltens des Netzwerks.

2.3.2 Kombination einzelner Zellen zu Neuronalen Netzwerken

Die Zellen sind untereinander zu Zellverbänden, die das eigentliche Neuronale Netzwerk bilden, zum Zweck des Informationsaustausches miteinander verbunden. Hierbei gibt es grundlegend verschiedene Verbindungsstrukturen, die das Verhalten des Netzwerks

festlegen. Ebenso spielt die Art und Weise, wie die Information an das nächste Neuron weitergeleitet wird, eine wichtige Rolle. Der mögliche Aufbau und die unterschiedlichen Funktionsweisen der Verbindungen zwischen den Neuronen sollen hier kurz aufgezeigt werden.

Das Neuronale Netzwerk wird durch folgende Punkte charakterisiert:

- Verbindungsstruktur zwischen Verarbeitungseinheiten
es ist grundsätzlich zwischen zwei verschiedenen Verbindungen zu unterscheiden
 - gerichtete Verbindungen mit definierter Ausrichtung des Informationsflusses
 - ungerichtete Verbindungen mit wechselseitiger Beeinflussung der NeuronenDurch Gewichtungen der Verbindungen wird der Einfluß eines Neurons auf das andere festgelegt: positive Gewicht bewirken einen erregenden Einfluß auf das Zielneuron, negative Gewichte einen hemmenden. In Sonderfällen werden Schwellwerte benutzt, die ein Maß für die Tendenz zur Aktivierung bzw. Deaktivierung darstellen.
- Kontrollstrategie
bestimmt, in welcher Sequenz die Verarbeitungseinheiten aktiviert werden. Bei sog. Vorwärtsvermittlungsnetzen wird die Aktivierung schichtweise von der Eingabeschicht ausgehend bis zur Ausgabeschicht durchgeführt. In vollvernetzten Strukturen wird auch oft eine Quasi-Gleichzeitigkeit der Aktivierung verlangt.
- Vermittlungsregel
bestimmt die Netzaktivität net_j aus der Aktivierung a_i des Quell-Neurons i und der Gewichtung w_{ij} der Verbindung zum Ziel-Neuron j
$$net_j = \sum_i a_i \cdot w_{ij}$$
- Adaptionenregel
dient dazu, daß das Neuronale Netzwerk „Erfahrungen“ adaptiert. Hierzu wird ein Soll/Ist-Abgleich an den Zellen der Ausgabeschicht mittels Trainingsdaten durchgeführt und infolge einer Abweichung die Gewichtsstruktur modifiziert

Für den Aufbau von Neuronalen Netzwerken hat es sich bewährt, die Zellen schichtweise anzuordnen (siehe Bild 2-8). Dabei wird den Zellen innerhalb einer Schicht ein gleichartiges Verhalten zugewiesen. Man unterscheidet dabei 3 Typen von Zellen. Zum einen die Eingabeschicht, deren Zellen als Eingabepuffer für äußere Einflüsse dienen. Sie

werden nicht durch netzinterne Methoden initialisiert, sondern immer von außen. Daran können sich eine oder mehrere verdeckte Zwischenschichten anschließen. Sie werden netzintern verwaltet und unterliegen dem durch das Netzmodell festgelegten Informationsfluß. Ihre Konfiguration ist von der Außenwelt vollständig abgekapselt und wird dem Netzwerk überlassen. Als Schnittstelle zur Ausgabe dient die Ausgabeschicht. Hier werden die Werte abgegriffen, die als Folge der Informationsverarbeitung des Netzwerks gebildet werden.

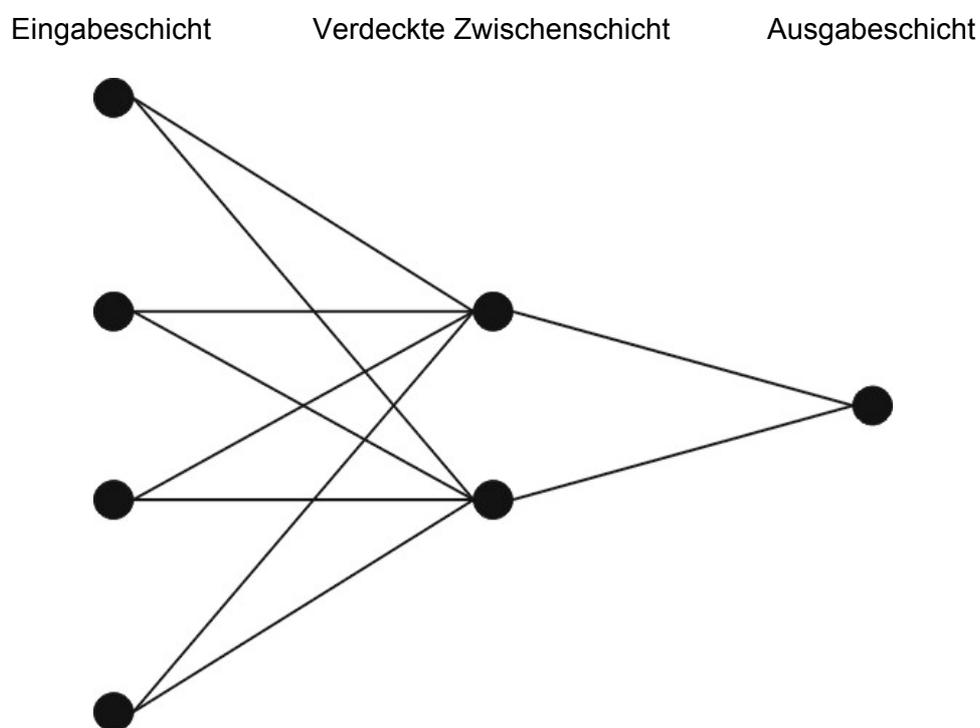


Bild 2-8 Schematischer Aufbau eines Neuronalen Netzwerks mit Vorwärtsvermittlung

2.3.3 Vorteile Neuronaler Netzwerke

Diese Strukturelemente und die noch zu besprechenden Techniken zur Verarbeitung der Informationen führen zu folgenden Fähigkeiten von Neuronalen Netzwerken:

- Robustheit
die simulierten Neuronen übernehmen eine Art „Kollektivverantwortung“, was dazu führt, daß beim Versagen infolge inkorrektur Ansteuerung einiger Neuronen die

Leistungsfähigkeit des Netzwerks nur leicht vermindert wird im Vergleich zum Idealfall. Die Systemleistung nimmt also schrittweise und nicht abrupt ab.

- Modellinhärente Parallelisierungsmöglichkeit
die Netzmodelle eignen sich hervorragend zur massiv-parallelen Ausführung in Mehrprozessor-Rechnerarchitekturen
- Adaptivität („Lernen“)
das „Wissen“ des Netzes ruht in der Verbindungsstruktur der Neuronen untereinander. Durch Änderung dieser Verbindungsstruktur wird die Einflußnahme der Neuronen untereinander reguliert. Dies geschieht durch Präsentation von Eingangsmuster in das Netzwerk unter Kenntnis der erwünschten Reaktion. Bei Abweichung der erreichten und der gewünschten Reaktion wird die Verbindungsstruktur solange modifiziert, bis die Abweichung minimal ist. Dieser Vorgang wird als Trainingsbetrieb bezeichnet. Nach diesem Vorgang ist es dann möglich, dem Netz ähnliche Eingangsmuster zu präsentieren, wodurch das Netz aufgrund der gebildeten Verbindungsstruktur ein Ergebnis analog zum Trainingsbetrieb liefert.

2.3.4 Ablauf der Erstellung eines Neuronalen Netzwerks

Zusammenfassend soll hier nochmals kurz der komplette Ablauf aufgezeigt werden, der nötig ist, um ein Neuronales Netz zu erstellen und zu trainieren.

- 1) Erstellung der Netzwerkstruktur
- 2) Festlegung von Adaptionregel und Kontrollstrategie
- 3) Eingabe der Parameter zur Konfiguration dieser Algorithmen
- 4) besetzen sämtlicher Gewichte analog der Initialisierungsfunktion
- 5) laden der Trainingsdatensätze
- 6) Durchführung des Trainings durch mehrfache Abarbeitung folgender Schritte:
 - a) Eingabe der Werte in die Zellen der Eingabeschicht
 - b) Berechnung der Werte der Zwischenschicht
 - c) Berechnung der Werte der Ausgabeschicht
 - d) Bestimmung des Fehlers zwischen errechnetem Ausgabewert und dem im Trainingsdatensatz festgelegten

- e) Anpassung der Gewichte des Netzwerks anhand der Adaptionregel zur Minimierung des Fehlermaßes
wenn Soll-/Ist-Abgleich der Ausgabezelle hinreichend genau ist oder sich keine Änderung der Gewichtstruktur mehr ergibt, wird wie folgt fortgefahren
- 7) laden der Testdatensätze
- 8) Einsetzen der Daten in die Eingabezellen
- 9) Bestimmung des Ausgabewerts

Hierbei kennzeichnen die Punkte 1) bis 3) die Erstellung des Netzwerks, während die Punkte 4) bis 6) das Training des Netzwerks darstellen. Zur Erleichterung kann das Netzwerk, besser gesagt seine Gewichtsstruktur, in diesem Stadium gespeichert werden und steht von nun an direkt, d.h. ohne neues Training, zur Verfügung.

2.4 Verwendete Werkstoffe

Für die Versuchsreihen wurden zwei verschiedene Werkstoffe verwendet, die beide in der Technik weit verbreitet sind. Zum einen handelt es sich um den Vergütungsstahl C45, dessen ZTU-Diagramm in Bild 2-9 dargestellt ist. Zum anderen wurde der Wälzlagerstahl 100Cr6 untersucht, dessen ZTU-Diagramm in Bild 2-10 zu sehen ist.

Aus diesen Diagrammen läßt sich das durch eine Wärmebehandlung erzielbare Gefüge in Abhängigkeit der Abkühlgeschwindigkeit von der Austenitisierungstemperatur ablesen. Das Ablesen der Gefügeanteile und der resultierenden Härte erfolgt entlang der eingezeichneten Abkühlkurven [Hor85, Sch91].

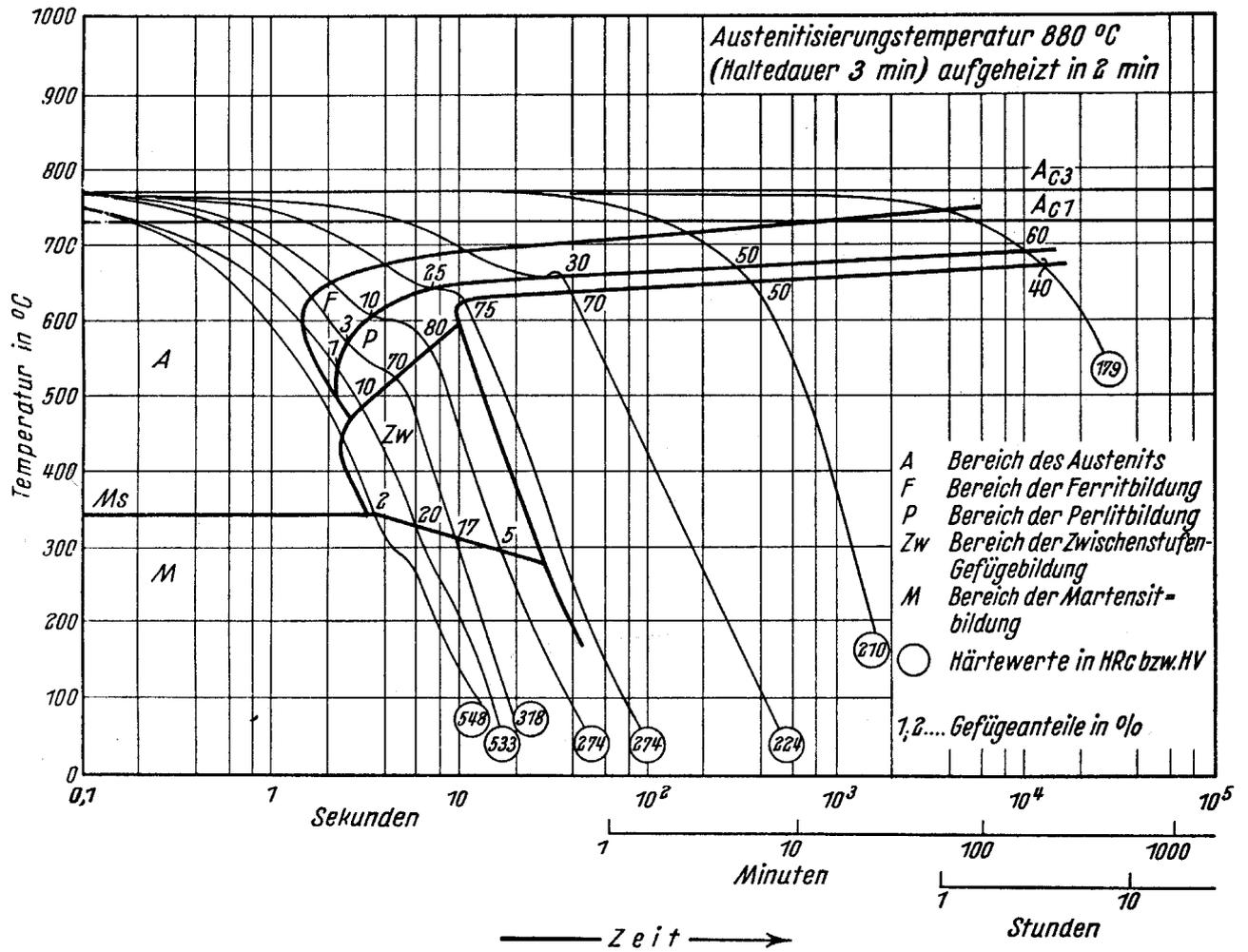


Bild 2-9 Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild (ZTU) für kontinuierliche Abkühlung für den Stahl C45 bei einer Austenitisierungstemperatur von 880°C (aus [Ros69])

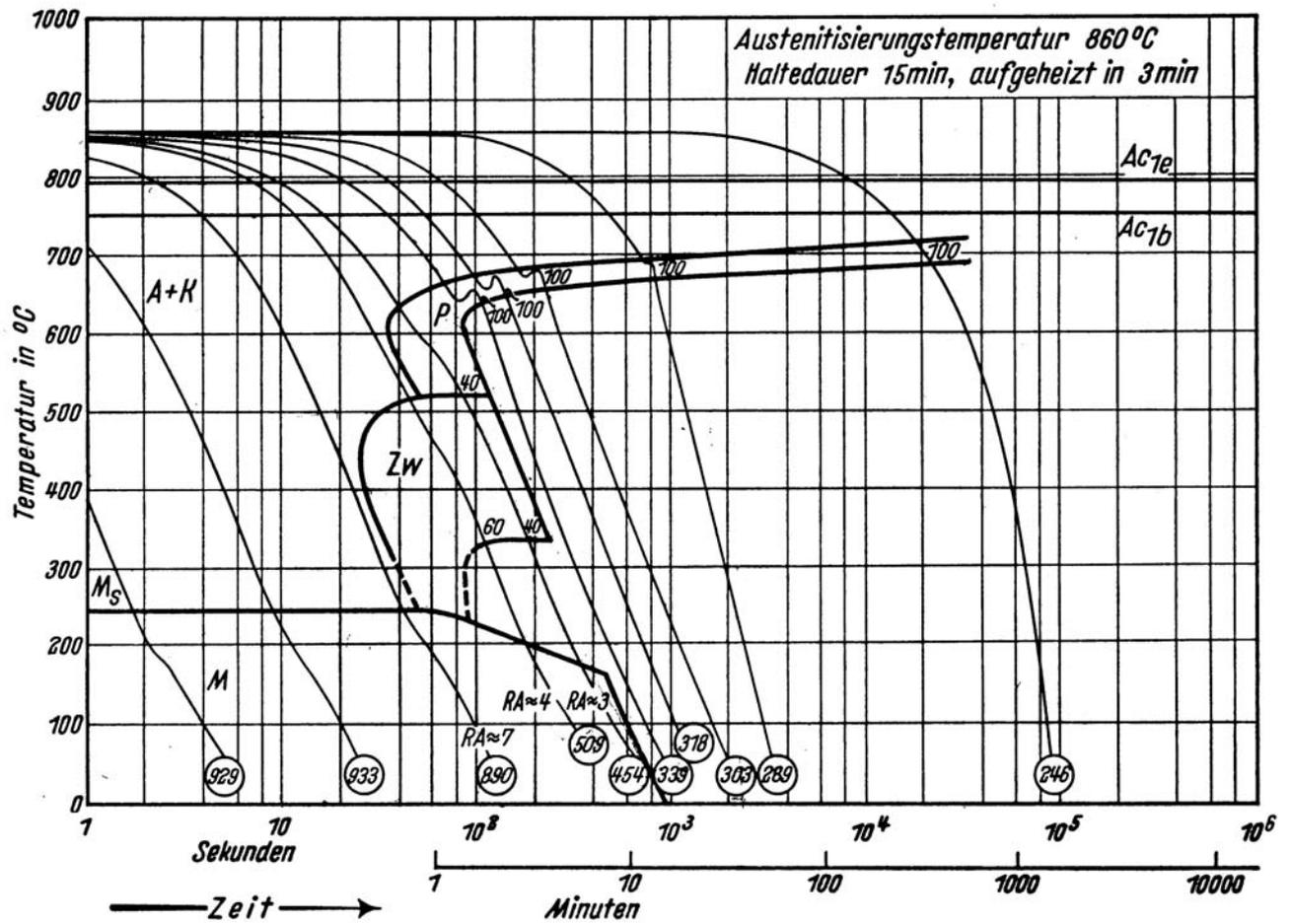


Bild 2-10 Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubild (ZTU) für kontinuierliche Abkühlung für den Stahl 100Cr6 bei einer Austenitisierungstemperatur von 860°C (aus [Ros69])

3 Experimentelle Durchführung

3.1 Probenerstellung

3.1.1 Verwendete Werkstoffe

Es wurden Proben aus dem Vergütungsstahl C45 und aus dem Wälzlagerstahl 100Cr6 untersucht. Der unlegierte, untereutektoide Stahl C45 (1.0503) [Weg89] ist ein Eisenbasiswerkstoff mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,45%. Er wurde aus zwei Gründen ausgewählt: erstens wurden an diesem Werkstoff in Vorgängerarbeiten [Sch99] bereits Untersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuche sollten verifiziert und erweitert werden. Zum zweiten handelt es sich hierbei um einen sehr oft eingesetzten Stahl, der bei geeigneter Wärmebehandlung und unterschiedlichen Abkühlungsgeschwindigkeiten die relevanten Gefügeausbildungen Martensit, Bainit und Ferrit/Perlit aufweist (siehe Bild 2-9).

Als zweiter Werkstoff wurde der Wälzlagerstahl 100Cr6 (1.3505) [Weg89] gewählt. Dieser ist ein Stahl mit 1,00% Kohlenstoff, der mit 1,5% Chrom legiert ist. An diesem Stahl sollte untersucht werden, ob die am C45 gewonnenen Erkenntnisse auch auf andere Werkstoffe übertragbar sind. Dieser Werkstoff unterscheidet sich hinsichtlich des Gefüges deutlich von dem des C45. Durch die Legierung mit Chrom kommt es zur Ausscheidung von Chromkarbiden, die in Form kleiner Kugeln homogen verteilt im Gefüge vorliegen. Durch das Legieren mit Chrom kommt es zu deutlich anderen Gefügeausbildungen als beispielsweise beim C45. Ebenso werden dadurch ein trägeres Umwandlungsverhalten und eine höhere Einhärtbarkeit erreicht (siehe Bild 2-10). So muß der C45 beispielsweise innerhalb maximal 20 s abgeschreckt werden, damit das Gefüge rein martensitisch ist. Beim 100Cr6 hingegen muß die Abschreckung nur innerhalb etwa 2 min erfolgen.

3.1.2 Wärmebehandlung

3.1.2.1 Proben mit definierter Wärmebehandlung

Für die Versuchsreihen wurden Proben erstellt, die sich in der Wärmebehandlung unterscheiden. Es wurden daher Proben in verschiedenen Abschreckmedien gehärtet, um unterschiedliche Gefüge zu erhalten. Hierzu wurden die Proben nach der Austenitisierung in Wasser, Öl bzw. an Luft abgekühlt.

Vor der Wärmebehandlung wurde von den vorliegenden Stangen 8 mm dicke Scheiben abgetrennt. Die Probenscheiben aus C45 wurden vor Versuchsbeginn bei 860°C und 50 min Ofenzeit normalgeglüht, anschließend an Luft abgekühlt. Die Proben aus 100Cr6 lagen im weichgeglühten Zustand vor.

Die Austenitisierung der Proben erfolgte beim C45 bei 860°C/19 min Ofenzeit und beim 100Cr6 bei 850°C/19 min. Anschließend wurde von dieser Temperatur aus definiert mit Wasser, Öl und Luft abgekühlt.

3.1.2.2 Stirnabschreckversuch nach DIN 50191

Aus dem Stahl 100Cr6 wurden zusätzlich 3 Jominy-Proben (siehe Bild 3-2) erstellt und daran Stirnabschreckversuche [DIN89, Sta95] (Bild 3-2 und Bild 3-3) durchgeführt, wobei die Austenitisierungstemperatur hier ebenfalls 850°C betrug, aufgrund der Probengröße wurde jedoch eine Ofenzeit von 50 min gewählt.

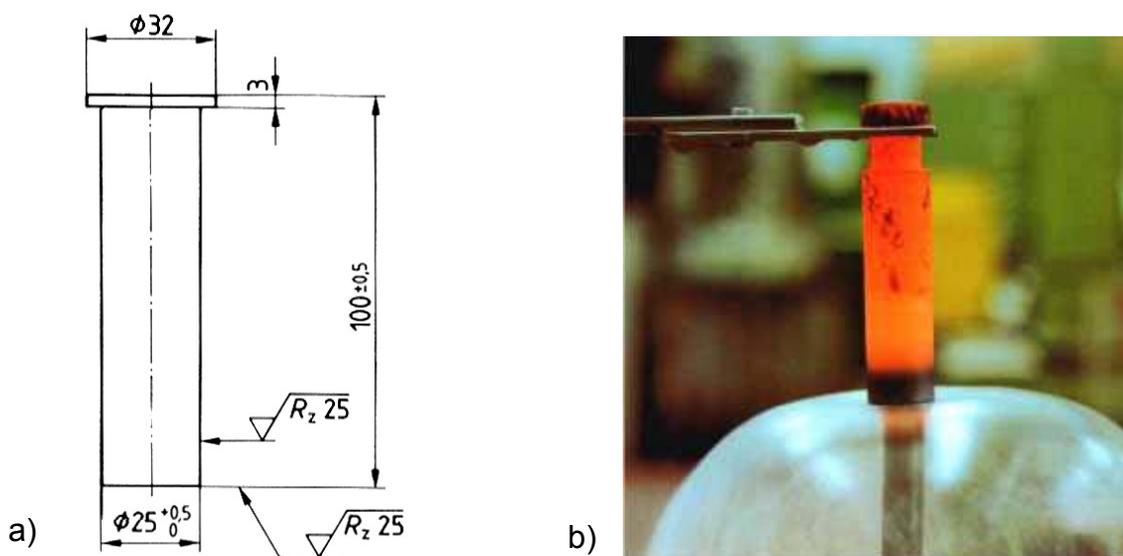


Bild 3-1 a) Skizze einer Stirnabschreckprobe (Jominy-Probe) nach [DIN87]
b) Durchführung eines Stirnabschreckversuchs [Sta95]

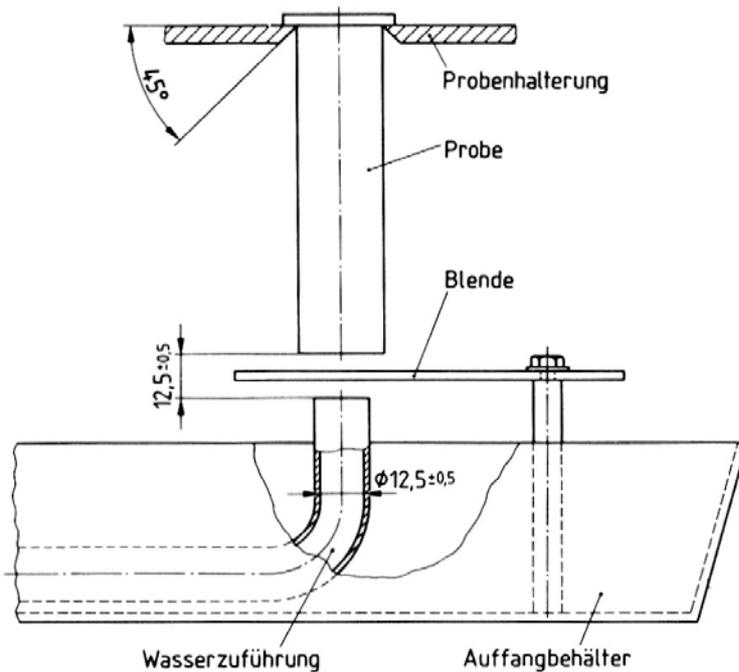


Bild 3-2 Skizze zum Aufbau einer Einrichtung zur Durchführung eines Stirnabschreckversuchs nach [DIN87]

3.2 Metallographische Präparation

3.2.1 Mechanische Präparation

An die Wärmebehandlung schloß sich die metallographische Präparation an. Zuerst wurden die Scheiben in der Mitte parallel zur Stablängsachse getrennt, so daß jeweils zwei halbkreisförmige Teile entstanden sind (siehe Bild 3-3). Hierzu wurde ein Discotom der Fa. Struers mit der Trennschiebe 03TRE eingesetzt. Die Trennung erfolgte mit Wasserkühlung unter geringem Vorschub, um einem Anlaßeffect und einer damit verbundenen Änderung des Gefüges durch die entstehende Wärme entgegenzuwirken.

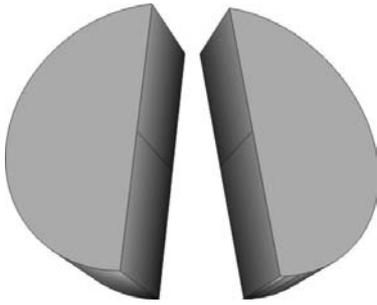


Bild 3-3 Skizze zur Trennung der Probenscheiben

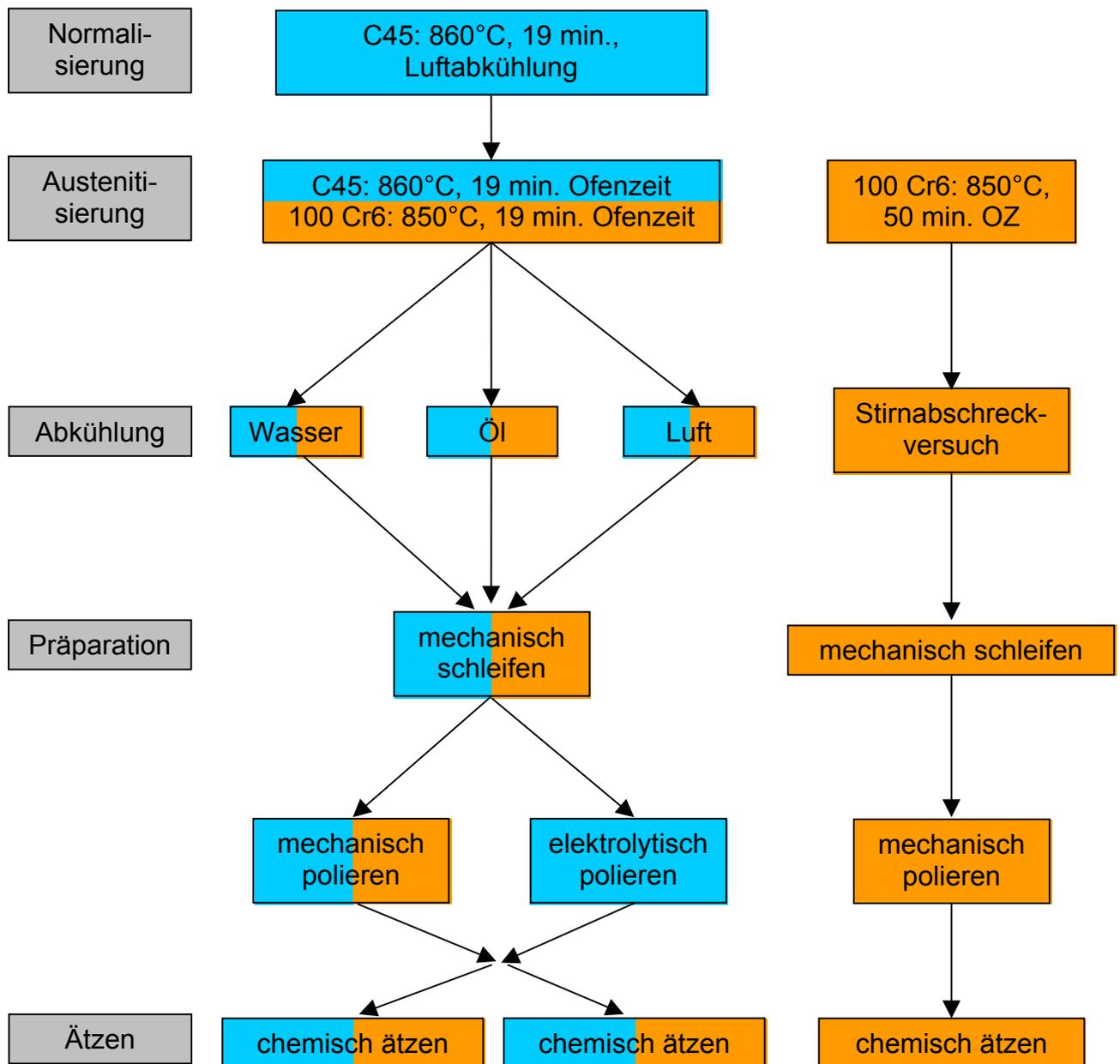
Nach dem Trennen wurden die Proben in Epoxidharz eingebettet, anschließend mechanisch geschliffen und poliert mit einem Planopol/Pedemax der Fa. Struers. Zwischen den einzelnen Bearbeitungsschritten und auch nach erfolgter Präparation wurden die Proben im Exsiccator gelagert, um einem oxidativen Angriff der Probenoberfläche entgegenzuwirken.

Das Schleifen erfolgte nach Tabelle 3-1 in zwei Stufen.

	Schleifen		Polieren		
	1	2	3	4	5
Unterlage	MD-Piano	MD-Allegro	MD-PAN	MD-DAC	MD-NAP
Körnung	120	9 µm	3 µm	3 µm	1 µm
Schmiermittel	Wasser	Lubricant Blau	Lubricant Blau	Lubricant Blau	Lubricant Blau
Geschwindigkeit	150 U/min.	150 U/min.	150 U/min.	150 U/min.	150 U/min.
Druckstufe	4	4	6	4	2
Zeit in min.	bis plan	5	7	3	½

Tabelle 3-1 Ablauf der Präparation der Proben aus C45 und 100Cr6

Nach dem Schleifen wurden die beiden Hälften der Proben unterschiedlich weiterbehandelt: die eine Hälfte wurde an der Trennfläche mechanisch poliert (siehe Schritte 3 bis 5 in Tabelle 3-1). Im Falle der Proben aus 100Cr6 konnte der Schritt 4 mit der Unterlage MD-DAC übersprungen werden. Die in Tabelle 3-1 angegebenen Zeiten dienen nur als Richtwerte, die tatsächlichen Polierzeiten wurden entsprechend verlängert, bis die polierte Oberfläche den Vorstellungen entsprach.



Präparationsschritte für C45 ■ für 100Cr6 ■

Bild 3-4 schematisierte Vorgehensweise zur Probenpräparation für die Werkstoffe C45 und 100Cr6

3.2.1.1 Elektrolytische Präparation

Die andere Hälfte der Proben wurde mit Hilfe des Elektropoliergeräts Lectropol-5 der Fa. Struers elektrolytisch mit dem Elektrolyt E5 poliert. Dieser Elektrolyt wurde aufgrund der Empfehlung der Fa. Struers ausgewählt.

Die eingesetzte rechteckige Maske wurde speziell für die Proben erstellt und hatte die Abmessungen 5 mm auf 20 mm, was zur einer polierten Fläche von 1 cm² führt. Es muß jedoch beachtet werden, daß es im Randbereich der Maske zu einem Abbrand an der Probenoberfläche kommen kann, was zu tiefen Löchern in diesem Bereich führen kann. Dieser Effekt beruht auf der Geometrie des sich ausbildenden elektrischen Feldes sowie auf Potentialdifferenzen und kann nur schwer verhindert werden.

Zur Feststellung der Geräteparameter wurden vor dem Polieren der Proben Versuche an anderen Proben aus dem gleichen Material in den gleichen Wärmebehandlungen durchgeführt. Die für die Probe optimale Polierspannung wurde mittels einer Stromdichte-Potential-Kurve (siehe Bild 3-5) ermittelt, die mit diesem Gerät erstellt werden kann. Die ermittelten Werte sind in Tabelle 3-2 zusammengestellt.

Polierspannung	Flußrate	Polierdauer	Elektrolyttemperatur
35 V	14	8 s	< 20°C

Tabelle 3-2 Geräteeinstellungen für das elektrolytische Polieren der Proben aus C45 mit dem Elektrolyt E5

Beim Polieren der Proben wurde darauf geachtet, daß die Proben möglichst exakt auf der Maskenöffnung plziert wurden, um auszuschließen, daß durch einen Spalt zwischen Maske und Probe Sauerstoff an die polierte Fläche gelangt, wodurch es zu starker Oxidation und damit zur Beeinträchtigung des Polierergebnisses kommen kann. Ebenso wurde die Maske nach jedem Versuch gereinigt, um einen Angriff der Probenoberfläche durch den Elektrolyt vor Versuchsbeginn zu verhindern. Nach dem Polieren wurde die Probe sofort mit Ethanol abgespritzt und anschließend in einem Ultraschallbad mit Ethanol gereinigt. Das Trocknen erfolgte kurz unter Warmluft, danach durch Auslagerung in einem Kaltlufttrockner.

Die Temperatur des Elektrolyts wurde sowohl aus Gründen der verbesserten Wirkungsfähigkeit als auch Sicherheitsgründen mit Hilfe einer Wasserkühlung auf maximal 20°C beschränkt. Beim Erhitzen besteht aufgrund der Zusammensetzung des Elektrolyts Explosionsgefahr, da dieser Perchlorsäure enthält. Gelagert wurde der Behälter mit dem Elektrolyt im Kühlschrank.

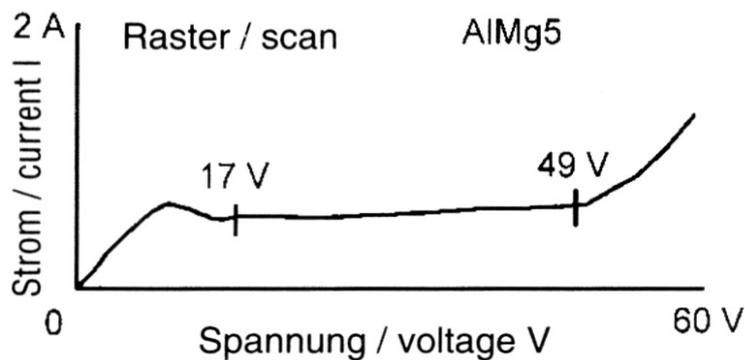


Bild 3-5 Beispiel einer Stromdichte-Potential-Kurve für die Legierung AlMg5, aufgenommen mit dem Gerät Lectropol-5, aus [Kie00]

3.2.2 Ätzen

3.2.2.1 Elektrolytisches Ätzen

Ziel des elektrolytischen Ätzens war, den Ätzvorgang reproduzierbar zu gestalten. Das Gerät Lectropol-5 liefert hierzu gute Voraussetzungen, da hier die Spannung, mit der geätzt wird und die Flußrate, mit der die Probe mit Elektrolyt versorgt wird, eingestellt werden kann. Ebenso wird die Temperatur des Elektrolyts durch eine externe Kühlung durch Leitungswasser nahezu konstant gehalten. Bei Einhaltung der gewählten Zeit und unter der Annahme, der Elektrolyt sei in seiner Zusammensetzung als konstant zu betrachten, kann davon ausgegangen werden, daß die wichtigsten Parameter, die Einfluß auf das Ätzergebnis haben, reproduzierbar eingestellt werden können.

Zusammen mit den Vorversuchen zum Polieren der Proben wurden daher am Lectropol-5 auch Versuche zum elektrolytischen Ätzen der Proben durchgeführt (siehe auch Abschnitt 5.2).

3.2.2.2 Chemisches Ätzen

Das abschließende Ätzen wurde bei allen Proben gleich durchgeführt: die Proben wurden bei Raumtemperatur in 1%-iger alkoholischer Salpetersäure geätzt, die aus 100 ml Ethanol und 1 ml Salpetersäure (HNO_3) hergestellt wurde, wobei die Proben mit leichten Bewegungen in die Ätzflüssigkeit getaucht wurden. Nach dem Ätzen wurden die Proben sofort mit Ethanol abgespritzt, um das Ätzmittel von der Oberfläche zu entfernen. Zur gründlichen Entfernung des Ätzmittels wurden die Proben dann in einem Ultraschallbad in

Ethanol gereinigt. Die Trocknung erfolgte hier ebenfalls kurz unter einem Warmlufttrockner, anschließend in einem Kaltlufttrockner.

Es wurde versucht, den Ätzgrad bei allen Proben möglichst ähnlich einzustellen. Hierzu wurde die zu ätzende Probe einer Vergleichsprobe unter dem Mikroskop gegenübergestellt und so lange nachgeätzt, bis der Ätzgrad der beiden Proben annähernd identisch waren.

3.3 Metallographische Untersuchungen

Für die Begutachtung und Untersuchung der Schriffe stand ein Mikroskop „Axiophot“ der Fa. Carl Zeiss mit Autofocus und einem Scanningtisch zur Verfügung. Der Scanningtisch ist durch die Software KS 400 aus dem Hause Carl Zeiss Vision [Car97] ansteuerbar, wodurch eine Probe definiert unter dem Mikroskop bewegt werden bzw. eine bestimmte Position auf der Probe angefahren werden kann. Diese Einrichtung ermöglicht eine automatische Abrasterung einer großen Probenoberfläche durch den Computer. Der Autofocus ermöglicht dabei das automatische Scharfstellen des Bilds, da die Probe nie hundertprozentig eben ist und sich daher der Abstand Objektiv – Probenoberfläche ändert, was durch eine Korrektur des Abstands ausgeglichen werden muß.

Das Mikroskopbild wird durch eine CCD-Kamera der Fa. Sony aufgenommen, an den Computer weitergeleitet und dort durch einen Framegrabber „Matrox Meteor“ digitalisiert dem Rechner zur Verfügung gestellt.

Das Messen der Haralick-Parameter erfolgte im KS400 mit dem Makro „haram“ (Abschnitt 8.1) bzw. mit kombinierter Härtemessung (Makro „haram_mit_haerte“, Abschnitt 8.2)

3.3.1 Untersuchungen der Proben aus dem Werkstoff C45

In einem ersten Schritt wurden Proben aus C45 in 3 verschiedenen Wärmebehandlungszuständen untersucht. Hierzu wurden scheibenförmig Proben aus dem Material austenitisiert und jeweils 3 davon in den Medien Wasser, Öl und an Luft abgekühlt. Die so entstandenen Proben wurden wie in Abschnitt 3.2 besprochen getrennt. Die Proben wurden entsprechend der Wärmebehandlung bezeichnet. Bei den in Öl und an Luft abgekühlten Proben wurde eine Hälfte der Scheibe mechanisch präpariert, bei den in Wasser abgeschreckten Proben wurden beide Probenhälften präpariert, wobei eine Hälfte mechanisch präpariert und die andere Hälfte mechanisch geschliffen, elektrolytisch poliert

und chemisch geätzt wurde (siehe Tabelle 3-3). Die Präparationsmethode, bei der die Proben elektrolytisch poliert wurden, wird im weiteren als elektrolytische Präparation bezeichnet.

Bezeichnung	Werkstoff	Präparation	Abkühlmedium	Probe
AF 1_1	C45	Mechanisch	Wasser	Probe 1
AF 1_2	C45	Mechanisch	Wasser	Probe 2
AF 1_3	C45	Mechanisch	Wasser	Probe 3
AF 2_1	C45	Mechanisch	Öl	Probe 1
AF 2_2	C45	Mechanisch	Öl	Probe 2
AF 2_3	C45	Mechanisch	Öl	Probe 3
AF 3_1	C45	Mechanisch	Luft	Probe 1
AF 3_2	C45	Mechanisch	Luft	Probe 2
AF 3_3	C45	Mechanisch	Luft	Probe 3
AF 4_1	C45	Elektrolytisch	Wasser	Probe 1
AF 4_2	C45	Elektrolytisch	Wasser	Probe 2
AF 4_3	C45	Elektrolytisch	Wasser	Probe 3
AFW2_3_7	C45	Mechanisch	Wasser	Vorversuch
AFW2_3_9	C45	Elektrolytisch	Wasser	Vorversuch

Tabelle 3-3 Bezeichnungen der Proben aus C45

An den Proben sollte zuerst untersucht werden, welche Rolle die Präparation bei der Messung der Haralick-Parameter spielt. Um einen Unterschied zwischen mechanischem und elektrolytischem Polieren beurteilen zu können, wurde die Probe AFW2_3_9, die in der gleichen Wärmebehandlung vorlag wie die Probe AFW2_3_7, mechanisch geschliffen, elektrolytisch poliert und anschließend chemisch geätzt. Im Vergleich zu Probe AFW2_3_7 sollte festgestellt werden, ob der Unterschied in der Präparationsmethode Auswirkungen auf die Haralick-Parameter mit sich bringt.

Zur Untersuchung des Einflusses des Ätzgrades wurde eine in Wasser gehärtete Probe mit der Bezeichnung AFW2_3_7 mechanisch präpariert und chemisch geätzt. Für die Beurteilung wurde sie vor dem zweiten Abrastern chemisch nachgeätzt.

An den Proben AFx_y wurde die Oberfläche auf einer Fläche von 54 mal 214 Meßfeldern, entsprechend 4995 mal 19795 µm, mit Hilfe des Scanningtisches abgerastert und mittels Bildanalysesoftware an jeder Stelle die Haralick-Parameter bestimmt. Hierbei sollte durch

den Vergleich der Proben miteinander auch die Abhängigkeit der Haralick-Parameter von der Abkühlgeschwindigkeit festgestellt werden.

An den Proben AF1_2 und AF3_1 wurde außerdem die Verteilung der Mikrohärtigkeit nach Knoop über die Oberfläche zusätzlich zu den Haralick-Parametern bestimmt.

Mit Hilfe dieser Daten wurde ein Vergleich der Haralick-Parameter mit der Härte durchgeführt, um eine Abhängigkeit der beiden Parameter voneinander zu können.

3.3.2 Untersuchung der Proben aus dem Werkstoff 100Cr6

Aus dem Werkstoff 100Cr6 wurden 3 Jominy-Proben nach [DIN87] angefertigt und entsprechend Abschnitt 3.2 mechanisch präpariert. Des Weiteren wurden wie beim C45 3 scheibenförmige Proben erstellt und nach der Austenitisierung in den Medien Wasser, Öl und Luft abgekühlt. Zur Bezeichnung der Proben siehe Tabelle 3-4.

Bezeichnung	Werkstoff	Präparation	Abkühlmedium	Probe
TB1_1	100Cr6	Mechanisch	Jominy-Versuch	Probe 1
TB1_2	100Cr6	Mechanisch	Jominy-Versuch	Probe 2
TB1_3	100Cr6	Mechanisch	Jominy-Versuch	Probe 3
100Cr6H ₂ O	100Cr6	Mechanisch	Wasser	
100Cr6Oel	100Cr6	Mechanisch	Öl	
100Cr6Luft	100Cr6	Mechanisch	Luft	

Tabelle 3-4 Bezeichnungen der Proben aus 100Cr6

Da an Proben aus diesem Werkstoff bislang keine Untersuchungen durchgeführt worden sind, mußten zuerst die optimalen Mikroskopeinstellungen bestimmt werden. Hierzu wurde die Probe TB1_2 entlang der Probenlängsachse unter Variation der Mikroskopeinstellungen mehrmals abgescannt und dabei die Haralick-Parameter bestimmt.

Auch am 100Cr6 sollte die Verteilung der Parameter über große Bereiche der Probenoberfläche Aufschluß über die Konstanz und die Abhängigkeit der Parameter von der Wärmebehandlung geben. Hierzu wurden die Oberflächen der Proben TB1_x auf 100 mal 150 Feldern, was einer Fläche von 9250 µm mal 13875 µm entspricht, abgescannt und dabei die Haralick-Parameter an jeder Bildposition bestimmt.

Um eine Korrelation zwischen den Parametern aus der Texturanalyse und der lokalen Mikrohärtigkeit herstellen zu können, wurden die Jominy-Proben TB1_x entlang der Längsachse abgefahren. An verschiedenen Positionen wurden zuerst die Haralick-Parameter und anschließend die Mikrohärtigkeit nach Knoop bestimmt. Hieraus ergab sich ein Verlauf der Texturparameter im Vergleich zur Mikrohärtigkeit in Abhängigkeit von der Abkühlgeschwindigkeit.

Die Umsetzung des Neuronalen Netzwerks in die Praxis erfolgte mit dem Simulator SNNS (siehe Abschnitt 3.5). Hierbei wurden alle 11 gemessenen Haralick-Parameter dem Neuronalen Netz präsentiert. Um das Netz zu trainieren, wurde zusätzlich die Mikrohärtigkeit zur Verfügung gestellt.

Um das Netz zu trainieren wurden die Daten der Proben TB1_1 und TB1_2 benutzt. Hieraus wurden anhand der Texturparameter der Probe TB1_3 die entsprechenden Härtewerte errechnet. Diese Werte wurden dann den an Probe TB1_3 tatsächlich gemessenen Werten gegenübergestellt (siehe Bild 4-17).

Um den Einfluß der Abkühlgeschwindigkeit auf die Höhe der Haralick-Parameter zu quantifizieren wurden die Proben 100Cr6H₂O, 100Cr6Oel und 100Cr6Luft an einem großen Bereich der Oberfläche abgescannt, wobei festgestellt werden sollte, wie groß die Schwankungen der Haralick-Parameter über den Querschnitt einer Probe sind. Außerdem sollte beurteilt werden, wie sich die Haralick-Parameter über die große Probenoberfläche verhalten, um beispielsweise Unterschiede in der Wärmebehandlung zwischen Rand und Kern darstellen zu können.

Ein weiterer wichtiger Punkt war die Bestimmung des Einflusses der Präparation auf die Texturanalyse. An den Proben TB1_2 und TB1_3 sollte daher überprüft werden, inwieweit die Reproduzierbarkeit der Parameter nach einer komplett neuen Präparation sichergestellt werden kann. Hierzu wurden die beiden Proben nach der Messung der Texturparameter nochmals genau wie beim ersten mal präpariert.

3.4 Bestimmung der Mikrohärt

Die Mikrohärtprüfung wurde im Anschluß an die Bestimmung der Texturparameter vorgenommen, um eine Korrelation zwischen diesen beiden Meßwerten herstellen zu können. Hierzu wurde ein Knoop-Sensor [DIN88] in den Revolver des Mikroskops eingeschraubt (siehe Bild 3-6). Das System wurde so abgestimmt, daß der Härteeindruck in der Mitte des vom Rechner eingezogenen Bildes entstand und die längere Diagonale senkrecht in diesem Bild lag.

Die Steuerung der Erzeugung des Eindrucks und die Messung der Härte und erfolgten über den Mikrohärtmesser MHT-4 der Firma Carl Zeiss. Die Einstellmöglichkeiten am Gerät erlaubten die Variation der Prüfkraft, der Haltezeit nach Aufbringung der Prüfkraft F in Newton und die Absenkgeschwindigkeit.

Aufgrund der hohen Härte der untersuchten Proben wurde die Prüfkraft auf den Maximalwert von 200 gf (entsprechend 1,96 N) gesetzt, um möglichst große Eindrücke zu erzeugen. Dieses Vorgehen minimiert den Meßfehler bei zu kleinen Eindrücken, da der Eindruck bei kleiner Prüfkraft aufgrund mangelnder Mikroskopauflösung nur sehr klein erscheinen würde.

Für die Haltezeit wurden nach [Mot56] 5 s gewählt, da durch geringere Haltezeiten die Wahrscheinlichkeit von Erschütterungen gesenkt werden kann. Vibrationen sind aufgrund der Aktivitäten im Gebäude leider kaum vermeidbar, ihr Einfluß ist jedoch nicht zu unterschätzen. Durch Schwingungen des Mikroskops kommt es auch dazu, daß der Sensor mit höherer Kraft als nur der Prüfkraft auf die Probe gedrückt wird. Dies hat zur Folge, daß effektiv eine höhere Kraft auf die Probe einwirkt – zumindest kurzzeitig. Da dieser Einfluß weder konstant noch durch das vorhandene System erfaßbar ist, wurde versucht, durch kurze Haltezeit diesen Einfluß weitestgehend zu minimieren.

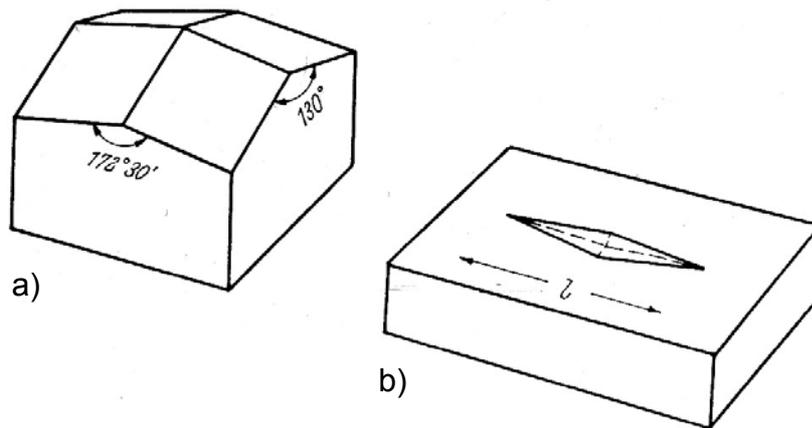


Bild 3-6 a) Skizze eines Eindringkörpers zur Härteprüfung nach Knoop
b) damit erzeugter Eindruck [Mot56]

Bei der Wahl der Absenkgeschwindigkeit, d.h. der Geschwindigkeit mit der der Prüfkörper in die Probe bis zum Erreichen der Prüfkraft eindringt, wurde ähnlich verfahren. Hier wurden 40 gf/s (entsprechend 0,39 N/s) gewählt, was bei einer Prüfkraft von 200 gf zu einer Dauer von 5 s führt von Berührung des Prüfkörpers mit der Probe bis zur Aufbringung der Prüfkraft.

Zur Bestimmung der Härte blendet das Gerät in das Mikroskopbild zwei Linien ein, über deren Abstand im Bild und die kalibrierte Vergrößerung die tatsächliche Länge d der längeren Diagonale des Eindrucks ermittelt wird (siehe Bild 3-7). Die projizierte Fläche des Eindrucks in mm^2 wird mit A_K bezeichnet. Der Abstand der Linien kann durch ein an das MHT-4 angeschlossenes Zeigergerät (Maus) eingestellt werden. Hieraus lässt sich nach der Formel

$$\frac{0,102 \cdot F}{A_K} = 0,102 \cdot \frac{F}{d^2 \cdot 0,5 \cdot \left(\cot \frac{172^\circ 30'}{2} \cdot \tan \frac{130^\circ}{2} \right)} =$$

(Gleichung 3-1)

$$= 0,102 \cdot \frac{F}{0,07028 \cdot d^2} = 14,229 \cdot 10^6 \cdot \frac{0,102 \cdot F}{d^2}$$

die Härte nach Knoop errechnen.



Bild 3-7 Gefügebild eines 100Cr6 mit Härteeindruck nach Knoop und Einblendung der Linien zum Ausmessen des Abdrucks am MHT-4 (00AF_00684)

Um die Länge der Eindruckdiagonalen zu bestimmen, war es nötig, das Gerät mittels eines Objektmikrometers zu kalibrieren. Diese wurde hierzu im durch den MHT-4 gelieferten Bild bei den in Frage kommenden Mikroskopvergrößerungen betrachtet. Die Linien zur Abstandsmessung wurden dabei auf die größtmögliche Länge des Objektmikrometers eingestellt und die dann am MHT-4 gelieferte Länge ggf. am Gerät korrigiert.

Bei der Messung der Härte wurde darauf geachtet, daß die längere Diagonale des Knoop-Eindringkörpers senkrecht zur Zeiligkeit des Materials eingesetzt wurde, um eine Verfälschung der Ergebnisse möglichst zu vermeiden. Hierdurch sollte erreicht werden, daß die Härte nicht nur in der entsprechenden Zeile gemessen wird, sondern daß möglichst auch die benachbarten Zeilen Einfluß auf den Härtewert haben, um so einen über das gesamte Mikroskopbild gemittelten Härtewert zu erhalten.

3.5 Simulator des Neuronalen Netzwerks

Die Korrelation zwischen Haralick-Parametern und Mikrohärtigkeit wurde mit Hilfe eines speziell trainierten Neuronalen Netzwerks [Kra90] hergestellt, indem die gemessenen

Haralick-Parameter zusammen mit der entsprechenden gemessenen Härte dem Netzwerk übergeben wurden und daraus ein Wert für die Härte vom Netzwerk errechnet wurde.

Zum Einsatz kam der „Stuttgart Neural Network Simulator“ (SNNS) in der Version 4.1 [SNN90], um eine Korrelation zwischen den Haralick-Parametern und der entsprechenden Härte herzustellen. Es handelt sich hierbei um eine am Lehrstuhl für Informatik der Universität Stuttgart entwickelte Softwarelösung, die es gestattet, unterschiedlichste Neuronale Netzwerke zu erstellen und zu simulieren.

Hierin wurde ein Vorwärtsvermittlungsnetzwerk mit insgesamt 19 Neuronen erstellt (siehe Bild 3-8). 11 Neuronen bilden die Eingabeschicht. Sie nehmen die von der Bildanalysesoftware bestimmten Haram-Parameter auf und geben diese Werte an die aus 7 Neuronen bestehende Zwischenschicht weiter. Als Ausgabe diene ein einzelnes Neuron. Dieses soll den Härtewert entsprechend der Aktivierung der Neuronen der Eingabeschicht darstellen.

Als Kontrollstrategie (update function) für dieses Netz wurde die Funktion „Topological_Order“ ausgewählt. Diese Methode wurde in [SNN90] als wohl vorteilhaftester Modus für Vorwärtsvermittlungsnetze bezeichnet. Die Abarbeitung erfolgt hierbei schichtweise, wobei mit der Eingabeschicht begonnen wird, daraufhin die Zwischenschicht bearbeitet wird und abschließend der Wert in der Ausgabeschicht zur Verfügung gestellt wird.

Beim Training des Netzwerkes ist es notwendig, einen Startwert der Gewichte für den ersten Zyklus festzulegen. Dies geschieht durch die Initialisierungsfunktion „Randomize_Weights“. Sie setzt Zufallswerte für sämtliche Gewichtungen zwischen den Zellen fest. Der Wertebereich der Zufallszahlen wird durch das Intervall $[\alpha; \beta]$ gegeben, der im Control-Dialog des Simulators festgelegt werden kann. Standardmäßig wird das Intervall $[-1.0; 1.0]$ gewählt. Diese Werte wurden beim Training auch beibehalten.

Als Adaptionregel (learning function) kam die Funktion Rprop (Resilient back propagation) zum Einsatz. Sie dient zur Fehlerrückvermittlung beim Vergleich des beim Training zur Verfügung gestellten Sollwerts mit dem vom Netzwerk errechneten Ist-Wert der Ausgabeschicht. Hiermit wird eine Anpassung der Gewichtstruktur des kompletten Netzwerkes erreicht, indem der Fehler an der Ausgabeschicht errechnet wird. Nach Korrektur der Gewichte zwischen der Ausgabeschicht und der Zwischenschicht ist es dann

möglich, die Gewichte zwischen der Eingabeschicht und der Zwischenschicht anzupassen. Die Anpassung verläuft so, daß die Gewichtungen um einen Betrag $\Delta_{ij}^{(t)}$ (update-value) geändert werden. Die Richtung der Änderung, d.h. ob der Faktor addiert oder subtrahiert wird, hängt von der Gradienteninformation des Trainingsdatensatzes ab. Die Modifikation des update-values geschieht daraufhin, falls bei Änderung des Gewichts im Vergleich zur letzten Änderung das Vorzeichen gewechselt wurde. Dies bedeutet, daß die letzte Modifikation des Gewichts zu groß war und so der optimale Wert übersprungen wurde. In diesem Fall wird der update-value mit einem konstanten Faktor $\eta^- \in]0; 1[$ multipliziert. Wird das Vorzeichen allerdings nicht gewechselt, so wird der update-value mit einem ebenfalls konstanten Wert $\eta^+ > 1$ multipliziert, um die Konvergenz der Gewichtung hin zum Optimum zu beschleunigen.

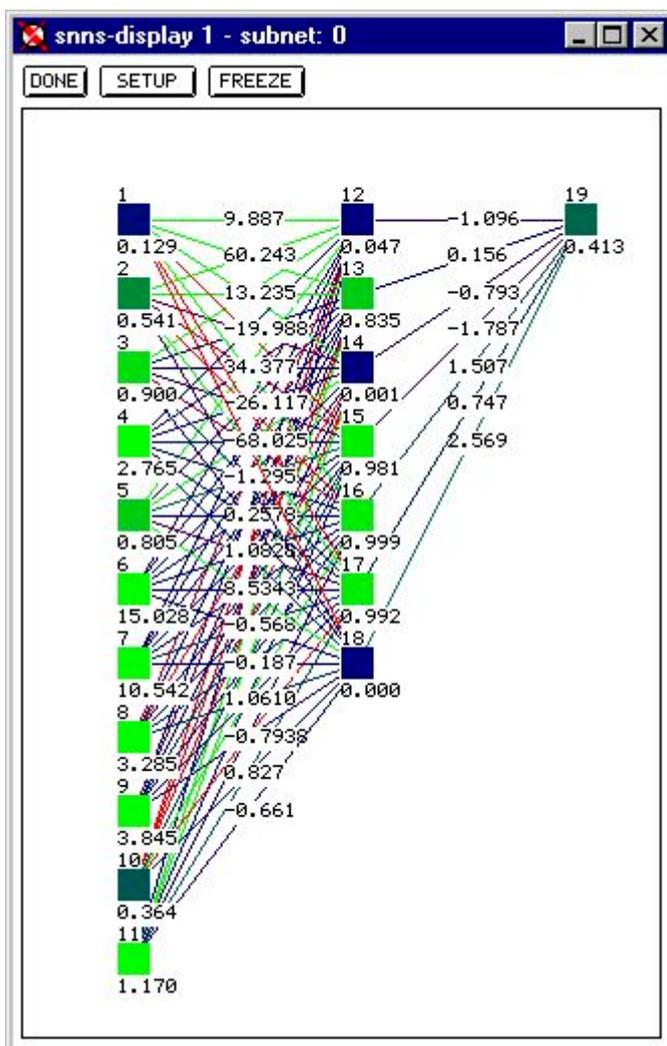


Bild 3-8 schematische Darstellung des Neuronalen Netzwerks im SNNS für den Werkstoff 100Cr6

3.5.1 Struktur der im SNNS verwendeten Datensätze

Die Übergabe der Daten an den SNNS erfolgt mittels eines speziellen Dateiformats. Die Trainings- oder Testdatensätze setzen sich aus einem Kopf- und einem Datenbereich zusammen (siehe Bild 3-9). Im Kopfbereich werden allgemeine Spezifikationen der vorliegenden Datei aufgeführt. Hier befinden sich zuerst die Angaben über die genaue Version des SNNS, für die die Datei erstellt wurde. In der folgenden Zeile werden Datum und Uhrzeit der Erstellung der Datei aufgeführt. Daran schließt sich die Anzahl der enthaltenen Datensätze („No. of patterns“) an. Als nächstes ist die Angabe über die Zahl der Eingabewerte („No. of input units“) vorgesehen. Abgeschlossen werden die Kopfdaten durch die Zahl der Ausgabewerte („No. of output units“). Im Falle der Testdaten ist dieser Wert auf Null zu setzen.

Im folgenden Datenbereich sind die Eingabewerte und ggf. die Ausgabewerte aufgeführt. Hierzu werden die Eingabewerte in einer Zeile durch Leerzeichen getrennt aufgeführt. In der nächsten Zeile wird der dazu passende Ausgabewert angegeben. Die Datensätze können ggf. mit Kommentaren versehen werden, was durch vorangestelltes Doppelkreuz # am Zeilenanfang gekennzeichnet wird. Diese Zeile wird somit als Kommentar betrachtet und vom Neuronalen Netzwerk nicht berücksichtigt.

```
SNNS pattern definition file V1.4
generated at 02.08.00, 11:57:59

No. of patterns : 50
No. of input units : 11
No. of output units : 1

#pattern 1
0.177567834506425 0.717135366115974 0.850424200876622 2.39074848812287 0.787937460739177
0.44895
#pattern 2
0.188583001402439 0.654267576611515 0.830809643082658 1.92936921300844 0.803263402687669
0.44505
#pattern 3
0.21873332307062 0.599646605656481 0.826738141290485 1.72301131718299 0.816145083860918
0.4299
#pattern 4
0.184283902034367 0.64944356045419 0.833695638788029 1.9513135512821 0.800976813782004 1
0.4374
#pattern 5
0.170171275238109 0.624439110183613 0.849602772587828 2.04749593170831 0.805246686610052
0.4299
#pattern 6
0.194449829826105 0.488543956329688 0.839177180896286 1.53008486876395 0.830437355738611
0.4299
#pattern 7
0.192606617513244 0.556720384313652 0.842633572133998 1.7826323416057 0.821834252428171
0.4412
```

Bild 3-9 Struktur eines Datensatzes für den SNNS

4 Ergebnisse

4.1 Proben aus dem Werkstoff C45

4.1.1 Einfluß der Präparation auf die Messung der Texturparameter

Die in Wasser abgeschreckten Proben AF4_x wurden im Vergleich zu den identisch wärmebehandelten Proben AF1_x elektrolytisch poliert. Da es sich bei dem hierzu eingesetzten Gerät um ein Leihgabe der Fa. Struers handelte und daher bislang keinerlei Erfahrungen hiermit bestanden, sollten die entsprechenden Geräteparameter in einer ersten Versuchsreihe an speziell angefertigten Proben ermittelt werden.

Durch eine im Gerät eingebaute Funktion kann eine für die Kombination Werkstoff – Elektrolyt typische Stromdichte-Potential-Kurve aufgezeichnet werden. Hieraus läßt sich die optimale Polierspannung ermitteln. Für die Präparation des Stahls C45 wurde so eine Polierspannung von 35 V ermittelt.

Es wurde der Elektrolyt E5 gewählt, um dem großen Schlacken-Anteil im Gefüge gerecht zu werden.

In Tabelle 4-1 wurden die an den Proben AFW2_3_7 und AFW_2_3_9 gemessenen Haralick-Parameter in Form der Mittelwerte über die gesamte Probenoberfläche gegenübergestellt. Bei vergleichbarem Ätzgrad der beiden durch unterschiedliche Methoden polierten Proben zeigen sich jedoch Unterschiede in einigen Parametern. So sind beispielsweise in den Parametern 6 und 7 deutliche Unterschiede zu erkennen. Die anderen Meßwerte sind miteinander betragsmäßig etwa vergleichbar.

Probe	Mittelwert des Parameters Haram										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
AFW2_3_7	0,10	0,60	0,87	2,24	0,78	12,97	8,36	3,35	4,00	0,38	1,22
AFW2_3_9	0,08	0,67	0,87	2,65	0,76	11,80	9,91	3,51	4,23	0,41	1,27

Tabelle 4-1 Vergleich der Poliermethode anhand der Mittelwerte der Haralick-Parameter an den Proben AFW2_3_7 und AFW2_3_9 (C45, 860°C/Wasser)

Im direkten Vergleich eines Parameters auf den beiden Proben (siehe Bild 4-1) zeigt sich ein entscheidender Unterschied zwischen den beiden Proben und damit zwischen den

beiden Poliermethoden. Während der Parameter der mechanisch präparierten Probe AFW2_3_7 um einen relativ konstanten Mittelwert schwankt, ändert sich der Mittelwert auf der elektrolytisch polierten Probe AFW2_3_9 erheblich. Dies wird in Bild 4-1 durch eine polynomische Ausgleichsgerade dritten Grades verdeutlicht.

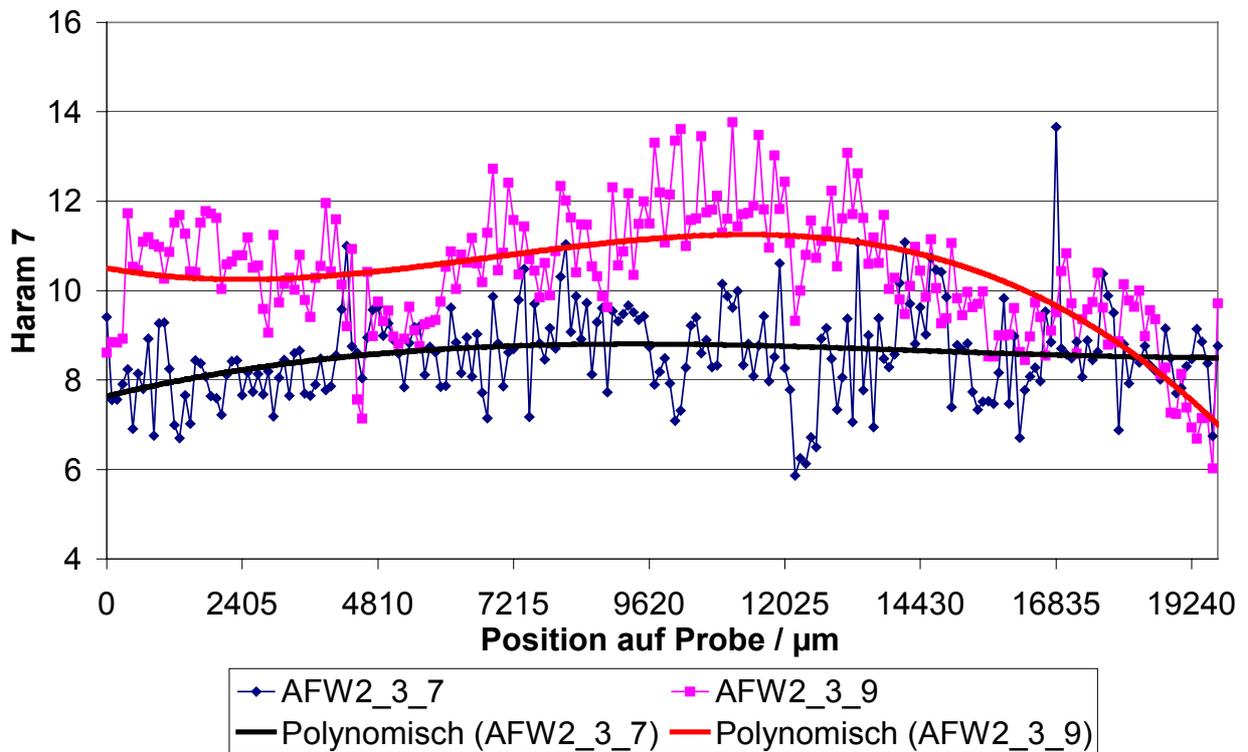


Bild 4-1 Darstellung des Verlaufs des Texturparameters Haram7 über die Oberfläche der Proben AFW2_3_7 und AFW2_3_9 (C45, 860°C/Wasser)

4.1.2 Vergleich der Haralick-Parameter bei Proben mit unterschiedlicher Wärmebehandlung

Nach dem Abscannen der Proben AFx_y zeigte sich ein z.T. signifikanter Unterschied in der Höhe der einzelnen Haralick-Parameter (siehe Tabelle 4-2 und Bild 4-2, vgl. Bild 4-11). Hierbei ist zu erkennen, daß bei einigen Parametern eine deutliche Abhängigkeit des Betrags vom verwendeten Abkühlmedium besteht. So trennt der Parameter Haram7 beispielsweise die Wärmebehandlungszustände: während die in Wasser abgeschreckten Proben einen Wert von ca. 6 aufweisen, haben die in Öl abgeschreckten Proben einen Wert um 29; die an Luft abgekühlten Proben hingegen liegen mit einem Wert um 20 zwischen den beiden anderen Zuständen.

Andere Parameter, wie z.B. Haram6, liefern bei sämtlichen Proben nahezu identische Werte.

Haram	Mittelwert des Parameters an Probe								
	860°C/Wasser			860°C/Öl			860°C/Luft		
	AF1_1	AF1_2	AF1_3	AF2_1	AF2_2	AF2_3	AF3_1	AF3_2	AF3_3
1	0,147	0,204	0,169	0,036	0,032	0,034	0,100	0,090	0,090
3	0,859	0,851	0,850	0,910	0,906	0,909	0,929	0,929	0,937
4	1,915	1,474	1,641	7,507	7,711	7,980	5,029	5,367	5,920
6	16,251	16,875	16,155	10,016	10,726	10,632	14,941	16,209	12,883
7	7,132	5,468	6,083	28,684	29,389	30,468	19,410	20,713	22,938

Tabelle 4-2 Mittelwerte der Haralick-Parameter gemessen entlang der Mittelachse der Proben AFx_y

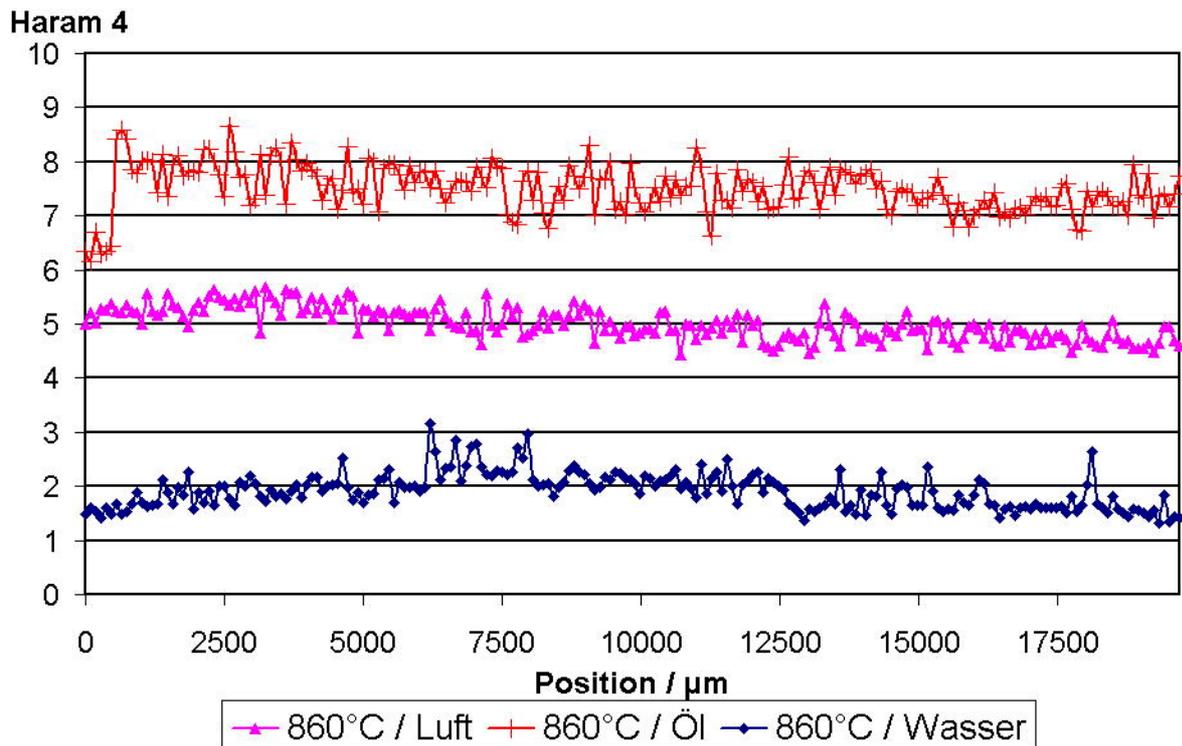


Bild 4-2 Vergleich des Parameters Haram4 in Abhängigkeit des Abkühlmediums an den C45-Proben AF1_1 (860°C/Wasser), AF2_1 (860°C/Öl) und AF3_1 (860°C/Luft)

4.1.3 Verteilung der Haralick-Parameter über die Oberfläche

Bei der Betrachtung der Parameter über die gesamte Oberfläche zeigte sich ein ähnliches Bild wie in Abschnitt 4.1.2 (siehe Tabelle 4-3). Die Höhe der Parameter ist vergleichbar. Jedoch zeigt sich bei dieser großflächigen Untersuchung die Zeiligkeit des verwendeten Werkstoffes sehr stark (siehe Bild 5-1), was sich in einer senkrechten Streckung der Bereiche im Diagramm ausdrückt. Dies führt zu einer großen Schwankung der Parameter über die Oberfläche (siehe Bild 4-3). Ebenfalls gut zu erkennen sind Gebiete, in denen die Abkühlung langsamer verlief, als am Rand der Probe (hellblaue Bereiche in der Probenmitte). An der Ecke der Probe ist der Parameter Haram1 mit einem Wert im Bereich zwischen 0,2 und 0,25 höher als in der Probenmitte, wo der Parameter im Bereich zwischen 0,15 und 0,2 liegt.

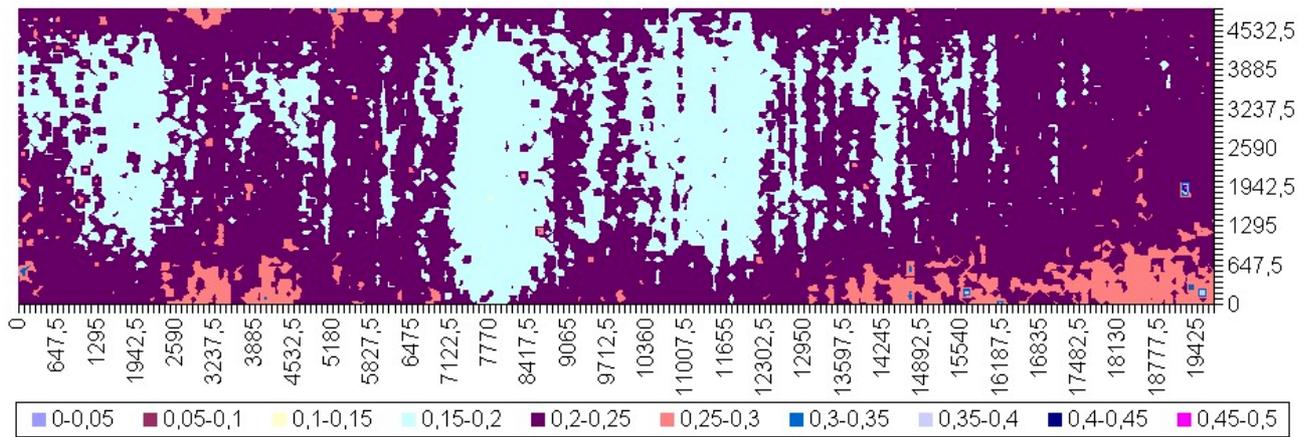


Bild 4-3 Darstellung des Parameters Haram1 über die Oberfläche der Probe AF1_2 (C45, 860°C/Wasser)

Bei der grafischen Darstellung der Haralick-Parameter und der entsprechenden Standardabweichungen zeigen sich große Unterschiede zwischen den Parametern und auch zwischen den einzelnen Proben. Der Mittelwert des Parameters über die Probenoberfläche wird durch die Säulenhöhe repräsentiert, die Standardabweichung durch die senkrechten Linien am oberen Ende der Säulen, wobei die Länge der Linie der doppelten Standardabweichung entspricht.

Haram	AF1_1	AF1_2	AF1_3	AF2_1	AF2_2	AF2_3	AF3_1	AF3_2	AF3_3
1	0,154	0,211	0,172	0,035	0,032	0,033	0,099	0,090	0,090
2	0,494	0,403	0,464	1,351	1,472	1,463	0,714	0,762	0,741
3	0,847	0,840	0,838	0,909	0,903	0,907	0,929	0,929	0,937
4	1,664	1,302	1,464	7,458	7,641	7,896	5,068	5,418	5,946
5	0,814	0,844	0,823	0,673	0,659	0,661	0,788	0,784	0,778
6	16,300	16,869	16,183	9,968	10,766	10,556	14,903	16,185	12,876
7	6,164	4,807	5,394	28,485	29,093	30,122	19,558	20,915	23,042
8	2,993	2,692	2,867	4,242	4,281	4,269	3,585	3,692	3,731
9	3,512	3,107	3,354	5,349	5,455	5,426	4,280	4,413	4,441
10	0,336	0,293	0,322	0,746	0,800	0,800	0,485	0,519	0,490
11	1,117	1,014	1,089	1,629	1,678	1,674	1,290	1,318	1,314

Tabelle 4-3 Mittelwerte der Haralick-Parameter gemessen an den Proben AF1_x, AF2_x und AF3_x

Haram	AF1_1	AF1_2	AF1_3	AF2_1	AF2_2	AF2_3	AF3_1	AF3_2	AF3_3
1	0,025	0,024	0,021	0,004	0,003	0,004	0,017	0,012	0,012
2	0,068	0,063	0,049	0,153	0,128	0,141	0,079	0,081	0,082
3	0,019	0,022	0,018	0,009	0,007	0,009	0,008	0,007	0,008
4	0,406	0,320	0,288	0,575	0,560	0,839	0,492	0,436	0,513
5	0,017	0,015	0,012	0,018	0,015	0,015	0,015	0,014	0,015
6	0,567	0,352	0,354	0,987	1,045	1,367	0,509	0,486	0,600
7	1,566	1,228	1,106	2,213	2,171	3,265	1,933	1,705	2,035
8	0,172	0,143	0,132	0,057	0,042	0,066	0,100	0,0779	0,073
9	0,234	0,194	0,175	0,121	0,087	0,111	0,142	0,121	0,115
10	0,039	0,040	0,029	0,073	0,057	0,069	0,046	0,046	0,047
11	0,068	0,073	0,050	0,066	0,049	0,054	0,059	0,056	0,064

Tabelle 4-4 Standardabweichungen der Haralick-Parameter der Proben AF1_x, AF2_x und AF3_x

Der Parameter Haram9 zeigt beispielsweise nur relativ geringe Differenzen im Betrag zwischen den unterschiedlichen Gefügen, dafür sind aber die Standardabweichungen (angedeutet durch die Striche am oberen Ende der Balken) und damit die Streuungen um den Mittelwert sehr gering (siehe Bild 4-4).

Haram9

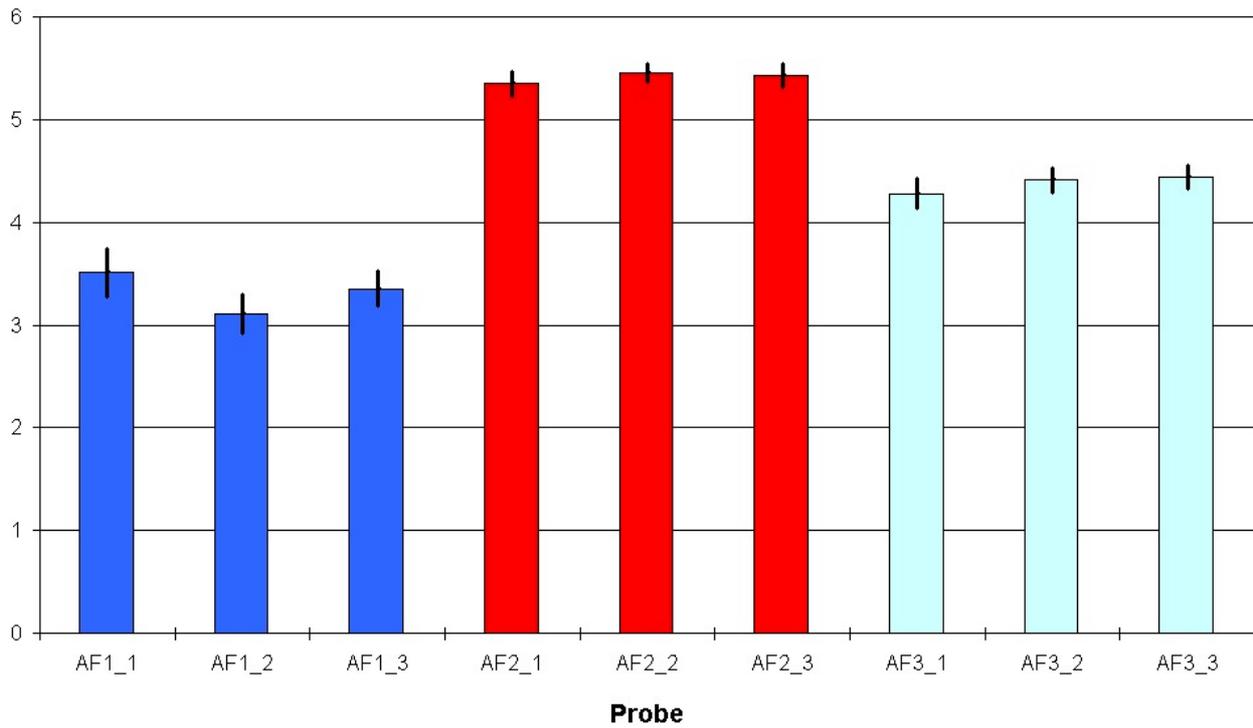


Bild 4-4 Vergleich des Parameters Haram9 und der dazugehörigen Standardabweichungen bei den Proben AF1_x (C45, 860°C/Wasser), AF2_x (C45, 860°C/Öl) und AF3_x (C45, 860°C/Luft)

Haram2

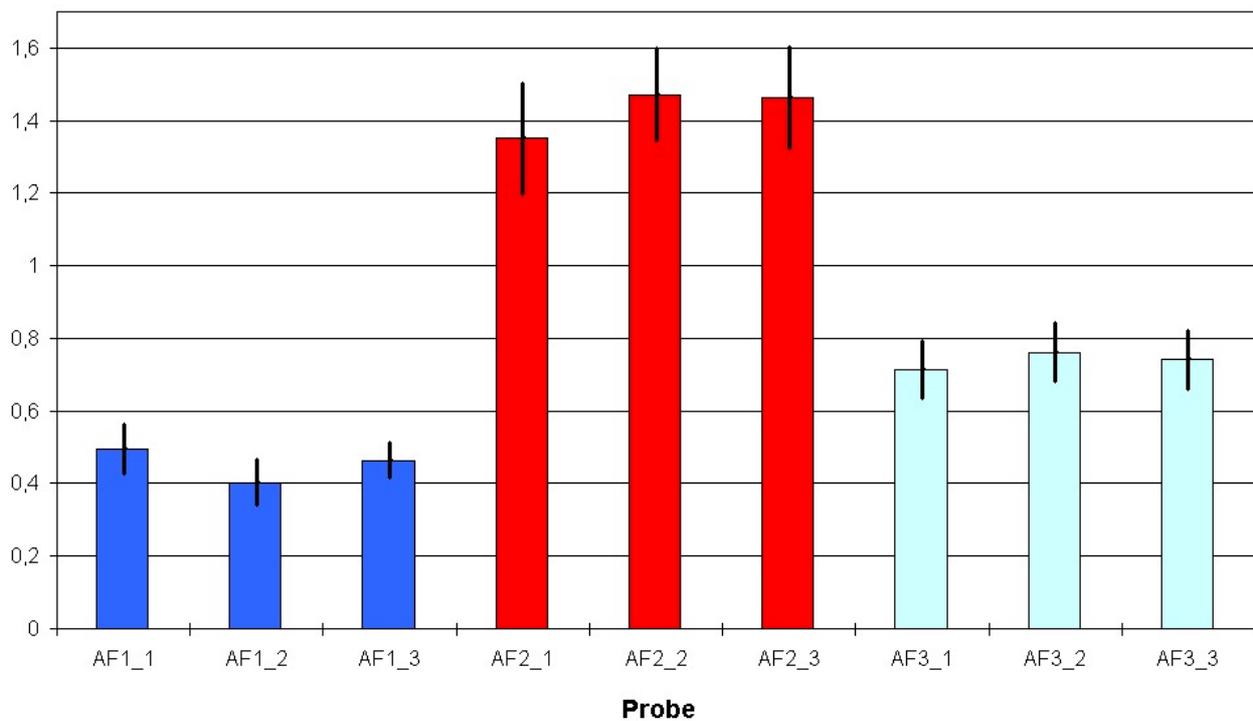


Bild 4-5 Vergleich des Parameters Haram2 und der dazugehörigen Standardabweichungen bei den Proben AF1_x (C45, 860°C/Wasser), AF2_x (C45, 860°C/Öl) und AF3_x (C45, 860°C/Luft)

Bei anderen Parametern stellt sich ein ganz anderes Bild ein. So z.B. bei dem Parameter Haram2 (siehe Bild 4-5). Hier läßt die Höhe des Parameters eine sehr gute Unterscheidung zwischen den Abkühlmedien zu, jedoch sind hier die Standardabweichung und der damit verbundene Fehler sehr groß.

4.1.4 Zusammenhang zwischen den Texturparametern und der Mikrohärt

Das eigentliche Ziel der Versuche war die Herstellung einer Korrelation zwischen den durch die Texturanalyse ermittelten Haralick-Parameter und mechanischen Werkstoffeigenschaften wie beispielsweise der Härte. Hierzu wurde an den Proben AF1_2 und AF3_1 , wie in Abschnitt 3.4 bereits dargestellt, nach Bestimmung der Haralick-Parameter an genau dieser Stelle in der Mitte des Mikroskopbildes die Mikrohärt nach Knoop gemessen (siehe Bild 4-6).

Beim Vergleich der Verläufe einzelner Haralick-Parameter mit dem entsprechenden Verlauf der Mikrohärt zeigt sich teilweise ein ähnlicher Verlauf (z.B. Parameter Haram1 in Bild 4-6).

In einem ersten Schritt sollte versucht werden, die Haralick-Parameter in direkte Verbindung mit der Härte zu bringen. Dazu wurden die Parameter gegen die Härte in einem Diagramm aufgetragen.

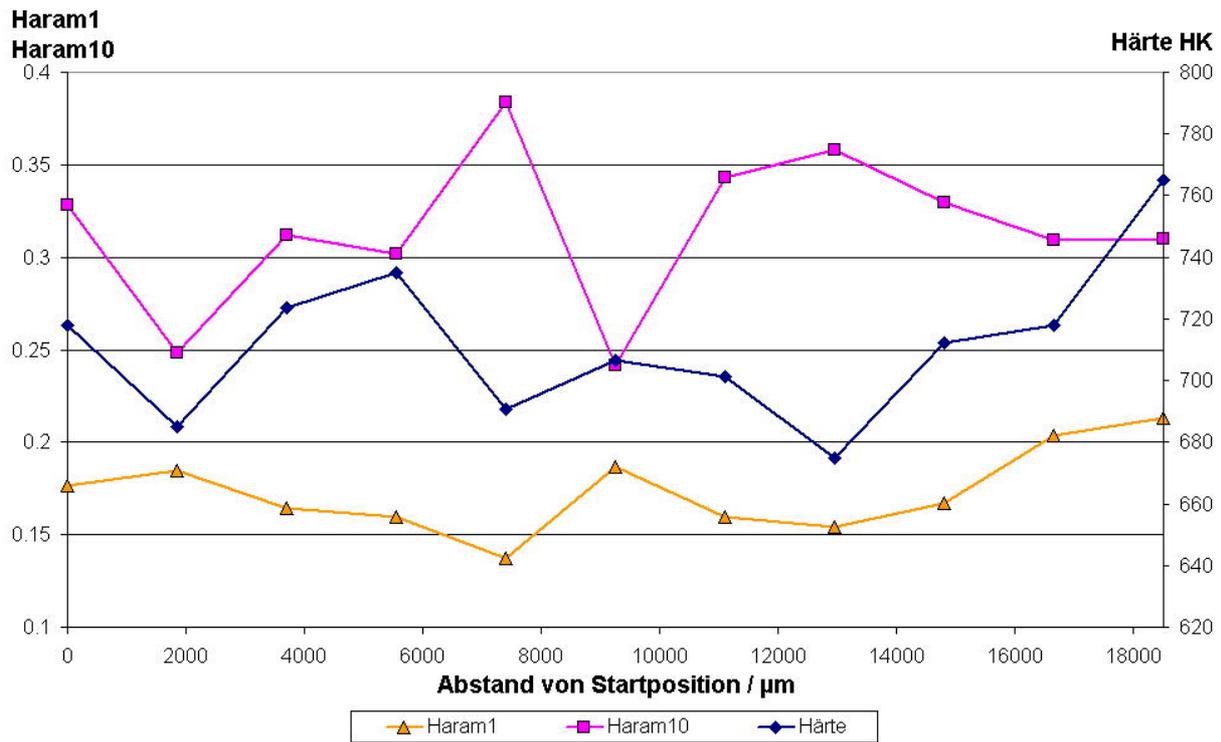


Bild 4-6 Vergleich der Texturparameter Haram1, Haram10 und der Mikrohärtigkeit HK an Probe AF1_2 (C45, 860°C/Wasser)

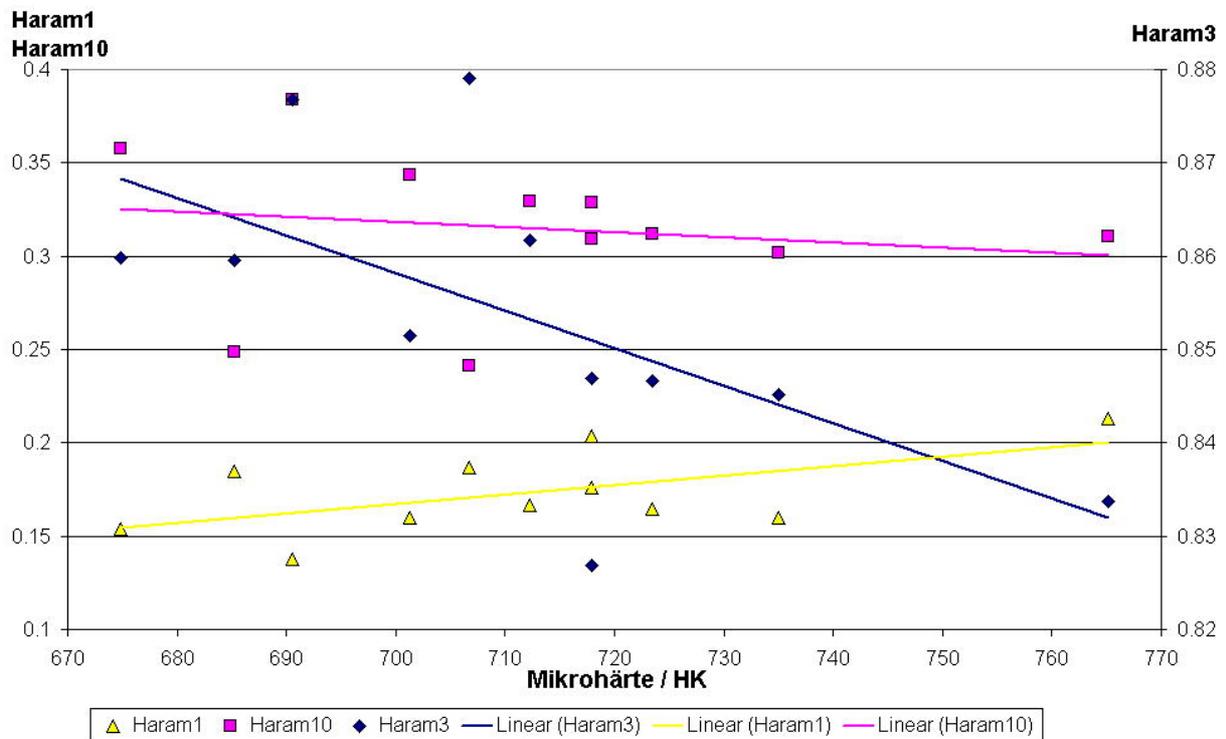


Bild 4-7 Korrelation zwischen den Texturparametern Haram1, Haram3 und Haram10 mit der Mikrohärtigkeit an der Probe AF1_2 (C45, 860°C/Wasser)

Hierbei zeigte sich jedoch kein linearer Zusammenhang (siehe Bild 4-7 und Bild 4-8), die Punkte lagen meist nicht einmal annähernd auf einer Geraden. Beim Vergleich mehrerer Proben miteinander zeigte sich, daß die Korrelation hier sogar einen ganz anderen Verlauf hat als bei der ersten Probe. Aus diesem Grund wurde nicht weiter verfolgt, eine direkte Korrelation zwischen den Haralick-Parametern und der Härte herzustellen. Es ist dabei jedoch zu beachten, daß das Gefüge aufgrund der Wärmebehandlung über die Oberfläche nur geringe Unterschiede aufweist, wodurch es auch nur zu geringen Härteschwankungen kommt. Die Aussage der in Bild 4-7 und Bild 4-8 dargestellten Kurven sollten daher nicht überbewertet werden, da die großen Schwankungen vermutlich auf den Meßfehler beruhen.

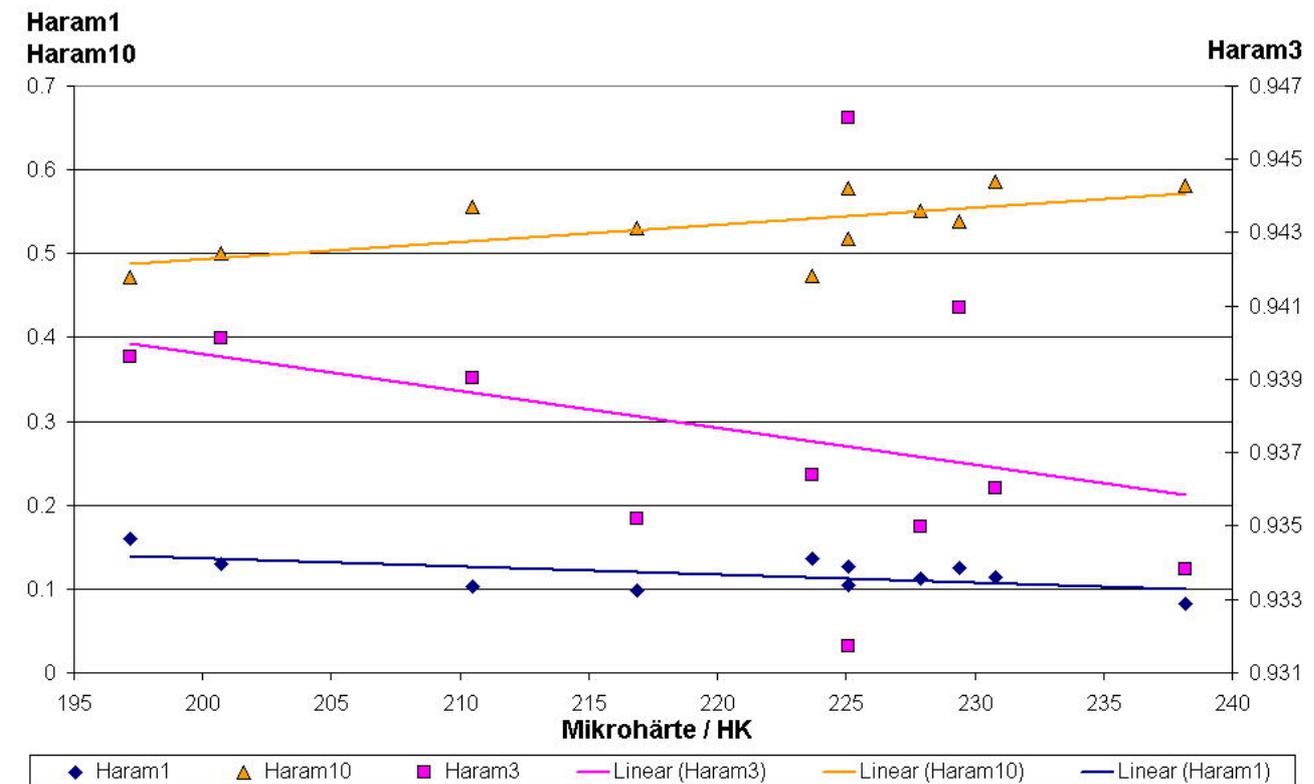


Bild 4-8 Korrelation zwischen den Texturparametern Haram1, Haram3 und Haram10 mit der Mikrohärte an der Probe AF3_1 (C45, 860°C/Luft)

In Vorarbeiten [Sch99, Sch00] wurde für den Stahl C45 bereits eine Korrelation zwischen Härte und Texturparametern über ein Neuronales Netzwerk hergestellt. Da die Härtemessung jedoch nach zwei verschiedenen, nicht miteinander vergleichbaren

Methoden durchgeführt worden ist, ist kein direkter Vergleich mit diesen Ergebnisse möglich. Von der Erstellung eines neuen Neuronalen Netzwerks mit den hier bestimmten Härtewerten nach Knoop wurde abgesehen, da die Proben aufgrund der durchgeführten Wärmebehandlung nur diskrete Gefügestände, wenn auch mit leichten Abweichungen vom erwarteten Idealzustand, aufwiesen. Idealerweise werden für das Training eines Neuronale Netzwerks Stirnabschreckproben nach Jominy verwendet, da hier ein kontinuierliches Spektrum aller bei Wärmebehandlungen zu erwartender Gefügestände des betrachteten Werkstoffs vorliegt.

4.2 Proben aus dem Werkstoff 100Cr6

4.2.1 Bestimmung der optimalen Mikroskopeinstellungen

Da am Werkstoff 100Cr6 bisher keine Untersuchungen mit den Methoden der Texturanalyse angestellt worden sind, mußten hier in einem ersten Schritt die optimalen Mikroskopeinstellungen bestimmt werden.

Zur Variation boten sich mehrere Einstellmöglichkeiten an:

- die Aperturblende
- die Gesichtsfeldblende
- die Lampenspannung

Bezeichnung	Aperturblende	Gesichtsfeldblende	Lampenspannung
ABganz_zu_GBhalb_5V	zu	halb	5 V
ABhalb_offen_GBhalb_5V	halb	halb	5 V
ABoffen_GBganz_auf_6V	offen	offen	6 V
ABoffen_GBhalb_4V	offen	halb	4 V
ABoffen_GBhalb_5V (Einst_wie_C45)	offen	halb	5 V
ABoffen_GBhalb_6V	offen	halb	6 V

Tabelle 4-5 Übersicht über die für Proben aus dem Wälzlagerstahl 100Cr6 getesteten Mikroskopeinstellungen

An der Stirnabschreckprobe TB1_2 aus 100Cr6 wurde eine Reihe längs der Probe mit verschiedenen Mikroskopeinstellungen (siehe Tabelle 4-5) abgefahren und jeweils die

Haralick-Parameter bestimmt. Anhand der daraus erstellten Diagramme sollten die optimalen Einstellungen ermittelt werden.

Es zeigte sich, daß die Varianten „ABganz_zu_GBhalb_5V“ und „ABoffen_GBhalb_4V“ stets sehr geringe Meßwerte zeigten. Dieses Verhalten ist der Auswertung nicht dienlich, da hier aufgrund von Meßungenauigkeiten große Schwankungen in den Werten hervorgerufen worden wären.

Die Variante „ABoffen_GBhalb_6V“ zeigte hingegen eine sehr starke Abhängigkeit der Haralick-Parameter vom Gefüge. Jedoch zeigten sich hier auch sehr große Schwankungen des Parameters, woraufhin diese Variante ebenfalls ausschied.

Haram10

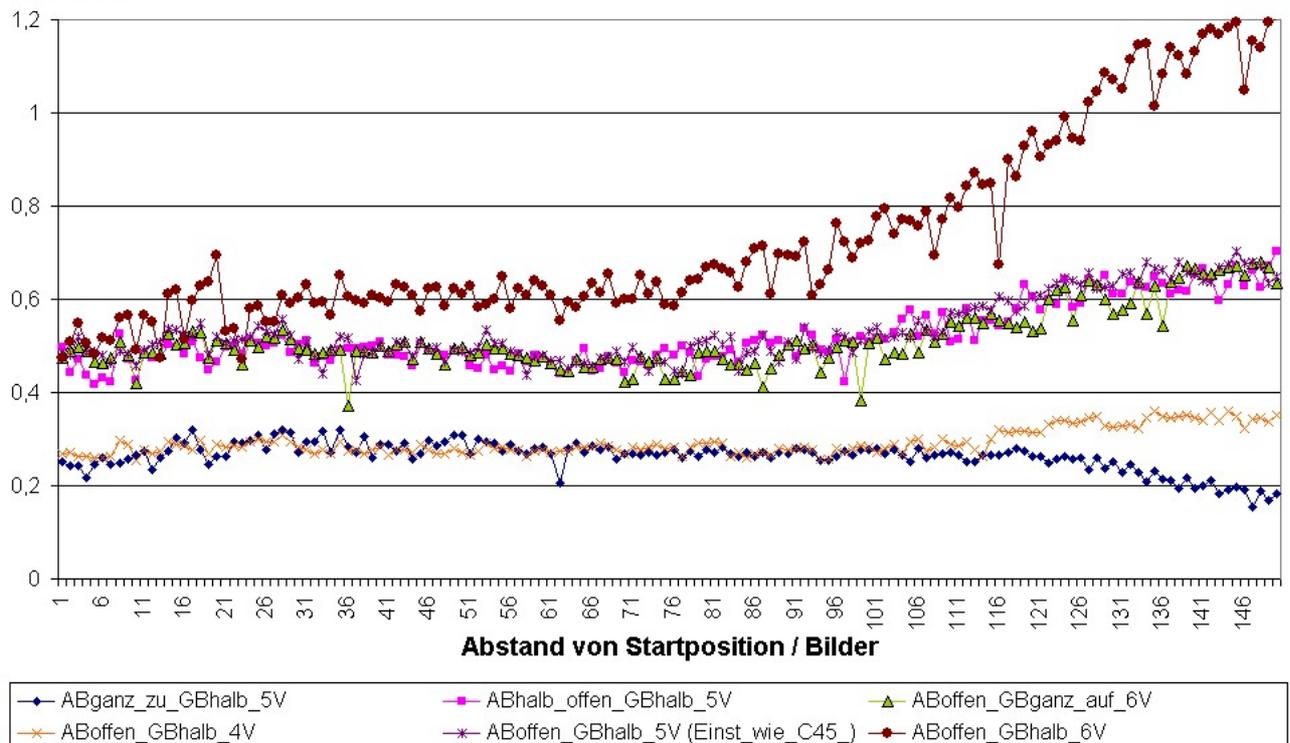


Bild 4-9 Vergleich der Mikroskopeinstellungen an der 100Cr6-Stirnabschreckprobe TB1_2 am Beispiel des Parameters Haram10

Ausgewählt wurde letztendlich die Variante „ABoffen_GBhalb_5V“. Zum einen zeigt sie eine gute Abhängigkeit der Texturparameter vom Gefüge, andererseits wurden genau diese Einstellungen bereits beim C45 verwendet. Dies sollte auch Verwechslungen zwischen den Einstellungen vorbeugen.

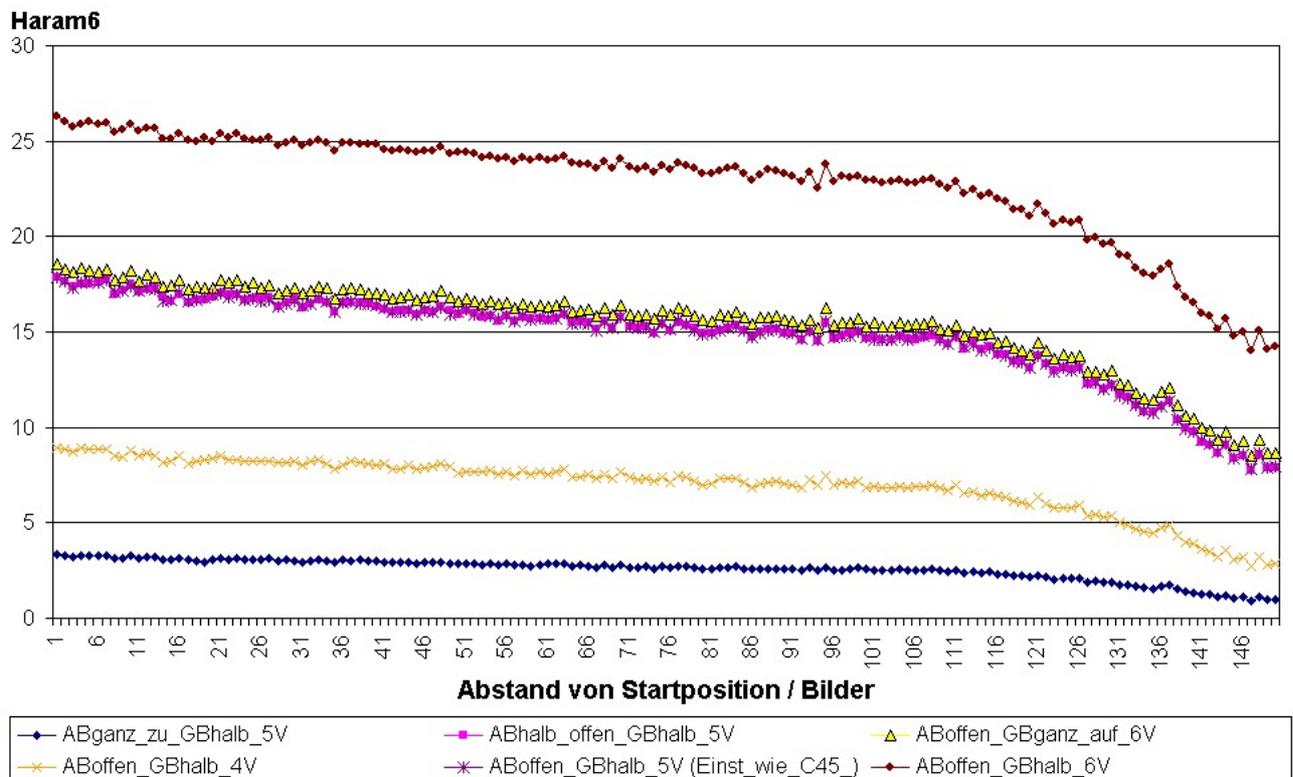


Bild 4-10 Vergleich der Mikroskopeinstellungen an der 100Cr6-Stirnabschreckprobe TB1_2 am Beispiel des Parameters Haram10

4.2.2 Einfluß der Abkühlgeschwindigkeit auf die Haralick-Parameter

Zur Untersuchung der Änderung der Werte der Texturparameter bei Abkühlung in unterschiedlichen Medien wurden wie in Abschnitt 3.3.2 beschrieben die 3 Proben 100Cr6H2O, 100Cr6Oel und 100Cr6Luft angefertigt.

An diesen Proben zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit der Parameter von der Abkühlung (siehe Bild 4-11, vgl. Bild 4-2). Allerdings sind die Werte bei identischem Abkühlmedium unterschiedlich. Während beim C45 die in Öl abgekühlten Proben die höchsten Werte aufweisen, haben beim 100Cr6 die an Luft abgekühlten Proben die höchsten Werte.

Haram 4

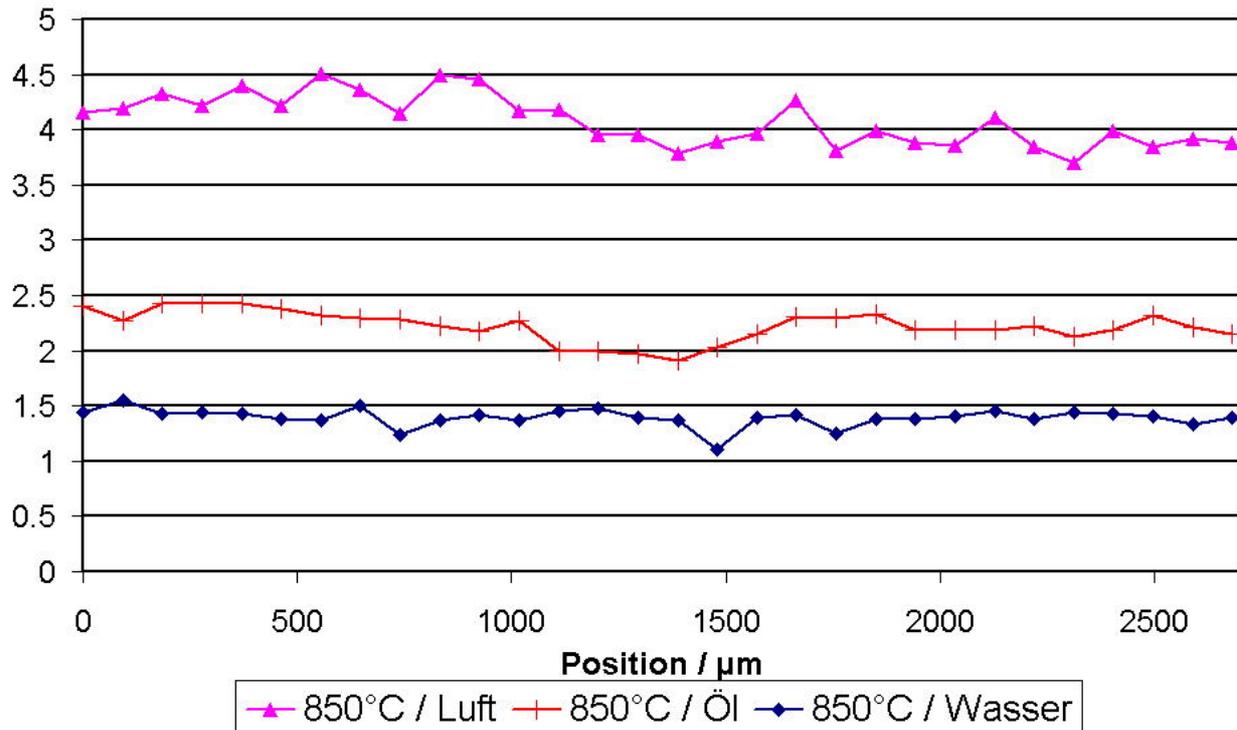


Bild 4-11 Vergleich verschiedener Abkühlgeschwindigkeiten von Austenitisierungstemperatur auf die Texturparameter an den Proben 100Cr6H2O, 100Cr6Oel und 100Cr6Luft

Haram	100Cr6H2O		100Cr6Oel		100Cr6Luft	
	Mittelwert	Std.abw.	Mittelwert	Std.abw.	Mittelwert	Std.abw.
1	0,1341	0,0316	0,0866	0,0103	0,0382	0,0027
3	0,7579	0,0298	0,8538	0,0174	0,8517	0,0188

4	1,4394	0,1920	2,2741	0,1960	4,2491	0,3311
6	17,5790	0,3179	16,9393	0,3850	13,8477	0,4255
7	5,0608	0,6809	8,4391	0,7607	15,7468	1,3197

Tabelle 4-6 Mittelwerte und Standardabweichungen der Haralick-Parameter gemessen an den Proben 100Cr6H2O, 100Cr6Oel und 100Cr6Luft

4.2.3 Verteilung der Texturparameter über die Oberfläche

An den Stirnabschreckproben TB1_x, z.B. am Parameter Haram4 an der Probe TB1_2 in Bild 4-12, zeigt sich die Textur der Proben gut in den Haralick-Parametern in einer lokalen, horizontalen Streckung einzelner Bereiche auf der Probenoberfläche.

Auffällig ist bei beiden Parametern jedoch, daß die Änderung des Parameters in der Nähe der Stirnfläche langsamer verläuft als in größerem Abstand.

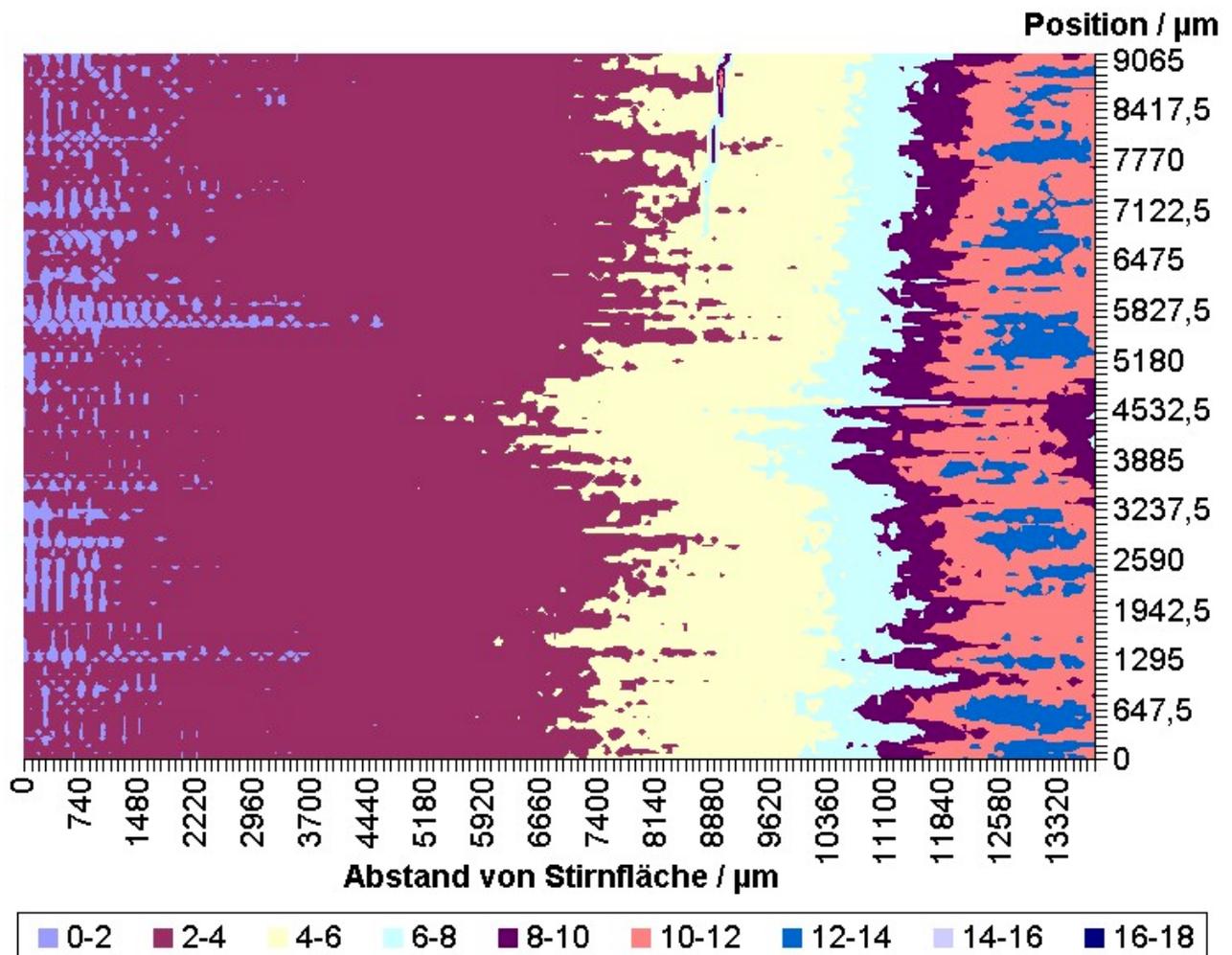


Bild 4-12 Verteilung des Parameters Haram4 auf der Oberfläche der Stirnabschreckprobe TB1_2 aus 100Cr6

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch bei Betrachtung des Parameters Haram 6 an der gleichen Probe. Hier ist die Tendenz des Parameters zwar fallend bei größer werdendem Abstand von Stirnfläche, jedoch zeigt sich die gleiche Struktur des großen Bereichs an der Stirnfläche, in dem sich der Parameter nur langsam ändert, während der Abfall ab einem Abstand von ca. 11 mm plötzlich schneller verläuft.

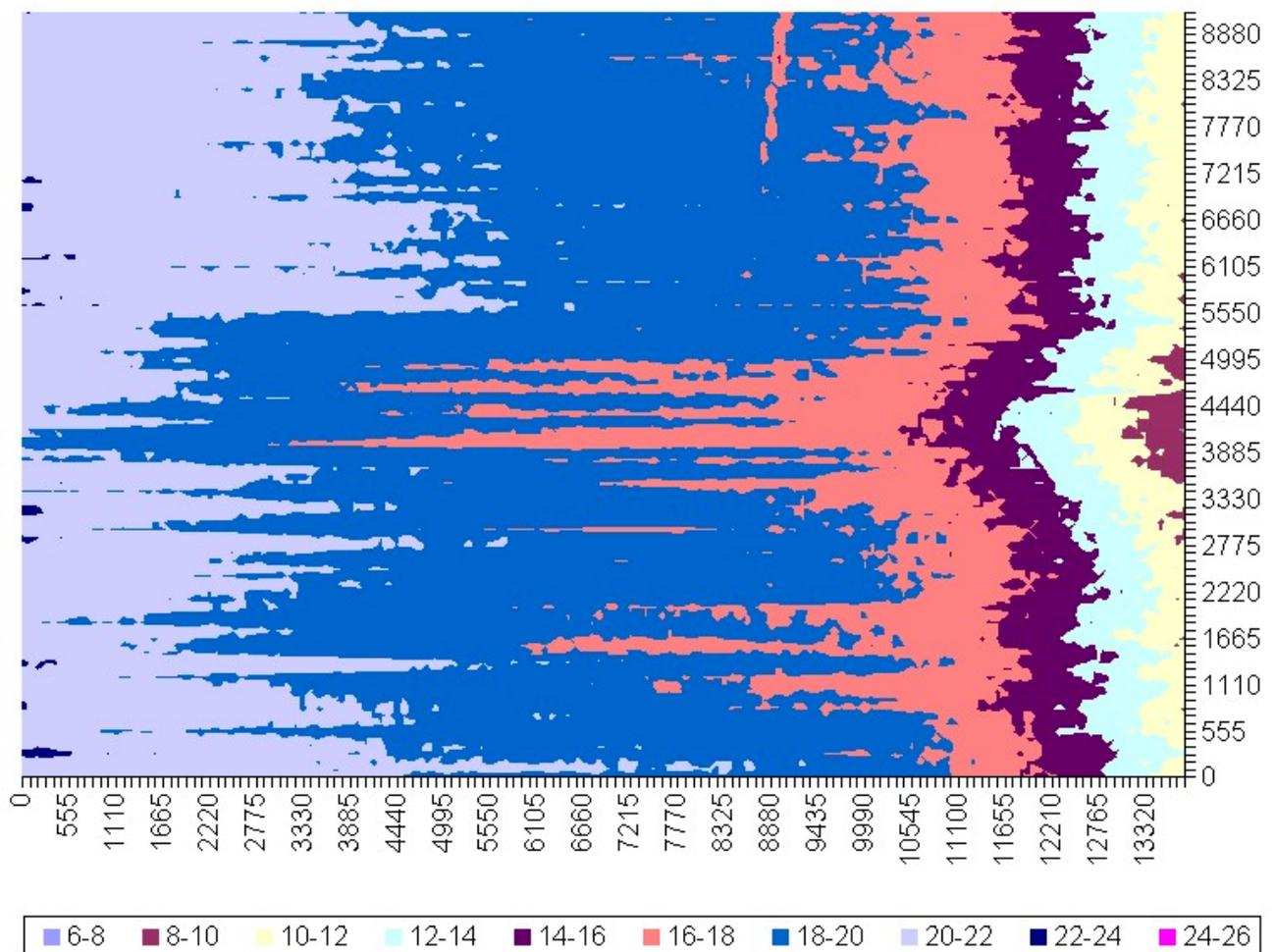


Bild 4-13 Verteilung des Parameters Haram6 auf der Oberfläche der 100Cr6-Stirnabschreckprobe TB1_2

Als Ursachen für dieses Verhalten des Parameters sind wieder die gleichen Argumente gültig. Die Parameter spiegeln also das Härteverhalten wider und zeigen die Übergänge von martensitischem Gefüge in ein perlitische mit all seinen Zwischenstufen.

4.2.4 Korrelation der Haralick-Parameter mit der Mikrohärt

Wie bereits in Abschnitt 4.1.4 durchgeführt, wurden auch beim Werkstoff 100Cr6 versucht, eine direkte Korrelation zwischen den Texturparametern und der Härte herzustellen. Wie in Bild 4-14 zu sehen ist, ähnelt der Verlauf des Parameters Haram6 sehr dem der Härte, während die anderen Parameter einen grundsätzlich anderen Verlauf als die Härte haben. Aus diesem Anlaß wurde wiederum versucht, eine direkte Korrelation zwischen einem Parameter, speziell Parameter Haram6, und der entsprechenden Mikrohärt herzustellen.

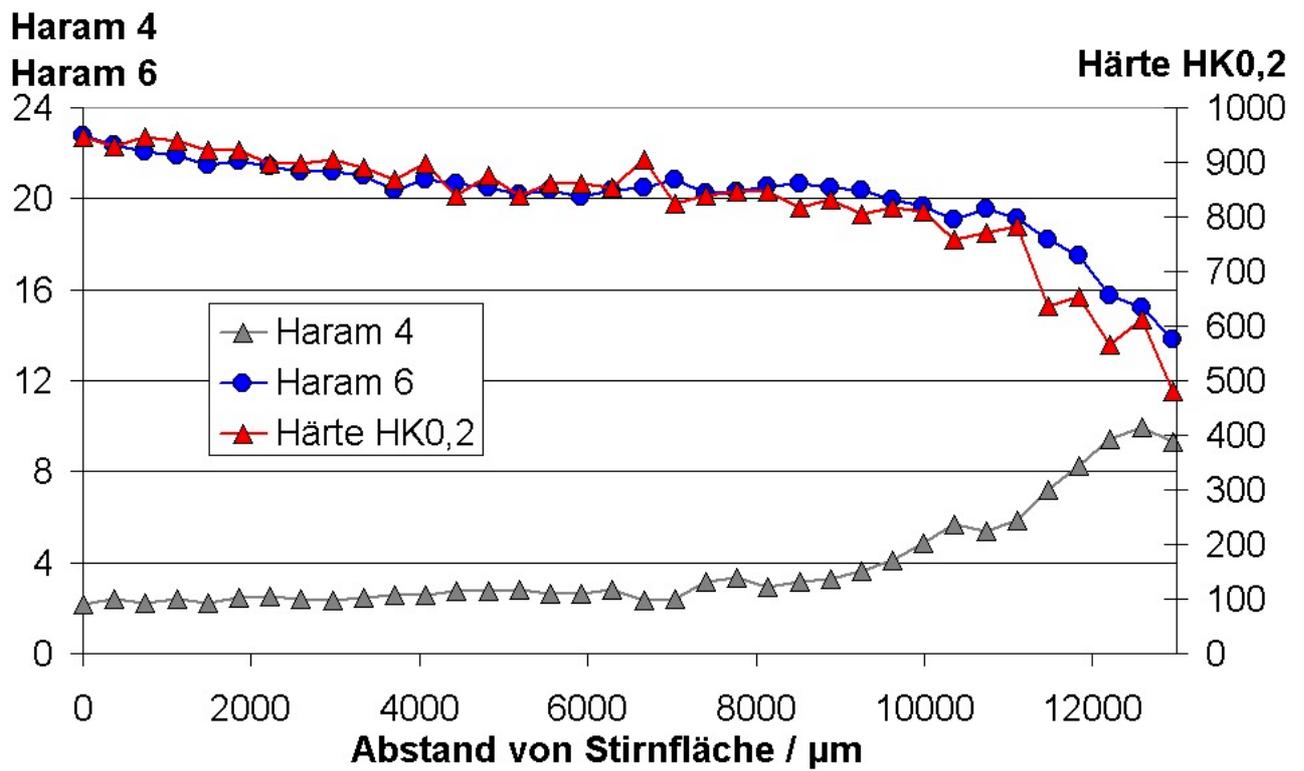


Bild 4-14 Verlauf der Texturparameter Haram4 und Haram6 im Vergleich zur Mikrohärtigkeit nach Knoop an der 100Cr6-Stirnabschreckprobe TB1_2

Bei Auftragung des Texturparameters Haram6 gegen die Härte für mehrere Meßreihen auf den Proben TB1_x zeigt sich für die meisten Meßreihen ein linearer Zusammenhang der beiden Meßgrößen. Einige Meßreihen weichen von diesem Verlauf jedoch stark ab, z.B. die Meßreihen TB1_2 oder TB1_2_3 in Bild 4-15. Bei genauerer Betrachtung einzelner Meßreihen in Bild 4-16 zeigt sich z.B., daß die Meßreihe TB1_2 keinen linearen Zusammenhang zwischen Mikrohärtigkeit und dem Texturparameter Haram6 liefert. Andere Meßreihen, z.B. TB1_1_3 auf Probe TB1_1 und TB1_2_4 auf Probe TB1_2, liefern zwar den linearen Zusammenhang, weisen aber eine relativ große Streuung um die Ausgleichsgerade auf. Die Abweichungen und die Tatsache der relativ geringen Steigung der Ausgleichsgeraden führen zu einem sehr großen Fehler bei der direkten Bestimmung der Härte aus dem Parameter Haram6.

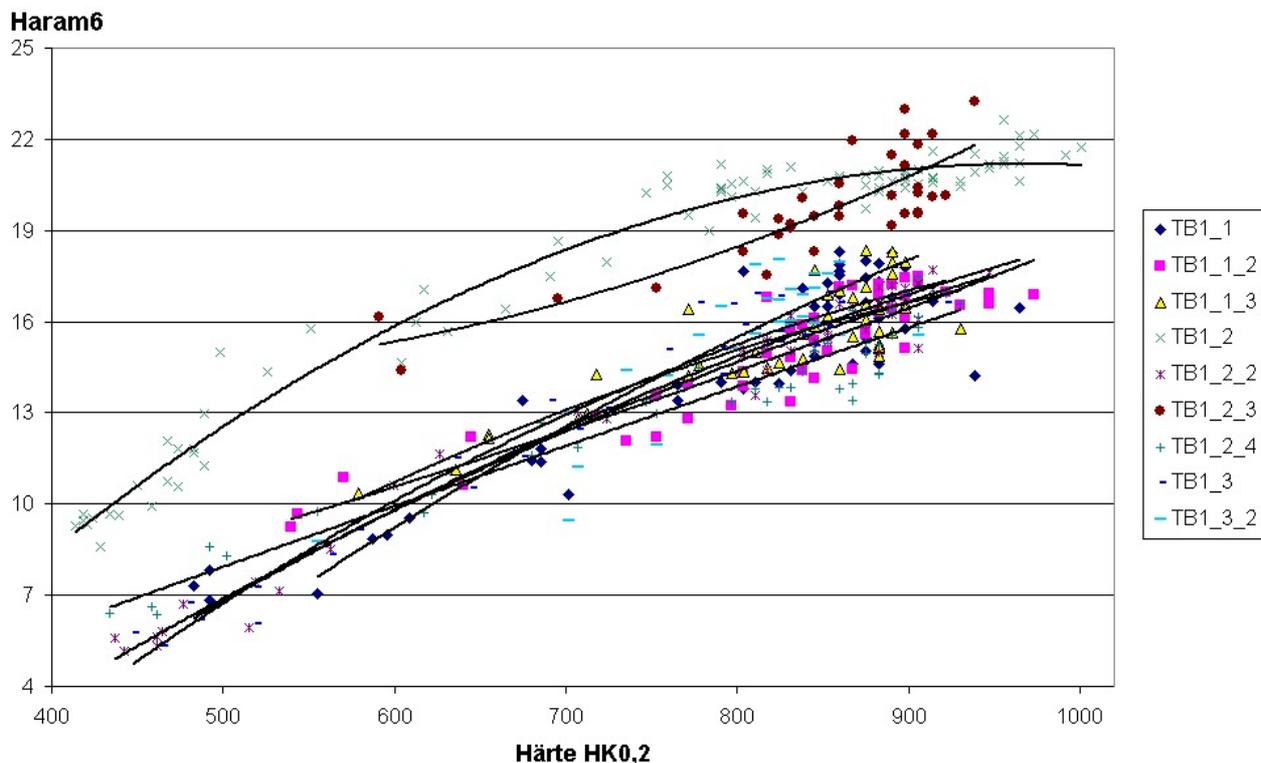


Bild 4-15 Korrelation der Mikrohärtigkeit nach Knoop mit dem Parameter Haram6 an mehreren Meßreihen der 3 100Cr6-Stirnabschreckproben TB1_x

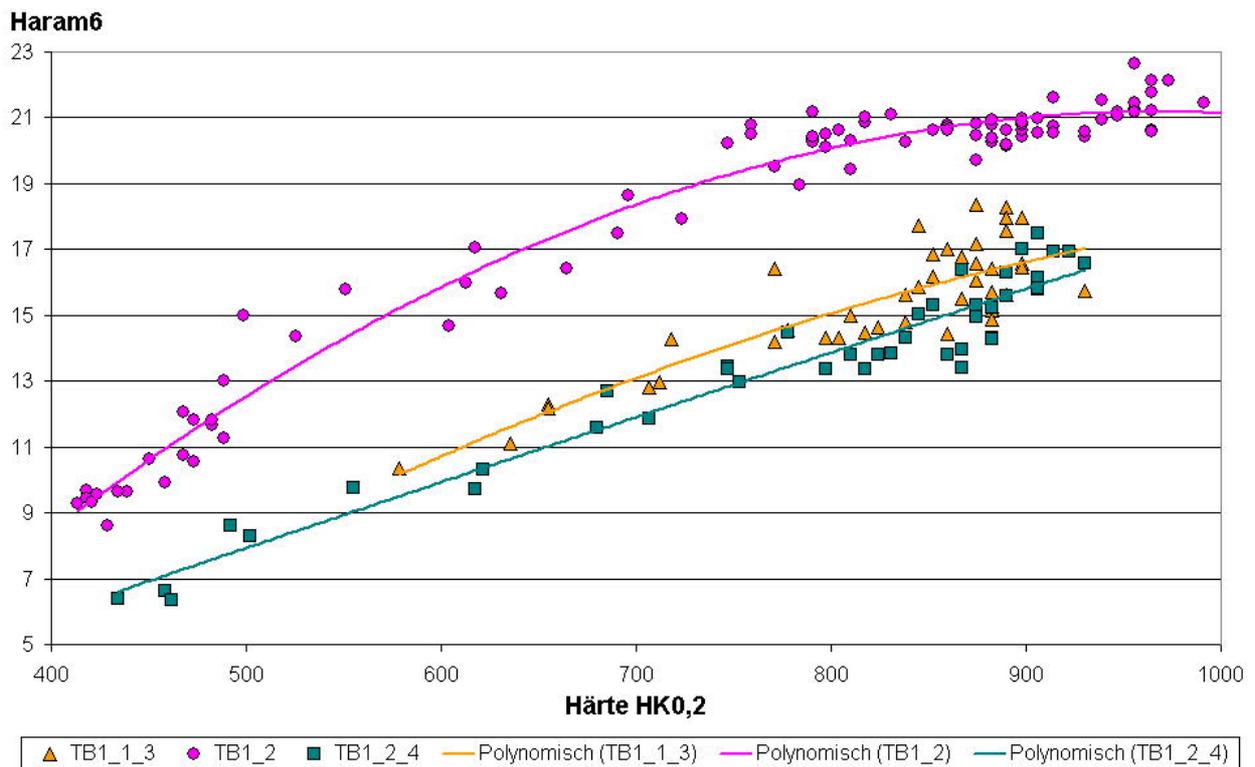


Bild 4-16 Korrelation von Mikrohärtigkeit und Haram6 anhand 3 Meßreihen an 100Cr6-Stirnabschreckproben

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde eine andere, wenn auch aufwendigere Methode gewählt, um die gewünschte Korrelation herzustellen. Es kam die Methode des Neuronalen Netzwerks (siehe Abschnitt 2.3) zum Einsatz.

Hierbei zeigt sich ein guter, linearer Zusammenhang zwischen den beiden Werten. Die Abweichung zwischen der Trendlinie und den errechneten Härtewerten der Meßpunkte beträgt maximal 12,5%. Die Standardabweichung der Differenzen zwischen Trendlinie und dem vom Netz errechneten Wert beträgt 38,6.

errechnete Härte / HK

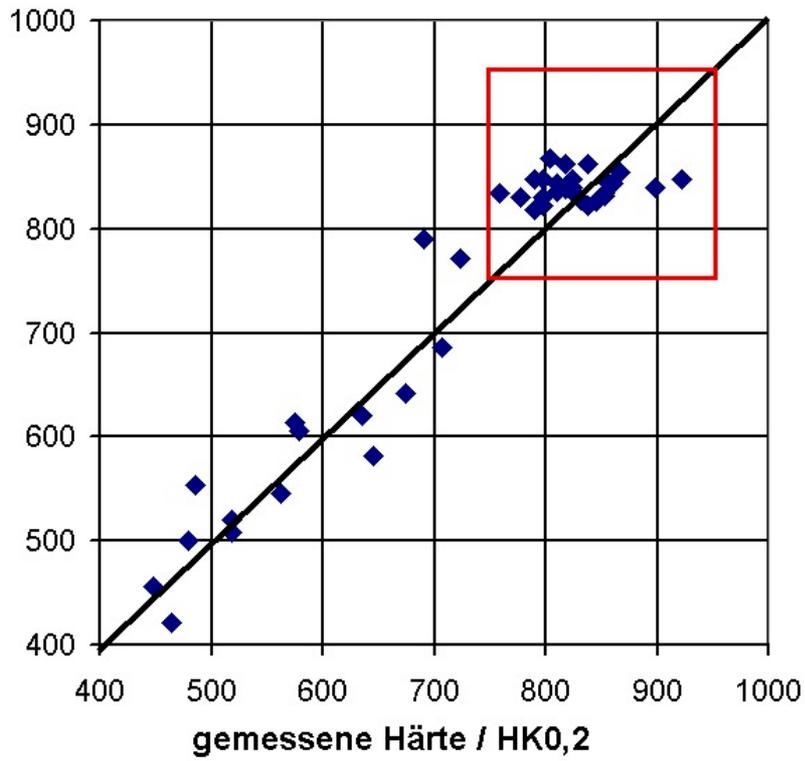


Bild 4-17 Gegenüberstellung der vom Neuronalen Netzwerk errechneten Härten mit den tatsächlich gemessenen Werten einer 100Cr6-Stirnabschreckprobe

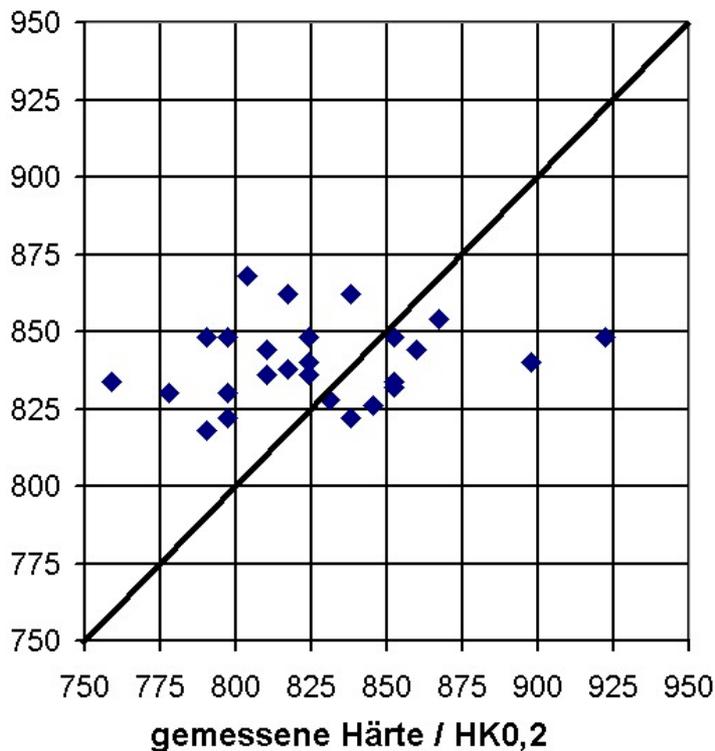
errechnete Härte / HK

Bild 4-18 Auswertung des Neuronalen Netzwerks im technisch relevanten Härtebereich des Werkstoffs 100Cr6 mit Stirnabschreckproben aus 100Cr6, Ausschnitt aus Bild 4-17

4.2.5 Einfluß der Präparation auf die Messung der Texturparameter

Um den Einfluß der Präparation festzustellen, sollte die Probe TB1_2 erneut geschliffen, poliert und geätzt werden. Hierzu wurde die Präparation analog zum 1. Durchgang wiederholt, wobei darauf geachtet wurde, daß die Parameter möglichst identisch waren. Es zeigte sich jedoch, daß das Ätzen bei gleicher Dauer wie beim ersten Versuch ein anderes Ergebnis liefert. Die Ätzung der 2. Präparation fiel wesentlich schwächer aus als beim ersten Durchgang. Daraufhin wurde die Probe nach der Aufnahme der Haralick-Parameter solange nachgeätzt, bis der Ätzgrad vergleichbar mit dem der 1. Präparation war. Die Verläufe der Texturparameter entlang der Längsachse der Stirnabschreckproben wurden gegenübergestellt, wobei sich zeigt, daß die Parameter nach erneuter Präparation einen anderen Verlauf (siehe Bild 4-19) bzw. einen anderen Betrag aufweisen (siehe Bild 4-20). Dies ist direkt abhängig vom Ätzgrad der Proben, was sich aus den Gefügebildern (Bild 4-21) erkennen läßt. Im Anschluß an das Nachätzen kommt es zu einer Annäherung des Parameters an Höhe und Verlauf des Parameters nach der ersten Präparation.

Haram 4

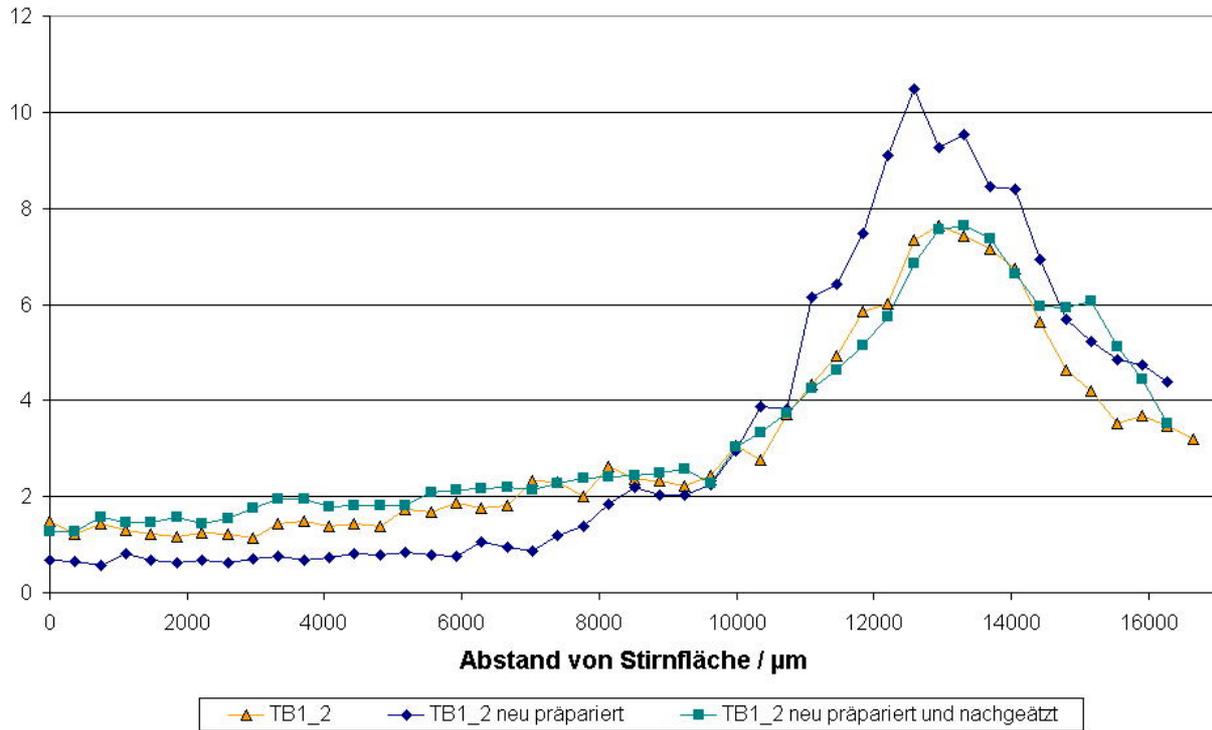


Bild 4-19 Abhängigkeit des Parameters Haram4 von der Präparation der 100Cr6-Stirnabschreckprobe TB1_2

Haram 6

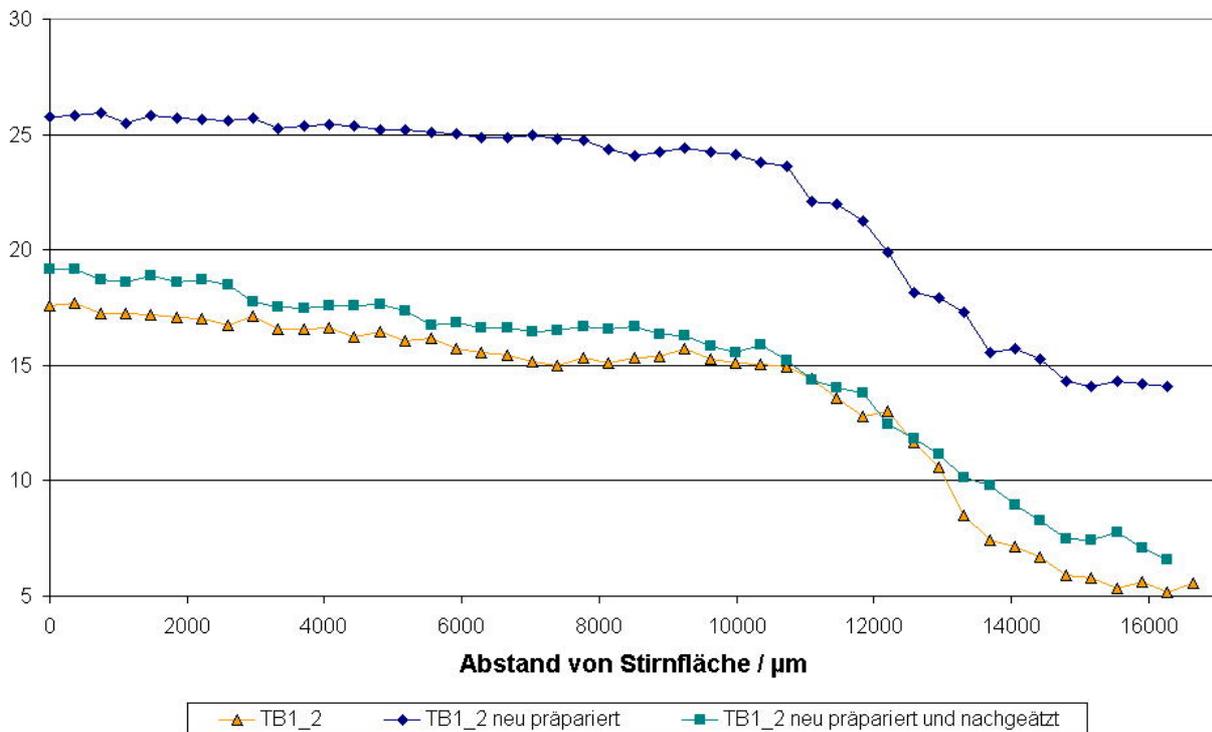


Bild 4-20 Abhängigkeit des Parameters Haram6 von der Präparation der 100Cr6-Stirnabschreckprobe TB1_2

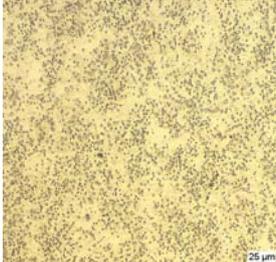
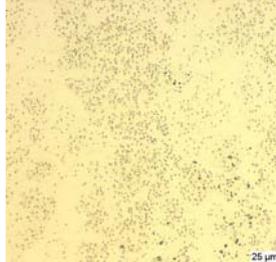
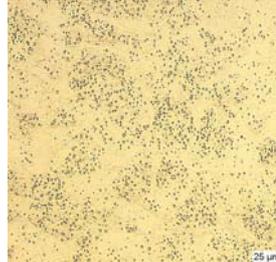
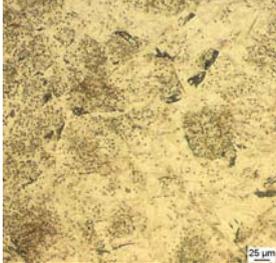
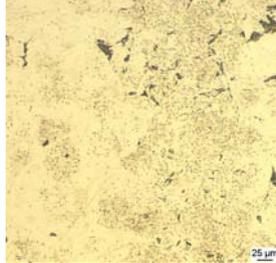
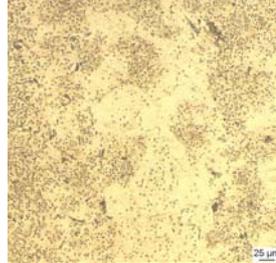
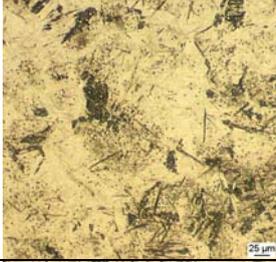
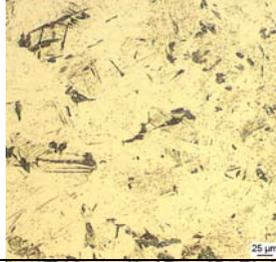
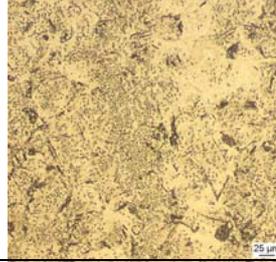
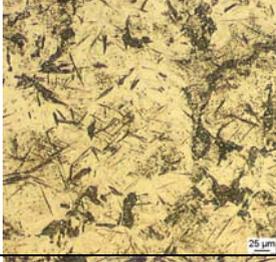
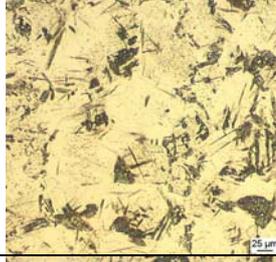
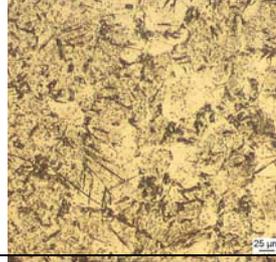
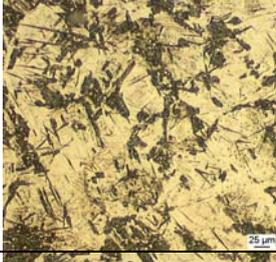
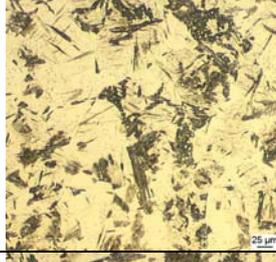
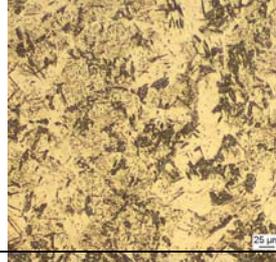
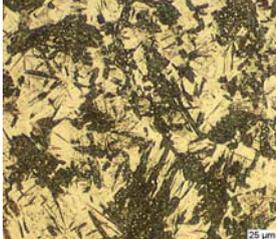
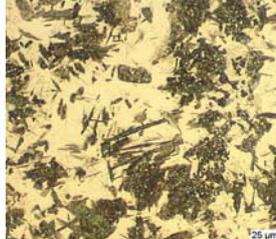
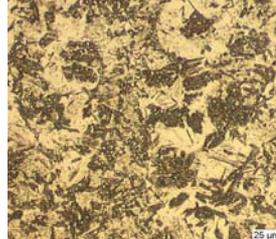
Abst. Stirnfläche	1. Präparation	2. Präparation	2. Pröp. nachgeätzt
0 μm			
7.770 μm			
9.990 μm			
11.100 μm			
11.840 μm			
12.580 μm			

Bild 4-21 Gegenüberstellung von Gefügebilder mit unterschiedlichen Präparationen der 100Cr6-Stirnabschreckprobe TB1_2 bei verschiedenen Abständen von der Stirnfläche

5 Diskussion

5.1 Problem der Zeiligkeit

Ausgangsmaterial für die Probenerstellung waren jeweils Stangen des entsprechenden Werkstoffs. Bei der Herstellung dieser Erzeugnisform kommt es durch das angewendete Walzen zur Ausbildung einer zum Teil erheblichen Zeiligkeit. Auch bei den erstellten Proben konnte diese Erscheinung beobachtet werden (siehe Bild 5-1). Die längs der Stabachse verlaufende Zeiligkeit beruht auf der lokalen Änderung des Kohlenstoffgehalts. Dies kann verschiedene Ursachen haben, zum einen kann es bei der Abkühlung aus dem schmelzflüssigen Zustand zu Seigerungen kommen.

Am 100Cr6 können z.B. bei Betrachtung parallel zur Stabachse Unterschiede in der Verteilung der Karbide beobachtet werden. Es sind Zeilen mit höherem Karbidgehalt neben Zeilen mit geringerem Anteil an Karbiden angeordnet.



Bild 5-1 Gefügebild eines C45 mit ausgeprägter Zeiligkeit (00AF_00695)

Durch diese Werkstoffeigenschaft kommt es zu großen Schwankungen der Texturparameter. Ebenfalls als problematisch erwies sich dieser Effekt bei der

Härtemessung, da die Texturparameter aus dem gesamten Bild bestimmt wurden, die Härte mittels des Knoop-Sensors jedoch nur in der Bildmitte. Bei paralleler Ausrichtung des Eindringkörpers und der Zeiligkeit wird der ermittelte Härtewert verfälscht. Daher wurde der Eindringkörper senkrecht zur Zeiligkeit eingesetzt, um einen möglichst großen, repräsentativen Bereich abzudecken.

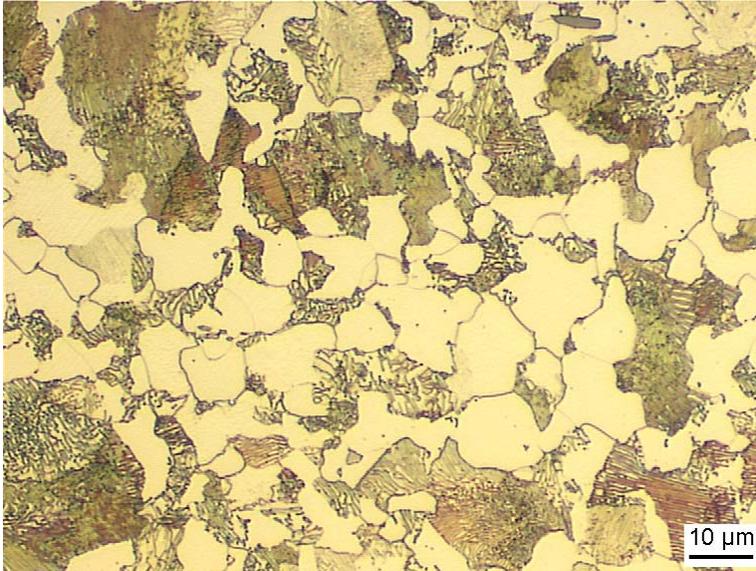


Bild 5-2 ferritisch-perlitischer C45 mit ausgeprägter Ferrit-Zeile in der Bildmitte

5.2 Einfluß der metallographischen Präparation

Die elektrolytische Präparation konnte nicht zur Zufriedenheit durchgeführt werden. Zuerst sollte das Polieren mit dem Lectropol-5 untersucht werden. Dies führte jedoch zu einer unzureichenden Einebnung im Vergleich zur mechanischen Präparation (vgl. Bild 5-3 und Bild 5-4). Außerdem zeigte sich, daß einige Proben durch das Polieren lokal angeätzt wurden (Bild 5-5).



Bild 5-3 Probe aus C45, in Wasser gehärtet, mechanisch geschliffen und mechanisch poliert (00AF_00188)

Es wurde für die Versuch der Elektrolyt E5 benutzt, der für Stähle mit einem hohen Gehalt an Verunreinigungen geeignet ist (siehe auch Abschnitt 3.2.1.1).



Bild 5-4 Probe aus C45, in Wasser gehärtet, mechanisch geschliffen und elektrolytisch poliert (00AF_00108)



Bild 5-5 Probe aus C45, in Wasser gehärtet, mechanisch geschliffen und elektrolytisch poliert, nicht geätzt, starker Angriff des Gefüges beim Polieren (00AF_00229)

Es sollte auch untersucht werden, ob das elektrolytische Ätzen Vorteile gegenüber dem chemischen Ätzen bringt. Das Ätzen wurde direkt im Anschluß an das elektrolytische Polieren durchgeführt. Dies lieferte jedoch weder befriedigende noch reproduzierbare Ergebnisse. Der Ätzgrad war über die Oberfläche der Probe sehr unterschiedlich, um die sulfidischen Einschlüsse war der Angriff meist stärker als an anderen Stellen. Aus diesem Grund wurde versucht, die Proben nach dem elektrolytischen Polieren extern elektrolytisch zu ätzen. Beim externen Ätzen wird das Bauteil in ein mit Elektrolyt gefülltes Gefäß außerhalb des Elektropoliergerätes getaucht. Auch hier zeigte sich ein ähnliches Bild, da die Ergebnisse ebenfalls nicht reproduzierbar waren (siehe Bild 5-6), der Ätzangriff war auch hier über die ganze präparierte Fläche gesehen sehr unterschiedlich.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden weitere Versuche mit der elektrolytischen Präparation bis auf weiteres gestoppt. Bei der Rückgabe des Leihgerätes stellte sich heraus, daß dieses einen Defekt hatte, der u.U. für die negativen Erfahrungen verantwortlich gewesen sein könnte. Um die Versuche weiterführen zu können, wurde daher auf das elektrolytische Ätzen verzichtet. Zur Untersuchung des Einflusses der Poliermethode wurden aber in Wasser gehärtete Proben aus C45 (AF4_x) mit dem Lectropol-5 elektrolytisch poliert, jedoch chemisch geätzt.

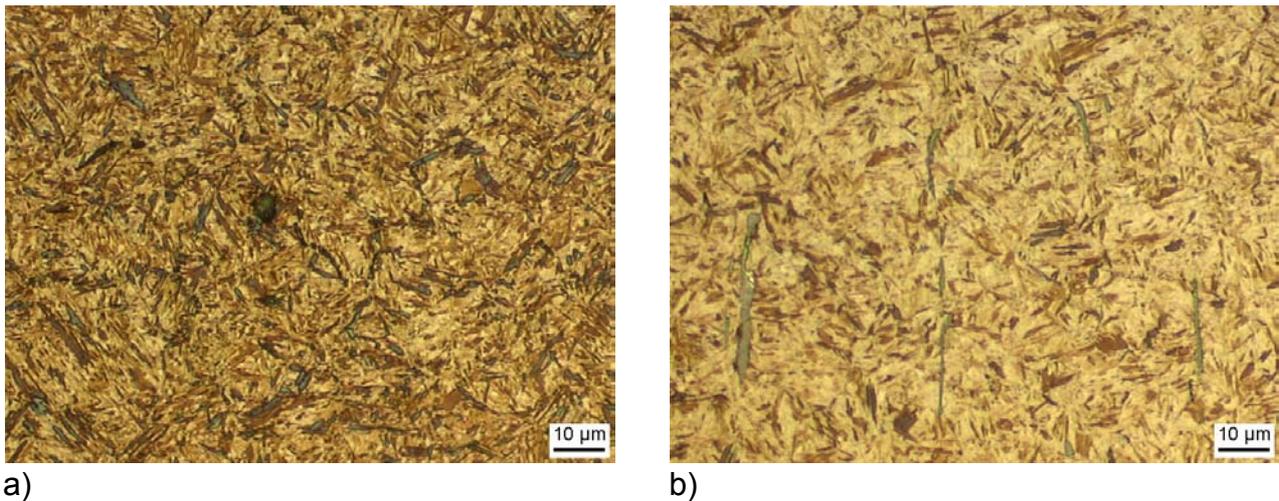


Bild 5-6 Gefügebilder mit unterschiedlich starkem Ätzangriff an zwei verschiedenen Stellen auf einer Probe aus dem Stahl C45, in Wasser gehärtet, elektrolytisch poliert und extern elektrolytisch geätzt (00AF_00211 (a) und 00AF_00216 (b))

Als äußerst einflußreich auf die Texturanalyse hat sich der Ätzgrad erwiesen (siehe Abschnitt 4.2.5). So sinkt der Parameter Haram6 um nahezu 50% beim Vergleich einer Probe mit einem bestimmten Ätzgrad mit einer Probe mit geringerem Ätzgrad (siehe Bild 4-20). Da dieser Parameter jedoch sehr schwer zu quantifizieren ist, bedarf es hier erfahrener Fachpersonal, das den Ätzgrad durch optischen Vergleich unter dem Mikroskop vergleichbar einstellen kann. Hier sollte eine reproduzierbare Präparation unter definierten Bedingungen (Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Dauer, Wartezeit zwischen Behandlungsschritten, ...) durchgeführt werden, oder eine Methode entwickelt werden, um Proben reproduzierbar zu präparieren. Diese Präparation stellt dann die gewünschte Ausgangsbasis für generell vergleichbare Ergebnisse aus Texturanalysen dar.

5.3 Einfluß der Mikroskopeinstellungen auf die Texturanalyse

Der Einfluß der Mikroskopeinstellungen stellt sich als weiterer wichtiger Faktor in der Texturanalyse heraus. Dies hat sich bereits in Abschnitt 4.2.1 gezeigt, wo die optimalen Mikroskopeinstellungen für den 100Cr6 ermittelt werden sollten. Hierzu wurden die Texturparameter bei verschiedenen Mikroskopeinstellungen bestimmt, wobei sich z.T. große Unterschiede in Abhängigkeit von Lampenspannung und Stellung der Aperturblende feststellen ließen.

Wie in Bild 5-7 dargestellt, ändern sich die Haralick-Parameter mit der Lampenspannung am Mikroskop zum Teil erheblich. So steigt der Wert des Parameters Haram6 von 13,0 bei 4 V Lampenspannung auf 23,1 bei 5 V, während er bei einer Spannung von 6 V weiter auf 28,9 ansteigt. Dies bedeutet einen Anstieg des Parameters Haram6 von 25,7% bei Erhöhung der Lampenspannung um 2 V von 4 V auf 6 V.

Der Parameter Haram7 hingegen zeigt ein ganz anderes Bild. Hier steigt der Wert von 7,7 auf 15,7 bei Erhöhung der Spannung von 4 V auf 5 V, bei weiterer Erhöhung auf 6 V fällt der Wert allerdings wieder auf 6,5. Dies bedeutet einen Anstieg des Parameters um 103,9% bei der Erhöhung der Spannung von 4 V um 1 V.

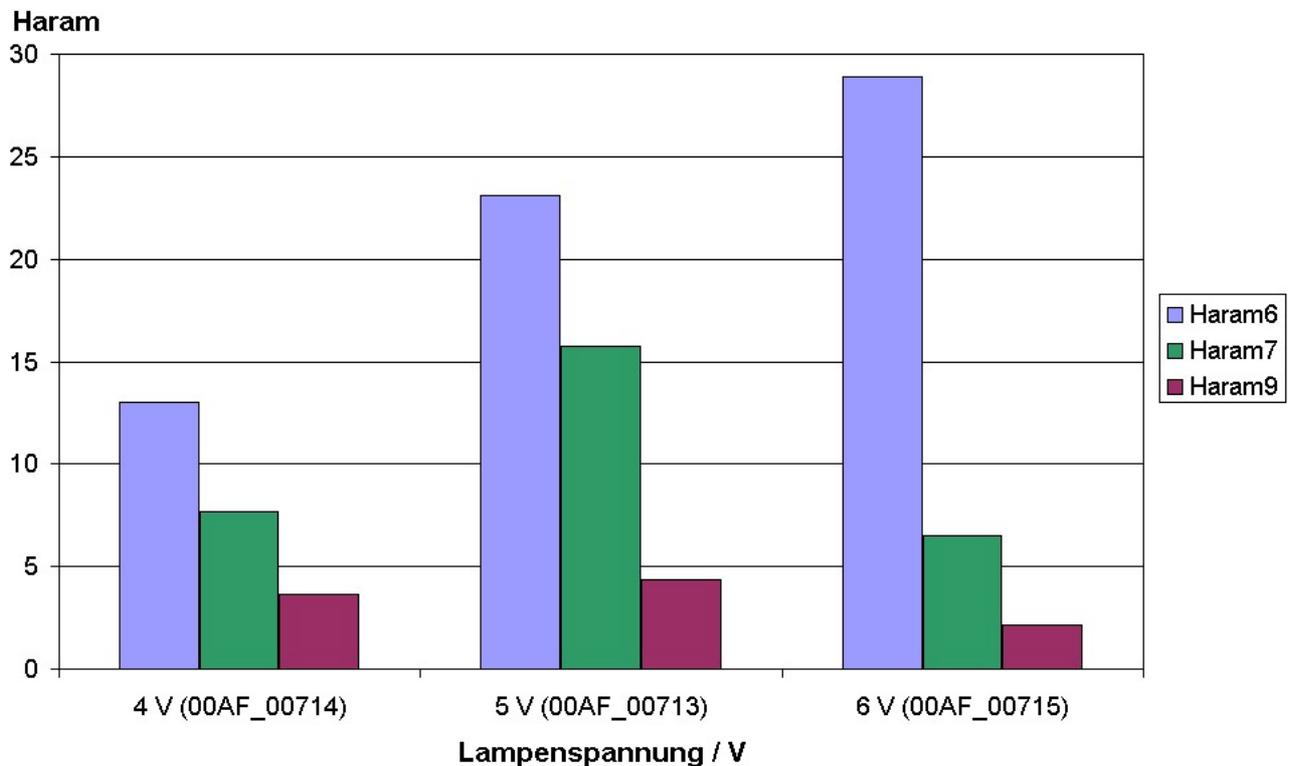


Bild 5-7 Einfluß der Lampenspannung auf die Texturparameter Haram6, Haram7 und Haram9 bei Spannungen von 5 V, 6 V und 7 V an der selben Position auf der 100Cr6-Stirnabschreckprobe TB1_2

Diese großen Schwankungen beeinträchtigen die Meßergebnisse der Texturanalyse stark. Es muß daher darauf geachtet werden, sämtliche Mikroskopeinstellungen so konstant wie möglich zu halten. Ein direkter Vergleich der gemessenen Werte ist daher auch bei

gleichem Mikroskop nur sehr schwer möglich, da die Beleuchtung nicht zwingend exakt gleiche Bedingungen liefert.

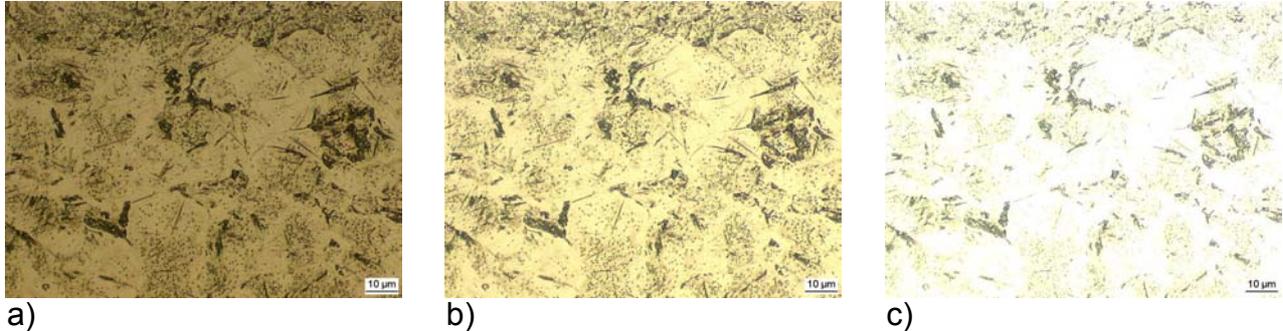


Bild 5-8 Gefügebilder der 100Cr6-Stirnabschreckprobe TB1_2 bei verschiedenen Lampenspannungen
a) 4 V (00AF_00714)
b) 5 V (00AF_00713)
c) 6 V (00AF_00715)

5.4 Korrelation der Texturparameter mit dem Gefüge

Sowohl beim C45 als auch beim 100Cr6 zeigt sich eine direkte Abhängigkeit der Parameter nach Haralick mit dem lokalen Gefüge der Probe. Grund für die Unterschiede in der Höhe einzelner Parameter sind die durch die verschiedenen Wärmebehandlungen unterschiedlich ausgebildeten Gefüge.

Die Abhängigkeit der Texturparameter von der Abkühlgeschwindigkeit (siehe Bild 5-9) zeigt sich beispielhaft an den Proben aus C45 in verschiedenen Wärmebehandlungen in Bild 5-10. In Teilbild a) ist das aufgrund der sehr langsamen Abkühlung an Luft ferritisch-perlitische Gefüge des Kohlenstoffstahls dargestellt. In b) sieht man das Gefüge der im Öl abgekühlten Probe mit Anteilen an Martensit, Bainit und Perlit. Hiervon unterscheidet sich deutlich das martensitische Gefüge in Teilbild c), das durch die Abkühlung in Wasser zustande kam, jedoch kam es zur Bildung eines geringen Anteils an Bainit, der dunkel zwischen den helleren Martensitnadeln erscheint.

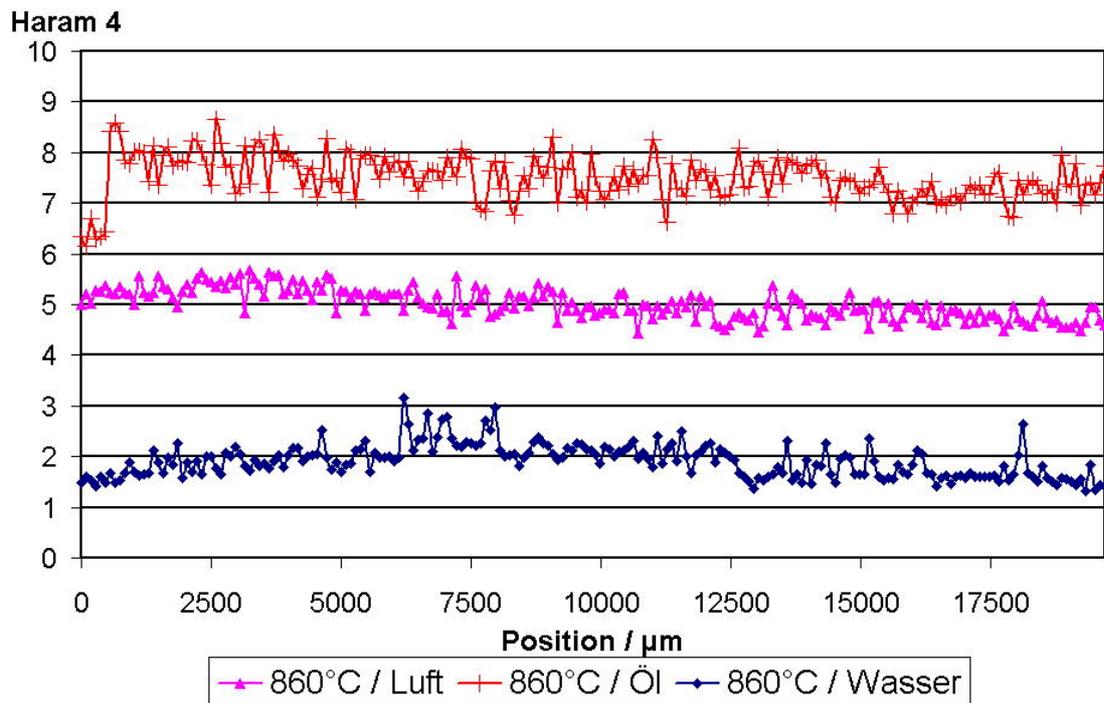


Bild 5-9 Vergleich des Parameters Haram4 in Abhängigkeit des Abkühlmediums an den C45-Proben AF1_1 (860°C/Wasser), AF2_1 (860°C/Öl) und AF3_1 (860°C/Luft)

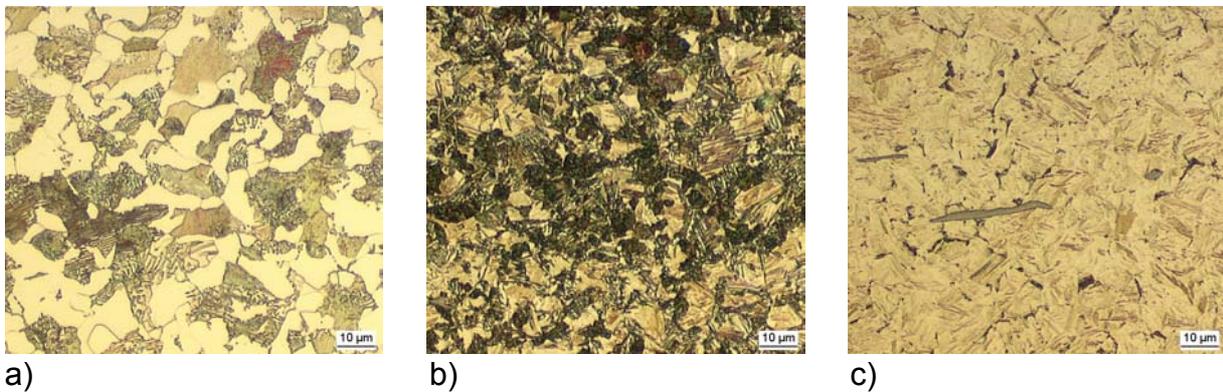


Bild 5-10 Gefügebilder der Proben aus C45

- a) Probe AF3_1 (860°C/Luft) (00AF_00161), Haram4 = 5,868
 b) Probe AF2_1 (860°C/Öl) (00AF_00143), Haram4 = 7,514
 c) Probe AF1_1 (860°C/Wasser) (00AF_00077), Haram4 = 1,692

Haram 4

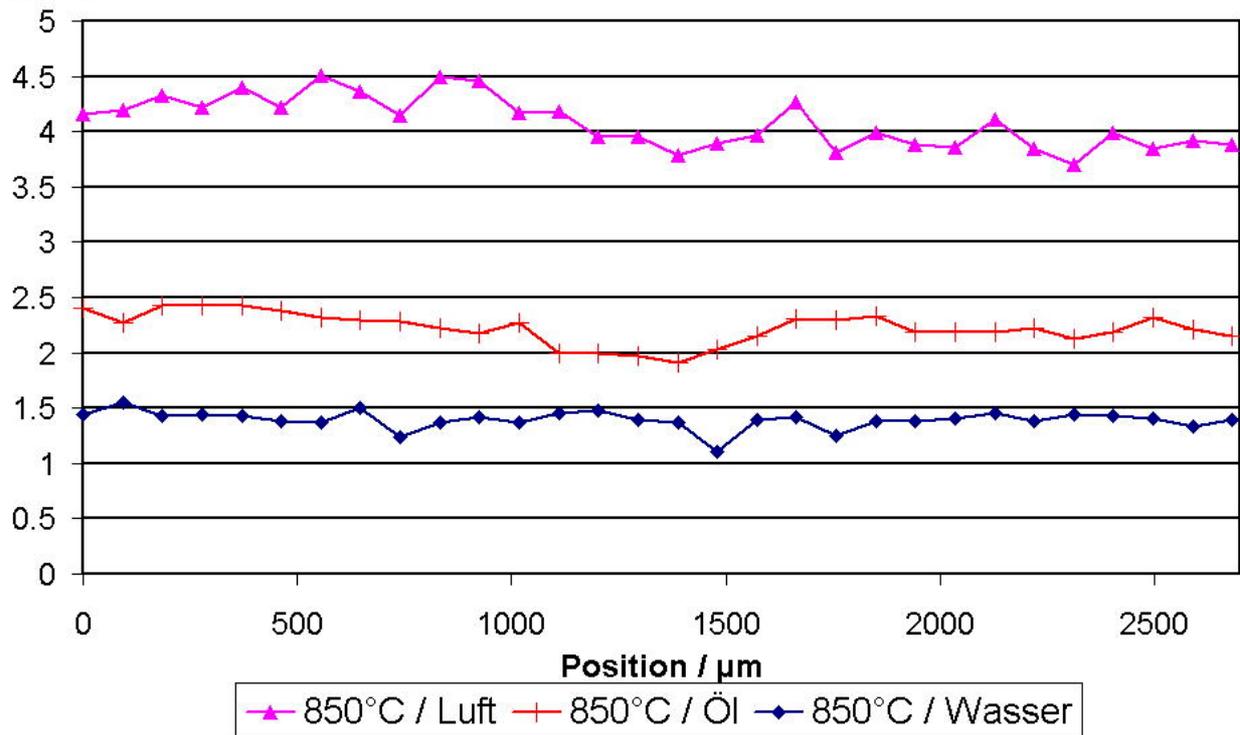


Bild 5-11 Vergleich verschiedener Abkühlgeschwindigkeiten von Austenitisierungstemperatur auf die Texturparameter an den Proben 100Cr6H₂O, 100Cr6Oel und 100Cr6Luft

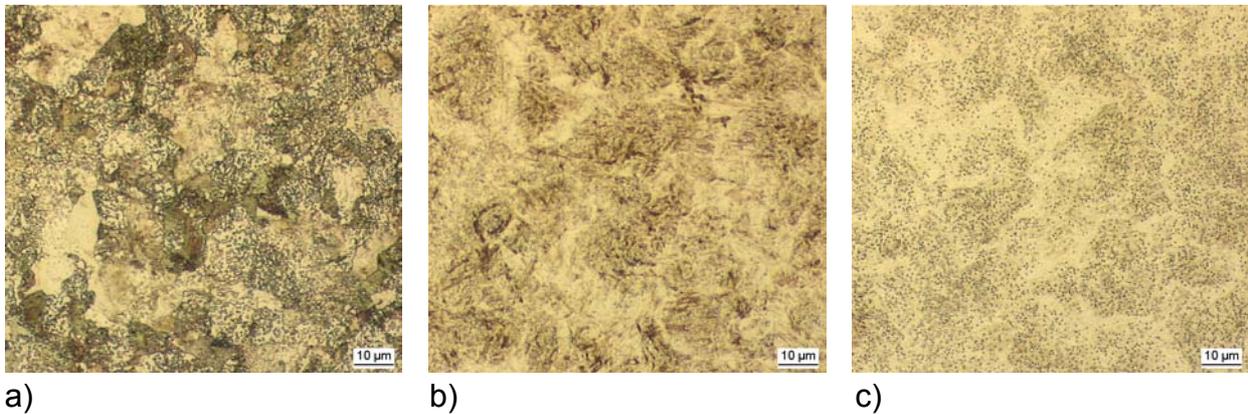


Bild 5-12 Gefügebilder der Proben aus 100Cr6
 a) Probe 100Cr6Luft (00AF_00716)
 b) Probe 100Cr6Oel (00AF_00715)
 c) Probe 100Cr6H₂O (00AF_00713)

Auch beim Werkstoff 100Cr6 kommt es beim Härten infolge der unterschiedlich schnellen Abkühlung zur Ausbildung völlig verschiedener Gefüge (siehe Bild 5-12), was sich auch in den Texturparametern widerspiegelt (Bild 5-11).

So zeigt die an Luft abgekühlte Probe in Teilbild a) ein perlitisches Gefüge mit eingelagerten, kugelförmigen Karbiden. Teilbild b) zeigt das Gefüge der in Öl abgeschreckten Probe mit martensitischer Matrix und geringem Anteil an Bainit aus kontinuierlicher Abkühlung. Die in Wasser abgeschreckte Probe zeigt ein nahezu rein martensitisches Gefüge, in dem die Karbide eingelagert sind.

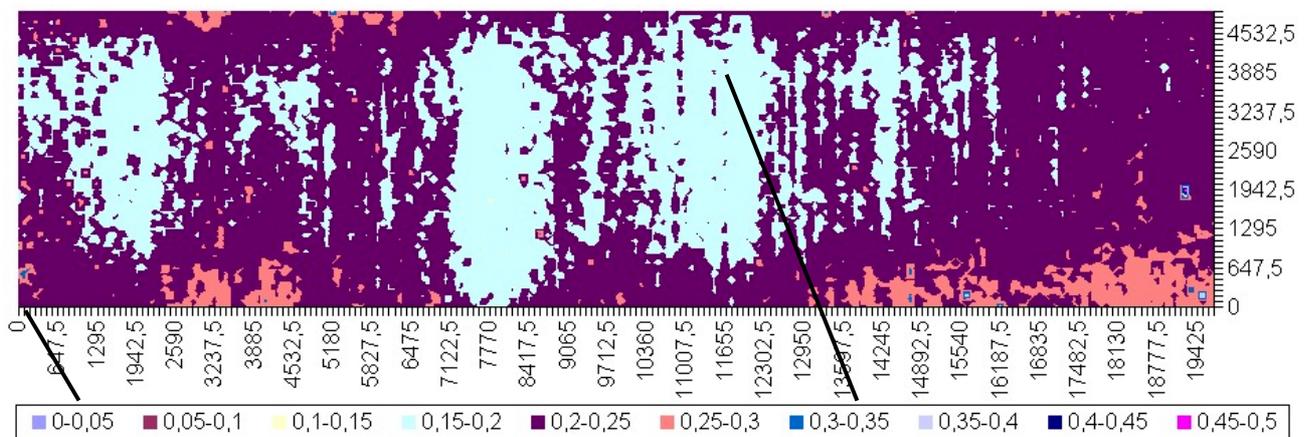
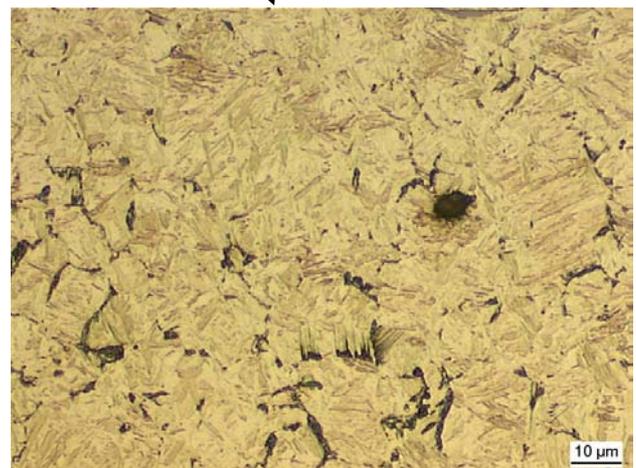


Bild 5-13 Darstellung des Parameters HARM1 über die Oberfläche der Probe AF1_2 (C45, 860°C/Wasser)



a)



b)

Bild 5-14 Gefügebilder der Probe AF1_2 (C45, 860°C/Wasser)

a) vom Rand der Probe, Position 0 μm; 0 μm (00AF_00124), HARM1 = 0,235

b) aus der Probenmitte, Position 3792,5 μm; 11747,5 μm (00AF_00127), HARM1 = 0,175

Diese Abhängigkeit der Texturparameter vom Gefüge bestätigt sich auch an den Proben aus C45 in den Gefügebildern in Bild 5-14. Während an der Ecke der Stirnabschreckprobe (Bild 5-14 a) aufgrund der starken Abschreckwirkung des Wassers beim Härten ein fast rein martensitisches Gefüge vorliegt, ist der Bainit-Anteil in der Mitte der Probe wesentlich höher, da hier aufgrund mangelhafter Wärmeabführung beim Abschrecken kein rein martensitisches Gefüge gebildet werden konnte. Dies spiegelt sich in der Höhe der Parameter wider, denn an der Ecke der Probe ist der Parameter Haram1 mit einem Wert im Bereich zwischen 0,2 und 0,25 höher als in der Probenmitte, wo der Parameter im Bereich zwischen 0,15 und 0,2 liegt.

Ein ähnliches Bild zeigt sich auch an den Stirnabschreckproben aus 100Cr6. Die durch die verschiedenen Abschreckgeschwindigkeiten bedingten Unterschiede im Gefüge werden hier sehr gut in der Höhe des Wertes der Parameter sichtbar. So steigt beispielsweise der Parameter Haram4 mit größer werdendem Abstand von der Stirnfläche der Probe von Werten um 0 auf Werte im Bereich zwischen 12 und 14 an (siehe Bild 5-15).

Wie im Bild zu sehen ist, lässt sich die langsame Änderung des Parameters Haram4 bis zu einem Abstand von etwa 8 mm von der Stirnfläche gut in Verbindung mit dem Gefüge bringen. So ist zwischen den Bildern a) an der Stirnfläche und Bild b) in 3,7 mm Abstand davon kaum ein Unterschied im Gefüge zu erkennen. Erst in einem Abstand von 8,14 mm (Bild c) von der Stirnfläche steigt der Wert des Parameters Haram4 vom Bereich zwischen 2 und 4 auf Werte von 4 bis 6.

Der Anstieg des Parameters Haram4 ist im Gefüge durch einen deutlichen Bainitanteil in der martensitischen Grundmatrix zu erkennen. Bereits in einem Abstand von 10,175 mm, d.h. in Bild d) zeigen sich erstmals geringe Perlitanteile neben Bainit und Martensit, was zu einem weiteren Anstieg des Parameters auf Werte zwischen 6 und 8 führt. Der weiter steigende Perlitanteil in den Bildern e) und f) in den Abständen 11,47 mm bzw. 12,95 mm von der Stirnfläche bewirken eine ständige Erhöhung des Parameters mit größer werdendem Abstand von der Stirnfläche.

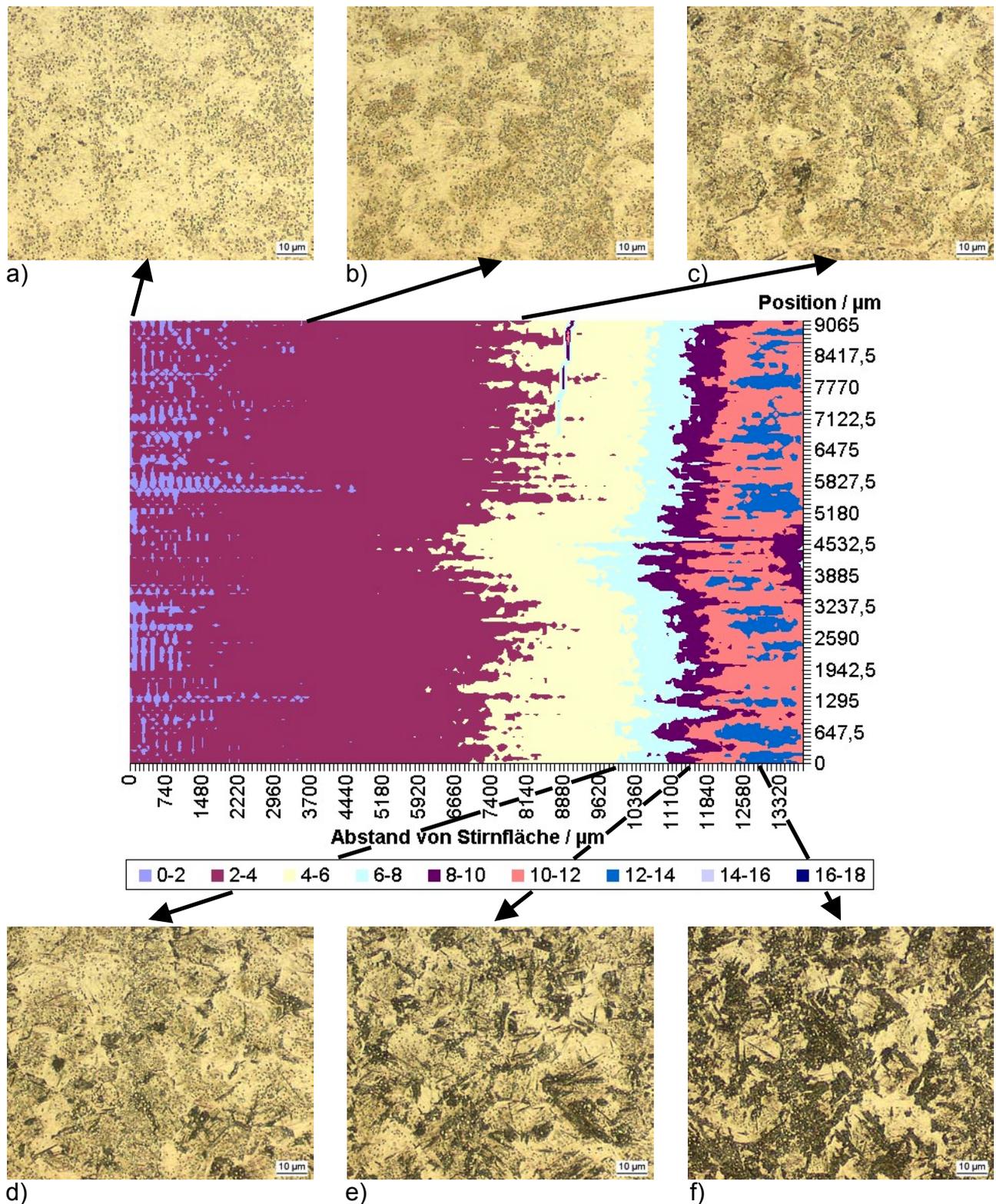


Bild 5-15 Verteilung des Parameters Haram4 auf der Oberfläche der Stirnabschreckprobe TB1_2 aus 100Cr6 mit entsprechenden Gefügebildern in verschiedenen Abständen von der Stirnfläche
 a) 0 μm (00AF_00293) b) 3700 μm (00AF_00294)
 c) 8140 μm (00AF_00295) d) 10175 μm (00AF_00296)
 e) 11470 μm (00AF_00297) f) 12950 μm (00AF_00298)

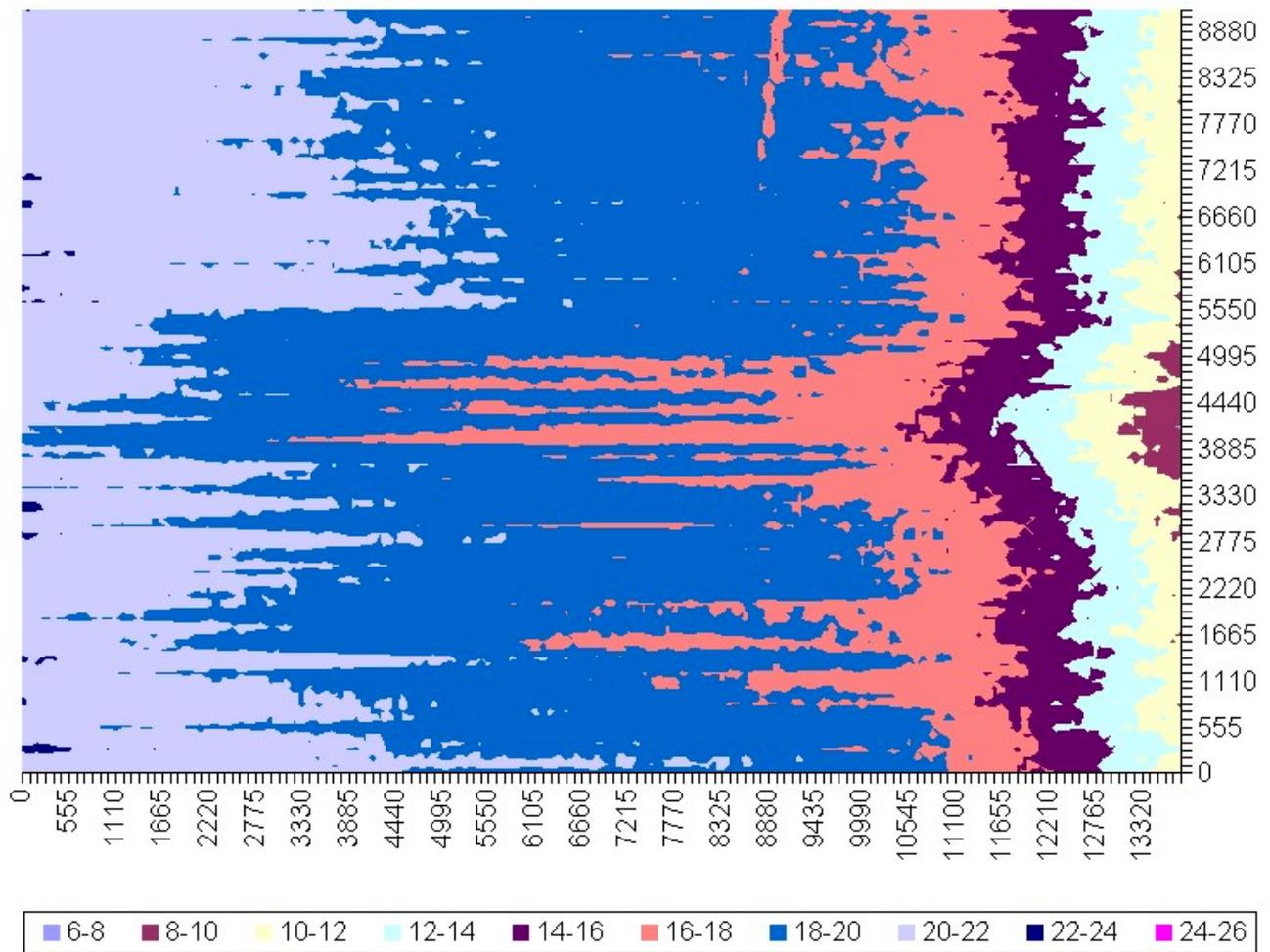


Bild 5-16 Verteilung des Parameters HARM6 auf der Oberfläche der 100Cr6-Stirnabschreckprobe TB1_2

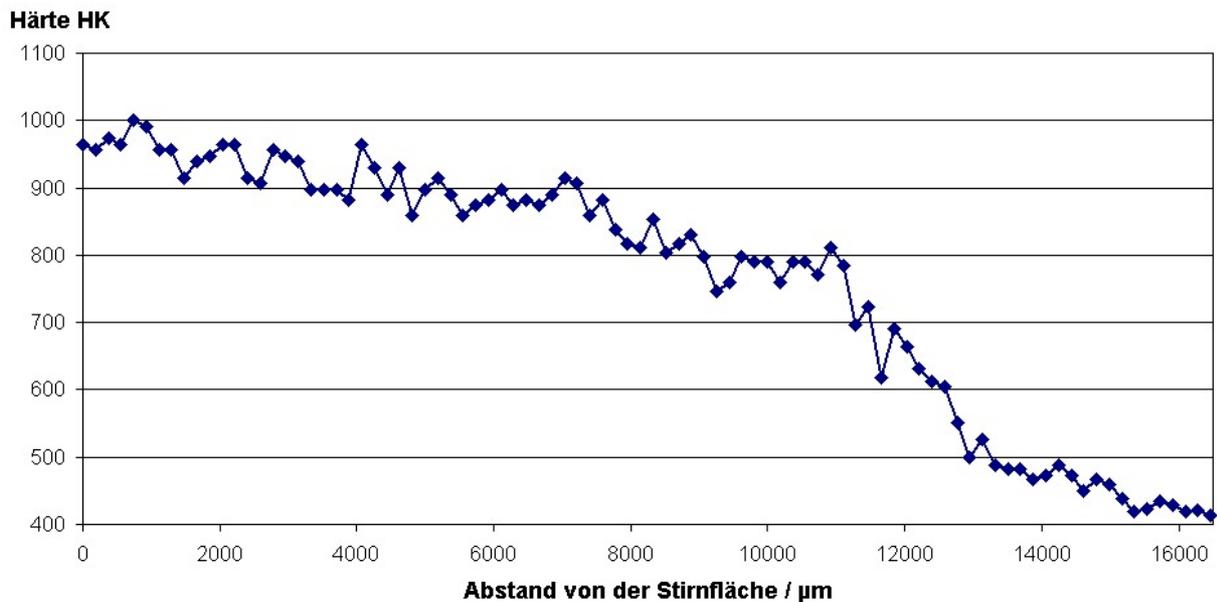


Bild 5-17 Härteverlauf der Probe TB1_2

Beim Parameter Haram6 (Bild 5-16, vgl. Bild 5-17) zeigt sich ein ähnliches Bild, jedoch fällt hier der Parameter von Werten im Bereich zwischen 20 und 22 auf Werte zwischen 10 und 12. Grund für dieses Verhalten ist die sich durch die spezielle Technik der Wärmebehandlung erreichte variable Abkühlgeschwindigkeit über die Probenlängsachse hinweg (siehe Stirnabschreckversuch, Abschnitt 3.1.2.2). Aufgrund der unterschiedlichen Abkühlung kommt es hierbei nicht nur zur Ausbildung eines charakteristischen Härteverlaufs, da die Härte gemessen von der Stirnfläche her abfällt, sondern vielmehr zu grundsätzlichen Unterschieden im Gefüge der Probe, die ursächlich mit dem Verlauf der Härte verbunden sind.

Jedoch zeigt sich auch hier die gleiche Struktur des großen Bereichs an der Stirnfläche, in dem sich der Parameter nur langsam ändert, während der Abfall ab einem Abstand von ca. 11 mm plötzlich schneller verläuft.

Die langsame Änderung des Gefüges und die damit verbundene geringe Änderung des Parameters bis zu einem Abstand von etwa 8 mm von der Stirnfläche ist mit der sehr guten Einhärbarkeit des Wälzlagerstahls 100Cr6 verbunden. Diese Eigenschaft wird durch die Legierungselemente Kohlenstoff und Chrom hervorgerufen, wodurch es bis in etwa 11 mm Tiefe von der Oberfläche zu einer Mikrohärtigkeit von 800 HK_{0,2} kommt (siehe Bild 4-14), wodurch die Verschleißbeständigkeit von Werkstücken aus diesem Werkstoff nach entsprechender Wärmebehandlung enorm gesteigert werden kann.

5.5 Bestimmung der Härte einer 100Cr6-Stirnabschreckprobe über ein Neuronales Netzwerk

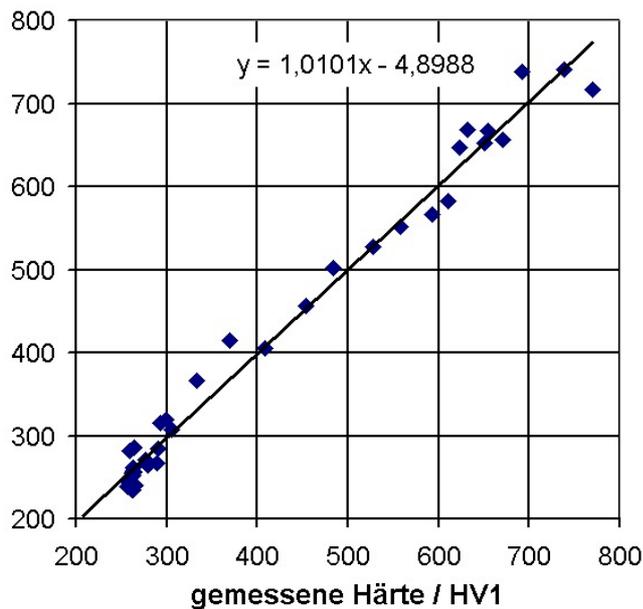
In Vorgängerarbeiten [Sch99] wurde bereits gezeigt, daß für den Stahl C45 eine gute Korrelation zwischen Texturparametern und Mikrohärtigkeit im Neuronalen Netzwerk hergestellt werden kann (Bild 5-18 a).

Bei der Auswertung der Proben aus 100Cr6 im Neuronalen Netzwerk zeigte sich, daß die Korrelation zwischen gemessener und errechneter Härte im gesamten den erwarteten linearen Zusammenhang zeigt (Bild 5-18 b), im Härtebereich zwischen 750 und 950 jedoch nicht die gewünschte Abhängigkeit zeigte (Bild 4-18).

Während sich die Werte der errechneten Härte zwischen 820 und 870 bewegen, liegt die gemessene Härte im Bereich von 760 bis 920 HK0,2. Die Steigung der Ausgleichsgeraden weicht mit 0,0665 deutlich vom optimalen Wert 1 ab. In der Praxis wird dieser Werkstoff jedoch genau in diesem Härtebereich verwendet.

Diese geringe Änderung der errechneten Härtewerte deutet auf nur geringe Unterschiede in den (wesentlichen) Haralick-Parametern hin. Der Grund für die große Streuung der gemessenen Härtewerte liegt im großen Meßfehler in diesem Härtebereich. Aufgrund der hohen Härte sind die erzeugten Eindrücke relativ klein. Dadurch steigt der Fehler mit steigender Härte.

errechnete Härte / HV1



errechnete Härte / HK

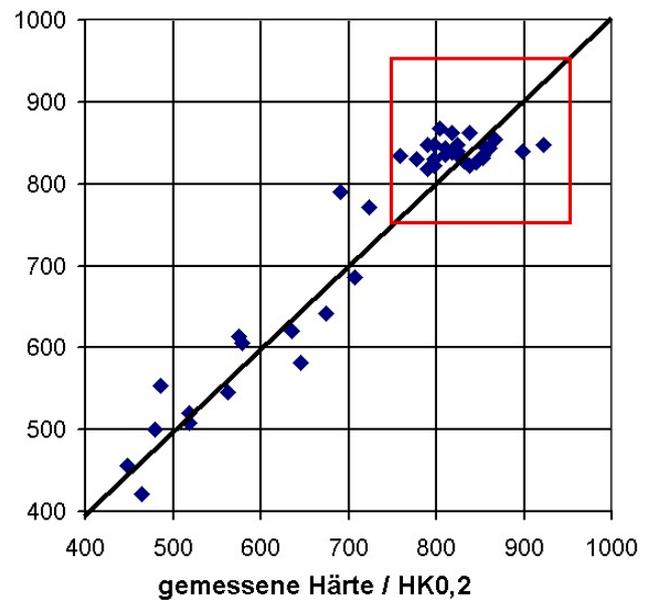


Bild 5-18 Gegenüberstellung der vom Neuronalen Netzwerk errechneten Härten mit den tatsächlich gemessenen Werten

- a) an einer Stirnabschreckprobe aus C45 (JSC453_01) (aus [Sch99])
- b) an einer Stirnabschreckprobe aus 100Cr6 (TB1_3)

6 Zusammenfassung

Die Versuchsergebnisse bestätigen die praktische Durchführbarkeit der Texturanalyse nicht nur am Werkstoff C45, sondern auch am Wälzlagerstahl 100Cr6. Die Quantifizierung von Eigenschaften wird somit auch an Gefügen ermöglicht, die aufgrund des kontrastarmen Bildes bisher nicht über die konventionellen Methoden der QGA auswertbar waren.

Beim Vergleich der Texturparameter mit dem Gefüge stellte sich heraus, daß selbst kleine Unterschiede zuverlässig dargestellt werden (Abschnitt 4.1.3, Bild 4-3 und Bild 5-14) und somit eine eindeutige Abhängigkeit einiger Haralick-Parameter vom vorliegenden Gefüge festgestellt werden kann. Dies zeigte beispielsweise Unterschiede im Gefüge, die aufgrund der mangelhaften Wärmeabführung aus dem Probeninnern im Vergleich zum schneller abgekühlten Probenrand zustande kamen. Ebenso zeigten sich bei Stirnabschreckproben deutliche Abhängigkeiten der Parameter von der Position auf der Probe.

Zwar zeigen die nach Haralick gemessenen Texturparameter keine direkte Korrelation mit der Mikrohärtigkeit, diese kann jedoch über ein Neuronales Netzwerk hergestellt werden. Mit Hilfe dieser Methode wäre es auch möglich, eine Korrelation der Texturparameter mit anderen, schwer zugänglichen Eigenschaften herzustellen. Es zeigten sich sowohl am C45 als auch am 100Cr6 gute lineare Korrelationen der vom Neuronalen Netzwerk errechneten Härtewerten mit den tatsächlich gemessenen.

Jedoch wurde die Auswertung durch verschiedene Ursachen gestört bzw. erschwert. Zum einen wiesen die verwendeten Werkstoffe eine starke Zeiligkeit auf, zum anderen lieferte die elektrolytische Präparation nur mangelhafte Ergebnisse.

Ein großes Problem der Texturanalyse ist die reproduzierbare Präparation der Proben. Diese ist der wichtigste Schritt für eine aussagekräftige Texturanalyse. Besonders der Ätzgrad hat sich hier als sehr kritisch im Bezug auf Höhe und Verlauf der Parameter bei Stirnabschreckproben herausgestellt. Es sollte daher darauf geachtet werden, die Präparation der Proben möglichst sorgfältig und reproduzierbar durchzuführen. Wichtige Parameter sind hierbei beispielsweise die Temperatur während der Präparation, die

Luftfeuchtigkeit, die Wartedauer zwischen zwei Behandlungsschritten, die Konzentration des Ätzmittels, usw.

Des weiteren muß auch bei der mikroskopischen Untersuchung auf konstante Einstellungen geachtet werden. So haben beispielsweise Beleuchtungsstärke oder Blendenöffnungen einen großen Einfluß auf das Meßergebnis. Die Einstellungen am Mikroskop können bei sorgfältigem Vorgehen jedoch als nahezu konstant angesehen werden.

Aus diesem Grund sollte gerade die reproduzierbare Präparation weiterentwickelt werden, da sich dieser Punkt als Schwachstelle des System erwiesen hat. Eine Lösungsmöglichkeit könnte die elektrolytische Präparation sein. Diese sollte auch durchgeführt werden, lieferte allerdings nicht die gewünschten reproduzierbaren Ergebnisse. Da hieran vermutlich ein Gerätedefekt schuld war, sollte diese Methode auf jeden Fall nochmals untersucht werden. Als alternativer Weg bietet sich an, die konventionelle mechanische Probenpräparation sorgfältig unter exakt definierten Bedingungen durchzuführen, um reproduzierbare Ergebnisse zu erhalten.

7 Literatur

[Car97]	Carl Zeiss Vision GmbH, KS 400 Imaging System Release 3.0 , Handbuch Teil 1 + 2 (1997)
[DIN87]	DIN 50191: Stirnabschreckversuch (1987)
[DIN88]	DIN ISO 4516: Metallische und verwandte Schichten - Mikrohärtebestimmung nach Vickers und Knoop (1988)
[DIN89]	DIN-Taschenbuch 218, Wärmebehandlung metallischer Werkstoffe, Beuth-Verlag, (1989)
[Hab91]	Haberäcker, P.: Digitale Bildverarbeitung - Grundlagen und Anwendung, 4. Aufl., Carl Hanser Verlag (1991)
[Har73]	Haralick, R. M.: Textural Features for image classification, IEEE Transactions on systems, man and cybernetics, Vol. SMC-3 No. 6, pp 610-621 (1973)
[Hor85]	Horstmann, D.: Das Zustandsschaubild Eisen-Kohlenstoff und die Grundlagen der Wärmebehandlung der Eisenkohlenstoff-Legierungen, Verlag Stahleisen (1985)
[Jäh95]	Jähne et al.: Technische Bildverarbeitung, Springer Verlag (1995)
[Kie00]	Kiessler, G., Elssner, G.: Gefügedarstellung mit einem neuen elektrolytischen Polier- und Ätzgerät, in Praktische Metallographie 37, Carl Hanser Verlag (2000)
[Kla00]	Klauck, U.: Was ist Textur?, Vorlesungsskript FH Aalen (2000)
[Kra90]	Kratzer, K. P.: Neuronale Netze: Grundlagen und Anwendung, 1. Aufl., Carl Hanser Verlag (1990)
[Mot56]	Mott, B. W.: Die Mikrohärteprüfung, 1. Aufl., Berliner Union (1956)
[Rit91]	Ritter, H., Martinetz, T., Schulten, K.: Neuronale Netze - Eine Einführung in die Neuroinformatik selbstorganisierender Netzwerke, 2. Aufl., Addison-Wesley (1991)
[Ros69]	Rose, A.; Wever, F.; Peter, W.; Straßburg, W.; Rademacher, L.: Atlas zur Wärmebehandlung der Stähle, Band 1, Verlag Stahleisen (1969)
[Sch00]	Schmid, J., et al.: Texturanalyse in der quantitativen Gefügeanalyse am Beispiel von Stahlgefügen, Fortschritte in der Metallographie, Sonderbände der Praktischen Metallographie, Band 31 (2000)
[Sch91]	Schumann, H.: Metallographie, 13. Aufl., Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Stuttgart (1991)
[Sch99]	Schmid, J.: Quantitative Gefügeanalyse - Korrelation zwischen Texturparametern und mechanischen Eigenschaften, Diplomarbeit, FH Aalen (1999)
[SNN90]	SNNS, User Manual, Version 4.0, University of Stuttgart, Institute for parallel and distributed, High performance systems (IPVR) (1990)
[Sta95]	Stahl-Informations-Zentrum Düsseldorf, Wärmebehandlung von Stahl - Härten, Anlassen, Vergüten, Bainitisieren, 2. Aufl. (1995)
[The98]	Theuer, J.: Quantitative Metallographie mit Bildverarbeitung, Diplomarbeit, FH Aalen (1998)
[Weg89]	Wegst, C.: Stahlschlüssel, Verlag Stahlschlüssel Wegst GmbH (1989)
[Wel00]	Die Welt, 17.01.2000

8 Anhang

8.1 Makro zur Messung der Texturparameter nach Haralick im KS400

```
#-----  
# MACRO:      haram.mocarella  
# SYSTEM:     KS400 - Version 3.0  
# ABSTRACT:   Macro for measurement of Texture Parameter HARAM1-11  
# AUTHORS:    tb+af  
# HISTORY:    19/07/00  
#-----  
#  
#  
  
imgdelete ""  
Gclear 0  
fcnload "haram.mcr"  
global fsizeX,fsizeY,fstartX,fstartY  
global dbs  
tvselect "WVFG_METEOR"  
STopen "Mcp4_AXPB_Sony"  
STsetprop "FocusRange",50  
dbs="Probe"  
fsizeX = 560  
fsizeY = 560  
fstartX = 10  
fstartY = 5  
AF = 3  
fk = 0  
  
#Messfeatures  
  
imgdelete ""  
Gclear 0  
  
read dbs,"Probenbezeichnung eingeben !!"  
DBdelete dbs+"_haram"  
  
#Vergroesserung, Anzahl Messfelder, Autofokus  
! Eingaben obj,nx,ny,AF  
  
if obj == 1  
    MSsetprop "SCALEX",0.41841  
    MSsetprop "SCALEY",0.41841  
endif  
  
if obj == 2  
    MSsetprop "SCALEX",0.165017  
    MSsetprop "SCALEY",0.165017  
endif
```

```

if obj == 3
  MSsetprop "SCALEX",0.081429
  MSsetprop "SCALEY",0.081429
endif

while 1
  STdefhome
  MByesno "Nullpunkt justiert??"
  if _STATUS == 1:break
endwhile

STgetpos pX0,pY0,pZ0
MSgetprop "SCALEX",scalex
MSgetprop "SCALEY",scaley

StepX := int(fsizeX* scalex/0.25)
StepY := int( fsizeY* scaley/0.25)

showwindow "Messages",1
Append = _OFF
for iy=0;iy<ny;iy=iy+1
  for ix=0;ix<nx;ix=ix+1
    STmove "XY",pX0+ix*StepX,pY0+iy*StepY,0,0,1,1
    STwait "XY"
    fk = fk + 1
    if fk >= AF
      STautofocus
      fk = 0
    endif
    STwait "XYZA"
    tvinp 1
    mess_haram 1
    Append = _ON
    write "@"
    write
    write "Feld in X-Richtung:", ix+1, "von",nx
    write "Feld in Y-Richtung:", iy+1,"von",ny
    Anzahl=(iy)*nx+ix+1
    write Anzahl,"von",nx*ny
    imgdisplay 1
    if ix==0: STgetpos 0,0,posZ,0,0
  endfor
  STmove "Z",0,0,posZ,0,0,1
endfor

STwait "XY"
STmove "XYZ",pX0,pY0,pZ0,0,0,1

Gstring 130,230,"Habe fertig!!",12,"SWV___50",0

stop

```

```

macro Eingaben (*Objektiv=1,*Anzahl_X=8,*Anzahl_Y=8,*Autofokus=3)
~Eingaben^taetigen^!
~$group( 1:Epi 20x, 2:Epi 50x, 3:Epi 100x Oel)
~$spin
~$spin
~$spin (1,5,1)

endmacro

macro tvinp (Input = 1)
  tvframeinput Input,fstartX,fstartY,fsizex,fsizex
endmacro

macro mess_haram (Append = _OFF)

  dbsharam =dbs+"_haram"

MSsetprop
"REGIONFEAT","HARAM1,HARAM2,HARAM3,HARAM4,HARAM5,HARAM6,HARAM7,HARAM8,HARAM9,
HARAM10,HARAM11"

imgRGB2grey 1,2
  RGnew 2
  MSmeasall dbsharam,1,1
endmacro

```

8.2 Makro zur Messung der Haralick-Parameter und der Härte im KS400

```

#-----
# MACRO:      haram_mit_haerte.mocarella
# SYSTEM:    KS400 - Version 3.0
# ABSTRACT:  Macro for measurement of Texture Parameter HARAM1-11 and hardness HK
# AUTHORS:   tb+af
# HISTORY:   02/08/00
#-----
#
#
imgdelete "*"
Gclear 0

fcnload "haram_mit_pause_fuer_haertemessung.mcr"
global fsizex,fsizex,fstartX,fstartY
global dbs
tvselect "WVFG_METEOR"
STopen "Mcp4_AXPX_Sony"
STsetprop "FocusRange",50
dbs="Probe"
fsizex = 560
fsizex = 560
fstartX = 10
fstartY = 5
AF = 3
fk = 0

```

```
#Messfeatures

imgdelete ""
Gclear 0

read dbs,"Probenbezeichnung eingeben !!"
DBdelete dbs+"_haram"

#Vergroesserung, Anzahl Messfelder, Autofokus
! Eingaben obj,nx,ny,AF,sw

if obj == 1
  MSsetprop "SCALEX",0.41841
  MSsetprop "SCALEY",0.41841
endif

if obj == 2
  MSsetprop "SCALEX",0.165017
  MSsetprop "SCALEY",0.165017
endif

if obj == 3
  MSsetprop "SCALEX",0.081429
  MSsetprop "SCALEY",0.081429
endif

while 1
  STdefhome
  MByesno "Nullpunkt justiert??"
  if _STATUS == 1:break
endwhile

STgetpos pX0,pY0,pZ0
MSgetprop "SCALEX",scalex
MSgetprop "SCALEY",scaley

StepX := int(fsizeX* scalex/0.25)
StepY := int( fsizeY* scaley/0.25)

showwindow "Messages",1
Append = _OFF

ok = _TRUE

STmove "XYZA",0,sw*370,0,0,0,0
STwait "XYZRTA"

while ok
  STmove "XYZA",0,-(sw*370),0,0,0,0
  STwait "XYZRTA"
  STautofocus
  tvinp 1
  mess_haram 1
  Append = _ON
```

```
imgdisplay 1
  MBokcancel "nächstes Bild"
  ok = _STATUS
endwhile
```

```
stop
```

```
macro Eingaben (*Objektiv=1,*Anzahl_X=8,*Anzahl_Y=8,*Autofokus=3,*Schrittweite=4)
~Eingaben^taetigen^!
~$group( 1:Epi 20x, 2:Epi 50x, 3:Epi 100x Oel)
~$spin
~$spin
~$spin (1,5,1)
~$spin
endmacro
```

```
macro tvinp (Input = 1)
  tvframeinput Input,fstartX,fstartY,fsizeX,fsizeY
endmacro
```

```
macro mess_haram (Append = _OFF)
```

```
  dbsharam =dbs+"_haram"
```

```
MSsetprop
"REGIONFEAT","HARAM1,HARAM2,HARAM3,HARAM4,HARAM5,HARAM6,HARAM7,HARAM8,HARAM9,
HARAM10,HARAM11"
```

```
imgRGB2grey 1,2
  RGnew 2
  MSmeasall dbsharam,1,1
endmacro
```