



**Auswahl eines Härtemittels zur Herstellung  
perlitischer und bainitischer Schienen  
und Ermittlung der optimalen Prozessparameter**

## **Diplomarbeit**

eingereicht von

**Wolfgang Vanovsek**

am Lehrstuhl für Metallurgie  
der Montanuniversität Leoben

Leoben, Jänner 2006





## Diplomarbeit

# S 629

Herrn **Wolfgang Vanovsek**

wird vom Lehrstuhl für Metallurgie folgendes Diplomarbeitsthema gestellt:

### Auswahl eines Härtemittels zur Herstellung perlitischer und bainitischer Schienen und Ermittlung der optimalen Prozessparameter

#### Ziel der Arbeit:

Bei der **voestalpine** Schienen GmbH werden 2 Arten von kopfgehärteten Schienen für höchste Ansprüche im Eisenbahnverkehr durch eine Wärmebehandlung im Tauchverfahren hergestellt. Abgesehen von der unterschiedlichen Prozessführung - kontinuierlich beim HSH- und isotherm beim Bainit-Prozess - sind die Eigenschaften beider Härtemittel unterschiedlich. Die **voestalpine** Schienen GmbH plant beide Schienenarten in ein und demselben Härtemittel herzustellen.

Ziel der Arbeit ist die Auswahl eines Härtemittels und Ermittlung der optimalen Prozessparameter zur Erzeugung von sowohl perlitischen als auch bainitischen Schienen in einer stabilen Dampfhaupphase. Die Prozessdauer soll dabei minimiert, die Gefügehärte maximiert werden. Berücksichtigung finden sollen auch andere HME-Eigenschaften, wie etwa Alterungsbeständigkeit, Ausschleppverluste, Anfälligkeit auf bakterielle Belastung etc.

#### Literaturteil:

Wärmebehandlung von Schienenstählen (allg. und speziell im Tauchverfahren in polymeren, wassermischbarer Abschreckmitteln); Gefügeumwandlungen (Perlit, Bainit); Wärmeübergänge in flüssigen Medien (Berücksichtigung der Dampfhaup)

Eigenschaften (chem., phys.) von polymeren, wassermischbaren Abschreckmitteln

#### Praktischer Teil:

1. Untersuchung der Abschreckwirkung verschiedener Härtemittel.
2. Auswahl des Härtemittels, das die schnellste Abschreckung bei stabiler Dampfhaupphase ermöglicht. Ermittlung der dazu nötigen, optimalen Prozessparameter (Temp., Konz., Luftmenge, Anströmintensität) unter Berücksichtigung von Alterungsbeständigkeit, Ausschleppverlusten, Anfälligkeit auf biologische Belastung etc.
3. Abklären der Möglichkeiten bainitische Schienen mit diesem in Pkt 2 gefundenen Härtemittel zu erzeugen (Intervalltauchung ?, opt. Prozessparameter ?).



Leoben, im Januar 2005

Department Metallurgie

Univ. Prof. Wilfried Krieger



WWW.UNILEOBEN.AC.AT

## **Danksagung**

**Ich möchte mich an dieser Stelle bei**

**Herrn Dipl.Ing. Dr. mont. Jan Friedemann Plaul**

**(Lehrstuhl für Metallurgie; Montanuniversität Leoben)**

**und**

**Herrn Dipl.Ing. Gregor Girsch**

**(voestalpine Schienen GmbH)**

**für die wissenschaftliche Betreuung meiner Diplomarbeit bedanken.**

**Mein Dank gilt auch den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der voestalpine Schienen GmbH, die durch ihre Unterstützung die Umsetzung des praktischen Teiles dieser Arbeit erst möglich gemacht haben.**

**Im Besonderen danke ich:**

**Frau Dr.Ing. Birgit Eisenkolb**

**Herrn Dipl.Ing. Dr. mont. Peter Pointner**

**Herrn Dipl.Ing. Hans Peter Brantner**

**Herrn Dipl.Ing. Richard Stock**

**Herrn Dipl.Ing. Peter Schwarzböck**

**Herrn Ing. Christian Hayden**

**Herrn Erich Novak**

## **Eidesstattliche Erklärung**

**Ich erkläre an Eides Statt, dass ich die vorliegende Diplomarbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzen Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe**



## Auswahl eines Härtemittels zur Herstellung perlitischer und bainitischer Schienen und Ermittlung der optimalen Prozessparameter

**Diplomarbeit**  
eingereicht von

**Wolfgang Vanovsek**



### Kurzfassung

Bei der voestalpine Schienen GmbH werden zwei Arten von kopfgehärteten Schienen für höchste Ansprüche im Eisenbahnverkehr hergestellt.

Abgesehen von der unterschiedlichen Prozessführung - kontinuierlich beim HSH-Prozess und isotherm beim Bainit-Prozess – sind die Eigenschaften der Härtemittel verschieden. Die voestalpine Schienen GmbH plant beide Schienenarten mit ein und demselben Härtemittel herzustellen.

Das Abschreckverhalten von polymeren, wassermischbaren Härtemitteln kann durch folgende Prozessparameter entscheidend beeinflusst werden:

- Anströmintensität des Härtemediums an die Schiene
- Temperatur des Härtebades
- Konzentration des Härtebades
- Zugabe von Luft in das Härtemedium bzw. von der zugeführten Luftmenge

Diese Einflüsse wurden in einem Vorprojekt (Metallurgie 06/01) untersucht. Heute sind bereits Härtemittel verfügbar, die eine schroffere Abschreckung in einer stabilen Dampfhautphase ermöglichen.

Ziel der Diplomarbeit ist, die Auswahl eines Härtemittels und die Ermittlung der optimalen Prozessparameter zur Erzeugung von sowohl perlitischen als auch bainitischen Schienen in einer stabilen Dampfhautphase.

**Industriepartner**

**voestalpine**  
SCHIENEN GMBH





## Selection of a quenching agent for the manufacture of pearlitic and bainitic rails, and the determination of the optimal process parameters

### Diploma thesis

presented by

**Wolfgang Vanovsek**



### summary

Voestalpine-Schienen GmbH produces two types of heat treated rails for the highest demands in railroad traffic.

Aside from the different modes of processing – continuous cooling in the HSH process and isothermal transformation in the bainitic process – the properties of quenching agents are different. Voestalpine-Schienen GmbH is planning to manufacture both types of rails with one single quenching agent.

The cooling mechanism of aqueous polymer quenchants can be decisively influenced by the following process parameters:

- the intensity of the flow of the quenchant onto the rail
- the temperature of the quenchant
- the concentration of the quenchant
- addition of air into the quenchant and the amount of air added

These influences were investigated in an earlier project (Metallurgie 06/01). Today quenchants are available which make a more abrupt cooling in a stable film boiling phase possible.

The aim of this diploma thesis is the selection of an appropriate quenchant and the determination of the optimal process parameters for the manufacture of both pearlitic and bainitic rails in a stable film boiling phase.

**Industriepartner**

**voestalpine**  
SCHIENEN GMBH



## **Inhaltsverzeichnis**

<b>Verwendete Formelzeichen .....</b>	<b>3</b>
<b>Verwendete Abkürzungen .....</b>	<b>3</b>
<b>1 Einleitung und Aufgabenstellung .....</b>	<b>4</b>
<b>2 Theoretische Grundlagen .....</b>	<b>11</b>
2.1 Phasenumwandlungen .....	11
2.1.1 Ferritisch-Perlitische Umwandlung .....	14
2.1.2 Bainitische Umwandlung .....	21
2.1.3 Martensitische (athermische) Umwandlung .....	26
2.2 Technische Wärmebehandlungen .....	30
2.3 Wärmebehandlung von Schienenstählen .....	34
2.4 Polymerarten und Eigenschaften .....	37
2.4.1 PVA: polyvenyl alcohol .....	37
2.4.2 PAG: polyalkylen glykol .....	37
2.4.3 PVP: polyvinyl pyrolidone .....	38
2.4.4 SPA: Sodium polyacrylate .....	38
2.5 Abschreckmechanismen .....	39
2.6 Änderung der Eigenschaften mit der Zeit .....	40
2.7 Wirkung von polymeren, wassermischbaren Härtemitteln .....	41
2.7.1 Wärmeübertragung und Abkühlverlauf .....	41
2.7.2 Filmbildungsmechanismus.....	45
2.7.3 Einfluss auf den Abkühlverlauf .....	46
2.8 Umweltverträglichkeit und gesundheitliche Aspekte .....	50
<b>3 Praktischer Teil .....</b>	<b>52</b>
<b>3.1 Anlagen .....</b>	<b>52</b>
3.1.1 HSH <sup>®</sup> -Anlage .....	52
3.1.2 Der Quenchomat .....	55
3.1.3 2m-Versuchsanlage .....	60
<b>3.2 Charakterisierung der getesteten Härtemittel.....</b>	<b>63</b>
3.2.1 Polymer AP .....	63
3.2.2 Breox Quenchant HT .....	63
3.2.3 Ferroquench AP-2 .....	64

3.2.4	Aquaquench 631 .....	64
3.2.5	Aquaquench EC/WE .....	64
<b>3.3</b>	<b>Versuchsablauf .....</b>	<b>65</b>
3.3.1	Versuche am Quenchomat.....	65
3.3.2	Versuche auf der 2m-Anlage.....	69
<b>4</b>	<b>Ergebnisse.....</b>	<b>74</b>
4.1	Auswertung und Reproduzierbarkeit.....	74
4.1.1	Quenchomat.....	74
4.1.2	2m-Anlage.....	75
4.2	Einflussfaktoren auf das Abkühlverhalten und die Gefügeausbildung.....	80
4.2.1	Quenchomat.....	80
4.2.2	2m-Anlage.....	93
<b>5</b>	<b>Diskussion und Ausblick.....</b>	<b>107</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>111</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>113</b>
	<b>Tabellen- und Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>115</b>
	<b>Anhang A.....</b>	<b>118</b>
	<b>Anhang B.....</b>	<b>122</b>

## Formelzeichen und Abkürzungen

v: Eintauchgeschwindigkeit des Prüfkörpers.....[m/s]

g: Erdbeschleunigung.....[m/s<sup>2</sup>]

h: Fallhöhe des Prüfkörpers.....[m]

R<sub>m</sub>: Zugfestigkeit.....[MPa]

R<sub>p0,2</sub>: Streckgrenze.....[MPa]

A<sub>4</sub>: Bruchdehnung.....[%]

Z: Brucheinschnürung.....[%]

K<sub>IC</sub>: Bruchzähigkeit.....[MPam<sup>0,5</sup>]

HME: Härtemedium

HMI: Härtemittel

PVA: polyvenyl alcohol

PAG: polyalkylen glykol

PVP: polyvinyl pyrolidone

SPA: Sodium polyacrylate

VAS: VOEST-ALPINE Schienen GmbH & Co KG

HSH<sup>®</sup>: Head Special Hardened

DOBAIN<sup>®</sup>: Donawitz Bainit

2m-Anlage: 2 Meter - Versuchsanlage



## 1 Einleitung und Aufgabenstellung

Viele Stahlteile werden irgendeiner Art von Wärmebehandlung unterzogen, beispielsweise um hohe Festigkeit, Oberflächenhärte, besondere Zähigkeit oder gute Bearbeitbarkeit zu erzielen. Steigende Anforderungen an Sicherheit und Wirtschaftlichkeit in der Fertigung bedingen eine Steuerung des Wärmebehandlungsverlaufs, damit die gewünschten Eigenschaften der Teile mit geringer Ausschussquote oder erneute Behandlung erzielt werden können. Die Einwirkung des Erwärmungs- und Diffusionsverlaufs auf das Härtegut ist hinreichend bekannt. Die Kenntnisse über die Einwirkung der Abschreckmittel und Abschreckverhältnisse auf die Eigenschaften des Härteguts sind jedoch weniger gut dokumentiert und auch unzureichend, wenn es darum geht, das Ergebnis einer Wärmebehandlung im Voraus zu bestimmen.

In industriellen Wärmebehandlungsanlagen werden in zunehmendem Maße wässrige Polymerlösungen als Abschreckmittel und Ersatz für Härteöle oder Wasser eingesetzt. Die wesentlichen Gründe für das Interesse an Polymerlösungen als Alternative zu Härteölen sind folgende:

- keine Feuergefahr
- keine Entwicklung von Rauch oder Ölnebel
- größere Abschreckintensitäten im Vergleich zu Härteölen verbunden mit der Möglichkeit, niedriger legierte, billigere Stähle zu verwenden; jedoch ist das Risiko der Rissbildung und des Verzuges größer
- kein Entfetten der gehärteten Teile

Im Vergleich zur Wasserhärtung hat die geringere Abschreckintensität von polymeren Härtemitteln (HMi) weniger Verzug und ein geringeres Risiko der Rissbildung zur Folge. Auf der anderen Seite müssen Polymerlösungen zur Gewährleistung gleichmäßiger Härteergebnisse und ausreichender Lebensdauer ständig in Bezug auf Konzentration, Temperatur, Badbewegung, Verschmutzungsgrad und bakterielle Belastung kontrolliert und gewartet werden.[1]

Bei der voestalpine Schienen GmbH werden 2 Arten von kopfgehärteten Schienen für höchste Ansprüche im Eisenbahnverkehr durch eine Wärmebehandlung im Tauchverfahren hergestellt (**Tabelle 1.1**):

Schienenart	Prozess	Härtemittel	Abschreckvorgang	Gefüge
HSH	Kopftauchung; kontinuierliche Umwandlung	Wassermischbares Polymer; <b>Sodiumpolyacrylat SPA</b>	In der Dampfhautphase	feinperlitisches
DOBAIN	Intervalltauchung; quasi-isotherme Umwandlung	Wassermischbares Polymer; <b>Polyalkylenglykol PAG</b>	In der Kochphase	bainitisch: unterer Bainit

**Tabelle 1.1: Ausgangssituation**

Abgesehen von der unterschiedlichen Prozessführung - kontinuierlich beim HSH-Prozess und isotherm beim Bainit-Prozess – sind die Eigenschaften beider Härtemittel verschieden. Die voestalpine Schienen GmbH plant beide Schienenarten mit ein und demselben Härtemittel herzustellen.

Das Abschreckverhalten von polymeren, wassermischbaren Härtemitteln kann durch folgende Prozessparameter entscheidend beeinflusst werden:

- Anströmintensität des Härtemediums an die Schiene
- Temperatur des Härtebades
- Konzentration des Härtebades
- Zugabe von Luft in das Härtemedium bzw. von der zugeführten Luftmenge

Diese Einflüsse wurden in einem Vorprojekt (Metallurgie 06/01) untersucht [14]. Heute sind bereits Härtemittel verfügbar, die eine schroffere Abschreckung in einer stabilen Dampfhautphase ermöglichen.

Ziel der Diplomarbeit ist, die Auswahl eines Härtemittels und die Ermittlung der optimalen Prozessparameter zur Erzeugung von sowohl perlitischen als auch bainitischen Schienen in einer stabilen Dampfhautphase (**Tabelle 1.2**).

Abschreckprozess	Schientyp	
	HSH	DOBAIN
Kochphase	Versuchsstadium Dr.Eisenkolb	Laufende Optimierung Dr.Eisenkolb
Dampfhautphase	Prozessoptimierung Diplomarbeit Vanovsek	Abklärung der grundsätzlichen Möglichkeit Diplomarbeit Vanovsek

**Tabelle 1.2: Aufgabenstellung**

Von Seiten der voestalpine Schienen GmbH werden seit längerer Zeit unter der Leitung von Fr. Dr. Eisenkolb Versuche durchgeführt, bei denen das DOBAIN<sup>®</sup>-Verfahren laufend optimiert wird und die Herstellung von bainitischen Schienen durch eine isotherme Umwandlung erprobt wird. Die Diplomarbeit läuft parallel zu diesen Versuchen, wobei die gewonnenen Erkenntnisse miteinander verglichen werden können.

Bei der Herstellung von sowohl perlitischen als auch bainitischen Schienen in einer stabilen Dampfhautphase muss folgende Ausgangslage berücksichtigt werden.

- **Perlitische Schiene**

- Um ein feinperlitisches Gefüge mit gleichmäßig hoher Härte zu erreichen, wird beim HSH<sup>®</sup>-Verfahren der Schienenkopf in der Dampfhautphase kontinuierlich abgekühlt.
- Die minimale Dauer des Abschreckprozesses ist durch das kontinuierliche ZTU-Schaubild für die HSH<sup>®</sup>-Schiene (**Bild 1.1**) definiert. Daraus folgt, dass der Handlungsfreiraum bei der Optimierung der Behandlungszeit stark eingeschränkt ist. Eine zu schnelle Abkühlung hätte zu Folge, das sich am Rand der Schiene bereits ein Bainitsaum bildet bzw. bei noch schnellerer Abkühlung sich bainitische und martensitische Fremdgefüge über den ganzen Schienenquerschnitt bilden (**Bild 1.2**).
- Die Abschreckintensität von polymeren Abschreckmittel ist sehr stark von ihrer Konzentration abhängig. Eine Erhöhung der Badkonzentration führt zu einer stabileren Abschreckphase und somit zu einer langsameren Abkühlung [22]. Ein wesentlicher Punkt bei der Prozessoptimierung ist die Senkung der Stoffmengenkonzentration des

Härtemittels im Härtemedium, da dies den Verbrauch an Härtemittel und somit die Produktionskosten senkt.

- Großen Einfluss auf das Abschreckverhalten nimmt auch die Temperatur des Abschreckbades. Eine hohe Badtemperatur begünstigt zwar die Bildung einer stabilen Dampfhautphase, erhöht aber gleichzeitig die Ausschleppverluste durch Verdunstung. Dies erhöht wiederum die Konzentration im Abschreckbad. Die HSH<sup>®</sup>-Anlage ist mit einem Wärmetauschersystem ausgestattet, mit dem die Temperatur des Abschreckbades in einem Temperaturbereich zwischen 25 und 50 °C optimal für den Abschreckprozess einstellbar ist. Bei den Versuchen auf der 2m-Anlage sollte deshalb die Badtemperatur ebenfalls in diesem Temperaturbereich liegen.
- Die Einbringung von Luft in das Abschreckbad begünstigt ebenfalls die Bildung einer stabilen Dampfhautphase. Dadurch wird es möglich eine stabile Dampfhautphase, die für eine gleichmäßige langsame Abkühlung notwendig ist, schon bei einer niedrigen Badkonzentration zu erreichen.
- Durch eine Variation der Anströmgeschwindigkeit ist eine Erhöhung bzw. Senkung der Abschreckgeschwindigkeit möglich, wobei hier durch die Pumpenleistung der Anlage ebenfalls Grenzen gesetzt sind.

- **Bainitische Schiene**

- a) kontinuierliche Abkühlung

Aus **Bild 1.3** ist ersichtlich, dass sich alle Abkühlungskurven vom Schienenrand bis zum Schienenkern in einem Zeitkorridor von 200 bis 600 Sekunden befinden müssen. Daraus ergeben sich zwei wichtige Fragen, die es in dieser Arbeit zu erörtern gilt:

- 1) Kann man mit polymeren Abschreckmitteln unter Ausnutzung einer stabilen Dampfhautphase so niedrige Abkühlgeschwindigkeiten erreichen?
- 2) Ist es möglich, ein homogenes Gefüge aus unterem Bainit ohne Anteile von Fremdgefüge (Martensit, oberem Bainit, Perlit) zu erreichen?

- b) isotherme Umwandlung

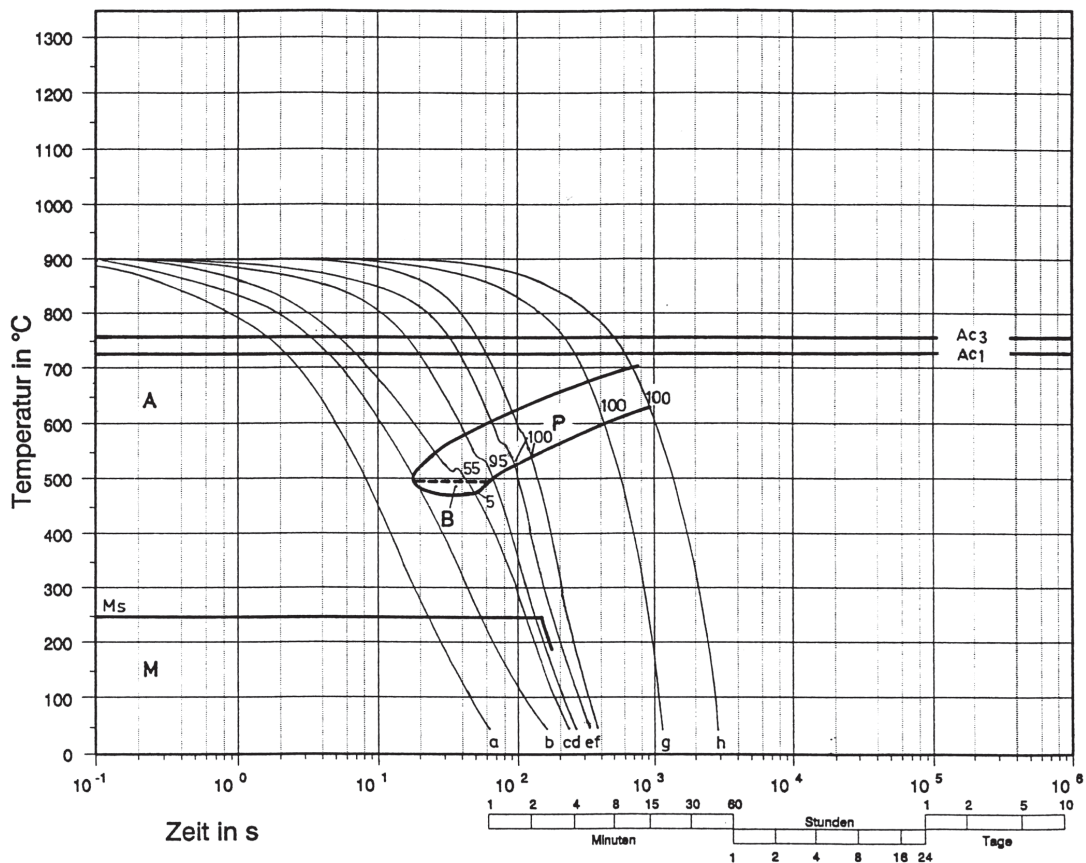
Um eine isotherme Umwandlung zu erhalten, wird die Schiene sehr rasch auf eine bestimmte Temperatur abgekühlt und für eine bestimmte Zeit auf dieser Temperatur gehalten.

Zur Erzielung einer gleichmäßig hohen Härte und zur Reduzierung von Spannungen im oberen Temperaturbereich ist es notwendig, dass die Dampfhautphase möglichst kurz gehalten wird und der Übergang von der Dampfhaut- in die Kochphase an der gesamten

Werkstoffoberfläche gleichmäßig erfolgt. Dies wird durch die ersten zurückbleibenden Polymeranteile aus den Abschrecklösungen erreicht.

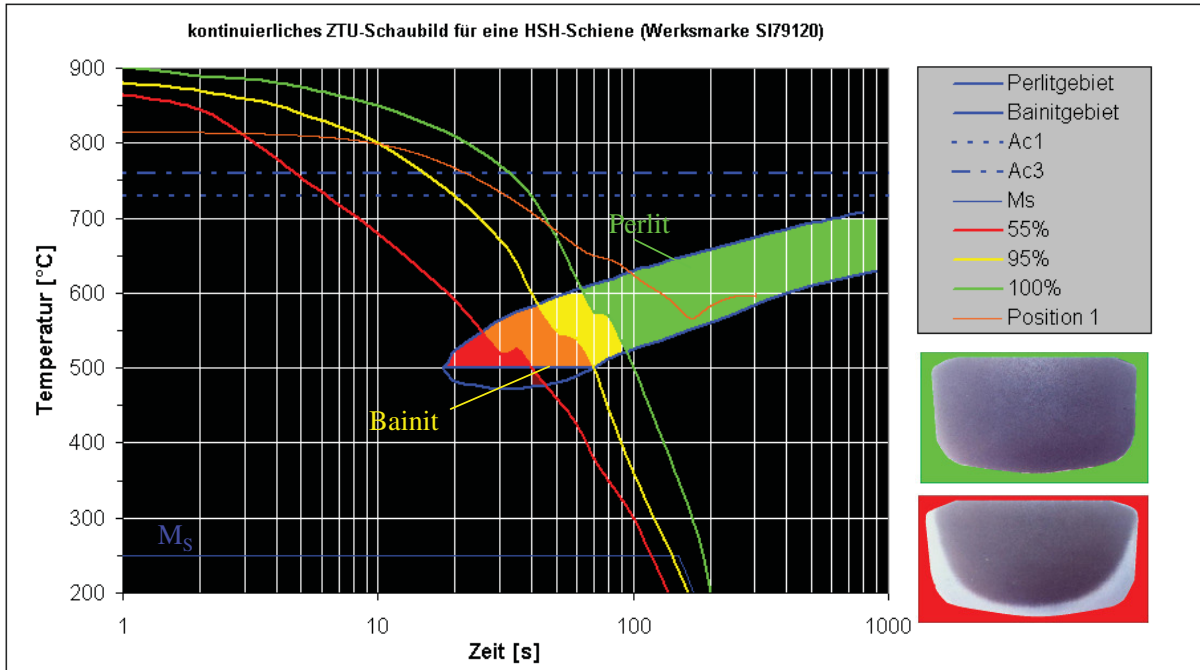
Beim DOBAIN<sup>®</sup>-Verfahren lässt man durch einen Intervalltauchung die Temperatur der Schiene um die Umwandlungstemperatur pendeln. Immer wenn die Schiene das Tauchbad verlässt erwärmt sie sich wieder durch die Rückwärme und wird dann wieder abgekühlt. **Bild 1.4** zeigt, dass sich dieser Vorgang in einem Temperaturbereich von 300 bis 400 °C abspielen sollte. Daraus ergeben sich folgende Fragen:

- 1) Kann man trotz einer stabilen Dampfhautphase die benötigten, hohen Abkühlgeschwindigkeiten erreichen.
- 2) Können die Prozessparameter so variiert werden, dass beide Schienenarten mit ein und demselben Härtemittel hergestellt werden können?

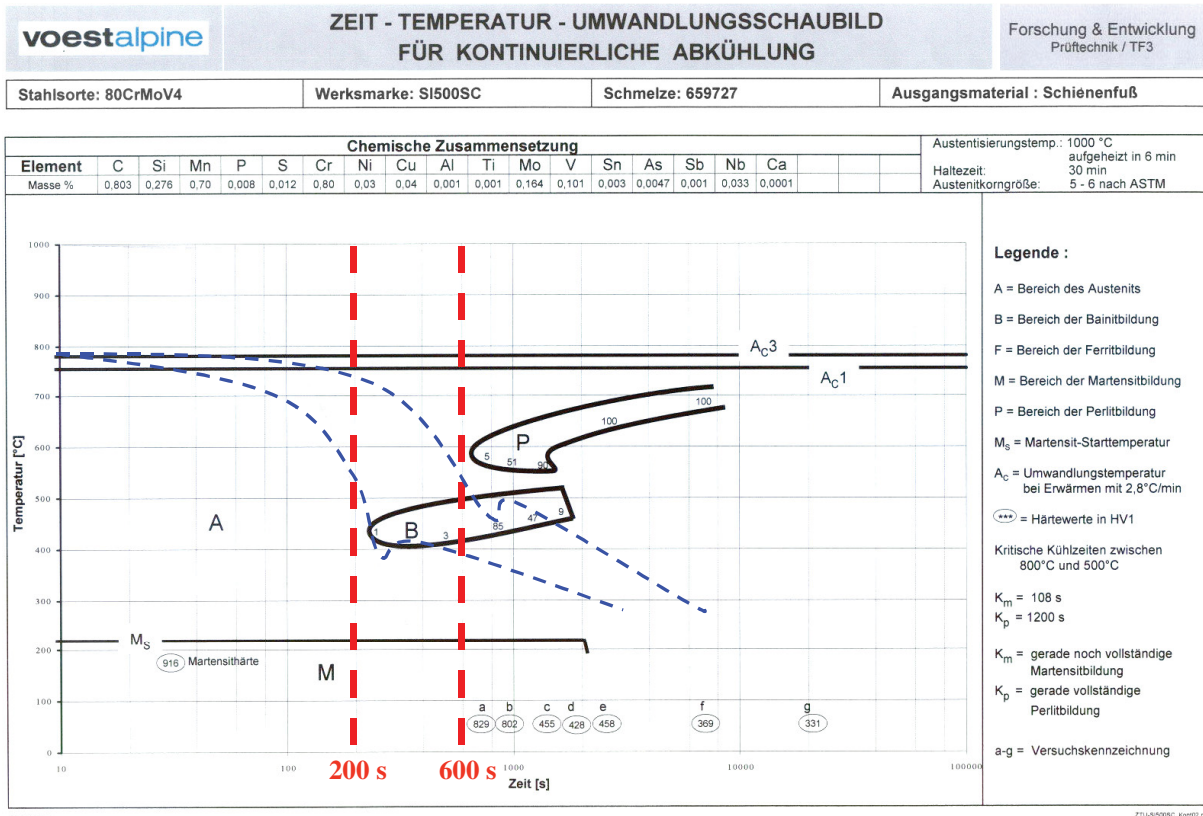


**Bild 1.1:** Kontinuierliches ZTU-Schaubild für eine HSH-Schiene (Werksmarke SI79120)

# 1 Einleitung und Aufgabenstellung

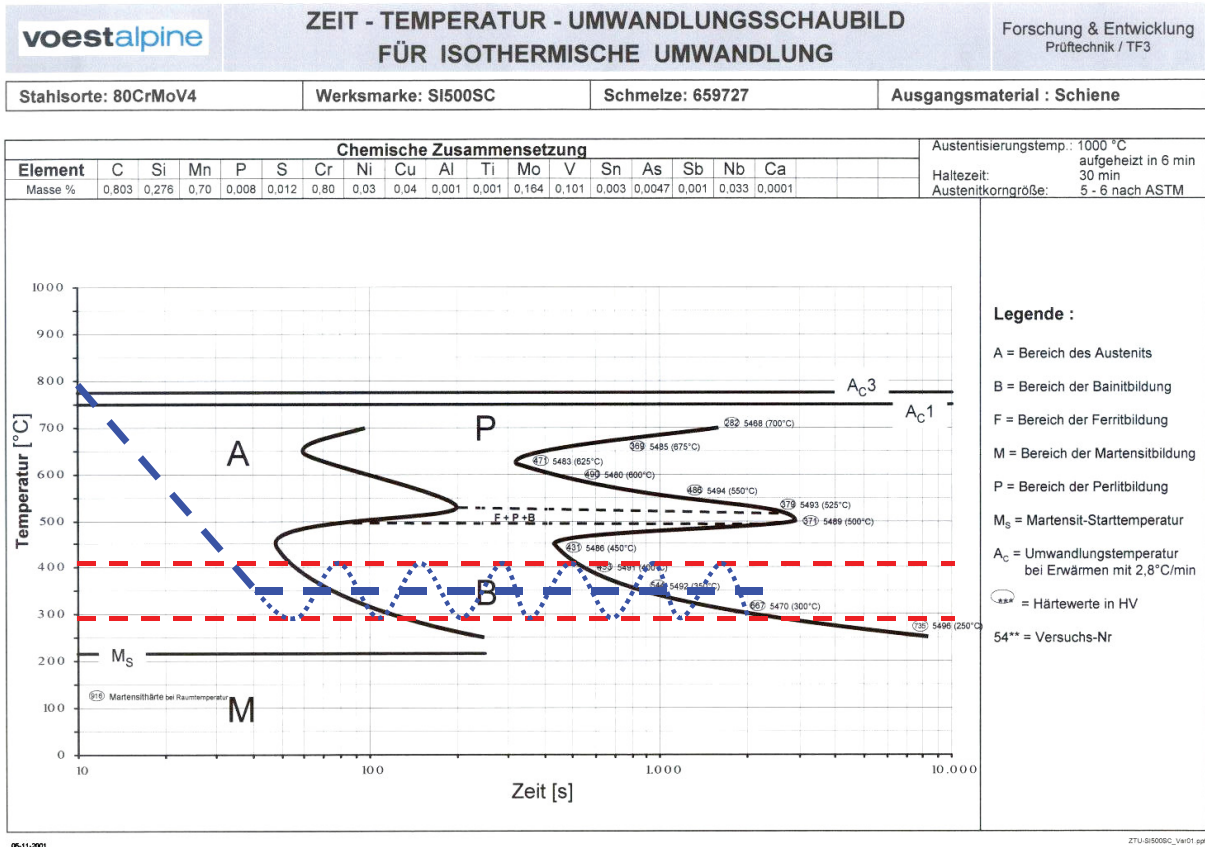


**Bild 1.2:** Kontinuierliches ZTU-Schaubild für eine HSH-Schiene (Werksmarke SI79120)



**Bild 1.3:** Kontinuierliches ZTU-Schaubild für eine DOBAIN-Schiene (Werksmarke SI500SC)

# 1 Einleitung und Aufgabenstellung



**Bild 1.4: Isothermes ZTU-Schaubild für eine DOBAIN-Schiene (Werksmarke SI500SC)**

## 2 Theoretische Grundlagen

### 2.1 Phasenumwandlungen

Die große Vielfalt der Eigenschaften von Stählen beruht im Wesentlichen auf ihrer Möglichkeit unterschiedliche Gefüge einzustellen. Von großer Bedeutung hierfür sind die allotropen Phasenumwandlungen, d.h. Phasenumwandlungen mit Änderungen der kristallographischen Struktur, und Ausscheidungsvorgänge, bei denen aus einem übersättigten Mischkristall ein zweiphasiges Gefüge entsteht. Die Abhängigkeit der Phasenumwandlungen von den Zustandsgrößen Temperatur, Konzentration und Druck wird in den Zustandsdiagrammen erfasst.

In vielen technischen Vorgängen ist insbesondere die  $\gamma$ - $\alpha$ -Umwandlung von großer Bedeutung, weil sich diese in einem für Wärmebehandlungen und Warmformvorgänge wichtige Temperaturbereich abspielt. Diese Umwandlung kann gleichgewichtsnah, also wie im Zustandsschaubild beschrieben, ablaufen oder aber bei rascher Abkühlung zunächst unterdrückt werden und dann im Temperaturbereich des unterkühlten Austenits stattfinden. Die Umwandlung kann nicht mehr durch das Zustandsschaubild beschrieben werden, vielmehr wird auf Zeit-Temperatur-Umwandlungsschaubilder zurückgegriffen.

Bei den Phasenumwandlungen im Festkörper kann grundsätzlich zwischen den diffusionsabhängigen und den diffusionslosen Umwandlungen unterschieden werden. Die diffusionsabhängigen Umwandlungen sind thermisch aktivierbar, während die diffusionslosen Umwandlungen athermisch erfolgen und nur durch die Unterkühlung kontrolliert werden. In **Tabelle 2.1** werden die Phasenumwandlungen, die bei der Abkühlung aus der Austenitphase auftreten können, und die dabei entstehenden Gefüge diskutiert. Diffusionskontrolliert bilden sich die Phasen Ferrit und Karbid sowie das Phasengemenge Perlit. Bei den diffusionslosen Phasenumwandlungen legen die Atome nur Wege zurück, die deutlich kleiner als ein Gitterabstand sind. Daher können sie auch bei tiefen Temperaturen stattfinden, bei denen eine Diffusion nicht mehr möglich ist.



1 Merkmal	2 Phasenumwandlung			
	I		II	III
1. Mechanismus	diffusionskontrolliert		bainitisch	diffusionslos
2. Produkt	Ferritisch-perlitisch		Zwischenstufe	Martensit
	Äquiaxiales $\alpha$ + normaler Perlit	Unregelmäßiges $\alpha$ + karbidarmer Perlit	Körniger Bainit bis oberer Bainit	Lanzettenmartensit
3. Bildungsparameter				
3.1 Umwandlungsparameter	etwa 900 bis 640 bzw. 510 °C		etwa 640 bis 510 °C	etwa 510 °C
3.2 Abkühlgeschwindigkeit	sehr klein bis etwa 160 °C/s		etwa 160 bis 3000 °C/s	etwa 3000 °C/s
4. Gesamtgefüge bestehend aus	äquiaxialer Ferrit + Perlit bzw. unregelmäßiger Ferrit + karbidarmer Perlit (bei Umwandlungstemperatur 830 °C und $V_{ab}$ 10 °C/s in Form von Wittmannstätten Ferrit)		Mischgefüge aus Bainit + Produkt unter III + Produkt unter I (außer äquiaxialen Ferrit und normalem Perlit)	Lanzettenmartensit

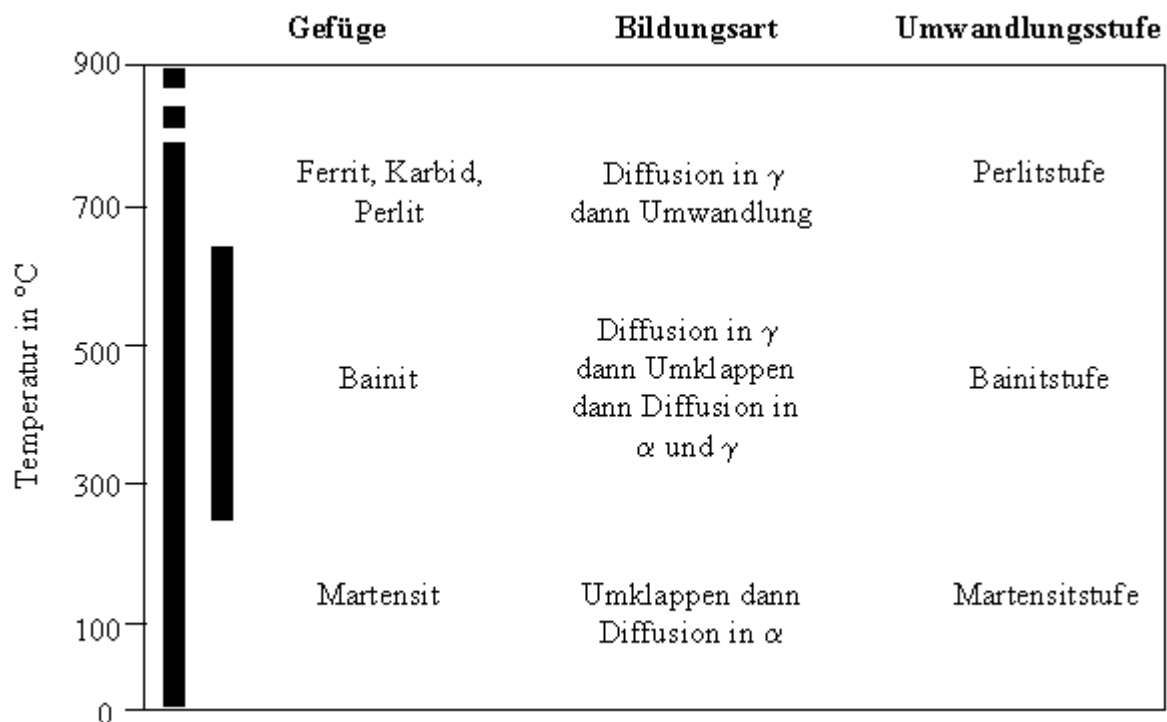
**Tabelle 2.1: Phasenumwandlung bei Abkühlung der Austenitphase eines unlegierten Stahles mit ca. 0,08 Massen-% Kohlenstoff;  $P_f$  = Perlitfinishtemperatur,  $B_s$  = Bainitstarttemperatur.  $M_s$  = Martensitstarttemperatur. [2]**

Die typischen Temperaturen für diffusionskontrollierte Umwandlungen liegen zwischen der Gleichgewichtstemperatur und ca. 500 °C; typisch Abkühlungsgeschwindigkeiten sind < 169 K/s. Erfolgt die Umwandlung diffusionslos durch einen Schervorgang, entsteht als Umwandlungsprodukt die martensitische Phase, die sich unter 500 °C bei hohen Abkühlgeschwindigkeiten bildet. Zwischen diesen beiden Umwandlungsarten kann in einem weiten Abkühlungsgeschwindigkeitsbereich eine Kombination aus diffusionskontrollierter und Scherumwandlung ablaufen; diese Umwandlung wird bainitisch oder auch Zwischenstufenumwandlung genannt.

Die in den Stählen metallographisch sichtbaren Gefüge sind stark von den jeweiligen Randbedingungen der Phasenumwandlung abhängig. Als Ausgangspunkt für technische

Wärmebehandlungen dient in der Regel ein austenitisches Gefüge, aus dem während der Abkühlung stabilere Umwandlungsprodukte entstehen, wobei Korngröße und Homogenität des Austenits die Umwandlungsprodukte mitbestimmen. Je nach Unterkühlung unter die Gleichgewichtstemperatur und nach Abkühlungsgeschwindigkeit können so aus dem Austenit äquiaxialer Ferrit und Perlit, bainitischer Ferrit und Perlit, Bainit – eventuell in Kombination mit bainitischem Ferrit oder mit Martensit – sowie Lanzetten-Martensit entstehen.

Entsprechend der Bildungstemperatur und der entstehenden Gefüge lassen sich in Stählen drei Gruppen von Umwandlungen unterscheiden: die Umwandlung in der Perlit-, Bainitstufe und Martensitstufe. Die in **Bild 2.1** angegebenen sind nur ein Hinweis auf den jeweiligen Bildungsbereich; sie sind stark abhängig vom Gehalt an Legierungselementen und den Abkühlbedingungen. Der Begriff „Umklappen“ beschreibt dabei eine kooperative Atombewegung, die sich in einer Gitterscherung widerspiegelt.



**Bild 2.1: Bildung der wichtigsten Gefüge in unlegierten Stählen. [2]**

Neben diesen allotropen Phasenumwandlungen spielen auch Ausscheidungsvorgänge eine wichtige Rolle bei der Gefügeeinstellung in Stählen. Ausscheidungen sind sekundäre Phasen, die sich bei Unterschreiten der Löslichkeit bilden und keine Eisenmodifikationen sind.

In reinen Eisen-Kohlenstoff-Legierungen sind vor allen Karbide, hier besonders das Eisen-Karbid  $\text{Fe}_3\text{C}$  (Zementit) und dessen Modifikationen, von Bedeutung.

Die ferritisch-perlitische, die bainitische und die martensitische Phasenumwandlung werden im Folgenden näher betrachtet.

### 2.1.1 Ferritische-Perlitische Umwandlung

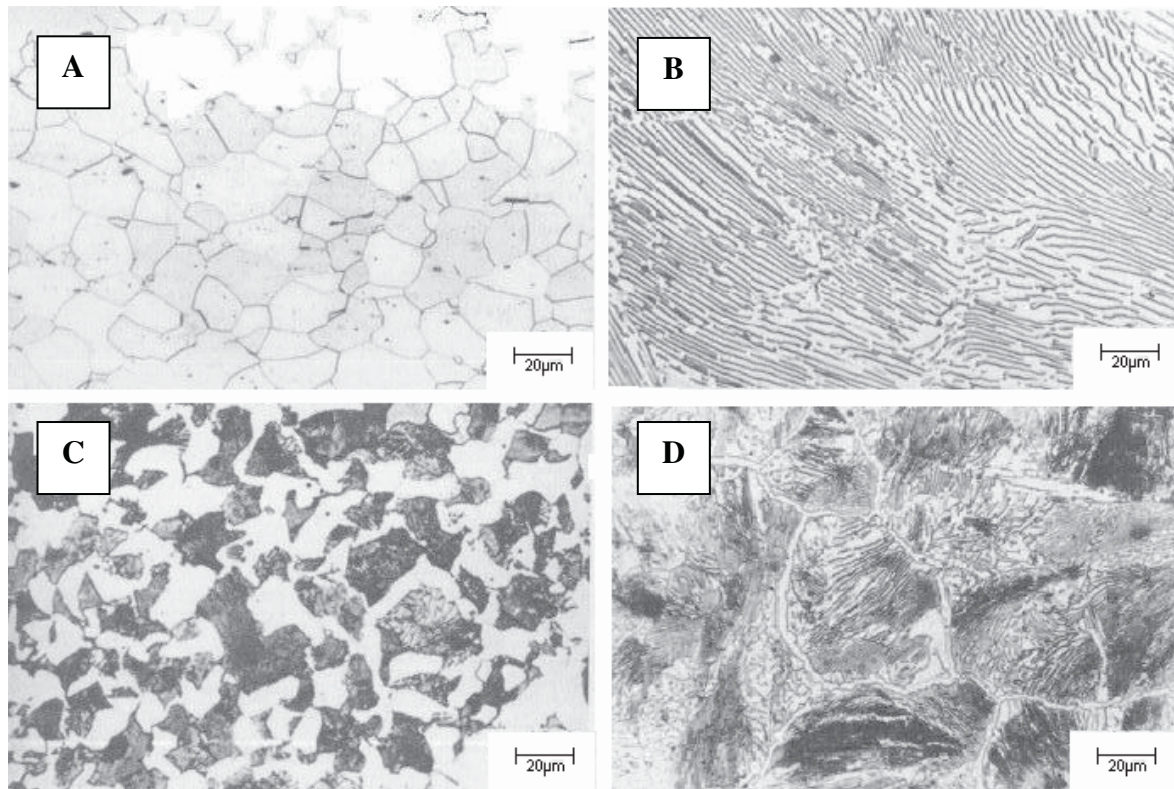
#### 2.1.1.1 Morphologie

Wird nach dem Austenitisieren gleichgewichtsnah abgekühlt, so wandelt die dichtestgepackte kubisch-flächenzentrierte Austenitstruktur gemäß dem Zustandsschaubild Eisen-Zementit bei Unterschreiten der  $A_{C1}$ -Temperatur in den weniger dichtgepackten kubisch-raumzentrierten  $\alpha$ -Mischkristall (Ferrit) und in den orthorombischen Zementit um. Das metallographische Gefüge besteht je nach C-Gehalt des Stahles aus Ferrit und Zementit in unterschiedlicher Anordnung:

Stähle mit sehr geringem C-Gehalt (< 0,02 % C)	Ferrit ( $\alpha$ -Mischkristall) und Tertiärzementit
Untereutektoide Stähle (< 0,8 % C)	Voreutektoider Ferrit ( $\alpha$ -Mischkristall) und Perlit (eutektoider Zementit)
Eutektoide Stähle (0,8 % C)	Perlit
Übereutektoide Stähle (> 0,8 % C)	Perlit und Sekundärzementit (zumeist an den Korngrenzen)

**Tabelle 2.2: Gefüge in Abhängigkeit vom C-Gehalt [2]**

In **Bild 2.2(A-D)** sind typische Produktgefüge der ferritisch-/perlitischen Umwandlungen im metallographischen Schliff dargestellt.



**Bild 2.2:** **A: Ferritgefüge eines Kohlenstoffarmen Stahl**  
**B: Perlitgefüge eines eutektoiden Fe-C-Stahls**  
**C: Ferritisch-perlitisches Gefüge eines untereutektoiden Stahls**  
**D: Perlitisches Gefüge mit Korngrenzen-Zementit eines übereutektoiden Stahls [2]**

Der Gefügebestandteil Ferrit wird diffusionskontrolliert gebildet und den Umwandlungen der Perlitstufe zugeordnet. Ferrit (lat. „ferrum“) ist die metallographische Bezeichnung für den kubisch raumzentrierten  $\alpha$ -Mischkristall, in welchem der Kohlenstoff interstitiell gelöst ist. In seiner typischen Form ist er in der zweidimensionalen Darstellung des ebenen metallographischen Anschliffes als eine Aneinanderreihung polyederförmiger Flächen ausgebildet (**Bild 2.2A**). Die Kohlenstofflöslichkeit des  $\alpha$ -Gitters als Funktion der Temperatur wird für die gleichgewichtsnahen Abkühlung durch die Linie P-Q im Zustandsschaubild Eisen-Zementit dargestellt. Die maximale Kohlenstofflöslichkeit beträgt 0,02 Massen- %.

Wichtigstes Strukturmerkmal des bei höheren C-Gehalten gebildeten Perlits ist eine abwechselnde Folge von Platten („Lamellen“) aus Ferrit und Zementit, wobei die

Eigenschaften perlitischer Werkstoffe vom Lamellenabstand  $\lambda$  abhängen. Bei übereutektoiden Stählen wird der Zementit an den Austenitkorgrenzen gebildet.

Da im Perlit wesentlich mehr Ferrit vorhanden ist als Zementit, bildet der Ferrit die Grundmasse, in die der Zementit plattenförmig eingelagert ist (lamellarer Perlit **Bild 2.2B**).

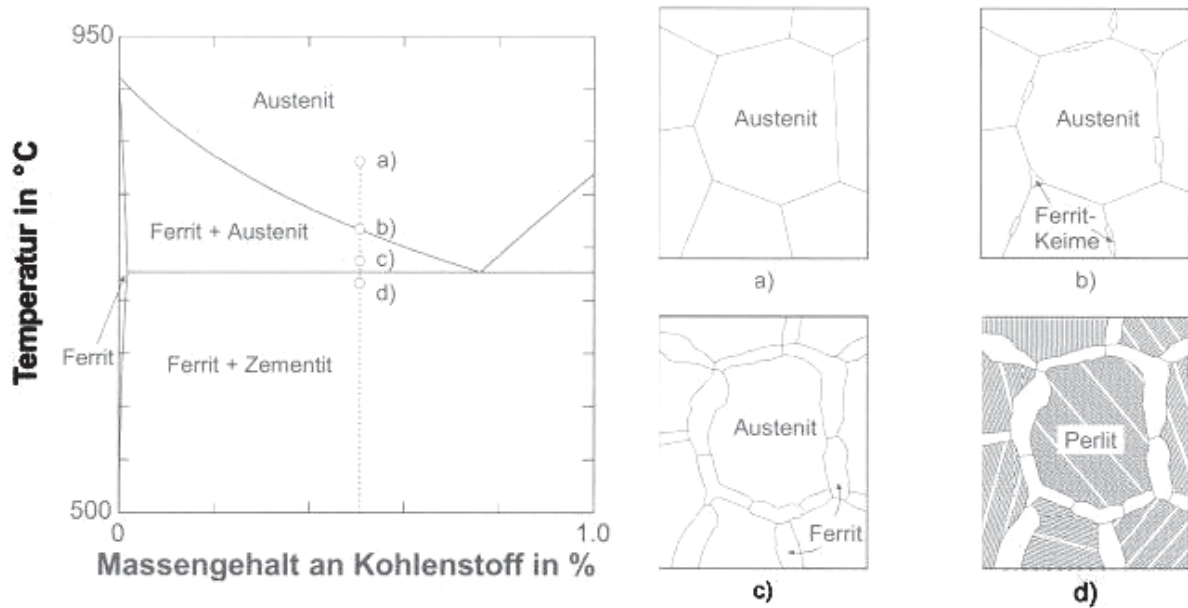
Eisen-Kohlenstofflegierungen mit weniger als 0,8 % Kohlenstoff scheiden während der Abkühlung, sobald die GS-Linie des Fe-Fe<sub>3</sub>C-Diagramms unterschritten wird zunächst primäre, kohlenstoffarme  $\alpha$ -Mischkristalle aus. Die restlichen  $\gamma$ -Mischkristalle reichern sich bis auf 0,8 % C bei 723 °C an und zerfallen daraufhin in das Eutektoid Perlit (**Bild 2.2C**).

Dagegen scheiden Eisen-Kohlenstoff-Legierungen mit einem C-Gehalt zwischen 0,8 und 2,06 % während der Abkühlung, sobald die ES-Linie des Fe-Fe<sub>3</sub>C-Diagramms unterschritten wird zunächst primäre, kohlenstoffreiche Fe<sub>3</sub>C-Kristalle aus. Die übrigbleibenden  $\gamma$ -Mischkristalle verarmen dadurch an Kohlenstoff und zerfallen bei 723 °C isotherm in das Eutektoid Perlit (**Bild 2.2D**).

Die Eigenfarbe von Ferrit und Zementit ist weiß. Also muss auch der Perlit als Gemenge zweier weißer Kristallarten ebenfalls weiß sein. Wenn im Allgemeinen bei geringeren Vergrößerungen der Perlit dunkel erscheint, so ist dies auf besondere Schattenwirkungen des einfallenden Lichts zurückzuführen und nicht etwa auf die Färbung dieser Phase. Der Name „Perlit“ stammt von dem im Lichtmikroskop häufig erscheinenden gold-gelben Glanz, der Perlmut ähnelt.

### 2.1.1.2 Bildung des ferritischen Gefüges: Umwandlung ohne Ausscheidungen

Unter technischen Bedingungen werden Stähle häufig aus dem Austenitgebiet bis auf Raumtemperatur abgekühlt. Bei untereutektoiden Stählen erfolgt bei der A<sub>C3</sub>-Temperatur eine erste Umwandlung. In **Bild 2.3** ist ein Auszug aus dem Eisen Kohlenstoff-Zustandsaubild dargestellt.



**Bild 2.3:** Ausschnitt aus dem metastabilen Eisen-Kohlenstoff-Diagramm. Für eine Beispiel-Legierung mit 0,5 Massen-% Kohlenstoff ist schematisch die Gefügeentwicklung von Austenit a) über die Ausscheidung von voreutektoidem Ferrit b) und c) bis hin zum Perlit d) dargestellt. [2]

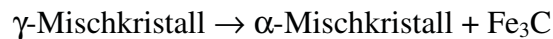
Für eine gegebene binäre Legierung mit einem Massegehalt von 0,5 % Kohlenstoff ist eine langsame Abkühlung eingezeichnet. Am Punkt a) ist diese Legierung austenitisch. Die Umwandlung des Austenits setzt bei Erreichen der  $A_3$ -Temperatur ein (Punkt b). Ferrit keimt an den Korngrenzen des Austenits an; diese Umwandlung wird als voreutektoide Ferritausscheidung bezeichnet. Bei weiterer Abkühlung wächst der Ferrit entlang den Korngrenzen. Der Wachstumsprozess ist charakterisiert durch die Diffusion von Kohlenstoff aus dem Ferrit in den Austenit, da der Ferrit nur maximal 0,02 Massen-% Kohlenstoff lösen kann. Dies führt zu einem entsprechenden Anstieg des Kohlenstoffgehaltes im Austenit an der jeweiligen Phasengrenze. Am Punkt c) ist ein Gefüge eingestellt, bei dem der Ferrit vollständig die Austenitkorngrenzen dekoriert. An diesem Punkt, kurz vor der eutektoiden Umwandlung, besteht das Gefüge zu fast 40 % aus Ferrit. Eine weitere Abkühlung über die eutektoide Temperatur hinaus führt zur Umwandlung der verbliebenen 60 % Austenit in Perlit (Punkt d). **Bild 2.2C** zeigt einen metallographischen Schliff eines auf dies Art entstandenen Gefüges.

### 2.1.1.3 Bildung des perlitischen Gefüges. Umwandlung mit gleichzeitiger Ausscheidung

Bei der eutektoiden Temperatur von 723 °C und einer Kohlenstoffkonzentration von 0,8 % sind die drei Phasen Austenit, Ferrit und Zementit im Gleichgewicht. Es existiert keine

Umwandlungskraft, weder in Richtung auf den rein austenitischen Zustand noch in Richtung auf das Phasengemenge Ferrit und Zementit.

Erst mit dem Unterschreiten der  $A_1$ -Temperatur bei gleichgewichtsnaher Abkühlung wird thermodynamisch eine Austenitumwandlung möglich; der  $\gamma$ -Mischkristall zerfällt entsprechend der eutektoiden Reaktion:

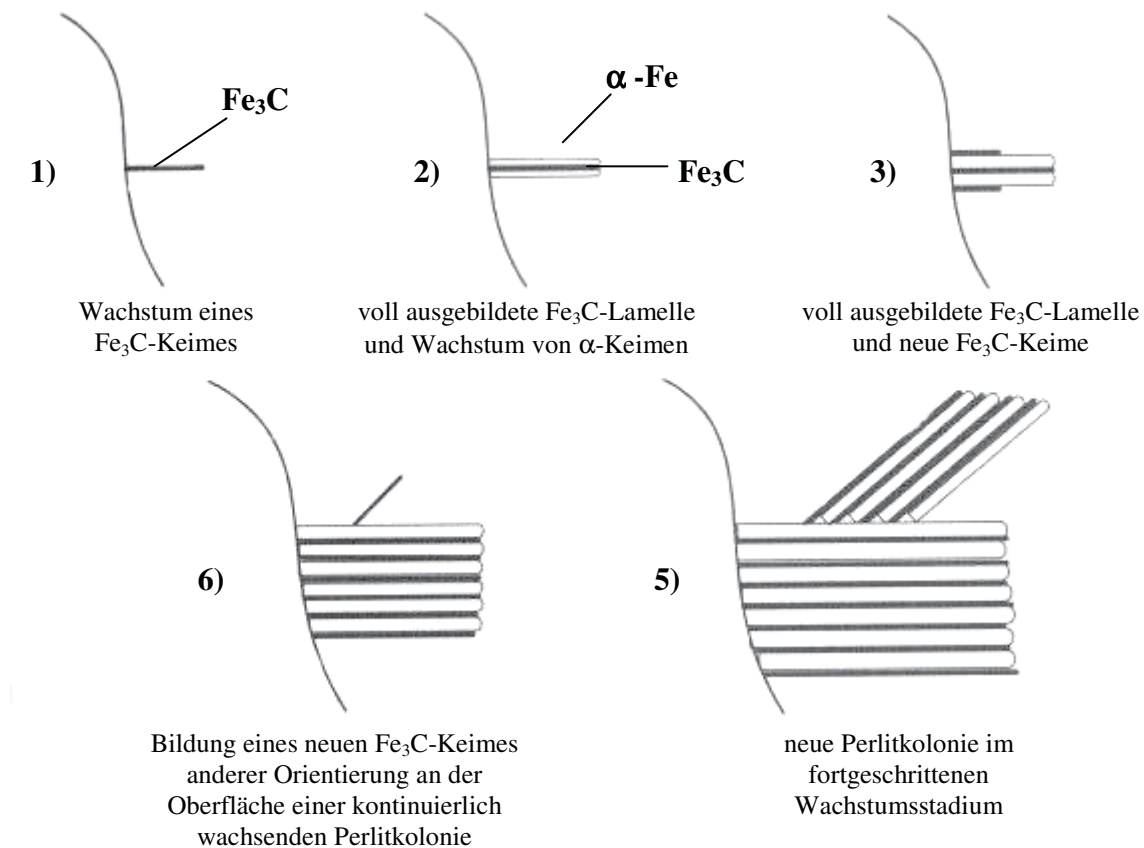


Die Keimbildung des Phasengemenges Perlit erfolgt bevorzugt an den Korngrenzen des Austenits oder auch an den Phasengrenzen des Austenits mit einer voreutektoiden Ausscheidung (Ferrit oder Zementit). Bei dieser Keimbildung muss wegen der stark unterschiedlichen Kohlenstoffkonzentration der Phasen  $\gamma$ -Mischkristall,  $\alpha$ -Mischkristall und Zementit zwangsläufig eine Kohlenstoffdiffusion stattfinden. Daher gehört die Perlitumwandlung zu den diffusionsgesteuerten diskontinuierlichen Reaktionen. Sie wird auch „gekoppeltes Wachstum“ oder „Doppelreaktion“ genannt, weil ein Reaktionsteilschritt die Bildung der  $\alpha$ -Phase und ein zweiter die Bildung der Karbidphase betrifft.

Hat sich z.B. als erster wachstumsfähiger Keim ein Ferritkeim gebildet, so hat dieser aus seinem Umwandlungsbereich Kohlenstoff in die umgebende Austenitmatrix ausgeschieden, da die Kohlenstofflöslichkeit des  $\alpha$ -Mischkristalls geringer ist als die des  $\gamma$ -Mischkristalls. Die an der Phasengrenze Ferrit/metastabiler Austenit entstandene Konzentrationsanreicherung an Kohlenstoff führt zur Bildung des orthorombischen Kristallgitters des Zementits mit seinem relativ hohen Anteil an Kohlenstoffatomen. Dieses Karbid seinerseits stellt nun einen Ort dar, an welchem die Kohlenstoffatome wegen der Natur des Zementitgitters bei der vorliegenden Temperatur energetisch günstiger eingebaut werden können, als sie in den Gitterlücken des übersättigten Austenits vorliegen. Es baut sich daher ein Aktivitätsgefälle zwischen Zementit und Austenit auf, wodurch infolge von Kohlenstoffdiffusion der Zementitkeim weiter wachsen kann (**Bild 2.4**).

An der Seite des Karbidteilchens verarmt der Austenit an Kohlenstoff, wodurch die Wahrscheinlichkeit der Ferritkeimbildung vergrößert wird. So entsteht der lamellare Aufbau einer Perlitinsel. Diejenigen Lamellen, die parallel zueinander angeordnet und kristallographisch gleich orientiert sind werden zusammengefasst als „Kolonie“ bezeichnet. Wenn ein Ferrit/Zementitkeim zufällig eine andere Orientierung annimmt, bildet sich eine

Perlitkolonie mit einer neuen Lamellenrichtung (**Bild 2.4,5**). Eine direkte Betrachtung von Orientierungsbeziehungen der Kolonien zum Austenit wird dadurch erschwert, dass die Kolonien zu demjenigen Austenitkorn feste kristallographische Beziehungen besitzen, in welches die Perlitkolonie nicht hineinwächst.



**Bild 2.4: Keimbildung und Keimwachstum von Perlit [3]**

### 2.1.1.4 Einfluss des Lamellenabstandes auf die mechanischen Eigenschaften

Die mechanischen Eigenschaften des Perlits werden hauptsächlich über den Lamellenabstand und damit über die Unterkühlung eingestellt. Zusätzlich werden sie von der Perlitkoloniengröße bestimmt, wobei abnehmende Umwandlungstemperaturen und kleinere Austenitkorngrößen diese verkleinern. Die Brucheinschnürung steigt und die Übergangstemperatur nimmt ab, je kleiner die Perlitkolonie bei gleichem Lamellenabstand ist.

Die Zähigkeitseigenschaften werden bei gleichen Streckgrenzwerten mit zunehmendem Perlitgehalt verbessert. Ein feinstreifiges lamellares Gefüge wirkt auf die mechanischen Eigenschaften wie ein Feinkorngefüge.



Mit steigendem Kohlenstoffgehalt oder beschleunigter Abkühlung nimmt der Perlitanteil nach einer Unterkühlung im entstandenen Umwandlungsgefüge zu. Der Lamellenabstand wird mit fallender Perlitbildungstemperatur (steigender Unterkühlung) unabhängig von der Stahlzusammensetzung kleiner. Der im Vergleich zum Ferrit härtere Perlit führt mit zunehmendem Perlitanteil zu einer Erhöhung von Streckgrenze und Festigkeit des Stahls.

### **2.1.1.5 Einfluss der Legierungselemente auf die Perlitbildung**

Durch Zugabe von Legierungselementen zu binären Eisen-Kohlenstofflegierungen wird die Perlitbildung verändert. Legierungselemente beeinflussen die freie Enthalpie der Umwandlung und damit die Gleichgewichtstemperatur, die bei gleicher Umwandlungstemperatur die Unterkühlung verändert. In beiden Fällen wird somit auch die Wachstumsgeschwindigkeit des Perlits verändert.

Im Allgemeinen stellt sich für jedes Legierungselement eine spezifische Verteilung zwischen Ferrit und Austenit ein. Der Gewinn der freien Umwandlungsenergie ist am größten, wenn die Legierungselementverteilung der Gleichgewichtszustände erreicht wird. Die Diffusion der Legierungselemente kann, gerade bei kleinen Unterkühlungen mit relativ geringen treibenden Kräften zeitbestimmend sein. Auch die Beeinflussung der Kohlenstoffaktivität von Austenit zum Karbid ist möglich. Bei der Perlitbildung kommt es auf Grund des unterschiedlichen Lösungsvermögens der einzelnen Phasen für Legierungselemente an den Phasengrenzen zu einer An- oder Abreicherung von Legierungselementen.

Generell bewirken Substitutionslegierungselemente eine Verzögerung der Perlit-Umwandlung, entsprechend einer Verlangsamung des Perlitwachstums, und führen zu einer deutlichen Trennung des Perlitbereiches vom Bainitbereich in ZTU- Diagrammen. Zu diesen Elementen zählen unter anderen Mangan, Nickel, Molybdän, Chrom, Vanadium und Bor. Die Verlangsamung der Perlitbildung wird immer dann ausgenutzt, wenn an Stelle eines perlitischen Gefüges eine bainitische bzw. martensitische Gefügestruktur erzeugt und damit z.B. eine höhere Härte erzielt werden soll.

### 2.1.1.6 Sonderformen des Perlits

#### Feinstlamellarer Perlit (Sorbit und Troostit)

Steigt die Umwandlungsgeschwindigkeit durch große Unterkühlungen stark an (Abkühlungsgeschwindigkeiten bis 200 K/s), erfolgt die Perlitbildung in einem Temperaturbereich mit Rekaleszenz, d.h. Wiedererwärmung der Probe durch freiwerdende Umwandlungswärme. Der so entstandene sehr feinlamellare Perlit, dessen Lamellen im Lichtmikroskop auch bei stärkster Vergrößerung kaum noch auflösen sind, wurde früher als Sorbit bezeichnet.

Bei Abkühlgeschwindigkeiten oberhalb 200 K/s ist die Unterkühlung und die Wärmeabfuhr so groß, dass es nicht zu einer Wiedererwärmung der Probe kommt und so die Perlitbildung bei rund 500 °C eintritt. Der im Bereich der maximalen Umwandlungsgeschwindigkeit gebildete, lichtmikroskopisch nicht mehr auflösbare feinstlamellare Perlit wurde früher als Troostit bezeichnet.

### 2.1.2 Bainitische Umwandlung

#### 2.1.2.1 Morphologie

Bei Bainit (benannt nach dem amerikanischen Metallkundler E.C. Bain) handelt es sich um ein Zweikomponentengefüge, dessen Bildungstemperatur zwischen der Perlit- und der Martensitstufe im Temperaturbereich zwischen 550 °C und 250 °C. Im Überlappungsbereich mit Perlit ist die Ausbildung des Bainit ähnlich wie die des Perlits. Im Überlappungsbereich mit Martensit ist sie ähnlich wie die des Martensit. Es ist daher verständlich, dass es stetige Übergänge in der Gefügeausbildung der Perlitstufe zur Bainitstufe sowie der Bainitstufe zur Martensitstufe gibt.

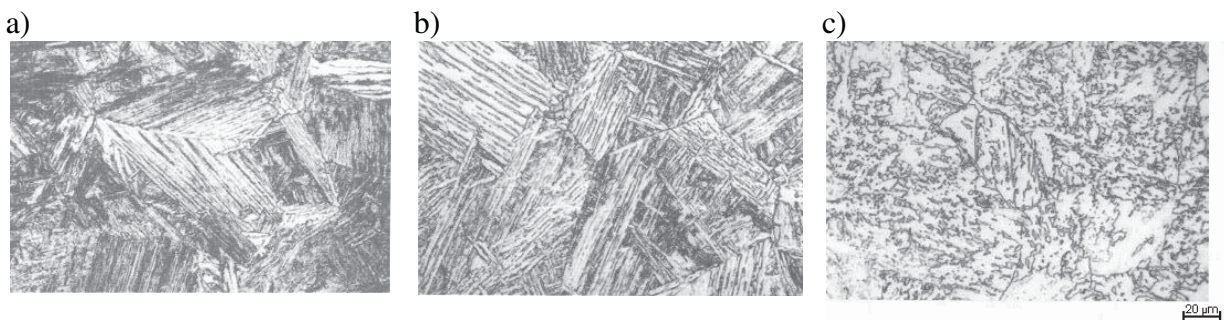
Die Gefüge der Bainitstufe lassen sich auf zwei Arten unterscheiden. Zum einen werden folgende Bildungsbereiche unterteilt:

- oberer Temperaturbereich > 500 °C kohlenstoffarmer oder ferritischer Bainit (acicular ferrite),
- 550- 400 °C oberer Bainit (upper bainite),
- 400- 250 °C unterer Bainit (lower bainite).

Zum anderen besteht die Möglichkeit die Gefüge über ihr metallographisches Erscheinungsbild zu unterscheiden:

- feinnadelig
- grobnadelig
- körnig

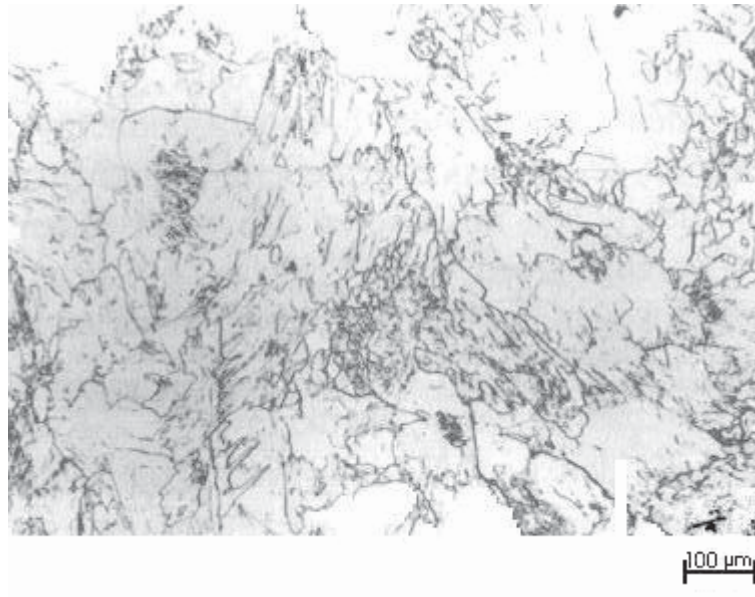
Metallkundlich erfolgt eine Unterteilung des Bainits in oberen und unteren Bainit. Beim oberen Bainit treten die kohlenstoffreichen Komponenten – Karbide, Martensit und /oder Restaustenit – zwischen den Nadeln des bainitischen Ferrits auf. Beim unteren Bainit scheiden sich Karbide innerhalb der Ferritplatten aus. Beide Bainitarten können im Gefüge gleichzeitig auftreten. Eine lichtmikroskopische Unterscheidung zwischen diesen Gefügearten ist kaum möglich, da die Ausbildung so fein sein kann, dass die kohlenstoffreichen Komponenten vom bainitischen Ferrit kaum zu unterscheiden sind. Lichtmikroskopisch wird zwischen einem körnigen, grob- sowie einem feinnadeligen Bainit unterschieden (**Bild 2.5a-c**). Die Ausdrucksweisen „feinnadelig“, „grob-nadelig“ und „körnig“ kennzeichnen den für die mechanischen Eigenschaften wesentlichen Abstand und die Anordnung der Karbide innerhalb des Bainits.



**Bild 2.5: Lichtmikroskopische Darstellung bainitischer Gefüge. a) feinnadeliger Bainit, b) grobnadeliger Bainit, c) körniger Bainit. [4]**

Im Fall der nadeligen Ausbildungsform liegt der bainitische Ferrit in Form lang gestreckter Lanzetten vor, die gruppenweise parallel laufen (**Bild 2.5a,b**). Sind die kohlenstoffreicheren Komponenten und der bainitische Ferrit nur teilweise voneinander zu trennen, wird das Gefüge als fein (**Bild 2.5a**), sonst als grob bezeichnet (**Bild 2.5b**). Liegen keine durchgehenden Nadeln in Gruppen vor, wird das Gefüge als körnig bezeichnet (**Bild 2.5c**).

In **Bild 2.6** ist ein kohlenstoffarmes Bainitgefüge, der sog. „azicularer Ferrit“, dargestellt. Dieser Gefügetyp besteht aus Ferritlanzetteln und Inseln kohlenstoffangereicherten Austenits, die entweder vollständig oder teilweise in Martensit umwandeln.



**Bild 2.6:** Kohlenstoffarmes Bainitgefüge („azicularer Ferrit“) [4]

### 2.1.2.2 Bildung des bainitischen Gefüges

Die Einteilung des Bainits kann entsprechend der metallkundlichen Vorgänge in kohlenstoffarmen Bainit ( $B_1$ ), oberem Bainit ( $B_2$ ) und unterem Bainit ( $B_3$ ) erfolgen (**Bild 2.7**). Der obere und untere Bainit kann bei kontinuierlicher Abkühlung im Gefüge gleichzeitig auftreten und unter Umständen lichtmikroskopisch nicht zu unterscheiden sein.

#### **Oberer Bainit**

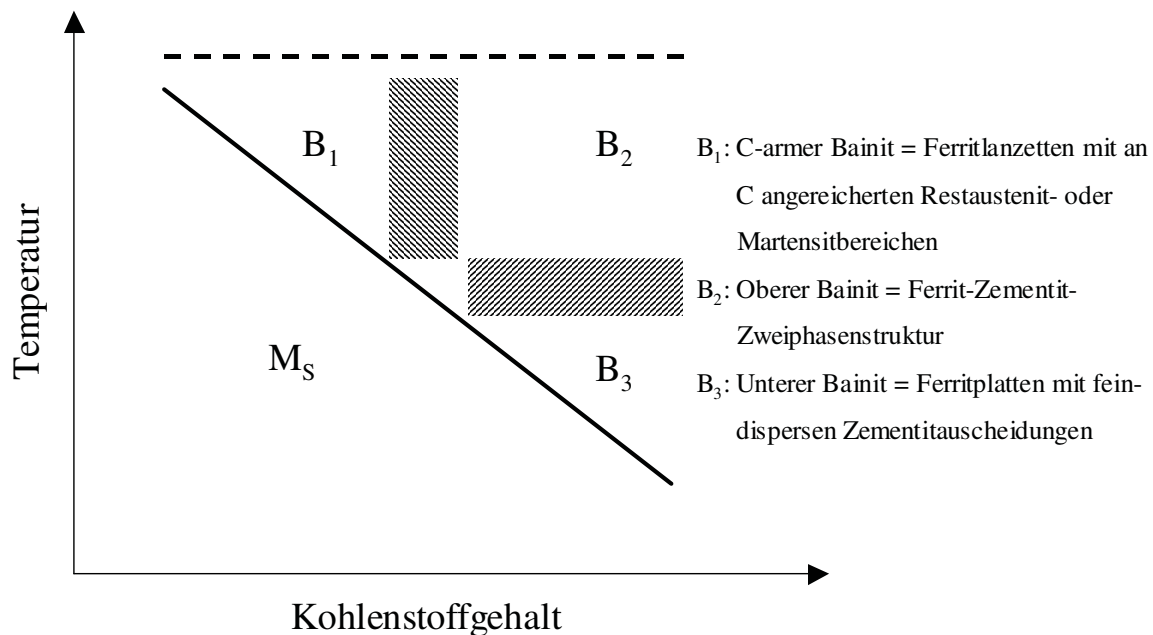
Der obere Bainit entsteht im oberen Temperaturbereich der Bainitstufe zwischen 550- 400 °C. Je nach Kohlenstoffgehalt des Stahls kann die Umwandlung unterschiedlich ablaufen. Bei Stählen mit höherem Kohlenstoffgehalt beginnt die Umwandlung mit dem diffusionsgesteuerten Schritt der Ausscheidung von Zementit ( $Fe_3C$ ), siehe **Bild 2.8**. Hierdurch verarmt der Austenit an Kohlenstoff, so dass die  $M_s$ -Temperatur erreicht wird und es zu einer Umwandlung durch Scherung entsprechend dem Martensitmechanismus kommt.

Bei Stählen mit geringeren Kohlenstoffgehalten ist die treibende Kraft für die Zementitbildung geringer. Die  $\gamma$ -Bereiche, aus denen Ferritlanzetteln entstehen, „warten“ nicht die Wegdiffusion des Kohlenstoffs aus ihren Bereichen ab, sondern wandeln zunächst

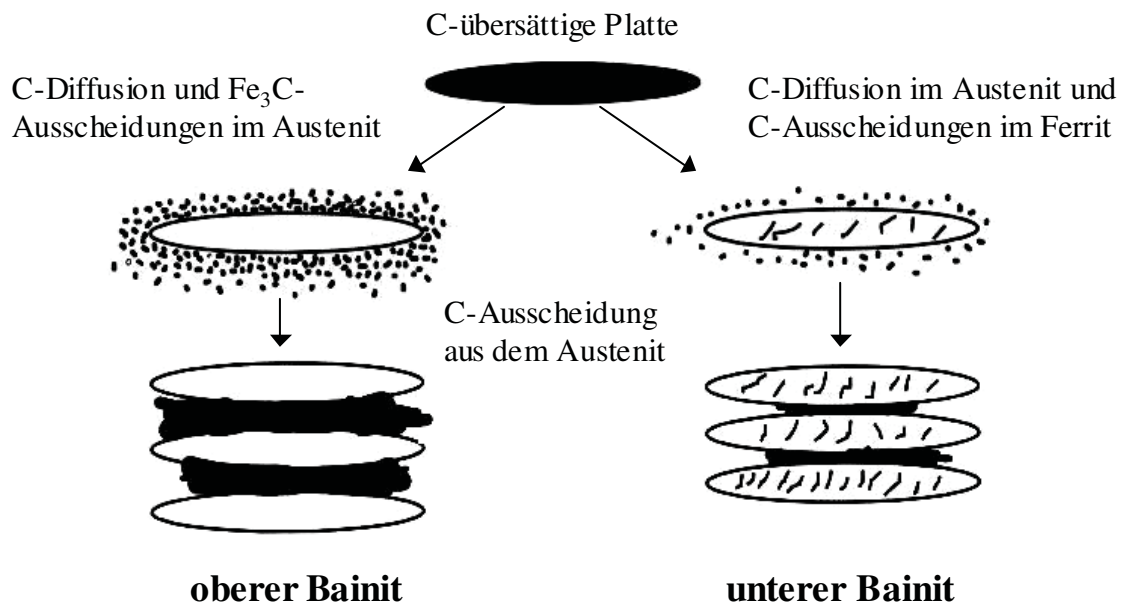
entsprechend dem Martensitmechanismus um. Nach diesem ersten Transformationsschritt erfolgt ein zweiter, diffusionsgesteuerter Teilschritt der Umwandlung. Wegen der geringen Kohlenstofflöslichkeit und der noch gegebenen Diffusionsfähigkeit der Kohlenstoffatome scheidet sich Zementit zwischen den Ferritplatten aus.

### Unterer Bainit

Der untere Bainit bildet sich im unteren Temperaturbereich der Bainitstufe zwischen 400 und 250 °C. Die Ferritbildung erfolgt auf die gleiche Weise wie im Falle des oberen Bainits. Wegen der abgesenkten Umwandlungstemperatur ist jedoch die Kohlenstoffdiffusion stark eingeschränkt, so dass der im Ferrit unlösliche Kohlenstoff nicht aus den Ferritplatten herausdiffundieren kann. Infolgedessen besteht beim unteren Bainit der diffusionsgesteuerte Teilschritt der Reaktion in einer Ausscheidung von Karbidteilchen im Inneren der wachsenden Ferritplatten. Statt des Zementits scheidet sich das leichter anzukeimende  $\epsilon$ -Karbonid aus, oder eine  $\epsilon$ -Karbidausscheidung geht der  $\text{Fe}_3\text{C}$ -Bildung voraus. Nach längeren Haltezeiten wandelt das  $\epsilon$ -Karbonid in die Gleichgewichtsphase ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) um.



**Bild 2.7: Schematische Einteilung der Bildungsbereiche verschiedener Bainitgefüge. [4]**



**Bild 2.8:** Schematische Darstellung der Bildung des oberen und unteren Bainits. [4]

### 2.1.2.3 Einfluss der Legierungselemente auf die Bainitbildung

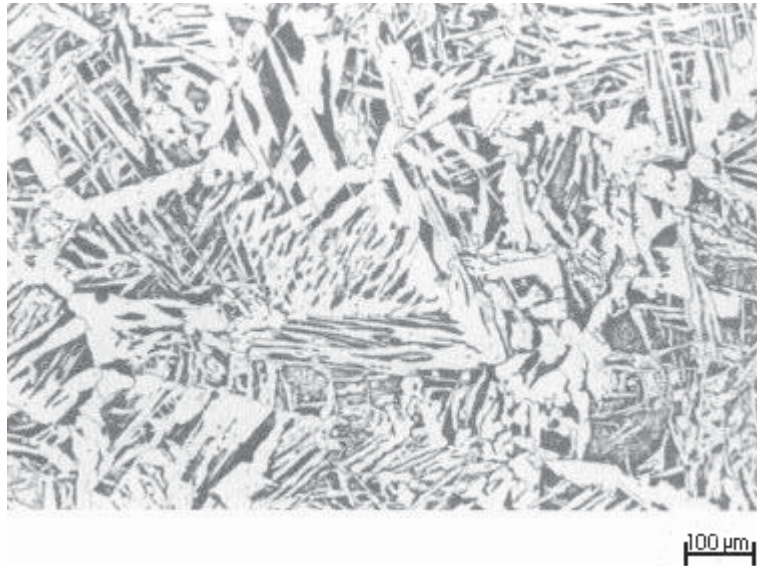
Die Zugabe von Legierungselementen resultiert üblicherweise in der Verzögerung der ferritischen und perlitischen Reaktionen. Die bainitische Reaktion wird zusätzlich zu tieferen Temperaturen hin verschoben, dies führt zu einem umwandlungsträgen Bereich zwischen den einzelnen Phasenbereichen. Unabhängig von diesem Einfluss ist es auf Grund der Nachbarschaft zur martensitischen Umwandlung schwierig ein vollständig umgewandeltes bainitisches Gefüge zu erhalten.

Werkstoffe mit bainitischer Struktur bieten eine Reihe von Vorteilen, wie z.B. einen geringeren Kohlenstoffgehalt zur Verbesserung der technologischen Eigenschaften. Die Eigenschaften können in einem weiten Bereich variiert werden. Günstig sind hierfür Umwandlungsschaubilder mit einem metastabilen Austenitgebiet zwischen den Phasenbereichen des Ferrits und dem des Bainits im isothermen ZTU-Diagramm. Der Ferrit-Phasenbereich wird zu längeren Zeiten hin verschoben und die Bainitumwandlung beginnt unmittelbar bei Erreichen der B<sub>S</sub>-Temperatur (Bainitbildungstemperatur).

### 2.1.2.4 Widmannstätten Ferrit

Der Widmannstätten Ferrit benannt nach der von A. v. Widmannstätten in meteoritischen Metallmassen gefundenen Gefügeausbildung (**Bild 2.9**); er entsteht bevorzugt bei Kohlenstoffgehalten von etwa 0,2 bis 0,4 % und relativ schneller Abkühlung von hohen

Austentisierungstemperaturen, d.h. bei großen Austenitkörnern. Sein bevorzugtes Merkmal sind die von den Austenitkorn Grenzen in das Korn hineinwachsenden Ferritplatten, die im Schliffbild als Nadeln erscheinen. Auf Grund seiner Entstehungsbedingungen kann Widmannstätten Ferrit in Gussgefügen und Schweißverbindungen nachgewiesen werden. Die Zähigkeitseigenschaften dieses Gefüges sind im Vergleich zu einem Normalglühgefüge schlechter.



**Bild 2.9: Widmannstätten Ferrit [4]**

### 2.1.3 Martensitische (athermische) Umwandlung

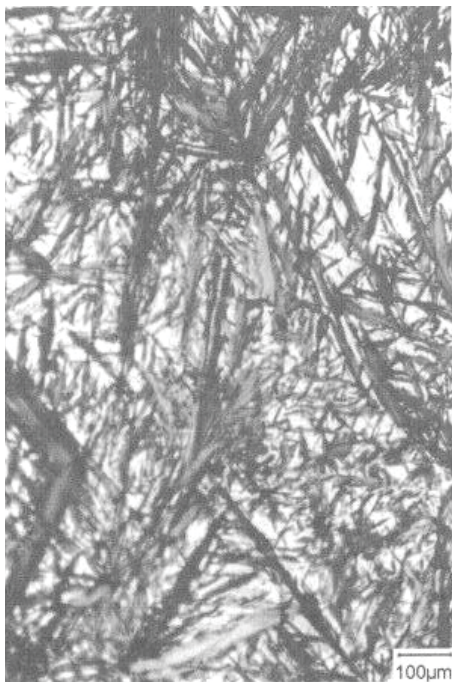
#### 2.1.3.1 Morphologie

Bei großen Unterkühlungen erfährt die Phasenumwandlung eine mit sinkender Temperatur zunehmende Diffusionsbehinderung. Da gleichzeitig die treibende Kraft der Phasenumwandlung zunimmt kommt es schließlich dazu, dass ganze austenitische Kristallbereiche schlagartig in den ferritischen Zustand umklappen, ohne dass sich dabei die Legierungszusammensetzung durch Diffusionsprozesse verändern kann. Die hierbei gebildete Kristallstruktur wird als Martensit bezeichnet. Benannt wurde er nach dem deutschen Wissenschaftler A. v. Martens, 1850 –1914. Dieser leitete das 1904 gerufene Königliche Materialprüfungsamt, ein Vorgängerinstitut der heutigen Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung in Berlin.

Die mit dieser Umwandlung verbundene Volumen- und vor allem Gestaltänderung verursacht starke elastische Gitterverspannungen, die der Umwandlung natürlich entgegenwirken. Bei

hohen Kohlenstoffgehalten ( $> 1,4 \%$ ) und tiefen Umwandlungstemperaturen können diese Verspannungen nur in geringem Maße durch Gleit- und Erholungsvorgänge abgebaut werden, so dass die Umwandlung von Austenit in Martensit nicht immer vollständig abläuft. Metallographisch gesehen bildet sich der Martensit plattenförmig aus. Die umgewandelten Kristallbereiche sind auf einer polierten Oberfläche bereits vor dem Anätzen durch klar umrissene Reliefstrukturen erkennbar. Die in **Bild 2.10a** gezeigte Struktur von plattenförmigen Martensitkristallen in noch nicht umgewandelten Restaustenit wird nach dem Ätzen sichtbar.

Bei niedrigem Kohlenstoffgehalt ( $\ll 0,5 \%$ ) und höherer Umwandlungstemperatur können elastische Gitterspannungen durch Gleitvorgänge leichter abgebaut werden. Der Martensit besteht dann nicht mehr aus Kristallplatten, sondern aus lanzettenförmigen Kristallen, die blockweise gebündelt in verschiedenen Richtungen angeordnet sind. Der Lanzettenmartensit (früher: Lattenmartensit) ist in **Bild 2.10b** dargestellt. Die Lanzetten sind mehrere  $\mu\text{m}$  lang und besitzen Dicken zwischen  $0,1$  und  $0,5 \mu\text{m}$ . Bei mittleren C-Gehalten ( $0,5$ -  $1,4 \%$ ) können beide Mechanismen des Spannungsabbaus auftreten.



a) Plattenmartensit



b) Lanzettenmartensit

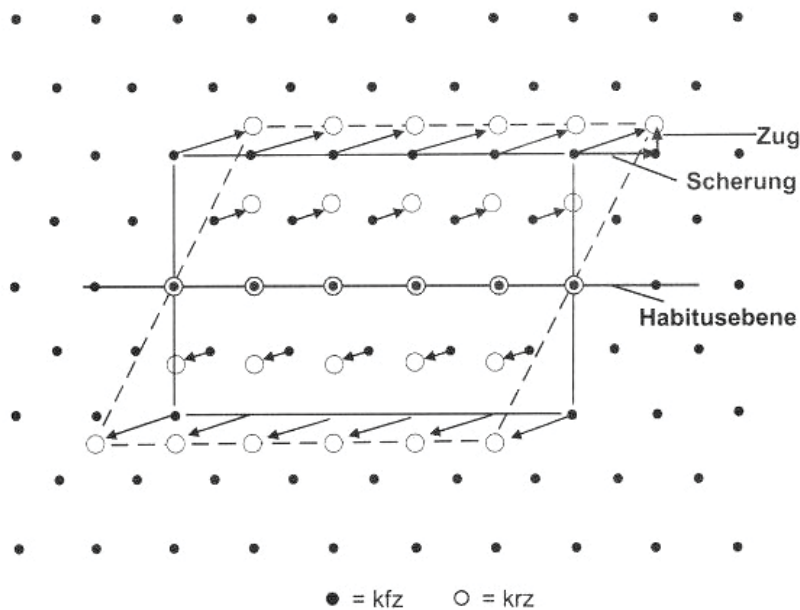
**Bild 2.10: Verschiedene Morphologien des Martensits in Fe-C-Legierungen. [5]**



### 2.1.3.2 Bildung des martensitischen Gefüges

Die Martensitumwandlungen, die zu den in **Bild 2.10** dargestellten Gefügen führen, haben eine Reihe von Merkmalen, die sie von den diffusionsgesteuerten Umwandlungen deutlich unterscheiden.

1. Sie erfolgen in der Regel bei tiefen Temperaturen athermisch, d.h. sie setzen während der Abkühlung bei Erreichen der einer bestimmten Temperatur schlagartig ein und laufen erst bei weiterer Abkühlung kaskadenartig in Bruchteilen von Sekunden ab. Wird die Abkühlung gestoppt, so hört auch die weitere Umwandlung auf, obwohl das Gleichgewicht noch nicht erreicht ist.
2. Es findet kein Platzwechsel einzelner Atome statt, sondern nur ein gemeinsamer Platzwechsel von Atomgruppen in einer gekoppelten koordinierten Bewegung (kooperative Scherbewegung von Atomen). Diese komplexe Verformung des Gitters wird durch Scher- und Zugkräfte bewerkstelligt. Da keine Diffusion erfolgt, bleibt beim Umklappen des kfz-Austenitgitters in das krz-Martensitgitter die relative Lage der Eisen- und Kohlenstoffatome zueinander erhalten (**Bild 2.11**).
3. Zwischen dem kubisch-flächenzentrierten Gitter des Austenits und dem kubisch-raumzentrierten Martensitgitter besteht eine kristallographische Orientierungsbeziehung.
4. Diese koordinierten Atombewegungen bewirken eine Volumenvergrößerung (ca. 3 % beim kubisch-raumzentrierten Martensit) und eine ausgeprägte Gestaltänderung des umwandelnden Kristallbereichs (**Bild 2.11**). Diese Gestaltänderung macht sich auf sich auf der Oberfläche durch eine Reliefstruktur bemerkbar.
5. Durch die Gestaltänderung entstehen elastische Verzerrungen im Kristallvolumen. Die Verzerrungen können durch Gleitung oder Zwillingsbildung reduziert werden. Auf Grund der elastischen Verzerrungen und der hohen Versetzungsdichte bzw. Zwillingsgrendichte sind Martensitphasen härter als die Mutterphase.



**Bild 2.11: Umwandlung des kubisch-flächenzentrierten Gitters in das kubisch-raumzentrierte Gitter durch Scher- und Zugkräfte. [5]**

### 2.1.3.3 Einfluss der Legierungselemente auf die Martensitbildung

Durch die Zusammensetzung der Legierung und die Art des Einbaus der Legierungselemente als substitutionelles oder interstitielles Legierungselement in das Grundgitter werden eine Reihe von Eigenschaften bestimmt, die von maßgeblichem Einfluss auf die Martensitmorphologie sein können.

Die meisten Legierungselemente, die im Austenit in Lösung gehen, senken die  $M_S$ -Temperatur, mit Ausnahme von Kobalt und Aluminium. Die weitaus größte Wirkung wird jedoch durch die interstitiell gelösten Elemente, wie Kohlenstoff oder Stickstoff, erreicht.

### 2.1.3.4 Sonderformen des Martensit und der Martensitbildung

#### **Kubischer Martensit**

Neben dem zumeist tetragonal verzerrten kubischraumzentrierten Gitter des Eisen-Kohlenstoff-Martensits wird auch kubischer Martensit als Abschreckgefüge beobachtet. Er tritt bei niedrigen Gehalten an interstitiellen Legierungselementen, vor allem aber in Eisen-Nickel-, Eisen-Mangan-, Eisen-Chrom-Legierungen und weiteren binären und ternären Eisenlegierungen mit Substitutionselementen auf.

### **Hexagonaler ( $\epsilon$ -) Martensit**

Hexagonaler oder  $\epsilon$ -Martensit kommt in manganhaltigen Stählen mit mehr als 10 % Mangan vor. Er entsteht ebenfalls in kohlenstoffhaltigen Legierungen des Eisen mit Nickel, Mangan, Chrom und Kobalt bei der Abkühlung oder nach einer plastischen Verformung.

### **Thermoelastischer Martensit**

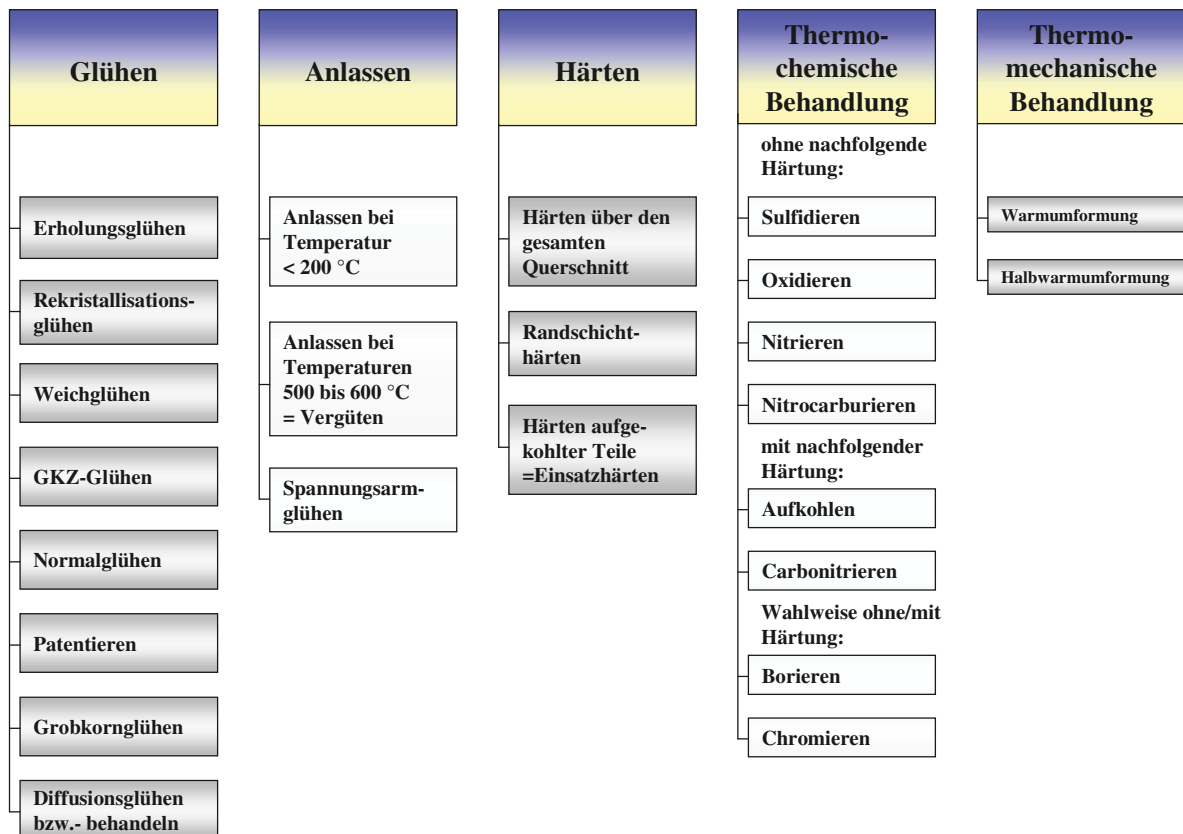
Neben dem Fe-C-Martensit treten in legierten Stählen noch reversible Martensitumwandlungen auf. Die Martensitphase steht hier im thermischen Gleichgewicht mit einer Austenitphase. Die Austenit-Martensit-Umwandlung bei Abkühlung setzt bei Erreichen der Temperatur  $M_S$  (Martensitstarttemperatur), die Martensit-Austenit-Umwandlung setzt bei Erwärmung bei Erreichen der Temperatur  $A_S$  (Austenitstarttemperatur) ein.

### **Isotherme Martensitbildung**

Der größte Teil der martensitischen Umwandlungen erfolgt athermisch. Jedoch existieren einige Beispiele für isotherme Martensitbildung. So wird in einigen Legierungen beobachtet, dass nach Ende der Abkühlung und einem Halten der Temperatur eine isotherme Martensitbildung einsetzt. Diese Art der Martensitbildung lässt sich bevorzugt in Stählen und Legierungen mit niedriger Martensitstarttemperatur bei Raumtemperatur sowie unterhalb der Raumtemperatur beobachten, zum Beispiel in binären Eisen-Nickel-Legierungen mit 30 % Nickel.

## **2.2 Technische Wärmebehandlung**

Nach der Definition des Internationalen Verbandes für die Wärmebehandlungen der Metalle (IVW) ist in Anlehnung an DIN EN 10052 Wärmebehandlung ein „Vorgang, in dessen Verlauf ein Werkstück oder ein Bereich eines Werkstückes absichtlich einer oder mehreren Temperatur-Zeit-Folgen und gegebenenfalls zusätzlich anderen physikalischen und/oder chemischen Einwirkungen ausgesetzt wird, um durch gezielte Gefügeveränderungen die gewünschten Verarbeitungs- und/oder Gebrauchseigenschaften einzustellen.“ Nach Art der Einwirkung lassen sich die Wärmebehandlungsverfahren in thermische, thermochemische und thermomechanische Verfahren einteilen (**Bild 2.12**).



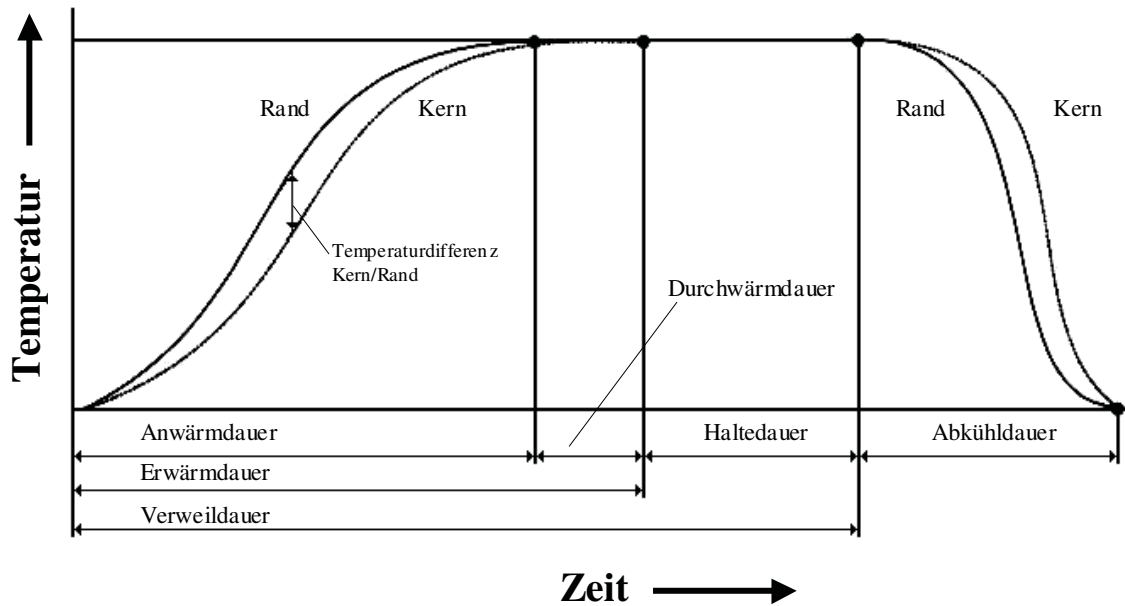
**Bild 2.12: Wichtige Verfahren der Wärmebehandlung von Stahl [6]**

Bei den thermischen Verfahren wird häufig zwischen Glühen, Anlassen und Härten unterschieden. Beim Glühen steht in der Regel die Gefügebeeinflussung zur Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften (Zerspanbarkeit, Kaltumformbarkeit) im Vordergrund, Während beim Härten und Anlassen die Optimierung der Gebrauchseigenschaften (Härte, Zähigkeit, Verschleißwiderstand) vorwiegend betrachtet wird. Die Änderung der Werkstoffeigenschaften wird im Wesentlichen durch folgende Vorgänge erreicht:

- Umwandlung von Gefügebestandteilen (z.B. Normalglühen, Härten),
- Abbau von inneren Spannungen und Änderung, ihrer Verteilung (z.B. Spannungsarmglühen, Anlassen),
- Änderung der Größe, Form und Anordnung der Gefügebestandteile (z.B. Grobkornglühen, Weichglühen).

Jede Wärmebehandlung, umfasst als Einzelvorgänge das Erwärmen auf Solltemperatur der Wärmebehandlung (**Bild 2.14**), das Aufrechterhalten der Temperatur über den ganzen Querschnitt für eine bestimmte Zeit (Halten) und das Abkühlen von der Solltemperatur. Der

Ablauf einer Wärmebehandlung kann deswegen in Form einer schematischen Temperatur-Zeit-Folge dargestellt werden (**Bild 2.13**).



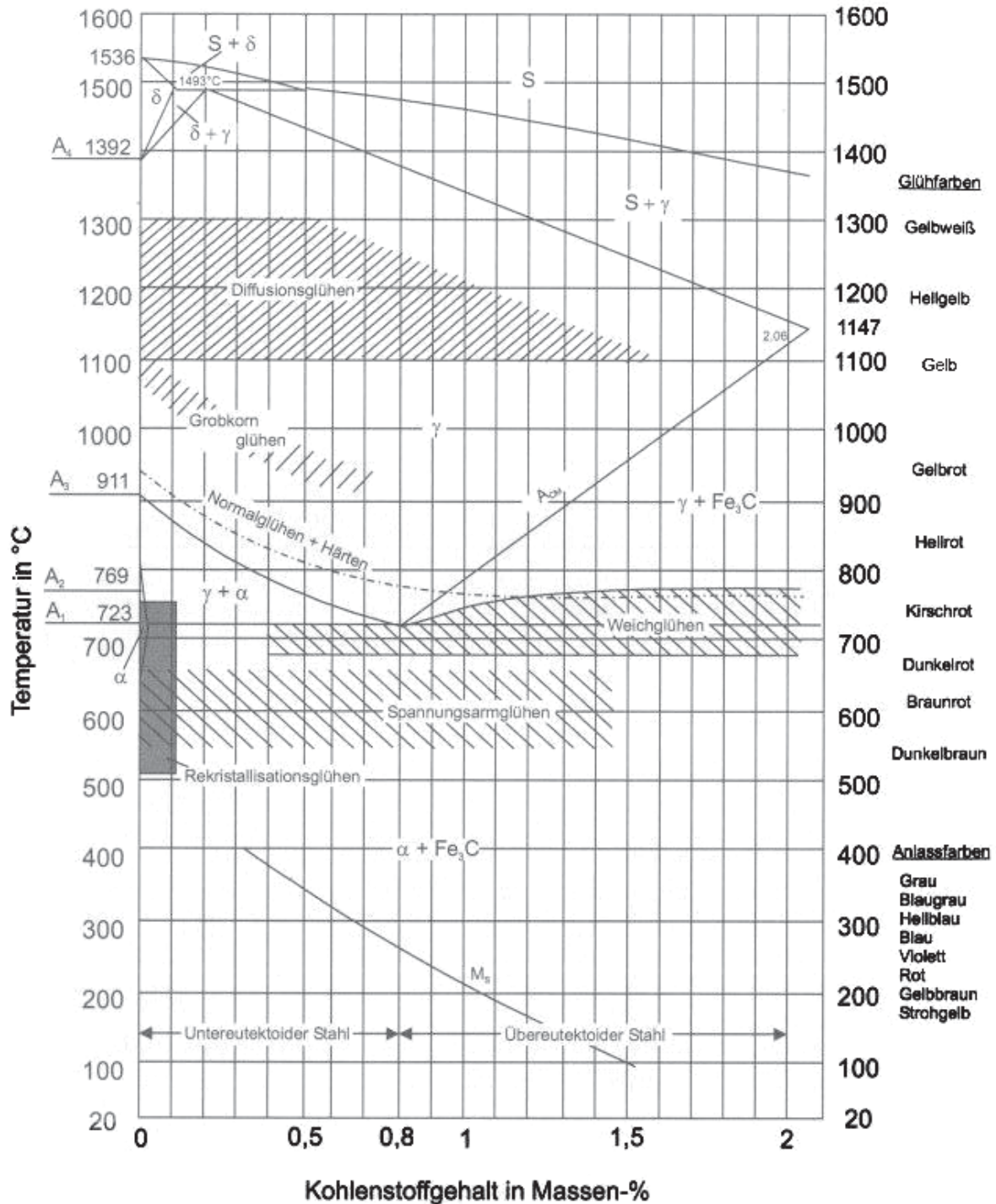
**Bild 2.13: Schematische Temperatur-Zeit-Folge einer Wärmebehandlung mit charakteristischen Kenngrößen. [6]**

Bei der Festlegung der Wärmebehandlungstechnologie ist zu beachten, dass nicht nur die Werkstoffeigenschaften sondern auch die Größe und Form der Werkstücke und die Dauer der Einzelvorgänge einen großen Einfluss auf das Ergebnisse der Behandlung haben.

Während der Erwärmung (Anwärmdauer plus Durchwärmdauer) treten als Folge der Wärmeleitung umso größere Temperaturunterschiede zwischen Werkstückrand und -kern auf, je schneller aufgeheizt wird und je größer die Abmessungen sind. Eine schlechtere Wärmeleitfähigkeit, wie sie bei den hochlegierten Stählen vorliegt, verstärkt die Temperaturunterschiede und begünstigt die damit verbundene Ausbildung thermischer Spannungen. Da diese beim Aufheizen zu Verzug und Spannungsrissen führen können, müssen die Aufheizgeschwindigkeiten dem Werkstoff und den Werkstückabmessungen angepasst werden. Gleiches gilt auch beim Abkühlen der Werkstücke. Auch hier sollten die Abkühlgeschwindigkeiten so gewählt werden, dass das gewünschte Gefüge sicher eingestellt werden kann, die Eigenspannungen jedoch relativ gering bleiben. Die Haltezeit wird meist auf Grund vorliegender Erfahrungen gewählt.

## 2 Theoretische Grundlagen

Für unlegierte Stähle werden die für die Wärmebehandlungsverfahren charakteristischen Temperaturbereiche in Abhängigkeit vom C-Gehalt im Eisen-Kohlenstoffdiagramm angegeben (**Bild 2.14**), für höher legierte Stähle verschieben sich diese Temperaturbereiche entsprechend der Änderung der Umwandlungstemperaturen.



**Bild 2.14:** Temperaturbereiche verschiedener Glühbehandlungen für Fe-C-Legierungen. [6]

### 2.3 Wärmebehandlung von Schienenstählen

Durch eine beschleunigte Abkühlung aus dem Austenitbereich auf Temperaturen von etwa 500° C wird ein feinperlitisches Gefüge mit hoher Härte und Festigkeit bei guter Zähigkeit erreicht. Für die Kopfhärtung von Schienen haben sich drei Verfahren durchgesetzt, das Tauchverfahren (Eintauchen der walzheißen Schiene mit dem Kopf in ein Kühlmedium), das Kopfhärten aus der Walzhitze mittels Wasserbesprühung und das induktive Härten (induktive Erwärmung des Kopfes und anschließende Abkühlung des Kopfes). [7]

Beim induktiven Härten wird der kalte Schienenkopf stufenweise mittels Induktion definiert auf Austenitisierungstemperatur gebracht und nach einer Temperatur-Ausgleichstrecke einer beschleunigten Abkühlung mittels Pressluft unterzogen. Mit diesem Verfahren kann über die Schienenlänge eine sehr gleichmäßige Härtung erreicht werden, es ist aber produktionstechnisch sehr aufwändig und energetisch teuer.[7]

Das HSH<sup>®</sup>-Verfahren ist ein, von der voestalpine Schienen GmbH entwickeltes Wärmebehandlungsverfahren, bei dem im Gegensatz zum induktiven Härten, der Schienenkopf nicht erst aufgeheizt werden muss. Die Wärmebehandlungsanlage ist In-line in die Produktionskette integriert, wodurch die walzwarme Schiene direkt nach dem Walzen in das Härtebecken getaucht wird. Verfahrensziel ist es, einen Schienenkopf mit feinperlitischen Gefüge höchster Härte zu erzeugen (**Bild 2.15** und **Bild 1.1**), was eine hohe Verschleißfestigkeit bewirkt und die Rissempfindlichkeit [8] senkt.

Im Gegensatz zum Schienenkopf werden Steg und Fuß der Schiene nicht gehärtet. Dadurch erreicht man hohe Zähigkeits- und Dehnungswerte, die eine hohe Dauerfestigkeit bewirken.

HSH<sup>®</sup>-Schienen weisen einen höheren Widerstand gegen eine Schädigung der Schienenoberfläche durch Rollkontaktermüdung auf als naturharte Schienengüten mit geringerer Festigkeit [24]. Wegen der hohen Härte (**Tabelle 2.3**), Streckgrenze und Dauerschwingfestigkeit des feinperlitischen Gefüges der HSH<sup>®</sup>-Schiene, konnte der Verschleißwiderstand gegenüber der Regelgüte R260 im Mittel um den Faktor 3 erhöht werden [27]. Bei Streckenbeobachtungen bei verschiedenen Eisenbahnen auf der ganzen Welt konnte festgestellt werden, dass durch den 3-fachen Verschleißwiderstand der HSH<sup>®</sup>-Schienen die Schienenliegedauer deutlich verlängert wurde [23].

Bei der VAS werden auch bereits Schienen mit bainitischen Gefüge mit der Bezeichnung DOBAIN<sup>®</sup> in einem Tauchverfahren hergestellt. Hierbei wird, im Gegensatz zum HSH<sup>®</sup>-

Verfahren, der Schienenkopf nicht kontinuierlich sondern isotherm abgekühlt (**Bild 2.17** und **Bild 1.4**). Die gesamte Walzlänge der Schiene kann ebenfalls direkt aus der Walzhitze wärmebehandelt werden, indem ihre Temperatur durch eine Intervalltauchung über einen bestimmten Zeitraum in einem kleinen, definierten Temperaturintervall gehalten wird. Mit dem Erzeugen eines bainitischen Gefüges ist eine Festigkeitssteigerung möglich, ohne dabei wie bei den perlitischen Güten die Zähigkeit zu verlieren. Schienen mit bainitischen Gefüge zeigen bei Festigkeiten über  $1400 \text{ N/mm}^2$  hohe Zähigkeit (**Tabelle 2.4**). Außerdem verspricht der bainitische Schienenstahl zusätzlich zu guten Verschleißigenschaften eine sehr gute Widerstandsfähigkeit gegen so genannte Rollkontaktermüdungsschäden zu haben [28].

Gefüge	Mindesthärte	Abkühlmedium	Schienen Güte
feinstreifiger Perlit	260 HB	Luftabkühlung	Naturhart R260
feinstreifiger Perlit	350 HB	polymere, wassermischbare Abschreckmittel	Kopfgehärtet R350HT

Tabelle 2.3: Beispiele für Gefügehärte [26]

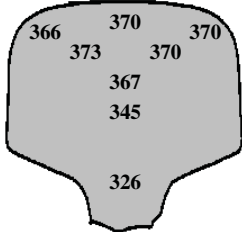
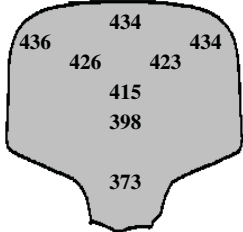
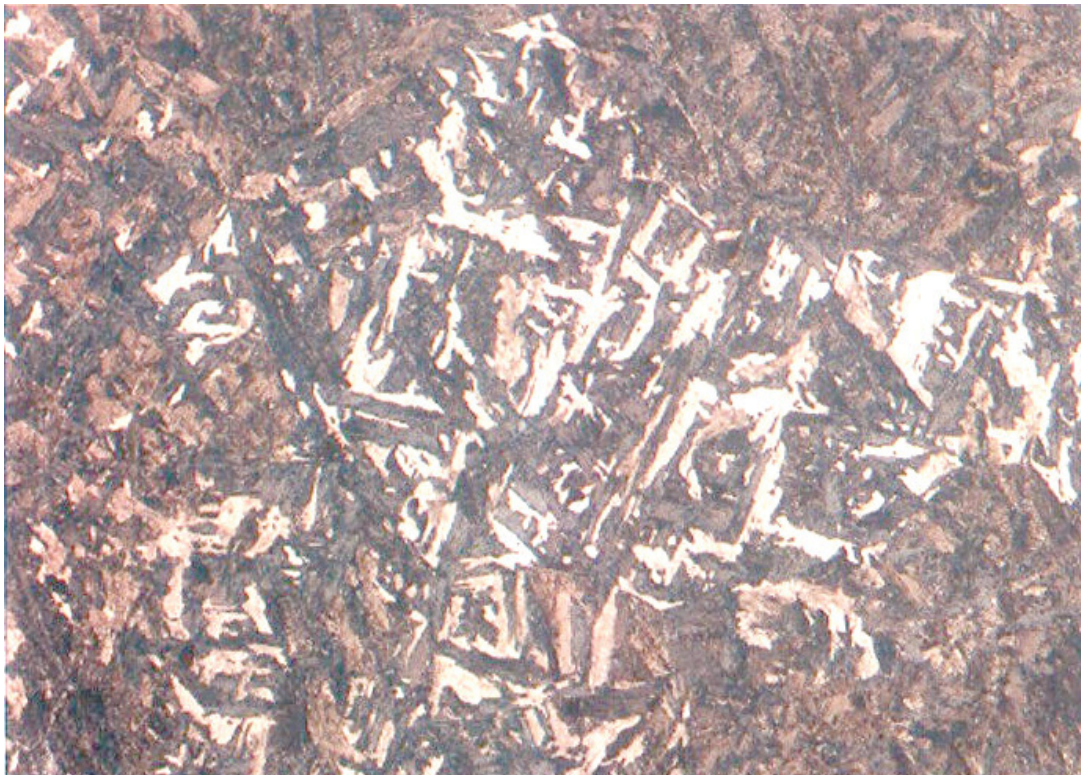
Eigenschaftsvergleich HSH - DOBAIN			
HSH		DOBAIN	
<b>Zugversuch:</b> $R_m = 1270 \text{ MPa}$ $R_{p0,2} = 940 \text{ MPa}$ $A_4 = 11,1 \%$ $Z = 21,0 \%$	<b>Härte in HB</b> 	<b>Zugversuch:</b> $R_m = 1475 \text{ MPa}$ $R_{p0,2} = 1186 \text{ MPa}$ $A_4 = 11,4 \%$ $Z = 39,5 \%$	<b>Härte in HB</b> 
<b>Zähigkeit:</b> $a_v = 36 \text{ J/cm}^2$ $K_{IC} = 33 \text{ MPam}^{0,5}$		<b>Zähigkeit:</b> $a_v = 37 \text{ J/cm}^2$ $K_{IC} = 34 \text{ MPam}^{0,5}$	

Tabelle 2.4: Eigenschaftsvergleich HSH-DOBAIN [25]





**Bild 2.15: Gefügebild einer feinperlitischen Schiene (400fach,  $\text{HNO}_3$ )**



**Bild 2.16: Gefügebild einer bainitische Schiene (400fach,  $\text{HNO}_3$ )**

### 2.4 Polymerarten und Eigenschaften

Um den Bereich der Abkühlungsgeschwindigkeit, der zwischen Wasser- und Öl Abschreckmitteln liegt, abzudecken, wurde Anfang der 50er Jahre begonnen, wasserlösliche, polymere Abschreckmedien zu entwickeln. Weltweit ist eine Reihe von unterschiedlichen Polymeren für Wärmebehandlungszwecke im Gebrauch. Folgende vier Polymertypen sind hauptsächlich in Verwendung:

- Polyvinylalkohol
- Polyalkylenglykol
- Polyvinylpyrolidon
- Natrium-Polyacrylat

Allgemein gilt, dass die Eigenschaften polymerer Härtemedien (HMe) nicht nur durch den Polymertyp, sondern auch durch die der beigemengten Additive wie Korrosionsschutz, Entschäumer oder Biozide stark beeinflusst werden. Ein Mischen verschiedener Polymertypen muss unbedingt vermieden werden, weil dadurch die Abschreckeigenschaften verändert werden können.

#### 2.4.1 PVA: polyvenyl alcohol

PVA war das erste polymere HMe, welches 1952 in den Markt eingeführt wurde. Schwierig bei dieser Art ist die Konzentrationseinstellung. Weiters führt es zu Ablagerungen (oder Reste) an den Anlagenteilen bzw. Werkstücken in klebriger Form bis zu Krustenbildung.[9]

#### PVA: POLY (VINYL ALCOHOL)

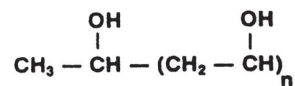
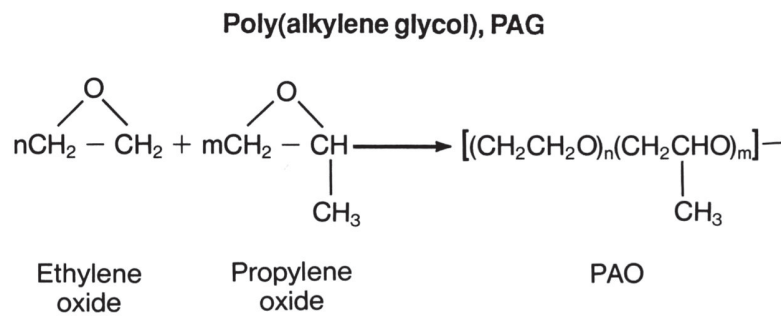


Bild 2.17: Strukturformel PVA [9]

#### 2.4.2 PAG: polyalkylen glykol

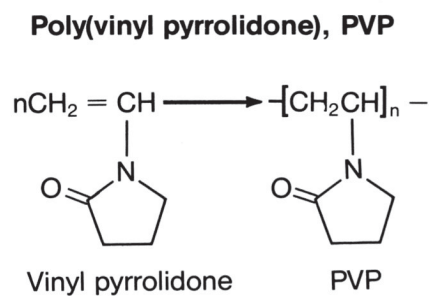
Die Markteinführung war Mitte der 60er Jahre. Es war in der Vergangenheit das am meisten verbreitete HMe. Diese Produktgruppe weist ein breites Anwendungsspektrum auf. Es gibt kaum Schwierigkeiten in der Handhabung. Ab einer Badtemperatur von 70-75 °C tritt allerdings Entmischung auf.[9]



**Bild 2.18: Strukturformel PAG [10]**

### 2.4.3 PVP: polyvinyl pyrrolidone

Laut Hersteller wird dieser Polymertyp die neueste Generation von polymeren HME werden und daher die SPA's ablösen. Ursprünglich wurden PVP's in der Kosmetik bzw. Pharmaindustrie verwendet. Die Reinsubstanz ist ein Feststoff. PVP's sind bei jeder Temperatur in Wasser löslich.



**Bild 2.19: Strukturformel PVP [10]**

### 2.4.4 SPA: Sodium polyacrylate

Die SPA's bilden das jüngste, in den USA entwickelte, Produkt. Zurzeit sind SPA's die am meisten verbreiteten HME.

SPA's sind sehr gut wasserlöslich. Das Molekulargewicht muss laufend kontrolliert werden, da das Natrium speziell in hartem Wasser (Kalzium, Magnesium, Eisen...) ionisieren kann. Dadurch tritt eine Viskositätsänderung auf, die ständige Viskositätsmessungen notwendig macht.[9]

Das Konzentrat ist eine zähe Flüssigkeit. Ab einer Badtemperatur von 70-75 °C tritt Entmischung auf. Generelles Ziel der Acrylate ist die Erreichung einer ölähnlichen Abschreckwirkung.

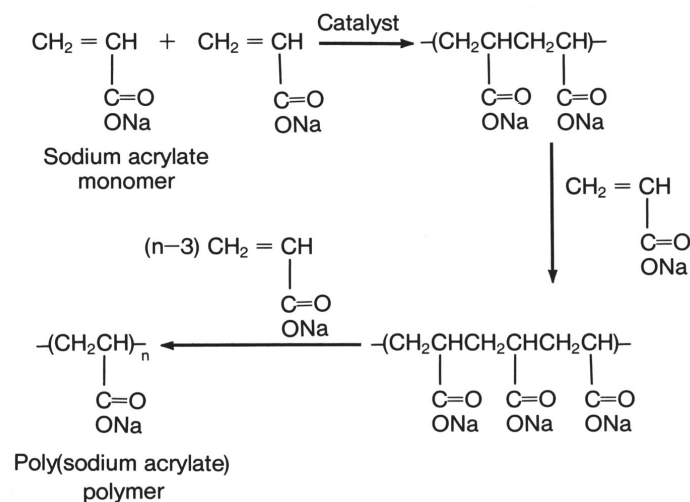


Bild 2.20: Strukturformel SPA [10]

## 2.5 Abschreckmechanismen

Beim Abschrecken mit Polymerlösungen sind gänzlich andere Mechanismen als beim Abschrecken mit Härteölen oder mit Wasser wirksam.

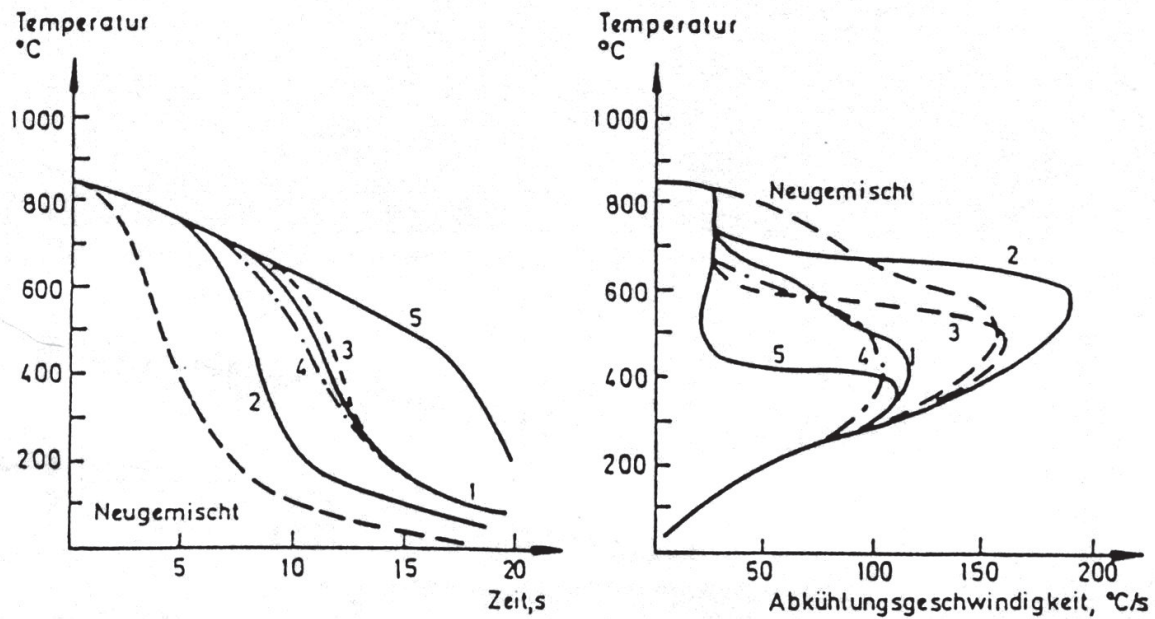
Die Löslichkeit der Polyalkylenglykole nimmt mit zunehmender Temperatur ab. Beim Erwärmen der Polymerlösung auf Temperaturen oberhalb von 70 bis 75 °C beginnt eine Ausscheidung des Polymers aus dem Wasser. Während des Abschreckens in einer Polyalkylenglykollösung wird auf der Oberfläche des zu härtenden Teiles ein dünner, fast wasserfreier Film des Polymers gebildet, der die Wärmeübertragung zum Abschreckmittel verringert. Mit zunehmender Konzentration des Polymers in der Lösung wird der Film dicker und verursacht eine geringere Abkühlgeschwindigkeit. Wenn die Oberflächentemperatur des Teiles auf Temperaturen unterhalb von 70 °C absinkt, löst sich der Polymerfilm auf, und die Wärmeübertragung erfolgt durch Konvektion.

Beim Abschrecken in Polyacrylatlösungen wird auf der Oberfläche des zu härtenden Teiles eine gallertartige, hochviskose Schicht gebildet, die verglichen mit dem Polyalkylenglykolfilm relativ dick und ebenfalls nicht stabil ist. Aus diesem Grunde reagieren Abschreckmittel auf Polyacrylatbasis sehr empfindlich auf Änderung der Badumwälzung und der Temperatur. Die Dicke der viskosen Schicht verursacht normalerweise eine geringere Abschreckintensität verglichen mit dem Abschrecken in Glykolen. Die Instabilität der Acrylatschicht hat in erster Linie Streuungen der Härte und des Verzuges von Teilen, die in Acrylatlösungen abgeschreckt wurden, zur Folge. Dies ist besonders bei komplizierten Bauteilen der Fall, bei denen die Badbewegung an der Bauteiloberfläche nur schwer zu beherrschen ist.

Beim Abschrecken in Lösungen von Polyvinylalkoholen bildet sich ein dünner polymerisierter Film an der Bauteiloberfläche. Der Abschreckmechanismus ist dem von Polyalkylenglykolen ähnlich, obwohl dieser Film bei geringeren Temperaturen nicht aufgelöst wird. Stattdessen bleibt nach dem Härten ein lackähnlicher Film auf der Bauteiloberfläche.[1]

### 2.6 Änderung der Eigenschaften von HMe mit der Zeit

Das Abschreckvermögen eines Abschreckmittels kann sich im Laufe der Zeit aufgrund von thermischer Zersetzung, Verunreinigungen u.a.m. ändern. Polymere sind hier weniger stabil als Öle, was durch folgendes Beispiel illustriert wird.[11] Bei einem Banddurchlaufofen für die Härtung kleinerer Teile wurde ein Polymerabschreckmittel (Acrylat) mit einer Konzentration von 15 % verwendet. Die Konzentration wurde laufend mit einem Refraktometer und durch Bestimmung der Viskosität kontrolliert. Während des Betriebs wurde das Abschreckmittel nach und nach verunreinigt und nach einigen Monaten kam es zu schwankenden Härtungsergebnissen, d.h. zu ungleichmäßiger oder auch zu geringer Härte, manchmal sogar zu Rissbildung an den Teilen, obwohl die Kontrolle der Konzentration keine abweichenden Werte aufzeigte. Die Erstellung der Abkühlungskurven für das Abschreckmittel im Labor zeigte eine große Streuung des Abschreckvermögens (**Bild 2.21**). Dieses Bild zeigt, dass die Dampfhaupphase (Leidenfrost'sches Phänomen [12]) teils wesentlich verlängert worden war, teils auch große Schwankungen im Vergleich zu der bei einem neugemischten Polymerabschreckmittel zeigte. Auch die maximale Abkühlungsgeschwindigkeit zeigte eine Streuung in einem breiten Bereich. Es war nicht festzustellen, woraus die Verunreinigungen bestanden und sie beeinflussten hier auch weder den Refraktometerwert noch die Viskosität. In anderen Fällen, die untersucht wurden, hatten Verunreinigungen den Refraktometerwert mehr oder weniger beeinflusst. Es ist offensichtlich, dass die Art der Verunreinigung große Bedeutung für die Wirkung auf das Abschreckvermögen hat, was sich am sichersten mit Hilfe der Abkühlungskurve überprüfen lässt.[11]



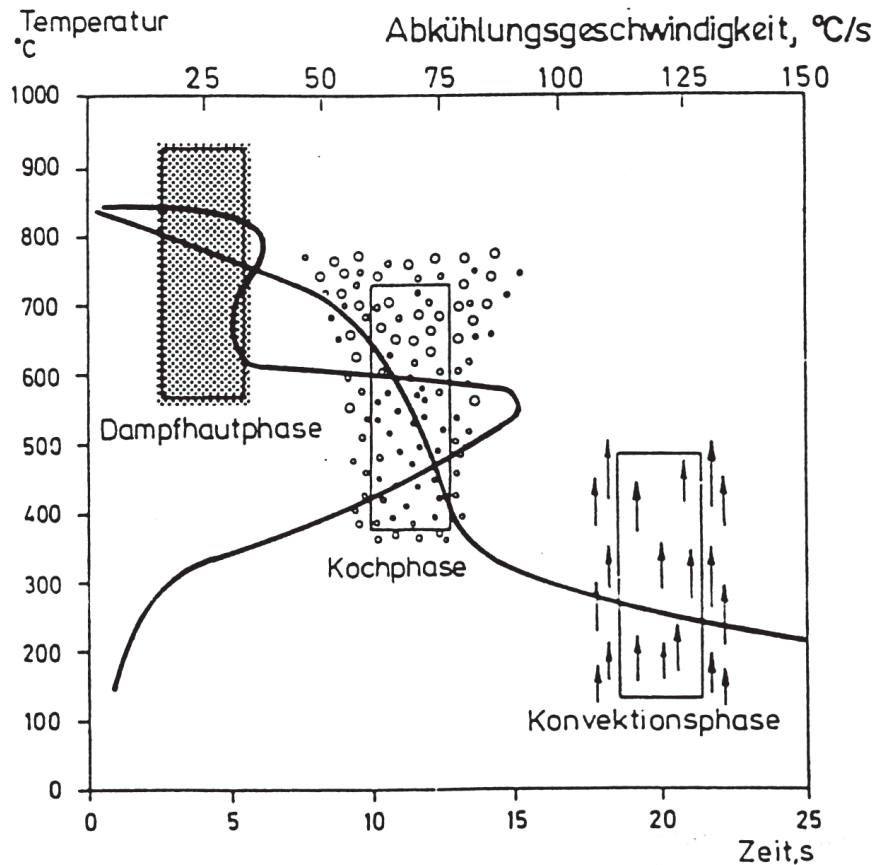
**Bild 2.21:** Abkühlungskurven eines verunreinigten polymeren Abschreckmittels mit unterschiedlichem Alter [11]

### 2.7 Wirkung von polymeren, wassermischbaren Härtemitteln

Die Abschreckintensität von Polymerlösungen kann in einem weiten Bereich durch Änderung der Polymerkonzentration, der Badtemperatur, dem Einbringen von Luft und der Badbewegung variiert werden.

#### 2.7.1 Wärmeübertragung und Abkühlverlauf

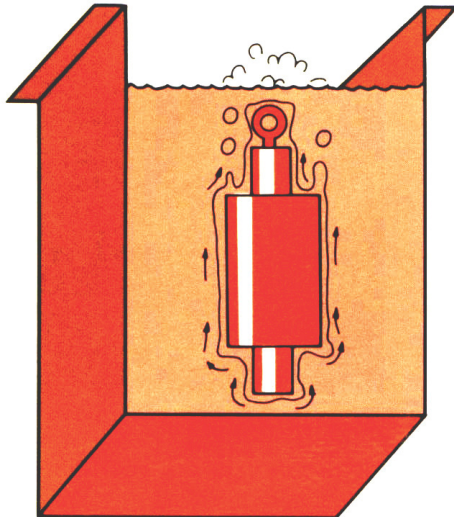
Die Eigenschaften eines HMe's werden am Besten mittels der Abkühlungskurven, welche das Abschreckverhalten beschreiben, charakterisiert. Mit Hilfe der Abkühlungskurve lässt sich jedes Abschreckmittel identifizieren und im Hinblick auf seine kennzeichnenden Merkmale bestimmen. Der Abschreckverlauf beim Härten lässt sich in drei Phasen einteilen, siehe **Bild 2.22**, die alle für das Ergebnis nach dem Abschrecken von Bedeutung sind.



**Bild 2.22: Die drei Phasen des Abschreckprozesses [11]**

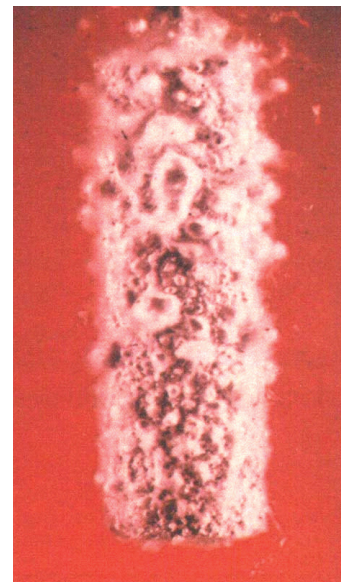
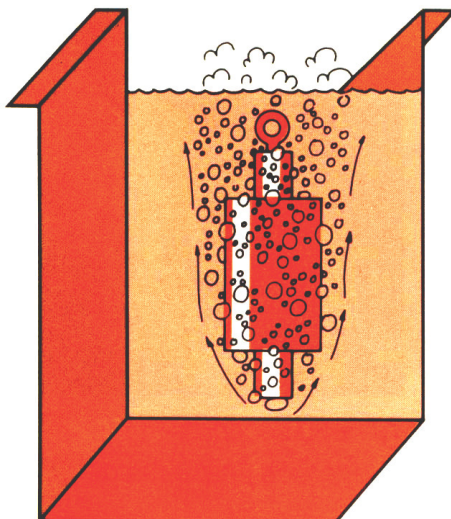
In der ersten Phase, der Dampfhauphase, ist die Temperatur an der Oberfläche des Gutes so hoch, dass das Abschreckmittel rasch verdampft und sich eine dünne, isolierende Dampfhauphase um das ganze Teil herum bildet (**Bild 2.23**). Dieses Phänomen wird auch Leidenfrost'scher Effekt bezeichnet. [12]

Um eine erwünschte Phasenumwandlung in Ferrit und Perlit zu gewährleisten, muss diese Dampfhauphase lang genug andauern. Die Dampfhauphase ist u.a. sehr stark von der Dampfbildungswärme des Abschreckmittels, der Oberflächenbeschaffenheit des Teils, z.B. Zunder oder anderer Belag, der chemischen Zusammensetzung insgesamt, der Gestaltung des Abschreckbeckens u.a.m., abhängig.



**Bild 2.23: Schema und reales Bild der Dampfhaut**

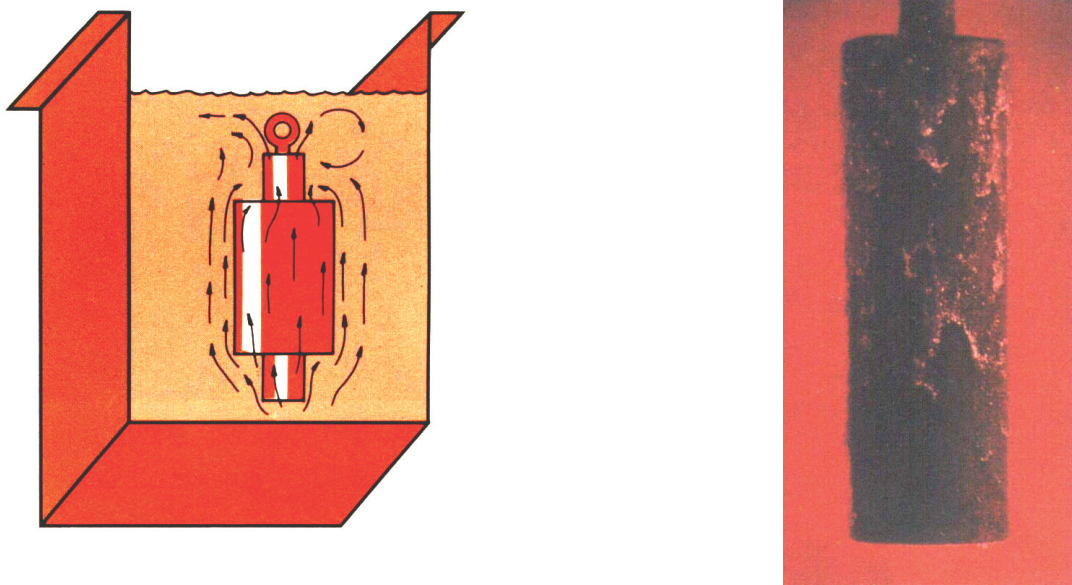
In der zweiten Phase, der Kochphase, gelangt das Abschreckmittel in direkten Kontakt mit der heißen Oberfläche und kommt unverzüglich zum Kochen, wodurch sich eine hohe Abkühlungsgeschwindigkeit ergibt (**Bild 2.24**). Um z.B. für Martensithärte eine effiziente Kühlung der verwendeten Stahlsorte zu erzielen, muss die Abkühlungsgeschwindigkeit in dem Temperaturbereich, in dem die Ferrit- und Perlitnase im ZTU-Schaubild für diesen Stahl liegt (**Bild 2.14**), am höchsten sein.



**Bild 2.24: Schema und reales Bild der Kochphase**



Die dritte Phase, die Konvektionsphase, beginnt, wenn die Oberflächentemperatur des Teils auf den Siedepunkt des Abschreckmittels abgesunken ist (**Bild 2.25**). Die Abkühlungsgeschwindigkeit wird hier vor allem durch die Strömungsgeschwindigkeit des Abschreckmittels beeinflusst. Eine niedrige Übergangstemperatur zwischen Koch- und Konvektionsphase bedeutet eine hohe Abschreckleistung.



**Bild 2.25: Schema und reales Bild der Konvektionsphase**

Jedes Abschreckmittel, dessen Siedetemperatur unterhalb der Härtetemperatur liegt, kühlt die Werkstoffoberfläche nach dem in den **Bildern 2.23, 2.24** und **2.25** gezeigten Schema ab.

- Dampfhautphase
- Koch- oder Siedephase
- Konvektionsphase

Um ein feinperlitisches Gefüge mit gleichmäßig hoher Härte zu erreichen, wird beim HSH<sup>®</sup>-Verfahren der Schienenkopf in der Dampfhautphase kontinuierlich abgekühlt.

Beim DOBAIN<sup>®</sup>-Verfahren wird die gesamte Schiene in der Kochphase isotherm abgekühlt. Zur Erzielung einer gleichmäßig hohen Härte und zur Reduzierung von Spannungen im oberen Temperaturbereich ist es notwendig, dass die Dampfhautphase möglichst kurz gehalten wird und der Übergang von der Dampfhaut- in die Kochphase an der gesamten Werkstoffoberfläche gleichmäßig erfolgt.

2.7.2 Filmbildungsmechanismus

Bild 2.26 zeigt schematisch die Wirkungsweise von Polymerabschrecklösungen an der Werkstückoberfläche.

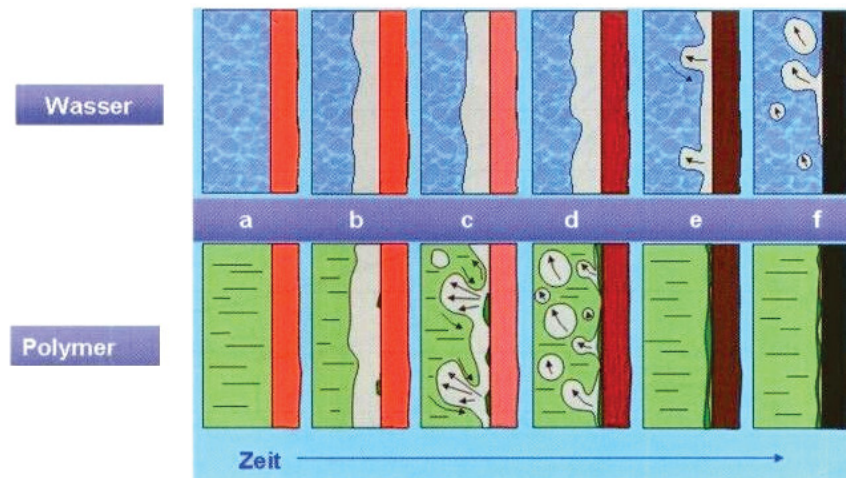


Bild 2.26: Wirkungsweise von Polymerlösungen [13]

Man unterscheidet bei wässrigen Polymerlösungen zwischen zwei Mechanismen zur Ausbildung des Isolierfilms (Bild 2.27).

- Die Polymerlösungen bilden konzentrationsabhängig den Isolierfilm durch temperaturabhängige **reversible Unlöslichkeit** der Polymere im Wasser aus. Der Isolierfilm an der Oberfläche existiert bei diesen Produkten, solange die Temperatur der Oberfläche oberhalb etwa 70-75 °C, bei bestimmten Typen auch oberhalb 90 °C, liegt. Bei Unterschreitung der Temperatur geht der Film schnell wieder in Lösung.
- Der Isolierfilm wird durch **Aufkonzentration** an der Werkstoffoberfläche erreicht.

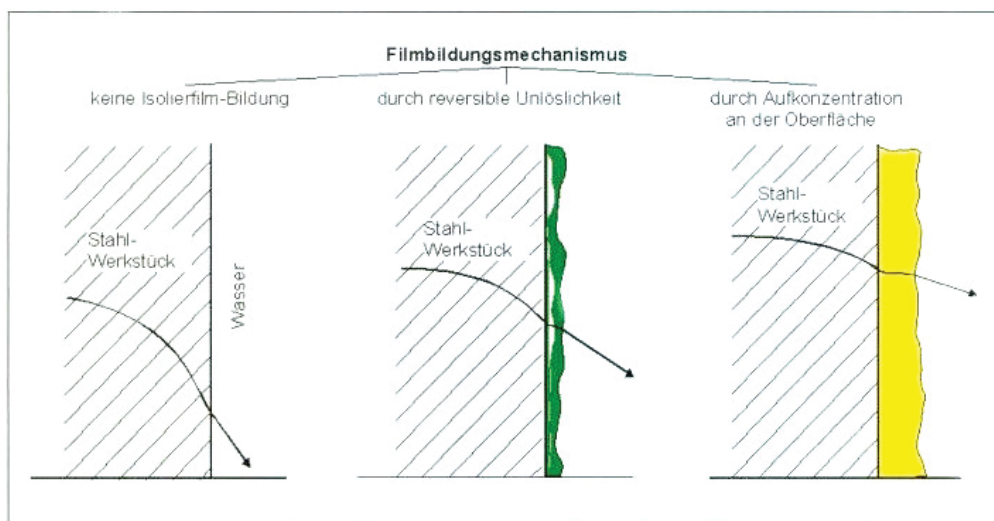


Bild 2.27: Einfluss des Mechanismus der Isolierfilmbildung auf den Wärmeübergang [13]

### 2.7.3 Einfluss auf den Abkühlverlauf

#### 2.7.3.1 Temperatur-, Konzentrations- und Lufteinfluss

Die drei Parameter Temperatur, Konzentration und Luft wurden im Rahmen eines Vorprojektes (Metallurgieprojekt 06/01) variiert und untersucht, wobei der Einfluss von Temperatur und Konzentration aus der Fachliteratur[22] bekannt war. Aus ungefähr 300 Versuchen ergaben sich interessante Ergebnisse, die nicht nur auf die HSH<sup>®</sup>-Anlage in Donawitz anzuwenden sind, sondern allgemeine Aussagen über polymere Abschreckmittel im gesamten Temperaturverlauf zulassen. Für diese Arbeit ist nur der Bereich 800 bis 500 °C ausschlaggebend. Wenn man die untersuchten Prozessparameter einzeln und schematisch betrachtet kommt man zu folgenden Schlüssen.

#### Temperatur des Härtemediums

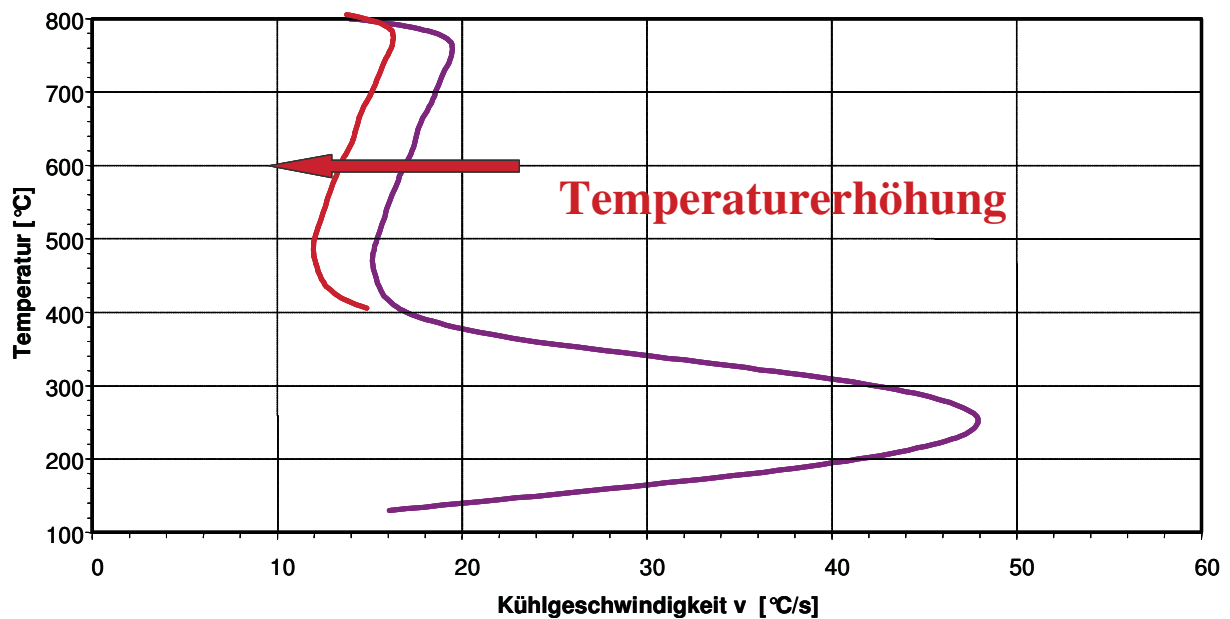
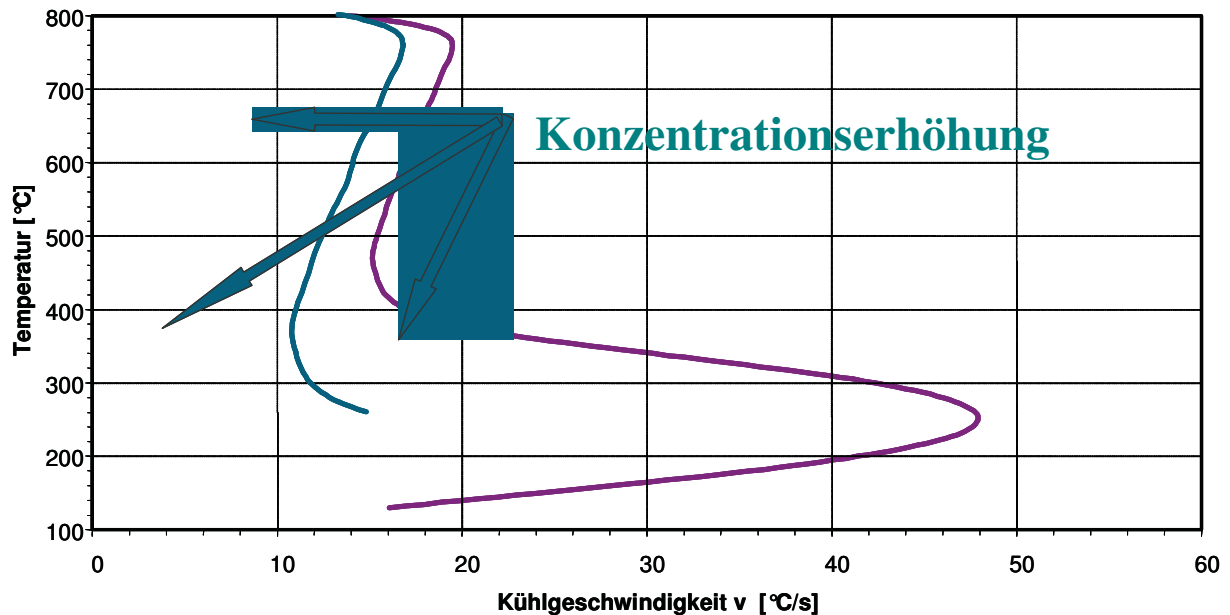


Bild 2.28: Einflussparameter Temperatur [14]

Wird eine Temperaturerhöhung (Bild 2.28) des HMe durchgeführt, so verschiebt sich die Abkühlkurve zu niedrigeren Kühlgeschwindigkeiten. Dies führt dazu, dass die Schiene oder das Werkstück nicht so stark abgeschreckt wird. Wie man aus ZTU-Diagrammen weiß, hängt die Härte mit der Abschreckgeschwindigkeit zusammen. Je niedriger die Abkühlrate, desto geringer ist die Härte. Weiters führt eine höhere Temperatur zu einer Stabilisierung des gesamten Prozesses, da sich die Dampfhaut schneller nach Zusammenbruch wieder aufbaut

(keine Hügel im oberen Temperaturbereich). Die Temperatur ist daher wesentlicher Prozessparameter und ist leicht einzustellen - sowohl niedrige Temperaturen bis 20 °C als auch höhere Temperaturen bis 50 °C.

### Konzentration des Härtemediums



**Bild 2.29: Einflussparameter Konzentration [14]**

Eine Konzentrationserhöhung (**Bild 2.29**) führt dazu, dass die Dampfhautphase verlängert wird. Weiters wird die Dampfhaut um die Probe herum dicker, was zur Folge hat, dass die Abschreckgeschwindigkeit zu geringeren Werten verschoben wird. Eine Konzentrationserhöhung stabilisiert den Abschreckprozess, allerdings darf man natürlich die Wirtschaftlichkeit nicht aus dem Auge verlieren. Durch höhere Konzentrationen erhöhen sich die Ausschleppverluste, da durch die höhere Viskosität mehr Polymer an der Oberfläche der Schiene anhaften kann. Die Einstellung der Konzentration ist nicht so einfach wie die Temperatureinstellung. Die Konzentration wird sowohl refraktometrisch als auch viskosimetrisch gemessen. Die Einstellung der Soll-Konzentration erfolgt viskosimetrisch.

## Luft im Härtemedium

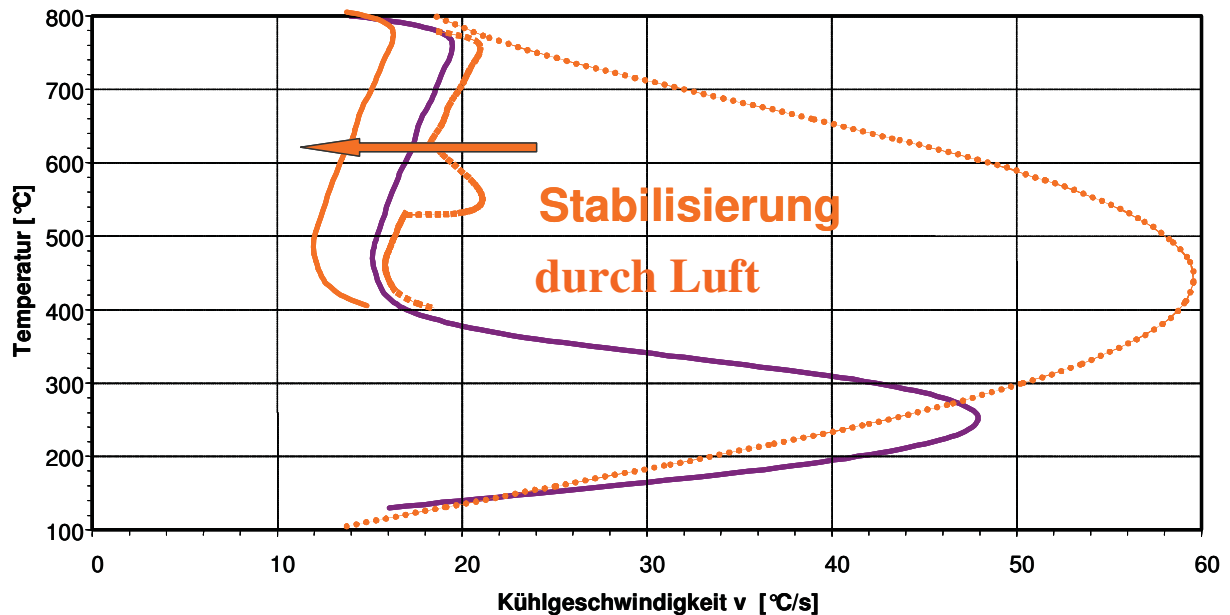


Bild 2.30: Einflussparameter Luft [14]

Wird Luft in das HMe eingebracht (**Bild 2.30**), so verringert sich die Abschreckwirkung und der Prozess wird stabilisiert. Die Gründe hierfür sind aus der Literatur nicht ersichtlich. Der Einfluss der Luft ist nicht so stark wie jener von Temperatur und Konzentration.

### 2.7.3.2 Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit

Die Erfassung der Abkühlungskurven von Härteölen im Labor erfolgt normalerweise bei nicht in Bewegung befindlichem Öl. Abkühlungskurven für wässrige Polymerabschreckmittel müssen jedoch unter Umwälzung des Mediums bestimmt werden, um eine gute Reproduzierbarkeit zu erreichen. Dies hat mit dem Abschreckmechanismus von Polymeren zu tun. Alle drei Phasen der Abkühlungskurve können mehr oder weniger durch die Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst werden.

**Bild 2.31** zeigt Beispiele den Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit. Bei Härteölen wird vor allem die Konvektionsphase beeinflusst, während bei Polymeren sämtliche Phasen beeinflusst werden, am stärksten die Dampfhautphase. Es handelt sich im **Bild 2.31** um einen Polymertyp, der sehr empfindlich auf Schwankungen der Strömungsgeschwindigkeit reagiert. [11]

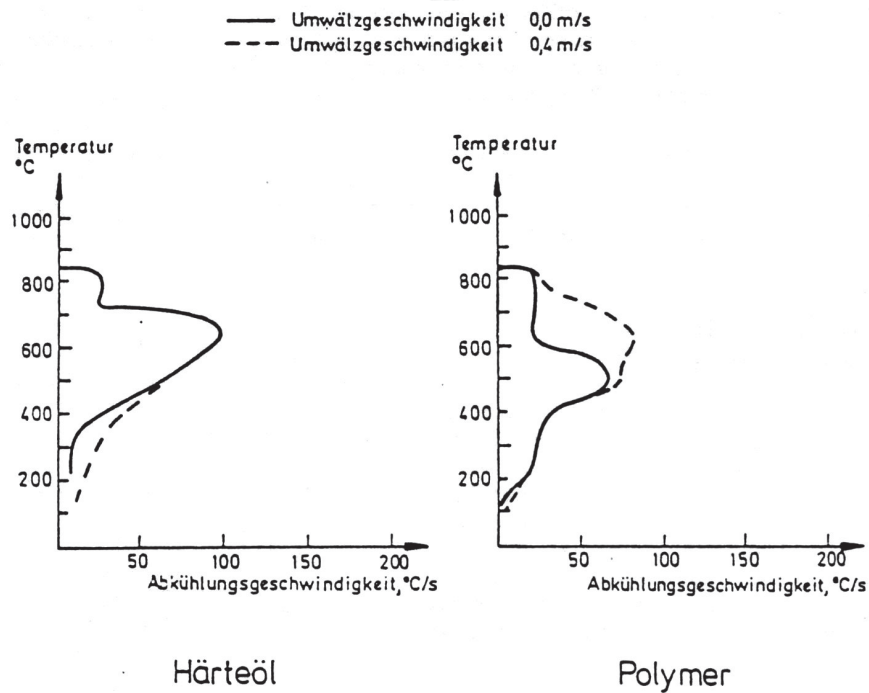


Bild 2.31: Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit [11]

### 2.7.3.3 Einfluss der Gestaltung der Abschreckbecken

Eine Badbewegung ist u.a. erforderlich, damit eine gleichmäßige Abschreckmitteltemperatur im Abschreckbad erzielt und der eingetauchten Charge neues, kälteres Abschreckmittel zugeführt wird.

### 2.7.3.4 Ausschleppverluste

Beim Herausnehmen der Teile aus dem Bad nach dem Abschrecken ist die Oberfläche mit einer Polymerschicht überzogen, weil am Ende des Abkühlvorganges üblicherweise eine kurze Kochphase entsteht und das HMe direkt mit der Werkstückoberfläche in Berührung kommt, wodurch eine Abnahme der Polymerkonzentration im Bad verursacht wird. Die Höhe dieser Ausschleppverluste hängt von folgenden Faktoren ab:

- Polymertyp
- Polymerkonzentration
- Badtemperatur
- Oberflächentemperatur der Teile zum Zeitpunkt der Entnahme aus dem Bad
- Geometrie und Oberflächenzustand der Teile.

Um das Risiko von Härterissen zu verringern, können die Teile aus dem Abschreckbad entnommen werden, bevor sie die Badtemperatur erreicht haben.

Bei dieser Vorgehensweise wird die sich bei höheren Oberflächentemperaturen bildende Polymerschicht nicht völlig aufgelöst und erhöht die Ausschleppverluste drastisch. [1]

Die Untersuchungen des Metallurgieprojektes 06/01 zeigen, dass Polymerlösungen bezüglich ihrer Abschreckeigenschaften und ihrer sonstigen Gebrauchseigenschaften ein attraktiver Ersatz für Härteöle sein können. Sie benötigen jedoch eine sorgfältige Pflege und Überwachung, wenn gleichmäßige Härteergebnisse gewährleistet werden sollen.

### **2.8 Umweltverträglichkeit und gesundheitliche Aspekte**

Die in Frage kommenden Polymere sind durchwegs nur schwach giftig, und es sind keine Fälle von ernsthafter gesundheitlicher Beeinträchtigung von Arbeitern durch Polymere bekannt.

Die Beurteilung der gesundheitlichen Gefährdung durch Polymerabschreckmittel ist:

- das Polymer selbst
- die Additive
- die Zersetzungsprodukte

und ihre Wirkung auf den menschlichen Körper (akute Gefährdung oder Reizung der Augen, der Lungen und der Haut) zu betrachten.

Das Polymer selbst ist im Allgemeinen schwach giftig und kann eine Reizung der Augen und der Haut bewirken. Das Ausmaß der Reizung nimmt normalerweise mit zunehmendem Molekulargewicht ab.

Als Additive sind in Polymerabschreckmitteln üblicherweise folgende Substanzen zu finden:

- Korrosionsinhibitoren, üblicherweise Aminoverbindungen (Nitrite werden nicht mehr eingesetzt)
- Entschäumer, normalerweise Emulsionen auf Siliziumbasis oder Natriumverbindungen
- Bakterizide, die in der Regel Formaldehyd freisetzen.

Dem Abschreckmittel sollten ohne Rücksprache mit dem Hersteller keine Stoffe zugesetzt werden, welche zu unerwünschten Reaktionen mit den bereits vorhandenen Additiven führen können.

Verbindungen, welche durch thermische Zersetzung entstehen können, sind z.B. Aldehyde, Ketone, Fettsäuren und Ammoniak. Diese Produkte können Reizungen der Augen und der Atmungsorgane bewirken. Welche dieser Verbindungen entstehen, hängt von der Art des Polymerabschreckmittels und den Arbeitsbedingungen ab. Darüber hinaus wird Kohlenmonoxid in geringen Mengen gebildet. Messungen haben gezeigt, dass hiermit keine gesundheitlichen Risiken verbunden sind.[1]

Beim Eintauchen von heißen Materialien in Polymerabschreckmittel wird Aerosol gebildet. Es enthält im wesentlichen Wasserdampf, aber auch die erwähnten Zersetzungsprodukte. Langzeitiger oder wiederholter Kontakt mit Polymeren kann zu einer Reizung der Haut mit den Symptomen Juckreiz und Austrocknung führen. Durch die Benutzung von Handschuhen, Brillen und ähnlichem und durch Waschen der betroffenen Hautpartien mit Wasser und Seife können diese Reizungen vermieden werden.

Ein weiteres Problem, welches möglicherweise auftritt und bei spritzenden oder ausgeschleppten Flüssigkeiten beachtet werden sollte, ist das der Rutschgefahr auf den betroffenen Fußböden.[1]



### **3 Praktischer Teil**

Ziel des praktischen Teiles der Diplomarbeit ist die Auswahl eines geeigneten Härtemittels und die Ermittlung der optimalen Prozessparameter zur Erzeugung von sowohl perlitischen als auch bainitischen Schienen in einer stabilen Dampfhaupphase. Die praktischen Versuche wurden an zwei Versuchsanlagen durchgeführt, die so gestaltet sind, dass die Ergebnisse mit den Kennzahlen der Produktionsanlage verglichen werden können.

#### **3.1 Anlagen**

##### **3.1.1 HSH<sup>®</sup>-Anlage [15]**

###### **3.1.1.1 Ziel des HSH<sup>®</sup>-Verfahrens**

Die Schienen – speziell der Schienenkopf – müssen hochverschleißfest sein, um den folgenden Ansprüchen an den Fahrweg Schiene zu genügen:

- höhere Achslasten
- höhere Geschwindigkeiten
- anspruchsvolle Streckenführung (enge Kurven und starke Steigung)
- intensive Befahrung der Schienenwege

Das Ziel des HSH<sup>®</sup> - Verfahrens (HSH<sup>®</sup>-Head Special Hardened) der voestalpine Schienen GmbH ist es, im Schienenkopf eine hochfeste, feinperlische Gefügestruktur zu erzeugen. Feinperlisch bedeutet, dass der Abstand zwischen den Ferrit- und Zementitlamellen möglichst klein ist. Der Schienenkopf wird dadurch sehr widerstandsfähig gegen Verschleiß und weist im Vergleich zur naturharten Schienengüte S900A (UIC60-Norm) unter vergleichbaren Beanspruchungsbedingungen einen im Durchschnitt dreifach höheren Verschleißwiderstand auf.

Die Verwendung von HSH<sup>®</sup>-Schienen bringt dem Kunden daher eine wesentlich höhere Lebensdauer der Schienen und eine Senkung der Lebenszykluskosten.[23]

Die voestalpine Schienen GmbH bietet eine breite Palette an kopfgehärteten HSH<sup>®</sup>-Schienen an. Je nach spezifischen Belastungs- und Anwendungsfall wird die optimale Schienengüte eingesetzt.

**Stahlsorten voestalpine**

	Norm	Bezeichnung	Chemische Zusammensetzung										mechanische Kennwerte			
			C [%]		Si [%]		Mn [%]		Cr [%]		P [%]	S [%]		Rm min.	A5 min.	Härte
			min	max	min	max	min	max	min	max	max	min	max	[MPa]	[%]	[BHN]
naturhart	EN 13674	R200	0,40	0,60	0,15	0,58	0,70	1,20	-	0,15	0,035	0,008	0,035	680	14	>200
	UIC 860	700	0,40	0,60	0,10	0,40	0,80	1,30	-	-	0,050	-	0,050	680	14	-
	EN 13674	R220	0,50	0,60	0,20	0,60	1,00	1,25	-	0,15	0,025	0,008	0,025	770	12	>220
	EN 13674	R260	0,62	0,80	0,15	0,58	0,70	1,20	-	0,15	0,025	0,008	0,025	880	10	>260
	UIC 860	900A	0,60	0,80	0,10	0,50	0,80	1,30	-	-	0,040	-	0,040	880	10	-
	EN 13674	R260Mn	0,55	0,75	0,15	0,60	1,30	1,70	-	0,15	0,025	0,008	0,025	880	10	>260
	UIC 860	900B	0,55	0,75	0,10	0,50	1,30	1,70	-	-	0,040	-	0,040	880	10	-
	EN 13674	R320Cr	0,60	0,80	0,50	1,10	0,80	1,20	0,80	1,20	0,020	0,008	0,025	1080	9	>320
UIC 860	1100	0,60	0,82	0,30	0,90	0,80	1,30	0,80	1,30	0,030	-	0,030	1080	9	-	
kopfgehärtet	VA-Spec.	HSHL	0,40	0,60	0,05	0,35	0,80	1,25	-	-	0,035	0,008	0,035	900	10	>260
	prEN 14811	R260 G HT	0,40	0,60	0,15	0,58	0,70	1,20	-	-	0,035	0,008	0,035	880	12	260-300
	VA-Spec.	HSHM	0,50	0,60	0,20	0,40	0,80	1,10	-	-	0,035	0,008	0,035	980	9	>290
	prEN 14811	R290 G HT	0,50	0,65	0,15	0,58	1,00	1,25	-	-	0,025	0,008	0,025	960	10	290-330
	EN 13674	R350HT	0,72	0,80	0,15	0,58	0,70	1,20	-	0,15	0,020	0,008	0,025	1175	9	>350
	EN 13674	R350LHT	0,72	0,80	0,15	0,58	0,70	1,20	-	0,30	0,020	0,008	0,025	1175	9	>350
	VA-Spec.	370LHT	0,70	0,82	0,40	1,00	0,70	1,10	0,40	0,70	0,020	0,008	0,025	1280	9	>370
VA-Spec.	400UHC	0,90	1,00	0,20	0,40	1,20	1,30	0,20	0,30	0,020	0,008	0,025	1280	9	>400	

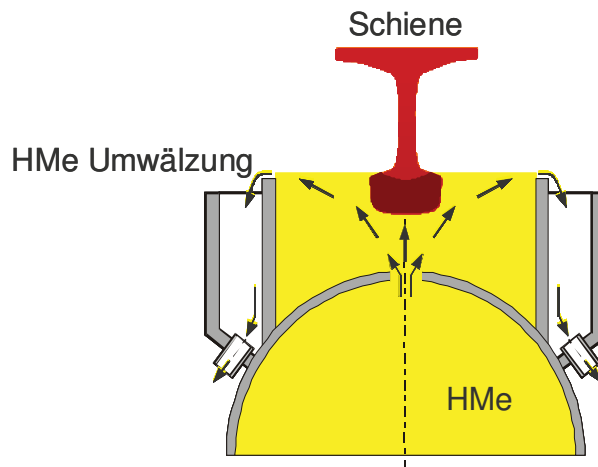
  

HSHL	Head Special Hardened Low Carbon	UHC	Ultra High Carbon
HSHM	Head Special Hardened Medium Carbon	HT	Heat Treated
HSH	Head Special Hardened	LHT	Low Alloyed Heat Treated

**Tabelle 3.1: Stahlsorten voestalpine Schienen GmbH**

**3.1.1.2 Allgemeine Beschreibung des HSH<sup>®</sup>-Prozesses**

Das bei der voestalpine Schienen GmbH in Donawitz entwickelte und patentierte Wärmebehandlungsverfahren ist in die Produktionsstraße für naturharte Schienen voll integriert. Die gesamte Walzlänge der Schiene kann direkt aus der Walzhitze in einem Vorgang wärmebehandelt werden (Inline Prozess). Die Wärmebehandlung ist ein Tauchverfahren, bei dem nur der Schienenkopf in einem Härtebad beschleunigt abgekühlt wird, sodass sich im gesamten Schienenkopf ein hochfestes, feinperlitisches Gefüge ausbildet. Die dafür verwendete Abschreckanlage (HSH<sup>®</sup> - Anlage) ist schematisch im **Bild 3.1** dargestellt. Das Härtebecken ist mit einem Härtemedium (HMe) gefüllt. Das HMe ist eine wässrige Lösung eines polymeren Härtemittels. Dieses HMe besitzt eine bestimmte Konzentration und eine bestimmte Temperatur. Das HMe wird in einem offenen System mit einem konstanten Volumenstrom umgewälzt und strömt von einem Verteilerkörper durch Düsen aus in das Härtebecken der Abschreck-Anlage und somit direkt an den Schienenkopf. Die Schiene bleibt für eine bestimmte Zeit (= Tauchzeit) mit dem Schienenkopf im HMe in dieser hängenden Position eingetaucht. Während dieser Zeit wandelt sich das austenitische Stahlgefüge des sich im Härtebad befindlichen Schienenkopfes zu feinkörnigem Perlit um.



**Bild 3.1: Prinzip Schienenkopfhärtung [15]**

Es entsteht ein feinperlitisches Gefüge im gesamten Schienenkopfquerschnitt, während der restliche Schienenquerschnitt (Steg, Fuß) durch die Abkühlung an Luft in ein gröberes, aber ebenfalls perlitisches Gefüge umgewandelt wird.

Die Feinperlitisierung des Schienenkopfes mit dem HSH<sup>®</sup>-Verfahren erfordert eine spezielle Prozessführung. Das entstehende Gefüge muss rein perlitisch sein, das heißt es dürfen keine anderen Gefügeanteile wie Bainit oder Martensit entstehen. Prinzipiell erreicht man mit einer größeren Abschreckwirkung bzw. einer beschleunigten Abkühlung eine höhere Gefügehärte im Schienenkopf. Beim HSH<sup>®</sup>-Prozess sind die Prozessparameter so aufeinander abzustimmen und die Abkühlung ist so zu steuern, dass ein feinperlitisches Gefüge mit einer möglichst hohen Härte entsteht.

**Die HSH<sup>®</sup>-Prozessparameter sind:**

Schiene:

- Tauchtemperatur des Schienenkopfes (= Oberflächentemperatur)
- Tauchzeit (= Verweilzeit im Quenchomat bzw. Härtebecken)

Härtemedium:

- Temperatur
- Konzentration des Abschreckmittels
- Umwälzmenge

Die HSH<sup>®</sup>-Prozess-Parameter sind auf die jeweilige Kombination aus Schienenwerkstoff und Schienenprofil (speziell Kopfquerschnitt) abgestimmt.

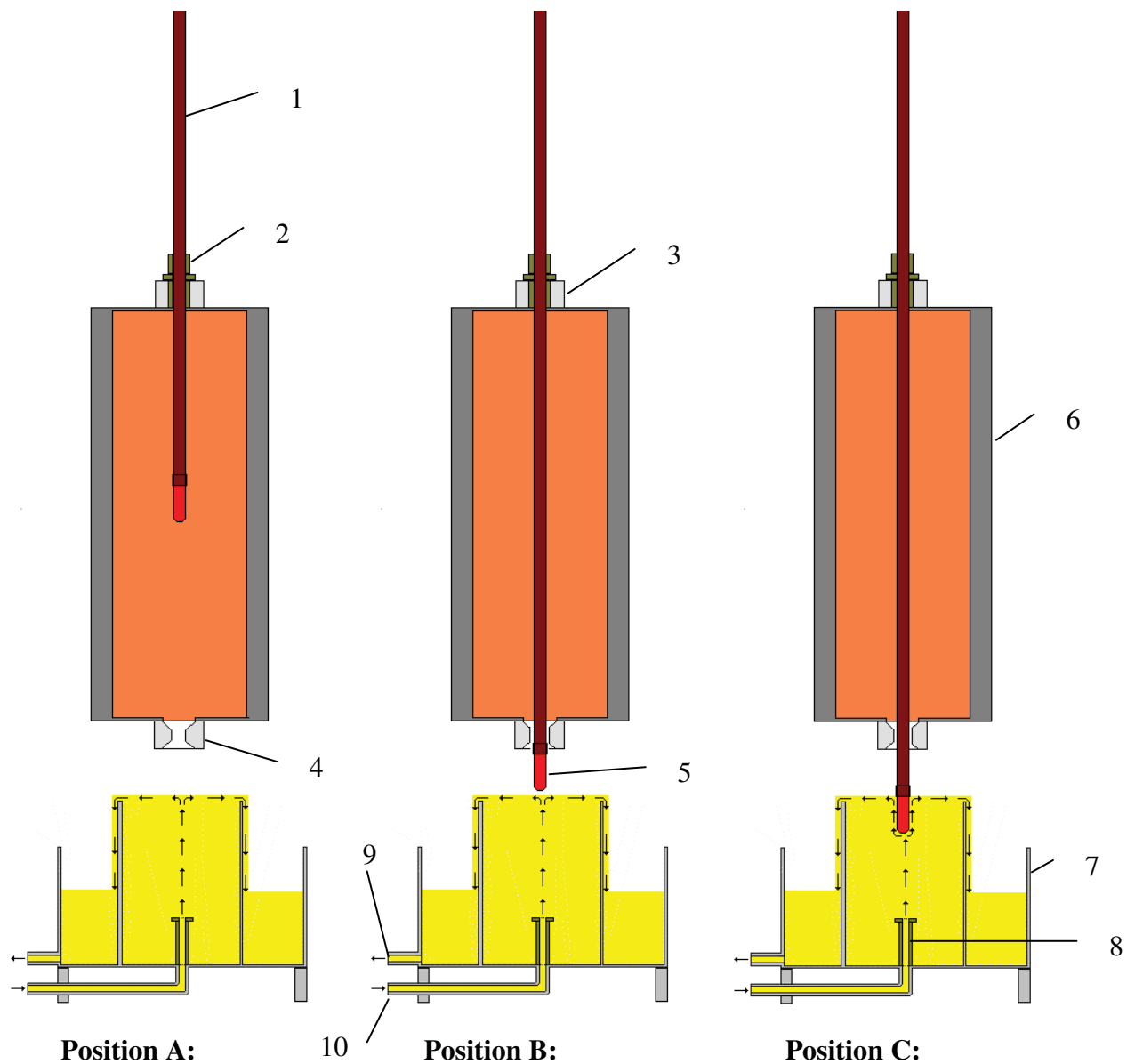
Der Abkühlprozess wird anhand dieser Parameter so gesteuert, dass eine vorgegebene Abkühlkurve durchlaufen wird. Dann ist sichergestellt, dass eine Schiene mit spezifikationsgerechtem Gefüge und entsprechender Härte hergestellt wird.

#### **3.1.2 Der Quenchomat**

Der Quenchomat ist eine von der voestalpine Schienen GmbH entwickelte Versuchsanlage, mit der man die Abschreckcharakteristik von wassermischbaren polymeren Abschreckmitteln bestimmen kann. Einerseits sollen Abschreckmittel die bereits in der Schienenproduktion im Einsatz sind auf ihre Altersbeständigkeit überprüft werden, d.h. Abweichungen von der vorgegebenen Abschreck-Sollkurve werden so ermittelt. Andererseits sollen neue Abschreckmittel auf ihre grundsätzliche Eignung für den Einsatz in der Produktionsanlage getestet werden.

Um gut vergleichbare Daten zu erhalten, ist es notwendig, die Versuche unter möglichst prozessnahen Bedingungen durchzuführen. Der Quenchomat ist so konstruiert, dass der HSH<sup>®</sup>-Prozess möglichst gut nachempfunden wird. So ist beispielsweise eine Originaldüse aus der HSH<sup>®</sup>-Anlage im Abschreckbecken eingebaut. Dadurch wird sicherhergestellt, dass das Strömungsverhalten des Härtemediums in der Versuchsanlage mit dem in der Produktionsanlage gut vergleichbar ist.

Diese Abschreckanlage ist im **Bild 3.2** schematisch dargestellt.



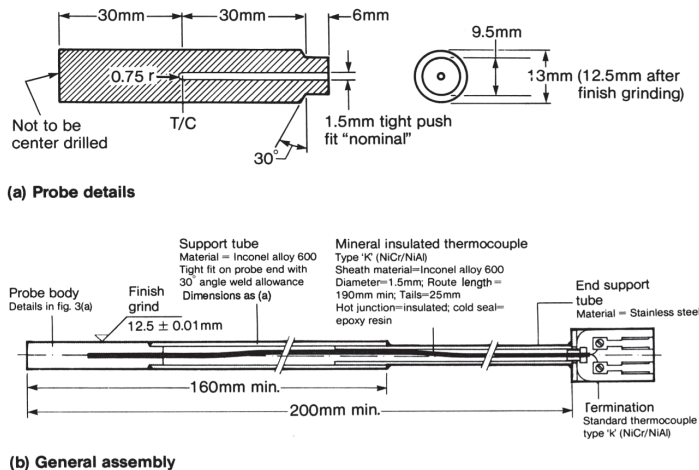
**Bild 3.2: Abschreckanlage Quenchomat**

- |                           |   |
|---------------------------|---|
| (1) Probenstab            | (6) Dreispulen-Rohr                               |
| (2) Zentrierhülse         | (7) Tauchbecken                                   |
| (3) Oberer Zentrierstein  | (8) Originaldüse aus der HSH <sup>®</sup> -Anlage |
| (4) Unterer Zentrierstein | (9) Abfluss                                       |
| (5) Prüfkörper            | (10) Zufluss                                      |

Der Quenchomat besteht im wesentlichen aus einem Rohröfen, einem Tauchbecken und einem, mit einem Thermoelement bestückten, Prüfkörper. Der Prüfkörper, der an einem Probenstab fixiert ist, wird in einem Dreizonenofen in einem Bereich von 17 – 26 cm Tiefe auf eine Temperatur von ca. 900 °C erwärmt. Diese Temperatur wird für 10 min im Ofen

gehalten, um die Durchwärmung der Probe zu garantieren und somit die Ausgangsbedingungen des Versuches gleich zu halten.

Der Prüfkörper selbst ist eine adaptierte Wolfson-Probe (**Bild 3.3**), die mit einer Schraubverbindung am Probenstab befestigt ist.



**Bild 3.3: Prüfkörper links und Größenvergleich Probe-3 ¼ “ Diskette rechts [21]**

Das Auflager am oberen Ofenende bildet ein feuerfester Stein mit einer Bohrung, in der sich eine Zentrierhülse aus Stahl befindet, die das Einführen der Probe in den Ofen ermöglicht und die zentrische Positionierung im Ofenraum sicherstellt.

Am unteren Ofenende befindet sich ebenfalls ein feuerfester Zentrierstein. Dieser verhindert, dass die durch die Ofenöffnung entweichende Strahlungswärme das Abschreckbad an der Oberfläche erwärmt. Anstelle einer Zentrierhülse befinden sich an der Ober- und Unterseite des Steines kegelförmige Ausnehmungen, welche das Einführen des Prüfkörpers in die Zentrierbohrung erleichtern. Der untere Zentrierstein verhindert außerdem ein Auspendeln der Probe während des Abschreckprozesses und sorgt dafür, dass sich der Prüfkörper genau über der Düse im Abschreckbecken befindet.

Durch den Zufluss strömt das HMe mit einem Volumenstrom von 0.25 l/min. Die Einstellung des Volumenstromes erfolgt durch die Mengenregelung einer Pumpe (**Bild 3.3**), die das HMe von einem Ausgleichsbehälter zum Zufluss pumpt. Die Düse ist so beschaffen, dass direkt am Düsenaustritt eine Strömungsgeschwindigkeit von 0,2 m/s bei 30 °C Badtemperatur und die Durchflussmenge von 0.25 l/min gemessen werden kann. Dies gewährleistet eine laminare

Strömung im Abschreckbad und ist dem Anströmverhältnissen im Härtebad der Produktionsanlage nachempfunden.

Über den Abfluss gelangt das HMe in den Ausgleichsbehälter, von dem aus es wieder über den Zufluss ins Abschreckbad gepumpt wird (**Bild 3.4**).



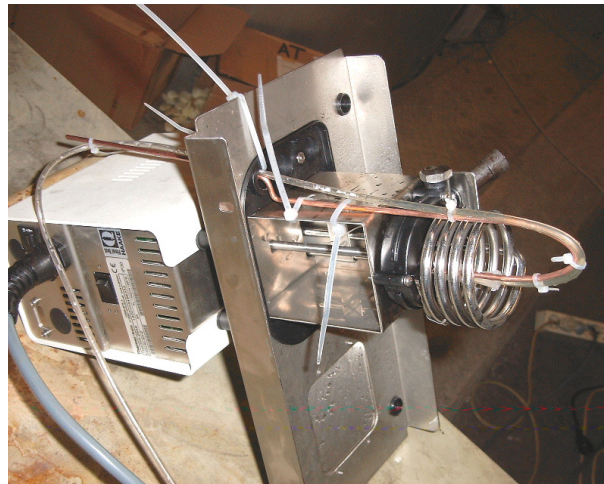
**Bild 3.4:** Abschreckanlage Quenchomat mit Ausgleichsbehälter und Thermostat

Im Ausgleichsbehälter wird das HMe von einem Thermostat auf einer konstanten Temperatur gehalten und über eine Umwälzpumpe homogenisiert.

Über die Ansaugöffnung dieser Umwälzpumpe ist es auch möglich Luft in das Abschreckbad einzudüsen, wobei der Propeller der Umwälzpumpe für eine Dispergierung der Luft im HMe sorgt (**Bild 3.6**). Für die Luftzufuhr steht eine 8 bar Pressluftleitung zur Verfügung. Durch ein Drosselventil wird eine Druckreduktion auf den gewünschten Druck erzeugt.



**Bild 3.5: Pumpe mit Mengenregelung**



**Bild 3.6: Luftzufuhr in die Ansaugöffnung**

Neben der Konstanthaltung von Badtemperatur, Konzentration und Luftzufuhr ist es auch wichtig, dass sich der Prüfkörper während der einzelnen Versuchsschritte immer an der selben Position befindet. Zu diesem Zweck ist die Probenstange auf einer Lafette aufgehängt, mit der man die drei Position, in denen sich die Probe während der Versuchsschritte befinden soll, exakt einstellen kann (**Bild 3.2**):

- **Position A:**

Die Probe befindet sich in der Ofenmitte und wird durch Aufwärmen und Halten austenitisiert.

- **Position B:**

Nach dem Aufheizen wird die Probe so positioniert, dass sie sich 1cm über der Oberfläche des Abschreckbades befindet und durch die Umgebungsluft auf die gewünschte Tauchtemperatur abgekühlt wird.

- **Position C:**

Die Probe wird mit Hilfe eines Auslösemechanismus, welcher manuell bedient wird, von Position B aus in das Abschreckbad bis zur Unterkante der Schraubverbindung (Prüfkörper – Probenstange) eingetaucht.

Die Eintauchgeschwindigkeit ist hierbei über die Fallhöhe des Prüfkörpers definiert,

wobei die Reibung vernachlässigt wird:  $v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$

Nach dem Eintauchen befindet sich die Probe im gleichen Abstand von der Düse wie in der Produktionsanlage der Schienenkopf.

Während der drei Schritte kann die Temperatur des Prüfkörpers mit dem Thermoelement aufgenommen werden.



### 3.1.3 2m-Versuchsanlage

#### 3.1.3.1 Ziel der Versuche auf der 2m-Anlage

Auf der 2m-Anlage können Schienenstücke unter praktisch realen Produktionsbedingungen gehärtet werden, weil der Abschreckversuch an Schienenproben durchgeführt wird.

Es ist möglich mit Thermoelementen die Abkühlcharakteristik des Härtemediums zu bestimmen und auch die Temperaturverläufe im Schienenstück, bzw. deren Auswirkung auf die Gefügeumwandlung und die daraus resultierende Verteilung der Härtewerte im Schienenquerschnitt zu untersuchen.

#### 3.1.3.2 Allgemeine Beschreibung der 2m- Anlage

Der Aufbau der 2m-Anlage gleicht im Prinzip dem der HSH<sup>®</sup>-Produktionsanlage, d.h. sie stellt ein 2 Meter langes differenzielles Stück der gesamten Produktionsanlage dar (**Bild 3.7**). Die Abmessungen des Querschnittes (**Bild 3.1**) und der Abstand der Anströmdüsen sind mit der HSH<sup>®</sup>-Anlage identisch.



**Bild 3.7: 2m-Versuchsanlage**

In der Versuchsanlage können ca. 400 l einer Polymerlösung umgewälzt werden, wobei die Umwälzleistung über zwei Drosselventile eingestellt werden kann. Diese Umwälzleistung wird mit einem Durchflussmengenmessgerät magnetinduktiv gemessen und bestimmt die jeweilige Austrittsgeschwindigkeit an den Düsen und somit die Anströmintensität.

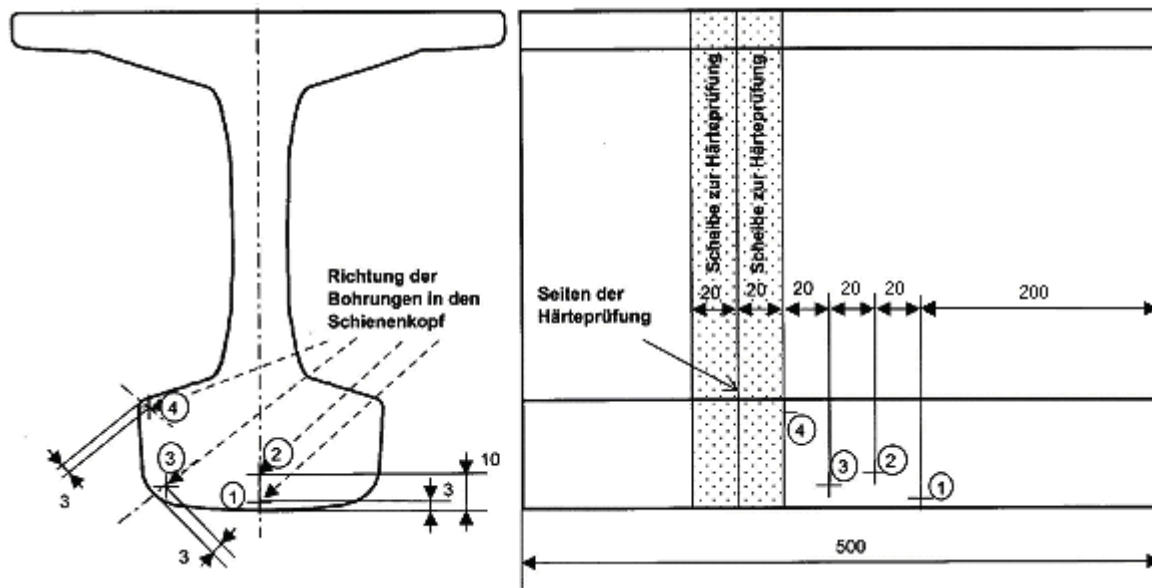
Das Abschreckbad kann auf eine definierte Badtemperatur aufgeheizt bzw. gekühlt werden. Zusätzlich kann die zum Bad zugegebene Menge an Luft variiert werden. Hierfür steht eine 8 bar Pressluftleitung zur Verfügung, wobei durch ein Drosselventil eine Druckreduktion auf den gewünschten Druck erzeugt werden kann.

Um die Schienenstücke härten zu können, müssen sie zuerst austenitisiert werden. Dies erfolgt in einem Kammerofen, indem sie innerhalb von 45 min auf 1000 °C erwärmt und dann 15 min bei dieser Temperatur gehalten werden. Danach werden die Schienenstücke aus dem Ofen genommen und an den Kranhaken befestigt. Mit dem Kran wird die Schiene in Tauchposition gebracht und bleibt dort bis sie durch die Umgebungsluft auf die gewünschte Tauchtemperatur abgekühlt wird (**Bild 3.7**). Nachdem diese Tauchtemperatur mit einem Pyrometer gemessen worden ist, wird die Versuchsschiene in das Abschreckbad eingetaucht und dort auf unter 500 °C abgekühlt (**Bild 3.10**).

Für die Härteversuche wurden Schienenstücke der Qualität SI 79120 (HSH<sup>®</sup>-Schiene) und SI500SC (DOBAIN<sup>®</sup>-Schiene) des Profiles UIC60E1 mit einer Länge von 500 mm verwendet.

Diese zwei Schienensorten können für die Versuche auf zwei verschiedene Arten präpariert werden.

Bei der ersten Art der Präparierung ist das Schienenstück mit vier in unterschiedlicher Tiefe angebrachten Thermoelementen bestückt. Dieses wird hauptsächlich für die Bestimmung von Abkühlkurven verwendet (**Bild 3.8** und **Bild 3.9**). Wenn man bei den Versuchen nur die Abkühlcharakteristik (Abkühlgeschwindigkeit und Ausbildung der drei Abschreckphasen) untersuchen möchte, können die Versuchsschienen mehrmals verwendet werden. Will man allerdings den Einfluss der Abschreckgeschwindigkeit auf die Gefügeumwandlung und die Gefügehärte untersuchen, darf man die Schienenstücke nur einmal verwenden, da das mehrmalige Erwärmen und Abkühlen der Schiene die Gefügeausbildung hinsichtlich Korngröße und Randentkohlungstiefe beeinflusst und die Ergebnisse dann mit den realen Produktionsbedingungen nur mehr bedingt vergleichbar sind.

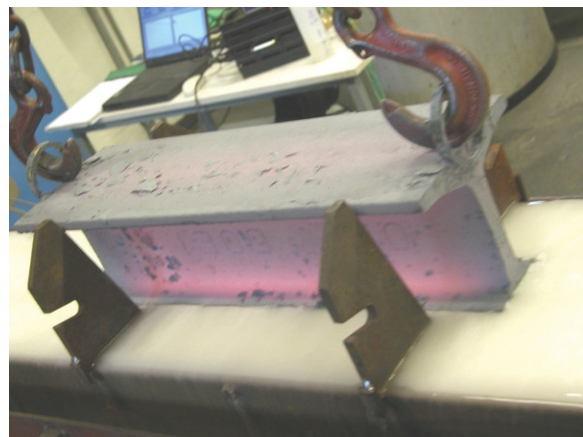


**Bild 3.8: Position der Thermoelemente im Schienenkopf**

Bei der zweiten Art der Präparierung werden an die Schienenstücke nur zwei ringförmige Halterungen für die Kranhaken angeschweißt, um sie ins Abschreckbad eintauchen zu können. Diese Versuchsschienen sind nur für den einmaligen Einsatz gedacht, um sie metallographisch zu untersuchen. Zu diesem Zweck wird eine 10 mm dicke Probenscheibe aus der Schiene herausgeschnitten, deren Querschnittsfläche in weiterer Folge auf Gefügeumwandlung und Härte geprüft wird.



**Bild 3.9: Schienenstück mit Thermoelementen**



**Bild 3.10: Versuchsschiene im Abschreckbad**

### 3.2 Charakterisierung der getesteten Härtemittel

Härtemittel	Hersteller	Art
Breox Quenchant HT	Inspec UK	PAG
Polymer AP	Petrofer	SPA
Feroquenich AP-2	Petrofer	SPA
Aquaquenich 631	Houghton-Durferrit	SPA
Aquaquenich EC/WE	Houghton-Durferrit	PVP

**Tabelle 3.2: Aufstellung der untersuchten Härtemittel**

#### 3.2.1 Breox Quenchant HT

Das HMi Breox Quenchant HT der Firma Inspec UK war das Erste in der HSH<sup>®</sup> - Anlage verwendete polymere Härtemittel. Dieses Polymer ist vom Typ der Polyalkylenglykole und bildet auch bei hohen Konzentrationen trotz Luftzufuhr keine stabile Dampfhaupphase aus. Daher wurde es auch durch Polymer AP ersetzt. Quenchant HT findet allerdings in der DOBAIN<sup>®</sup>-Anlage der VA Schienen GmbH Anwendung. In dieser 18 Meter langen Versuchsanlage werden DOBAIN-Schienen mit Hilfe einer Intervalltauchung gehärtet. Dabei kommt es durch eine quasi-isotherme Umwandlung zur Bildung von unterem Bainit. [17]

#### 3.2.2 Polymer AP

Das HMi Polymer AP war lange Zeit in der HSH<sup>®</sup> - Anlage in Verwendung. Der Hersteller ist die Firma Petrofer. Das Polymer AP ist von der Polymerart ein Natrium Polyacrylat. Das Mittel eignet sich insbesondere für Abkühlvorgänge, bei denen ganz gezielt kein Martensit entstehen soll.

Polymer AP-Lösungen werden im Konzentrationsbereich zw. 10 und 30 % empfohlen. Innerhalb dieser Grenzen verändert sich die Abschreckwirkung bei Schwankungen der Konzentration sowie der Badtemperatur nur sehr wenig. Im Konzentrationsbereich von 1 bis 10 % weist dieses Produkt jedoch eine deutliche Abhängigkeit der Abschreckwirkung von der

Badkonzentration auf. Die Konzentrationskontrolle kann für den Betrieb mittels Refraktometer erfolgen. Es wird jedoch empfohlen, regelmäßige Viskositätsmessungen durchzuführen (bei VAS täglich), da sich das Polymer im Laufe der Zeit verändert, wodurch die Refraktometer Methode falsche Messergebnisse bringen kann. [13]

Die Produktion dieses Härtemittels wurde eingestellt. Nachdem dieses HMi aber so lange in der Produktion erfolgreich im Einsatz war, wird auch bei dieser Arbeit seine Abschreckcharakteristik als Referenzwert für die Abschreckversuche herangezogen.

#### **3.2.3 Ferroquench AP-2**

Dieses Produkt ist eine Weiterentwicklung des Polymer AP der Firma Petrofer. Ferroquench AP-2 ist ebenfalls auf Basis der Natrium Polyacrylate aufgebaut und hat eine ähnliche Abschreckcharakteristik wie das HMi Polymer AP. [18]

#### **3.2.4 Aquaquench 631**

Aquaquench 631 wird von der Firma Houghton-Durferrit hergestellt. Das HMi ist ebenfalls auf Basis der Natrium Polyacrylate aufgebaut. [19]

Trotz seiner relativ guten Abschreckcharakteristik, könnte ein Einsatz in der Produktion problematisch sein, da es im ausgetrockneten Zustand feste krustenartige Rückstände bildet, die bei Reinigungs- und Wartungsarbeiten nur sehr schwer entfernt werden könnten.

#### **3.2.5 Aquaquench EC/WE**

Aquaquench EC/WE wird von der Firma Houghton-Durferrit hergestellt. Das HMi ist als einziges der getesteten HMi auf Basis der Polyvinylpyrolidone aufgebaut. Dieser Wirkstoff ist in reiner (wasserfreier) Form ein Feststoff, was auch durch die Versuche bestätigt wurde. Bei verschütten dieses HMi bleibt nach dem Verdunsten von Wasser ein weißer leichtlöslicher Feststoff übrig. Als minimale Konzentration wird ca. 5 % angegeben, wobei die Badtemperatur in einem Bereich zwischen 25 und 50 °C liegen sollte. [20]

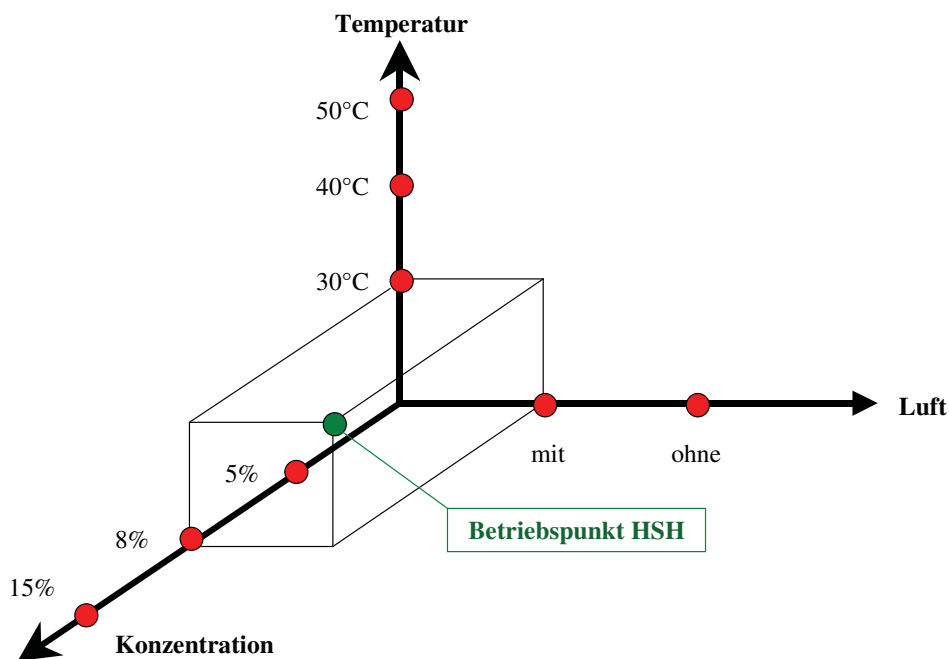
Die Versuche im Rahmen des Metallurgieprojektes 06/01 ergaben eine schlechte Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Die bei Houghton-Durferrit firmenintern durchgeführten Untersuchungen wiesen diese schlechte Reproduzierbarkeit nicht auf. Daher wurden im Rahmen dieser Arbeit die eigenen Messergebnisse mit denen des Metallurgieprojektes 06/01 und der Firma Houghton-Durferrit genau verglichen. Es stellte sich heraus, dass die Versuche erst ab einer Konzentration von 7 % gut reproduzierbar sind.

### 3.3 Versuchsablauf

Die Abschreckintensität von Härtemitteln kann mit Hilfe von Abkühlungskurven eines Prüfkörpers charakterisiert werden. Die Konzentration, die Temperatur und die eingebrachte Luft wurden innerhalb betriebsüblicher Grenzen variiert. Es besteht aber die Notwendigkeit, diese Parameter innerhalb enger Grenzen zu halten, um gleichmäßige Härtungsergebnisse zu gewährleisten.

#### 3.3.1 Versuche am Quenchomat

Durch die Variation der drei Einflussfaktoren Temperatur, Konzentration und Luft ergibt sich eine dreidimensionale Versuchsmatrix (**Bild 3.11**). Diese Versuchsmatrix stellt neben der Variation der Anströmgeschwindigkeit die Basis für die Voruntersuchung der Härtemittel am Quenchomat dar.



**Bild 3.11: 3D-Versuchsmatrix**

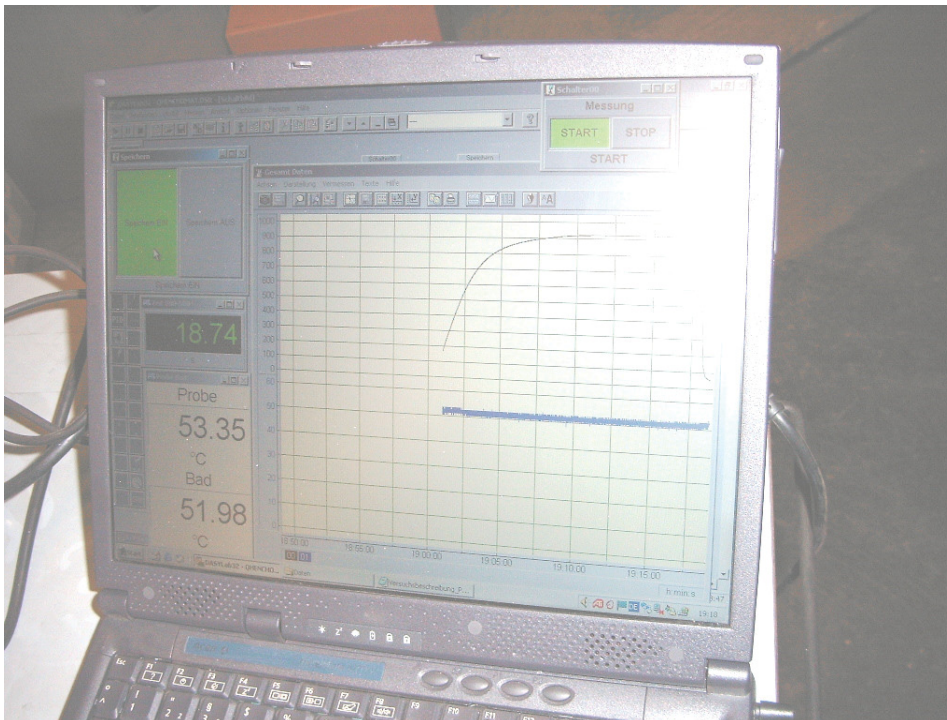
Um einen reproduzierbaren Abschreckversuch durchführen zu können müssen folgende Schritte genau eingehalten werden:

1. **Aufheizofen:** Als erster Schritt wird der Dreispulen-Rohrofen eingeschaltet und über den Temperaturregler auf eine Austenitisierungs-Temperatur von 920 °C eingestellt.

Das Aufheizen des Ofens dauert ca. zwei Stunden und währenddessen kann die Versuchsanlage zusammengebaut und die Abschrecklösung hergestellt werden.

2. **Probenkörper:** Als nächster Schritt wird der Positionierungsstein auf den Ofen, in die dafür vorgesehene Passform aufgesetzt. In die Bohrung des Steins wird die Probenführung eingesetzt. Das Thermoelement für die Probe wird durch den Probenstab geführt, in die Probe gesteckt und anschließend werden Probenkörper und Probenstab miteinander verschraubt. Das Thermoelement wird am Ende des Probenstabes durch den Gewindestift festgeschraubt. Das Probenelement wird nun von oben durch die Probenführung in den Aufheizofen geschoben. Im Anschluss wird der Prüfkörper in die Aufheizposition gebracht und die Probenstange in die Lafette eingehängt (**Bild 3.2**, Position A). Danach wird das Thermoelement an der Messzelle angeschlossen.
3. **Abschreckmittel:** Die Konzentrationsangaben des Abschreckmittels beziehen sich immer auf Massenprozent des eigentlichen Abschreckkonzentrates in der wässrigen Lösung. Die Versuchsanlage hat ein Fassungsvermögen von 16 Litern. Es sollte ein Volumen von 13,5 Litern Abschreckmedium nicht unterschritten werden, da es sonst zum Ansaugen von Luft durch die Umwälzpumpe kommt und somit der konstante Volumenstrom von 1,4 l/min nicht mehr gegeben ist.
4. **Versuchsanlage zusammenbauen:** Die Versuchsanlage lässt sich in sämtliche Einzelteile zerlegen und somit auch nach den Versuchen gut reinigen.
  - An die Umwälzpumpe wird, an der Förderöffnung mittels einer Schlauchklemme, ein Schlauch angeschlossen und dessen zweites Ende wird an die Einlaufdüse des Quenchomaten, an der Unterseite ebenfalls mit einer Schlauchklemme, angeschlossen.
  - An die beiden Rücklaufanschlüsse, am Überlauf des Quenchomaten, wird ebenfalls jeweils ein Schlauch, mittels Schlauchklemme, angeschlossen. Die offenen Enden dieser beiden Schläuche werden so positioniert, dass das rückfließende Abschreckmittel am Rand des Ausgleichsbehälters wieder in die Wanne fließt.
  - Die Luftzuführung von der Betriebsdruckleitung wird am Thermostaten mit einer Schraube fixiert und die Ausströmöffnung so positioniert, dass sie sich genau unter dem Propeller des Thermostaten befindet, um eine feine Verteilung der Luftbläschen im Abschreckmedium zu gewährleisten.

- Die Abschrecklösung wird nun in den Ausgleichsbehälter gefüllt.
  - Nach der Befüllung des Ausgleichsbehälters können nun die Umwälzpumpe und der Thermostat eingeschaltet werden.
  - Das zweite Thermoelement, welches die Temperatur im Abschreckbad misst, wird durch die Halterung im Abschreckbad, auf die halbe Tiefe des Abschreckbades, gesteckt. Das andere Ende dieses Thermoelementes wird ebenfalls an der Messzelle angeschlossen.
5. **Messzelle:** Anschließend kann die Messzelle eingeschaltet werden. Wichtig ist, dass zuerst die Messzelle und dann der Computer eingeschaltet wird, da sonst der Computer die Messzelle nicht „erkennt“.
6. **Computer:** Der Computer wird hochgefahren und anschließend wird das Programm: „DASYLAB“ gestartet (**Bild 3.12**). Nun wird auf dem Bedienungspult am Bildschirm des Computers die Taste: „Start“ gedrückt. Diese Taste ist nicht mit der Taste: „Versuch Start“ zu verwechseln! Ob das Programm läuft, erkennt man daran, dass erstens die „Probentemperatur“ und zweitens die „Badtemperatur“ angezeigt wird. Ist das nicht der Fall, wird das Programm geschlossen, der Computer heruntergefahren und neuerlich gestartet bis das Programm reagiert.



**Bild 3.12: Laptop mit Dasylab**



7. **Messungsvorbereitung:** Die Abschreckmessung kann durchgeführt werden wenn:
  - das Abschreckbad die gewünschte Temperatur erreicht hat,
  - der Ofen auf Betriebstemperatur ist
  - und die Probe mindestens zehn Minuten bei 900°C gehalten wurde.
8. **Messung:** Die eigentliche Messung wird wie folgt durchgeführt:
  - Das Aufzeichnungsprogramm wird am Bildschirm mittels Schaltknopf „Versuch Start“ aktiviert.
  - Anschließend werden feuerfeste Handschuhe angezogen, da die Probe eine Temperatur von über 900 °C hat und auch der Probenstab sehr heiß ist. Wegen der Spritzgefahr ist während des gesamten Versuches eine Schutzbrille zu tragen.
  - Der Probenstab wird nun durch den unteren Zentrierstein geführt und 1cm oberhalb der Badoberfläche in Position gebracht. Nachdem der Probenhalterung an der Halterungsschiene fixiert worden ist, kühlt der Prüfkörper in dieser Position bis auf die gewünschte Tauchtemperatur (jene Temperatur, bei der die Probenhalterung weggezogen wird und die Probe in das Abschreckbad fällt) ab.
  - Diese Arbeitsschritte müssen sehr rasch durchgeführt werden, da bei einer Proben temperatur von 810 °C die Probenhalterung nach hinten weggezogen wird.
  - Der Probenkörper taucht nun in das Abschreckbad ein und die Messung beginnt bei 800 °C Probenkörpertemperatur und endet bei 500 °C mit der Zeitaufnahme vollautomatisch. Die Messwerte werden weiter aufgezeichnet, bis zum Doppelklicken des Buttons „Versuch Ende“ am Bildschirm des Computers. Die Messung sollte erst unter 100 °C gestoppt werden. Sehr wichtig für die Reproduzierbarkeit der Messwerte ist eine konstante Tauchtemperatur, darum sollte stets bei der gleichen Temperatur das Wegziehen der Probenhalterung erfolgen.
  - Der Versuch wird durch betätigen des „Versuch Ende“-Buttons und des „Stop“-Buttons beendet. Die Messwerte werden automatisch in einem Dateiordner abgespeichert , der vor der Inbetriebnahme des Programms erstellt werden muss.
  - Als letzter Schritt wird nun die Probe aus dem Abschreckbad durch den unteren Zentrierstein nach oben gezogen und wieder in die Halterung für das Aufheizen gehängt.

### 3.3.2 Versuche auf der 2m-Anlage

Die Versuche auf der 2m-Anlage sollen die bei den Quenchomatversuchen gewonnen Erkenntnisse verifizieren und ihren Einfluss auf die Gefügeausbildung unter produktionsnahen Bedingungen untersuchen. Nachdem die Versuche an der 2m-Anlage wesentlich aufwendiger sind, ist es umso wichtiger Fehlversuche zu vermeiden und unter Einhaltung folgender Punkte die Reproduzierbarkeit der Versuche sicherzustellen:

#### 1. Probenkörper:

Die Probenkörper sind ursprünglich Schopfstücke von Schienen, die in der Produktion beim Zuschneiden auf die erwünschte Schienenlänge anfallen. Diese Schienenstücke sind bereits gehärtet und müssen deshalb in einem Kammerofen erneut austenitisiert werden. Zuvor werden die Schienenstücke auf 500 mm Länge zugeschnitten und wie in **Abschnitt 3.1.3.2** beschrieben präpariert. Hierbei ist besonders darauf zu achten, dass sich die Thermoelemente immer exakt an ihrer vorgesehenen Position befinden.

#### 2. Kammerofen:

Der Kammerofen in dem die Schienenstücke erwärmt werden, muss auf 1000 °C aufgeheizt werden. Nachdem dies mehrere Stunden in Anspruch nimmt, wird der Ofen schon in der Nacht vor dem Versuchstag in Betrieb genommen. Während des Aufheizvorganges befinden sich bereits Stahlkörper im Ofen, die später zum Erwärmen des Abschreckbades verwendet werden.

#### 3. Abschreckmittel:

- Ansetzen des Abschreckmittels:

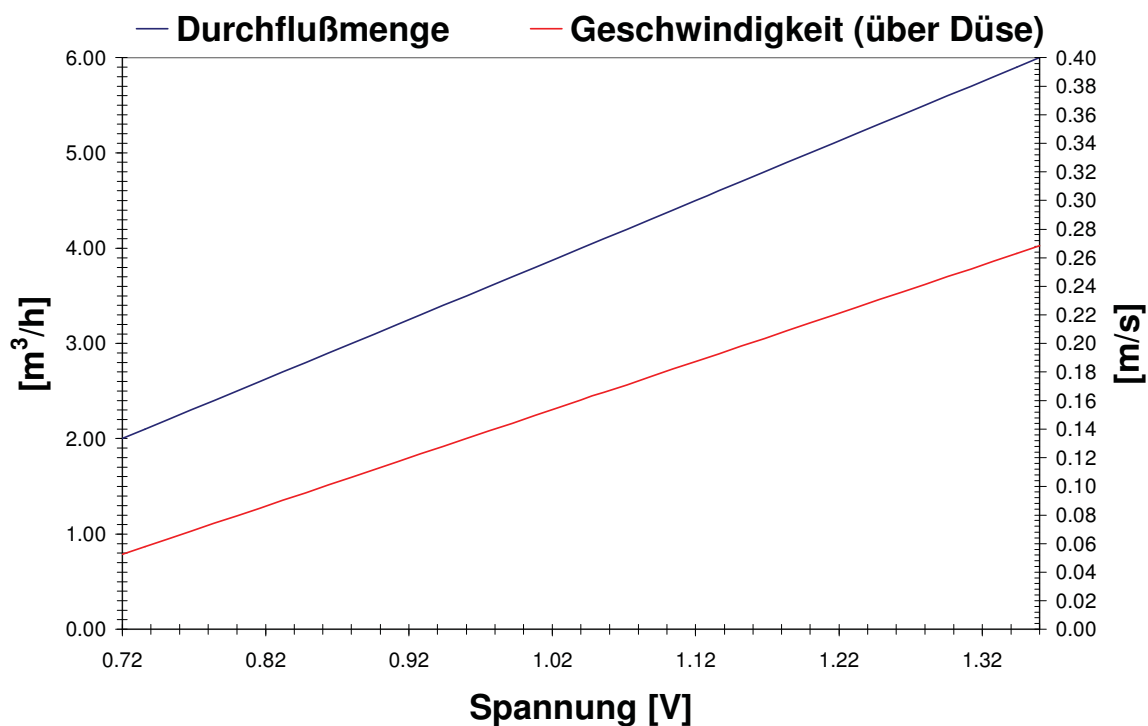
Die 2m-Anlage hat insgesamt ein Fassungsvermögen von ca. 400 l. Wobei sich die eine Hälfte des Abschreckmittels in der eigentlichen Abschreckeinrichtung (Abschreckbad, Überlauf und Düsenrohr) befindet und die andere Hälfte in dem offenen Ausgleichstank darunter (**Bild 3.1** und **Bild 3.7**). Nachdem der Ausgleichstank nicht das gesamte Volumen des Abschreckmittels von 400 l aufnehmen kann, ist es notwendig die Befüllung bei laufender Umwälzpumpe durchzuführen, um ein Überlaufen des Ausgleichstanks zu verhindern. Die Anlage wird zuerst mit der gewünschten Menge Wasser befüllt, danach wird die erforderliche Menge an Härtemittel beigegeben. Das Stoffmengenverhältnis wird in Massenprozent ermittelt und die Konzentration sowohl refraktometrisch als auch

viskosimetrisch gemessen. Um die Homogenisierung des Härtemediums sicherzustellen, wird beim Neuansatz das Abschreckbad ca. eine Stunde von der Pumpe umgewälzt. Beim Abstellen der Umwälzpumpe ist es wichtig das Zuflussventil, die zwei Drosselventile und das Abflussventil der Abschreckanlage (**Bild 3.7**) zu schließen bevor die Pumpe abgeschaltet wird, um ein Überlaufen des Ausgleichtanks zu verhindern.

Nachdem das Ansetzen des Abschreckbades ebenfalls viel Zeit in Anspruch nimmt, wird es ebenfalls am Vortag des Versuches durchgeführt.

- Ermittlung der Anströmgeschwindigkeit:

Die Durchflussmenge wird mit einem Durchflussmengenmessgerät magnetinduktiv gemessen. Die digitale Anzeige gibt einen Spannungswert in Volt an, der einer bestimmten Durchflussmenge in  $\text{m}^3/\text{h}$  entspricht. Um einen entsprechenden Wert für die Anströmgeschwindigkeit in  $\text{m/s}$  zu erhalten, wurde bei verschiedenen Einstellungen der Drosselventile mit einem Strömungsmessgerät die Austrittsgeschwindigkeiten direkt über den Düsen gemessen. Die erhaltenen Werte wurden in einem Diagramm gegenübergestellt (**Bild 3.13**). Mit diesem Diagramm kann man jedem Spannungswert eine bestimmte Durchflussmenge bzw. Anströmgeschwindigkeit zuordnen.



**Bild 3.13: Diagramm Spannung- Durchflussmenge-Anströmgeschwindigkeit**

#### **4. Inbetriebnahme der 2m-Anlage:**

Bei der Inbetriebnahme der Anlage ist besonders darauf zu achten, das zuerst die Umwälzpumpe eingeschaltet wird und erst dann das Zuflussventil, die beiden Drosselventile und das Abflussventil geöffnet wird. Die Ventile werden ganz geöffnet damit sich das Abschreckbad bei maximaler Durchflussmenge möglichst schnell homogenisiert.

Nun werden aus dem aufgeheizten Kammerofen mit einer Zange heiße Stahlkörper entnommen und in das Abschreckbad gelegt. Der Ofen darf dabei nur kurz geöffnet werden, um einen Temperaturverlust zu vermeiden. Mit diesen Stahlkörpern wird das Abschreckbad auf die gewünschte Badtemperatur erwärmt.

Während dieses Vorganges kann bereits ein Schienenstück von einem kleinen Übergabewagen in den Ofen eingesetzt werden.

#### **5. Erwärmen und Halten der Schienenstücke im Kammerofen:**

Bei diesem Vorgang ist darauf zu achten, das immer nur ein Schienenstück im Ofen erwärmt wird und der Ofen während dessen auf keinen Fall geöffnet wird. Bei Testversuchen, die beim Einfahren der Anlage durchgeführt wurden, wurden immer zwei Schienenstücke gleichzeitig erwärmt und dann hintereinander im Abschreckbad gehärtet. Die Testversuche ergaben, das immer nur das Schienenstück, das als erstes aus dem Ofen entnommen und gehärtet wurde, brauchbare Messergebnisse lieferte. Beim zweiten Schienenstück begann während des Abschreckvorganges der Dampf Film an jener Schienenkante abzureißen, die im Ofen zur Ofentüre zeigte. Der Abriss des Dampf Films setzte sich von dieser Position aus schrittweise über die ganze Schiene fort. Ursache hierfür ist wahrscheinlich, dass sich die zweite Schiene beim Entnehmen der ersten Schiene aus dem Ofen an der Vorderkante abkühlt und die Zeit die sie bis zu ihrer Abschreckung im Tauchbad im Ofen verweilt, nicht ausreicht die Schiene homogen zu durchwärmen. Abgesehen davon, ergaben sich bei der zweiten Schiene immer sehr hohe Randentkohlungstiefen, die ebenfalls auf die für eine Zeit lang offenstehende Ofentüre zurückzuführen sind.

Die Schienenstücke werden immer innerhalb von 45 Minuten auf 1000 °C erwärmt und für 15 Minuten auf dieser Temperatur gehalten. Ein Unterschreiten dieser Zeitvorgabe würde bewirken, dass das Schienenstück nicht vollständig austenitisiert wird. Bei einem Überschreiten dieser Zeitvorgabe, würde es zu einer Kornvergrößerung kommen, die beim Abschrecken schlechte Härtewerte liefert.

#### 6. Messvorbereitungen

Während das Schienenstück im Ofen erwärmt wird, können folgende Messvorbereitungen getroffen werden:

- Sofern das Schienenstück mit Thermoelementen bestückt ist, werden diese an die mit dem Computer verbundene Messeinheit angeschlossen. Danach wird der Computer hochgefahren und das Programm „DASYLAB“ gestartet. Der gesamte Aufwärmvorgang kann am Computer mitverfolgt werden, indem man den Button „Start“ aktiviert.
- Das Pyrometer (**Bild 3.7**), welches die Oberflächentemperatur der Schiene misst, wird ebenfalls in Stellung gebracht und justiert.
- Die Temperatur des Abschreckbades wird laufend mit einem Thermometer kontrolliert und kann im Bedarfsfall mit einem Tauchsieder erhöht oder mit einer Wasserkühlung gesenkt werden.
- Wenn ein Versuch mit Luftzufuhr durchgeführt wird, sollte die Luftzufuhr bereits mindestens 15 min. vor dem Versuch aktiviert werden, um sicher zustellen, dass sich die Luft im Härtemedium gleichmäßig verteilt.
- Die Anströmgeschwindigkeit kann ebenfalls schon zu diesem Zeitpunkt eingestellt werden.

#### 7. Messung

Die Messung selbst läuft folgendermaßen ab:

Zuerst werden der Übergabewagen und Kran in Position gebracht.

Danach wird von einer Person die Ofentür geöffnet, während eine andere Person das Schienenstück mit einer Zange aus dem Ofen auf den Übergabewagen zieht. Die Ofentüre wird sofort wieder geschlossen.

Nun werden die zwei Kranhaken in die Halterungen am Schienenstück vom Hänger eingehängt und die Schiene leicht angehoben.

Während der Kranführer das Schienenstück über das Härtebad manövriert, wird es vom Hänger durch eine Zange festgehalten und auf die Tauchposition ausgerichtet. Bei diesem Vorgang muss man besonders darauf achten, dass die Thermoelemente nicht verrutschen oder gar beschädigt werden.

Zur selben Zeit aktiviert eine dritte Person am Computer die Speicherung der Messwerte, begibt sich dann zum Pyrometer und richtet es exakt auf einem Messpunkt in der Schienenmitte aus.

Nachdem sich das Schienenstück genau über den Schablonen im Härtebecken frei hängt, begibt sich der Hänger zum Computer und kontrolliert die Aufzeichnung der Messwerte am Bildschirm.

Die Person am Pyrometer misst laufend die Oberflächentemperatur der Schiene, bis 780 °C erreicht sind. Nun gibt er an den Kranführer das Kommando „Achtung – Tauchen“, und schaltet sobald der Kranführer die Schiene ins Abschreckbad abgesetzt hat eine Stoppuhr ein. Nach 160 s zieht der Kranführer das Schienenstück auf das Kommando „Achtung – Ziehen“ wieder aus dem Abschreckbad. Die Person am Pyrometer misst nun Rückwärme Temperatur der Schiene.

Nachdem die Rückwärmtemperatur ermittelt worden ist, wird auch die Speicherung der Temperatur-Messwerte beendet.

Die abgekühlte Schiene muss nun für die metallographische Untersuchung mit einer Versuchsnummer gekennzeichnet werden.

Danach wird wieder ein neues Schienenstück in den Ofen eingesetzt und die Anlage für den nächsten Versuch vorbereitet.

## 4 Ergebnisse

### 4.1 Auswertung und Reproduzierbarkeit

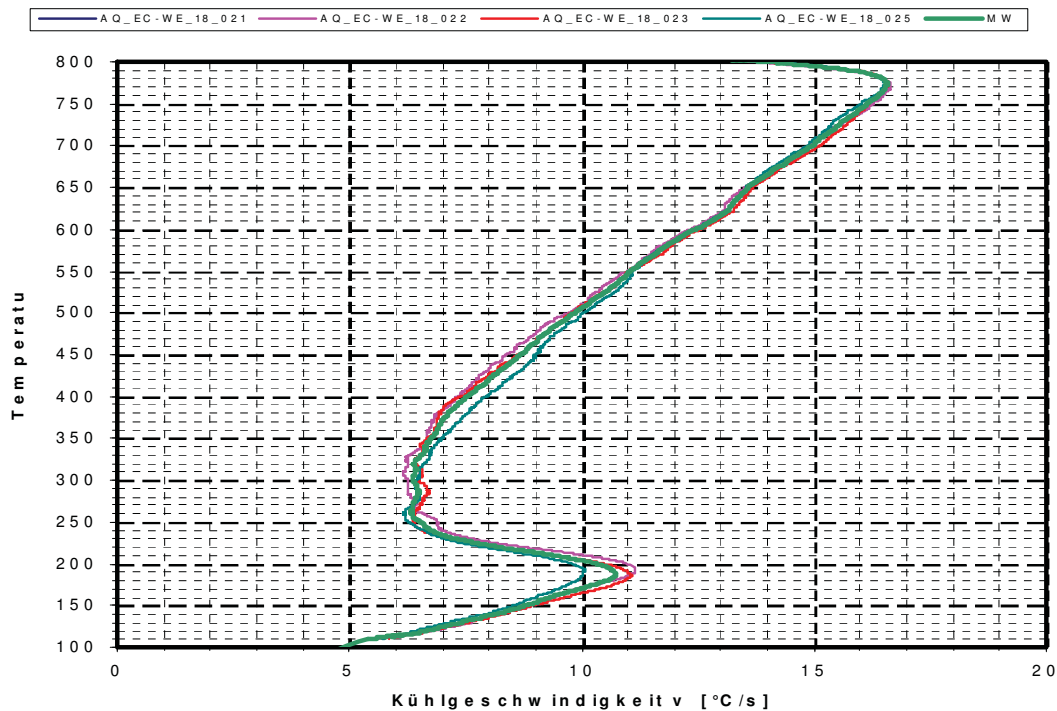
Um die Ergebnisse der Versuche als reproduzierbar bezeichnen zu können, müssen folgende vier Beurteilungskriterien übereinstimmen:

- Prozessparameter
- Abkühlkurven
- Gefüge
- Härte

#### 4.1.1 Quenchomat

Der Quenchomat zeichnet sich dadurch aus, dass er im Prinzip von jeder Person nach einer kurzen Einweisung bedient werden kann. Unter genauer Einhaltung der Versuchsvorgaben sind die Ergebnisse sehr gut reproduzierbar.

**Bild 4.1** und **Bild 4.2** zeigt die gute Reproduzierbarkeit einer Versuchsreihe. Die Standardabweichungen zum Mittelwert sind in **Tabelle 4.1** angeführt.



**Bild 4.1: Reproduzierbarkeit Temperatur-Kühlgeschwindigkeit**

Temperatur- Kühlgeschwindigkeit	Temperatur - Zeit
$\sigma_{\max} = 2,3 \text{ °C/s}$ für die Kühlgeschwindigkeit	$\sigma_{\max} = 0,14 \text{ s}$ für die Zeit
$\sigma_{\max} = 0,50 \text{ °C}$ für die Temperatur	$\sigma_{\max} = 0,44 \text{ °C}$ für die Temperatur

Tabelle 4.1: Standardabweichungen

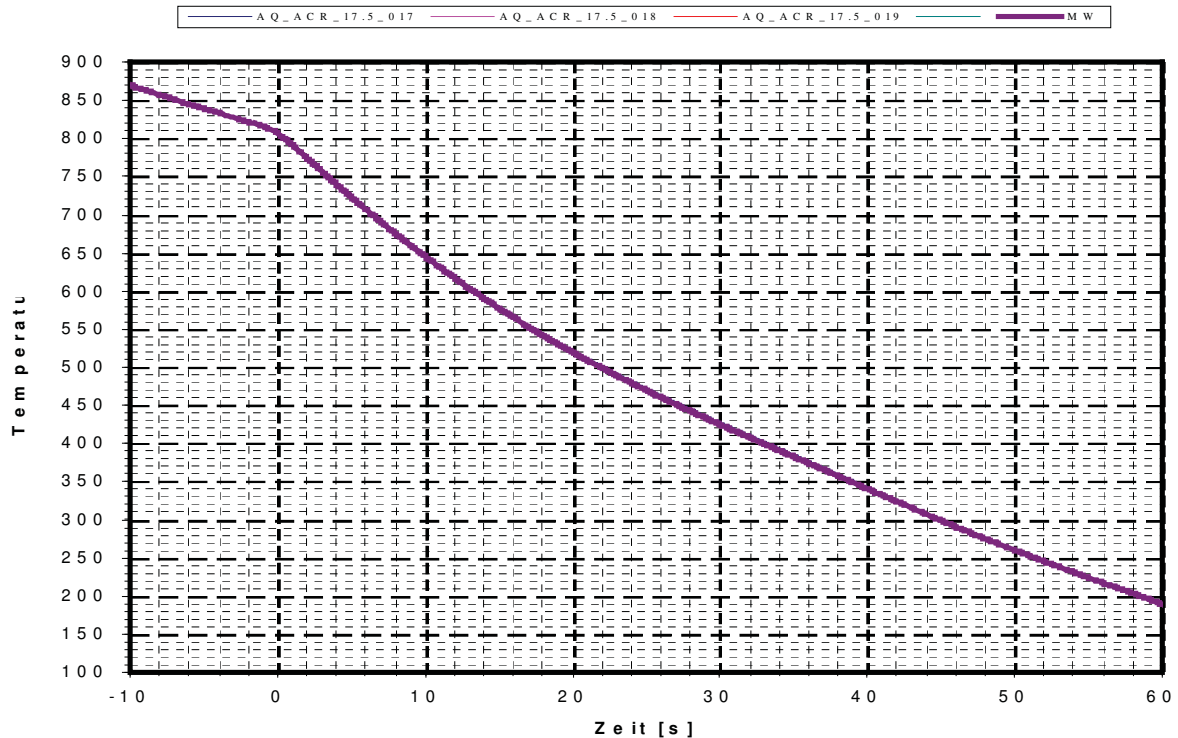


Bild 4.2: Reproduzierbarkeit Temperatur-Zeit

#### 4.1.2 2m-Anlage

Anders als beim Quenchomaten, ist bei der 2m-Anlage eine gut eingespielte und mit der Anlage gut vertraute Bedienmannschaft von 3 Personen notwendig um eine gute Reproduzierbarkeit der einzelnen Versuchsergebnisse sicherzustellen.

Um die Anlage einzufahren und ihre Leistungsfähigkeit zu testen, wurden vorerst 21 Versuche mit dem Härtemittel Aquaquench EC/WE durchgeführt.

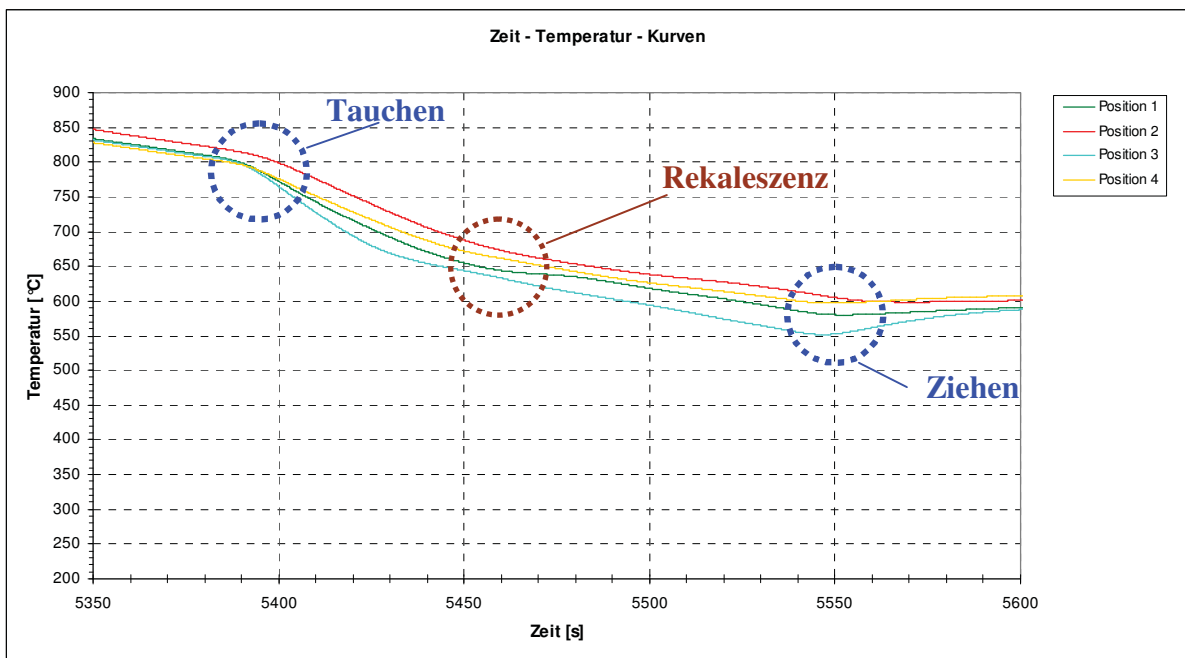
Die Vorgangsweise bei der Auswertung wird am Beispiel des Versuches ECWE Nr.052 nachstehend beschrieben.

##### 1. Erstellen der Zeit-Temperatur-Kurven:



Die Temperatur wird mit einer Frequenz von 100 Hertz gemessen. Dadurch erhält man je nach Aufzeichnungsdauer 30000 bis 60000 Temperaturmesswerte pro Thermoelement. Diese Messdaten werden in eine Excel-Tabelle importiert. Um ein anschauliches Zeit-Temperatur-Diagramm erstellen zu können, müssen die Abkühlkurven zuerst geglättet werden. Dies erfolgt indem man den gleitenden Mittelwert über 1000 Messwerte bildet.

In **Bild 4.3** sind geglättete Zeit-Temperatur-Kurven in einem Excel-Diagramm dargestellt. Man erkennt an den Kurven deutlich jene Bereiche, in denen das Schienenstück in das Abschreckbad eingetaucht bzw. aus dem Bad herausgezogen wurde.



Versuch ECWE	Datum	Anströmung [m/s]	Konzentration		Luft [m³/h]	Badtemperatur Thermometer [°C]	Tauchtemperatur Pyrometer [°C]	Tauchzeit [s]	Rückwärme Pyrometer [°C]
			refraktometrisch [%]	viskosimetrisch [%]					
Nr.: 052	19.11.2002	0.12	8.40	-	0.24	30	770	150	530

**Bild 4.3: Zeit-Temperatur-Kurven des Versuches ECWE Nr.052**

## 2. Erstellen der Abkühlrate-Temperatur-Kurven:

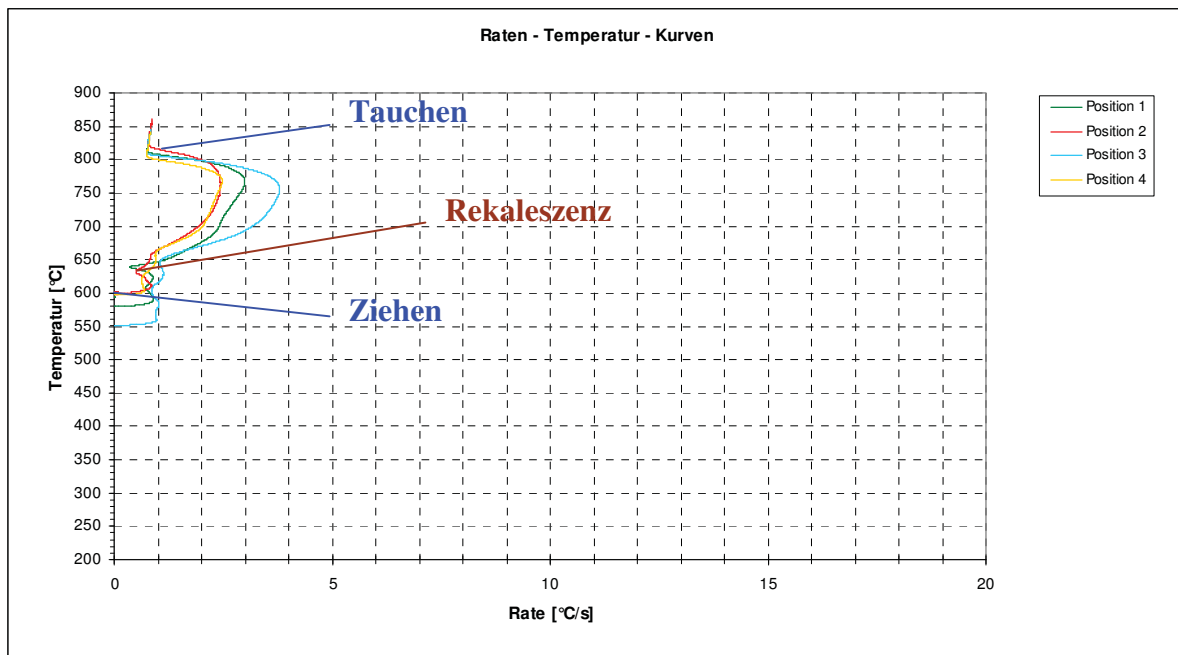
Aus den gemittelten Werten wird nun die Abkühlgeschwindigkeit errechnet und ebenfalls in einem Diagramm dargestellt (**Bild 4.4**).

Mit diesem Diagramm kann der Tauchzeitpunkt genau bestimmt werden. Im **Bild 4.4** kann man bei der Kurve der Messposition 4 bei 800 °C einen deutlichen Knick erkennen. Oberhalb der 800 °C kühlt die Schiene an Luft ab und unterhalb dieser Temperatur im Abschreckbad.

Jener Zeitpunkt an dem die Schiene aus dem Abschreckbad herausgezogen wird, ist ebenfalls gut zu erkennen. Die Abkühlgeschwindigkeit nimmt ab diesen Zeitpunkt stark ab, bis sie den Wert Null erreicht und steigt dann wieder durch die Rückwärme. Dies passiert hier im **Bild 4.4** bei Position 4 bei 600 °C.

Der Zeitpunkt an dem die Gefügeumwandlung eintritt ist ebenfalls gut zu sehen. Die Rekaleszenz (Umwandlungswärme) bewirkt in der Raten-Temperaturkurve nämlich einen deutlichen Ausschlag nach links (z.B. **Bild 4.4; Position 1**).

Nachdem die Schiene bei einer Temperatur vom 500 - 550 °C aus dem Tauchbad herausgezogen wird, können von den drei Abkühlphasen Dampfphase, Kochphase und Konvektionsphase nur die ersten zwei Phasen im Diagramm untersucht werden, wobei man beachten muss das die Rekaleszenz den Übergang zwischen Dampfphase und Kochphase stark beeinflusst.



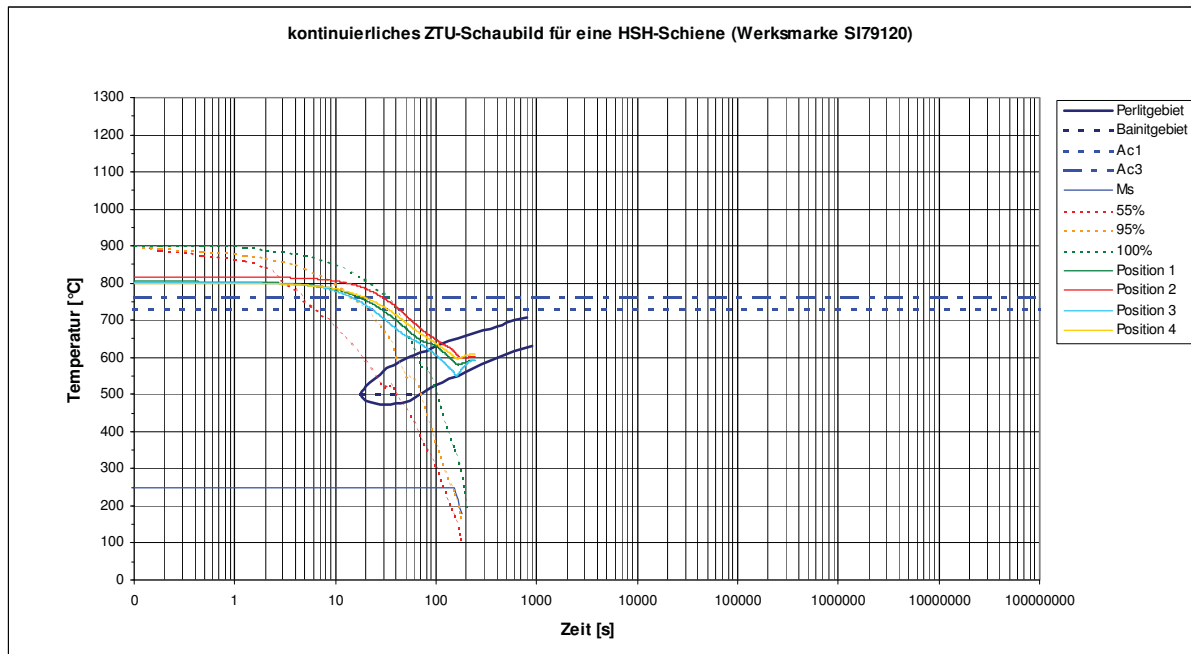
Versuch	Datum	Anströmung	Konzentration		Luft	Badtemperatur	Tauchtemperatur	Tauchzeit	Rückwärme
ECWE		[m/s]	refraktometrisch	viskosimetrisch		Thermometer	Pyrometer	[s]	Pyrometer
Nr.:			[%]	[%]	[m <sup>3</sup> /h]	[°C]	[°C]		[°C]
052	19.11.2002	0.12	8.40	-	0.24	30	770	150	530

**Bild 4.4:** Raten-Temperatur-Kurven des Versuches ECWE Nr.052

### 3. Gegenüberstellung und Vergleich der Zeit-Temperatur-Kurven mit dem ZTU-Diagramm:

Nachdem nun der exakte Tauchzeitpunkt bekannt ist, kann man die Abkühlkurven in ein ZTU-Schaubild einer HSH<sup>®</sup>-Schiene (Werksmarke SI79120) legen.

Beim Vergleich der Kurven stellt man aber fest, dass der Zeitpunkt der Rekaleszenz erwartungsgemäß sehr knapp beim Anfang des Perlitgebietes im ZTU-Schaubild liegt. Dadurch lässt sich aus dem in **Bild 4.5** dargestellten Diagramm bereits sehr gut abschätzen, welches Gefüge zu erwarten ist.



Versuch	Datum	Anströmung	Konzentration		Luft	Badtemperatur	Tauchtemperatur	Tauchzeit	Rückwärme
			refraktometrisch	viskosimetrisch					
ECWE						Thermometer	Pyrometer		Pyrometer
Nr.: 052	19.11.2002	[m/s] 0.12	[%] 8.40	[%] -	[m³/h] 0.24	[°C] 30	[°C] 770	[s] 150	[°C] 530

**Bild 4.5:** Zeit-Temperatur-Kurve des Versuches ECWE Nr.052 im ZTU-Schaubild für eine HSH-Schiene

#### 4. Beurteilung des Gefüges:

Die genaue Untersuchung des Gefüges erfolgt unter dem Lichtmikroskop.

In **Bild 4.6** erkennt man das reinperlitisches Gefüge im Schienenquerschnitt bei einer 400-fachen Vergrößerung.

Am Rand des Schienenkopfes in der Randentkohlungszone, die laut EN 13674 nicht größer als 0,5 mm sein darf, bildet sich Widmannstätten Ferrit. Dieser ist in **Bild 4.7** dargestellt.



Bild 4.6: Schliffprobe Nr.052 ( 400-fach )

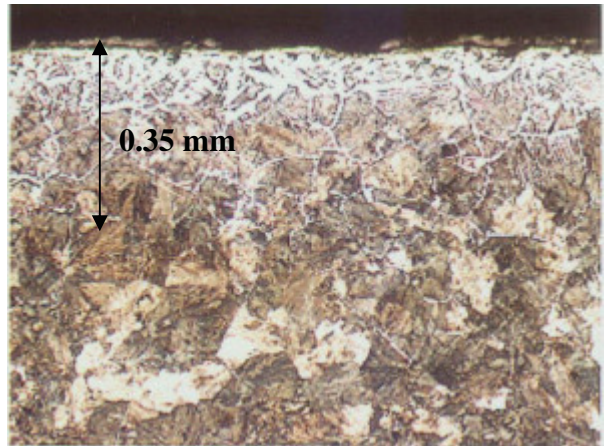


Bild 4.7: Schliffprobe Nr.052 ( 100-fach )

5. **Ermittlung der Härtewerte:**

Die Härtewerte werden an sechs Prüfpunkten nach Brinell ermittelt (**Bild 4.8**). Obwohl die Abkühlkurven auf einen einwandfreien Versuch hindeuten und bei der Schiene mit freiem Auge (**Bild 4.9**) nichts Gegenteiliges festzustellen ist, geht aus dem Gefügebildern (**Bild 4.6 und Bild 4.7**) und den gemessenen Härtewerten (**Tabelle 4.2**) hervor, dass die Schiene beim Erwärmen leicht überhitzt wurde. Die Härtewerte liegen nämlich 20 HB unter dem erwünschten Ergebnis (Zielwert: 365 HB an den Messpositionen 1-3).

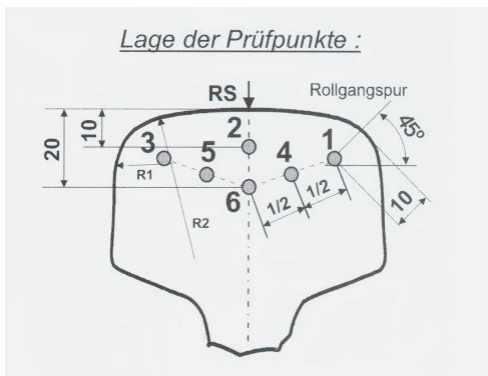


Bild 4.8: Lage der Prüfpunkte



Bild 4.9: Schliffprobe Nr.052 ( 1-fach )

ECWE Nr.052	Lage der Prüfpunkte					
	1	2	3	4	5	6
Härte in HB	339	349	357	344	348	336

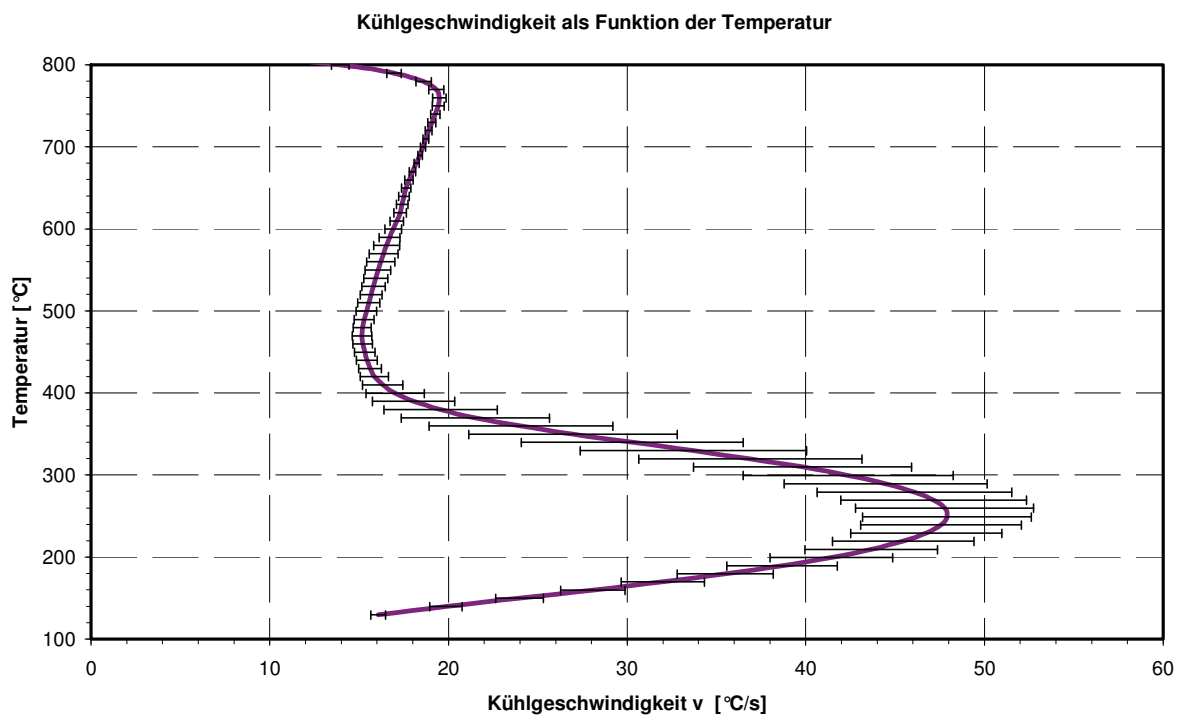
Tabelle 4.2: Härtewerte der Schliffprobe Nr.052

## 4.2 Einflussfaktoren auf das Abkühlverhalten und die Gefügeausbildung

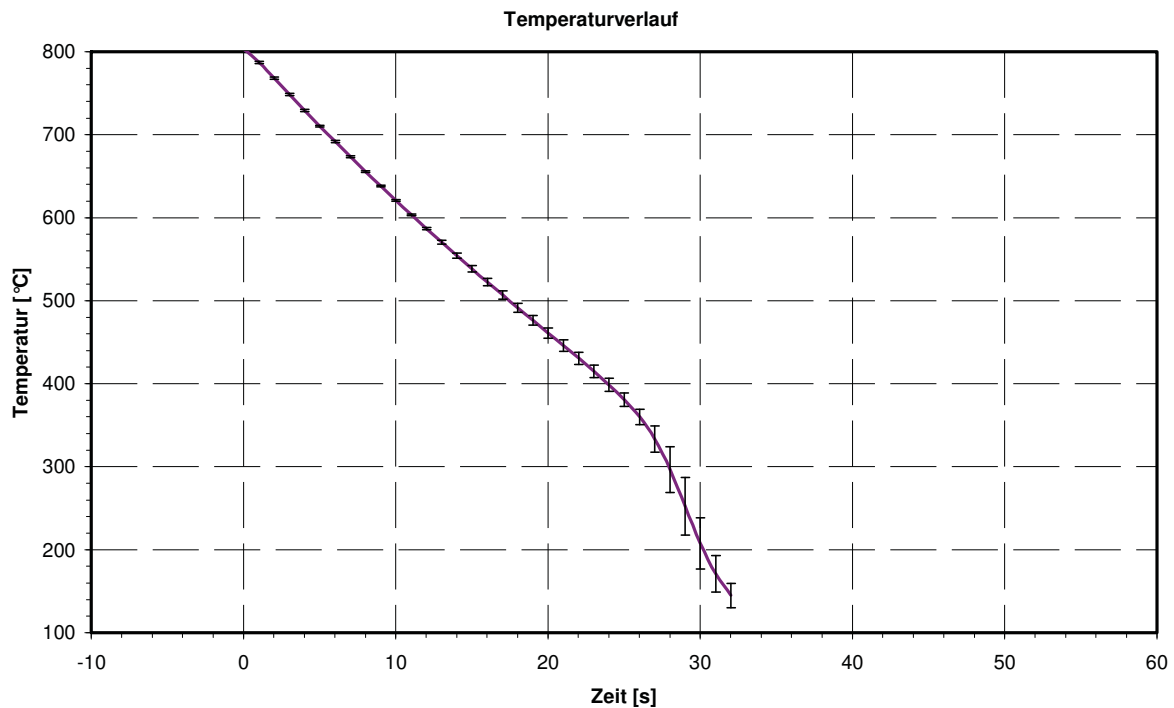
### 4.2.1 Quenchomat

#### 4.2.1.1 Referenzkurven

Diese Kurven wurden mit mehreren Proben des derzeitigen HMe aus der Schienenhärteanlage über einen längeren Zeitraum aufgenommen (**Bild 4.10** und **Bild 4.11**). Ziel ist es, im Temperaturbereich von 500 °C bis 800 °C eine Erhöhung der Abkühlrate, welche zu einer Härtesteigerung führen würde, zu erreichen. Weiters sind in den Bildern die Standardabweichungen (schwarze Begrenzungsstriche) eingetragen.



**Bild 4.10: Referenzkurve im Temperatur-Abkühlraten-Diagramm**



**Bild 4.11: Referenzkurve im Temperatur-Zeit-Diagramm**

### 4.2.1.2 Auswertung und Vergleich der Abkühlkurven

- **Polymer AP**

Dieses Mittel gehört zur Familie der SPA's. Es wurde lange Zeit in der Anlage benützt. Wenn man nun die drei Einflussfaktoren Temperatur, Konzentration und Luft variiert, kommt man zu folgenden Schlüssen.

- Wird die Temperatur erhöht, verringert sich die Abkühlrate (**Bild 4.12**).
- Erhöht man die Konzentration, verschiebt sich der Übergang in die Kochphase zu niedrigen Temperaturen (**Bild 4.12**).
- Vergleicht man nun die Fahrweise mit Luft und ohne Luft, so kommt man zum Schluss, dass Luft ein milderes Abschreckverhalten bewirkt (**Bild 4.13**).
- Erhöht man die Anströmgeschwindigkeit, erhöht sich die Abkühlrate und der Übergang in die Kochphase verschiebt sich zu höheren Temperaturen (**Bild 4.14**).

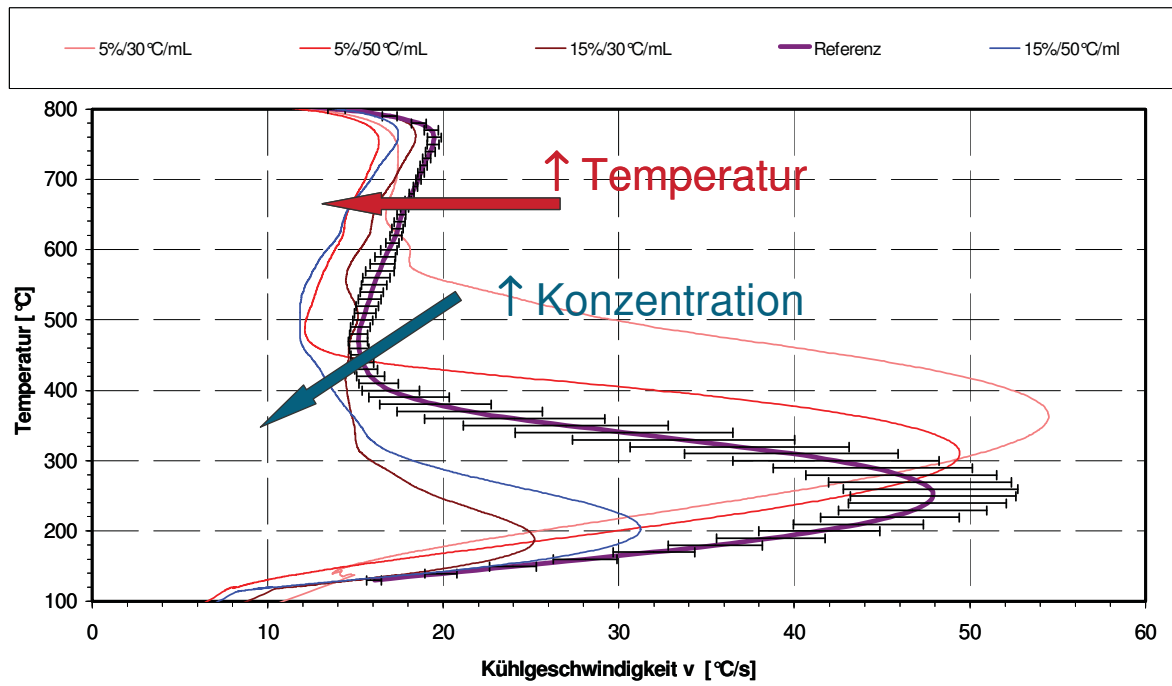


Bild 4.12: Polymer AP – Temperatur- und Konzentrationseinfluss

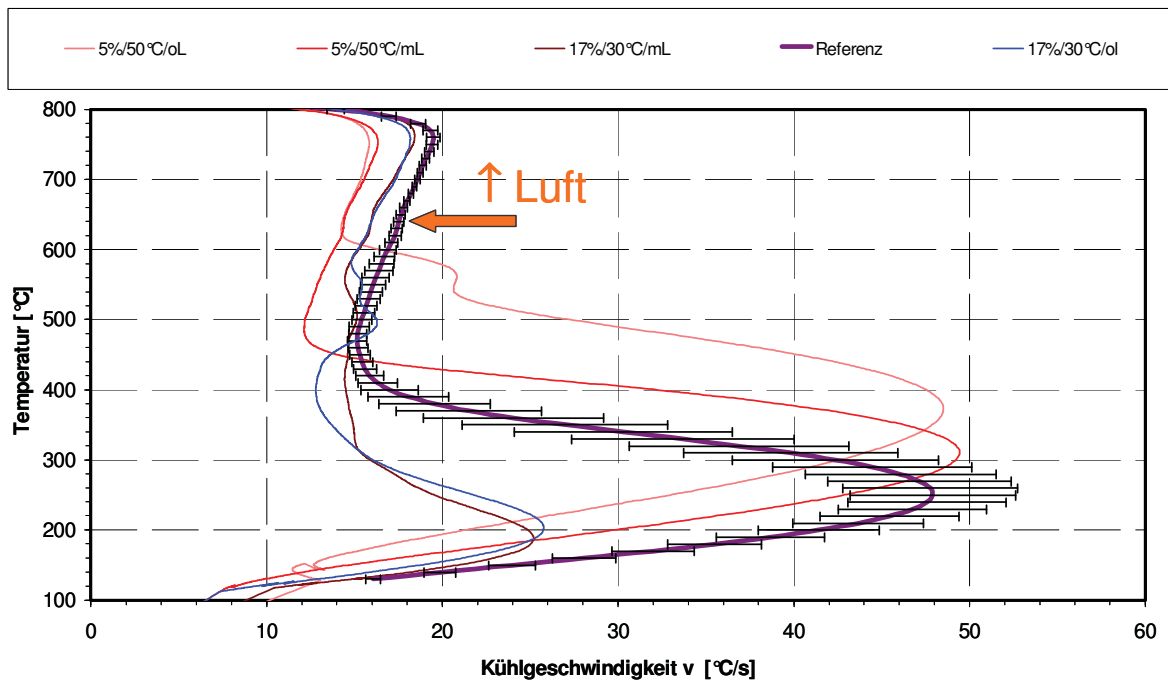
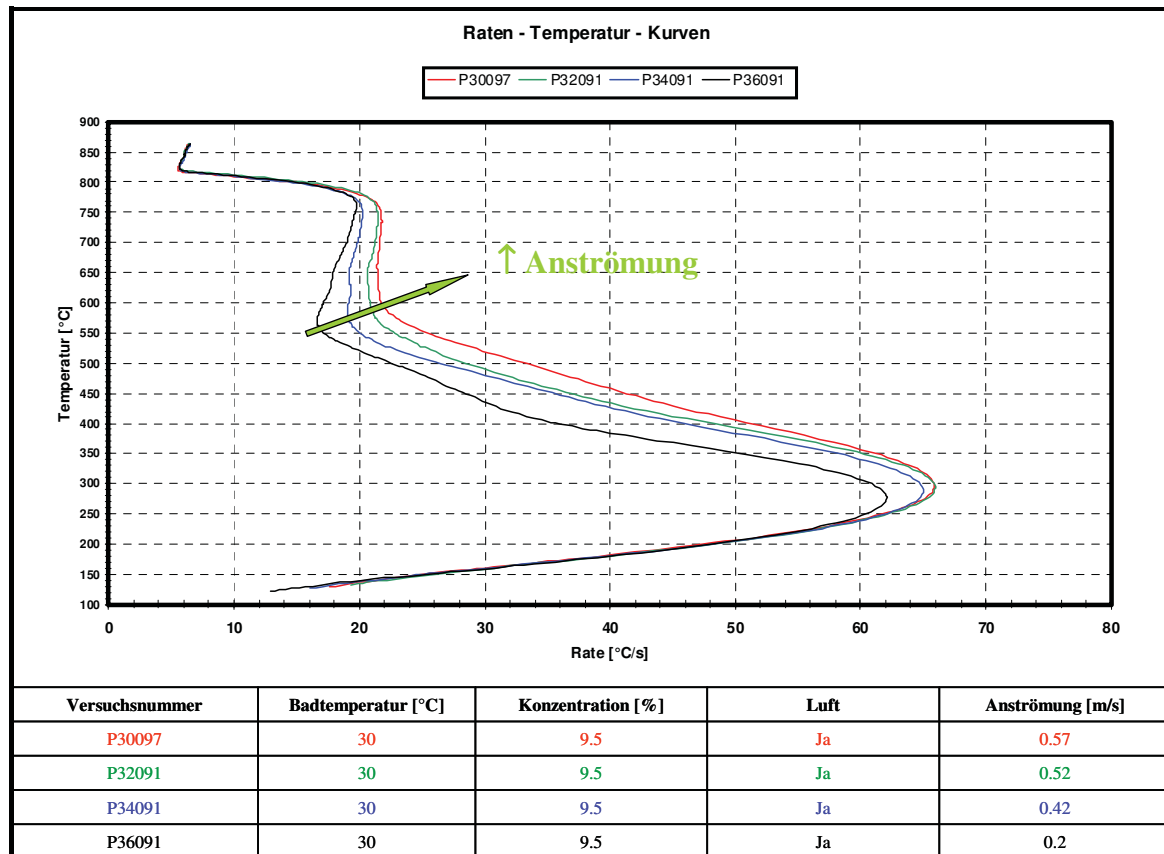


Bild 4.13: Polymer AP - Lufteinfluss



**Bild 4.14: Polymer AP - Einfluss der Anströmgeschwindigkeit**

- **Breox Quenchant HT**

Man kann erkennen, dass die Abkühlcharakteristik sehr unterschiedlich zu den anderen Mitteln ist, denn dieses Mittel weist erst bei sehr hohen Konzentrationen Ansätze einer Dampfhaupphase auf. Das Abschreckmittel Breox Quenchant HT verhält sich bei den Abschreckversuchen folgendermaßen.

- Wird die Temperatur erhöht, verringert sich die Abkühlrate (**Bild 4.15**).
- Erhöht man die Konzentration, verringert sich ebenfalls die Abkühlrate, wobei erst ab einer Konzentration von 30 % und unter Einwirkung von Luft leichte Ansätze einer Dampffilmphase zu erkennen sind (**Bild 4.16**).
- Eine gute Lufteinbringung war bei diesem Mittel erst ab einer Konzentration von 20 % möglich. Die Luftzufuhr bewirkt unter 20 % eine Erhöhung der Abkühlrate. Ab 20 % verringert sich die Abkühlrate. Dies deutet darauf hin das die Luft im Härtemittel immer gut gelöst sein muss, um die Bildung einer stabilen Dampffilmphase zu begünstigen (**Bild 4.15** und **Bild 4.16**).



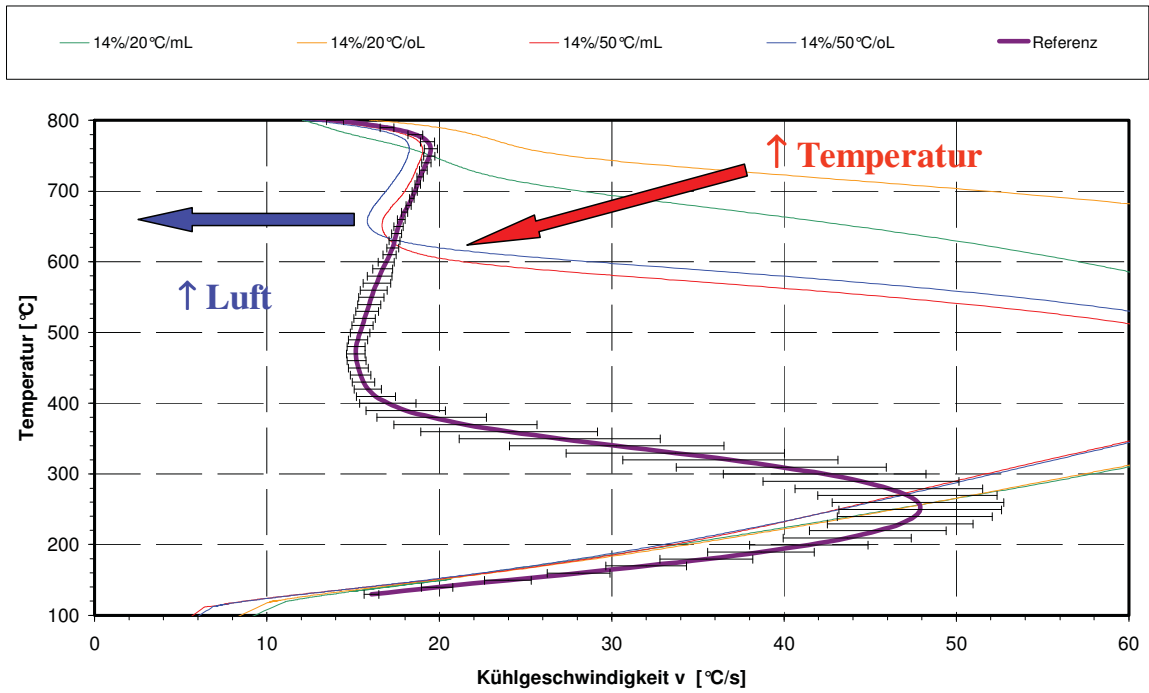


Bild 4.15: Quenchant HT – Temperatur- und Lufteinfluss

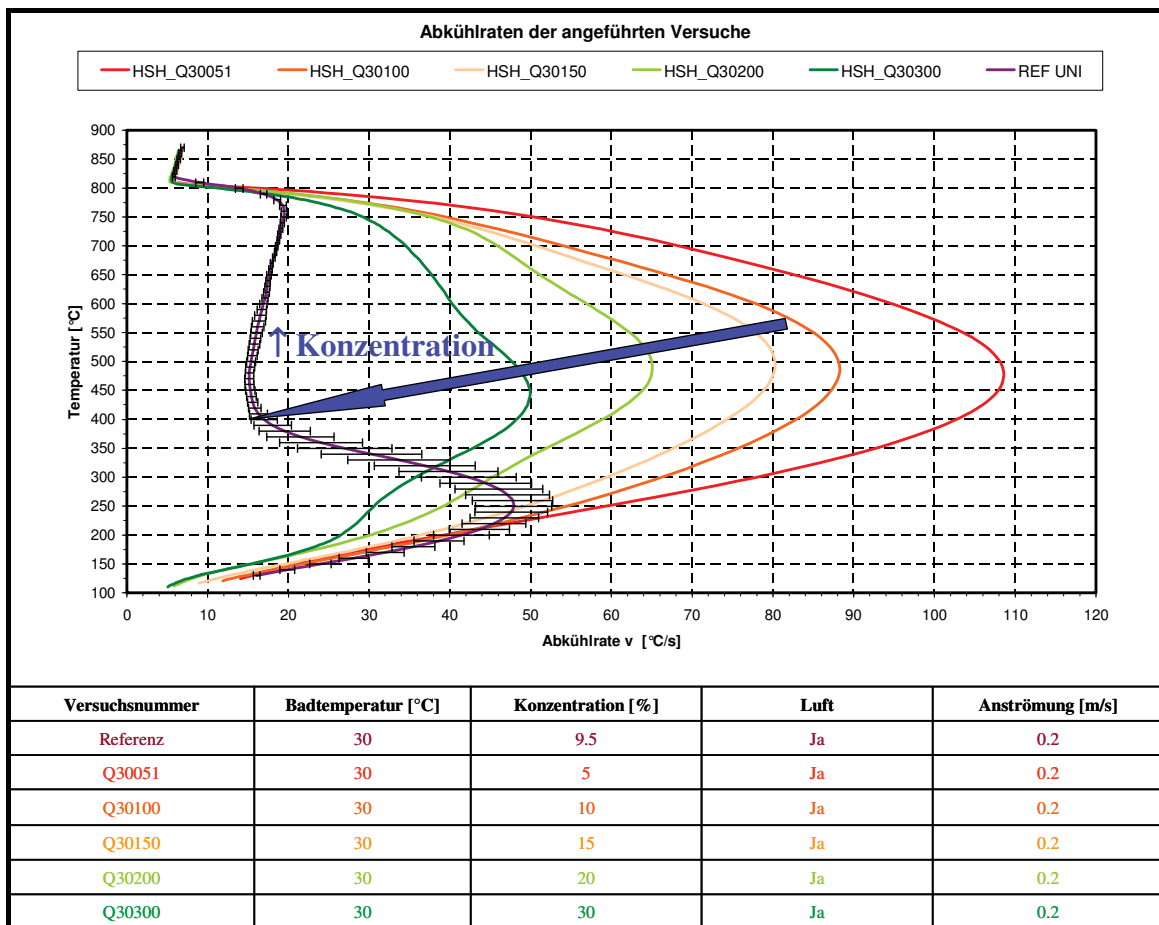
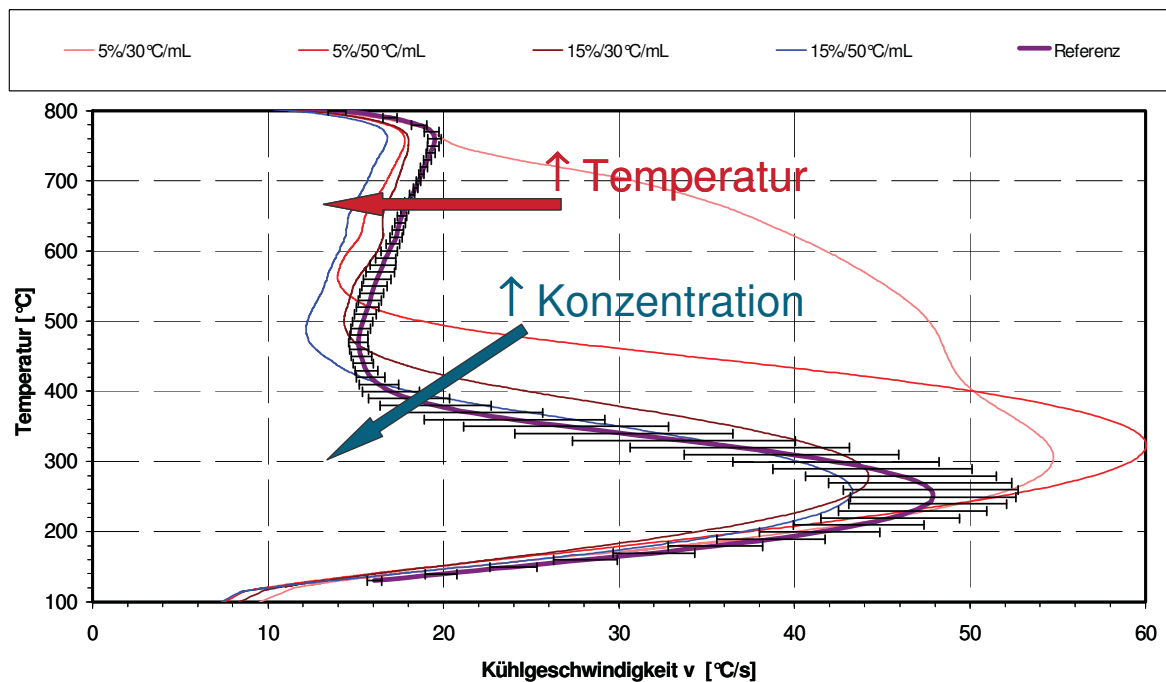


Bild 4.16: Quenchant HT – Konzentrationseinfluss

• **Ferroquench AP-2**

Seine Abkühlcharakteristik ist der des Polymer AP sehr ähnlich, soll aber hinsichtlich der Altersbeständigkeit bessere Eigenschaften haben. Auch hier können wieder folgende Feststellungen gemacht werden.

- Wird die Badtemperatur erhöht, verringert sich die Abkühlrate (**Bild 4.17**).
- Erhöht man die Konzentration des Härtemediums, verschiebt sich der Übergang in die Kochphase zu niedrigeren Temperaturen (**Bild 4.17**).
- Luft bewirkt auch hier ein milderes Abschreckverhalten, da es die Bildung einer stabilen Dampffilmphase begünstigt (**Bild 4.18**).
- Erhöht man die Anströmgeschwindigkeit, erhöht sich die Abkühlrate und der Übergang in die Kochphase findet zu einem späteren Zeitpunkt statt, wobei die Übergangstemperatur nahezu gleich bleibt (**Bild 4.19**).



**Bild 4.17: Ferroquench AP-2 – Temperatur- und Konzentrationseinfluss**

## 4 Ergebnisse

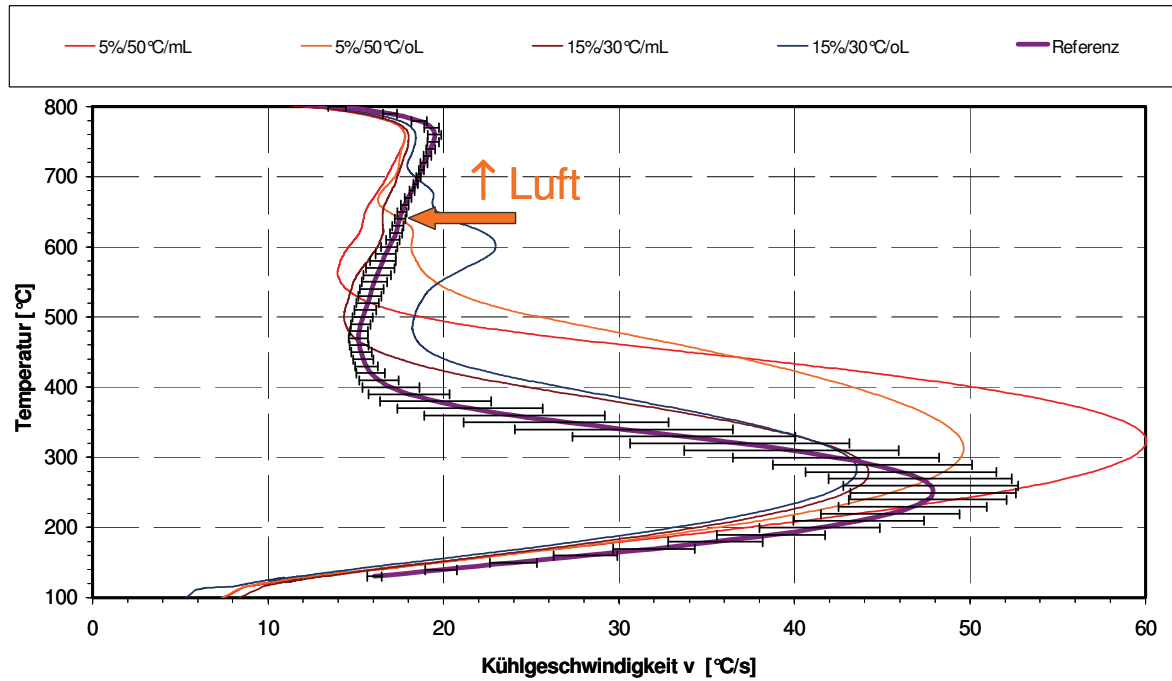


Bild 4.18: Ferroquench AP-2 – Lufteinfluss

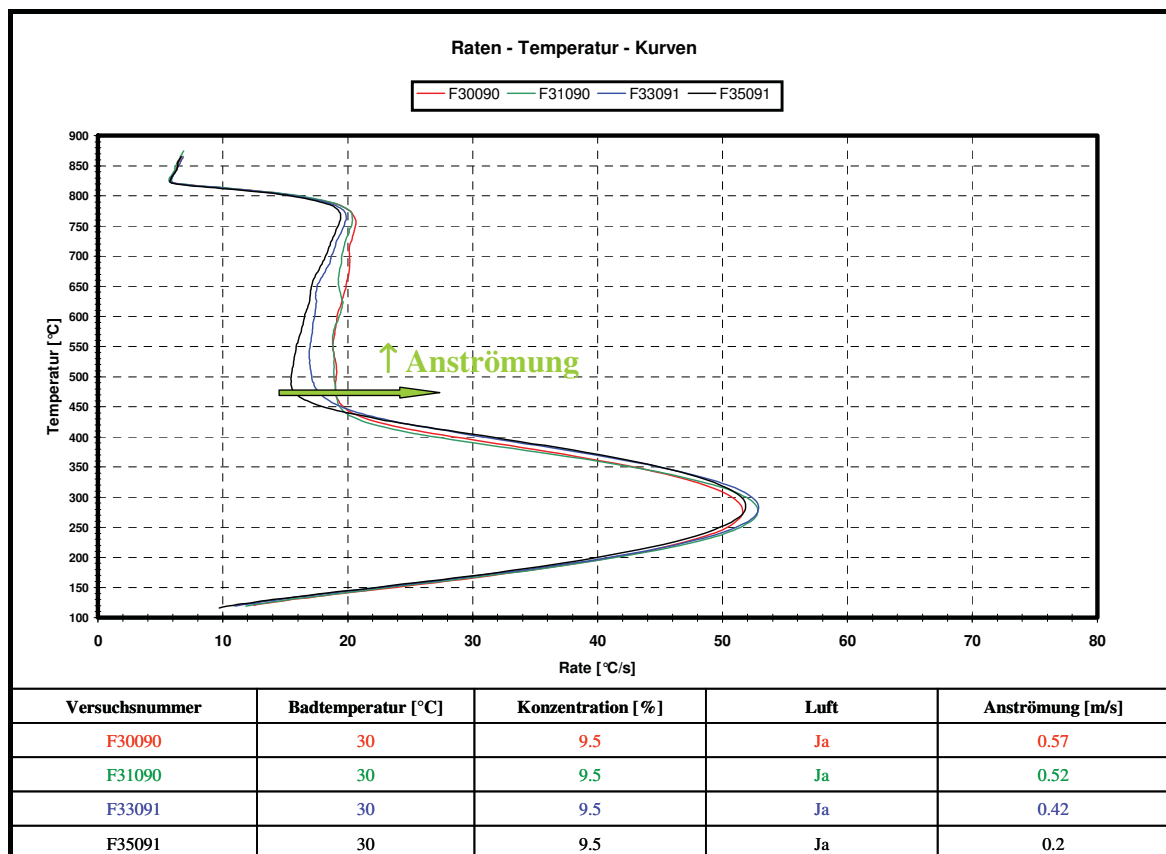
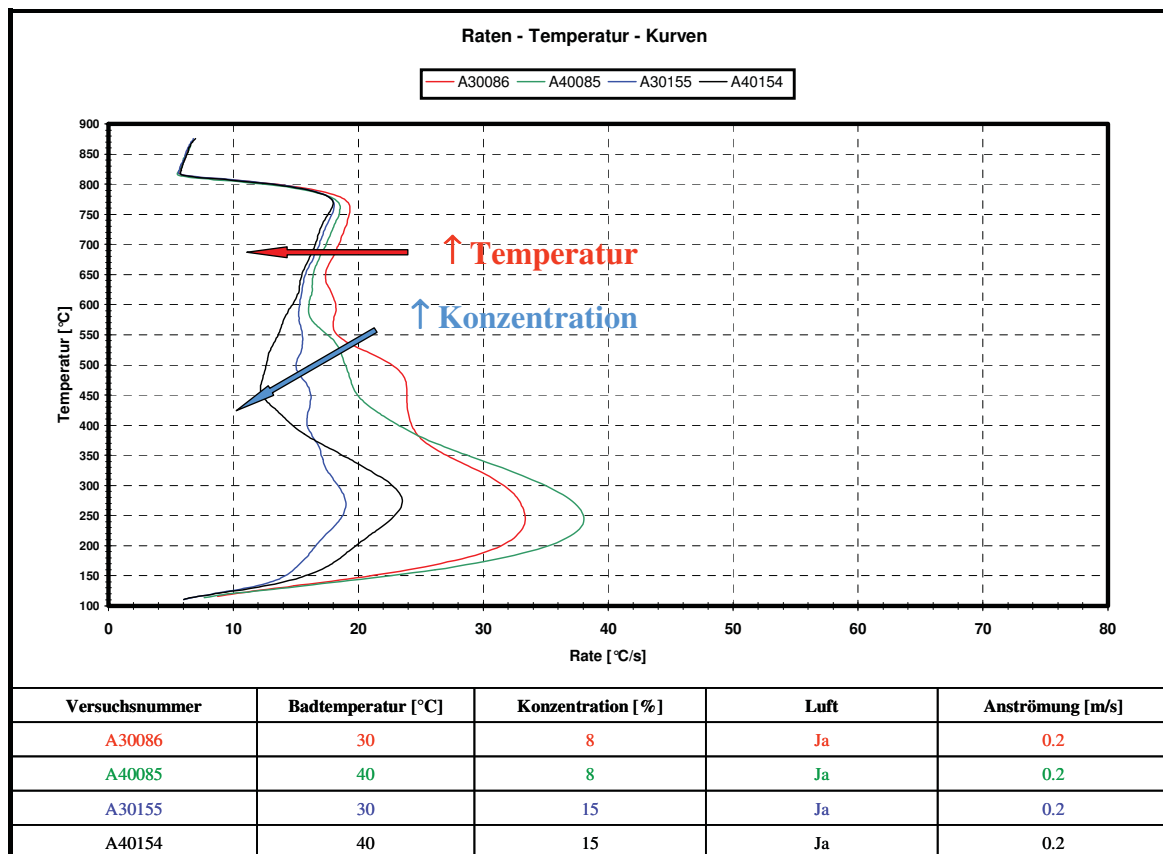


Bild 4.19: Ferroquench AP-2 - Einfluss der Anströmgeschwindigkeit

• **Aquaquench 631**

Die Abschreckcharakteristik lässt sich folgendermaßen beschreiben:

- Wird die Badtemperatur erhöht, verringert sich die Abkühlrate (**Bild 4.20**).
- Erhöht man die Konzentration des Härtemediums, verschiebt sich der Übergang in die Kochphase zu niedrigeren Temperaturen (**Bild 4.20**).
- Luft bewirkt auch hier ein milderes Abschreckverhalten, da es die Bildung einer stabilen Dampffilmphase begünstigt (**Bild 4.21**).



**Bild 4.20: Aquaquench 631 – Temperatur- und Konzentrationseinfluss**

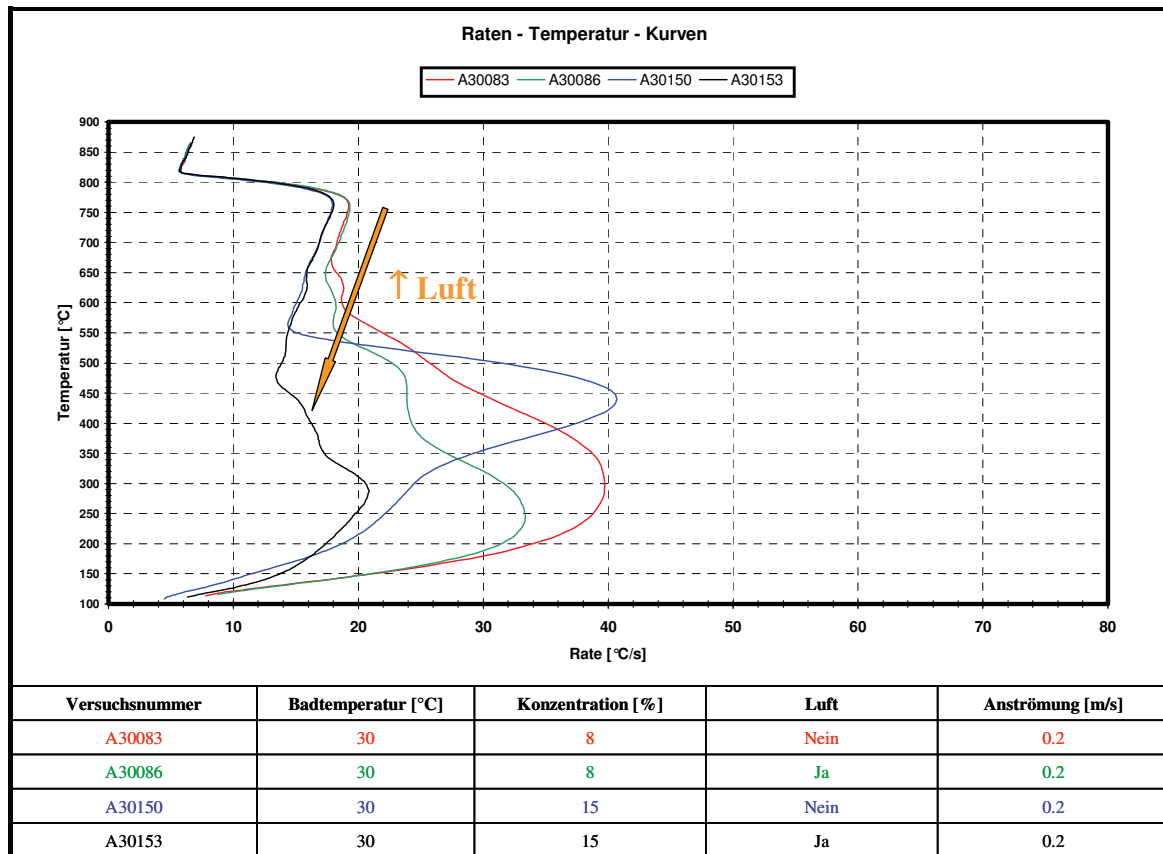


Bild 4.21: Aquaquench 631 – Lufteinfluss

- **Aquaquench EC/WE**

Das Härtemedium weist folgende Abschreckcharakteristik auf:

- Wird die Temperatur erhöht, verringert sich die Abkühlrate (**Bild 4.22**).
- Erhöht man die Konzentration, verschiebt sich der Übergang in die Kochphase zu niedrigen Temperaturen (**Bild 2.22**). Allerdings sind die Versuche bei einer Konzentration von 5 %, wie bei anderen Härtemittel, eher schlecht reproduzierbar.
- Vergleicht man nun die Fahrweise mit Luft und ohne Luft, so kommt man zum Schluss, dass Luft ein milderes Abschreckverhalten bewirkt (**Bild 4.23**).
- Erhöht man die Anströmgeschwindigkeit, erhöht sich die Abkühlrate und der Übergang in die Kochphase verschiebt sich zu höheren Temperaturen (**Bild 4.23**).

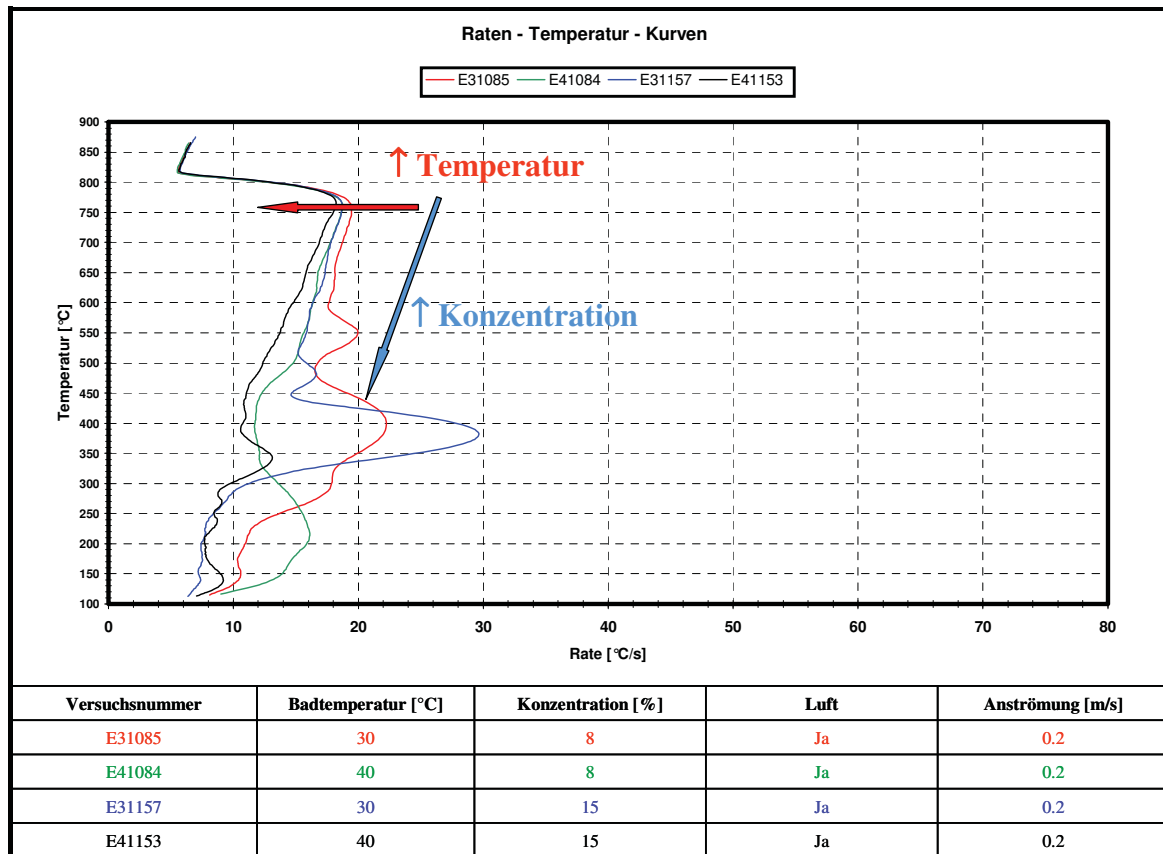


Bild 4.22: Aquaquench EC/WE – Temperatur- und Konzentrationseinfluss

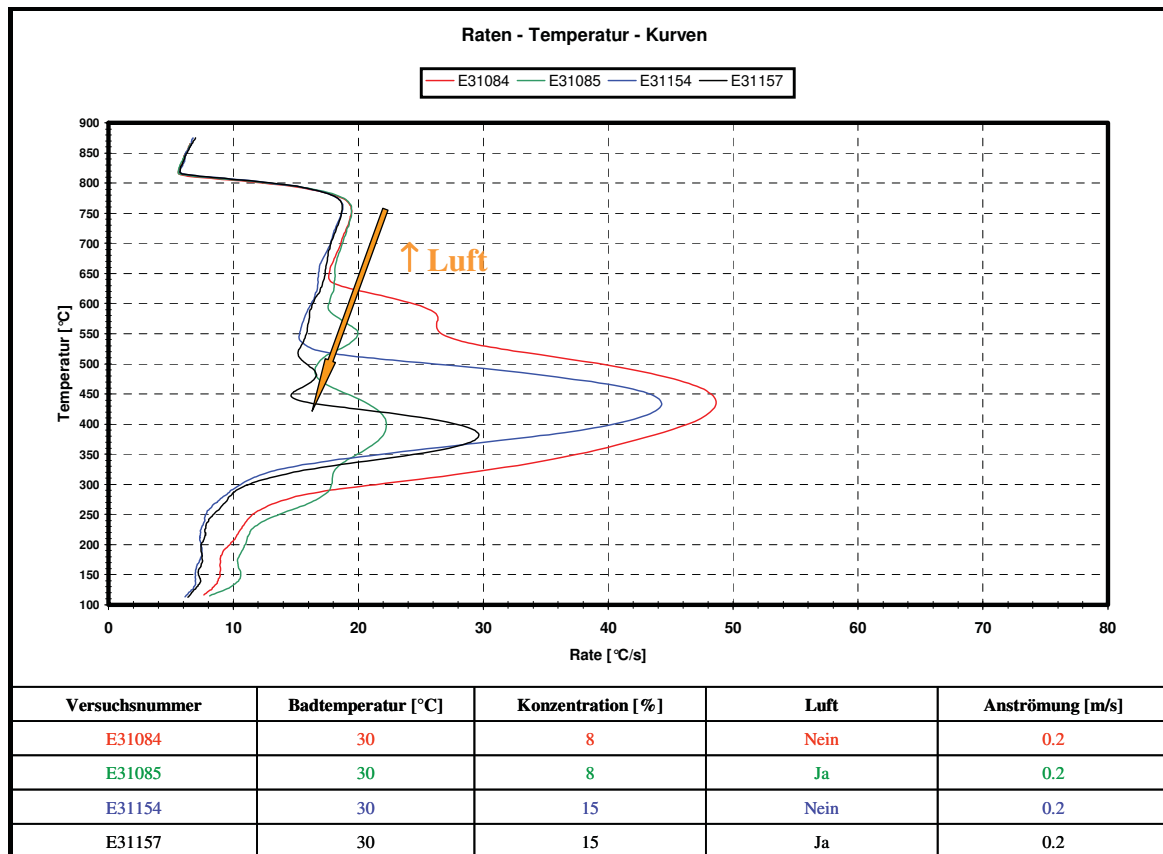
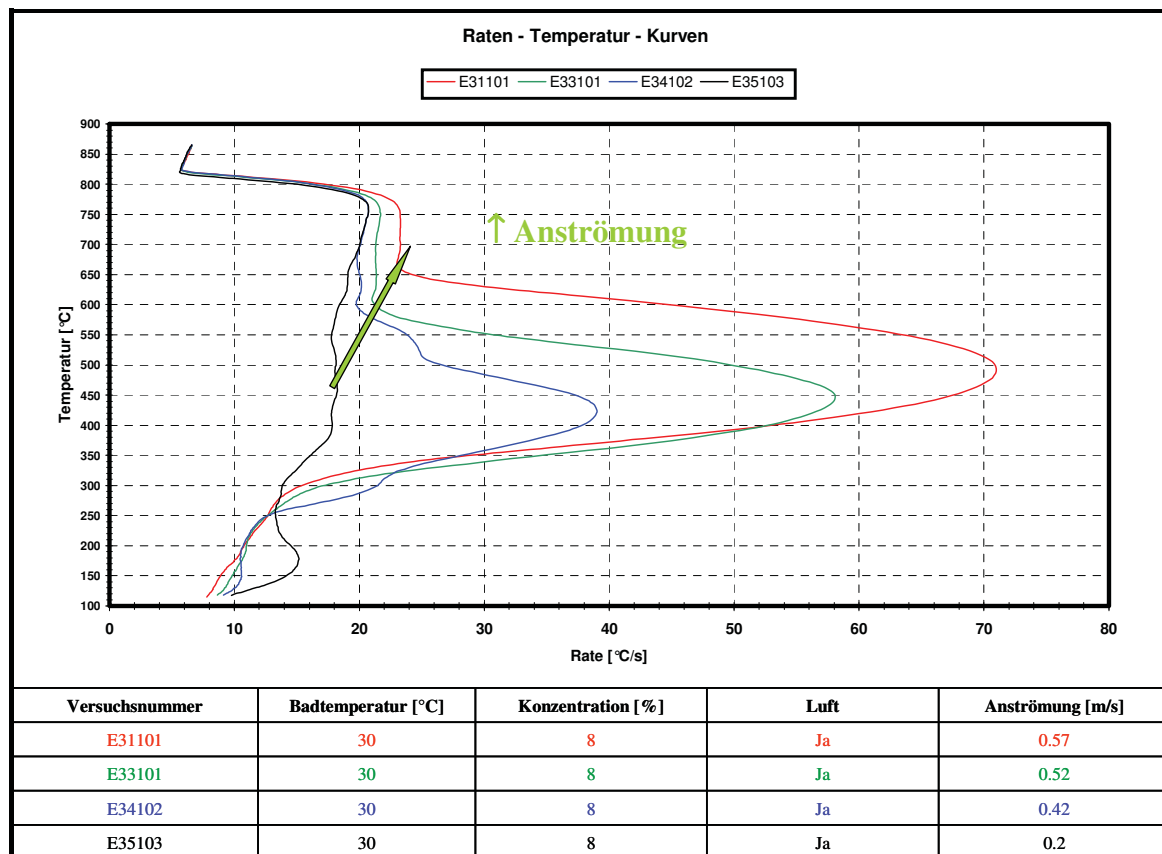


Bild 4.23: Aquaquench EC/WE – Lufteinfluss



**Bild 4.24: Aquaquench EC/WE – Einfluss der Anströmgeschwindigkeit**

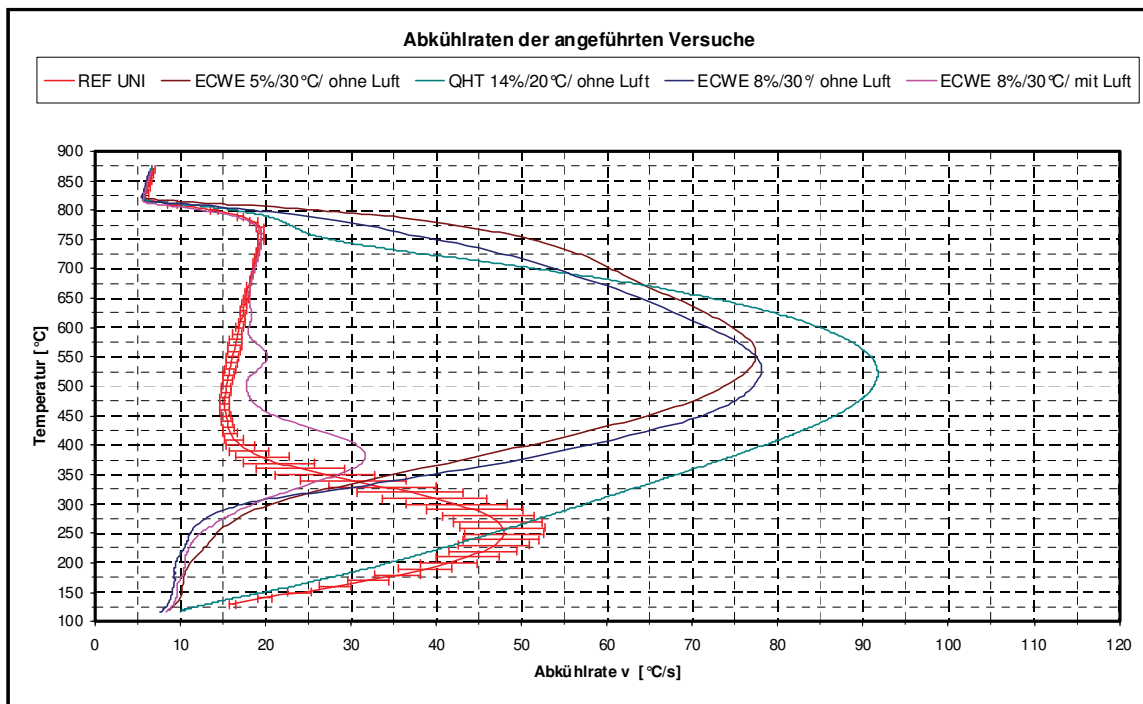
#### 4.2.1.3 Vergleich der Härtemittel

Im Rahmen der Diplomarbeit wurden 310 Abschreckversuche am Quenchomat durchgeführt. Die Auswertung der Versuche und der Vergleich der Ergebnisse führen zu folgenden Schlussfolgerungen, welche die Basis für nachfolgende Versuche an der 2m-Anlage darstellen (**Tabelle 4.3**):

- Im Zeitraum der Versuche an der 2m-Anlage ist das **Polymer AP** noch in der Produktionsanlage im Einsatz. Daher eignet es sich optimal zur Erstellung von Referenzkurven und Referenzwerten für HSH<sup>®</sup>-Verfahren. Eine Variation der Prozessparameter ist weniger sinnvoll, da dieses Härtemittel während seines langen Einsatzes in Produktion hinreichend untersucht worden ist und seine Produktion von der Herstellerfirma eingestellt wird.
- **Feroquench AP-2** ist das Nachfolgeprodukt von Polymer AP. Eine Neumischung von mindestens 12 % bildet bei einer Badtemperatur von 30 °C unter Luftzufuhr im Temperaturbereich von 775 bis 450 °C stabile Dampffilmphasen. Dies stellt für das HSH<sup>®</sup>-Verfahren ein sehr gutes Ergebnis dar. Allerdings fällt auf, dass bei einer Fahrweise ohne Luftzufuhr die Abkühlgeschwindigkeiten für eine isotherme

Umwandlung beim DOBAIN<sup>®</sup>-Verfahren wahrscheinlich zu niedrig sind (**Bild 4.25** und **Bild 4.26**). Klarheit darüber geben die Versuche auf der 2m-Anlage.

- Das Härtemittel **Aquaquench 631** hat zwar eine relativ gute Abschreckcharakteristik, von einem praktischen Einsatz als HMe wird allerdings generell Abstand genommen, da es beim Austrocknen sehr harte und unlöslich Rückstände bildet, welche die Rohrleitungen und Düsen der Anlage verlegen können.
- Das Härtemittel **Aquaquench EC/WE** hat ebenfalls eine sehr gute Abschreckcharakteristik. Eine Neumischung von 8 % bildet bei einer Badtemperatur von 30 °C unter Luftzufuhr im Temperaturbereich von 775 bis 450 °C stabile Dampffilmphasen. Dies stellt für das HSH<sup>®</sup>-Verfahren ein optimales Ergebnis dar. Im Vergleich zu Feroquench AP-2 fällt auf, dass bei einer Fahrweise ohne Luftzufuhr die Abkühlgeschwindigkeiten für eine isotherme Umwandlung beim DOBAIN<sup>®</sup>-Verfahren wahrscheinlich hoch genug sind (**Bild 4.26**). Klarheit darüber geben die Versuche auf der 2m-Anlage.
- Die Abkühlkurven des Härtemittels **Breox Quenchant HT** zeigen, dass dieses Härtemittel selbst bei sehr hohen Konzentrationen und Temperaturen keinen stabilen Dampffilm ausbildet (**Bild 4.25** und **Bild 4.26**). Nachdem es aber beim DOBAIN<sup>®</sup>-Verfahren erfolgreich eingesetzt wird, ist es für die Aufnahmen von Richtwerten gut geeignet.



**Bild 4.25: Raten-Temperatur-Kurven im Vergleich**



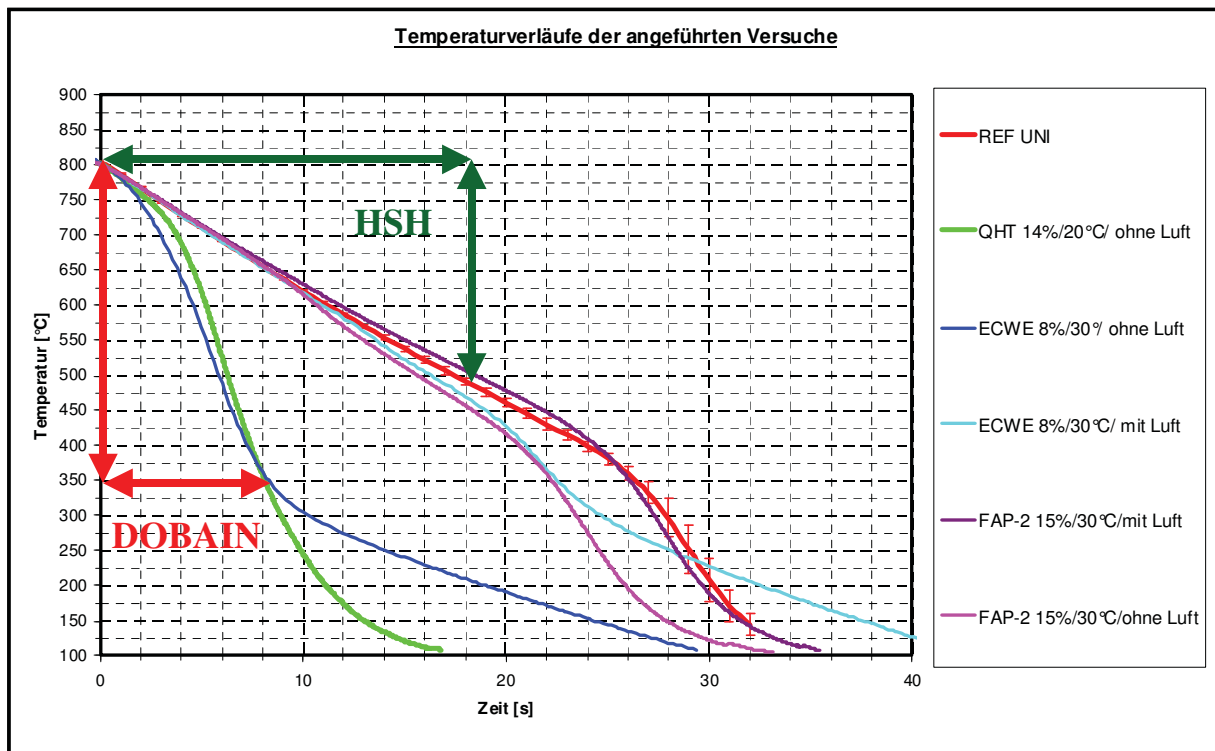


Bild 4.26: Zeit-Temperatur-Kurven im Vergleich

Härtemittel	Art	Beurteilung nach 310 Quenchemat-Versuchen	Für HSH®-Verfahren geeignet	Für DOBAIN®-Verfahren geeignet
Breox Quenchant HT	PAG	Bildet selbst bei sehr hohen Konzentrationen und Temperaturen keinen stabilen Dampffilm	Nein	Ja
Polymer AP	SPA	Stabiler Dampffilm bei folgenden Prozessparametern: - Konzentration HSH®-Anlage ( 7,73 % ) - Badtemperatur 30 °C - Luft Ja	Ja	Nein
Feroquenach AP-2	SPA	Stabiler Dampffilm bei folgenden Prozessparametern: - Konzentration 12 % - Badtemperatur 30 °C - Luft Ja	Ja	<b>Möglicherweise:</b> Bei niedriger Konzentration (< 12 %), ohne Luftzufuhr
Aquaquenach 631	SPA	Bildet extrem harte und schwerlösliche Ablagerungen und ist daher für den praktischen Einsatz nicht geeignet	Nein	Nein
Aquaquenach EC/WE	PVP	Stabiler Dampffilm bei folgenden Prozessparametern: - Konzentration: 8% - Badtemperatur 30 °C - Luft Ja	Ja	<b>Möglicherweise:</b> Bei niedriger Konzentration (= 8 %), ohne Luftzufuhr

Tabelle 4.3: Härtemittel im Vergleich

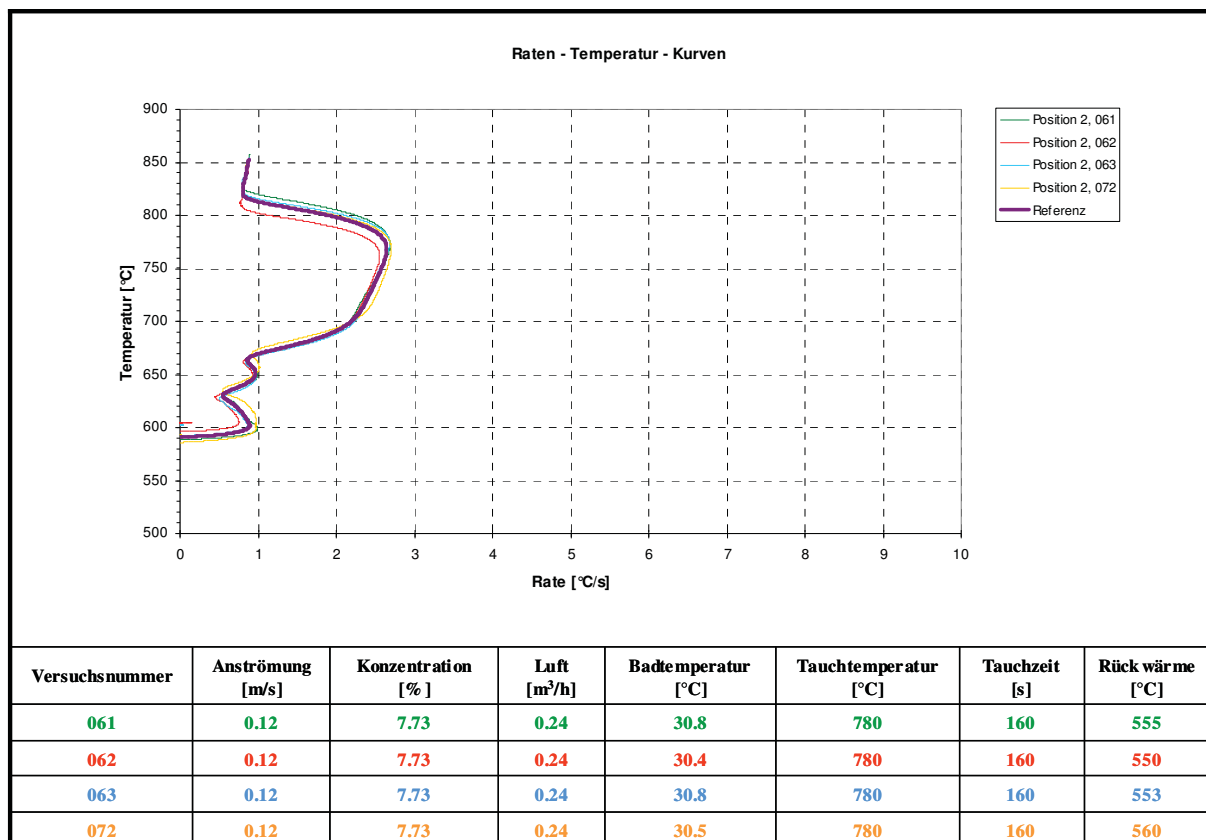
## 4.2.2 2m-Anlage

### 4.2.2.1 Referenzkurven und Referenzwerte

Die Referenzkurven wurden mit dem Polymer AP aufgenommen, wobei das Härtemittel direkt aus der HSH<sup>®</sup>-Anlage entnommen wurde.

**Bild 4.27** zeigt eine Referenzkurve, im Temperatur-Abkühlraten-Diagramm, die bei vier Versuchen aufgenommen worden ist. Es fällt auf, dass sich die Tauchtemperatur, welche mit einem Pyrometer an der Schienenoberfläche gemessen wird, deutlich von jener Temperatur, welche von den Thermoelementen im Schienenkopf gemessen wird unterscheidet. Für die Referenzkurve wurden die, von dem Thermoelement an Position 2 (**Bild 3.8**) gemessenen Werte herangezogen.

**Bild 4.28** zeigt, dass die Abkühlkurven der vier Versuche und die Referenzkurve im ZTU-Diagramm deckungsgleich sind.



**Bild 4.27** Referenzkurve im Temperatur-Abkühlraten-Diagramm

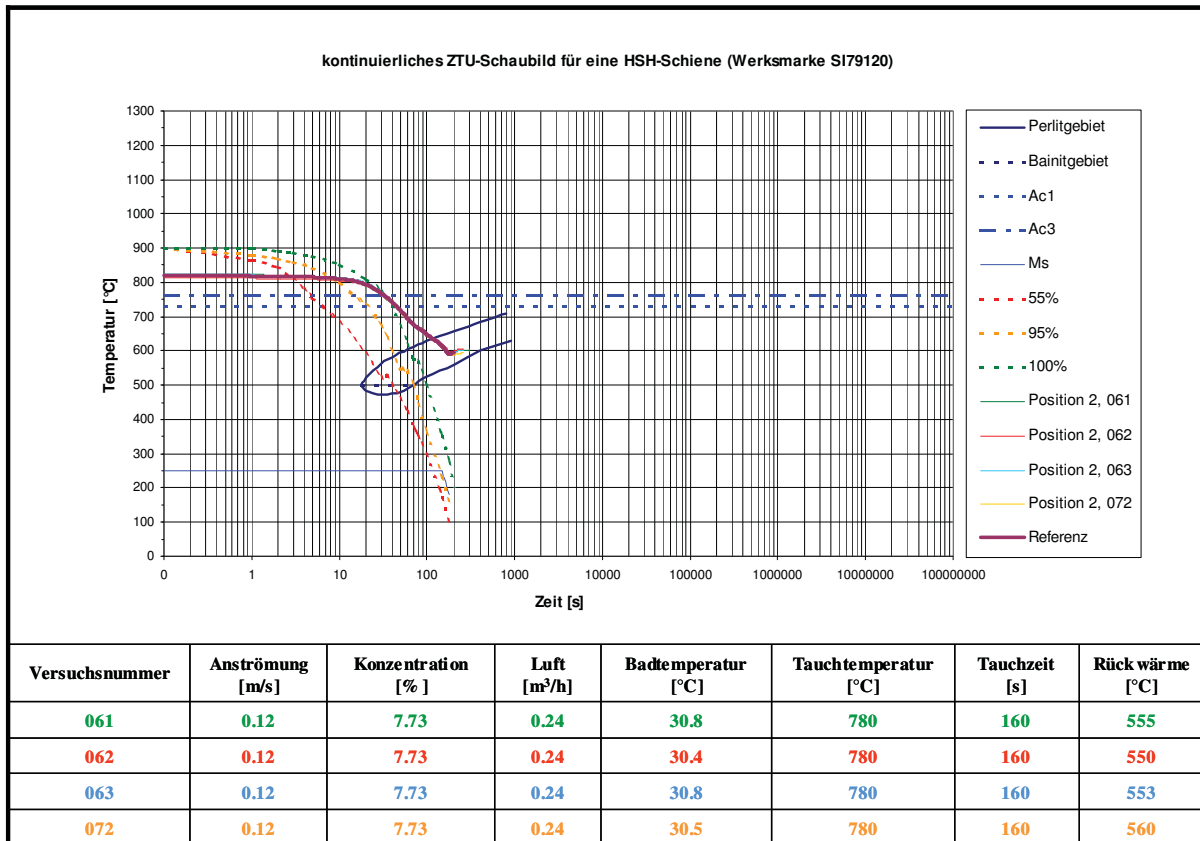


Bild 4.28 Referenzkurve im ZTU-Diagramm

Nun werden noch die Härtewerte und Gefüge (Bild 4.29 und Bild 4.30) untersucht, wobei die Härtemessung auf 5 HB genau erfolgt und die gemessenen Werte um ca. 30 HB niedriger sind, als Vergleichswerte aus der Produktionsanlage (Tabelle 4.4).

Bei einer durchschnittlichen Rückwärmetemperatur von 554,5 °C wird an den Prüfpunkten 1–3 eine durchschnittliche Härte von 346 HB erreicht, wobei dieser Härtewert einem Vergleichswert aus der Produktionsanlage von 376 HB entspricht.

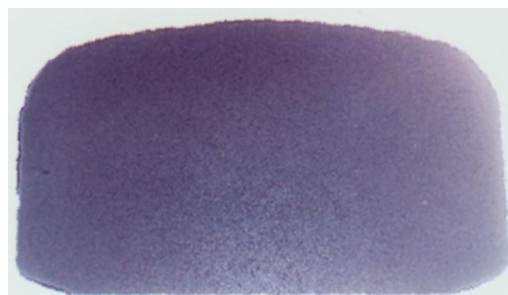
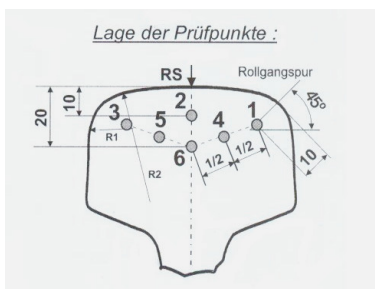


Bild 4.29: Lage der Prüfpunkte

Bild 4.30: Schliffprobe Nr.072 ( 1-fach ); feinperlitisch

ECWE Nr.072	Lage der Prüfpunkte					
	1	2	3	4	5	6
Härte in HB	351	342	347	344	350	332

Tabelle 4.4: Härtewerte der Schliffprobe Nr.072

4.2.2.2 Auswertung und Vergleich der Abkühlkurven

- Feroquench Ap-2

- HSH<sup>®</sup>-Verfahren

Bild 4.31 zeigt deutlich ,dass das Härtemittel Feroquench AP-2 beim Versuch Nr.173 bei einer Konzentration von 8 % noch keine stabilen Dampffilmphase erreicht. Auf Grund der hohen Abkühlgeschwindigkeiten ist hier der Vergleich der Abkühlkurven mit dem kontinuierlichen ZTU-Schaubild (Bild 4.32) nur bedingt möglich, da der Zeitpunkt der Gefügeumwandlung bereits eher im isothermen ZTU-Schaubild zu suchen ist. Allerdings lässt sich klar erkennen, dass aufgrund der hohen Abkühlgeschwindigkeit an den Fahrkanten der Schiene bereits bainitische und martensitische Gefügeanteile auftreten werden.

Um genaue Informationen über die Gefügezusammensetzung zu erhalten wurde der Versuch Nr.174 unter den gleich Versuchbedingungen wie Versuch Nr.173 durchgeführt, wobei das Schienenstück nicht mit Thermoelementen bestückt war.

Bild 4.33 und 4.34 zeigen anschaulich, dass die am Schienenrand gemessenen hohen Abkühlgeschwindigkeiten tatsächlich zu einem Saum aus unterem Bainit, oberem Bainit und Martensitinsel an den Fahrkanten führt.

Tabelle 4.5 zeigt, wie die gemessenen Härtewerte im Gefügebild der Schiene liegen.

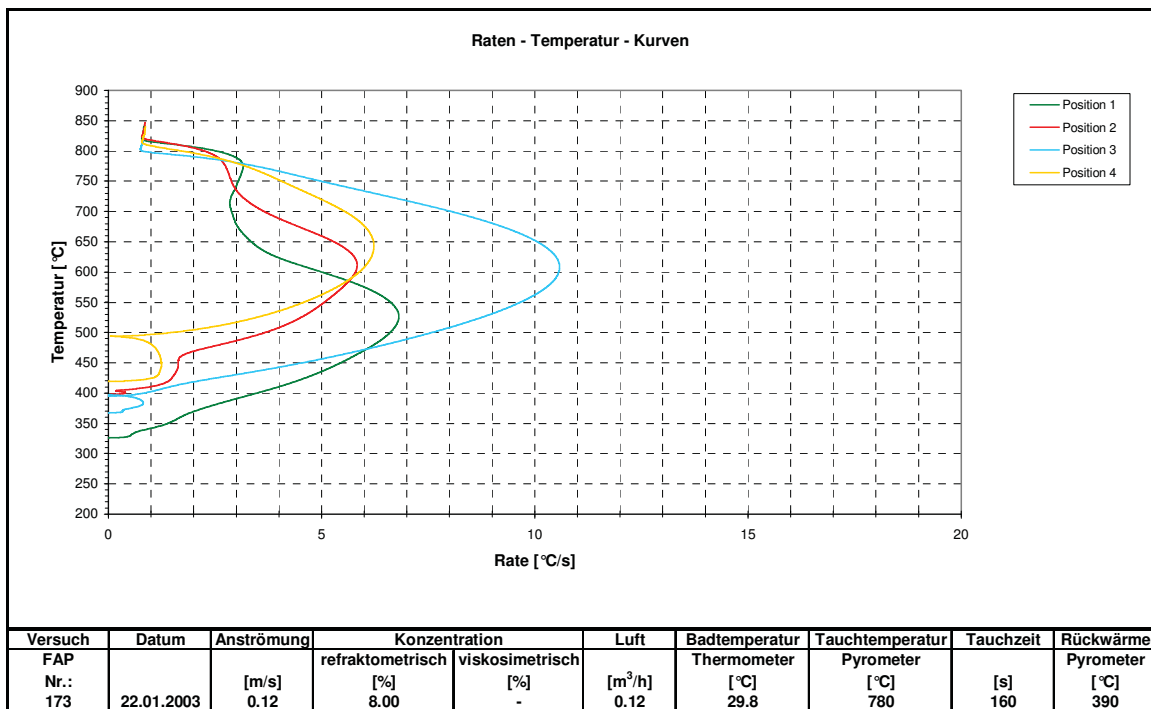


Bild 4.31: Raten-Temperatur-Kurven des Versuches FAP Nr.173

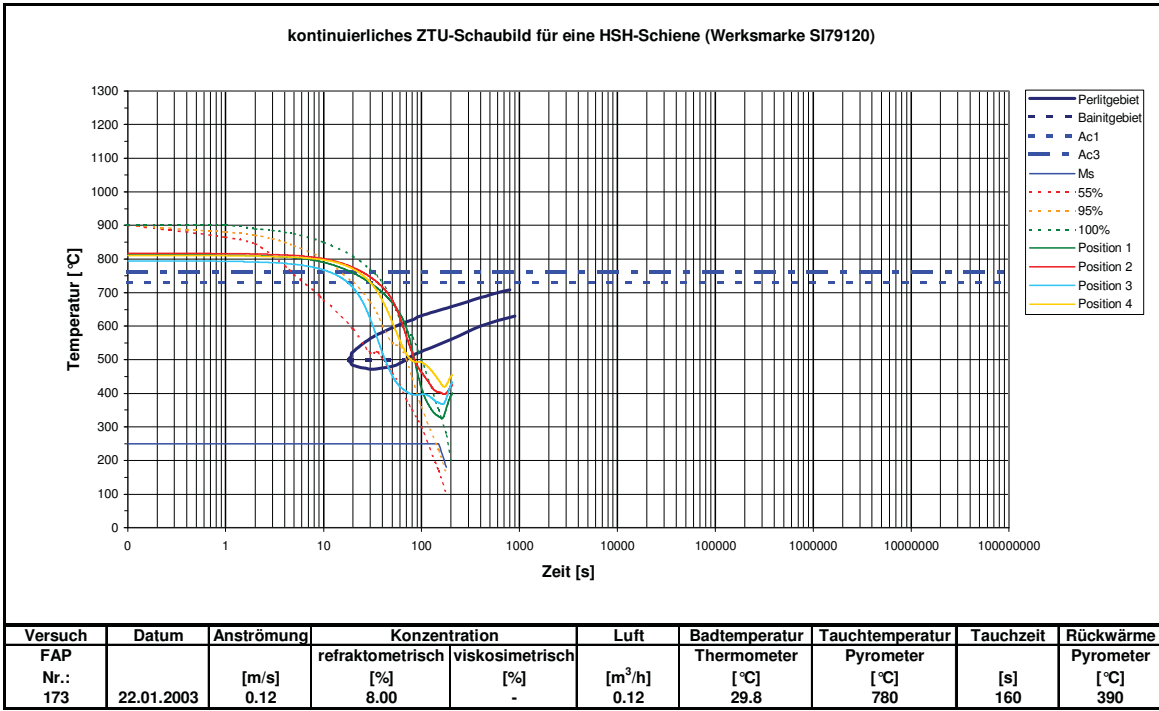


Bild 4.32: Zeit-Temperatur-Kurve des Versuches FAP Nr.173 im ZTU-Schaubild für eine HSH-Schiene

ANHANG A  
Abmessungen in [mm]

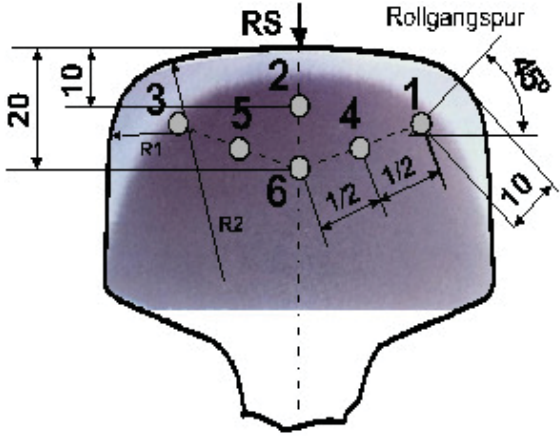
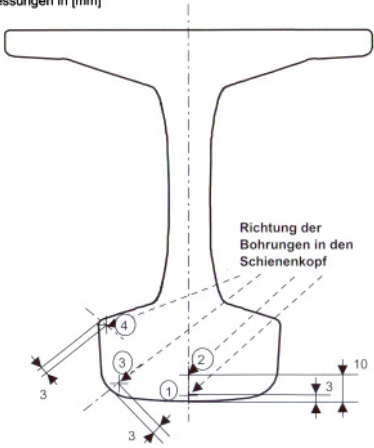


Bild 4.33: Lage der Thermoelemente

Bild 4.34: Schliffprobe Nr.174; Lage der Prüfpunkte

FAP Nr.174	Lage der Prüfpunkte					
	1	2	3	4	5	6
Härte in HB	382	372	383	381	375	369

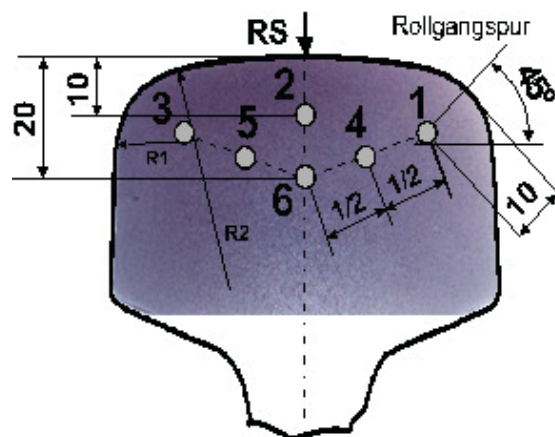
Tabelle 4.5: Härtewerte der Schliffprobe Nr.174

Nachdem sich bei Versuch Nr.174, bei einer Konzentration von 8 % noch keine stabile Dampfphase bildete, wurde beim Versuch Nr.193 die Badkonzentration auf 12 % erhöht. Alle anderen Prozessparameter blieben unverändert.

Das Schiffbild des Schienenstückes, welches beim Versuch Nr.193 nicht mit Thermoelementen bestückt war, wies ein der Norm entsprechendes feinperlitisches Gefüge auf (**Bild 4.34** und **Bild 4.35**), wobei die gemessenen Härtewerte den Referenzwerten entsprachen (**Tabelle 4.5**).

Aus den Quenchomatversuchen geht hervor, dass das Härtemittel Feroquench AP-2 unter Zugabe von Luft bei einer Konzentration von 12 % die selben Abschreckeigenschaften hat wie das Härtemittel Aquaquench EC/WE bei 8 %. Ohne Luftzufuhr ist die Abschreckwirkung von Feroquench AP-2 allerdings wesentlich geringer. Daher wurden die Versuche mit DOBAIN<sup>®</sup>-Schienenstücken nur mit den Härtemitteln Aquaquench EC/WE und Breox Quenchant HT durchgeführt.

Um die Abschreckwirkung von Feroquench AP-2 zu erhöhen müsste die Konzentration deutlich herabgesetzt werden.



**Bild 4.35: Schliffprobe Nr.193 (400-fach)**    **Bild 4.36: Schliffprobe Nr.193; Lage der Prüfpunkte**

FAP Nr.193	Lage der Prüfpunkte					
	1	2	3	4	5	6
Härte in HB	365	364	365	364	363	353

**Tabelle 4.6: Härtewerte der Schliffprobe Nr.193**

- **Aquaquench EC/WE**

- **HSH<sup>®</sup>-Verfahren**

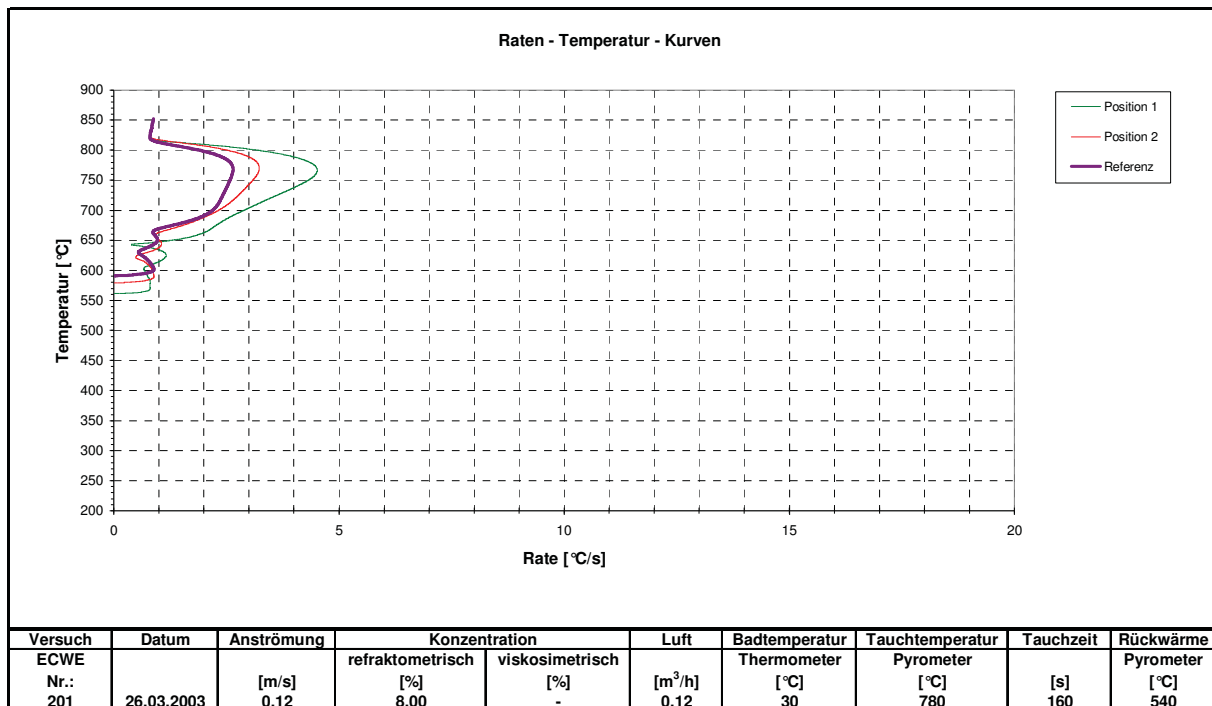
Nach einer Reihe von Testversuchen stellte sich heraus, dass die bei Versuch ECWE Nr.201 gewählten Prozessparameter sich für den HSH<sup>®</sup>-Prozess optimal eignen (**Bild 4.38**). Die Dampffilmphase blieb über den gesamten Abschreckprozess ausreichend stabil (**Bild 4.37**).

Es wurden weitere Versuche mit diesen Prozessparametern durchgeführt, wobei die Schienenstücke diesmal nicht mit Thermoelementen bestückt waren. Die Versuche ergaben, dass sich trotz einer leichten Überhitzung der Schienenstücke, die eine Kornvergrößerung bewirkt, feinperlitisches Gefüge mit einer Härte von bis zu 365 HB erzeugen lassen (**Bild 4.39**, **Bild 4.40** und **Tabelle 4.7**).

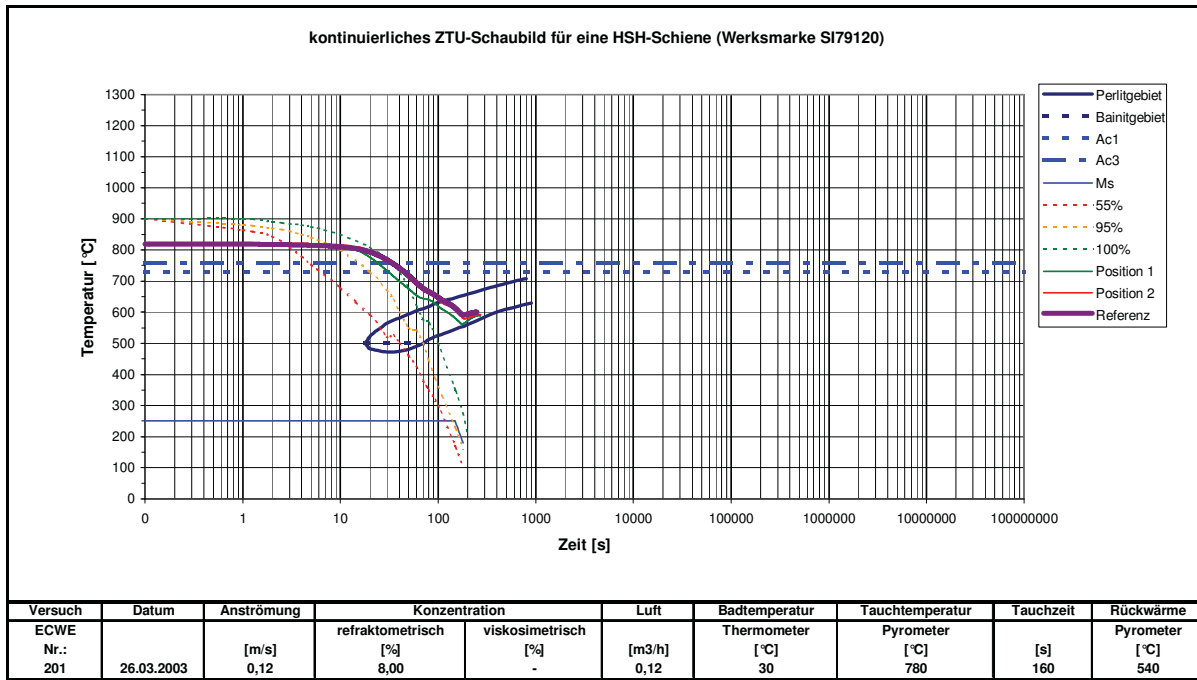
Die erreichten Härtewerte sind und ca. 10 HB höher als jene Referenzwerte, die mit Polymer AP, welches für Abschreckversuche direkt aus der Produktionsanlage entnommen worden war, erzielt worden sind.

Durch Wegschalten der Luftzufuhr und Erhöhung der Anströmgeschwindigkeit kann die Abkühlgeschwindigkeit noch deutlich erhöht werden.

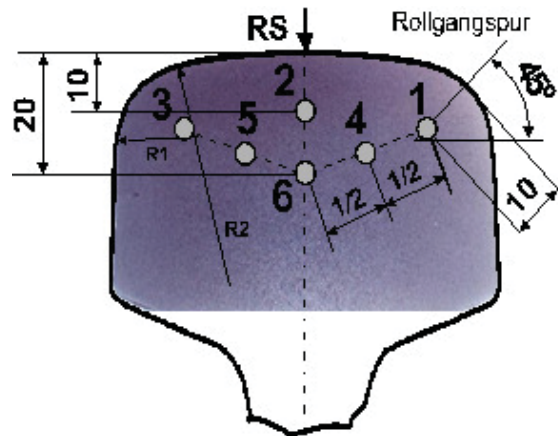
Ohne Luftzufuhr würde Aquaquench EC/WE, bei einer Konzentration von 8%, keine stabile Dampffilmphase ausbilden und sofort in die Kochphase übergehen.



**Bild 4.37: Raten-Temperatur-Kurven des Versuches ECWE Nr.201**



**Bild 4.38: Zeit-Temperatur-Kurve des Versuches ECWE Nr.201 im ZTU-Schaubild für eine HSH-Schiene**



**Bild 4.39: Schliffprobe Nr.402 (400-fach)**

**Bild 4.40: Schliffprobe Nr.402; Lage der Prüfpunkte**

ECWE Nr.402	Lage der Prüfpunkte					
	1	2	3	4	5	6
Härte in HB	361	365	363	357	363	348

**Tabelle 4.7: Härtewerte der Schliffprobe Nr.402**



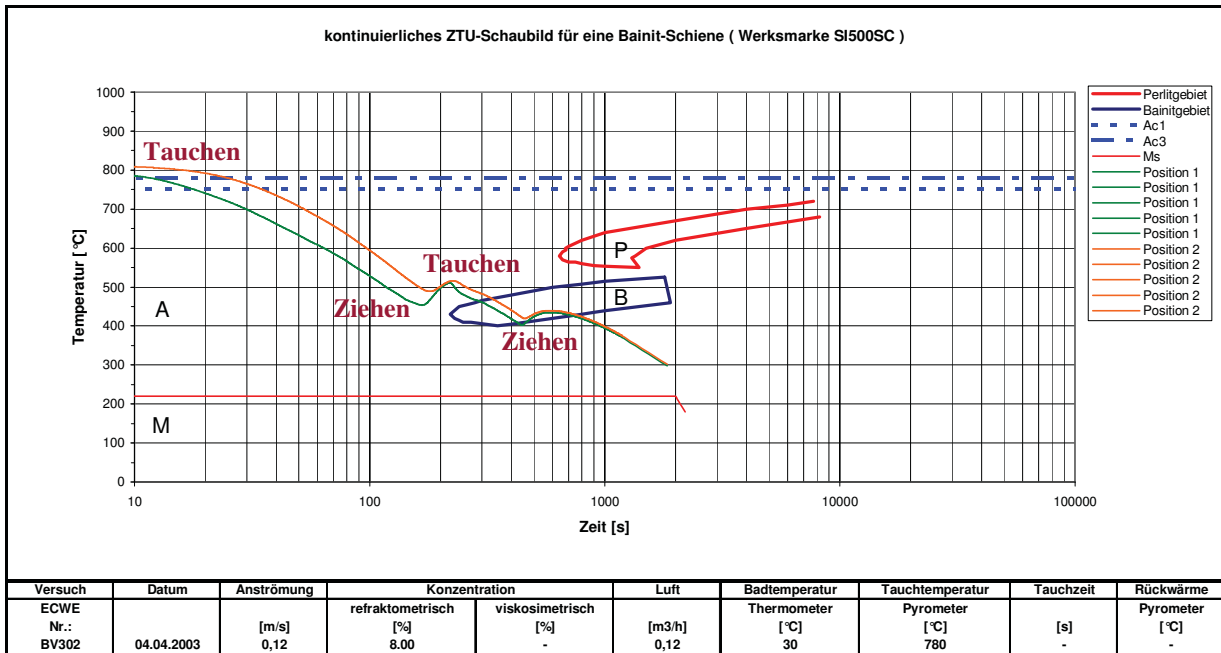
### - DOBAIN-Verfahren

Ziel dieser Versuchsreihe war es ein rein bainitisches Gefüge mit einer kontinuierlichen Abkühlung in einer stabilen Dampffilmphase zu erzeugen.

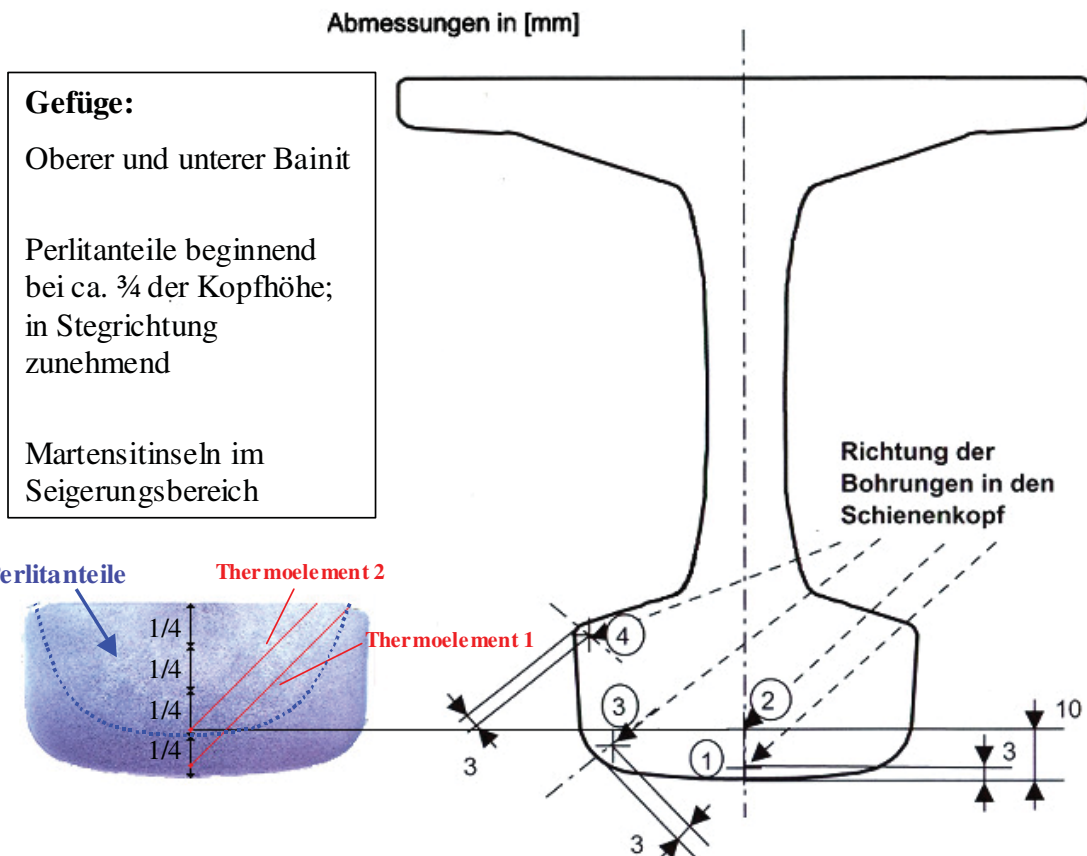
Aus diesem Grund wurde mit den in **Bild 4.41** angeführten Prozessparametern der Tauchversuch Nr.302 mit Thermoelementen durchgeführt und die ermittelten Abkühlkurven in das kontinuierliche ZTU-Schaubild für eine Bainit-Schiene gelegt. Das Schienenstück wurde zuerst bei 780 °C für 160 s in das Abschreckbad getaucht, dann herausgezogen und nach weiteren 210 s wieder getaucht. Nach einer Gesamtbehandlungszeit von 430 s wurde die Schiene wieder aus dem Abschreckbad herausgezogen (Rückwärmtemperatur: 450 °C) und an Luft weiter abgekühlt. Die Dampffilmphase blieb bis 450 °C stabil.

Laut **Bild 4.41** wäre ein Gefüge aus unteren und oberen Bainit mit Martensitanteilen zu erwarten. Um Gewissheit über die Gefügezusammensetzung zu erhalten, wurde der Versuch ohne Thermoelemente mit den exakt gleichen Prozessparametern und Behandlungszeiten wiederholt. Die Untersuchung der Schliﬀprobe Nr.304 (**Bild 4.42**) ergab, dass sich neben dem erwarteten bainitischen Gefüge auch Perlitanteile gebildet hatten, die bei  $\frac{3}{4}$  der Schienenkopfhöhe (vom Schienensteg aus betrachtet) beginnend, zum Schienensteg hin zunehmen. Thermoelement 2 befindet sich allerdings in  $\frac{3}{4}$  der Schienenkopfhöhe und **Bild 4.41** zeigt, dass sich die Abkühlkurve von Thermoelement 2 im kontinuierlichen ZTU-Schaubild viel zu weit links vom Perlitgebiet befindet, was eine Perlitbildung unmöglich macht.

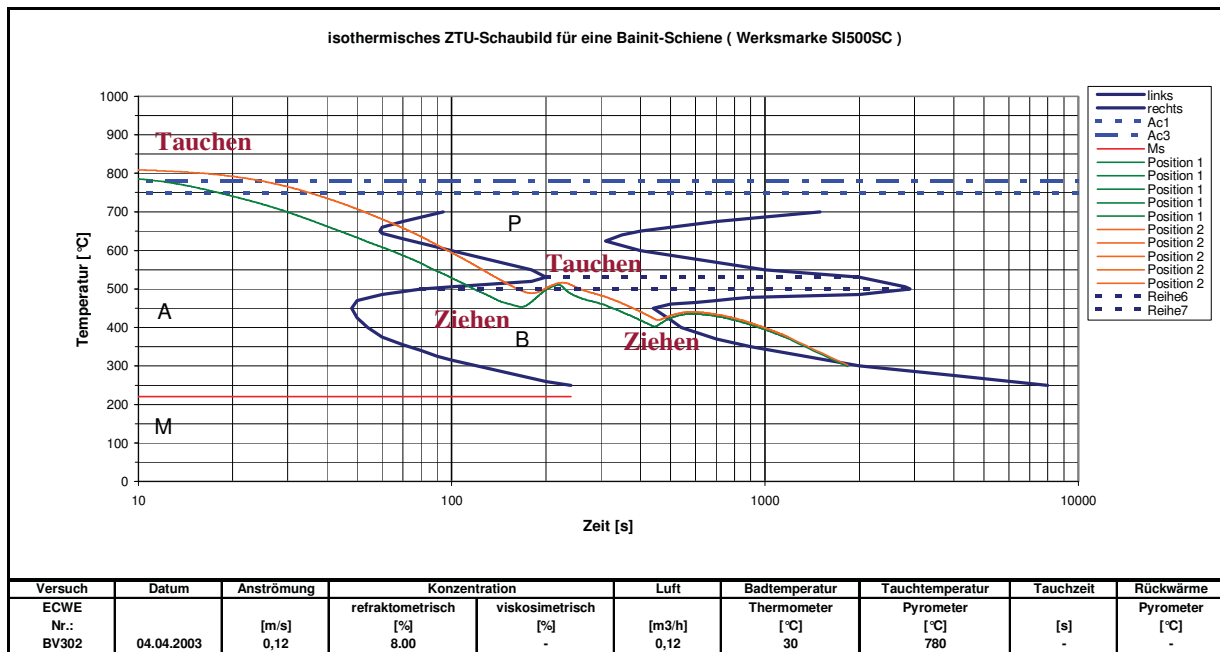
Nachdem die Abkühlkurven von Versuch Nr. 302 mit dem kontinuierlichen ZTU-Schaubild keine Übereinstimmung hatten, wurden sie in das isothermische ZTU-Schaubild gelegt (**Bild 4.43**). **Bild 4.43** zeigt deutlich, dass die Abkühlkurve von Thermoelement 2 bereits das Perlitgebiet schneidet und somit eine Übereinstimmung von Abkühlkurven, Gefügeausbildung und isothermischem ZTU-Schaubild der DOBAIN<sup>®</sup>-Schiene gegeben ist. Aus diesem Grund wurden bei den weiteren Versuchen mit DOBAIN<sup>®</sup>-Schienen die Abkühlkurven in das isothermische ZTU-Schaubild gelegt, denn selbst die Abkühlgeschwindigkeit in einer stabilen Dampffilmphase ist in diesem Fall bereits zu hoch für einen kontinuierlichen Abschreckprozess.



**Bild 4.41: Zeit-Temperatur-Kurve des Versuches ECWE Nr.302 im kontinuierlichen ZTU-Schaubild für eine DOBAIN-Schiene**



**Bild 4.42: Schliffbild und Gefüge des Versuches Nr. 304 mit eingezeichneten Thermoelementen**



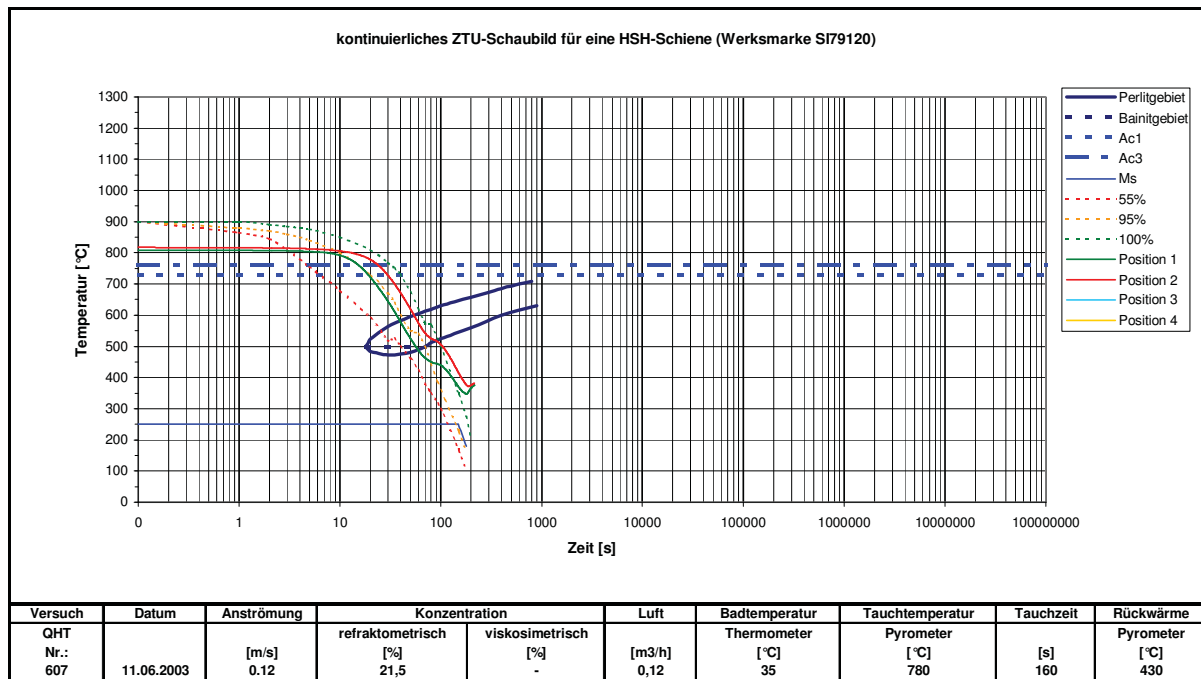
**Bild 4.43: Zeit-Temperatur-Kurve des Versuches ECWE Nr.302 im isothermischen ZTU-Schaubild für eine DOBAIN-Schiene**

- **Brex Quenchant HT**

- **HSH<sup>®</sup>-Verfahren**

Die Versuche am Quenchomat ergaben, dass das Härtemittel Brex Quenchant HT selbst bei einer Konzentration von 20 % und Luftzufuhr noch keine stabile Dampffilmphase ausbildet. Dieses Ergebnis wurde auf der 2m-Anlage überprüft. Die Versuche wurden bei einer Konzentration von 21,5 % mit Luftzufuhr durchgeführt. Die Badtemperatur betrug 35 °C. Das Schienenstück war mit zwei Thermoelementen bestückt und wurde für 160 s im Tauchbad abgekühlt. **Bild 4.44** zeigt, dass sich beim Versuch Nr. 607 die Abkühlkurven beider Thermoelemente bereits im Bainitgebiet befinden. Dieser Versuch wurde unter den gleichen Versuchsbedingungen mit einem Schienenstück ohne Thermoelemente wiederholt. An der Schliiffprobe dieses Schienenstückes war an den Fahrkanten deutlich heller Saum aus Bainit zu erkennen. Die Untersuchung des Gefüges ergab, dass sich oberer und unterer Bainit, sowie Anlassmartensit gebildet hatte.

Es wurden insgesamt fünf Versuche mit HSH<sup>®</sup>-Schienenstückes durchgeführt. Alle Versuche führten zu demselben Ergebnis. Das Härtemittel Brex Quenchant HT bildet selbst bei einer Konzentration von 30 %, trotz Luftzufuhr, keinen Dampffilm.



**Bild 4.44: Zeit-Temperatur-Kurve des Versuches QHT Nr.607 im ZTU-Schaubild für eine HSH-Schiene**

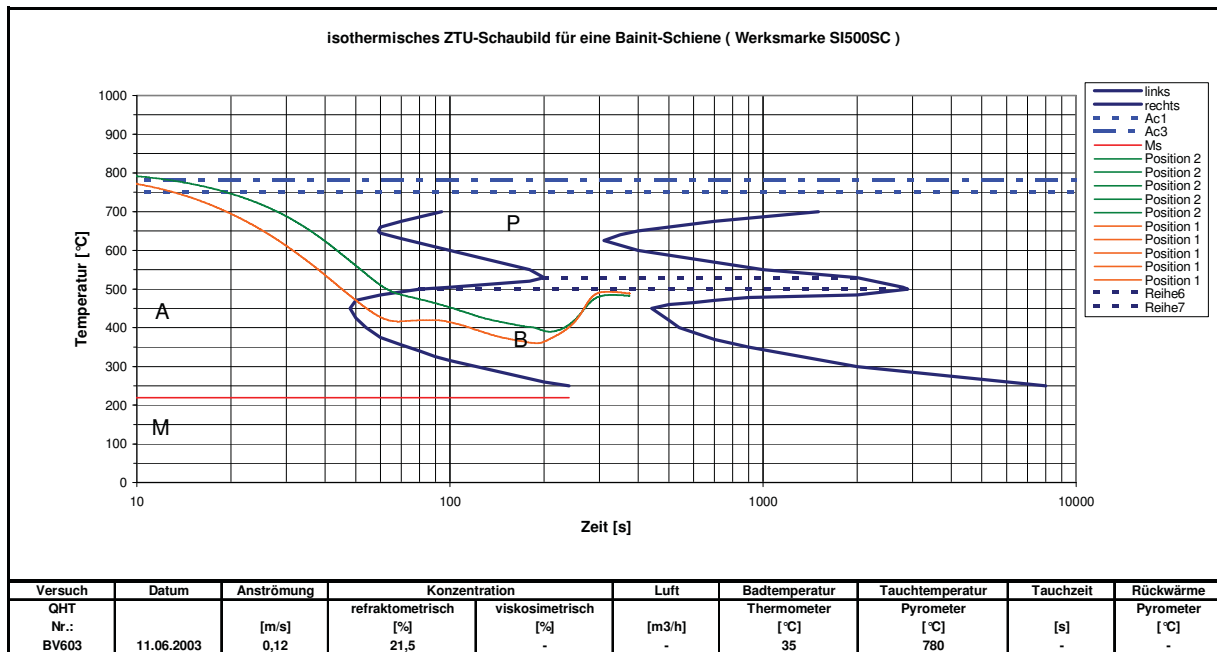
#### - DOBAIN<sup>®</sup>-Verfahren

Um die Ergebnisse der Versuche, die mit DOBAIN<sup>®</sup>-Schienenstücken und dem Härtemittel Aquaquench EC/WE durchgeführt wurden, mit den Richtwerten für das DOBAIN<sup>®</sup>-Verfahren vergleichen zu können, wurden auch auf der 2m-Anlage Versuche für eine isothermische Umwandlung mit Breox Quenchant HT durchgeführt. Dieses Härtemittel ist schon längere Zeit erfolgreich beim DOBAIN<sup>®</sup>-Verfahren im Einsatz.

Beim Versuch Nr.603 (**Bild 4.45**) wurde das Schienenstück 120 s im Tauchbad abgeschreckt. Laut Abschreckkurven sollte das Gefüge rein bainitisch sein und nur im Bereich des Schienensteges Perlitanteile aufweisen. Der Versuch wurde ohne Thermolemente wiederholt. Die Untersuchung der Schliffprobe ergab, dass sich im Bereich des Schienenkopfes unterer und oberer Bainit gebildet hatte, wobei der Anteil vom unteren Bainit deutlich größer war. Im Bereich des Schienensteges bildeten sich Perlitinseln aber auch Martensitinseln. Auch hier stimmten die Lage der Abkühlkurven mit dem entstandenen Gefüge weitgehend überein. Obwohl dieses Gefüge sicher noch nicht dem im DOBAIN<sup>®</sup>-Verfahren gewünschtem Gefüge aus reinem unteren Bainit entspricht, zeigt die Lage der Abkühlkurven mit welcher

## 4 Ergebnisse

hohen Abkühlgeschwindigkeit ( Abkühlung von 775 °C auf 475 °C in 50 s) eine Intervalltauchung eingeleitet werden muss .



**Bild 4.45: Zeit-Temperatur-Kurve des Versuches QHT Nr. 603 im isothermisches ZTU-Schaubild für eine DOBAIN-Schiene**

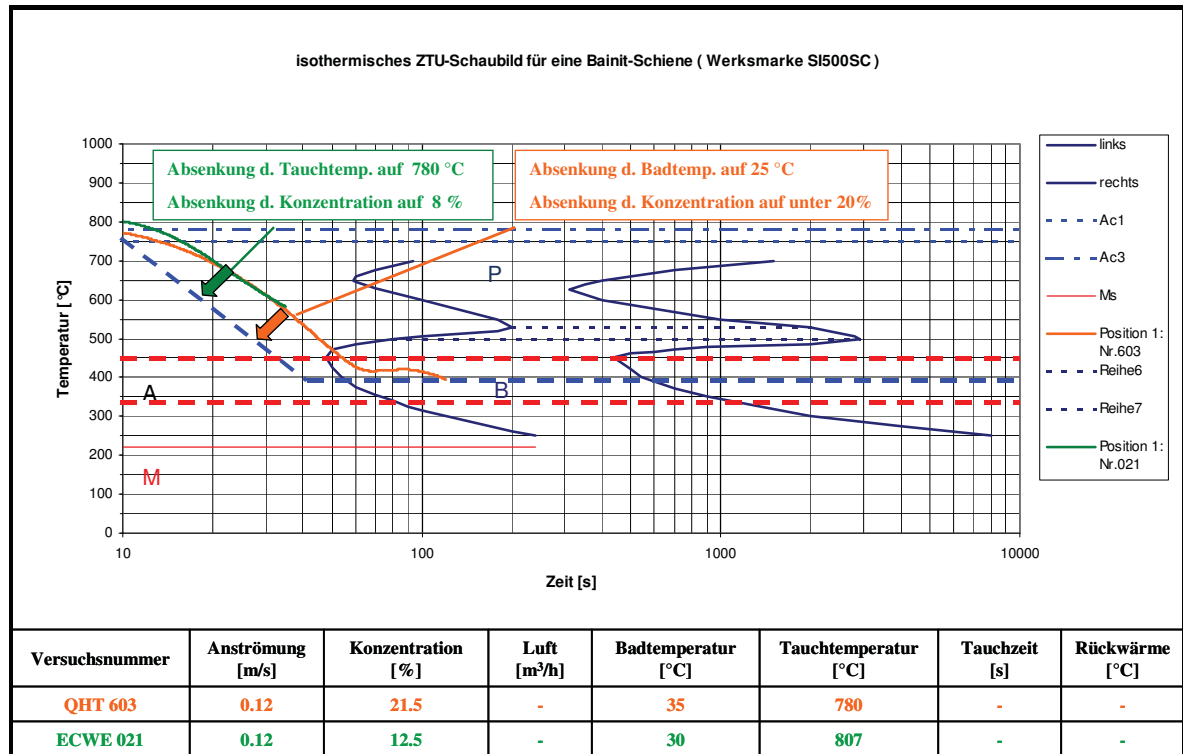
### 4.2.2.3 Vergleich der Härtemittel

Härtemittel Prozessparameter	Aquaquench EC/WE	Feroquench AP-2
Konzentration	8 %	> 12 %
Badtemperatur	30 °C	30 °C
Luft	Ja	Ja
Tauchzeit	150 s	150 s
Dampffilm	stabil	stabil
Gefüge	Feinperlitisch, kein Fremdgefüge	Feinperlitisch, kein Fremdgefüge
Härte ( in 10 mm Tiefe)	365 HB	365 HB

**Tabelle 4.8: Aquaquench EC/WE und Feroquench AP-2 im Vergleich**

**Tabelle 4.8** zeigt, dass sich die Härtemittel Aquaquench EC/WE und Feroquench AP-2 sehr gut für das HSH<sup>®</sup>-Verfahren eignen. Allerdings benötigt man bei Feroquench AP-2 eine Mindestkonzentration von 12 %.

Dies hat den Nachteil, dass trotz Wegschalten der Luftzufuhr, die Abkühlgeschwindigkeit bei dieser Konzentration für den Einsatz beim DOBAIN<sup>®</sup>-Verfahren zu niedrig wäre.



**Bild 4.46:** Aquaquench EC/WE und Breox Quenchant HT im Vergleich

**Bild 4.46** zeigt, dass die Abkühlkurven von Aquaquench EC/WE (grüne Kurve) und Breox Quenchant HT (orange Kurve) mit den angeführten Prozessparametern zwischen 700 und 580 °C deckungsgleich sind.

Würde man nun die Badtemperatur von einer Breox Quenchant HT – Mischung, die eine Konzentration von weniger als 20 % hat, auf 25 °C absenken und das Schienenstück bei der ersten Tauchung ganz in das Abschreckbad eintauchen, um im Anschluss eine Intervalltauchung durchzuführen, könnte man die für das DOBAIN<sup>®</sup>-Verfahren notwendige Temperaturführung erreichen. Diese Temperaturführung ist im Diagramm (**Bild 4.46**) durch die blau-gestrichelte Linie im Groben dargestellt und wird derzeit beim DOBAIN<sup>®</sup>-Prozess angewendet.

Denselben Effekt erreicht man, wenn eine Aquaquench EC/WE – Mischung von 8 %, mit einer Badtemperatur von 30 °C für eine, mit einer Volltauchung eingeleitete, Intervalltauchung verwendet wird. Die Tauchtemperatur sollte vor der ersten Tauchung 780 °C betragen.

Durch Zuschalten der Luftzufuhr könnte man mit diesen Prozessparameter auch ohne weiteres den HSH<sup>®</sup>-Prozess fahren. Dies wäre bei Breox Quenchant HT nicht möglich.

Somit ist Aquaquench EC/WE das einzige der untersuchten Härtemittel, mit dem durch wahlweise Verwendung der Luftzufuhr, beide Abschreckverfahren durchgeführt werden könnten.

## 5 Diskussion und Ausblick

Bei der Herstellung von sowohl perlitischen als auch bainitischen Schienen in einer stabilen Dampfhaupphase stellen sich aufgrund der in Kapitel 1 beschriebenen Ausgangslage folgende Fragen:

- Wie kann der Abschreckprozess beim HSH<sup>®</sup>-Verfahren noch weiter optimiert werden?
- Kann man mit polymeren Abschreckmitteln unter Ausnützung einer stabilen Dampfhaupphase Abkühlgeschwindigkeiten erreichen, welche die Herstellung einer bainitischen Schiene durch eine kontinuierliche Abkühlung ermöglichen?
- Ist es möglich, ein homogenes Gefüge aus unterem Bainit ohne Anteile von Fremdgefüge (Martensit, oberem Bainit, Perlit) zu erreichen?
- Kann man trotz einer stabilen Dampfhaupphase die für eine isotherme Umwandlung benötigten, hohen Abkühlgeschwindigkeiten erreichen.
- Können die Prozessparameter so variiert werden, dass beide Schienenarten mit ein und demselben Härtemittel hergestellt werden können?

Nach insgesamt 310 Quenchomat-Versuchen und 100 Versuchen auf der 2m-Anlage, kann man zusammenfassend folgende Schlüsse ziehen.

### • Perlitische Schiene

- Die minimale Dauer des Abschreckprozesses ist durch das kontinuierliche ZTU-Schaubild für die HSH<sup>®</sup>-Schiene (**Bild 1.1**) begrenzt. Daraus folgt, dass der Handlungsfreiraum bei der Optimierung der Behandlungszeit stark eingeschränkt ist. Eine zu schnelle Abkühlung hat zur Folge, dass sich am Rand der Schiene bereits ein Bainitsaum bildet, bzw. bei noch schnellerer Abkühlung sich bainitische und martensitische Fremdgefüge über den ganzen Schienenquerschnitt bilden (**Bild 1.2**).
- Die Abschreckintensität von polymeren Abschreckmittel ist sehr stark von ihrer Konzentration abhängig. Daher ist es naheliegend das Schwergewicht der Prozessoptimierung auf die Senkung der Stoffmengenkonzentration des Härtemittels im Härtemedium zu legen, da dies den Verbrauch an Härtemittel und somit die Produktionskosten senkt.



Aus diesem Gesichtspunkt schnitt das Härtemittel Aquaquench EC/WE im Vergleich zu den anderen getesteten Härtemitteln am besten ab, da es unter Luftzufuhr schon bei einer Konzentration von 8 % eine stabile Dampffilmphase bildet. Bei Feroquench AP-2 ist dies erst ab 12 % der Fall.

- Die Einbringung von Luft in das Abschreckbad begünstigt ebenfalls die Bildung einer stabilen Dampfhautphase. Aquaquench EC/WE ist das einzige, der getesteten Härtemittel, das schon bei einer Konzentration von 8 %, mit Luftzufuhr eine stabile Dampffilmphase bildet und ohne Luftzufuhr sofort in eine Kochphase übergeht, deren Abkühlgeschwindigkeit für das DOBAIN<sup>®</sup>-Verfahren hoch genug ist.

- **Bainitische Schiene**

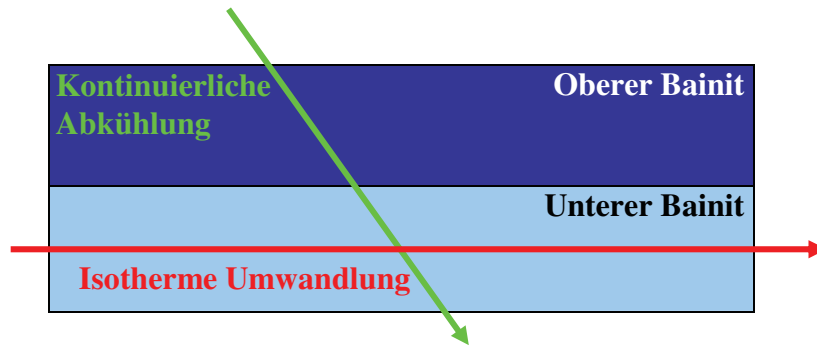
- a) kontinuierliche Abkühlung

Aus **Bild 1.3** ist ersichtlich, dass sich alle Abkühlungskurven vom Schienenrand bis zum Schienenkern in einem Zeitkorridor von 200 bis 600 Sekunden befinden müssen. Daraus ergeben sich drei wichtige Punkte, die in dieser Arbeit erörtert werden konnten:

- 1) Die Behandlungszeiten bei einer kontinuierlichen Abkühlung würden über 400 s betragen.
- 2) Mit polymeren Abschreckmitteln kann man, unter Ausnutzung einer stabilen Dampfhautphase, so niedrige Abkühlgeschwindigkeiten nicht erreichen. Die Abkühlgeschwindigkeit müsste in etwa der einer Luftabkühlung entsprechen.
- 3) Es ist nicht möglich in einer stabilen Dampffilmphase, ein homogenes Gefüge aus unterem Bainit ohne Anteile von Martensit, oberem Bainit und Perlit zu erreichen.

Bei der kontinuierlichen Abkühlung durchläuft die Abkühlkurve von oben nach unten zuerst das Gebiet des Oberen Bainits und dann das Gebiet des unteren Bainits. Deshalb bilden sich auch immer beide Gefüge aus.

Bei der isothermen Umwandlung durchläuft die Abkühlkurve nur das Gebiet des unteren Bainits von links nach rechts. Dadurch ist es möglich ein Gefüge aus reinem unterem Bainit zu erzeugen.



**Bild 5.1:** Schematische Darstellung der Lage der Abkühlkurven im Bainitgebiet

b) isotherme Umwandlung

**Bild 1.4** zeigt, dass der Temperaturbereich für eine isotherme Umwandlung zwischen 300 und 400 °C liegt. Die Ergebnisse der Versuche auf der 2m-Anlage lassen folgende Schlüsse zu:

- 1) Die Abkühlgeschwindigkeiten, die in einer stabilen Dampfhautphase erreicht werden können, sind nicht hoch genug, um eine Intervalltauchung durchführen zu können. Die Abkühlkurven, die an der Temperaturmessposition 2 aufgenommen werden, durchlaufen nämlich bereits das Perlitgebiet im isothermischen ZTU-Schaubild (**Bild 4.43**).
- 2) Durch Wegschalten der Luftzufuhr können bei dem Härtemittel Aquaquench EC/WE, bei einer Konzentration von 8 %, in der Kochphase bereits Abkühlgeschwindigkeiten erreicht werden, die eine Intervalltauchung ermöglichen (**Bild 4.46**).

Somit ist das Härtemittel Aquaquench EC/WE, von allen auf der 2m-Anlage getesteten Mitteln das einzige, das durch eine einfache Änderung der Prozessparameter, nämlich dem Ein- und Ausschalten der Luftzufuhr, bei beiden Verfahren eingesetzt werden könnte.

Abschließend kann man sagen, dass der Quenchomat für die grobe Charakterisierung von wassermischbaren polymeren Härtemitteln bestens geeignet ist. Die Ergebnisse der Quenchomat-Versuche bilden eine gute Basis für die Vorbereitung von Versuchen auf der 2m-Anlage. Aus den Ergebnissen der Versuche auf der 2m-Anlage lassen sich prozessbestimmende Kernaussagen ableiten, die bei Versuchen auf der Produktionsanlage verifiziert werden können.

Allerdings muss man immer berücksichtigen, dass es sich sowohl beim Quenchomat als auch bei der 2m-Anlage um Versuchsanlagen handelt, die unter idealen Laborbedingungen betrieben werden. So stimmt zum Beispiel der Grad der Verzunderung und die Oberflächenbeschaffenheit der Zunderschicht, bzw. deren Verteilung über die Schienenoberfläche von Schienenproben die auf der 2m-Anlage eingesetzt werden selten mit den Prozessbedingungen in der Produktion überein. Beim HSH<sup>®</sup>-Prozess muss der Dampffilm während des Abschreckprozesses auch unter diesen Oberflächeneinflüssen stabil bleiben. Die Oberflächeneinflüsse aufgrund der Verzunderung sind auf der 2m-Anlage wesentlich geringer. Versuche der voestalpine Schienen GmbH zeigten, dass das Härtemittel Aquaquench EC/WE im Gegensatz zum Härtemittel Feroquench AP-2 unter realen Produktionsbedingungen ein instabiles Verhalten zeigen kann. Dadurch ist ein praktischer Einsatz von Aquaquench EC/WE in der Produktion aus derzeitiger Sicht bedenklich und nochmals genau zu überprüfen.

## 6 Zusammenfassung

Bei der voestalpine Schienen GmbH werden zwei Arten von kopfgehärteten Schienen für höchste Ansprüche im Eisenbahnverkehr durch eine Wärmebehandlung im Tauchverfahren hergestellt (**Tabelle 6.1**):

Schienenart	Prozess	Härtemittel	Abschreckvorgang	Gefüge
HSH	Kopftauchung; kontinuierliche Umwandlung	<b>Polymer AP:</b> Wassermischbares Polymer; <b>Sodiumpolyacrylat SPA</b>	In der Dampfhaupphase	feinperlisch
DOBAIN	Intervalltauchung; quasi-isotherme Umwandlung	<b>Breox Quenchant HT:</b> Wassermischbares Polymer; <b>Polyalkylenglykol PAG</b>	In der Kochphase	bainitisch: unterer Bainit

**Tabelle 6.1: Ausgangssituation**

Abgesehen von der unterschiedlichen Prozessführung - kontinuierlich beim HSH<sup>®</sup>-Prozess und isotherm beim Bainit-Prozess – sind die Eigenschaften beider im Einsatz stehenden Härtemittel verschieden. Neben diesen Härtemitteln stehen drei weitere Härtemittel, deren Abschreckverhalten in einem Vorprojekt (Metallurgie 06/01) [14] getestet wurde, für weitere Untersuchungen zur Verfügung (**Tabelle 6.2**).

Härtemittel	Breox Quechant HT	Polymer AP	Feroquench AP-2	Aquaquench 631	Aquaquench EC/WE
Typ	PAG	SPA	SPA	SPA	PVP

**Tabelle 6.2: Aufstellung der getesteten Härtemittel**

Ziel der Diplomarbeit ist die Auswahl eines Härtemittels und die Ermittlung der optimalen Prozessparameter zur Erzeugung von sowohl perlischen als auch bainitischen Schienen in einer stabilen Dampfhaupphase (**Tabelle 1.2**).

Das Abschreckverhalten von polymeren, wassermischbaren Härtemitteln kann durch folgende Prozessparameter entscheidend beeinflusst werden:

- Anströmintensität des Härtemediums an die Schiene
- Temperatur des Härtebades
- Konzentration des Härtebades
- Zugabe von Luft in das Härtemedium bzw. von der zugeführten Luftmenge

Der Einfluss der Prozessparameter auf das Abschreckverhalten der verschiedenen Härtemittel wurde an zwei Versuchsanlagen, dem Quenchomat und der 2m-Anlage untersucht.

Während es am Quenchomat möglich ist polymere wassermischbare Härtemittel auf ihre grundsätzliche Eignung für die Schienenkopfhärtung zu testen, können auf der 2m-Anlage Schienenstücke unter produktionsnahen Bedingungen gehärtet werden.

In den praktischen Versuchen wurden Schienenstücke mit Thermoelementen bestückt um die Abkühlcharakteristik des Härtemediums und die Temperaturverläufe im Schienenstück zu bestimmen. Weiters wurden die Auswirkung auf die Gefügeumwandlung und die daraus resultierende Verteilung der Härtewerte im Schienenquerschnitt untersucht.

Die auf den zwei Versuchsanlagen durchgeführten Versuche ergaben folgende Ergebnisse, die mit realen Produktionsbedingungen verglichen wurden (**Tabelle 6.3**):

Härtemittel	Art	Beurteilung nach 310 Quenchomat-Versuchen	Beurteilung nach 100 Versuchen auf der 2m-Anlage		Beurteilung nach der Erprobung unter realen Produktionsbedingungen	
			Für HSH®-Verfahren geeignet	Für DOBAIN®-Verfahren geeignet	Für HSH®-Verfahren geeignet	Für DOBAIN®-Verfahren geeignet
Breox Quenchant HT	PAG	Bildet selbst bei sehr hohen Konzentrationen und Temperaturen keinen stabilen Dampf Film	<b>Nein</b>	<b>Ja</b>	<b>Nein</b>	<b>Ja</b>
Polymer AP	SPA	Stabiler Dampf Film bei folgenden Prozessparametern: - Konzentration HSH®-Anlage - Badtemperatur 30 °C - Luft Ja	<b>Ja</b>	<b>Nein</b>	<b>Ja</b>	<b>Nein</b>
Feroquench AP-2	SPA	Stabiler Dampf Film bei folgenden Prozessparametern: - Konzentration 12 % - Badtemperatur 30 °C - Luft Ja	<b>Ja</b>	<b>Möglicherweise:</b> Bei niedriger Konzentration (< 12 %), ohne Luftzufuhr	<b>Ja</b>	<b>In Erprobung</b>
Aquaquench 631	SPA	Bildet extrem harte und schwerlösliche Ablagerungen und ist daher für den praktischen Einsatz nicht geeignet	<b>Nein</b>	<b>Nein</b>	<b>Nein</b>	<b>Nein</b>
Aquaquench EC/WE	PVP	Stabiler Dampf Film bei folgenden Prozessparametern: - Konzentration: 8% - Badtemperatur 30 °C - Luft Ja	<b>Ja</b>	<b>Möglicherweise:</b> Bei niedriger Konzentration (= 8 %), ohne Luftzufuhr	Neigt zu instabilen Verhalten in der Dampf Filmphase, verursacht durch Oberflächeneinfluss der Verzunderung	<b>Grundsätzlich ja!</b> Hat allerdings sehr aggressive Kochphase <b>Problem:</b> -Lärmbelastung -Sicherheit am Arbeitsplatz

**Tabelle 6.3: Überblick über die Ergebnisse der durchgeführten Versuche**

Abschließend kann man aus den Versuchsergebnissen eindeutig ableiten, dass die Herstellung eines bainitischen Gefüges (unterer Bainit, ohne Fremdgefüge) in einer stabilen Dampf Filmphase grundsätzlich nicht möglich ist, da der Dampf Film bis 300 °C nicht stabil bleibt und auf Grund der niedrigen Abkühlgeschwindigkeit im Inneren des Schienenkopfes immer mit einem Perlitischen Gefüge zu rechnen ist. Künftige Untersuchungen sollten sich daher ausschließlich mit der Herstellung bainitischer Schienen in der Kochphase befassen.

## Literaturverzeichnis

- [1] Segerberg: Eigenschaften und Verträglichkeit von Polymerabschreckmitteln, München: Carl Hanser Verlag, 1987, S 50ff
- [2] Bleck, W. (Hrsg.): Werkstoffkunde Stahl für Studium und Praxis. 2. Auflage, Verlag Mainz, Aachen, 2004. ISBN 3-89653-820-9, S.125 bis S.132
- [3] Bleck, W. (Hrsg.): Werkstoffkunde Stahl für Studium und Praxis. 2. Auflage, Verlag Mainz, Aachen, 2004. ISBN 3-89653-820-9, S.137
- [4] Bleck, W. (Hrsg.): Werkstoffkunde Stahl für Studium und Praxis. 2. Auflage, Verlag Mainz, Aachen, 2004. ISBN 3-89653-820-9, S.183 bis S.185
- [5] Bleck, W. (Hrsg.): Werkstoffkunde Stahl für Studium und Praxis. 2. Auflage, Verlag Mainz, Aachen, 2004. ISBN 3-89653-820-9, S.153 bis S.154
- [6] Bleck, W. (Hrsg.): Werkstoffkunde Stahl für Studium und Praxis. 2. Auflage, Verlag Mainz, Aachen, 2004. ISBN 3-89653-820-9, S.232 bis S.234
- [7] De Boer H., Bienzeisler H., Müsgen B., Schmedders H., Wick K.: Verbesserung des Betriebsverhaltens von Eisenbahnschienen durch Feinperlitisieren des Schienenkopfes. Stahl und Eisen 112 (1992) Nr.10. , S. 101 bis S.107
- [8] Panzenböck, M.: Werkstoffprüfung metallischer Werkstoffe, Vorlesungsskriptum, Institut für Metallkunde und Werkstoffprüfung, Montanuniversität Leoben, WS2001/2002
- [9] Mueller, Edward R.: A look at the polymers – past, present and future
- [10] Totten, G. E., Bates, C. E., Clinton, N. A.: Handbook of Quenchants and Quenching Technology, OH: ASM International, 1993. ISBN 0-87170-448-X, S.163f
- [11] Segerberg: Prüfung von Abschreckmitteln für das Härten: Produktionsbedingungen entscheidend für das Abschreckvermögen, In: Fachberichte Hüttenpraxis Metallverarbeitung, 1987, Vol. 25, No. 9, S. 806 bis S. 809
- [12] Wolverine Tube, Inc., Online im Internet: URL: [www.wlv.com/products/databook/databook.pdf](http://www.wlv.com/products/databook/databook.pdf) (Stand 2001, Abruf 29.3.2002)
- [13] Beitz, H., Th., Beitz: Abschreckmittel für das Induktivhärten: Anwendung und Pflege. BHM 150 (2005), Heft 3, S.97
- [14] Hasenhündl R., Potesser M., Tubicanec A. und Vanovsek W.: Auswahl von polymeren Härtemitteln und Ermittlung der optimalen Prozessparameter für die Schienenkopfhärtung. Projektarbeit Metallurgie WS01/02, S.64 bis S.66
- [15] HSH<sup>®</sup>-Handbuch, Rev. 0, 13.07.2001, Fa. VA Schiene

- [16] Produktdatenblatt Polymer AP, Fa. Petrofer
- [17] Produktdatenblatt Breox Quenchant HAT, Fa. Inspec UK
- [18] Produktdatenblatt Feroquench AP-2, Fa. Petrofer
- [19] Produktdatenblatt Aquaquench 631, Fa. Houghton-Durferrit
- [20] Produktdatenblatt Aquaquench EC/EW, Fa. Houghton-Durferrit
- [21] Liščić, B, Tenst, H. M., Luty W., Theory and Technology of Quenching, Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 1992. ISBN 3-540-52040-6, S. 209
- [22] Totten, G. E., Bates, C. E., Clinton, N. A.: Handbook of Quenchants and Quenching Technology, OH: ASM International, 1993. ISBN 0-87170-448-X, S.211 und S.295
- [23] Girsch , G., R., Heyder: Kopfgehärtete HSH<sup>®</sup>-Schienen für den Hochgeschwindigkeitsverkehr, in: Eisenbahningenieur EL (54) 10/2003, S.6 bis S.15
- [24] Pointner, P., N., Frank: Rad/Schiene Kontakt: Rollkontaktermüdung an Schienen – Werkstoff oder Beanspruchung?. Eisenbahningenieur 50 (1999) Heft 3, S.22 bis S.26
- [25] [www.voestalpine.com/schienen/de/op2/research\\_development/projects/bainitic\\_rail](http://www.voestalpine.com/schienen/de/op2/research_development/projects/bainitic_rail) (Stand 2006, Abruf 04.07.2006 )
- [26] Bargel, H., Schulze, Günter, Werkstoffkunde, 7. Aufl., Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2000. ISBN 3-540-66855-1, S. 159
- [27] Frank, N., P., Pointner: High performance rails for heavy haul traffic. Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Heavy Haul Conference, Brisbane, 2001, pp. 467 – 296
- [28] Pointner, P., B., Eisenkolb, A., Jöller: Die Bainitische Schiene als eine Antwort auf die Rollkontaktermüdung, Tagungsverband ÖVG-Tagung, Fahrwegoptimierung des Rad/Schiene-Systems – Technologien und Wirtschaftlichkeit, Salzburg, Sept. 2000

## Tabellen- und Abbildungsverzeichnis

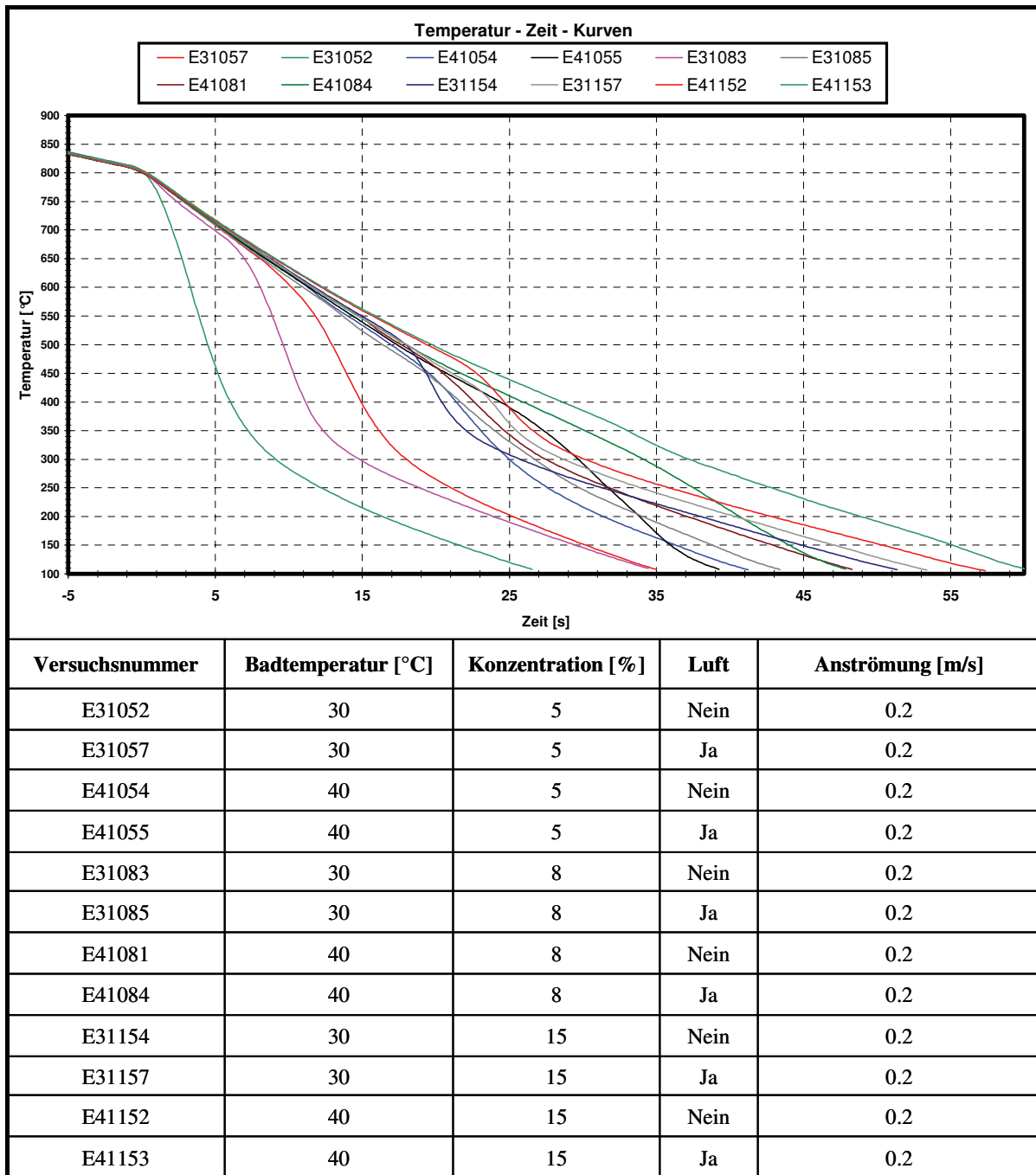
Tabelle 1.1: Ausgangssituation.....	5
Tabelle 1.2: Aufgabenstellung.....	6
Tabelle 2.1: Phasenumwandlung bei Abkühlung der Austenitphase eines unlegierten Stahles mit ca. 0,08 Massen-% Kohlenstoff [2].....	12
Tabelle 2.2: Gefüge in Abhängigkeit vom C-Gehalt.....	14
Tabelle 2.3: Gefügehärte [26].....	35
Tabelle 2.4: Eigenschaftsvergleich HSH-DOBAIN [25].....	35
Tabelle 3.1: Stahlsorten voestalpine Schienen GmbH.....	53
Tabelle 3.2: Aufstellung der untersuchten Härtemittel.....	63
Tabelle 4.1: Standardabweichungen.....	75
Tabelle 4.2: Härtewerte der Schliiffprobe Nr.052 .....	79
Tabelle 4.3: Härtemittel im Vergleich.....	92
Tabelle 4.4: Härtewerte der Schliiffprobe Nr.072.....	94
Tabelle 4.5: Härtewerte der Schliiffprobe Nr.174.....	96
Tabelle 4.6: Härtewerte der Schliiffprobe Nr.193.....	97
Tabelle 4.7: Härtewerte der Schliiffprobe Nr.402.....	99
Tabelle 4.8: Aquaquenench EC/WE und Feroquenench AP-2 im Vergleich.....	104
Tabelle 6.1: Ausgangssituation.....	111
Tabelle 6.2: Aufstellung der getesteten Härtemittel.....	111
Tabelle 6.3: Überblick über die Ergebnisse der durchgeführten Versuche.....	112
Bild 1.1: Kontinuierliches ZTU-Schaubild für eine HSH <sup>®</sup> -Schiene (Werksmarke SI79120)..	8
Bild 1.2: Kontinuierliches ZTU-Schaubild für eine HSH <sup>®</sup> -Schiene (Werksmarke SI79120)..	9
Bild 1.3: Kontinuierliches ZTU-Schaubild für eine DOBAIN <sup>®</sup> -Schiene (Werksmarke SI500SC).....	9
Bild 1.4: Isothermes ZTU-Schaubild für eine DOBAIN <sup>®</sup> -Schiene (Werksmarke SI500SC).....	10
Bild 2.1: Bildung der wichtigsten Gefüge in unlegierten Stählen.....	13
Bild 2.2: Lichtmikroskopische Darstellung perlitischer Gefüge.....	15
Bild 2.3: Ausschnitt aus dem metastabilen Eisen-Kohlenstoff-Diagramm.....	17
Bild 2.4: Keimbildung und Keimwachstum von Perlit [3].....	19
Bild 2.5: Lichtmikroskopische Darstellung bainitischer Gefüge.....	22
Bild 2.6: Kohlenstoffarmes Bainitgefüge („acicular ferrite“.....)	23
Bild 2.7: Schematische Einteilung der Bildungsbereiche verschiedener Bainitgefüge.....	24
Bild 2.8: Schematische Darstellung der Bildung des oberen und unteren Bainits [4].....	25
Bild 2.9: Widmannstätten Ferrit.....	26
Bild 2.10: Verschiedene Morphologien des Martensits in Fe-C-Legierungen.....	27
Bild 2.11: Umwandlung des kubisch-flächenzentrierten Gitters in das kubisch-raumzentrierte Gitter durch Scher- und Zugkräfte [5].....	29
Bild 2.12: Wichtige Verfahren der Wärmebehandlung von Stahl.....	31
Bild 2.13: Schematische Temperatur-Zeit-Folge einer Wärmebehandlung mit charakteristischen Kenngrößen [6].....	32
Bild 2.14: Temperaturbereiche verschiedener Glühbehandlungen für Fe-C-Legierungen.....	33
Bild 2.15: Gefügebild einer feinperlitischen Schiene (400fach, HNO <sub>3</sub> ).....	36
Bild 2.16: Gefügebild einer bainitische Schiene (400fach, HNO <sub>3</sub> ).....	36
Bild 2.17: Strukturformel PVA [8].....	37
Bild 2.18: Strukturformel PAG [9].....	38



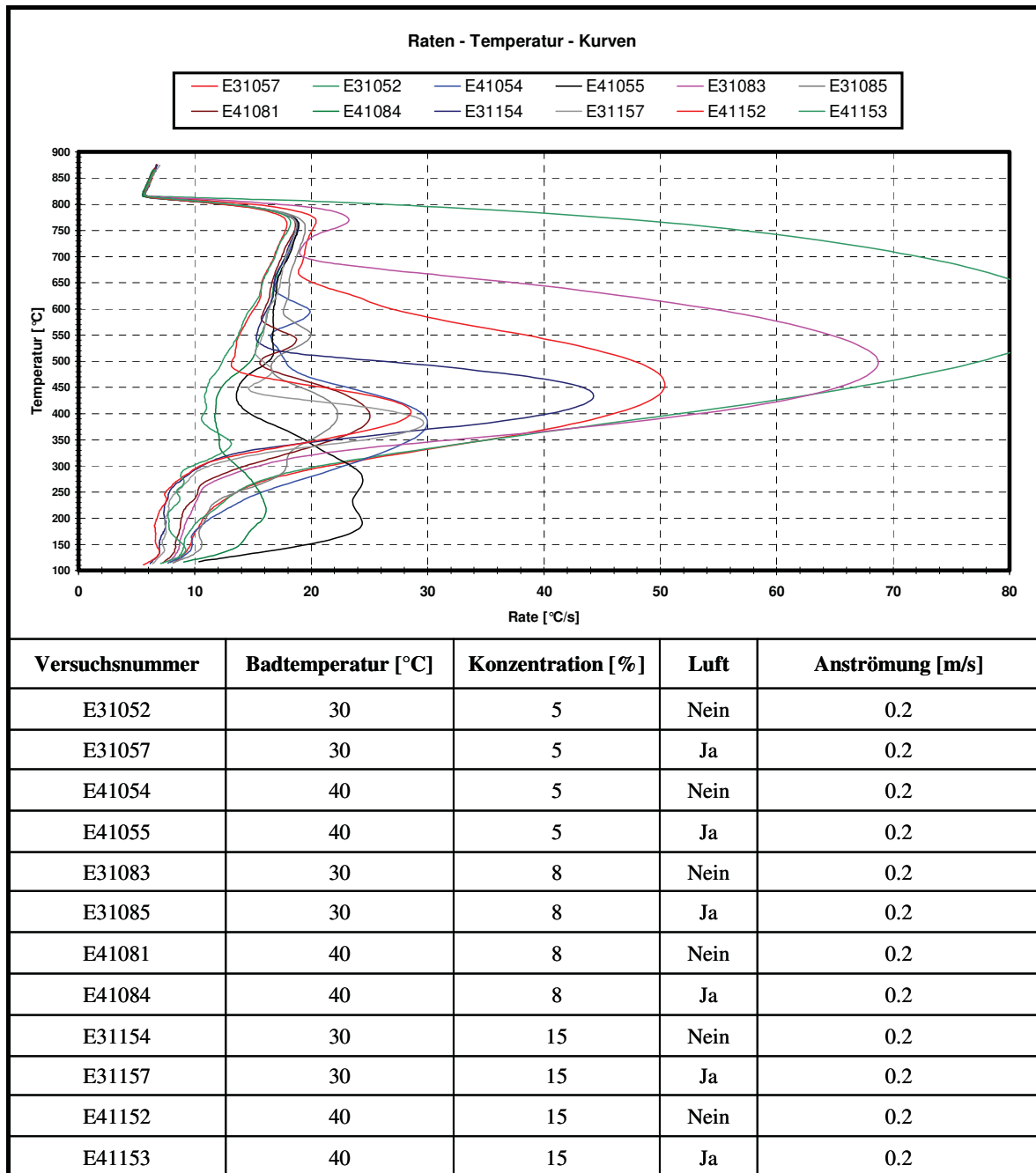
Bild 2.19: Strukturformel PVP [9].....	38
Bild 2.20: Strukturformel SPA [9].....	39
Bild 2.21: Abkühlungskurven eines verunreinigten polymeren Abschreckmittels mit unterschiedlichem Alter [10].....	41
Bild 2.22: Die drei Phasen des Abschreckprozesses [10].....	42
Bild 2.23: Schema und reales Bild der Dampfhaut [12].....	43
Bild 2.24: Schema und reales Bild der Kochphase [12].....	43
Bild 2.25: Schema und reales Bild der Konvektionsphase [12].....	44
Bild 2.26: Wirkungsweise von Polymerlösungen [13].....	45
Bild 2.27: Einfluss des Mechanismus der Isolierfilmbildung auf den Wärmeübergang [13]..	45
Bild 2.28: Einflussparameter Temperatur [14].....	46
Bild 2.29: Einflussparameter Konzentration [14].....	47
Bild 2.30: Einflussparameter Luft [14].....	48
Bild 2.31: Einfluss der Strömungsgeschwindigkeit [11].....	49
Bild 3.1: Prinzip der Schienenkopfhärtung [15].....	54
Bild 3.2: Abschreckanlage Quenchomat.....	56
Bild 3.3: Prüfkörper links und Größenvergleich Probe-3 ¼ “ Diskette recht [21].....	57
Bild 3.4: Abschreckanlage Quenchomat mit Ausgleichsbehälter und Thermostat.....	58
Bild 3.5: Pumpe mit Mengenregelung .....	59
Bild 3.6: Luftzufuhr in die Ansaugöffnung.....	59
Bild 3.7: 2m-Versuchsanlage.....	60
Bild 3.8: Position der Thermoelemente im Schienenkopf.....	62
Bild 3.9: Schienenstück mit Thermoelementen.....	62
Bild 3.10: Versuchsschiene im Abschreckbad.....	62
Bild 3.11: 3D-Versuchsmatrix.....	65
Bild 3.12: Laptop mit Dasylab.....	67
Bild 3.13: Diagramm Spannung- Durchflussmenge-Anströmgeschwindigkeit.....	70
Bild 4.1: Reproduzierbarkeit Temperatur-Kühlgeschwindigkeit.....	74
Bild 4.2: Reproduzierbarkeit Temperatur-Zeit.....	75
Bild 4.3: Zeit-Temperatur-Kurven des Versuches ECWE Nr.052.....	76
Bild 4.4: Raten-Temperatur-Kurven des Versuches ECWE Nr.052.....	77
Bild 4.5: Zeit-Temperatur-Kurve des Versuches ECWE Nr.052 im ZTU-Schaubild für eine HSH <sup>®</sup> -Schiene.....	78
Bild 4.6: Schliffprobe Nr.052 ( 400-fach ).....	79
Bild 4.7: Schliffprobe Nr.052 ( 100-fach ).....	79
Bild 4.8: Lage der Prüfpunkte.....	79
Bild 4.9: Schliffprobe Nr.052 ( 1-fach ).....	79
Bild 4.10: Referenzkurve im Temperatur-Abkühlraten-Diagramm.....	80
Bild 4.11: Referenzkurve im Temperatur-Zeit-Diagramm.....	81
Bild 4.12: Polymer AP – Temperatur- und Konzentrationseinfluss.....	82
Bild 4.13: Polymer AP – Lufteinfluss.....	82
Bild 4.14: Polymer AP - Einfluss der Anströmgeschwindigkeit.....	83
Bild 4.15: Quenchant HT – Temperatur- und Lufteinfluss.....	84
Bild 4.16: Quenchant HT – Konzentrationseinfluss.....	84
Bild 4.17: Feroquench AP-2 – Temperatur- und Konzentrationseinfluss.....	85
Bild 4.18: Feroquench AP-2 – Lufteinfluss.....	86
Bild 4.19: Feroquench AP-2 - Einfluss der Anströmgeschwindigkeit.....	86
Bild 4.20: Aquaquench 631 – Temperatur- und Konzentrationseinfluss.....	87
Bild 4.21: Aquaquench 631 – Lufteinfluss.....	88
Bild 4.22: Aquaquench EC/WE – Temperatur- und Konzentrationseinfluss.....	89

Bild 4.23: Aquaquench EC/WE – Lufteinfluss.....	89
Bild 4.24: Aquaquench EC/WE – Einfluss der Anströmgeschwindigkeit.....	90
Bild 4.25: Raten-Temperatur-Kurven im Vergleich.....	91
Bild 4.26: Zeit-Temperatur-Kurven im Vergleich.....	92
Bild 4.27: Referenzkurven im Temperatur-Abkühlraten-Diagramm.....	93
Bild 4.28: Referenzkurven im ZTU-Diagramm.....	94
Bild 4.29: Lage der Prüfpunkte.....	94
Bild 4.30: Schliffprobe Nr.072 ( 1-fach ); feinperlitisch.....	94
Bild 4.31: Raten-Temperatur-Kurven des Versuches FAP Nr.173.....	95
Bild 4.32: Zeit-Temperatur-Kurve des Versuches FAP Nr.173 im ZTU-Schaubild für eine HSH-Schiene.....	96
Bild 4.33: Lage der Thermoelemente.....	96
Bild 4.34: Schliffprobe Nr.174; Lage der Prüfpunkte.....	96
Bild 4.35: Schliffprobe Nr.193 (400-fach).....	97
Bild 4.36: Schliffprobe Nr.193; Lage der Prüfpunkte.....	97
Bild 4.37: Raten-Temperatur-Kurven des Versuches ECWE Nr.201.....	98
Bild 4.38: Zeit-Temperatur-Kurve des Versuches ECWE Nr.201 im ZTU-Schaubild für eine HSH-Schiene.....	99
Bild 4.39: Schliffprobe Nr.402 (400-fach).....	99
Bild 4.40: Schliffprobe Nr.402; Lage der Prüfpunkte.....	99
Bild 4.41: Zeit-Temperatur-Kurve des Versuches ECWE Nr.302 im kontinuierlichen ZTU-Schaubild für eine DOBAIN-Schiene.....	101
Bild 4.42: Schliffbild und Gefüge des Versuches Nr. 304 mit eingezeichneten Thermoelementen.....	101
Bild 4.43: Zeit-Temperatur-Kurve des Versuches ECWE Nr.302 im isothermischen ZTU-Schaubild für eine DOBAIN-Schiene.....	102
Bild 4.44: Zeit-Temperatur-Kurve des Versuches QHT Nr.607 im ZTU-Schaubild für eine HSH-Schiene.....	103
Bild 4.45: Zeit-Temperatur-Kurve des Versuches QHT Nr. 603 im isothermischen ZTU-Schaubild für eine DOBAIN-Schiene.....	104
Bild 4.46: Aquaquench EC/WE und Breox Quenchant HT im Vergleich.....	105
Bild 5.1: Schematische Darstellung der Lage der Abkühlkurven im Bainitgebiet.....	109

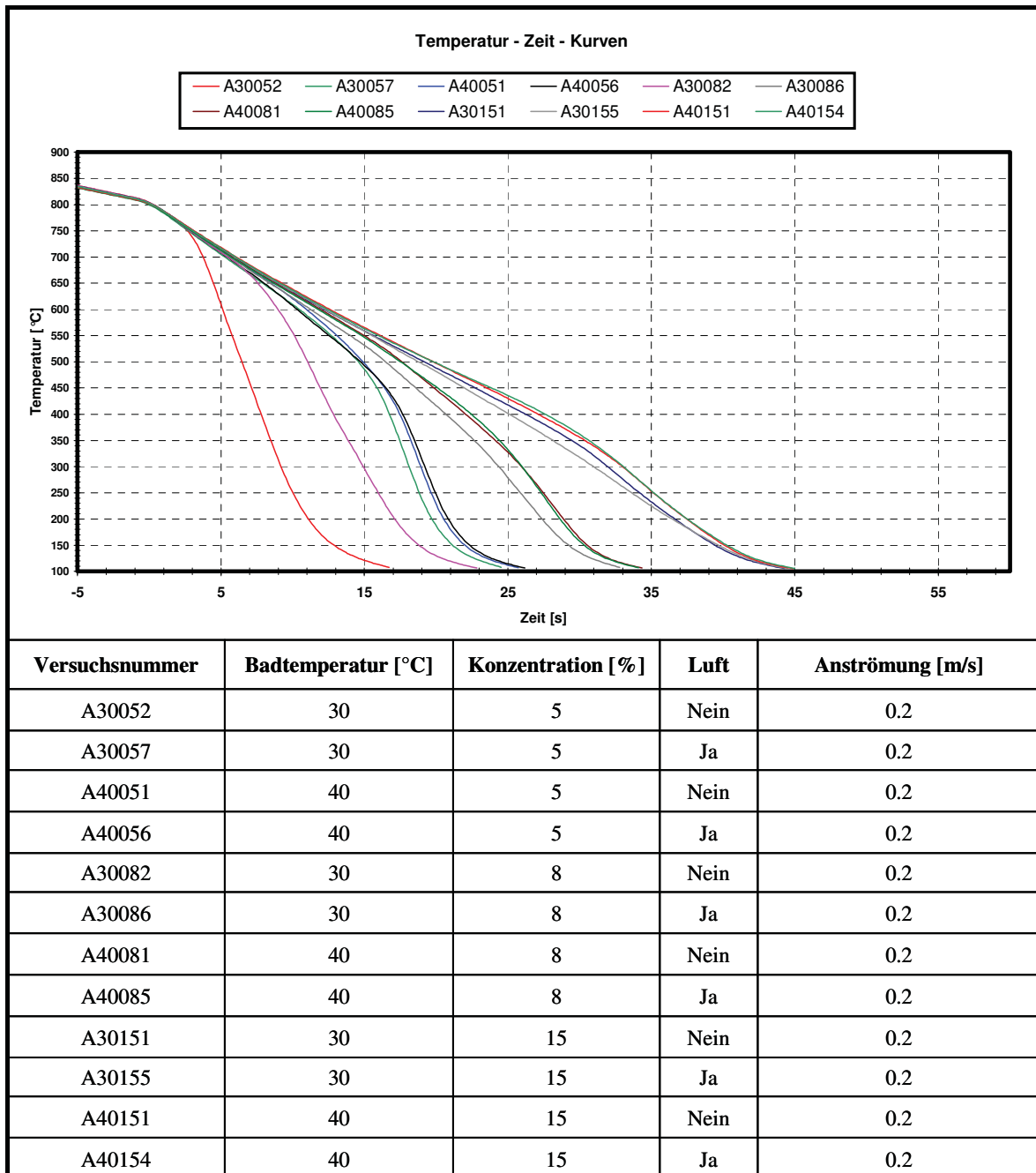
Anhang A



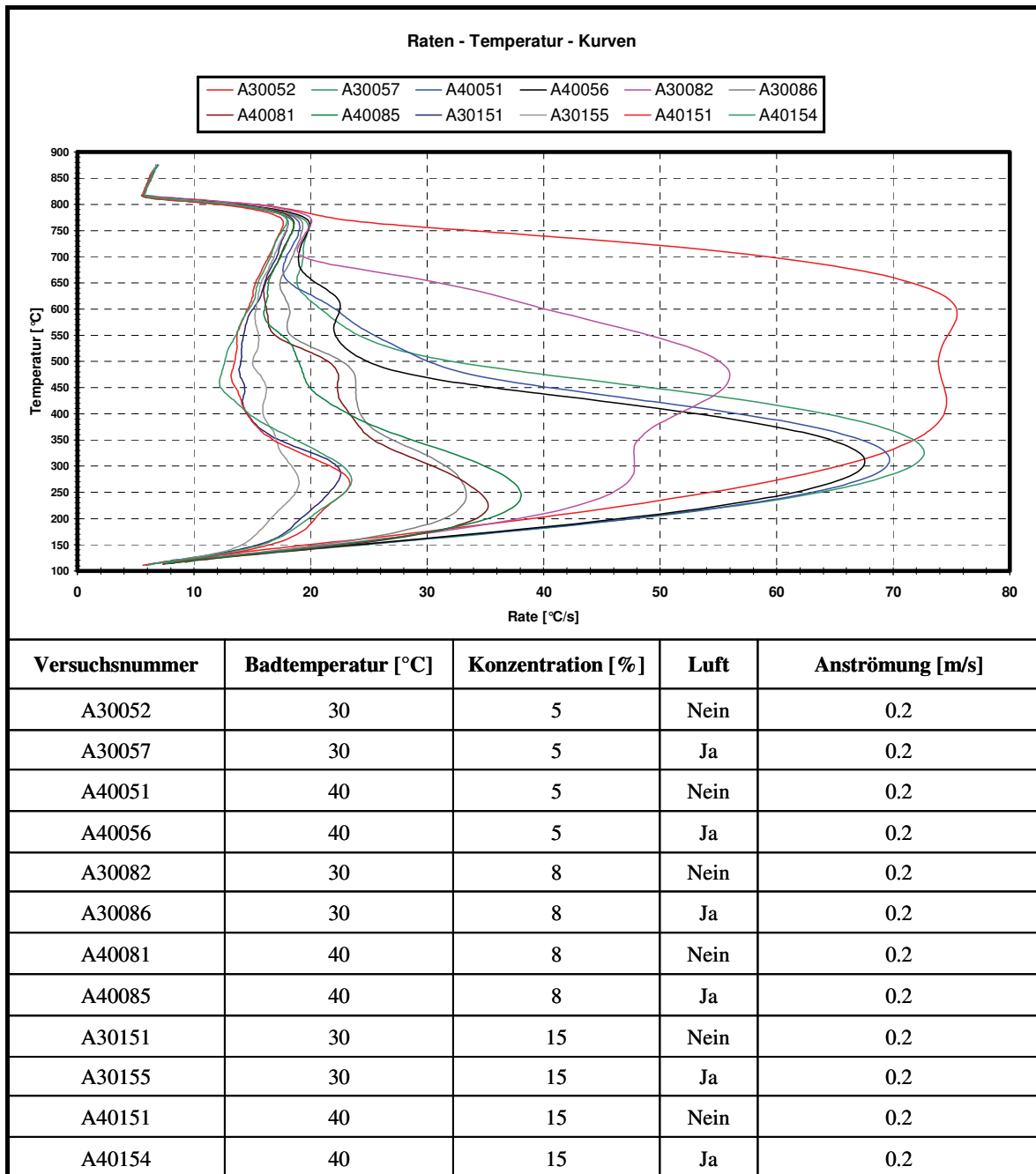
Anhang A1: Aquaquench EC/WE - Temperatur-Zeit



**Anhang A2: Aquaquench EC/WE - Temperatur-Abkühlgeschwindigkeit**



Anhang A3: Aquaquench 631 - Temperatur-Zeit



Anhang A4: Aquaquench 631 - Temperatur-Abkühlgeschwindigkeit

## Anhang B

### Übersicht über die Versuch an der 2m-Anlage:

#### B1: Polymer AP

Schiene	Polymer	Versuch Nr.:	Datum	Anströmung [m/s]	Konzentration		Luft [m³/h]	Badtemp. Thermometer [°C]	Tauchtemp. Pyrometer [°C]	Tauchzeit [s]	Rückwärme Pyrometer [°C]
					refraktometrisch [%]	viskosimetrisch [%]					
HSH	PAP	061	02.12.02	0,12	-	7,73	0,24	31,80	807,00	160,00	555,00
HSH	PAP	062	02.12.02	0,12	-	7,73	0,24	31,40	780,00	160,00	550,00
HSH	PAP	063	02.12.02	0,12	-	7,73	0,24	30,80	780,00	160,00	553,00
HSH	PAP	071	04.12.02	0,12	-	7,73	0,24	30,00	780,00	160,00	555,00
HSH	PAP	072	04.12.02	0,12	-	7,73	0,24	30,50	780,00	160,00	560,00

#### Anhang B1.1: Prozessparameter – Polymer AP

Schiene	Polymer	Versuch Nr.:	Versuchs- art	Härte						Aufwärm- zeit [min]	Halte- zeit [min]	Gefüge	
				Pos. 1 [HB]	Pos. 2 [HB]	Pos. 3 [HB]	Pos. 4 [HB]	Pos. 5 [HB]	Pos. 6 [HB]			Seigerungsbereich	Lauffläche
HSH	PAP	061	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-
HSH	PAP	062	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-
HSH	PAP	063	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-
HSH	PAP	071	met	347	351	350	346	342	342	45	15	Perlit	Perlit
HSH	PAP	072	thermo/met	351	342	347	344	340	332	45	15	Perlit	Perlit

#### Anhang B1.2: Gefüge und Härtewerte - Polymer AP

#### B2: Ferroquench AP-2

Schiene	Polymer	Versuch Nr.:	Datum	Anströmung [m/s]	Konzentration		Luft [m³/h]	Badtemp. Thermometer [°C]	Tauchtemp. Pyrometer [°C]	Tauchzeit [s]	Rückwärme Pyrometer [°C]
					refraktometrisch [%]	viskosimetrisch [%]					
HSH	FAP	171	22.01.03	0,12	6,20	-	0,12	28,80	780,00	160,00	390,00
HSH	FAP	172	22.01.03	0,12	6,20	-	-	30,50	780,00	160,00	370,00
HSH	FAP	173	22.01.03	0,12	8,00	-	0,12	29,80	780,00	160,00	390,00
HSH	FAP	174	22.01.03	0,12	8,00	-	0,12	29,70	780,00	160,00	410,00
HSH	FAP	175	22.01.03	0,12	8,00	-	0,12	30,00	780,00	160,00	400,00
HSH	FAP	181	24.01.03	0,12	8,00	-	0,12	28,70	780,00	160,00	390,00
HSH	FAP	182	24.01.03	0,12	9,50	-	0,12	29,50	780,00	160,00	370,00
HSH	FAP	183	24.01.03	0,12	9,50	-	0,12	29,80	780,00	160,00	500,00
HSH	FAP	191	26.01.03	0,12	9,50	-	0,12	30,00	780,00	160,00	400,00
HSH	FAP	192	26.01.03	0,12	10,00	-	0,12	30,00	780,00	160,00	435,00
HSH	FAP	193	26.01.03	0,12	12,00	-	0,12	30,00	780,00	160,00	530,00

#### Anhang B2.1: Prozessparameter - Ferroquench AP-2

Schiene	Polymer	Versuch Nr.:	Versuchs- art	Härte						Aufwärm- zeit [min]	Halte- zeit [min]	Gefüge	
				Pos. 1 [HB]	Pos. 2 [HB]	Pos. 3 [HB]	Pos. 4 [HB]	Pos. 5 [HB]	Pos. 6 [HB]			Seigerungsbereich	Lauffläche
HSH	FAP	171	thermo	-	-	-	-	-	-	45	-	-	-
HSH	FAP	172	thermo	-	-	-	-	-	-	45	-	-	-
HSH	FAP	173	thermo	-	-	-	-	-	-	45	-	-	-
HSH	FAP	174	met	382	374	383	381	375	369	45	-	Perlit/Martensitinseln	Perlit/unterer Bainit/obererBainit/Anlassmartensit
HSH	FAP	175	met	385	383	379	375	379	367	45	-	Perlit/Martensitinseln	Perlit/unterer Bainit/obererBainit/Anlassmartensit
HSH	FAP	181	thermo	-	-	-	-	-	-	45	-	-	-
HSH	FAP	182	thermo	-	-	-	-	-	-	45	-	-	-
HSH	FAP	183	met	-	-	-	-	-	-	45	-	Perlit/Martensitinseln	Perlit/unterer Bainit/obererBainit/Anlassmartensit
HSH	FAP	191	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-
HSH	FAP	192	met	-	-	-	-	-	-	45	15	Perlit/Martensitinseln	Perlit/unterer Bainit/obererBainit/Anlassmartensit
HSH	FAP	193	met	-	-	-	-	-	-	45	15	Perlit	Perlit

#### Anhang B2.1: Gefüge und Härtewerte - Ferroquench AP-2

**B3: Mischung - Polymer AP/Feroquen ch AP-2**

Schiene	Polymer	Versuch Nr.:	Datum	Anströmung [m/s]	Konzentration		Luft [m³/h]	Badtemp. Thermometer [°C]	Tauchtemp. Pyrometer [°C]	Tauchzeit [s]
					refraktometrisch [%]	viskosimetrisch [%]				
HSH	PAP/FAP	081	06.12.02	0.12	-	10.97	0.12	26.10	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	082	06.12.02	0.12	-	10.97	0.12	28.80	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	083	06.12.02	0.12	-	10.97	0.12	31.00	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	91m	11.12.02	0.12	-	10.76	0.12	31.30	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	091	11.12.02	0.12	-	10.76	0.12	32.20	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	92m	11.12.02	0.12	-	10.76	0.12	32.00	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	092	11.12.02	0.12	-	10.76	0.12	31.00	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	093	11.12.03	0.12	-	10.76	0.12	33.00	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	094	11.12.02	0.12	-	10.76	-	31.70	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	101	12.12.02	0.12	-	10.76	0.12	24.70	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	102	12.12.02	0.12	-	10.76	-	26.70	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	103	12.12.02	0.25	-	10.76	0.12	26.00	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	104	12.12.03	0.25	-	10.76	0.12	28.60	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	111	13.12.02	0.25	-	10.76	0.12	29.20	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	112	13.12.02	0.12	-	9.84	0.12	29.70	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	113	13.12.02	0.12	-	8.99	0.12	32.60	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	114	13.12.02	0.12	-	8.19	0.12	28.70	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	121	19.12.02	0.12	-	8.32	-	26.00	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	122	19.12.02	0.12	-	8.32	0.12	28.80	780.00	271.00
HSH	PAP/FAP	123	19.12.02	0.12	-	8.32	0.12	33.80	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	131	09.01.03	0.12	9.06	12.55	0.12	28.90	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	132	09.01.03	0.12	9.06	12.55	0.12	31.00	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	133	09.01.03	0.12	9.06	12.55	0.12	30.60	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	134	09.01.03	0.12	9.06	12.55	0.12	30.30	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	141	13.01.03	0.12	-	7.71	0.12	26.10	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	142	13.01.03	0.12	-	7.71	0.12	25.70	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	143	13.01.03	0.12	-	7.71	0.12	29.50	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	144	13.01.03	0.12	-	7.71	0.12	30.00	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	151	15.01.03	0.12	-	7.94	0.12	26.50	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	152	15.01.03	0.12	-	7.94	0.12	30.00	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	153	15.01.03	0.12	-	7.94	0.12	30.00	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	161	20.01.03	0.12	-	11.97	0.12	28.20	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	162	20.01.03	0.12	-	11.97	0.12	30.00	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	163	20.01.03	0.12	-	11.97	0.12	29.10	780.00	160.00
HSH	PAP/FAP	164	20.01.03	0.12	-	11.97	0.12	28.90	780.00	160.00

**Anhang B3.1: Prozessparameter - Polymer AP/Feroquen ch AP-2**

Schiene	Polymer	Versuch Nr.:	Versuchs- art	Härte						Aufwärm- zeit [min]		Halte- zeit [min]	Gefüge		Lauffläche
				Pos. 1 [HB]	Pos. 2 [HB]	Pos. 3 [HB]	Pos. 4 [HB]	Pos. 5 [HB]	Pos. 6 [HB]	Seigerungs- bereich	Seigerungs- bereich				
HSH	PAP/FAP	081	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	082	thermo/met	336	340	341	333	339	333	45	15	-	Perlit	Perlit	
HSH	PAP/FAP	083	met	366	365	365	361	361	350	45	15	-	Perlit	Perlit	
HSH	PAP/FAP	91m	met	361	360	357	351	353	352	45	15	-	Perlit	Perlit	
HSH	PAP/FAP	091	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	92m	met	362	359	361	359	358	345	45	15	-	Perlit	Perlit	
HSH	PAP/FAP	092	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	093	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	094	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	101	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	102	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	103	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	104	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	111	met	354	358	357	355	358	343	45	15	-	Perlit	Perlit	
HSH	PAP/FAP	112	met	355	355	353	348	346	347	45	15	-	Perlit	Perlit	
HSH	PAP/FAP	113	met	351	348	355	345	353	343	45	15	-	Perlit	Perlit	
HSH	PAP/FAP	114	met	357	356	364	356	350	344	45	15	-	Perlit	Perlit	
HSH	PAP/FAP	121	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	122	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	123	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	131	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	132	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	133	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	134	met	365	364	374	364	363	353	45	15	-	Perlit	Perlit	
HSH	PAP/FAP	141	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	142	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	143	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	144	met	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	151	met	-	-	-	-	-	-	45	>15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	152	met	-	-	-	-	-	-	45	>15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	153	thermo	-	-	-	-	-	-	45	>15	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	161	met	363	376	385	373	374	360	45	-	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	162	thermo	-	-	-	-	-	-	45	-	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	163	thermo	-	-	-	-	-	-	45	-	-	-	-	
HSH	PAP/FAP	164	met	382	374	383	381	375	369	45	-	-	-	-	

**Anhang B3.2: Gefüge und Härtewerte - Polymer AP/Feroquen ch AP-2**



**B4: Aquaquench EC/WE**

Schiene	Polymer	Versuch Nr.:	Datum	Anströmung [m/s]	Konzentration		Luft [m³/h]	Badtemp. Thermometer [°C]	Tauchtemp. Pyrometer [°C]	Tauchzeit [s]	Rückwärme Pyrometer [°C]
					refraktometrisch [%]	viskosimetrisch [%]					
HSH	ECWE	002	12.09.02	0,15	10,18	-	0,24	29,30	807,00	150,00	563,00
HSH	ECWE	003	12.09.02	0,15	10,18	-	0,24	30,40	807,00	150,00	582,00
HSH	ECWE	004	12.09.02	0,15	10,18	-	0,24	30,50	807,00	150,00	560,00
HSH	ECWE	011	16.09.02	0,12	10,18	-	-	30,10	807,00	150,00	488,00
HSH	ECWE	012	16.09.02	0,12	10,18	-	0,24	30,00	807,00	150,00	522,00
HSH	ECWE	013	16.09.02	0,12	10,18	-	-	41,50	807,00	150,00	540,00
HSH	ECWE	014	16.09.02	0,12	10,18	-	0,24	41,00	807,00	150,00	580,00
HSH	ECWE	015	16.09.02	0,12	10,18	-	0,24	41,80	807,00	150,00	555,00
HSH	ECWE	021	17.09.02	0,12	12,50	-	-	29,70	807,00	150,00	487,00
HSH	ECWE	022	17.09.02	0,12	12,50	-	-	44,10	807,00	150,00	550,00
HSH	ECWE	023	17.09.02	0,12	12,50	-	0,24	32,30	807,00	150,00	588,00
HSH	ECWE	024	17.09.02	0,12	15,00	-	-	45,10	807,00	150,00	580,00
HSH	ECWE	031	19.09.02	0,12	15,00	-	-	40,00	807,00	150,00	488,00
HSH	ECWE	032	19.09.02	0,12	15,00	-	-	45,00	807,00	150,00	-
HSH	ECWE	033	19.09.02	0,24	15,00	-	0,24	43,00	807,00	150,00	588,00
HSH	ECWE	034	19.09.02	0,24	15,00	-	0,24	45,00	-	150,00	588,00
HSH	ECWE	041	14.11.02	0,12	8,14	-	0,24	30,80	807,00	150,00	560,00
HSH	ECWE	042	14.11.02	0,12	8,14	-	0,24	32,80	787,00	120,00	558,00
HSH	ECWE	051	19.11.02	0,12	8,40	-	0,24	29,30	782,00	150,00	548,00
HSH	ECWE	052	19.11.02	0,12	8,40	-	0,24	30,00	770,00	150,00	530,00
HSH	ECWE	053	19.11.02	0,12	8,40	-	0,24	32,00	780,00	150,00	525,00
HSH	ECWE	201	26.03.03	0,12	8,00	-	0,12	30,00	780,00	160,00	540,00
HSH	ECWE	202	26.03.03	0,12	8,00	-	0,12	29,70	780,00	160,00	515,00
HSH	ECWE	203	26.03.03	0,12	8,00	-	0,12	30,30	780,00	160,00	550,00
HSH	ECWE	204	26.03.03	0,12	8,00	-	0,12	30,00	780,00	160,00	540,00
DOBAIN	ECWE	301	02.04.03	0,12	8,00	-	0,12	30,00	780,00	-	-
DOBAIN	ECWE	302	02.04.03	0,12	8,00	-	0,12	30,00	780,00	-	-
DOBAIN	ECWE	303	02.04.03	0,12	8,00	-	0,12	30,00	780,00	-	-
DOBAIN	ECWE	304	02.04.03	0,12	8,00	-	0,12	30,00	780,00	-	-
HSH	ECWE	401	08.04.03	0,12	8,00	-	<0,12	30,00	780,00	160,00	445,00
HSH	ECWE	402	08.04.03	0,12	8,00	-	0,12	30,00	780,00	160,00	525,00
HSH	ECWE	403	08.04.03	0,12	8,00	-	0,12	30,00	780,00	160,00	545,00
DOBAIN	ECWE	501	24.04.03	0,24	8,00	-	0,12	30,00	780,00	-	-
HSH	ECWE	502	24.04.03	0,12	8,00	-	0,12	30,00	780,00	160,00	555,00
DOBAIN	ECWE	503	24.04.03	0,24	8,00	-	0,12	30,00	780,00	-	-
HSH	ECWE	504	24.04.03	0,12	8,00	-	0,12	30,00	780,00	160,00	550,00
HSH	ECWE	505	24.04.03	0,12	8,00	-	0,12	30,00	780,00	160,00	550,00

**B4.1: Prozessparameter - Aquaquench EC/WE**

Schiene	Polymer	Versuch Nr.:	Versuchs- art	Härte						Gefüge			
				Pos. 1 [HB]	Pos. 2 [HB]	Pos. 3 [HB]	Pos. 4 [HB]	Pos. 5 [HB]	Pos. 6 [HB]	Aufwärm- zeit [min]	Halte- zeit [min]	Seigerungs- bereich	Lauffläche
HSH	ECWE	002	thermo/met	-	-	-	-	-	-	45	45	-	-
HSH	ECWE	003	thermo/met	-	-	-	-	-	-	45	45	-	-
HSH	ECWE	004	thermo/met	359	359	365	359	358	346	45	45	Perlit	Perlit
HSH	ECWE	011	thermo	-	-	-	-	-	-	45	45	-	-
HSH	ECWE	012	met	335	387	326	368	372	371	45	45	Perlit/Martensitinseln	Perlit/unterer Bainit/oberer Bainit/Anlassmartensit
HSH	ECWE	013	thermo	-	-	-	-	-	-	45	45	-	-
HSH	ECWE	014	thermo/met	347	344	342	340	337	327	45	45	Perlit	Perlit
HSH	ECWE	015	met	350	343	340	343	338	329	45	45	Perlit	Perlit
HSH	ECWE	021	thermo	-	-	-	-	-	-	45	45	-	-
HSH	ECWE	022	thermo/met	372	372	374	371	366	351	45	45	Perlit	Perlit/unterer Bainit/oberer Bainit
HSH	ECWE	023	met	344	342	342	339	334	327	45	45	Perlit	Perlit
HSH	ECWE	024	thermo	-	-	-	-	-	-	45	45	-	-
HSH	ECWE	031	met	371	386	386	387	377	360	45	45	Perlit/Martensitinseln	Perlit/unterer Bainit/oberer Bainit/Anlassmartensit
HSH	ECWE	032	thermo	-	-	-	-	-	-	45	45	-	-
HSH	ECWE	033	met	332	329	329	324	321	308	45	45	Perlit	Perlit
HSH	ECWE	034	thermo	-	-	-	-	-	-	45	45	-	-
HSH	ECWE	041	thermo/met	343	345	347	338	344	330	45	45	Perlit	Perlit
HSH	ECWE	042	thermo/met	321	311	313	309	304	299	45	45	Perlit	Perlit
HSH	ECWE	051	thermo/met	351	355	356	340	344	325	45	45	Perlit	Perlit
HSH	ECWE	052	thermo/met	339	349	357	344	348	336	45	45	Perlit	Perlit
HSH	ECWE	053	met	345	335	337	332	330	320	45	45	Perlit	Perlit
HSH	ECWE	201	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-
HSH	ECWE	202	met/thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-
HSH	ECWE	203	met	347	345	346	339	340	332	45	15	Perlit	Perlit
HSH	ECWE	204	met	345	341	344	337	338	327	45	15	Perlit	Perlit
DOBAIN	ECWE	301	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-
DOBAIN	ECWE	302	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-
DOBAIN	ECWE	303	met	355	341	359	344	347	365	45	15	Perlit/oberer Bainit	unterer Bainit/oberer Bainit
DOBAIN	ECWE	304	met	367	365	365	359	358	360	45	15	Perlit/oberer Bainit	unterer Bainit/oberer Bainit
HSH	ECWE	401	met	363	385	363	384	384	380	45	15	Perlit/Martensitinseln	Perlit/unterer Bainit/oberer Bainit/Anlassmartensit
HSH	ECWE	402	met	361	365	363	357	363	348	45	15	Perlit	Perlit/leicht überhitzt
HSH	ECWE	403	met	360	355	361	349	350	340	45	15	Perlit	Perlit/leicht überhitzt
DOBAIN	ECWE	501	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	u.Bainit/o. Bainit/Perlitanteile	unterer Bainit/oberer Bainit
HSH	ECWE	502	met	340	336	335	331	338	323	45	15	Perlit	Perlit/leicht überhitzt
DOBAIN	ECWE	503	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	Perlit/oberer Bainit	unterer Bainit/oberer Bainit
HSH	ECWE	504	met	344	341	339	334	338	322	45	15	Perlit	Perlit/leicht überhitzt
HSH	ECWE	505	met	344	346	350	343	349	331	45	15	Perlit	Perlit/leicht überhitzt

**B4.2: Gefüge und Härtewerte - Aquaquench EC/WE**

**B5: Breox Quenchant HT**

Schiene	Polymer	Versuch Nr.:	Datum	Anströmung [m/s]	Konzentration		Luft [m³/h]	Badtemp. Thermometer [°C]	Tauchtemp. Pyrometer [°C]	Tauchzeit [s]
					refraktometrisch [%]	viskosimetrisch [%]				
DOBAIN	QHT	601	11.06.03	0.12	21.50	-	0.12	30.00	780.00	-
DOBAIN	QHT	602	11.06.03	0.12	21.50	-	-	30.00	780.00	-
DOBAIN	QHT	603	11.06.03	0.12	21.50	-	-	30.00	780.00	-
DOBAIN	QHT	604	11.06.03	0.12	21.50	-	-	30.00	780.00	-
HSH	QHT	605	11.06.03	0.12	21.50	-	0.12	30.00	780.00	160.00
HSH	QHT	606	11.06.03	0.12	21.50	-	0.12	30.00	780.00	160.00
HSH	QHT	607	11.06.03	0.12	21.50	-	0.12	30.00	780.00	160.00
HSH	QHT	701	16.06.03	0.12	21.50	-	0.12	30.00	780.00	160.00
HSH	QHT	702	16.06.03	0.12	21.50	-	0.12	30.00	780.00	160.00
DOBAIN	QHT	703	16.06.03	0.12	21.50	-	-	30.00	780.00	-
DOBAIN	QHT	704	16.06.03	0.12	21.50	-	-	30.00	780.00	-

**B5.1: Prozessparameter - Breox Quenchant HT**

Schiene	Polymer	Versuch Nr.:	Versuchs- art	Härte						Gefüge			
				Pos. 1 [HB]	Pos. 2 [HB]	Pos. 3 [HB]	Pos. 4 [HB]	Pos. 5 [HB]	Pos. 6 [HB]	Aufwärm- zeit [min]	Halte- zeit [min]	Seigerungsbereich	Lauffläche
DOBAIN	QHT	601	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-
DOBAIN	QHT	602	thermo/met	357	380	357	389	393	380	45	>15	Perlit/Martensit -u. Bainitinseln	unterer Bainit/Perlitinseln/Anlassmartensit
DOBAIN	QHT	603	thermo/met	367	371	362	361	362	365	45	>15	Perlit/Martensit -u. Bainitinseln	unterer Bainit/Perlitinseln/Anlassmartensit
DOBAIN	QHT	604	thermo/met	392	402	391	388	390	390	45	>15	Perlit/Martensit -u. Bainitinseln	unterer Bainit/Perlitinseln/Anlassmartensit
HSH	QHT	605	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	Perlit/Martensitinseln	Perlit/unterer Bainit/obererBainit/Anlassmartensit
HSH	QHT	606	thermo	-	-	-	-	-	-	<45	<15	nicht austenitisiert	nicht austenitisiert
HSH	QHT	607	thermo	-	-	-	-	-	-	45	15	Perlit/Martensitinseln	Perlit/unterer Bainit/obererBainit/Anlassmartensit
HSH	QHT	701	met	390	395	390	390	395	380	45	15	Perlit/Martensitinseln	Perlit/unterer Bainit/obererBainit/Anlassmartensit
HSH	QHT	702	met	398	395	392	393	396	389	45	15	Perlit/Martensitinseln	Perlit/unterer Bainit/obererBainit/Anlassmartensit
DOBAIN	QHT	703	met	353	350	361	350	357	341	45	15	o. Bainit/Perlit/Martensitinseln	unterer Bainit/oberer Bainit/Anlassmartensit
DOBAIN	QHT	704	met	389	405	422	387	418	393	45	15	-	-

**B5.2: Gefüge und Härtewerte - Breox Quenchant HAT**

**B6: Außerordentliche Testversuche – DYFLEX LP 2173/3**

Schiene	Polymer	Versuch Nr.:	Datum	Anströmung [m/s]	Konzentration		Luft [m³/h]	Badtemp. Thermometer [°C]	Tauchtemp. Pyrometer [°C]	Tauchzeit [s]	Rückwärme Pyrometer [°C]
					refraktometrisch [%]	viskosimetrisch [%]					
HSH	DYFLEX	601DYF	14.05.03	0.12	10.00	-	0.12	30.00	780.00	160.00	450.00
HSH	DYFLEX	602DYF	14.05.03	0.12	10.00	-	0.12	30.00	780.00	160.00	480.00
HSH	DYFLEX	603DYF	14.05.03	0.12	10.00	-	0.12	30.00	780.00	160.00	440.00

**B6.1: Prozessparameter - DYFLEX LP 2173/3**

Schiene	Polymer	Versuch Nr.:	Versuchs- art	Härte						Gefüge			
				Pos. 1 [HB]	Pos. 2 [HB]	Pos. 3 [HB]	Pos. 4 [HB]	Pos. 5 [HB]	Pos. 6 [HB]	Aufwärm- zeit [min]	Halte- zeit [min]	Seigerungsbereich	Lauffläche
HSH	DYFLEX	601DYF	met	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-
HSH	DYFLEX	602DYF	met	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-
HSH	DYFLEX	603DYF	met	-	-	-	-	-	-	45	15	-	-

**B6.2: Gefüge und Härtewerte - DYFLEX LP 2173/3**