

MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN

University of Leoben, Austria

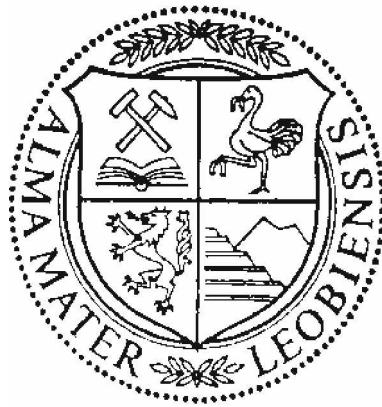
Lehrstuhl für Fördertechnik und Konstruktionslehre

Chair of Conveying Technology and Design Methods

Diplomarbeit zum Thema:

Abschrecksimulation von Stahlrohren

(Quenching simulation of steel tubes)



In Zusammenarbeit mit:

Voestalpine Tubulars/ Kindberg-Aumühl GmbH & Co KG

Verantwortliche Betreuer:

Herr Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Franz Kessler

Herr Dipl.-Ing. Dr. mont. Reinhold Reisner

Herr DI (FH) Dr. mont. Mario Leindl

Verfasst von:

Ilija Bušić



EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass die vorliegende Diplomarbeit

Abschrecksimulation von Stahlrohren

von mir selbstständig und nur unter Verwendung der angeführten Literatur verfasst wurde.

Leoben, Juni 2010

Ilija Bušić



Vorwort

An dieser Stelle möchte ich mich bei Herrn *Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Franz KESSLER* für die Ermöglichung der Diplomarbeit am Institut für Fördertechnik und Konstruktionslehre bedanken.

Gleichzeitig spreche ich den Mitarbeitern der Firma Voestalpine Tubulars Kindberg, insbesondere Herrn Betriebsleiter *Dipl.-Ing. Dr. mont. Reinhold REISNER* für die mir entgegengebrachte Unterstützung meinen Dank aus.

Zu besonderem Dank verpflichtet bin ich Herrn *DI (FH) Dr. mont. Mario LEINDL* für die fachliche Betreuung und die richtungsweisenden Anregungen, welche mir die Arbeit an der Finite-Elemente Simulation erleichterten.

Mein Dank ergeht auch an Herrn *Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Thomas ANTRETTNER* für seine engagierte Mithilfe.

Weiteres sei allen Mitarbeitern des Institutes für Fördertechnik und Konstruktionslehre für die freundliche Aufnahme am Institut und für ihre Unterstützung gedankt.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Frau *MARIJA* für ihre Geduld und für den privaten Rückhalt bedanken. Danken will ich auch meiner Familie für die Unterstützung während meines gesamten Studiums.



Kurzfassung

Viele Stahlprodukte besitzen nach den Fertigungsprozessen nicht die erforderlichen mechanischen Eigenschaften, welche für ihren Anwendungszweck notwendig sind. Um die Eigenschaften anzupassen, werden diese Stahlerzeugnisse einem Wärmebehandlungsverfahren unterworfen. Das Prinzip der Wärmebehandlung richtet sich nach einem genau definierten Arbeitsablauf, welcher sich aus einer Aufwärm-, Abkühl- und einer Anlassphase zusammensetzt. Dabei stellt die Abkühl- oder Abschreckphase einen wichtigen Schritt dar, da die Abkühlgeschwindigkeit das Gefüge des Werkstoffes beeinflusst. Kommt eine schnelle Abkühlung zustande, bildet sich das harte nadelförmige Gefüge „Martensit“ aus. Dauert dagegen der Abkühlprozess länger, so entsteht ein Mischgefüge mit schlechteren Eigenschaften. Je nach Gefügezusammensetzung und Wärmebehandlung wird das Material härter, fester oder zäher.

In der vorliegenden Arbeit wird das Abschreckverhalten von Stahlrohren numerisch analysiert. Dafür werden unterschiedliche Simulationsmodelle mit dem FE -Softwarepaket (Finite Elemente) *ABAQUS*TM erstellt und die Temperaturverläufe berechnet. Die Temperaturermittlung wird zuerst für das Außenkühlen der heißen Stahlrohre und später für eine Kombination aus Außen- und Innenkühlung durchgeführt.

Für die Erstellung dieser Berechnungsmodelle war eine Einarbeitung in die Thematik der Wärmeübertragung sowie der Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen notwendig. Vor allem wird das Verhalten von einer heißen Oberfläche nach Abschreckung durch Spritzwasserkühlung analysiert. Ein Hilfsmittel stellt dabei das Nukiyama-Diagramm dar, welches den gesamten Kühlprozess in vier Bereiche und in unterschiedliche Wärmeübertragungsmechanismen einteilt. Diese Wärmeübertragungsmechanismen bestimmen das Abkühlverhalten und werden als Randbedingungen in die Abschrecksimulation eingesetzt.

Der Schwerpunkt dieser Diplomarbeit besteht darin, aus den physikalischen Grundgesetzen der Wärmeübertragung und den vorhandenen Randbedingungen ein numerisches Simulationsmodell für die thermische Analyse zu erstellen. Ein wichtiges Ergebnis ist das zeitlich veränderliche Temperaturfeld im gesamten Rohr, einmal für die Rohraußenkühlung und in Folge für die Verknüpfung einer Außen- und Innenabschreckung.



Die aus dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse können unmittelbar zur Optimierung von Abschreckeinrichtungen verwendet werden.



Abstract

Many steel products do not possess the necessary mechanical properties after the manufacturing processes, which are necessary for their intended use. To increase the mechanical properties, these products are subjected to a heat treatment process. The principle of the heat treatment is a well defined workflow, which consists of a warm-up, a cool-down and a tempering stage.

Cooling or quenching of the heated steel is important for the composition of the microstructure. If the cooling rate is high enough the diffusionless transformation starts and the structure transforms from austenite into martensite. This structural arrangement gives the material more hardness, strength and increases the acid gas resistance.

In this study, the total quenching is analysed by a calculation model. To reduce the computing time and storage capacity the geometry of the tube was substituted on a 2D model. For the thermal analysis simulation models for the outer quenching and further for the combination of external and internal cooling are created.

The focus of this thesis is to analyse the temperature distribution across the wall thickness and the length of the steel pipe with the help of the FE-software package *ABAQUS*TM.

From the obtained simulation results a clear statement about the cooling conditions could be made. The best hardness result is achieved with the combination of external and internal quenching. That information can be used to optimize the quenching process.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemdefinition und Zielsetzung	2
1.2	Anlagenbeschreibung	3
1.3	Ansatz zur Problemlösung.....	7
2	Theoretische Grundlagen der Wärmeübertragung	9
2.1	Grundbegriffe des Wärmeaustausches	9
2.2	Wärmeleitung	10
2.2.1	Wärmeleitung durch eine gekrümmte Fläche (Rohrwand)	15
2.3	Konvektive Wärmeübertragung	17
2.4	Wärmetransport bei der Spritzwasserkühlung	22
2.4.1	Einfluss der Oberflächentemperatur T_O	23
2.4.2	Einfluss der Wasserbeaufschlagung	25
2.4.3	Die sekundären Parameter des Wärmeübergangs	26
2.5	Wärmestrahlung	27
3	Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen.....	28
3.1	Allgemeines.....	28
3.2	Härten von Stahl	29
4	Modellbildung für die thermische Simulation.....	32
4.1	Finite-Elemente-Methode.....	32
4.2	Thermische Modelle für die Abschrecksimulation	33
4.2.1	Modellbeschreibung für das Außenquench	35
4.2.2	Modellbeschreibung für das Außen- und Innenquench	36
4.3	Erstellung der Simulationsmodellen	37
4.3.1	Geometrierstellung	37
4.3.2	Implementierung der Materialeigenschaften	39
4.3.3	Definition der bewegten Wärmesenke	40
4.3.4	Fit-Funktion für unterschiedliche Wasserbeaufschlagungsdichten.....	45
4.3.5	Generierung des FE-Netzes.....	47



5	Ergebnisse der FEM-Berechnung	48
5.1	Temperaturfeld-Außenquench.....	48
5.2	Temperaturfeld Außen- und Innenquench	56
5.3	Konvergenzstudie des numerischen Modells	64
6	Diskussion und Evaluierung der Ergebnisse	67
6.1	Gegenüberstellung von Außenquench und Außen- u. Innenkühlung	67
6.2	Parametervariation.....	72
6.3	Temperaturmessung	81
7	Schlussfolgerung und Ausblick.....	83
	Literaturverzeichnis.....	85
	Abbildungsverzeichnis	88
	Tabellenverzeichnis.....	90
	Symbolverzeichnis	91
	Anhang A	A-1
	Input-File: Außen- und Innenquench	A-1
	Subroutine SFILM „bewegte Wärmesenke“	A-4
	Anhang B.....	B-1
	Zusammenstellungszeichnung der Abschreckeinrichtung	B-1



1 Einleitung

Die physikalischen Anforderungen an technische Güter und Werkstoffe hinsichtlich der Härte, der Festigkeit, der Duktilität etc. sind im Laufe der Zeit immer weiter gestiegen. Um diesen gerecht zu werden, müssen die bestehenden Produkte verbessert werden. Eine Verbesserung dieser ist durch optimierte Wärmebehandlungsprozesse möglich. Daher ist es in vielen Fällen erforderlich, dass das Werkstück einigen Wärmebehandlungsprozessen unterzogen wird.

Das Prinzip der Wärmebehandlung besteht darin, das Material auf eine definierte Temperatur zu erhitzen und es dann schnell oder kontinuierlich abzukühlen. Die Gefügebildung wird dabei von der Abkühlgeschwindigkeit oder Abkühlrate stark beeinflusst. Erfolgt die Wärmeübertragung schnell, bildet sich ein martensitisches Gefüge. Diese Gefügestruktur weist sehr gute Härteeigenschaften auf. Daher ist das vorgegebene Ziel nach dem Abschrecken die Erreichung eines überwiegend martensitischen Gefüges. Für die Sicherstellung dieses Zieles ist eine definierte Abkühlung wichtig.

Grundsätzlich gibt es drei Kühlverfahren, die Spritzkühlung, die Tauchkühlung sowie die Filmkühlung. In der vorliegenden Arbeit wird die Spritzwasserkühlung genauer betrachtet, weil im Betrieb der Firma Voestalpine Tubulars Kindberg mit dieser Kühlmethode die heißen Rohre abgeschreckt werden. Die austenitisierten Rohre werden dabei mit mehreren durch Düsen erzeugten Wassersprühstrahlen rasch abgekühlt.

Der Wärmetransport mit dieser Kühlvariante wird im wesentlichen von den Parametern Oberflächentemperatur, Wasserbeaufschlagungsdichte, Wassertemperatur, Oberflächenbeschaffenheit beeinflusst. Im Zuge dieser Diplomarbeit wird der Einfluss dieser Parameter untersucht um genaue Vorhersagen über das Abschreckverhalten der Rohre treffen zu können. Dafür werden numerische Modelle für die thermischen Analysen erstellt und berechnet.



1.1 Problemdefinition und Zielsetzung

Um den gestiegenen Anforderungen hinsichtlich der Materialeinsparung durch Verringerung der Wandstärken bei gleichbleibenden Materialeigenschaften, sowie der Forderung zur Auslegung von Rohrleitungen auf höhere Betriebsdrücke gerecht zu werden, ist es erforderlich die bestehenden Produkte über neue optimierte Härte- und Vergütungsprozesse zu verbessern. Diese Verbesserungsmaßnahmen sorgen für die Erhöhung der Werkstoffkennwerte, wie Härte, Festigkeit, Zähigkeit und Sauer gasbeständigkeit.

Die Haupteinflussgröße für den Härteerfolg ist neben der Werkstoffzusammensetzung, die Abkühlgeschwindigkeit. Erfolgt die Wärmeabfuhr schnell, bildet sich das harte nadelförmige Gefüge „Martensit“. Mit dieser Gefügestruktur können die oben an das Material gestellten Forderungen mit einer nachgeschalteten Vergütungsbehandlung erfüllt werden.

Für die Sicherstellung der hohen Abkühlraten wird in der bestehenden Kühlanlage der Firma Voestalpine Tubulars Kindberg versuchsweise eine zusätzliche Innenkühlung implementiert. Für diese und andere Abkühlvarianten werden numerische Modelle erstellt, um das Abkühlverhalten zu simulieren.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit sollen über die Analyse der simulierten Rohrabschreckprozesse mögliche Verbesserungsmaßnahmen hinsichtlich der Wärmeübertragung aufgezeigt werden. Zu diesem Zweck werden Simulationsmodelle für das Außen- und Innenabschrecken erstellt. Im weiteren Verlauf werden die Parameter der Innenabkühlung verändert und die Auswirkungen auf die Wärmeabfuhr untersucht.

Die Rohrabschrecksimulationen liefern Ergebnisse über die Temperaturverteilung während der Abkühlung und erlauben es, Vorhersagen über die Gefügebildung zu treffen. Mit dieser Erkenntnis ist es möglich die Prozesssicherheit beim Abschrecken zu erhöhen.

Im nächsten Kapitel wird der betriebliche Wärmebehandlungsprozess der Firma Voestalpine Tubulars Kindberg erläutert.



1.2 Anlagenbeschreibung

Eine schematische Darstellung der Vergütungsanlage, welche bei der Firma Voestalpine Tubulars Kindberg in Betrieb ist, wird in Abbildung 1.1 gezeigt. Die Wärmebehandlungsanlage setzt sich aus drei Komponenten zusammen, dazu zählen der Austenitisierungsofen, die Wasserquench und der Anlassofen. Die Prozessrichtung ist mit schwarzen Pfeilen gekennzeichnet. Der Ausgangspunkt ist der Austenitisierungsofen, welcher in zwei Zonen unterteilt ist. In der Aufwärmzone wird das Werkstück auf die Härte- oder Austenitisierungstemperatur gebracht. Als nächstes, in der Haltezone, wird das Werkstück für eine definierte Zeit auf diesem Temperaturniveau gehalten, um so die Durchhärtung zu sichern.

Im nächsten Teilprozess erfolgt die Abschreckung in der Wasserquench. Die Gefügewandlung wird dabei von der Abkühlgeschwindigkeit stark beeinflusst. Um das gewünschte Martensitgefüge zu erhalten muss die Wärmeabfuhr rasch zustande kommen. Ist dagegen die Wärmeübertragung zu langsam, entsteht ein Mischgefüge mit anderen Materialeigenschaften. Zum Schluss werden die abgeschreckten Werkstücke im Anlassofen auf eine entsprechende Anlassstemperatur wieder erwärmt und eine bestimmte Zeit auf diesem Temperaturniveau gehalten. Abschließend wird das Werkstück langsam abgekühlt, so dass sich die gewünschten Gütegrade einstellen.

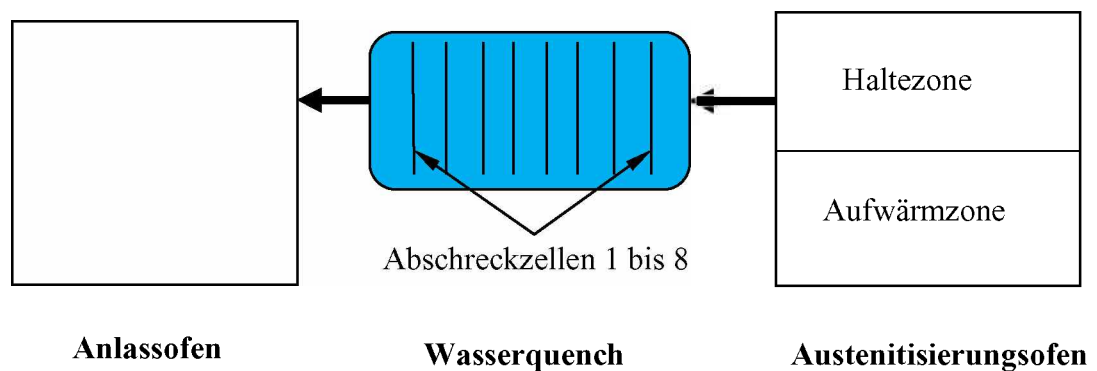


Abbildung 1.1: Schema Vergütungsanlage bei Voestalpine Tubulars Kindberg.

Im weiteren Verlauf wird eine genauere Spezifikation der einzelnen Anlagenkomponenten vorgenommen, dazu werden Aufnahmen der Vergütungsanlage gezeigt.

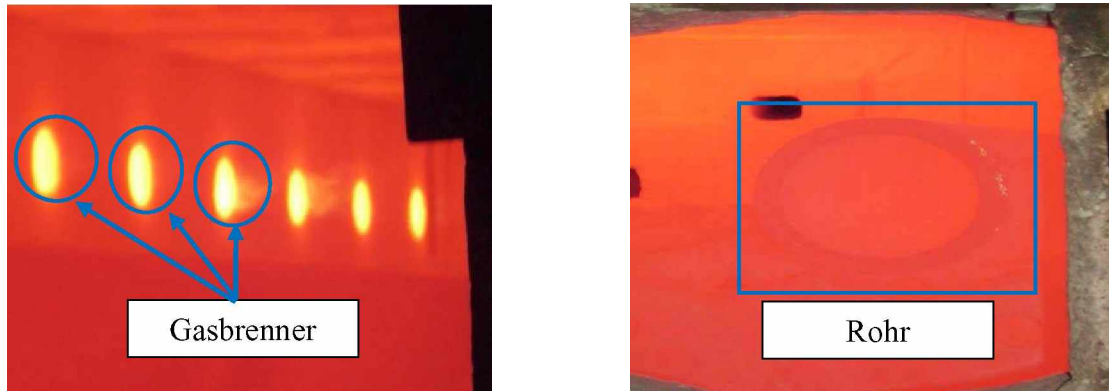


Abbildung 1.2: Innenraum Härteofen mit Gasbrennern (links); gehärtetes Rohr (rechts).

Der Innenraum des Härteofens ist in Abbildung 1.2 mit mehreren Gasbrennern dargestellt. Diese erwärmen das Stahlrohr auf die gewünschte Austenitisierungstemperatur. Im konkreten Fall wird das Rohrstück auf eine Temperatur von 880°C aufgeheizt.

Die Wasserquench (Abbildung 1.3) ist ein wichtiger Teil der Wärmebehandlungsanlage. Die Funktion der Abschreckanlage besteht darin, die austenitisierten Rohre von außen mit Kühlwasser abzukühlen. Dazu wird das Rohr in die erste Abschreckzelle bewegt und als Resultat stellt sich je nach den Kühlbedingungen ein definiertes Härtegefüge „Martensit“ ein.



Abbildung 1.3: Wasserquenchanlage bzw. Kühlanlage; Ausfahren des Werkstücks aus dem Härteofen (links), Abschreckzelle im Betrieb (rechts).

Hergestellt wurde die Quenchanlage von der Firma AMCO. Diese Bauart ist eine Außenquench mit acht hintereinander folgenden justierbaren Abschreckzellen und einem maximalen Wasserverbrauch von $1440 \text{ m}^3/\text{h}$. Der Abschreckprozess hängt im Wesentlichen von der Rohreinlauf-, Rohrauslauf- und Wassertemperatur ab.

Die Gesamtlänge dieser Außenkühlanlage beträgt $14,43 \text{ m}$ und wird mit einem Wasserdruck von 2 bar gespeist. Eine Zusammenstellungszeichnung der Abschreckeinrichtung ist im Anhang [B-1] beigelegt.

Die Zielsetzung ist es, die bestehende Wasserquenchanlage zu optimieren. Eine Verbesserungsmaßnahme ist die Implementierung einer Innenquench in die bestehende Anlage. Auf diese Weise wird das erhitzte Stahlrohr von außen und von innen gleichzeitig abgeschreckt. Ein weiterer Vorteil einer solchen Kühlvariante ist die Reduktion des Rohrverzuges.

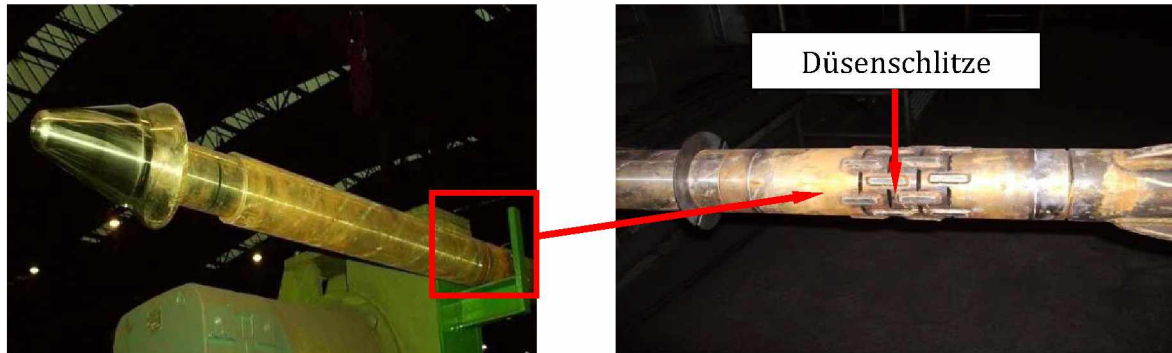


Abbildung 1.4: Innenlanze vorne (links); Detail des Düsenkopfes (rechts).

Die Hauptkomponente dieser Innenkühlung ist die Innenlanze, die mit einem speziellen Düsenkopf ausgeführt ist (siehe Abbildung 1.4).

Bei der Innenkühlung wird das Rohr über die lange Lanze geführt, dabei strömt aus den Düsenöffnungen das Kühlwasser heraus. Ist ein direkter Kontakt zwischen der Rohrinne und dem Kühlmedium gegeben, so beginnt das Rohrinnenhärten.

Die Ermittlung der Rohraußen- bzw. Rohrinne-temperatur während des Abschreckprozesses ist ein Ziel dieser Diplomarbeit. Zu diesem Zweck werden numerische Simulationen durchgeführt. Die Vorgehensweise zur Problemlösung und die Modellierung werden im nächsten Kapitel behandelt.

1.3 Ansatz zur Problemlösung

Nach der Spezifikation der Problemstellung werden neue Lösungsansätze entwickelt. Dazu ist ein visueller Überblick der notwendigen Arbeitsschritte in der folgenden Abbildung dargestellt.

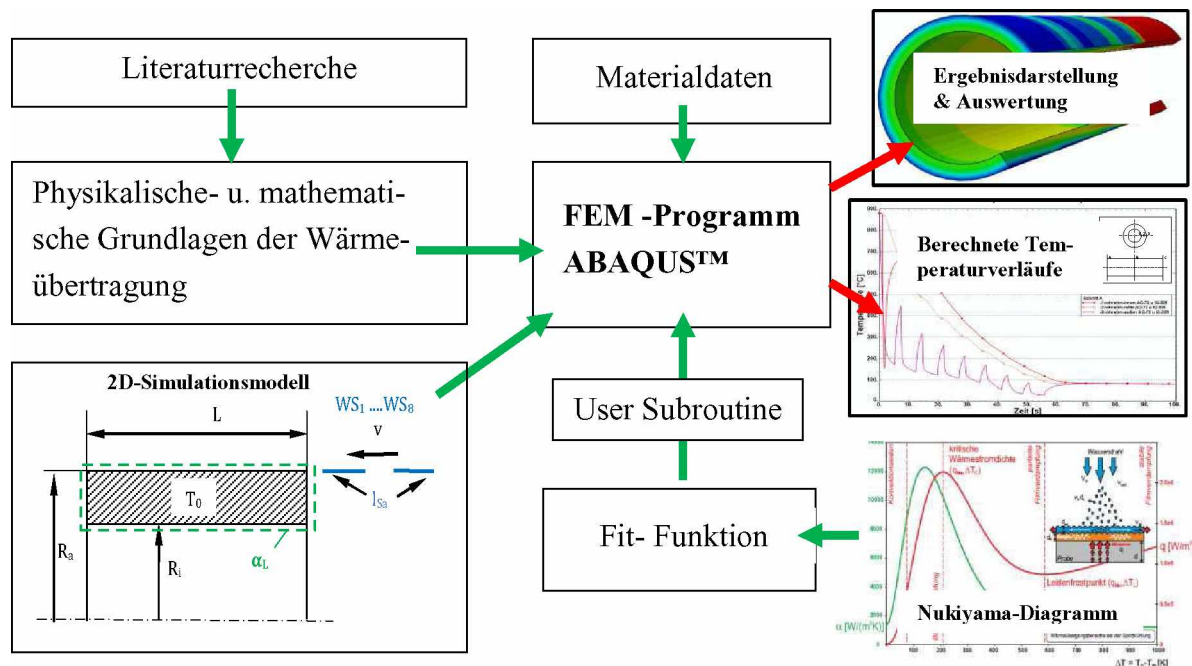


Abbildung 1.5: Schematische Darstellung der Lösungsstrategie.

Bei der Erstellung dieser Diplomarbeit war es zuerst erforderlich, sich mit der technischen Literatur zu beschäftigen. Im Zuge dessen war es möglich, entsprechende Lösungsansätze zu finden.

Die zentrale Gleichung eines thermischen Problems ist die Wärmeleitungsgleichung beziehungsweise die *FOURIERSche Differentialgleichung*. Mit dieser können räumliche und zeitliche Veränderungen der Temperatur in festen Körpern beschrieben werden. Da eine analytische Lösung dieser Differentialgleichung nur in Spezialfällen möglich ist, werden für die Lösung numerische Verfahren eingesetzt. Im konkreten Fall wird die Wärmeleitungsgleichung mit der FEM (Finite-Elemente-Methode) gelöst. Zum Einsatz kommt das kommerzielle FE-Paket *ABAQUS™*.



Als erster Schritt muss ein Berechnungsmodell mit allen erforderlichen Bedingungen erstellt werden. Weiters wird das 3D-Realbauteil, um die Rechenzeit und Speicherbedarf zu reduzieren, in ein 2D-Berechnungsmodell umgewandelt.

Für die Abschrecksimulation wird eine zeitlich veränderliche Randbedingung mit Hilfe einer Fit-Funktion definiert. Diese Fit-Funktion ist eine sehr gute Approximation der Verdampfungskurve (Abbildung 4.8, Seite 48), welche den Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz und der Wasserbeaufschlagungsdichte beschreibt. Die Implementierung in das FE-Programm erfolgt über die Fortran User-Subroutine „*SFILM*“. In dieser Subroutine bzw. Unterprogramm ist die Randbedingung in der Programmiersprache Fortran definiert.

Im nächsten Schritt werden die temperaturabhängigen Materialkennwerte, wie die Dichte, die spezifische Wärmekapazität und die Wärmeleitfähigkeit über die Benutzeroberfläche *ABAQUS/CAE* „Module-Property“ tabellarisch der Berechnungssoftware zugewiesen.

Ein Ergebnis der Abschrecksimulation ist das orts- und zeitabhängige Temperaturfeld über die gesamte Rohrlänge. Die Resultate können in verschiedener Form, beispielsweise als Temperaturlinien über die Zeit oder als graphische 3D-Bilder dargestellt werden.

Im nachfolgenden Kapitel werden die Grundgesetze der Wärmeübertragung und die unterschiedlichen Mechanismen der Wärmeabfuhr beschrieben.



2 Theoretische Grundlagen der Wärmeübertragung

Zum besseren Verständnis der vorliegenden Problematik werden in diesem Kapitel die physikalischen Grundlagen der Wärmeübertragung aufgezeigt. Der Wärmedurchgang wird in unterschiedlichen Übertragungsmechanismen eingeteilt und die für diese Arbeit relevanten Zusammenhänge werden aufgezeigt.

2.1 Grundbegriffe des Wärmeaustausches

Die Wärmeübertragung ist ein Teilgebiet der Wärmelehre. Sie beschreibt die Gesetzmäßigkeiten, nach denen der Austausch von Wärme zwischen Systemen unterschiedlicher Temperaturen erfolgt. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik besagt, dass die Energie in Form von Wärme nur dann von einem kälteren auf ein wärmeres System übergehen kann, wenn dieser Prozess durch mechanische Arbeit erzwungen wird. Eine selbsttätige Wärmeübertragung kommt nur dann zustande, wenn diese von einem wärmeren Bereich ausgeht und in Richtung eines Kälteren verläuft. Grundvoraussetzung für die selbsttätige Wärmeübertragung ist daher ein Temperaturgefälle.

Der Wärmetransport zwischen Stoffen verschiedener Temperatur ist beendet, wenn sich ein energetischer Gleichgewichtszustand eingestellt hat [6].

Ein System kann ein Stoff, ein Körper oder eine Kombination mehrerer Stoffe und Körper darstellen, das zu einem anderen System Wärme transferiert oder von dort Wärme erhält. Der Wärmedurchgang lässt sich gemäß Abbildung 2.1 in drei Übertragungsmechanismen einteilen.

- *Wärmeleitung*
- *Wärmeströmung (Konvektion)*
- *Wärmestrahlung*

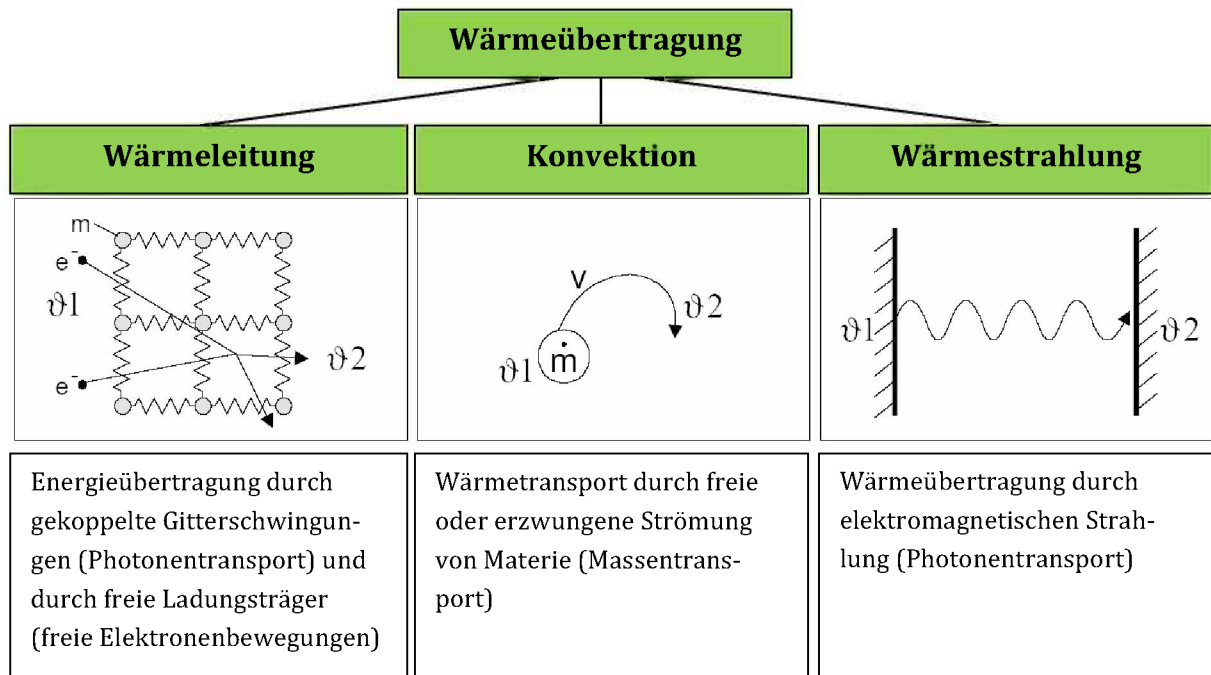


Abbildung 2.1: Wärmeübertragungsmechanismen [4].

2.2 Wärmeleitung

Die Wärmeleitung beschreibt einen Energietransport innerhalb eines Stoffes. Das Prinzip des Wärmetransportes wird so erklärt, dass die wärmeren Stoffbereiche Energie an die benachbarten kälteren Stoffteilchen abgeben. Dies wird im molekularen Bereich durch Gitterschwingungen und Elektronendiffusion in Metallen, oder durch Zusammenstöße von Atomen oder Molekülen in Gasen und Flüssigkeiten realisiert. Hier kommt der Wärmeaustausch ohne makroskopischen Stofftransport [3] zustande.

Der Wärmestrom bei der Wärmeleitung lässt sich durch die *FOURIER-Beziehung*¹ ausdrücken.

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \text{grad } T \tag{2.1}$$

¹ Jean Baptiste Fourier (1768-1830), französischer Mathematiker, entwickelte die Fourier-Reihen zur Lösung der Randwertaufgaben der instationären Wärmeleitung.

In der Gleichung 2.1 ist die Wärmestromdichte \vec{q} (Wärmestrom pro Fläche) als vektorielle Größe dem Gradienten der Temperatur $grad\ T$ proportional und entgegen gerichtet. Der Proportionalitätskoeffizient λ heißt Wärmeleitfähigkeit und charakterisiert die Eigenschaft des wärmetransportierenden Materials. Diese Konstante wird von der Temperatur, Druck und in manchen Fällen von der Anisotropie² des Materials beeinflusst.

Das Temperaturfeld ist von den ein- und ausfließenden Wärmeströmen abhängig. Dieser Zusammenhang kann mit Hilfe eines Kontrollvolumens, welches in einem kartesischen Koordinatensystem (x, y, z) skizziert ist, erklärt werden. Das in Abbildung 2.2 dargestellte Volumen besitzt keine Wärmequelle. Die Stoffwerte, wie Wärmeleitfähigkeit λ , Dichte ρ und spezifische Wärmekapazität c_p des homogenen, isotropen Materials sowie der Druck seien konstant.

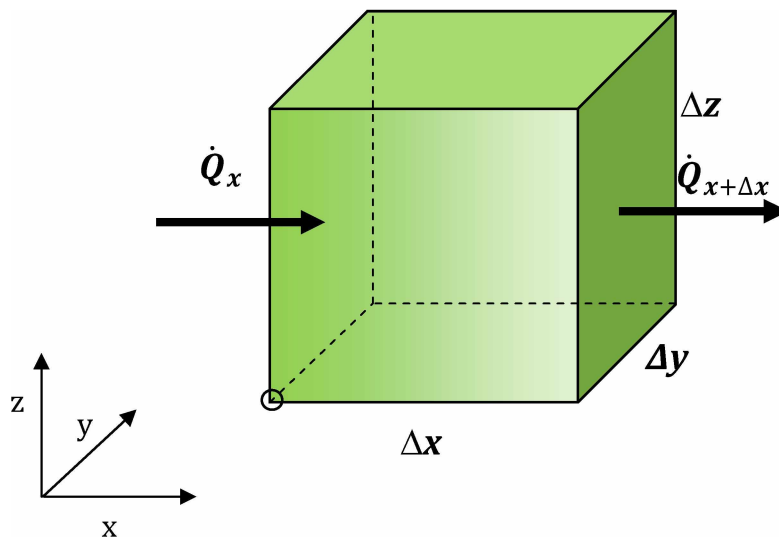


Abbildung 2.2: Kontrollvolumen mit Wärmestrom in x-Richtung nach [3].

² Bei anisotropen Werkstoffen sind Eigenschaften von der Richtung abhängig.



Es wird vorausgesetzt, dass sich die Enthalpie des Volumens nach dem *Ersten-Hauptsatz* entsprechend der Differenz der ein- und austretenden Wärmeströme in x -Richtung ändert. Dazu wird die folgende Bilanzgleichung aufgestellt:

$$\frac{\partial(m \cdot h)}{\partial t} = \dot{Q}_x - \dot{Q}_{x+\Delta x}. \quad (2.2)$$

Der Wärmestrom an der Stelle $x+\Delta x$ wird in eine *TAYLOR-Reihe*³ entwickelt, aus dieser Reihe wird nur der lineare Term als Näherung herausgenommen. Diese lautet:

$$\dot{Q}_{x+\Delta x} = \dot{Q}_x + \frac{\partial \dot{Q}_x}{\partial x} \Delta x. \quad (2.3)$$

Mit der Beziehung $dh = c_p dT$ für die Enthalpie und $\dot{Q}_x = q_x \Delta y \Delta z$ folgt dann:

$$m c_p \frac{\partial T}{\partial t} = - \frac{\partial q_x}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z. \quad (2.4)$$

Unter Verwendung der *FOURIER-Gleichung* (2.1) lässt sich \dot{q}_x ersetzen durch

$$q_x = - \lambda \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (2.5)$$

mit der Dichte $\rho = m/(\Delta x \Delta y \Delta z)$ folgt:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}. \quad (2.6)$$

³ Brook Taylor, britischer Mathematiker (1685-1731)



Alle in der Gleichung (2.6) eingesetzten Stoffeigenschaften werden zu einer temperaturleitfähigen Stoffeigenschaft α_S zusammengefasst:

$$\alpha_S = \frac{\lambda}{\rho c_p} . \quad (2.7)$$

Das Ergebnis ist die Wärmeleitungsgleichung für den eindimensionalen Fall:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_S \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} . \quad (2.8)$$

Wird die Temperaturänderung im dreidimensionalen Raum betrachtet, so müssen auch die Wärmeströme in y - und z -Richtung berücksichtigt werden. Es ist daher erforderlich weitere Terme in der oben durchgeführten Ableitung zu berücksichtigen.

Die einheitliche Darstellung der *FOURIER-Gleichung* für verschiedene Koordinatensysteme, wird mit Hilfe des *LAPLACE-Operators* ∇^2 ermöglicht. Sie lautet:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_S \nabla^2 T \quad (2.9)$$

Ausgehend von der Gleichung 2.9 lautet die Darstellung in kartesischen (x, y, z) Koordinaten

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_S \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.10)$$

Für die Ermittlung des Temperaturfeldes in einem zylindrischen Körper wandelt man Gleichung (2.9) in Zylinderkoordinaten (r, φ, z) um.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha_S \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) . \quad (2.11)$$



Sind die Anfangs- und Randbedingungen bekannt, ist es möglich mit Gleichung (2.9) zeitlich veränderliche Temperaturfelder zu berechnen. Unter der Anfangsbedingung versteht man die Definition des Temperaturfeldes zum Zeitpunkt $t=0$ s. Dagegen versteht man unter Randbedingungen die Vorgabe von Temperaturen oder Wärmeströmen am Rand der betrachteten Geometrie.

Im folgenden Abschnitt wird die Lösung der Gleichung (2.9) bzw. Gleichung (2.11) für ein gerades Rohr dargestellt.

Als eine Ergänzung wird hier das *Wiedemann-Franz-Gesetz*⁴ erwähnt. Dieses Gesetz sagt aus, dass in einem Metall die Wärmeleitfähigkeit λ nahezu proportional der elektrischen Leitfähigkeit σ ist. Es kann gesagt werden, dass ein Metall mit guter Wärmeleitfähigkeit auch ein guter elektrischer Leiter ist. Der Grund dafür sind die Leitungselektronen in den Metallen. Diese Elektronen bewegen sich frei durch den Kristall und diffundieren aus den warmen Gebieten in die kalten Zonen, wobei diese durch Zusammenstöße mit anderen Elektronen und Gitterbausteinen Energie übertragen.

⁴ Gustav Heinrich Wiedemann (1826-1899) und Rudolph Franz, deutsche Physiker.

2.2.1 Wärmeleitung durch eine gekrümmte Fläche (Rohrwand)

In Abbildung 2.3 ist ein dickwandiges Rohr mit Außenradius r_2 , Innenradius r_1 , Länge L und mit einem Temperaturgefälle dT/dr von innen nach außen skizziert. Betrachtet wird die stationäre Wärmeleitung.

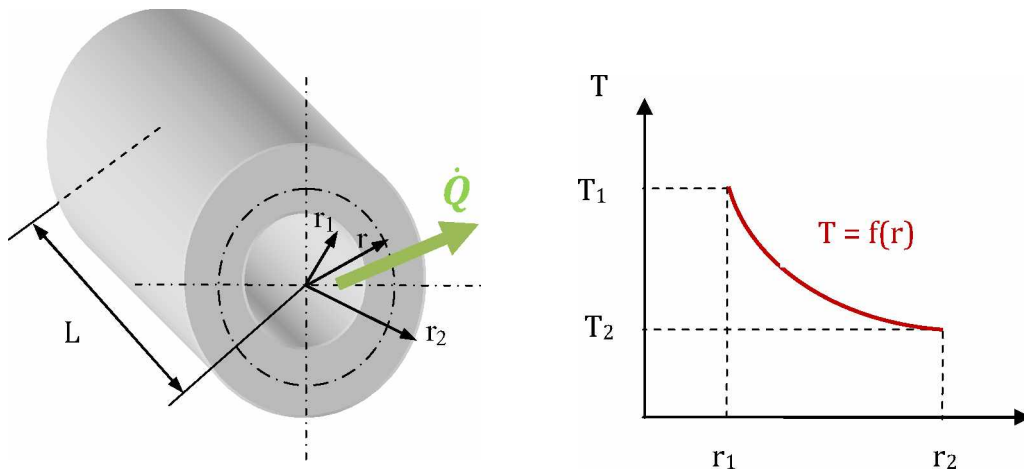


Abbildung 2.3: Wärmeleitung und Temperaturverlauf durch eine Rohrwand.

Als erstes kann angenommen werden, dass sich der Temperaturverlauf wie in der Abbildung 2.3 dargestellt, verändert. Der Wärmestrom wird mit der *FOURIER-Grundgleichung* für eindimensionale stationäre Wärmeleitung in Gleichung (2.12) bestimmt.

$$\dot{Q} = -\lambda A(r) \frac{dT}{dr} = -\lambda 2\pi r L \frac{dT}{dr} \quad (2.12)$$

Bei stationärer Wärmeleitung ist der Wärmestrom für alle Radien konstant. Für die Ermittlung des Wärmestromes \dot{Q} müssen zuerst die veränderlichen Größen, wie Temperatur T und Radius r in Gleichung (2.12) voneinander getrennt werden.



Im nächsten Schritt wird dann Gleichung (2.12) mit festgesetzten Integrationsgrenzen ($r=r_2$ und $T=T_2$) integriert. Das Resultat für den Wärmestrom \dot{Q} lautet:

$$\dot{Q} = -\lambda 2\pi L \frac{T_1 - T_2}{\ln \frac{r_2}{r_1}}. \quad (2.13)$$

Für die Temperatur $T(r)$ ergibt sich:

$$T(r) = T_1 + \frac{\ln \left(\frac{r}{r_1} \right)}{\ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \cdot (T_2 - T_1). \quad (2.14)$$

Die obere Gleichung ist besonders für die Ermittlung des Wärmeverlustes von Rohrisolierungen, bei stationärer Wärmeleitung wichtig.



2.3 Konvektive Wärmeübertragung

Die Konvektion bzw. Wärmeströmung ist einer von drei Mechanismen für den Wärmetransport. Dabei strömen die Flüssigkeiten oder die Gase entlang einer Körperoberfläche und in den Berührungszonen finden Energieübertragungen statt.

Eine Wärmeabgabe vom Fluid auf den Körper ist nur dann möglich, wenn die Temperatur der Fluide oder der Gase höher als die Körpertemperatur ist. Ist dagegen die Körpertemperatur niedriger wird Wärmeenergie aufgenommen. Die Wärme wird aus dem Inneren der Flüssigkeit an die Wand transportiert beziehungsweise umgekehrt.

Allgemein sind Flüssigkeiten und Gas schlechte Wärmeleiter. Es ist daher erforderlich um einen entsprechenden Wärmetransport zu erzielen die Flüssigkeits- oder Gasteilchen quer zum Wärmestrom in Richtung der Oberfläche zu bewegen. Die Intensität dieser Bewegungen hängen von vielen Einflüssen ab, wie von der Entstehung der Strömung, also Strömungsform (laminare oder turbulente), der Stoffeigenschaften und von der Abmessung der überströmten Körperoberfläche.

Grundsätzlich wird die Wärmeübertragung durch Konvektion in zwei Arten eingeteilt, man unterscheidet dabei zwischen der *freien* oder *natürlichen Konvektion* und der *erzwungenen Konvektion*.

Bei einer *erzwungenen Strömung* wird ein Druckunterschied mit Hilfe von Pumpen oder geodätischen Gefälle erzeugt und aufrechterhalten. Der Stoff fließt so an der Oberfläche entlang, unabhängig ob Wärme übertragen wird oder nicht.

Die *freie Konvektion* entsteht durch die Dichteunterschiede zwischen warmen und kalten Flüssigkeits- oder Gasteilchen. Ein alltägliches Beispiel kann beim Beheizen eines Raumes beobachtet werden. Im Raum strömt die Luft an der Heizkörperoberfläche vorbei nimmt dabei Wärmeenergie auf, wird spezifisch leichter und steigt nach oben und gibt an die Bauteiloberflächen Wärmeenergie ab und sinkt dann wieder an einer anderen Stelle nach unten. Als Resultat bildet sich im Raum eine sogenannte Luftwalze.

In vielen Bereichen werden Fluide für die Kühlung von technischen Oberflächen eingesetzt. Das Verhalten einer Strömung entlang der Oberfläche eines festen Körpers wird im weiteren Verlauf analysiert. Dazu ist in Abbildung 2.4 die Situation eines Kühlmediums, welches parallel zu einer ebenen Wand strömt, dargestellt. Das Kühlmedium strömt von rechts mit konstanter Geschwindigkeit w_0 und konstanter Temperatur T_0 , die angeströmte Wand besitzt die Temperatur T_w . Diese Wand setzt der Strömung einen Widerstand entgegen und verändert damit die Strömungsbedingungen. Das neu entstandene Strömungsbild wird mit der Grenzschichttheorie nach *PRANDTL* [3] erklärt.

Die Grenzschichtströmung wird in zwei Bereiche eingeteilt, die Grenze bildet der in der Abbildung 2.4 eingezeichnete Wandabstand δ . Mit der Annäherung an die Wand nimmt die Fluidgeschwindigkeit w den Wert Null an. Der Grund dafür ist, dass die Fluidteilchen mit direkter Wandberührung aufgrund der Haftbedingung ruhen. Weiters ist ersichtlich, dass eine Temperaturänderung in der sogenannten Temperaturgrenzschicht auftritt. Unmittelbar an der Wand gleicht sich Fluidtemperatur T_0 dem Wert der Wandtemperatur T_w an.

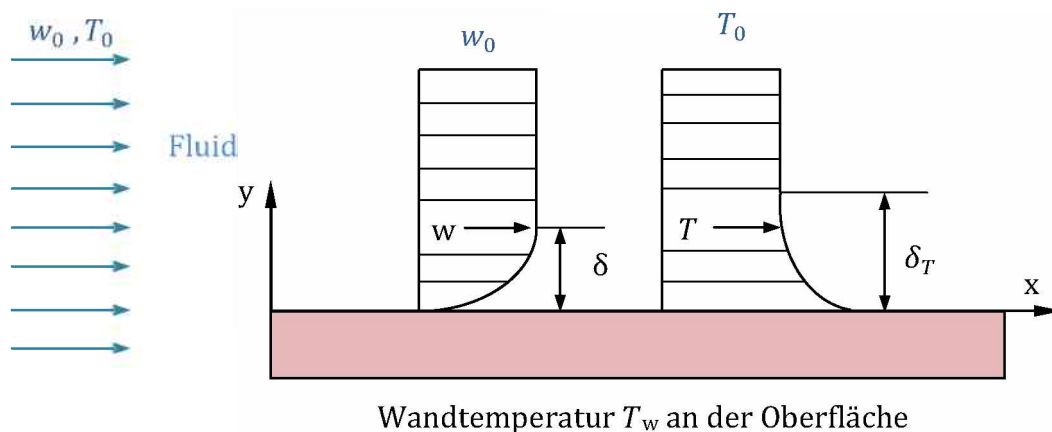


Abbildung 2.4: Grenzschichtströmung längs einer ebenen Wand mit Geschwindigkeits- und Temperaturprofil aus [3].

Wie schon erwähnt, findet unmittelbar an der Wand keine Bewegung des Fluides statt. Dort kann Wärme nur durch Leitung transportiert werden.



Der Wärmestrom \dot{Q}_w zwischen dem Fluid und der Wand wird aus der *FOURIERSchen-Beziehung* Gleichung (2.1) ermittelt. Bezieht man diesen auf die Wandfläche, so wird mit Hilfe der Gleichung (2.15) die Wärmestromdichte q_w berechnet.

$$q_w = \frac{\dot{Q}_w}{A} = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (2.15)$$

In der oben dargestellten Gleichung ist λ die Wärmeleitfähigkeit der Flüssigkeit und $(\partial T/\partial y)_{y=0}$ der Temperaturgradient an der Wand.

Diese Gleichung beschreibt das Verhalten der Wärmeübertragung direkt an der Wand. Im Bereich der Grenzschicht wird Wärme sowohl durch Leitung als auch durch Konvektion übertragen. Diese beiden Phänomene werden im *NEWTONschen-Abkühlgesetz*⁵ zusammengefasst, es lautet:

$$q_w = \alpha (T_w - T_0). \quad (2.16)$$

Der Wärmeübergangskoeffizient α ist dabei ein Proportionalitätsfaktor, welcher die Intensität des Wärmetransports an der Grenzschicht beschreibt. Es ist festzuhalten, dass der Wärmeübergangskoeffizient α im Gegensatz zur Wärmeleitfähigkeit λ keine Stoffeigenschaft ist, sondern von der Geometrie, den Strömungsbedingungen, einigen Stoffgrößen und weiteren Parametern abhängt. Zusammenfassung der Gleichungen (2.15) und (2.16) liefert:

$$\alpha = \frac{-\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{y=0}}{T_w - T_0}. \quad (2.17)$$

Die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten α ist experimentell oder durch Lösung der Erhaltungssätze für Masse, Impuls und Energie möglich.

⁵ Sir Isaac Newton (1643-1727), englischer Physiker, Mathematiker, Astronom und Philosoph



Eine weitere sinnvolle Bestimmungsmöglichkeit der Wärmeübertragungszahl α liefert die *Ähnlichkeitstheorie*. Diese Theorie besagt, dass die physikalischen Vorgänge einander ähnlich sind, wenn sich ihre mathematischen Bedingungen nicht unterscheiden und ihre kennzeichnenden Parameter in festen Verhältnissen zueinander stehen. Für den Wärmetransport bedeutet das, dass die Konvektionsströmungen auch mit unterschiedlichen Fluiden, geometrischen Abmessungen, Geschwindigkeiten oder Temperaturen ähnliche Wärmetransportbedingungen aufweisen können. Eine Einführung in die Ähnlichkeitstheorie ist bei Langeheinecke [3] zu finden.

In der Praxis bedient man sich vornehmlich der Ähnlichkeitstheorie bei der Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten. Hierzu existiert eine Reihe von empirischen Kenngrößen, welche in der Tabelle 2.1 aufgelistet sind.



<i>Kenngröße</i>	<i>Zeichen</i>	<i>Formel</i>	<i>Gleichung</i>	<i>Problembereich</i>
FOURIER-ZAHL	Fo	$F_o = \frac{\alpha t}{L^2}$	(2.18)	instationäre Wärmeleitung
FROUDE-ZAHL	Fr	$F_r = \frac{w^2}{g L}$	(2.19)	Strömung unter Schwerkräfteinfluss
GRASHOF ⁶ -ZAHL	Gr	$G_r = \frac{g \gamma \Delta T L^3}{\nu^2}$	(2.20)	freie Konvektion bei Temperaturgradient
NUSSELT ⁷ -ZAHL	Nu	$N_u = \frac{\alpha L}{\lambda}$	(2.21)	stationäre konvektiver Wärmeübergang
PÉCLET-ZAHL	Pe	$P_e = \frac{w L}{\alpha}$	(2.22)	erzwungene instationäre Konvektion
PRANDTL ⁸ -ZAHL	Pr	$P_r = \frac{\nu \rho c_p}{\lambda}$	(2.23)	Wärmeübertragungsgröße des Fluids
REYNOLDS ⁹ -ZAHL	Re	$R_e = \frac{w L}{\nu}$	(2.24)	Strömung unter Reibungseinfluss

Tabelle 2.1: Dimensionslose Kenngrößen der Wärmeübertragung

An dieser Stelle sei auf den VDI-Wärmeatlas [15] verwiesen, der eine Vielzahl von Spezialfällen der konvektiven Wärmeübertragung abdeckt und so eine rasche Ermittlung des Wärmeübergangskoeffizienten ermöglicht.

⁶ Franz Grashof (1826-1893), deutscher Ingenieur

⁷ Wilhelm Nußelt (1882-1957), deutscher Physiker

⁸ Ludwig Prandtl (1875-1953), Deutscher Physiker

⁹ Osborne Reynolds (1842-1912), britischer Physiker

2.4 Wärmetransport bei der Spritzwasserkühlung

Spritzwasserkühlung ist ein weit verbreitetes Kühlverfahren und wird eingesetzt um metallische Güter und Werkstoffe nach dem Gießen oder nach Wärmebehandlungsprozessen definiert abzukühlen. Mit dieser Kühlmethode werden heiße Stahlrohre abgeschreckt und das Verhalten der Wärmeübertragung wird dabei genau analysiert (siehe Abbildung 2.5). Der Wärmetransport bei der Spritzkühlung kann quantitativ durch die Wärmeübergangszahl α beschrieben werden. Sie ist keine physikalische Grundgröße, sondern ein zu bestimmender Proportionalitätsfaktor, der die Intensität des Wärmeübergangs bestimmt. Der Wärmeübergangskoeffizient α ist abhängig von der Oberflächentemperatur, der Oberflächenbeschaffenheit des Bauteils, der Wasserbeaufschlagungsdichte V_S , der Fluidtemperatur T_F und von der Dicke δ der sich ausbildenden Grenzschicht.

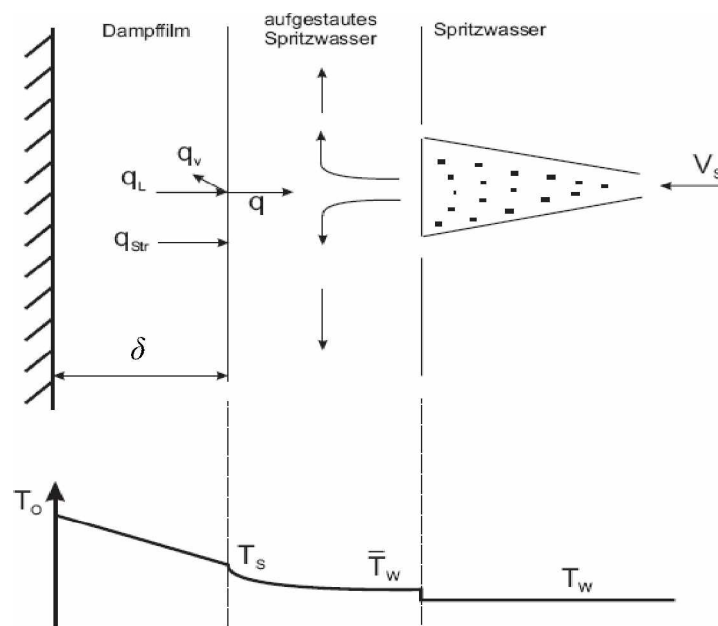


Abbildung 2.5: Wärmeübergang in der stabilen Filmverdampfung [10].

Das Bild 2.5 zeigt einen Wasserfilm der sich im Bereich der stabilen Filmverdampfung bei einer Spritzkühlung bildet und den Abtransport der Oberflächenwärme nach außen. Die Wärmestromdichte q setzt sich aus dem Strahlungsanteil q_{Str} , dem Leitungsanteil q_L und dem Ver-



dampfungsanteil q_V zusammen. Da die Dampffilmdicke δ sehr klein ist, wird im Bereich dieser ausschließlich konvektive Wärme senkrecht zur Oberfläche transportiert.

In den folgenden Kapiteln werden die Einflussgrößen und deren Wirkung auf die Wärmeübertragung bei der Spritzwasserkühlung analysiert.

2.4.1 Einfluss der Oberflächentemperatur T_O

Wie zuvor schon erwähnt, beeinflusst die Oberflächentemperatur T_O den Wärmetransport. Einen größeren Einfluss besitzt dabei die Temperaturdifferenz ΔT , welche sich bei der direkten Berührung zwischen der Kühlflüssigkeit und der Oberfläche einstellt. Dieser Zusammenhang wurde schon im Jahre 1934 von Nukiyama als Verdampfungskurve qualitativ skizziert und ist in Abbildung 2.6 gezeigt. In dieser Darstellung ist die Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten α und der Wärmestromdichte q von der Temperaturdifferenz $\Delta T = T_O - T_W$ dargestellt. Die Größe T_W repräsentiert dabei die Siedetemperatur des Wassers.

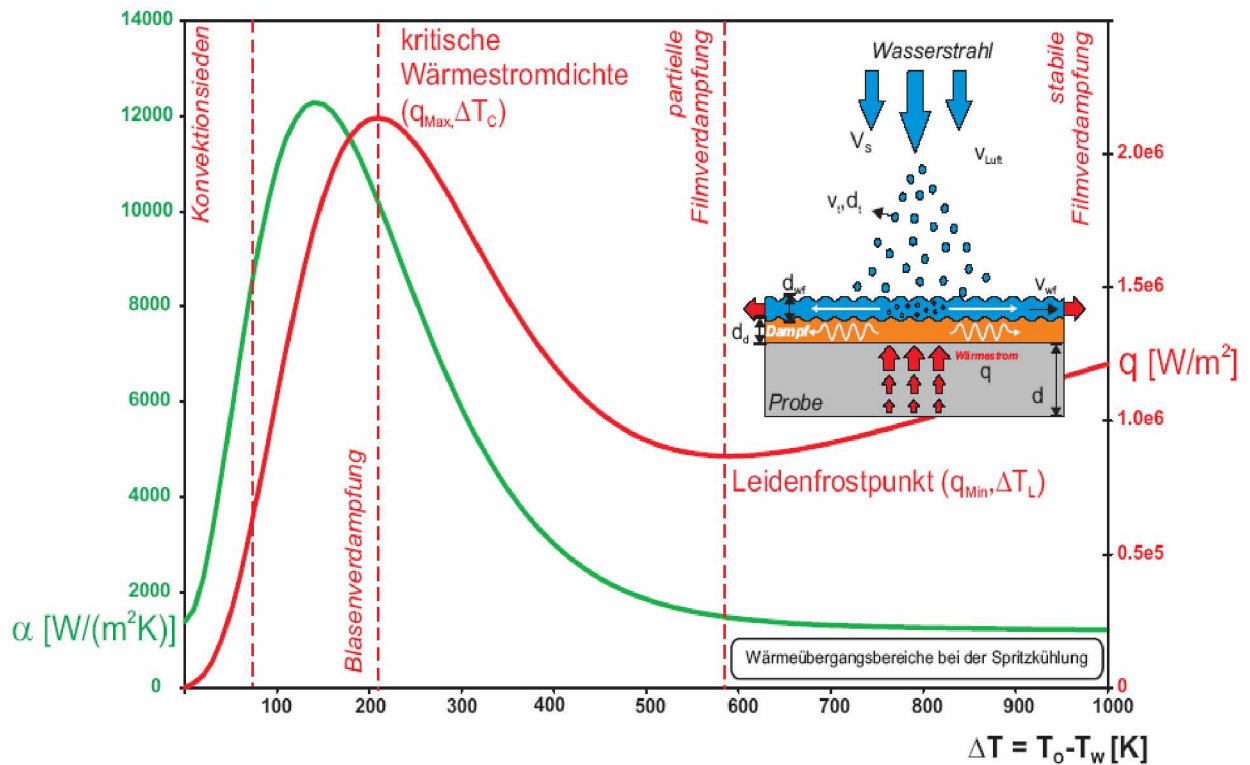


Abbildung 2.6: Wärmeübergangskoeffizient α und Wärmestromdichte q bei der Spritzwasserkühlung mit einer Wasserbeaufschlagungsdichte $V_s=10 \text{ kg/(m}^2\text{s)}$ aus [10].

Wird ein metallischer Körper, dessen Anfangstemperatur über der Siedetemperatur des Abschreckmediums liegt, abgekühlt, erfolgt die Wärmeabfuhr gemäß Abbildung 2.6 durch vier charakteristische aufeinanderfolgende Wärmeübergangsbereiche. Diese werden in stabile und partielle Filmverdampfung, in den Bereich der Blasenverdampfung und zum Schluss in das Gebiet des Konvektionssiedens eingeteilt.

Im Bereich der stabilen Filmverdampfung bildet sich ein geschlossener Dampffilm auf der heißen Oberfläche aus. Dieser verhindert einen direkten Kontakt mit der Kühlflüssigkeit und wirkt daher isolierend. Während dieser stabilen Filmverdampfung ist der Wärmeübergangskoeffizient α relativ gering. Hat sich die Oberfläche bis zur Leidenfrosttemperatur ΔT_L abgekühlt, bricht der Dampffilm zusammen und die sogenannte partielle oder instabile Filmverdampfung beginnt. In diesem Bereich steigen die Werte der Wärmestromdichte und des Wärmeübergangskoeffizienten an. Dabei erreicht die Wärmestromdichte einen maximalen Wert der als kritischer Wärmestrom q_{Max} (bei der kritischen Temperatur ΔT_c) bezeichnet wird.



Im Bereich der Blasenverdampfung sinken die Wärmestromdichte und der Wärmeübergangskoeffizient wieder ab. Zum Schluss im Bereich des Konvektionssiedens ist die Oberflächentemperatur nur unwesentlich größer als die Wassersiedetemperatur T_W und die Wärme wird durch Konvektion abgeführt.

2.4.2 Einfluss der Wasserbeaufschlagung

Bei der Spritzwasserkühlung sind die Haupteinflussgrößen neben der Temperaturdifferenz ΔT , die Wasserbeaufschlagungsdichte V_S , die Tropfengeschwindigkeit v_t sowie der Tropfendurchmesser d_t .

Eine Charakterisierung der Parameter Tropfengeschwindigkeit und der Tropfendurchmesser ist relativ schwierig und zeitintensiv. Deshalb wurde für die Abschrecksimulation nur auf die Einflussgrößen, wie die Temperaturdifferenz und die Wasserbeaufschlagungsdichte Rücksicht genommen.

Die Wasserbeaufschlagungsdichte [10] ist definiert in Gleichung (2.25) als die Wassermenge m [kg], die pro Zeit t [s] auf die Oberfläche A [m²] aufgebracht wird.

$$V_S = \frac{m}{A \cdot t} \quad (2.25)$$

Mit dieser Gleichung ist es möglich die erforderlichen Wasserbeaufschlagungsdichten für die weitere Betrachtung des Problems zu ermitteln und diese in die Berechnungssoftware zu implementieren.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit konnte festgestellt werden, dass sich bei Variation der Wasserbeaufschlagungsdichte die Verhältnisse der Wärmeübertragung bei der Spritzwasserkühlung ändern. Eine detaillierte Beschreibung dazu wird im Kapitel 4.3.4 präsentiert.



2.4.3 Die sekundären Parameter des Wärmeübergangs

Zu diesen Parametern zählen die Wassertemperatur, die Oberflächenbeschaffenheit und die Materialeigenschaften. Als erstes wird der Einfluss der Wassertemperatur auf den Wärmetransport beschrieben.

- **Wassertemperatur**

Der Einfluss der Wassertemperatur auf den Wärmeübergang ist, dass mit sinkender Wassertemperatur eine Zunahme des Wärmeübergangskoeffizienten erreicht wird.

- **Oberflächenrauigkeit**

In der Literatur ist man sich angesichts dieser Frage nicht ganz schlüssig. Reiners [9] behauptet, dass an großen Rauigkeitsspitzen eine schnellere Abkühlung statt findet und so die Leidenfrosttemperatur früher erreicht wird, was zur besseren Abkühlraten führt.

Im Widerspruch dazu bekräftigt Bernardin, dass die Oberflächenrauigkeit als Störstellen die Bildung des Flüssigkeits- und des Dampffilms negativ beeinflusst und die Leidenfrosttemperatur verringern. Die Folge daraus ist, dass eine rasche Wärmeabfuhr damit verhindert wird [10].

- **Materialeigenschaften**

Die Materialeigenschaften beeinflussen den Wärmetransport im Bereich der stabilen Filmverdampfung nicht. Dagegen ist im Bereich der partiellen Filmverdampfung der Wärmeübergang von der Wasserbeaufschlagungsdichte als auch von dem Material abhängig.



2.5 Wärmestrahlung

Bei der Wärmestrahlung emittieren oder absorbieren die Körper Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung, die sich im Raum mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Je nach Temperatur des Körpers kann diese Strahlung in verschiedenen Wellenlängenbereichen liegen, beispielsweise im infraroten oder sichtbaren Licht.

Grundsätzlich ist es so, dass jeder Körper Strahlung absorbiert und emittiert. Ist der Körper in thermischem Gleichgewicht mit seiner Umgebung, so vollziehen sich Emission und Absorption mit gleicher Geschwindigkeit. Besitzt der Körper eine höhere Temperatur als sein Umfeld, so emittiert er mehr als er absorbiert. Der Körper kühlt sich dadurch ab und erwärmt seine Umgebung.

Für die Berechnung der Wärmestrahlung ist vor allem die Gesamtstrahlung von Interesse, d. h. die über alle Wellenlängen integrierte Wärmestrahlung. Als Ergebnis der Integration erhält man das *STEFAN-BOLTZMANNsche Gesetz*¹⁰.

Da für die Abschrecksimulation die Wärmestrahlung eine untergeordnete Rolle spielt wird zu diesem Thema nicht mehr Stellung genommen und auf den VDI-Wärmeatlas [15] verwiesen. Dort ist eine ausführliche Beispielsammlung vordefinierter Fälle zu dieser Problematik dargestellt.

¹⁰ Josef Stefan (1835-1893), österreichischer Mathematiker und Physiker
Ludwig Boltzmann (1844-1906), österreichischer Physiker

3 Wärmebehandlung von Eisenwerkstoffen

3.1 Allgemeines

Die Wärmebehandlung ist ein Begriff aus der Werkstofftechnik und beinhaltet ein zeitlich begrenztes Erwärmen von metallischen Werkstücken auf einer definierten Temperatur. Eine Variation der Erwärmungs- und Abkühlungsbedingungen ermöglicht die Bildung unterschiedlicher Gefügestrukturen im Material (Abbildung 3.1). Über diese Gefügestrukturierung können Werkstoffeigenschaften wie die Härte, die Zähigkeit oder die Zugfestigkeit beeinflusst werden.

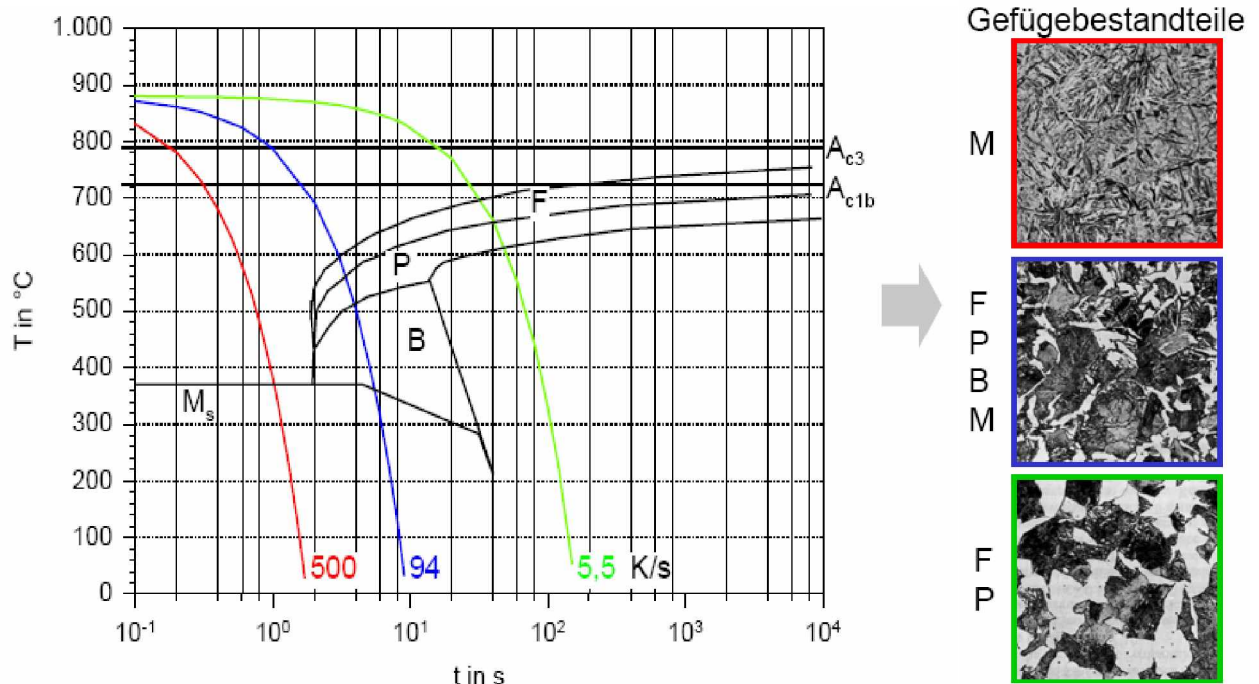


Abbildung 3.1: ZTU-Schaubild für den Werkstoff Ck45 mit unterschiedlichen Abkühlraten aus Hirsch [25].

In Abbildung 3.1 ist ein Zeit-Temperatur-Umwandlungsdiagramm (ZTU-Diagramm) mit verschiedenen Abkühlgeschwindigkeiten für den Vergütungsstahl Ck45 mit den entsprechenden Gefügebildern dargestellt. Das Diagramm ist in Bereiche unterschiedlicher Werkstoffphasen aufgeteilt, welche mit Großbuchstaben bezeichnet sind. Der Buchstabe M steht für den Bereich der Martensitbildung, B steht für das Gebiet der Bainitbildung, F gibt den Bereich der



Ferritbildung an und P symbolisiert die Perlitphase. Die waagrechten Linien die mit A_C gekennzeichnet sind stehen für die Austenitumwandlung, dabei gibt die A_{C1b} den Beginn der Austenitbildung und A_{C3} das Ende an.

Wie aus Abbildung 3.1 ersichtlich, hängt die Gefügebildung von den Abkühlgeschwindigkeiten ab. Erfolgt die Abkühlung rasch, bildet sich Martensit (rote Kühlkurve), ist dagegen die Kühlintensität kleiner stellt sich Mischgefüge ein (blauer Verlauf) und entspricht die Abkühlung der grünen Kurve wird ein Ferrit-Perlit Gefüge gebildet.

Grundsätzlich wird in der Wärmebehandlung zwischen Verfahren, die eine durchgreifende Gefügemwandlung bewirken und Verfahren die nur eine Umwandlung an der Oberfläche eines Werkstückes verursachen, unterschieden. Zu den erstgenannten Verfahren gehören das Durchhärten und Durchvergüten.

Die Wärmebehandlungsverfahren die lediglich eine Umwandlung an der Oberfläche bewirken, sind die Diffusions- und Randschichtverfahren (Nitrieren, Randschichthärten) und die thermochemischen Verfahren.

3.2 Härten von Stahl

Das Härten von Stahl dient der Erhöhung der mechanischen Werkstoffeigenschaft durch gezielte Änderung und Umwandlung des Gefüges. Dies erfolgt durch eine Erwärmung und das Halten auf entsprechender Härtetemperatur mit anschließender Abschreckung bzw. Abkühlung. Zu Demonstration ist exemplarisch ein Härteprozess mit Gefügeänderung in Abbildung 3.2 gezeichnet.

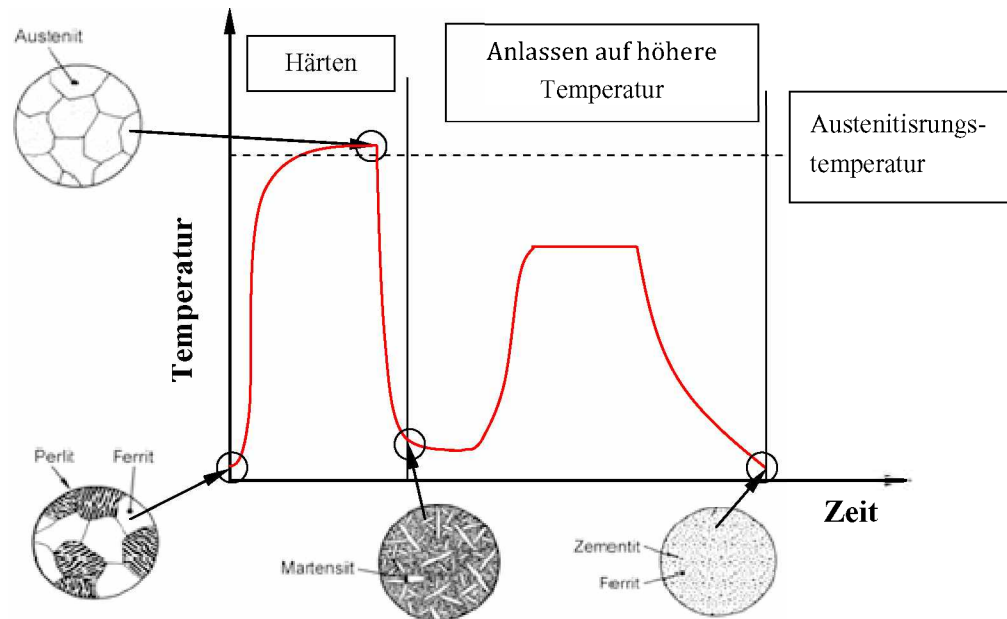


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung eines Temperatur-Zeitverlaufes beim Härten mit Gefügeumwandlung.

In Abbildung 3.2 ist das Härten von Stahl mit Gefügeänderung dargestellt, das Werkstück wird dabei so weit erwärmt, bis sich ein austenitisches Gefüge im Werkstück bildet. Diese Gefügeumwandlung beruht auf kristallinen Vorgängen. Das kubisch raumzentrierte (*krz*) Kristallgitter des Grundgefüges (Ferrit und Perlit) klappt schlagartig in das kubisch flächenzentrierte (*kfz*) Kristallgitter des Austenits um. Um eine Durchhärtung im ganzen Werkstück sicherzustellen, wird dieses für eine bestimmte Zeit auf der Härtetemperatur gehalten.

Als nächstes folgt die Abkühlung. Wird der entstandene Austenit langsam abgekühlt so transformiert sich das Kristallgitter in ein raumzentriertes Gitter zurück und es entsteht ein *ferritisch-perlitisch*es Gefüge wie am Beginn des Härteprozesses. Erfolgt dagegen die Abkühlung sehr schnell, wird in sehr kurzer Zeit ein raumzentriertes Gitter gebildet. Dem Kohlenstoffatom bleibt nicht genügend Zeit um aus dem Gitterwürfel heraus zuwandern um Zementit (Fe_3C) zu bilden. Das festgehaltene Kohlenstoffatom verspannt das Kristallgitter. Diese Verspannung führt zur Bildung eines feinnadeligen, sehr harten Gefüges, dem Martensit. Dabei ist die Umwandlung von Austenit in Martensit diffusionslos und wird auch als „Umklappen“ oder „Scherumwandlung“ bezeichnet.



Die höchste Härtesteigerung ist erzielbar, wenn der Grundwerkstoff vollständig in Martensit umgewandelt ist. Da dieses Gefüge sehr spröde ist, wird nach dem Abschrecken das Werkstück angelassen. Das Anlassen führt dazu, dass sich ein feinkörniges Gefüge aus entspanntem Martensit und fein verteilten Carbiden bildet. Diese Gefügestruktur besitzt sehr gute mechanische Kennwerte und wird wesentlich durch die Legierungselemente beeinflusst.

Als Abschreckmedium dienen Wasser, Öl, Salzbad, wässrige Polymerlösungen, Luft oder Gase. Für das Härten ist Stahl mit und über 0,2% Kohlenstoffgehalt geeignet. Die Legierungszusammensetzung im Stahl muss berücksichtigt werden, da diese die kritische Abkühlgeschwindigkeit beeinflussen und bei der Überschreitung dieser die Gefahr einer Rissbildung, besteht.

Zusammengefasst kann gesagt werden, dass mit Hilfe eines ZTU-Schaubildes und der Kenntnis über die chemische Zusammensetzung des Werkstoffes, die Wärmebehandlungsprozesse auf das gewünschte Endgefüge eingestellt werden können.



4 Modellbildung für die thermische Simulation

In diesem Kapitel wird der Aufbau des Simulationsmodelles von den theoretischen FE-Grundlagen bis zur physikalischen Modellbildung behandelt.

4.1 Finite-Elemente-Methode

Die Finite-Elemente-Methode hat sich im Bereich der numerischen Simulation mittlerweile als wichtiges Berechnungswerkzeug für den Ingenieur etabliert. Viele Problemstellungen in der Technik, wie die Wärmeleitung in festen Körpern oder die Deformation von Bauteilen werden durch partielle Differentialgleichungen beschrieben. Die Lösung dieser Differentialgleichungen, das bedeutet die Bestimmung der unbekanntenen Größen Temperatur oder Verschiebung, kann nur in speziellen Fällen auf analytischem Weg erfolgen. Für die Lösung von komplizierten Aufgabenstellungen werden numerische Verfahren eingesetzt.

Der Lösungsansatz bei der Methode der finiten Elemente besteht darin, das Berechnungsgebiet in bestimmte Anzahl endlich vieler Elemente zu unterteilen (Abbildung 4.1). Diese Elemente sind miteinander durch Knotenpunkte verbunden.

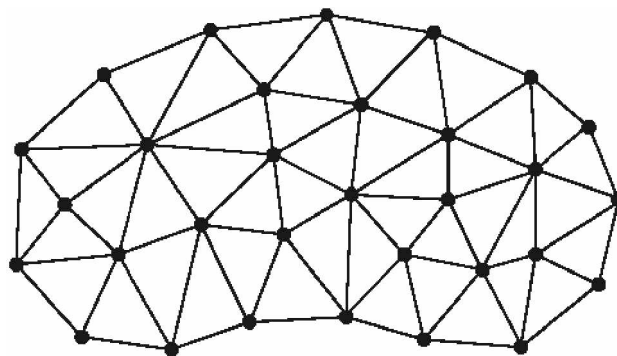


Abbildung 4.1: Unterteilung des Berechnungsgebietes in finite Elemente



Ein Element besitzt spezielle Ansatzfunktionen. Mit Hilfe dieser Ansatzfunktionen und den Randbedingungen lässt sich ein algebraisches Gleichungssystem aufstellen. Dazu wird das Verfahren nach Ritz oder Galerkin verwendet. Aus dem algebraischen Gleichungssystem werden die gesuchten Größen in weiterer Folge ermittelt.

Ist das betrachtete Problem instationär, muss zusätzlich noch eine Zeitdiskretisierung vorgenommen werden. Für die Lösung von zeitabhängigen Problemen ist zusätzlich eine Anfangsbedingung notwendig.

Bei nichtlinearen Differentialgleichungen (geometrisch oder materialabhängig) erfolgt die Lösung iterativ. In der Literatur sind zur Lösung dieser nichtlinearen Gleichungssysteme verschiedene Verfahren angeführt [17].

Die Methode der finiten Elemente hat sich inzwischen als wichtiges Berechnungswerkzeug etabliert und findet in vielen physikalischen Problemstellungen eine Anwendung.

4.2 Thermische Modelle für die Abschrecksimulation

Die relevanten Gleichungen zur Erstellung des Berechnungsmodelles werden in diesem Abschnitt erläutert und weiters wird zur Bildung des physikalischen Simulationsmodelles Stellung genommen.

Die Hauptgleichung für die thermische Simulation und somit für die Berechnung der instationären Temperaturverteilung ist die *FOURIERSche-Wärmeleitungsgleichung* [21].

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) + \dot{Q} = \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.1)$$

In Gleichung (4.1) steht T für Temperatur und t für Zeit. Die isotropen Werkstoffeigenschaften werden mit ρ als Dichte, c_p als spezifische Wärmekapazität und λ als Wärmeleitfähigkeit bezeichnet. In der vorliegenden Arbeit sind diese von der Temperatur abhängig, dies hat zur Fol-



ge, dass die Gleichung (4.1) nichtlinear wird. Mit der Größe \dot{Q} werden vorhandene Wärmequellen berücksichtigt.

Die Lösung der Differentialgleichung (4.1) ist ein Temperaturfeld das vom Ort und der Zeit abhängig ist. Dazu ist die Vorgabe der Anfangs- und Randbedingungen notwendig. Als Anfangsbedingung wird ein Temperaturfeld zum Zeitpunkt $t=0$ angegeben.

$$T(x, y, z, t = 0) = T_0(x, y, z) \quad (4.2)$$

Die Randbedingung kann als Temperaturrandbedingung definiert werden. Dabei wird die Temperatur für die Oberfläche T_O wie in Gleichung (4.3) vorgegeben.

$$T_O = T(x, y, z) \quad (4.3)$$

Eine weitere Randbedingung ist die Festlegung des Wärmestroms q nach Gleichung (4.4).

$$q = \alpha (T_O - T_W) \quad (4.4)$$

In der aufgestellten Gleichung steht α für den Wärmeübergangskoeffizienten und T_W für die Temperatur des Kühlmediums.

In der vorliegenden Arbeit ist eine erforderliche Randbedingung über die Fortran User-Subroutine „*SFILM*“ als Wärmestrom-Randbedingung, welche den Wärmeübergangskoeffizienten α als Funktion von Temperaturdifferenz ΔT und Wasserbeaufschlagungsdichte V_S berücksichtigt, definiert. Speziell für die Abschrecksimulation des Stahlrohrs wurde ein Unterprogramm mit dem Namen „bewegte Wärmesenke“ erstellt. An dieser Stelle wird auf das Kapitel 4.3.3 verwiesen, wo weiterführende Informationen zu dem Thema zusammengefasst sind.

4.2.1 Modellbeschreibung für das Außenquench

Viele Problemstellungen in der Technik besitzen komplexe Zusammenhänge, wie eine komplizierte Geometrie oder anspruchsvolle Randbedingungen, sodass eine Lösung nur schwer oder gar nicht möglich ist. Um eine Lösung zu ermöglichen werden daher vereinfachte Modelle des Problems erstellt.

Das Berechnungsmodell ist so festgelegt, dass nur die für die Lösung relevanten Merkmale definiert sind. Um die Rechenzeit und die Speicherkapazität zu reduzieren, wird das Modell so realitätsnah wie nötig für die Berechnung aufgebaut. Die Modellbildung ist ein wesentlicher Arbeitsschritt für die Gewährleistung guter Simulationsergebnisse.

Der Modellaufbau für die Abschrecksimulation mit den Anfangs- und Randbedingungen ist in Abbildung 4.2 dargestellt.

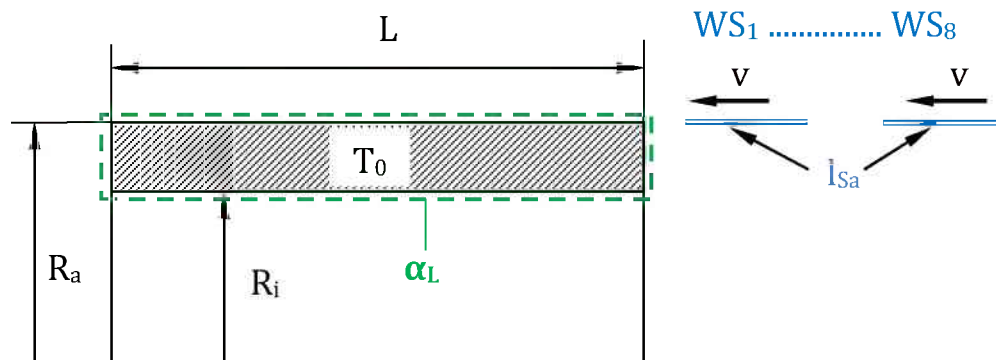


Abbildung 4.2: Modell Außenquench; bewegte Wärmesenken WS_1 bis WS_8 ; Rohrlänge L , Außenradius R_a , Innenradius R_i , Länge einer Wärmesenke l_{sa} und Geschwindigkeit v der bewegten Wärmesenken, Wärmeübergangszahl α_L zwischen Rohr und Luft.

Abbildung 4.2 zeigt das Berechnungsmodell für die Außenabkühlung eines Stahlrohres mit der Rohrgeometrie und den erforderlichen Anfangs- und Randbedingungen. Die Ausgangssituation ist so definiert, dass zum Zeitpunkt Null ($t=0$) eine Temperatur T_0 und die Randbedingungen α_L vorgegeben sind. Der Grund für die Festlegung dieser Randbedingungen ist, dass das Rohr bevor es die Abschreckanlage erreicht kurzzeitig an der Luft ist. Im konkreten Fall beträgt die Körpertemperatur T_0 am Anfang 880 °C .



Weiters ist in Darstellung 4.2 L die Modelllänge, l_s die Länge der Wärmesenke, R_a der Außenradius und R_i der Innenradius des Rohres.

Das Modell ist so definiert, dass die Abkühlung der heißen Rohroberfläche über die bewegten Wärmesenken WS eingeleitet wird. Die Bewegung der Wärmesenken in Richtung zum Rohr erfolgt mit einer Geschwindigkeit v . Der Kühlprozess beginnt erst dann, wenn der direkte Kontakt zwischen der Wärmesenke und dem Rohr gegeben ist.

Das Simulationsmodell unterscheidet sich in einem wesentlichen Punkt zum realen Abkühlprozess, bei der wirklichen Abkühlung wird das Stahlrohr in die Quenchanlage zum Abschrecken geführt und nicht umgekehrt.

Am Anfang dieser Diplomarbeit wurden Modelle erstellt in denen das Rohr bewegt wurde und die Wärmesenken feststehend waren. Aber aus programmtechnischen Gründen ist es einfacher das Rechenetz fest zu halten und die Randbedingungen zu bewegen. Deshalb wurde dem Modell mit der bewegten Wärmesenke der Vorzug gegeben.

4.2.2 Modellbeschreibung für das Außen- und Innenquenchen

Eine Erweiterung des Simulationsmodells ist in Abbildung 4.3 dargestellt. In der skizzierten Situation wird das Rohr von außen und innen abgekühlt. Daher wird das Berechnungsmodell um die bewegte Innenwärmesenke WS_i mit der Länge l_{Si} erweitert. Diese bewegt sich mit derselben Geschwindigkeit v , wie die äußeren Wärmesenken in Richtung zum Kühlobjekt.

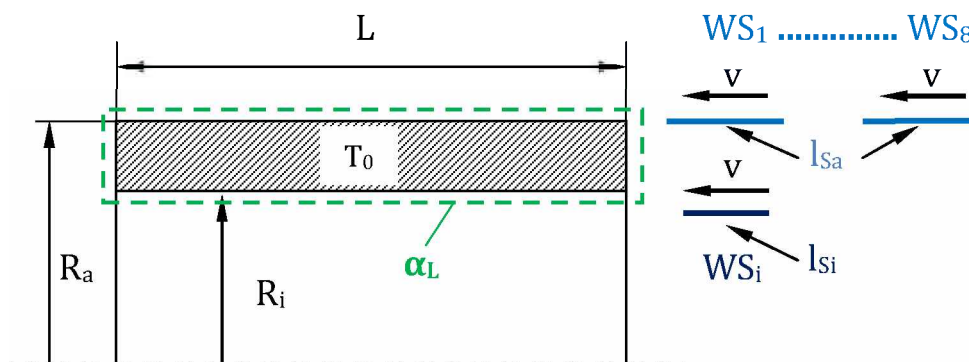


Abbildung 4.3: Simulationsmodell Außen- und Innenquenchen; Modelllänge L , Außenradius R_a , Innenradius R_i , Länge der äußeren Wärmesenken l_{Sa} , Länge der inneren Wärmesenke l_{Si} , Geschwindigkeit v der Wärmesenken.



Die Definition der Anfangs- und Randbedingungen ist gleich wie im Modell Außenquench.

Als nächstes werden die erforderlichen Arbeitsschritte für die Implementierung des Modelles in die Berechnungssoftware *ABAQUS*TM erklärt.

4.3 Erstellung der Simulationsmodellen

Die Abschrecksimulation in der vorliegenden Arbeit ist eine thermische Problembetrachtung. Der Temperaturverlauf wird mit einer transienten Temperaturfeldberechnung bestimmt. Als Berechnungswerkzeug kam die Methode der finiten Elemente (FEM) und speziell die Software *ABAQUS 6.8* zum Einsatz.

Zuerst werden die Simulationen für das Außenabschrecken und in weiterer Folge für die Kombination Außen- und Innenabschrecken erstellt. Das Hauptaugenmerk bei diesen thermischen Simulationen ist die Berücksichtigung der bewegten Wärmesenken und des Wärmeübergangskoeffizienten.

Zur Implementierung der Randbedingung in die Berechnung bietet das Simulationsprogramm *ABAQUS*TM eine Möglichkeit über die Fortran User-Subroutine „*SFILM*“ an. Der Aufbau der Subroutine wird in weiterer Folge genauer beschrieben.

4.3.1 Geometrierstellung

Die Modellerstellung (Pre-processing) erfolgt mit Hilfe der graphischen Benutzeroberfläche *ABAQUS/CAE*. Über diese können die Geometrie und weitere wichtige Parameter für die weitere Berechnung definiert werden.

Die Erstellung eines geometrischen Körpers ist prinzipiell mit *ABAQUS/CAE* möglich. Eine weitere Möglichkeit ist die Geometrie aus einem CAD-Programm zu importieren. Um die Rechenzeit und die Speicherkapazität zu reduzieren, werden für das Modell Symmetrieeigenschaften genutzt, wie in Abbildung 4.4 gezeigt ist. Dazu wird die reale Stahlrohrgeometrie für die numerische Analyse auf eine rotationssymmetrisches 2D-Modell übertragen.

Ein Auszug des implementierten Input-Files für die Außen- und Innenkühlung ist als Ausdruck im Anhang [A-1] enthalten.

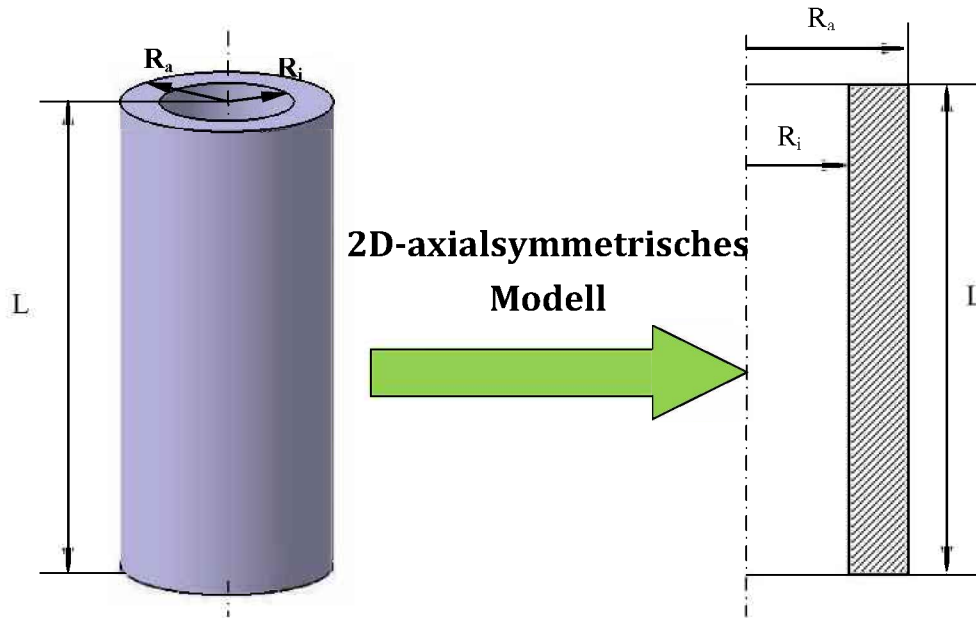


Abbildung 4.4: Originalkörper und 2D-axialsymmetrische Geometrie

Nach der Modellerstellung werden dem Körper Werkstoffkennwerte, wie in Tabelle 4.1 aufgelistet, zugewiesen.



4.3.2 Implementierung der Materialeigenschaften

Für die transiente thermische Simulation sind die Werkstoffkennwerte Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität und die Dichte erforderlich. In der vorliegenden Arbeit sind diese Kennwerte temperaturabhängig. Einen Überblick der eingesetzten Materialdaten gibt Tabelle 4.1 an. Diese Materialkennwerte wurden von der Firma Voestalpine Tubulars Kindberg zur Verfügung gestellt.

Temperatur T [°C]	Dichte ρ [kg/m ³]	Spezifische Wärmekapazität c_p [J/kg K]	Wärmeleitfähigkeit λ [W/m K]
25	7736,05	455,33	39,09
100	7714,1	485,25	39,06
200	7682,49	521,62	38,24
300	7648,28	567,57	36,92
500	7572,05	683,3	33,29
700	7530,04	1099,33	28,48
800	7498,19	818,89	25,78
900	7448,4	574,35	26,15
1000	7395,99	643,05	27,3

Tabelle 4.1: Werkstoffkennwerte für die untersuchte Stahllegierung



4.3.3 Definition der bewegten Wärmesenke

Die Qualität der Simulationsergebnisse hängt nicht nur von der Geometriemodellierung oder den Werkstoffkennwerten sondern entscheidend auch von den thermischen Randbedingungen ab.

Für die Beschreibung der Abkühlbedingungen in der Abschreckanlage werden bewegte Wärmesenken *WS* für die Außen- und Innenkühlung als thermische Randbedingungen erstellt. Diese Wärmesenken sind Wärmestrom-Randbedingungen, sie hängen wesentlich von der Wärmeübergangszahl α ab. Dieser Parameter besitzt den größten Einfluss auf die Temperaturentwicklung, wie in der Verdampfungskurve (Abbildung 2.6) skizziert ist. Weiters beschreibt dieser die Wärmeübergangsverhältnisse zwischen Werkstück und Abkühlmedium. Die Modellierung des Wärmeübergangs als Funktion von Wärmeübertragungskoeffizienten ist ein Hauptkriterium für die Güte der Simulationsergebnisse.

Die Modellierung eines Abkühlprozesses stellt sich schon bei einfacher Simulationsgeometrie, wie bei einem Würfel oder einer Kugel, als schwierig heraus. Der Grund dafür ist die Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten, da dieser von einer ganzen Reihe von Faktoren abhängt.

Um eine Charakterisierung der Wärmeübergangszahl zu ermöglichen, werden Vereinfachungen getroffen. Der erste Ansatz ist, den Wärmeübergangskoeffizienten konstant über den ganzen Temperaturbereich anzunehmen. Eine bessere Näherung ist eine lineare Approximation des Wärmeübergangskoeffizienten, in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz, wie in Abbildung 4.5 gezeigt ist.

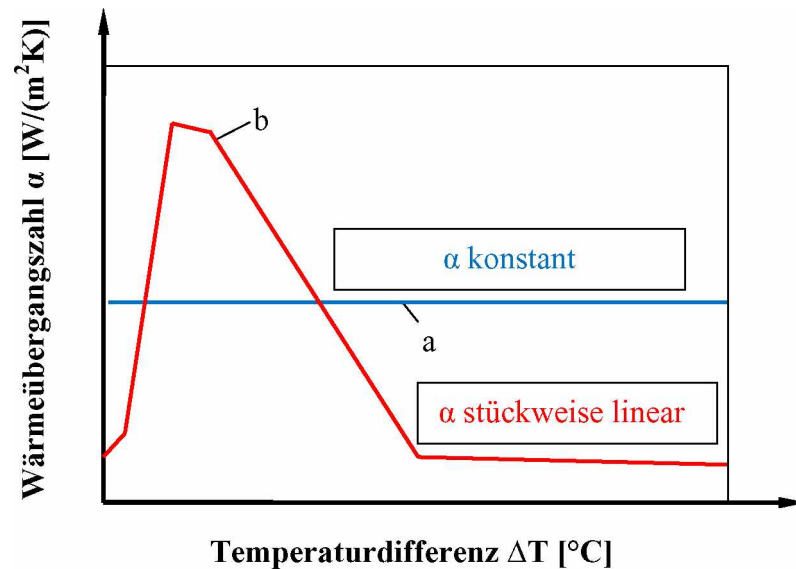


Abbildung 4.5: Approximation des temperaturabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten α ; a) α -konstante, b) lineare Approximation.

Der nächste Detaillierungsgrad ist den temperaturabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten α durch eine Polynomfunktion n-ten Grades abzubilden. Für diese Annäherung der Nukiyama-Kurve eignete sich die Polynomfunktion 4. Grades am besten. Die Berechnung und die graphische Darstellung dieser Funktion erfolgt mit dem kommerziellen Computeralgebrasystem *MATCAD*. In Abbildung 4.6 ist der Wärmeübergangskoeffizient als Funktion der Temperaturdifferenz, des Näherungspolynom und den Fehler zwischen der Nukiyama-Kurve und dem Näherungspolynom dargestellt.

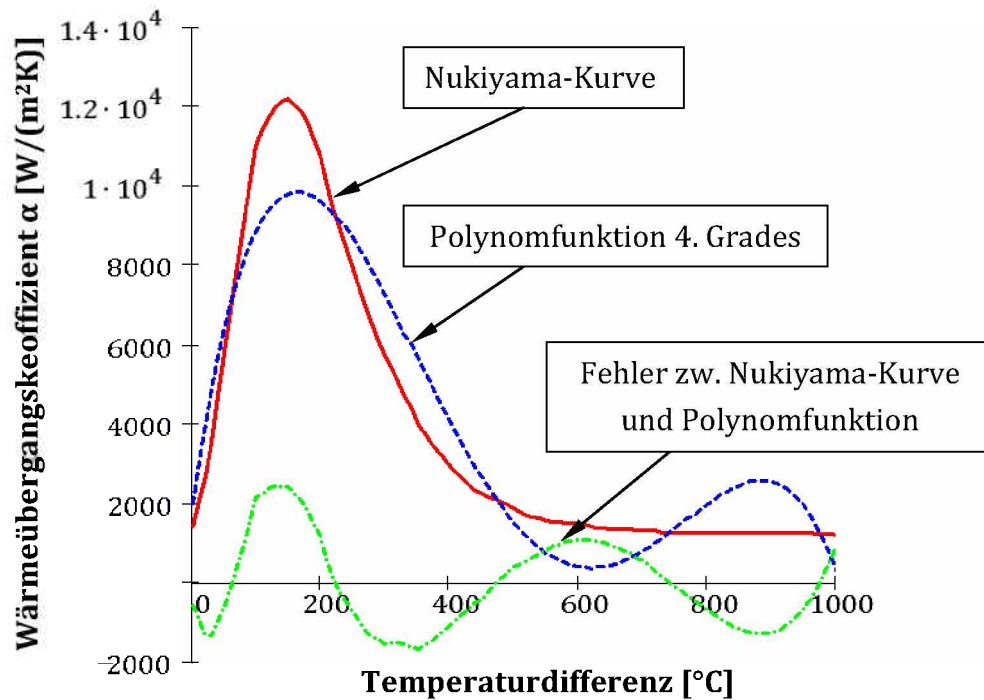


Abbildung 4.6: Polynomfunktion-4.Grades als Approximation an die Verdampfungskurve mit $V_S=10 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$.

Die oben skizzierte Polynomfunktion ist eine mögliche Annäherung an die Verdampfungskurve (roter Verlauf). Für genauere Betrachtungen eines thermischen Abschreckproblems ist dieser Ansatz zur Beschreibung des Wärmeübergangs nicht geeignet. Der Grund dafür ist, wie aus Abbildung 4.6 ersichtlich die große Abweichung zwischen der realen Verdampfungskurve und der Näherung.

Eine weitere Option zur Angabe des variablen Wärmeübergangskoeffizienten ist eine Kombination von zwei Exponentialfunktionen. Dieser Ansatz für die Beschreibung von α wurde mit der Software *MATCAD* entwickelt und lautet:

$$f(\Delta T) = 1200 + 10300 \cdot e^{-\left(\frac{\Delta T - 145}{108}\right)^2} + 3500 \cdot e^{-\left(\frac{\Delta T - 300}{125}\right)^2} \quad (4.5)$$

In der Gleichung (4.5) sind die Exponentialfunktionen von der Temperaturdifferenz ΔT abhängig. Der Verlauf dieser Funktion ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

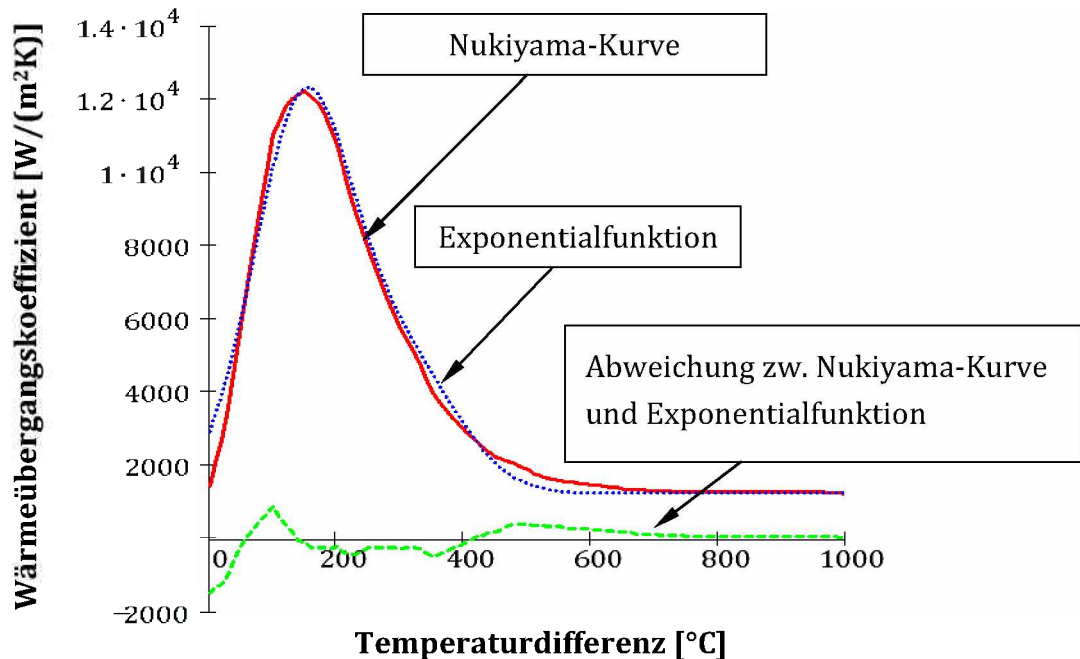


Abbildung 4.7: Exponentialfunktionen als Annäherung an die Nukiyama-Kurve mit $V_S=10 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$.

Die Exponentialfunktionen bieten eine gute Annäherung an die Verdampfungskurve und die Abweichung ist gering. Allerdings lieferte auch dieser Ansatz nicht ganz die erwarteten Simulationsergebnisse, weil hier die Verläufe nur für eine bestimmte Wasserbeaufschlagungsdichte V_S gelten und diese im realen Prozess wesentlich höher liegen. Für eine Wasserbeaufschlagungsmenge von $10 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ ist der Wärmeübergangskoeffizient als temperaturabhängiger Funktion in Abbildung 4.7 dargestellt.

Für weiterführende Überlegungen ist es notwendig den Wärmeübergangskoeffizienten α als Parameter von der Temperaturdifferenz und von der Wasserbeaufschlagungsdichte V_S anzugeben. Damit besteht die Möglichkeit den realen Abkühlprozess besser abzubilden. Die Anforderung, dass der Koeffizient α von der Temperatur und von der Wassermenge abhängig ist, kann mit einer Fit-Funktion erfüllt werden. Die Fit-Funktion stellt den Wärmeübergangskoeffizienten



ten auf der Rohroberfläche in Abhängigkeit von der Oberflächentemperatur, der Wassertemperatur und der Wasserbeaufschlagungsdichte dar. Dieser Zusammenhang lautet:

$$\alpha(\Delta T, V_S) = 190 \pm 25 + \tanh\left(\frac{V_S}{8}\right) \quad (4.6)$$
$$\times \left(140 \pm 4V_S \left[1 - \frac{V_S \cdot \Delta T}{72000 \pm 3500} \right] + 3.26 \pm 0.16 \cdot \Delta T^2 \left\{ 1 - \tanh\left(\frac{\Delta T}{128 \pm 1.6}\right) \right\} \right)$$

Er wird bei Wendelstorf und Spritzer [14] angeführt und begründet.

Die Oberflächentemperatur T_O des Rohres wird in der Abschrecksimulation für jeden Zeitschritt neu berechnet und fließt über die Temperaturdifferenz $\Delta T = T_O - T_W$ in die Gleichung (4.6) ein.

Der weitere Arbeitsschritt ist die Charakterisierung der bewegten Wärmesenke mit der Beziehung aus der Gleichung (4.6). Zu diesem Zweck wird mit der Programmiersprache *Fortran* eine User-Subroutine *SFILM*-, „bewegte-Wärmesenke“ erstellt. Das Hauptgerüst der Subroutine *SFILM* bildet neben dem Wärmeübergangskoeffizienten als Funktion von Temperatur und Wasserbeaufschlagungsdichte die *IF-ELSEIF*-Schleifen. Über diese *IF* -Bedingungen ist es möglich reale Abkühlvorgänge gut zu beschreiben. Die Anbindung ans *ABAQUS*TM erfolgt mit Hilfe eines geeigneten *Fortran Compilers*.

Detaillierte Informationen Subroutine „bewegte Wärmesenke“ können im Anhang [A-4] entnommen werden. Dort ist der Programmcode angegeben.

4.3.4 Fit-Funktion für unterschiedliche Wasserbeaufschlagungsdichten

Die Fit-Funktion erlaubt eine Darstellung verschiedener Wärmeübertragungszahlen in der Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz und der Wassermenge. Zur Demonstration werden fünf konkrete Fälle im Diagramm 4.8 präsentiert.

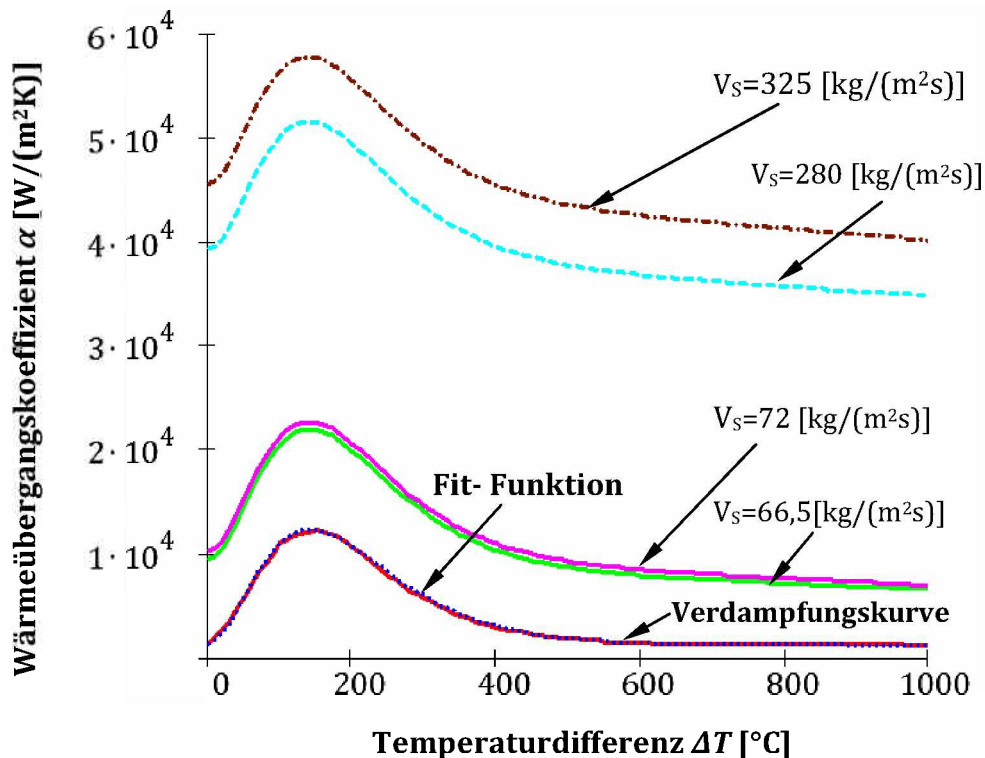


Abbildung 4.8: Fit-Funktionen für Wärmeübergangszahlen α nach Gleichung (4.6).

Die Basisfunktion in Abbildung 4.8 ist als rote Linie ausgeführt und gibt genau die Verdampfungskurve an. Die Fit-Funktion für eine Wasserbeaufschlagungsmenge von $10 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ ist blau gepunktet. Die Ungenauigkeit der Fit-Funktion im Vergleich zur Basisfunktion ist minimal.

Eine Erhöhung der Wasserbeaufschlagungsdichte V_S führt zur Steigerung des Wärmeübergangskoeffizienten α in allen Wärmeübergangsbereichen.

In der Literatur sind ausführliche Arbeiten zu dem Thema bekannt, in denen dieser Sachverhalt als richtig angegeben ist [10][14].



Die Werte für die Wasserbeaufschlagungsdichten sind nicht willkürlich gewählt, sondern die zweite und die dritte Kurve ($V_S=66.5$ und $V_S=72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$) repräsentieren den Wärmeübergangskoeffizienten als Funktion der Temperaturdifferenz für die untersuchte Außenkühlung und die restlichen zwei ($V_S=280$ und $V_S=325 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$) für die untersuchte Innenkühlung.

Die Wärmestromdichte lässt sich aus dem Wärmeübergangskoeffizienten und der Temperaturdifferenz nach Gleichung (4.4) berechnen. In Abbildung 4.9 sind die Wärmestromdichten für unterschiedliche Wasserbeaufschlagungsmengen V_S abgebildet.

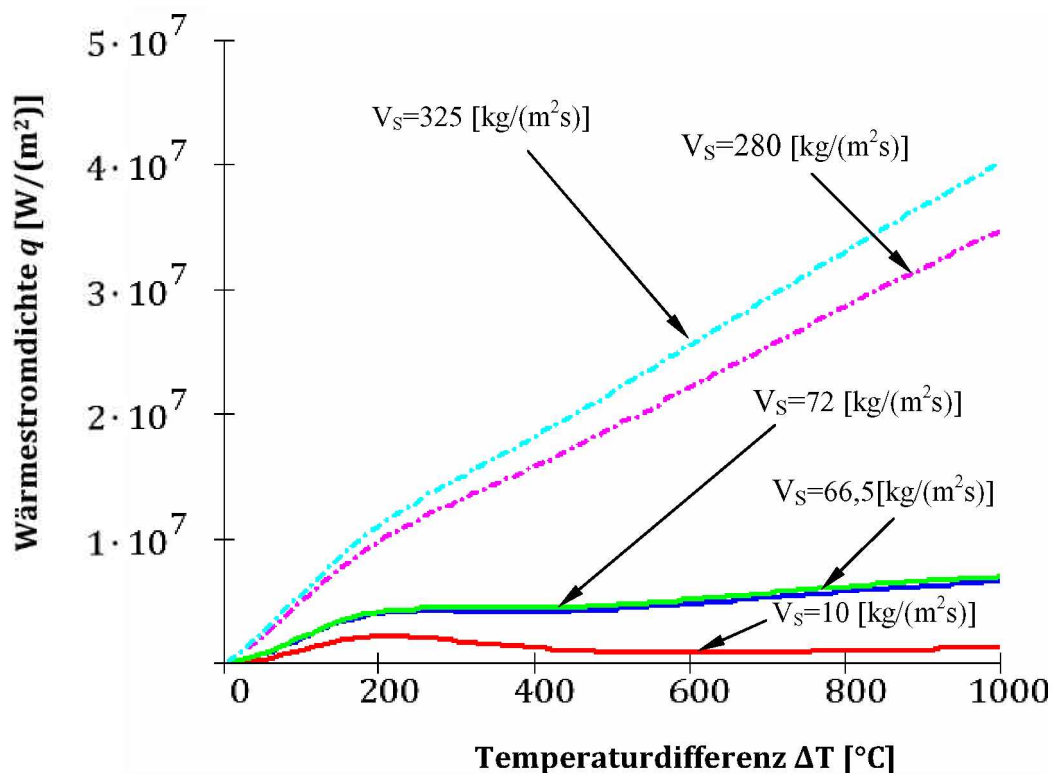


Abbildung 4.9: Wärmestromdichten q für verschiedene Wasserbeaufschlagungsmengen V_S in Abhängigkeit der Temperaturdifferenz ΔT nach Gleichung (4.4) und mit Wärmeübergangszahl α nach Abbildung 4.8.

Eine Erhöhung der Wasserbeaufschlagungsdichte bewirkt, wie abgebildet, eine Steigerung der Wärmestromdichte und somit eine schnellere Wärmeabfuhr. Der Grund dafür ist, dass zum Abkühlen der heißen Oberflächen nun mehr Wasser zur Verfügung steht.



4.3.5 Generierung des FE-Netzes

Die räumliche Diskretisierung des Simulationsmodells erfolgt mit dem Elementtyp (DCAX4), das ist ein vierknotiges axialsymmetrisches Element mit bilinearen Ansatzfunktionen. Das Berechnungsnetz ist gleichmäßig radial und längs verteilt. Die Anzahl der Elemente beträgt 19200 und die der Knotenpunkte 21609. In Abbildung 4.10 ist ein Ausschnitt des FE-Netzes gezeigt.

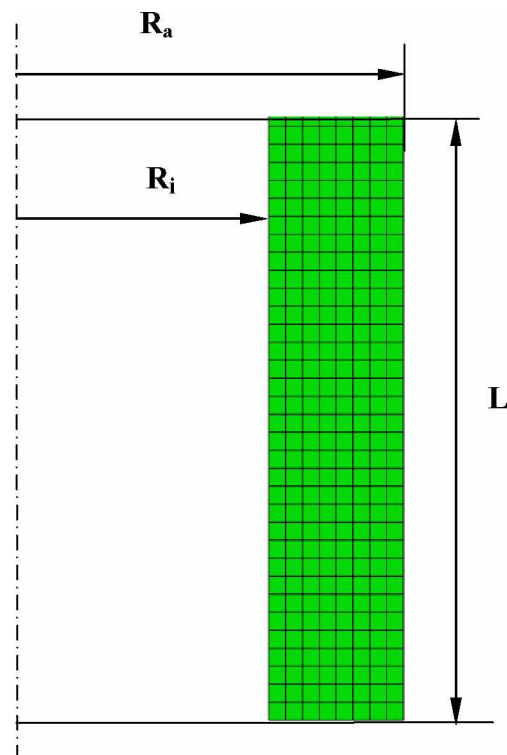


Abbildung 4.10: FE-Netz des Berechnungsgebietes; Elemententyp DCAX4, 19200 Elemente, Elementabmessung ($l \times b = 2,5 \times 2,375$ mm), 21609 Knotenpunkte.

Die 2D-Geometrie ist über die Parameter, Außenradius R_a , Innenradius R_i und über die Modelllänge L definiert. Die Vernetzung erfolgte, nach Angabe der Netzdichte, mit Hilfe von ABAQUS/CAE.



5 Ergebnisse der FEM-Berechnung

Für die Ermittlung der Temperaturverteilung im Stahlrohr werden unterschiedliche Abschrecksimulationen analysiert und die Ergebnisse graphisch als Kühllinien dargestellt. Zuerst wird das Temperaturverhalten für die Außenkühlung ermittelt. Im nächsten Schritt werden Temperaturprofile für das Außen- und Innenhärten erstellt. Zum Schluss werden mögliche Abschreckvariationen und deren Auswirkungen auf die Wärmeabfuhr betrachtet.

5.1 Temperaturfeld-Außenquench

Die Rohrabschrecksimulation liefert die Temperaturentwicklung während des Abkühlprozesses. Mit diesen Temperaturwerten und mit Hilfe eines ZTU-Schaubildes können Vorhersagen über die möglichen Gefügestrukturen getroffen werden.

Das Simulationsprogramm *ABAQUS* bietet zwei Optionen für die Ausgabe der Temperaturwerte. Die Charakterisierung der Temperatur kann direkt an den Knoten des FEM-Netzes als Feldvariable (*NT*) oder in den Elementen als Feldvariable (*Temp*) erfolgen. Dabei ist eine direkte Ausgabe der Knotentemperatur (*NT*) genauer als die der Elementtemperatur (*Temp*). Der Grund dafür liegt in der Extrapolation der Temperatur von den Knoten in die Integrationspunkte des Elementes. Daher basieren sämtliche Temperaturergebnisse auf die Feldvariable (*NT*).

Die Simulationsergebnisse für die Außenkühlung werden graphisch für drei unterschiedliche Stellen angegeben. Die Temperatureauswertung erfolgt in der Rohrstirnfläche, der Rohrmitte und am Rohrende. In den folgenden Diagrammen werden diese Positionen mit A, B und C bezeichnet.

In Abbildung 5.1 sind die Temperaturverläufe in Abhängigkeit der Abkühlzeit für die Außenkühlung, mit einer Wasserbeaufschlagungsdichte V_S von $72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ dargestellt.

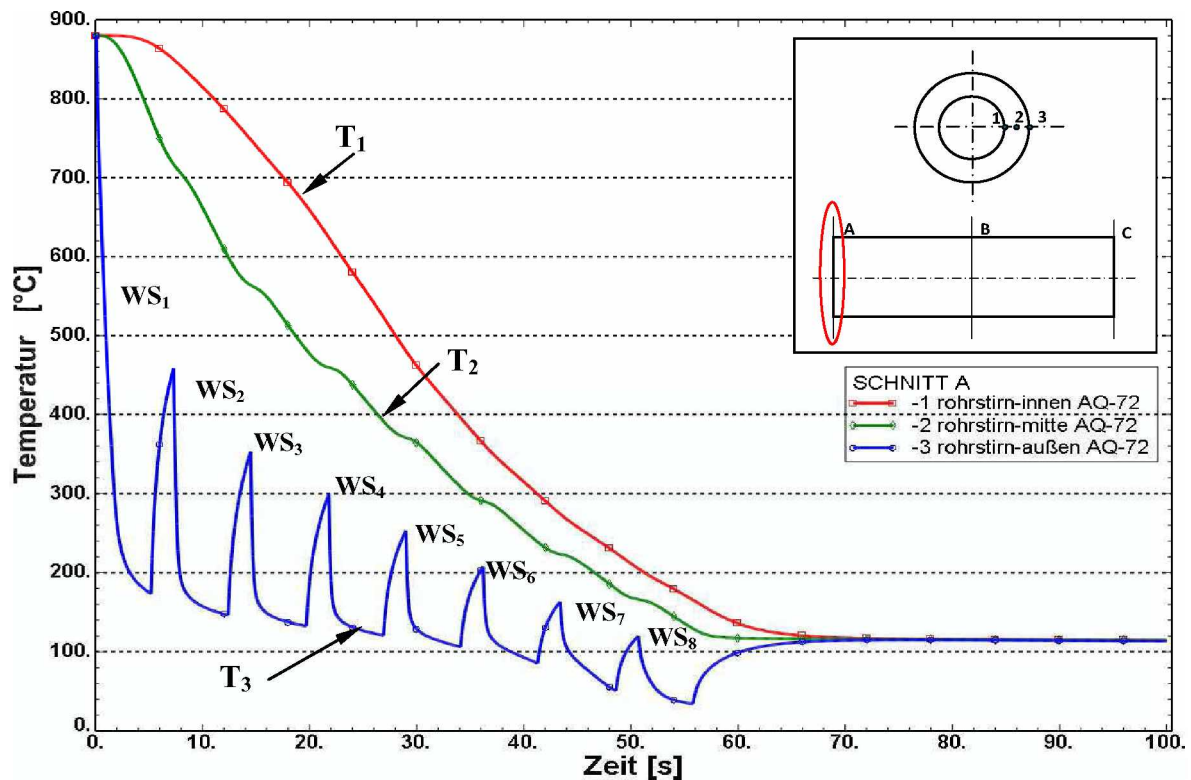


Abbildung 5.1: Temperaturprofil: Rohrstirnfläche Außenquench (AQ) $V_S=72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$.

Die Auswertung erfolgt in der Rohrstirnfläche, mit T_1 als Rohrintemperatur, T_2 als Temperatur in Wanddickenmitte und T_3 als Rohraußentemperatur. Das Diagramm ist so aufgetragen, dass auf der Ordinate die Temperatur in Grad Celsius [°C] und auf der Abszisse die Abkühlzeit in Sekunden [s] angegeben ist.

Die Ausgangssituation für die Simulation ist, dass das Rohr eine Anfangstemperatur von 880°C besitzt und die Wärmesenken sich mit $v=0,2 \text{ m/s}$ bewegen. Nach 86 s verlässt das Rohr die Quenchanlage und der Abschreckvorgang ist abgeschlossen.

Zuerst wird der Verlauf der Rohraußentemperatur T_3 analysiert. Die Härtetemperatur beträgt, wie zuvor erwähnt 880°C . Der Verlauf von T_3 nimmt nach der ersten Wärmesenke WS_1 stark ab, die Temperatur an der Außenoberfläche sinkt nach 5 s auf 170°C ab. Nach weiteren zwei



Sekunden steigt der Wert von T_3 wieder an, der Grund dafür ist die gespeicherte Wärmeenergie im Rohr. Das Stahlrohr wird von Innen bis die nächste Abkühlung WS_2 einsetzt, wieder aufgewärmt.

Erreicht die zweite Wärmesenke WS_2 das Rohr folgt zuerst ein Temperatursturz und später die nächste Aufwärmphase. Diese zweite Erwärmung fällt wesentlich geringer aus, weil die Temperaturdifferenz zwischen Außen- T_3 und Innen- T_1 kleiner wird und die gespeicherte Wärme bereits abgenommen hat. Die Intensität der Wiedererwärmung nimmt mit der Kühldauer ab und verlöscht total wenn sich die Außen- und Innentemperatur angeglichen haben.

Der Abkühlprozess für die Außenfläche setzt sich periodisch weiter fort bis das Rohr die letzte Abschreckstation WS_8 verlässt. Durch diese abwechselnden Abkühl- und Aufwärmphasen bildet die Temperaturlinie der Außenfläche eine „Sägezahn“ ähnliche Kontur.

Die Rohrintemperatur T_1 besitzt am Anfang einen Temperaturwert von 880°C . Vom Beginn des Abschreckprozesses fällt die Temperaturlinie mit der Kühldauer nur langsam ab und erreicht zum Schluss einen Wert von 118°C .

Der Verlauf von T_2 klingt über die Zeitdauer von 70 s ab und erreicht dasselbe Temperaturniveau wie die beiden anderen Temperaturkurven T_1 und T_3 .

Als nächstes werden die Temperaturlinien für die Rohrmitte und das Rohrende als Temperatur-Zeit-Diagramme dargestellt.

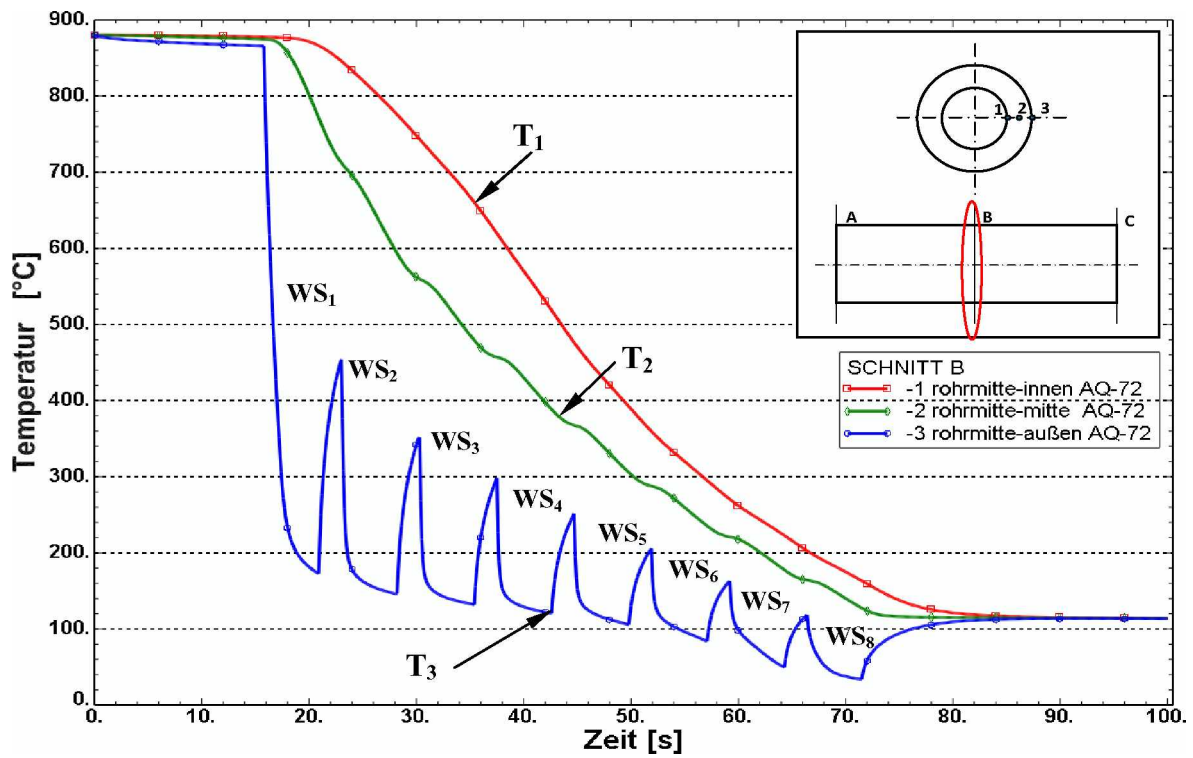


Abbildung 5.2: Temperaturprofil: Rohrmitte Außenquench (AQ) $V_S = 72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$.

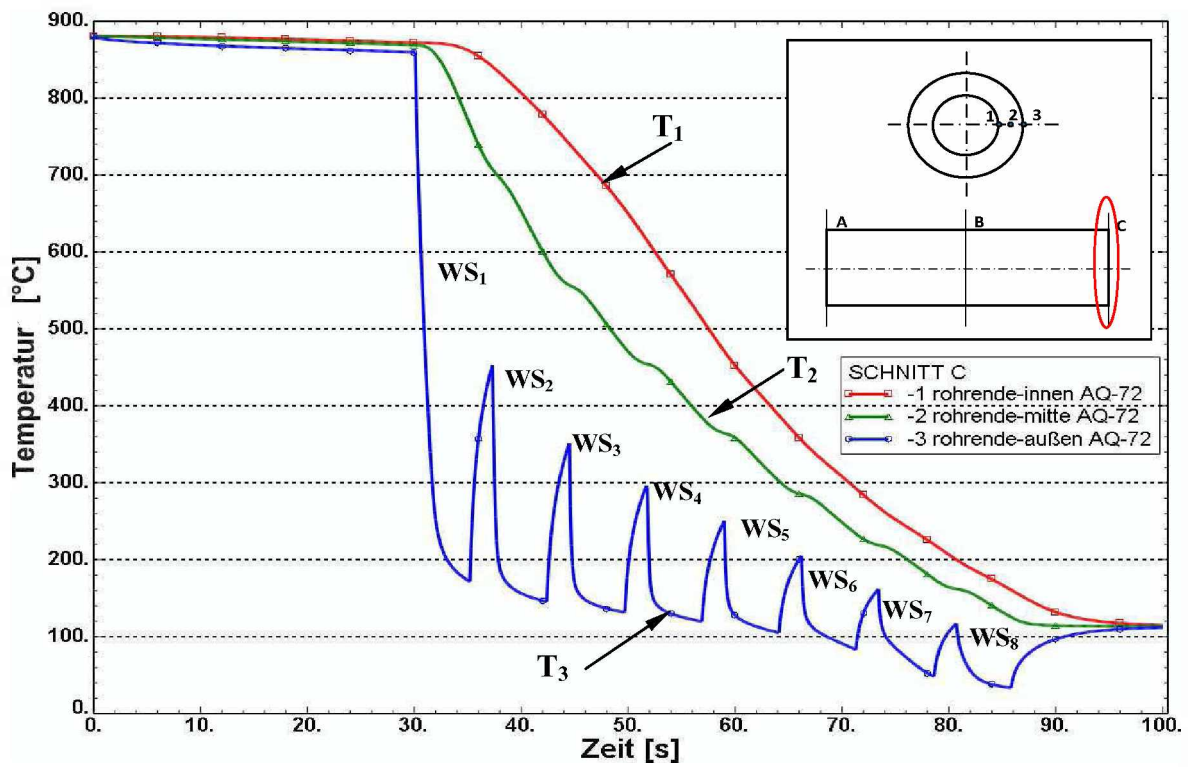


Abbildung 5.3: Temperaturprofil: Rohrende Außenquench (AQ) $V_S = 72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$.



Ein großer Vorteil der Abschrecksimulation ist, dass die Temperatur an einer beliebigen Körperposition ausgegeben werden kann. Dieser wird für die weitere Betrachtung der Temperaturentwicklung über die Rohrlänge genutzt und in Abbildung 5.2 und 5.3 als Temperaturprofile für die Rohrmitte und das Rohrende dargestellt. Die eingesetzte Wasserbeaufschlagungsdichte V_S beträgt $72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$.

Die Rohrintemperatur T_1 , die Wandmittentemperatur T_2 und die Rohraußentemperatur T_3 haben die gleichen Werte wie die Temperaturen in der Rohrstirnfläche vergleiche (Abbildung 5.1 und Abbildung 5.2, 5.3). Die Temperaturlinien sind identisch zu denen der Rohrstirnfläche, der einzige Unterschied ist, dass diese Verläufe um eine bestimmte Zeitdauer nach rechts verschoben sind.

Nach der Analyse der Simulationsergebnisse für die Außenkühlung kann festgestellt werden, dass die Temperaturabnahme über die gesamte Modelllänge L gleichmäßig verläuft.



Eine weitere Darstellung der berechneten Temperaturen für das Außenabschrecken zeigt die Abbildung 5.4.

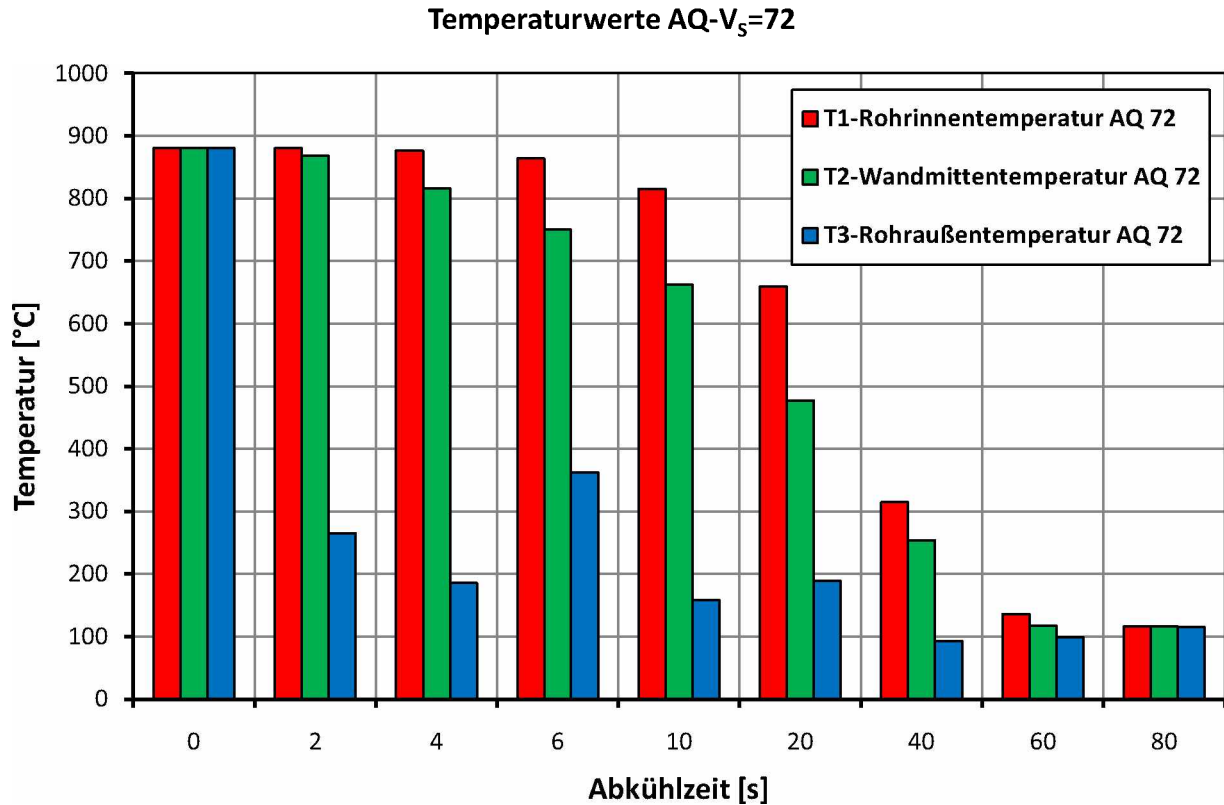


Abbildung 5.4: Gegenüberstellung der Temperaturwerte für die Außenquench (AQ); Wasserbeaufschlagungsdichte $V_s=72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$.

In dieser Abbildung werden drei unterschiedlichen Temperaturen über die Rohrwand für bestimmte Zeitpunkte miteinander verglichen. Aus dieser Darstellung ist die Temperaturdifferenz zwischen der Rohraußen- und Rohrinnenfläche ersichtlich. Ein Temperaturunterschied ist über den ganzen Prozess vorhanden, erst wenn eine Abkühldauer von 80 s erreicht ist, gleicht sich dieser aus.

Als weitere Ergänzung werden, in Abbildung 5.5, 3D-Abkühlbilder vom Rohr für bestimmte Abkühlzeiten dargestellt.

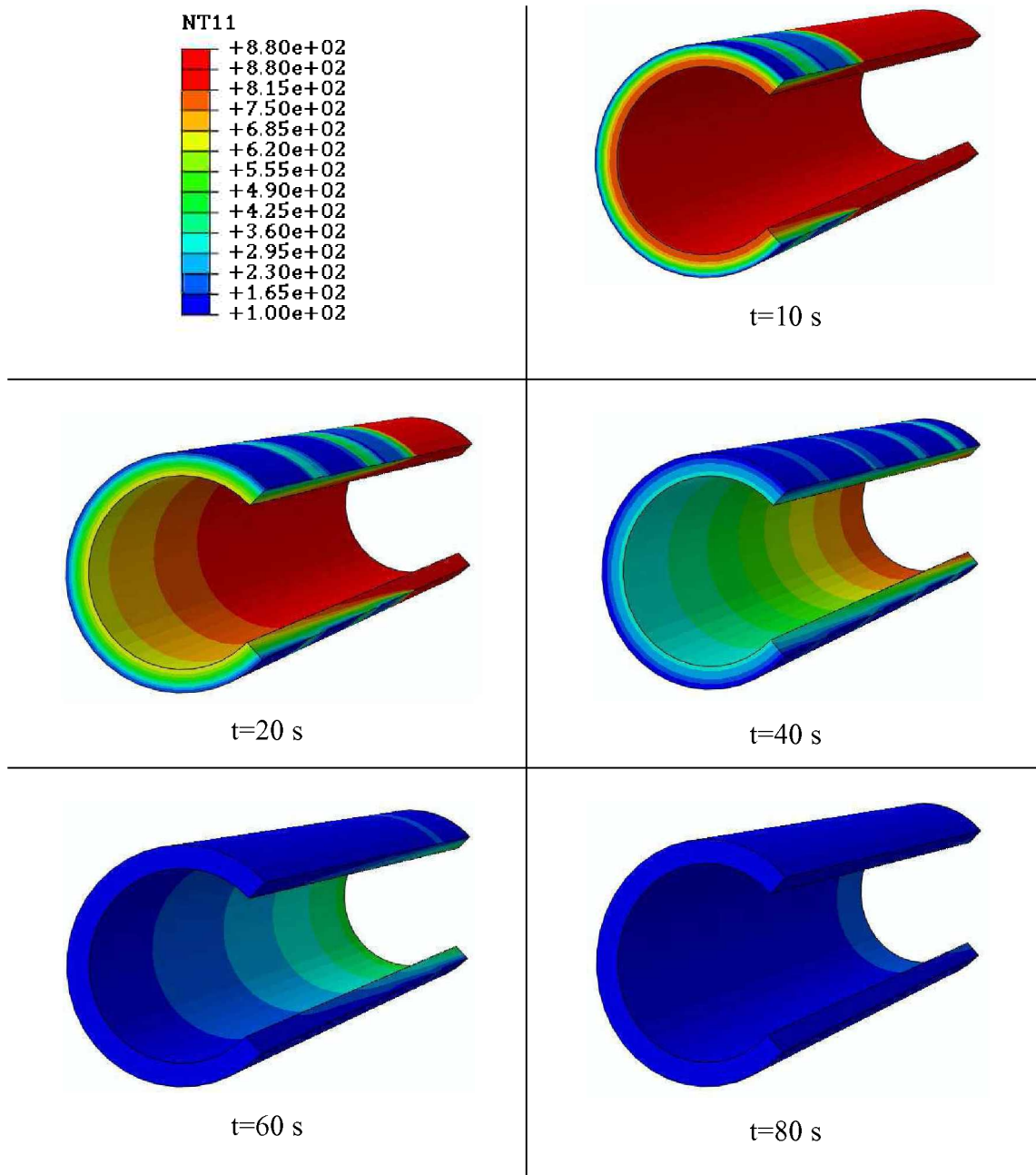


Abbildung 5.5: Temperaturfeld im Rohr für verschiedene Zeitpunkte beim Außenquench



Der Temperaturbereich ist von 880 bis 100°C begrenzt. Dabei wird als roter Bereich der höchste Wert und der niedrigste als dunkelblaues Feld definiert. Gut erkennbar ist die Temperaturverteilung über die Wandstärke und die Rohrlänge.

Die Momentaufnahme nach 10 s zeigt die kalte Rohraußenoberfläche und die heiße Rohrinnenseite. Beträgt die Abkühlzeit 40 s ist bereits sehr viel Wärme entzogen, ein deutlicher Temperaturunterschied zwischen der Rohraußen- und Rohrinnenfläche ist nur am Rohrende erkennbar. Wenn eine Abschreckdauer von 80 s erreicht ist, verlöscht dieser und eine gleichmäßige Rohrtemperatur stellt sich über die ganze Wandstärke und Länge ein.

5.2 Temperaturfeld Außen- und Innenquench

In diesem Kapitel wird die Änderung der Wärmeübertragungsverhältnisse analysiert, wenn das Rohr von außen und innen abgekühlt wird. Dazu werden Temperaturverläufe für verschiedene Zeitpunkte erstellt. Die berechneten Temperaturlinien für die Rohrstirnfläche sind in Abbildung 5.6 gezeigt.

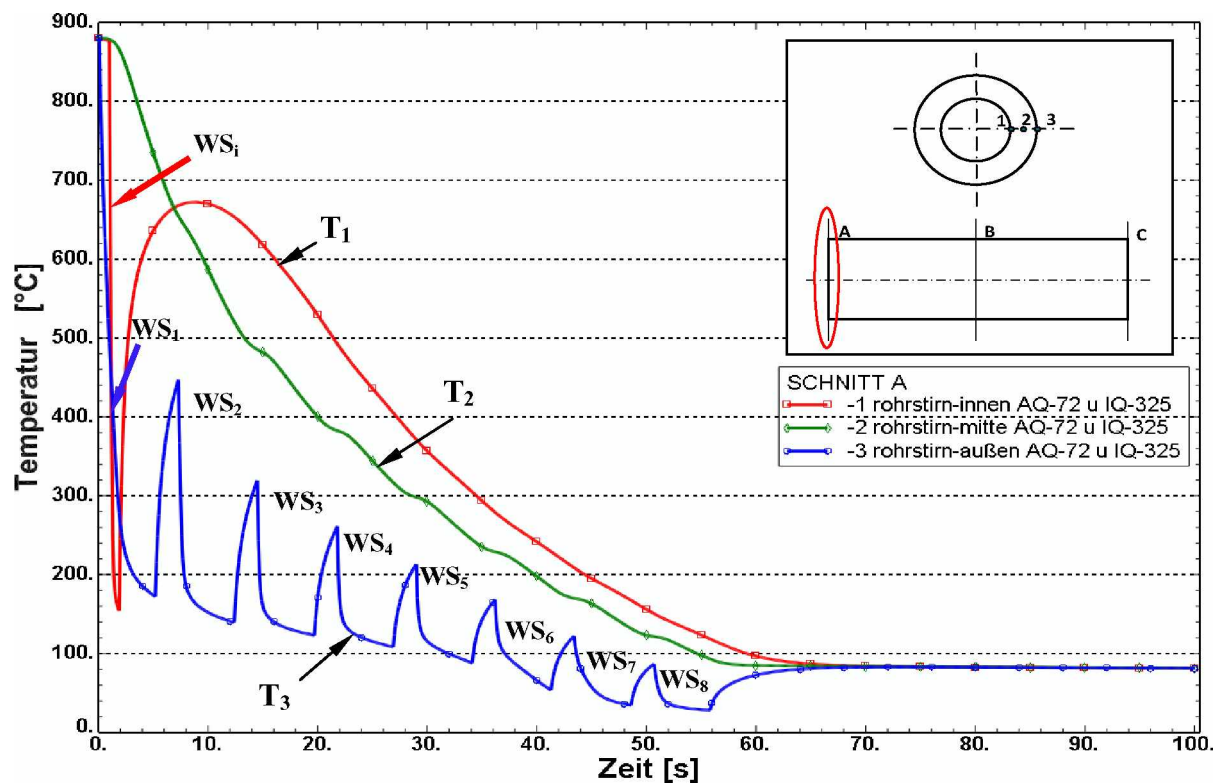


Abbildung 5.6: Temperaturverläufe: Rohrstirnfläche Außenquench (AQ) $V_S=72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ und Innenquench (IQ) $V_S=325 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$; WS_i bewegte Innenwärmesenke.

Eine interessante Situation ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Die Wärme wird nun von außen und von innen dem Kühlobjekt entzogen. Die Ausgangslage ist mit der Härtetemperatur und mit der Abschreckdauer von 100 s gegeben. Die Nomenklatur der Temperaturen ist gleich wie im Kapitel 5.1.

Die Abkühlung der Rohraußenfläche erfolgt über die acht Wärmesenken und der Verlauf der Rohraußentemperatur T_3 ist ähnlich im Vergleich zu Abbildung 5.1. Die Temperaturabnahme



von T_3 ist mit den acht Abkühl- und Aufwärmphasen gekennzeichnet und erreicht ein Wert von 80°C .

Der Verlauf der Innentemperatur T_I ist nun in Gegenüberstellung zu Abbildung 5.1 unterschiedlich. Die rasche Abschreckung erfolgt schon nach 2 s und die Temperatur T_I fällt auf einen Wert von 150°C unter. Diese starke Abkühlung führt dazu, dass nach wenigen Sekunden an der Rohrinneinnenseite eine Gefügeumwandlung stattfindet. Die gespeicherte Wärmeenergie kann nicht in dieser kurzen Zeit vollständig abgeführt werden und es folgt eine starke Wiedererwärmung der Rohrinneinnenseite. Diese Aufwärmphase hat zur Folge, dass die Innentemperatur T_I nach 9,5 s auf einen Wert von 680°C ansteigt. Die weitere Abkühlung der Innenfläche erfolgt auf Grund des konvektiven Wärmeaustausches mit der Umgebung.

Der Temperaturabfall von T_2 in Darstellung 5.6 ist stetig. Dieser erreicht nach dem Abschrecken denselben Wert wie die Rohraußen- und Rohrinneinnentemperatur.

Wie in Abbildung 5.6 gezeigt, wird mit der Kombination aus Außen- und Innenquench erreicht, dass die Temperatur der Innenfläche T_I anfangs niedriger als die mittlere Temperatur T_2 ist. Ein weiterer Effekt dieser Kühlvariante ist die Reduzierung des Temperaturunterschieds zwischen der Außen- und Innenseite.

Die Temperaturverläufe in der Rohrmitte und am Rohrende sind in den Abbildung 5.7 und 5.8 dargestellt.

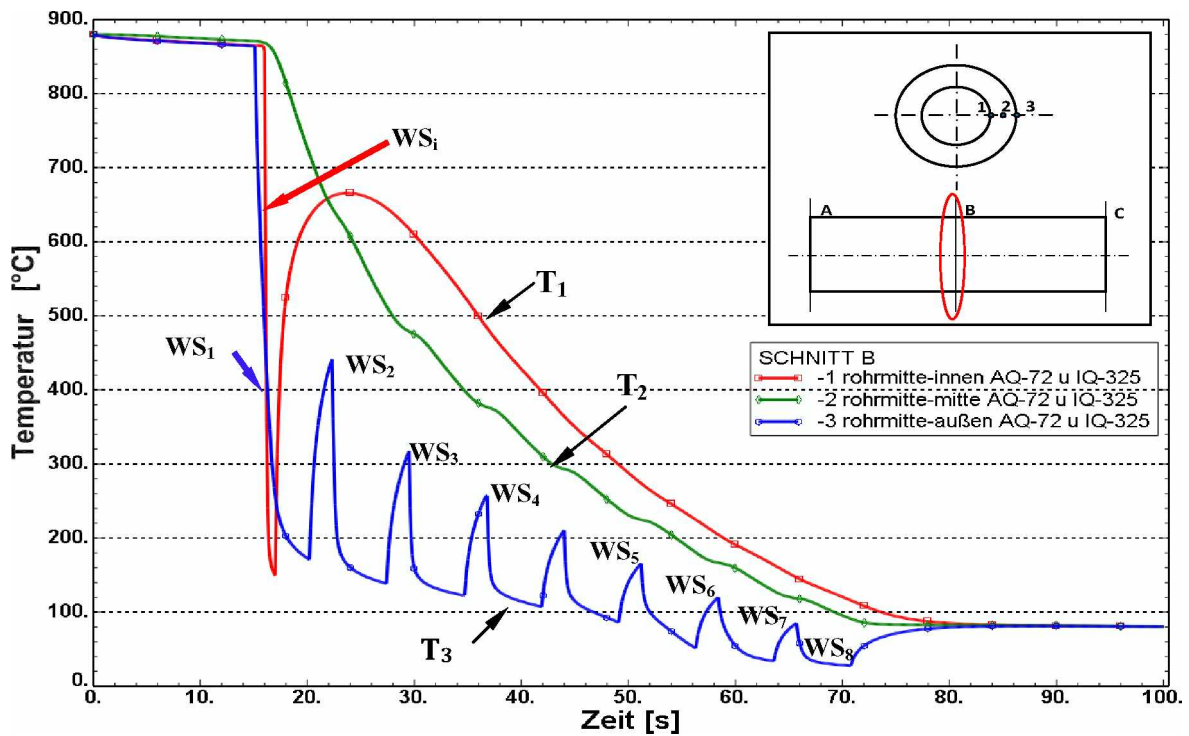


Abbildung 5.7: Temperaturverläufe: Rohrmittel Außenquench (AQ) $V_S=72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ und Innenquench (IQ) $V_S=325 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$; WS_i bewegte Innenwärmesenke.

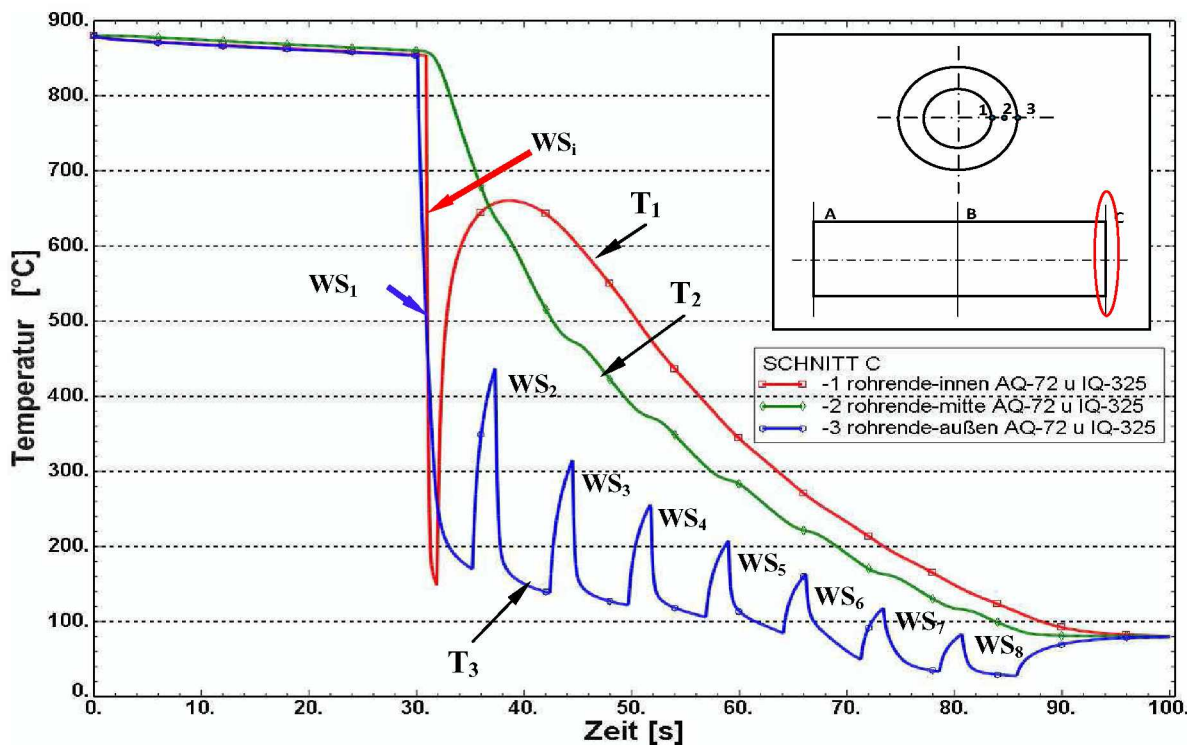


Abbildung 5.8: Temperaturverläufe: Rohrende Außenquench (AQ) $V_S=72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ und Innenquench (IQ) $V_S=325 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$; WS_i bewegte Innenwärmesenke.



Die Abschreckung mit Einbeziehung der Innenquench bzw. Innenkühlung, welche eine Beaufschlagungsdichte von $V_S=325 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ besitzt, führt zu einer intensiven Wärmeübertragung. Das ist in Abbildung 5.7 und 5.8 ersichtlich, dort sind die berechneten Temperaturverläufe graphisch dargestellt. Diese sind mit den Temperaturprofilen in Abbildung 5.6 deckungsgleich und lediglich um eine bestimmte Zeitspanne nach rechts verschoben.

Die oben erstellten Diagramme zeigen deutlich den Einfluss der Innenkühlung dem heißen Rohr wird noch schneller Wärme entzogen. Dieser Effekt führt mit sich, dass mit dieser Kühlvariante ein Erreichen der Martensitstarttemperatur M_S schneller möglich wird.

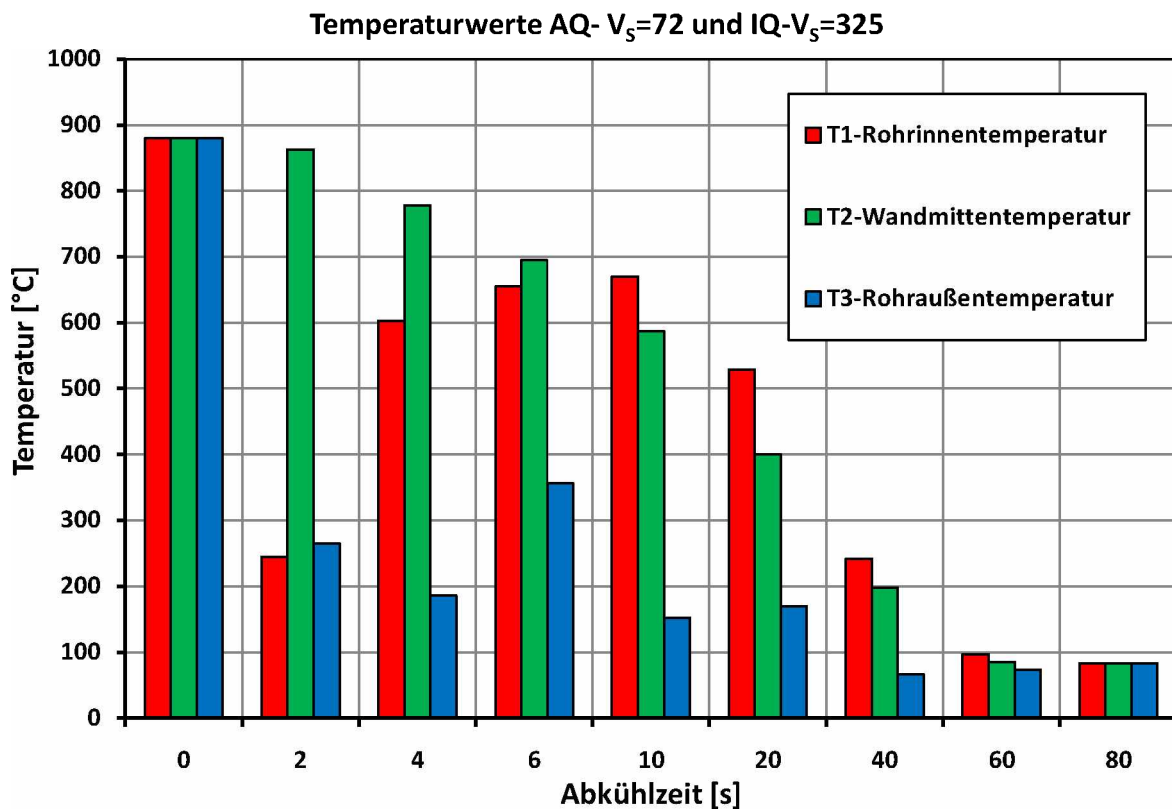


Abbildung 5.9: Gegenüberstellung der Temperaturwerte für die Kombination Außenquench (AQ) und Innenquench (IQ); Wasserbeaufschlagungsdichte-Außen $V_S=72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$, Wasserbeaufschlagungsdichte-Innen $V_S=325 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$.

Wie sich die Temperaturwerte an den drei signifikanten Stellen zueinander verhalten, ist in Abbildung 5.9 dargestellt. Am Beginn des Kühlprozesses ist die Ausgangstemperatur mit



880°C für den ganzen Körper vorgegeben. Werden nun die Temperaturwerte nach 2 s Abkühlzeit analysiert, ist die Temperaturdifferenz zwischen der Außen- und Innenfläche nicht so groß, wie im Vergleich zu Abbildung 5.4. Dafür ist die Innenkühlung verantwortlich, welche die Innenseite des Rohres schnell abkühlt. Nach einer weiteren Abkühldauer von 2 s ist der Temperaturunterschied zwischen außen und innen auf Grund des Nachwärmens gewachsen. Er verschwindet am Schluss des Abkühlprozesses.

Eine 3D-Darstellung des Temperaturfeldes im Rohr ist in der Abbildung 5.10 gezeigt. Das Rohr wird nun außen und innen gleichzeitig abgeschreckt. Nach zehn Sekunden Abkühlzeit ist der Kühleffekt eindeutig höher, als im Vergleich zur Außenkühlung. Der Grund dafür ist der bessere Wärmeabtransport mit dieser kombinierten Abschreckvariante. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Temperaturreduzierung über die Wandstärke und Länge gleichmäßiger abläuft und so die Gefahr eines Verzuges vermindert wird.

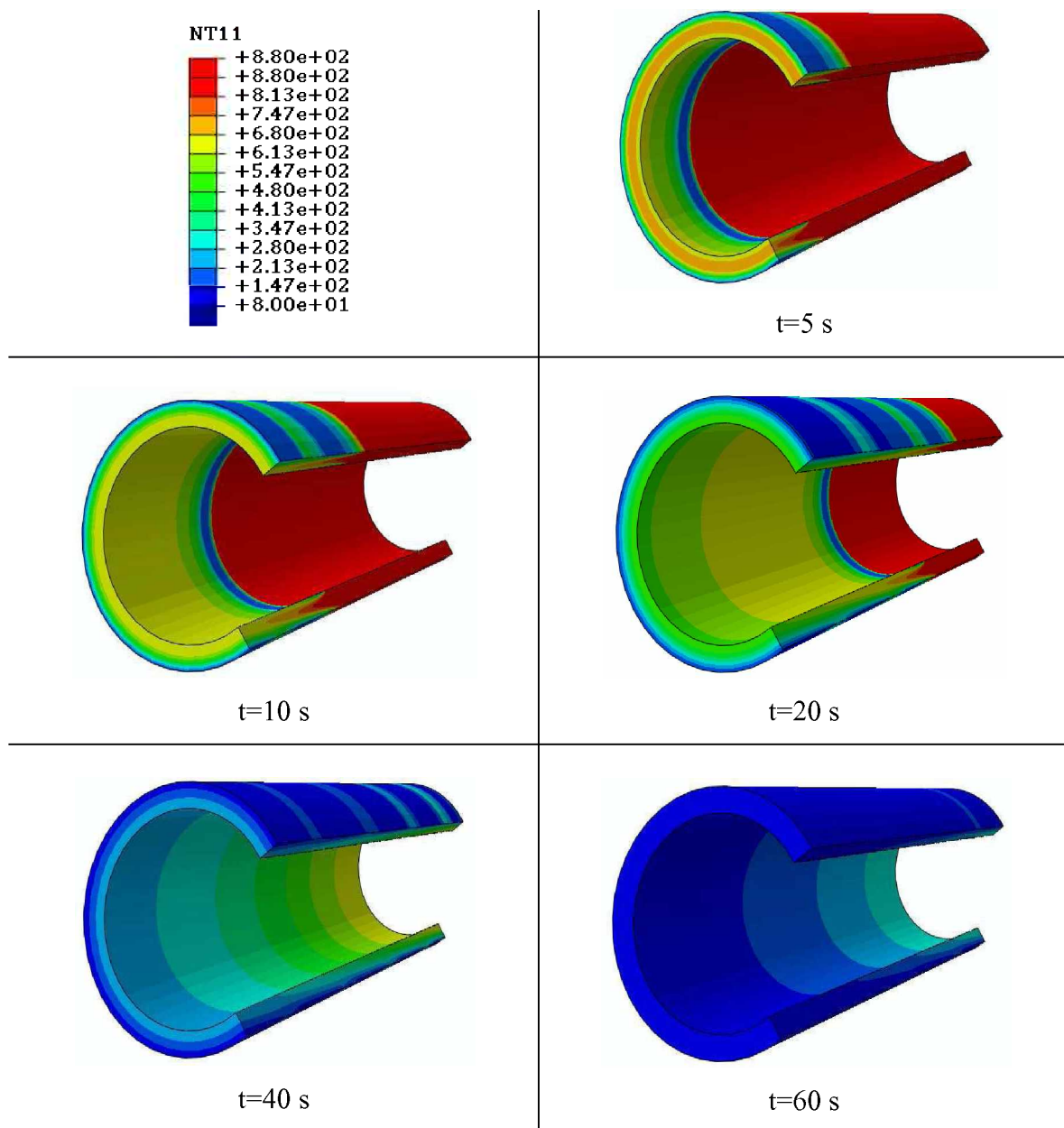


Abbildung 5.10: Temperaturfeld im Rohr für verschiedene Zeitpunkte bei Außen- und Innenkühlung

Im nächsten Schritt wird die Wassermenge der Innenkühlung reduziert und der Einfluss auf die Wärmeübertragung mit Hilfe eines Temperatur-Abkühlzeitdiagramms analysiert.



Weiters wird untersucht wie sich eine Reduzierung der Wassermenge auf die Abkühlung auswirkt. In Abbildung 5.11 ist das Temperaturprofil für Außen- und Innenquench dargestellt. Für die Innenkühlung ist die Wasserbeaufschlagungsmenge von $V_S=325 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ auf $280 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ reduziert.

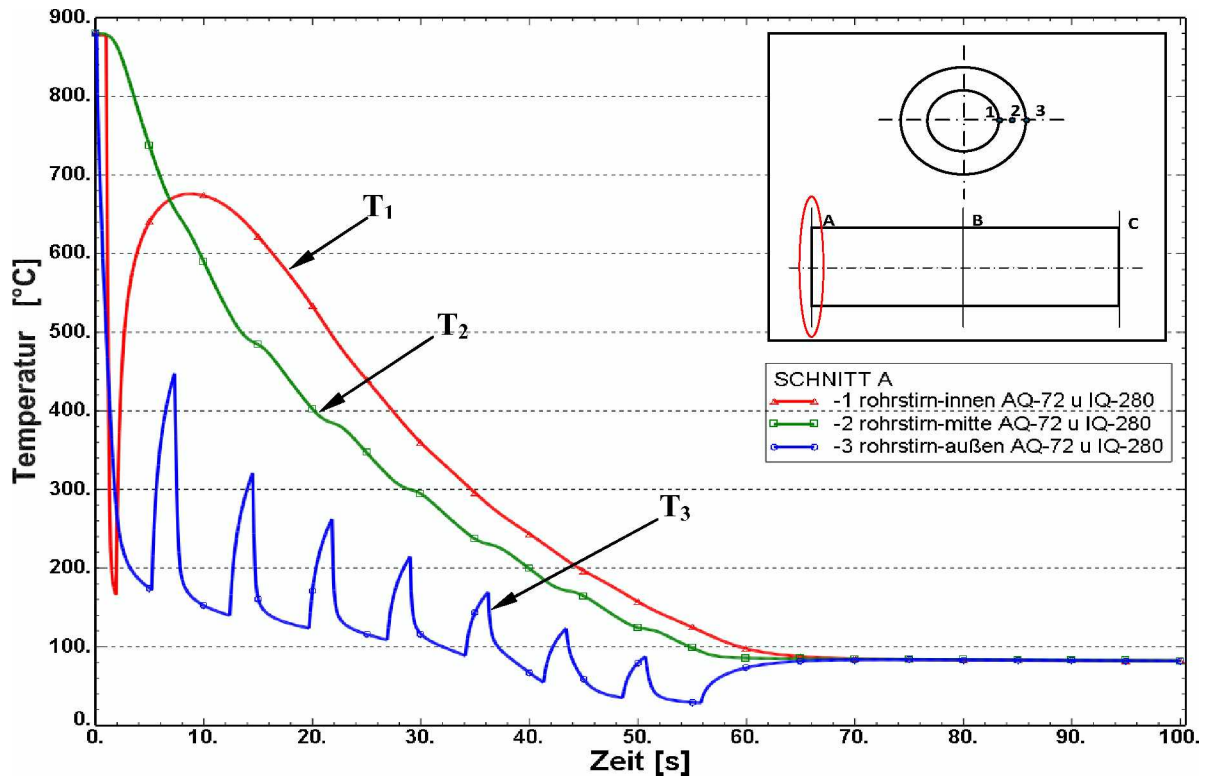


Abbildung 5.11: Temperaturprofil: Rohrstirnfläche Außenquench $V_S=72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ und Innenquench $V_S=280 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$.

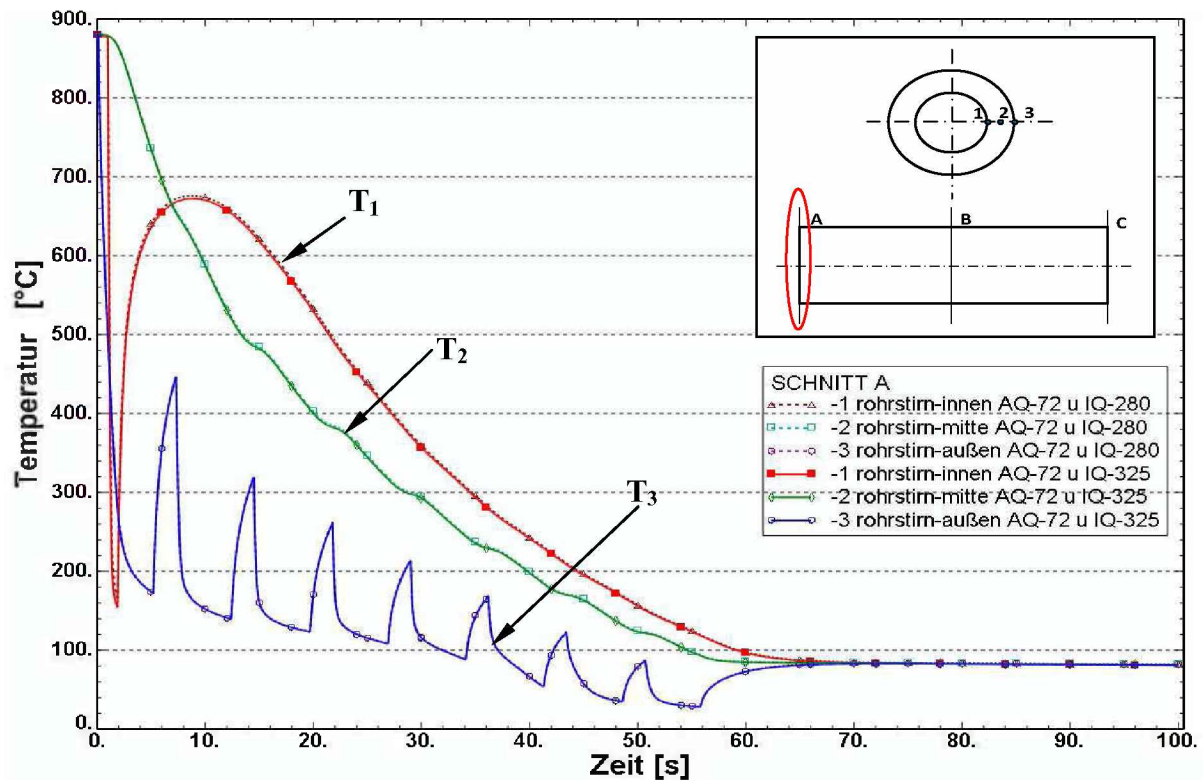


Abbildung 5.12: Vergleich der Temperaturprofile: Abbildung 5.1 mit Abbildung 5.11; Rohr-stirnfläche Außenquench $V_S=72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ und Innenquench $V_S=280 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ u. $V_S=325 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$.

Der Vergleich der Kühllinien (Abbildung 5.12) liefert ein unerwartetes Ergebnis. Obwohl die Wassermenge für die Innenkühlung auf $V_S=280 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ reduziert ist, sind die Temperaturprofile fast identisch.

Eine mögliche Erklärung dafür ist, dass ab einer gewissen Wassermenge eine maximale Wärmeübertragung erreicht ist und darüber hinaus keine signifikanten Veränderungen mehr möglich sind. Ein weiterer Grund dafür sind die Abkühlprozessbedingungen, wie die Prozessgeschwindigkeit, die Abkühlrate, die Wassertemperatur und die Materialeigenschaften. Es sind weitere Parameterstudien erforderlich um diesen Effekt genauer zu ergründen.



5.3 Konvergenzstudie des numerischen Modells

Die FE-Netzdicke wird für zwei konkrete Fälle verändert, um das Konvergenzverhalten des Netzes zu bestimmen. Dazu wird in der ersten Variante das Netz radial um die doppelte Elementenanzahl verdichtet. In der zweiten Variante erfolgt eine Netzverfeinerung in Längsrichtung um den Faktor zwei. Das ursprüngliche Netz und die beiden Netzvarianten sind in Abbildung 5.13 dargestellt.

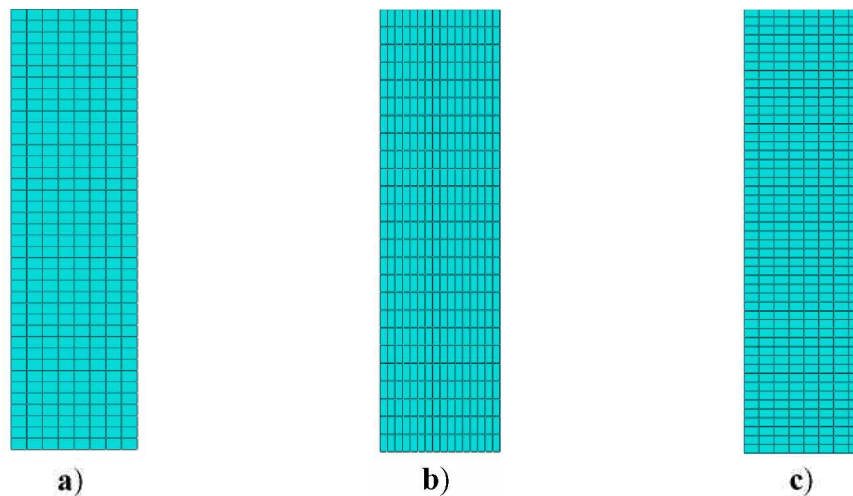


Abbildung 5.13: Variation der Netzdicke für Konvergenzbetrachtung; a) Basisnetz, b) Netz radial um Faktor zwei verdichtet, c) Netz längs um Faktor zwei verdichtet

Die Ergebnisse dieser Netzvariationen werden in den Abbildung 5.14 und 5.15 dargestellt. Der Vergleich erfolgt für die Rohrstirnfläche und das Rohrende.

Für den Beweis der Netzkonvergenz werden die Temperaturprofile der Außen- und Innenfläche für die unterschiedlichen Netzgenerierungen, wie in Abbildung 5.14 und 5.15 gezeigt, miteinander verglichen.

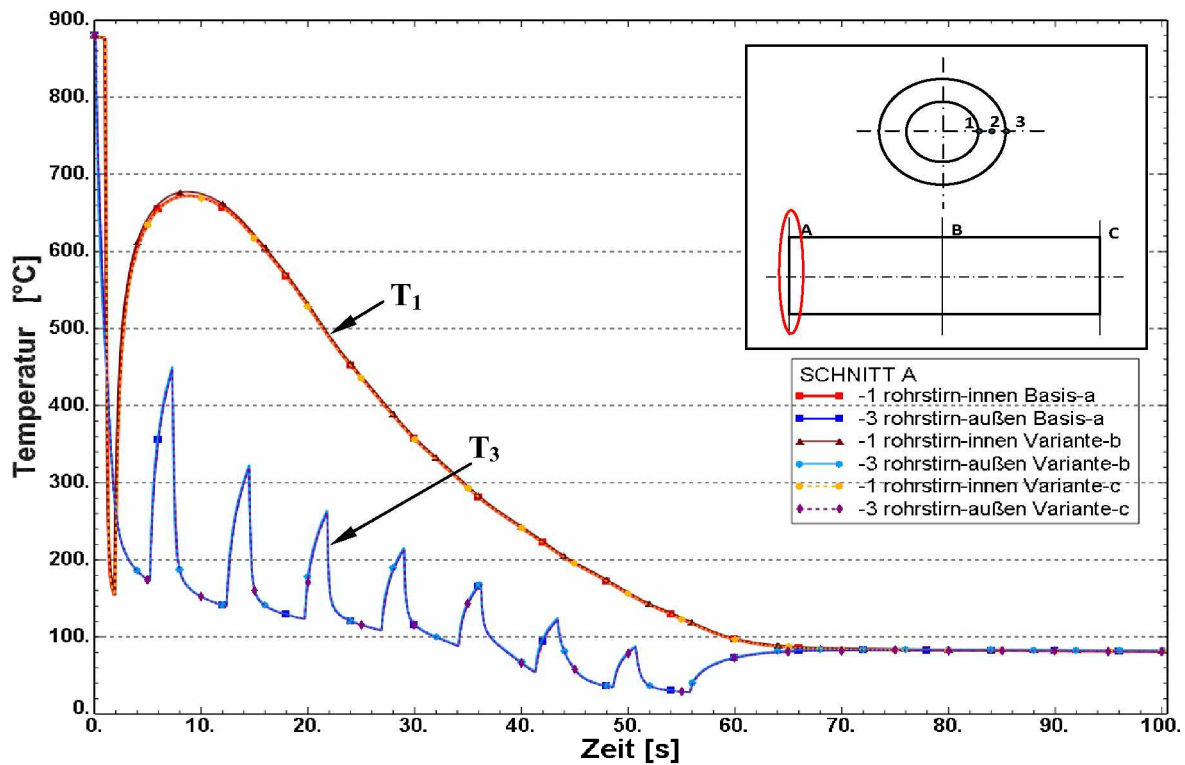


Abbildung 5.14: Temperaturverläufe in der Rohrstirnfläche für unterschiedliche Netzdichten.

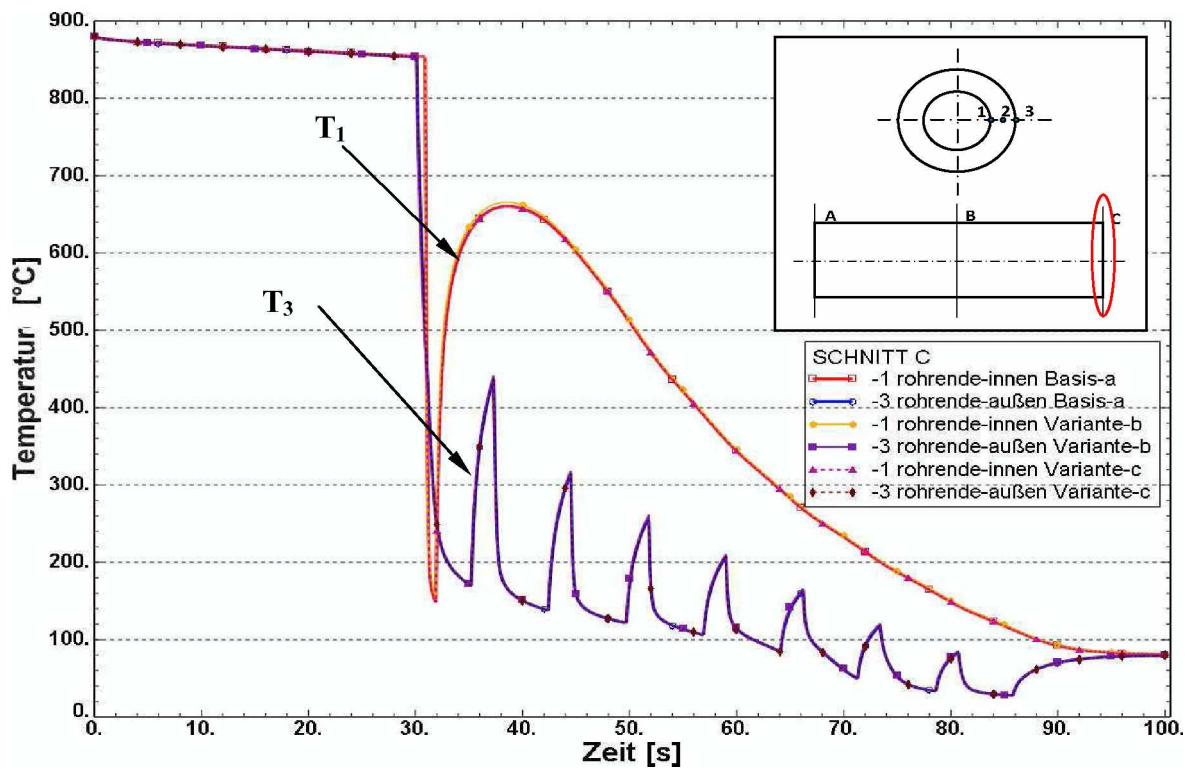


Abbildung 5.15: Temperaturverläufe am Rohrende für unterschiedliche Netzdichten.



Da die berechneten Temperaturbilder fast identische Verläufe besitzen, ist damit die Konvergenz des Netzes bewiesen. Das bedeutet, dass die gewählte Netzdichte keinen signifikanten Einfluss auf die Simulationsergebnisse hat.

6 Diskussion und Evaluierung der Ergebnisse

6.1 Gegenüberstellung von Außenquench und Außen- u. Innenkühlung

In diesem Kapitel werden direkte Vergleiche zwischen der Außenquench und der Außen- u. Innenquench gezogen. Mit diesen Gegenüberstellungen ist die Möglichkeit gegeben, die Vorteile einer Außen- und Innenkühlung aufzuzeigen.

Ein heißes Stahlrohr, das nur auf der Außenseite mit der Kühlflüssigkeit beaufschlagt wird braucht längere Zeit um über die ganze Wandstärke die Martensitstarttemperatur M_S zu erreichen. Dagegen wird mit der Kombination einer Außen- und Innenkühlung die erforderliche Umwandlungstemperatur schneller erreicht, in Abbildung 6.1 ist dieser Umstand dargestellt.

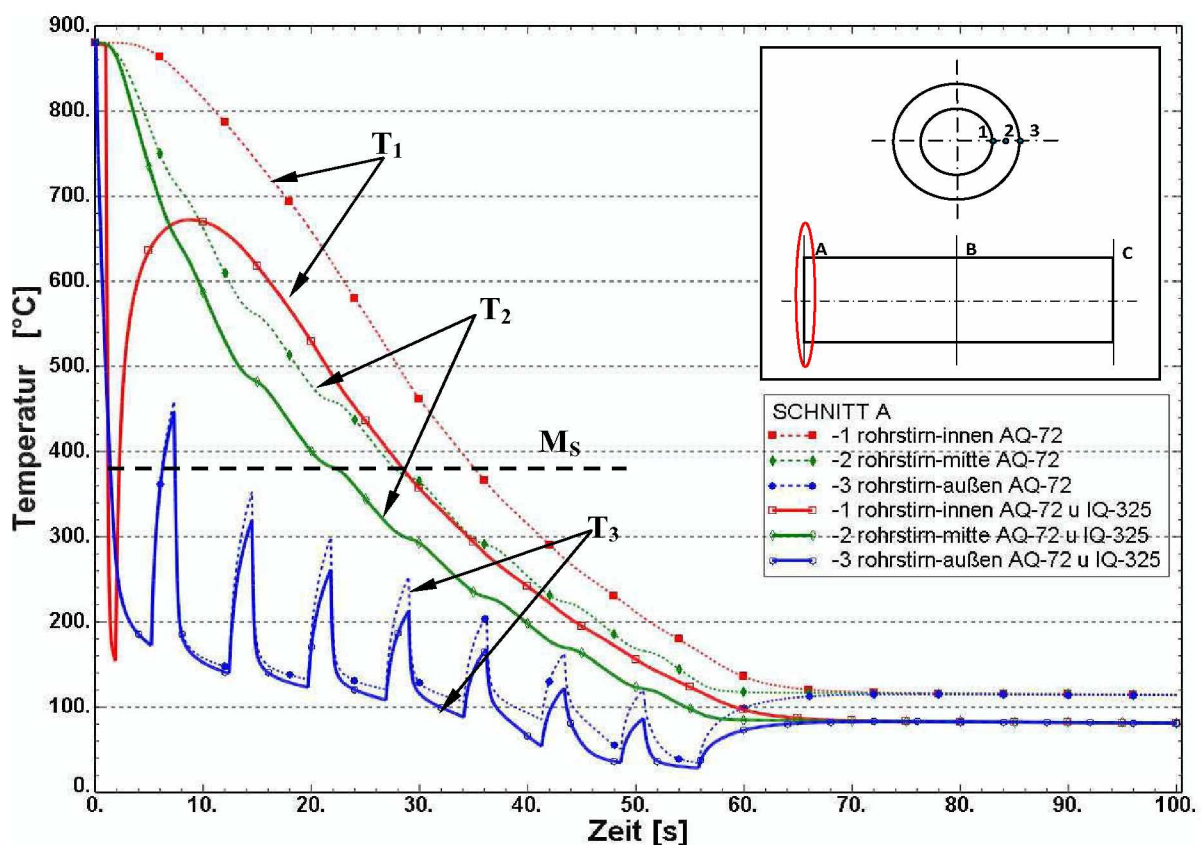


Abbildung 6.1: Rohrstimfläche: Gegenüberstellung Außenkühlung (AQ) mit Außen- u. Innenkühlung (AQ-IQ), M_S Martensitstarttemperatur.



In Abbildung 6.1 sind die Temperaturprofile der Außenkühlung über und die der Außen- und Innenkühlung gezeigt. Die Ausgangssituation ist für beide Fälle gleich, beide starten mit der Temperatur von 880°C . Ziel ist es rasch unter die Martensitstarttemperatur $M_s=400^{\circ}\text{C}$ zu kommen, um die Martensitbildung einzuleiten.

Bei der Rohraußentemperaturlinien T_3 ist die periodische Abschreckung gleichermaßen für beide Abkühlvarianten erkennbar. Nach einer Abkühlzeit von 14 Sekunden bildet sich zwischen den beiden Verläufen der Außentemperaturen eine Differenz, welche mit der Abkühlzeit größer wird und zum Schluss auf einen Wert von 37°C wächst. Der Grund dafür ist die Wärmeabfuhr über die Rohrrinnenseite.

Aufschlussreich ist die Beobachtung der Temperaturentwicklung an der Rohrrinnenseite. In der Abbildung 6.1 beschreibt der rote Verlauf die innere Temperaturabnahme T_1 für das Außen- und Innenquench. Ein steiler Temperaturabfall stellt sich dabei ein, wenn die Innenfläche mit dem Kühlwasser in die Berührung kommt.

Im Gegensatz dazu erfolgt die Abkühlung der Rohrrinnenfläche, für den Fall der alleinigen Außenquench langsam. Der Temperaturverlauf auf der Innenseite für das Außenabschrecken ist als rot strichlierter Verlauf T_1 in Abbildung 6.1 aufgezeichnet. Bei der direkten Gegenüberstellung der beiden Temperaturkurven ist ersichtlich, dass mit der Kombination einer Außen- und Innenkühlung die Wärme wesentlich schneller abgeführt wird.

Die beiden Werte der Wandmittentemperatur T_2 in Abbildung 6.1 zeigen gleich am Beginn der Abschreckung eine Differenz. Diese bleibt über die Gesamtkühldauer bestehen, aber sie ändert sich.

Die Analyse der Temperaturverläufe in der Rohrmitte (Abbildung 6.2) liefert keine neuen Erkenntnisse. Die Temperaturprofile sind jetzt zeitlich um 15 s nach rechts verschoben und besitzen einen ähnlichen Verlauf wie jene in Abbildung 6.1.

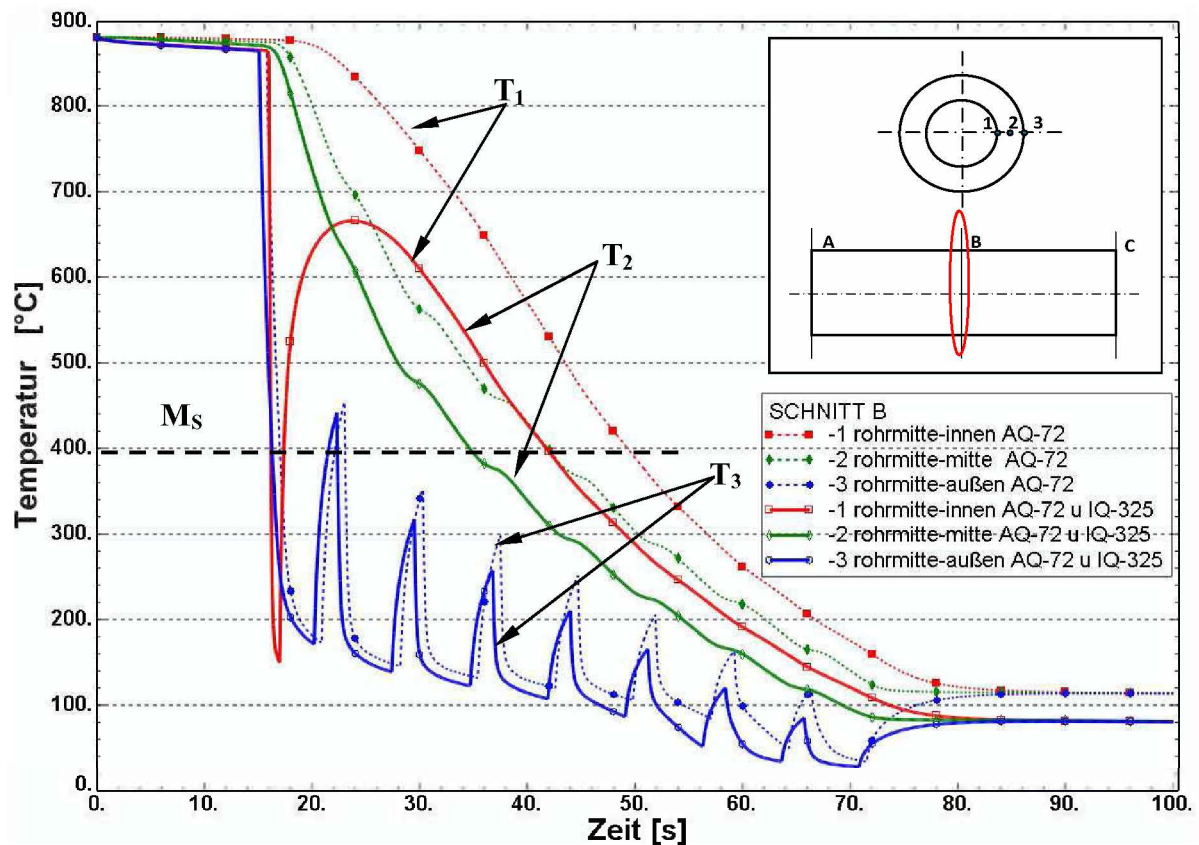


Abbildung 6.2: Rohrmitte: Gegenüberstellung Außenkühlung mit Außen- u. Innenkühlung, M_s Martensitstarttemperatur.

In Abbildung 6.3 sind die Temperaturkurven am Rohrende dargestellt. Dort wird die Umwandlungstemperatur für die Rohrinne- und Rohrmittenseite schneller mit der Außen- und Innenquench erreicht. Die Temperaturverläufe in Abbildung 6.3 sind um eine bestimmte Zeitspanne nach rechts verlegt. Auch in dieser Darstellung ist die Differenz zwischen den beiden Kühlvarianten gut erkennbar.

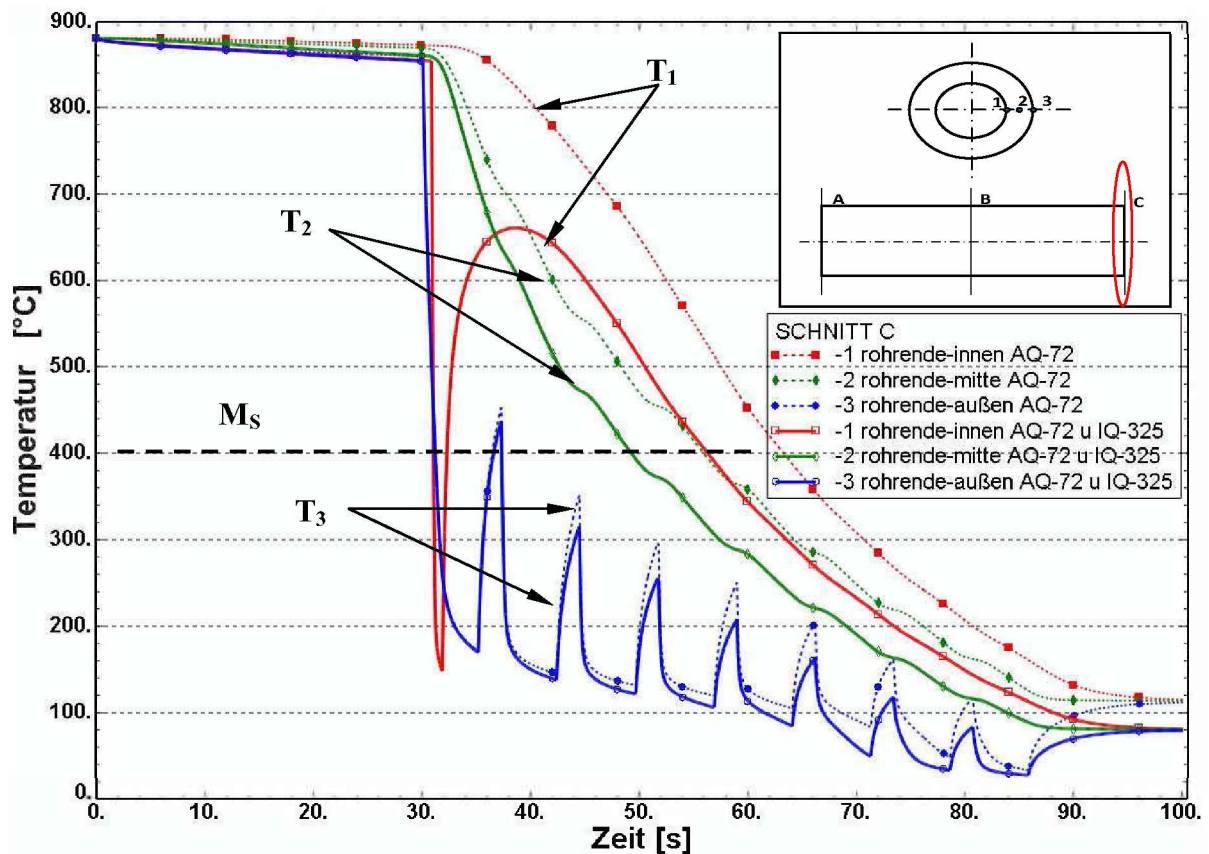


Abbildung 6.3: Rohrende: Gegenüberstellung Außenkühlung mit Außen- u. Innenkühlung; M_S Martensitstarttemperatur.

In den folgenden Abbildungen erfolgt eine Gegenüberstellung der einzelnen Abschreckvarianten. In Abbildung 6.4 werden die einzelnen Temperaturen für die zwei Kühlvarianten miteinander verglichen. Zuerst erfolgt die Gegenüberstellung der Rohrinnentemperatur T_1 , dann der Wandmittentemperatur T_2 und zum Schluss der Rohraußentemperatur T_3 .

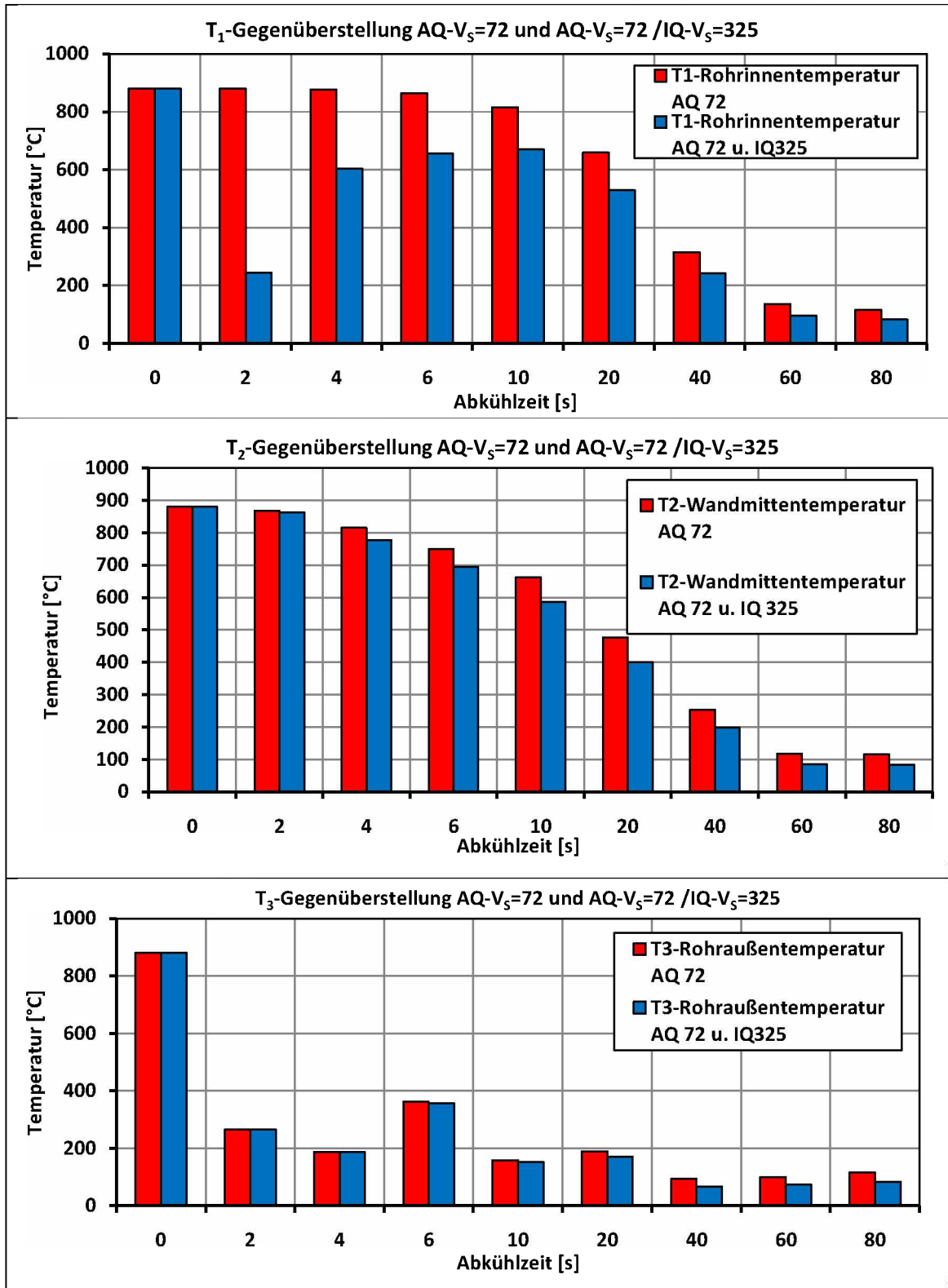


Abbildung 6.4: Gegenüberstellung der einzelnen Abschreckvarianten; Außenquench AQ-72 mit Außen- u. Innenquench AQ-72 u. IQ-325.

Die Temperatur an der Außenseite T_3 wird durch die acht Wärmesenken bis auf 72°C abgeschreckt, dabei gleicht der Temperaturverlauf einen „Sägezahnprofil“. Die mittlere Rohrtemperatur T_2 nimmt über die Zeit kontinuierlich ab.

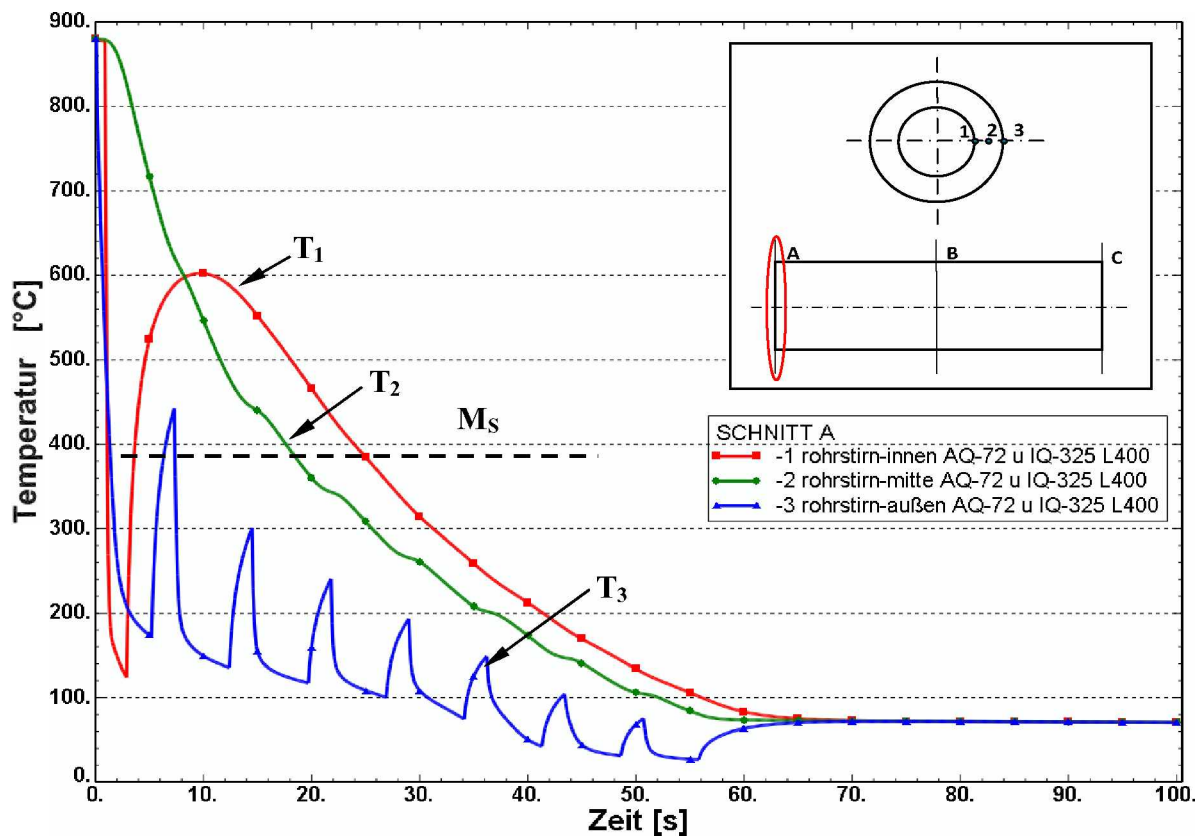


Abbildung 6.6: Rohrstirnfläche: Außen- u. Innenkühlung, Länge der Innenwärmesenke $l_{S_i}=400$ mm; M_S Martensitstarttemperatur.

Ein weiteres Modell ist in Abbildung 6.7 dargestellt. Das Rohr wird nun von innen mit zwei Wärmesenken und außen unverändert gekühlt.

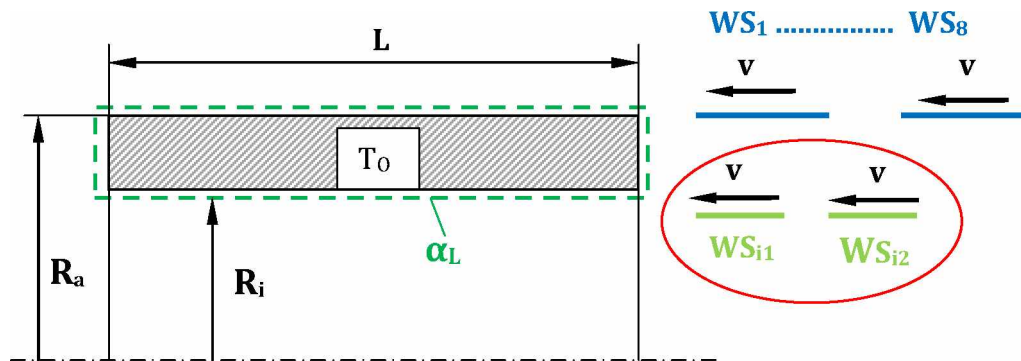


Abbildung 6.7: Berechnungsmodell mit zwei Innenwärmesenke.

Dieser Variante mit der zweiten Wärmesenke liefert interessante Ergebnisse. Auf die reale Situation zurückgeführt, wird jetzt die Innenlanze mit zwei Düsenköpfen derselben Länge bestückt.

Für die Abschrecksimulation bedeutet das, dass eine Variation der Subroutine vorgenommen werden muss. Die aus dieser Simulation errechneten Ergebnisse sind im Diagramm 6.8 aufgetragen.

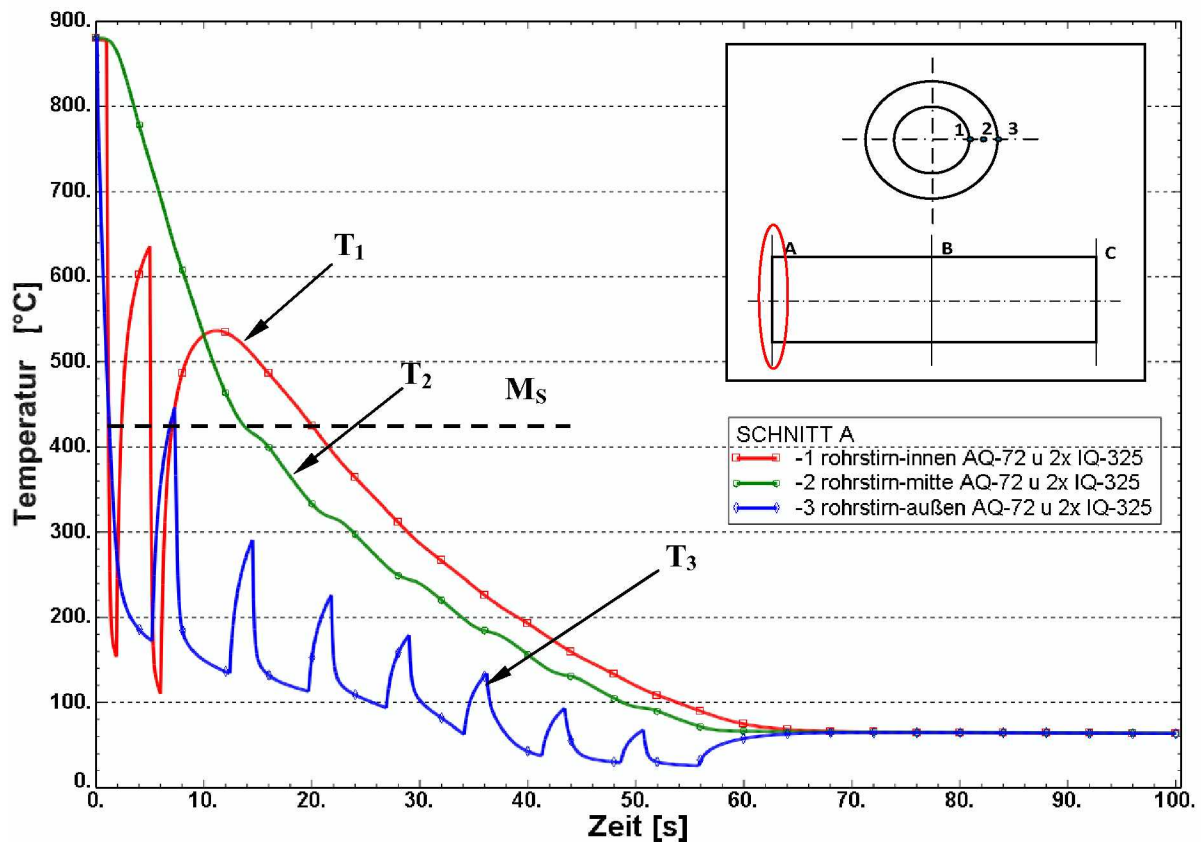


Abbildung 6.8: Rohrstimfläche: Außen- u. Innenkühlung mit zwei Innenwärmesenken.

In Abbildung 6.8 besitzt die Temperatur am Anfang über die ganze Rohrwand und die Länge einen Wert von 880°C. Der Verlauf der Rohrinnentemperatur T_1 wird genauer betrachtet. Nach 2 s fällt diese Temperatur auf 150°C und steigt dann anschließend wieder nach oben bis die zweite Innenwärmesenke wirkt. Es folgen dann wieder ein Temperatursturz und anschließend die Wiedererwärmung. Diese beiden Erwärmungen erfolgen auf Grund der gespeicherten Restwärme des Körpers. Im weiteren Verlauf sinkt T_1 über die Kühldauer stetig ab.

Das Abschreckverhalten der Außenfläche verläuft periodisch mit acht Kühl- und Aufwärmphasen, dies führt zu einem sogenannten „Sägezahnprofil“.

Die Temperaturkurve von T_2 nimmt mit der Abschreckdauer kontinuierlich ab, siehe Abbildung 6.8.

Zum Vergleich werden Temperatur-Zeit-Schaubilder der unterschiedlichen Abschreckmethoden erstellt. Dabei wird eine Gegenüberstellung von den Verläufen der Innentemperatur T_1 , der Wandmittentemperatur T_2 und der Außentemperatur T_3 gemacht.

In Abbildung 6.9 sind die Temperaturlinien für den Standardfall und für die zwei Modifikationen dargestellt.

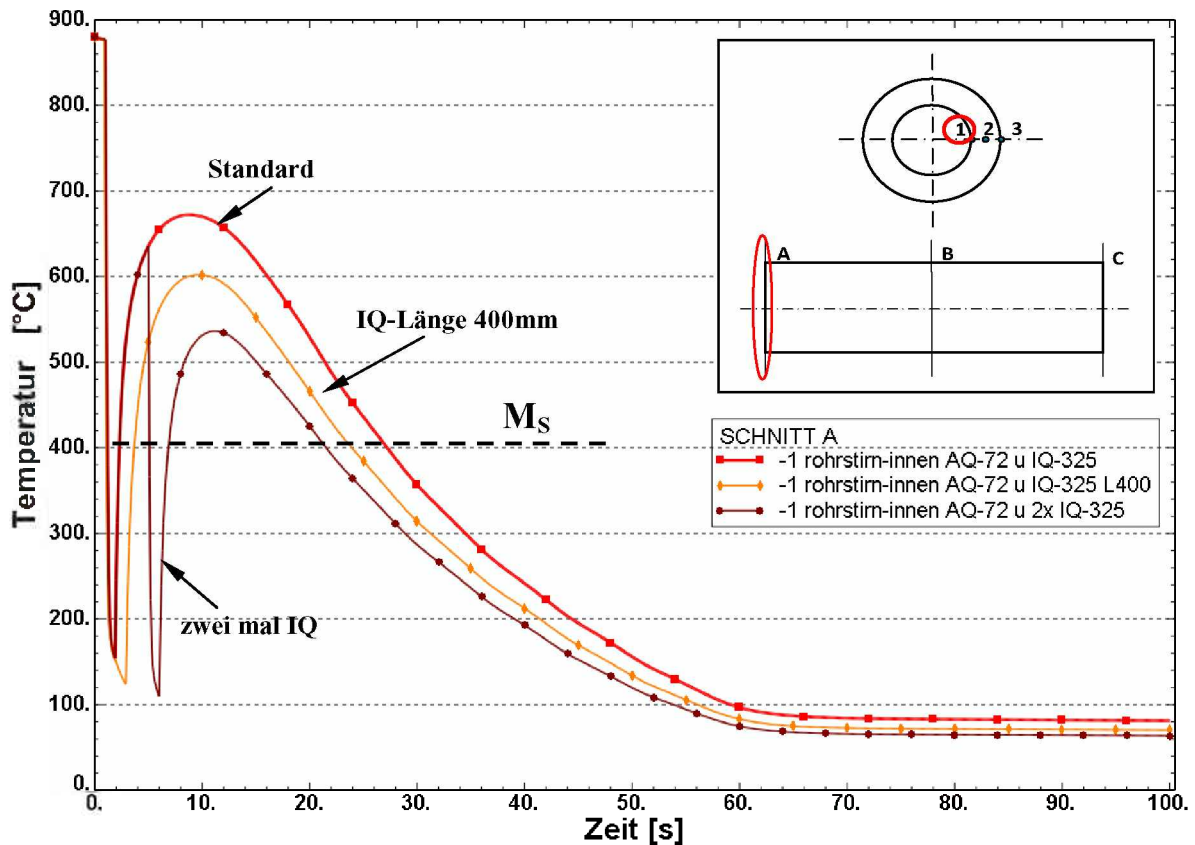


Abbildung 6.9: Rohrinnentemperaturen- T_I für unterschiedliche Abkühlvariationen.

Die Abkühlbedingungen am Anfang sind für jede dieser Abschreckmethoden gleich.

Aus dem Diagramm ist ersichtlich, dass die beste Abkühlung der Rohrinnenseite- T_I mit der Kombination Außen-und zweifachen Innenquench erreicht wird. Dem Rohr wird durch die zweifache Innenkühlung die Möglichkeit genommen sich von innen stark zu erhitzen.

Die Abkühlvariante mit der verlängerten Innenwärmesenke liefert auch guten Kühlerfolg.

In weiterer Folge werden die Verläufe der Wandmittentemperatur T_2 und der Rohraußentemperatur T_3 graphisch in Abbildung 6.10 und 6.11 dargestellt.

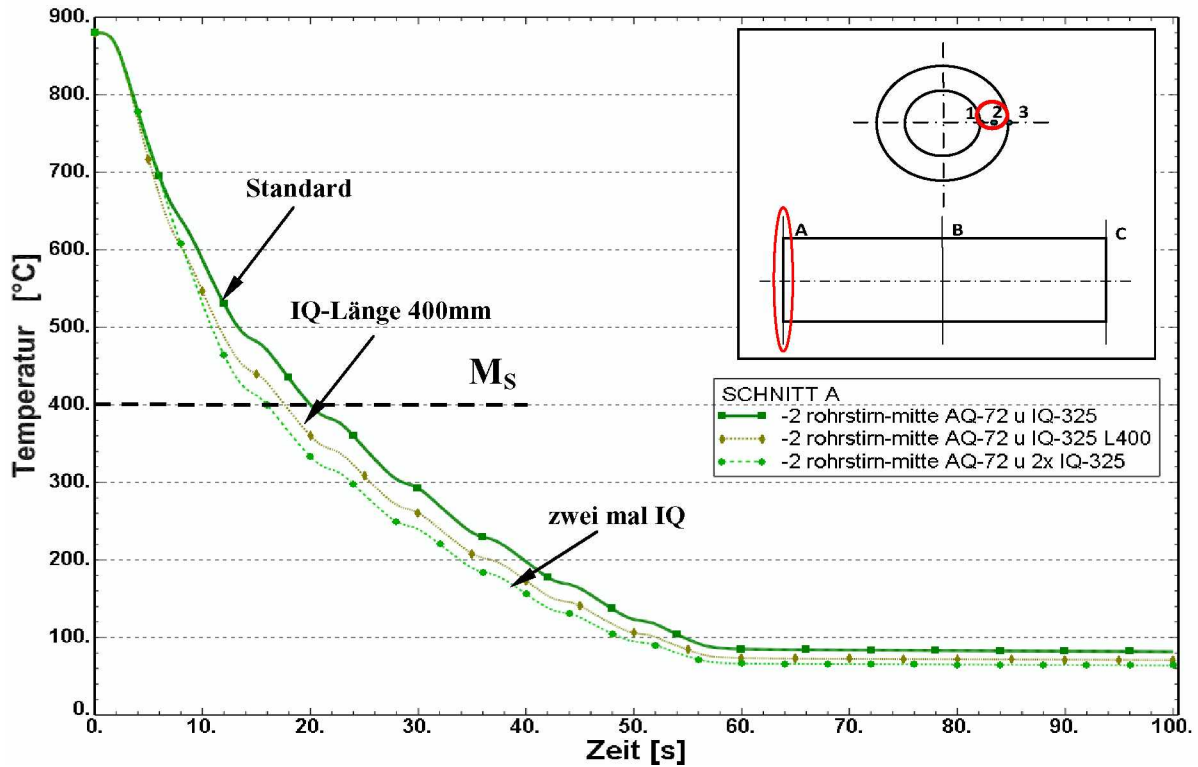


Abbildung 6.10: Mittlere Rohrtemperaturen- T_2 für unterschiedliche Abkühlvariationen.

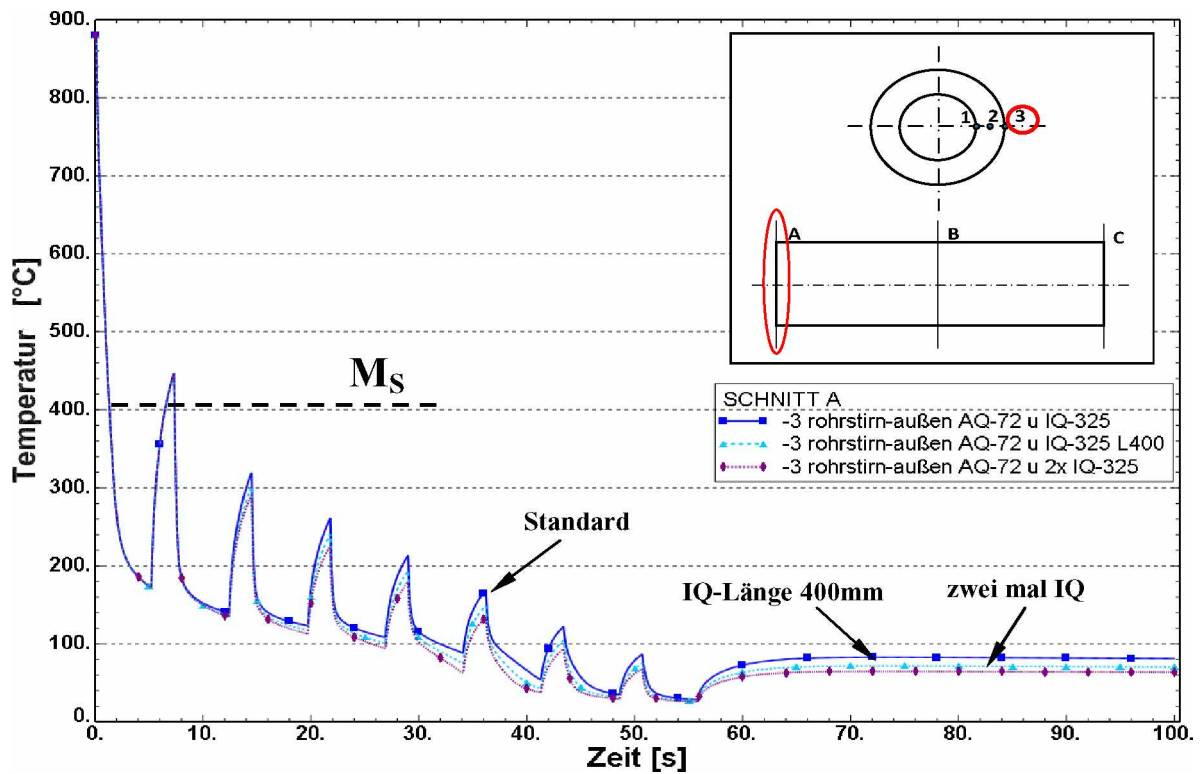


Abbildung 6.11: Rohraußentemperaturen- T_3 für unterschiedliche Abkühlvariationen.



Die Verläufe der mittleren Temperaturen T_2 für die unterschiedlichen Abkühlvarianten werden in Abbildung 6.10 gezeigt. Aus dieser Darstellung kann entnommen werden, dass mit der zweifachen Innenquench die Wandmittentemperatur T_2 am besten reduziert werden kann. Dagegen werden die Temperaturkurven der Rohraußenseite T_3 nur wenig durch die Variation der Innenquench beeinflusst, siehe Abbildung 6.11.

Wichtig für die Abkühlung ist die Temperaturgrenze von 400°C . Wird dieser Wert unterschritten, beginnt sich der Austenit in das martensitische Gefüge zu transformieren. Für den Anwender stellt sich die Frage, mit welcher „Quench-Modifikation“ erhält man den besten Härterfolg. Über die Analyse der erstellten Temperatur-Schaubilder, kann die effizienteste Kühlvariante bestimmt werden. Die Abschrecksimulation liefert hier ein eindeutiges Ergebnis. Die effektivste Kühlmethode ist die Variante bei der die Rohrinneenseite zweimal abgeschreckt wird.

In der nächsten Abbildung 6.12 werden die gesammelten Simulationsergebnisse der Parametervariation noch einmal in übersichtlicher Darstellung gezeigt. Ein Vergleich der Temperaturwerte wird einmal für die Rohrinneenseite, die Rohrmitte und die Rohraußenseite durchgeführt. Die Legende in dieser Darstellung gibt die unterschiedlichen Abkühlvariationen an. Für die Bezeichnung dieser werden Abkürzungen verwendet, wie $AQ72$ für Außenquench mit $V_S=72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$, $AQ72$ u. $IQ325$ stehen für die Außen- und Innenquench mit einer Wasserbeaufschlagungsdichte $V_S=72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ -Außen und $V_S=325 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ -Innen, die Bezeichnung $AQ72$ u. $IQ325-L400$ steht für eine kombinierte Außen- und Innenkühlung bei der die Innenwärmesenke eine Länge von 400 mm besitzt und die Kennzeichnung $AQ72$ u. $2x IQ325$ gibt eine weitere Variation der Außen- und Innenquench an.

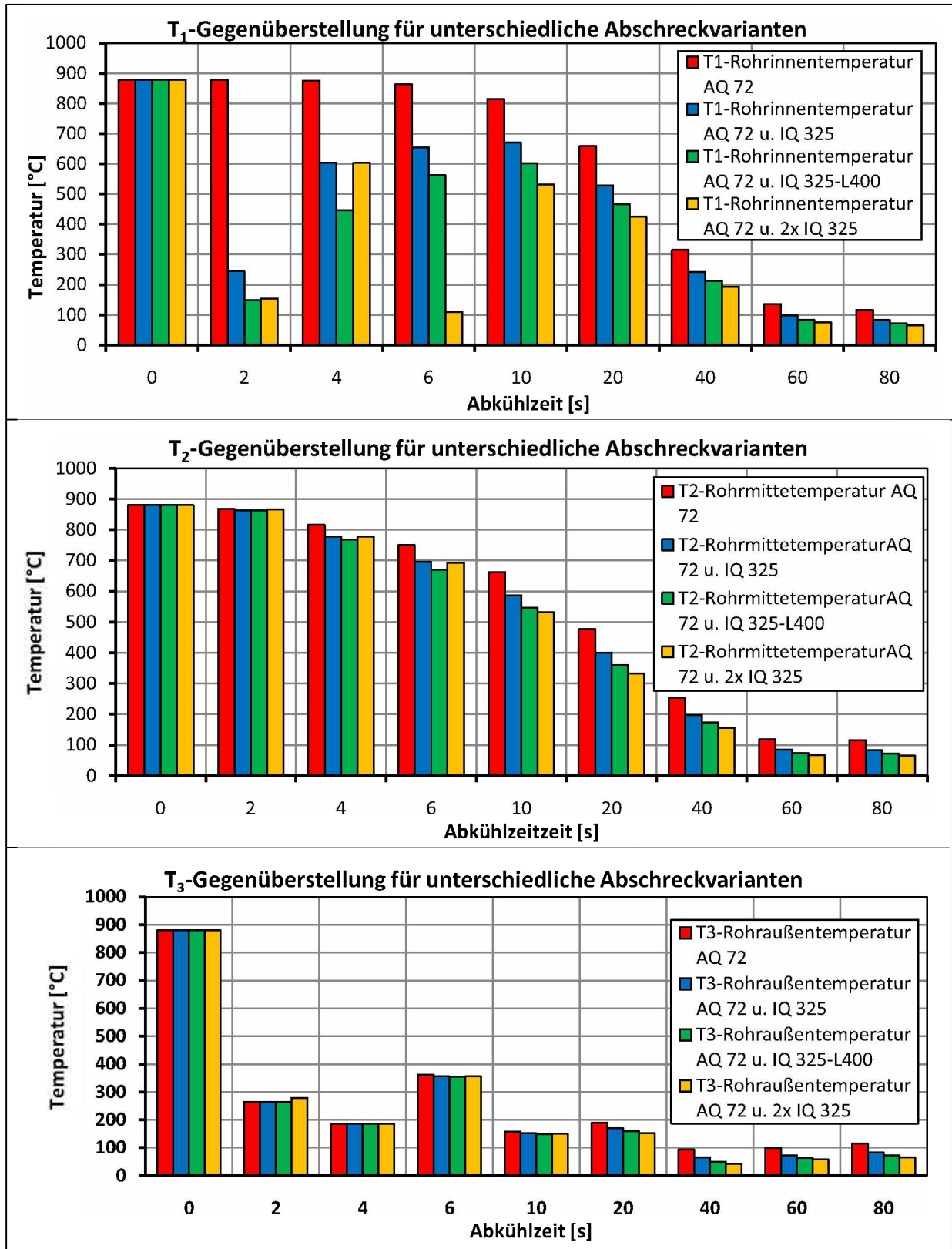


Abbildung 6.12: Temperaturwerte im Stahlrohr für unterschiedliche Abschreckvarianten.



In Abbildung 6.12 sind die Temperaturwerte in Form von Balkendiagrammen für die vier unterschiedlichen Abkühlmethoden dargestellt. Es werden dabei Vergleiche zwischen der Außenkühlung, der Außen- und Innenkühlung und den zwei weiteren Abkühlvariationen gezogen. Aus dieser Darstellung kann die geeignetste Abschreckmethode ausgewählt werden. Wie sich zeigt, wird das beste Abschreckergebnis mit der Außen- und zweifachen Innenquench (*AQ72* u. *2x IQ325*) erzielt. Aber auch die anderen Abkühlvariationen bringen eine Erhöhung der Abkühlgeschwindigkeit und damit auch eine Steigerung der Martensitkonzentration im Gefüge mit sich.



6.3 Temperaturmessung

Die Messungen der Rohraußentemperaturen T_3 erfolgten an der Wasserquenchanlage im laufenden Betrieb. Die Temperaturwerte wurden mit einem Infrarot-Thermometer aufgezeichnet. Die genauere Bezeichnung des Messgerätes lautet INFRATHERM-Pyrometer IGA 15 plus, es stammt von der Firma Impac. Für die Temperaturerfassung waren sieben Messpunkte jeweils nach den Abschreckzellen fixiert und für jeden dieser Referenzpunkte wurden fünf Messreihen detektiert. Mit dieser Messmethode war es nicht möglich aufgrund der starken Dampfbildung die Temperatur nach der ersten Abschreckzelle aufzunehmen. Eine Zusammenfassung der Messwerte ist in Tabelle 6.1 aufgelistet.

	1.Messung	2.Messung	3.Messung	4.Messung	5.Messung
nach 1.Abschreckzelle	starke Dampfbildung keine Messung möglich				
nach 2. Abschreckzelle	280*	255*	275*	250*	245*
nach 3. Abschreckzelle	95	95	95	95	95
nach 4. Abschreckzelle	95	95	95	95	95
nach 5. Abschreckzelle	95	95	95	95	95
nach 6. Abschreckzelle	90	90	90	90	90
nach 7. Abschreckzelle	80	80	80	80	80

Tabelle 6.1: Temperaturmesswerte für die Rohraußenseite T_3 alle Angaben in [°C].

Die in der Tabelle 6.1 aufgelisteten Temperaturen stellen Anhaltswerte dar. Wie aus der Tabelle 6.1 ersichtlich, stellt sich ein stabiles Temperaturniveau schon nach der dritten Abschreckzelle ein und die Rohrauslauftemperatur beträgt zum Schluss 80°C.

* Mittelwert



Ein direkter Vergleich zu den berechneten Temperaturverläufen ist nicht sinnvoll. Zunächst war es nicht möglich die Temperatur nach der ersten Abschreckzelle zu erfassen. Weiters war es nicht möglich einen Zusammenhang der gemessenen Temperaturen und der Berechnung herzustellen. Daher sind für die Evaluierung dieser Simulationsergebnisse andere Messmethoden notwendig.



7 Schlussfolgerung und Ausblick

Für eine optimale Einsetzbarkeit der Stahlrohre ist ein Wärmebehandlungsprozess für die Erhöhung der mechanischen Eigenschaften notwendig. Als ein Teilprozess ist das Abschrecken bei der die Wärmebehandlung von großer Bedeutung. Beim Abschrecken wird die heiße Oberfläche mit Spritzwasser gekühlt und auf dieser bilden sich im Laufe des Abkühlvorgangs unterschiedliche Wärmeübergangsphasen, wie die Filmverdampfung und die Siede- und Konvektionsphase, aus. Diese Wärmeübergangsmechanismen können gleichzeitig an verschiedenen Stellen auftreten und es stellt sich dadurch ein komplexer Abkühlprozess ein.

Ziel dieser Arbeit ist diese Wärmetransferphänomene zu beschreiben und numerische Modelle für die Abschrecksimulationen zu erstellen. Die hier entwickelte Simulationsmethode zur Berechnung der Temperatur basiert auf der Implementierung einer Subroutine „*SFILM-bewegte Wärmesenke*“ in das kommerzielle FEM-Programmpaket *ABAQUS*TM. Dieses Unterprogramm beschreibt die Abkühlbedingungen über eine „*Fit-Funktion*“, der ein abgesichertes Experiment zu Grunde liegt.

Die Temperaturberechnungen wurden zuerst für reine Außenkühlung und in weiterer Folge für die kombinierte Außen- und Innenkühlung durchgeführt. Aus diesen Simulationsergebnissen konnten direkt neue Erkenntnisse gewonnen werden. Bei der Außenkühlung ist die Temperaturdifferenz zwischen der Rohraußen- und Rohrrinnenfläche groß. Das trägt dazu bei, dass das Rohr außen schneller als innen härtet. Dieser Umstand kann mit der Variante einer Außen- und Innenkühlung behoben werden. Mit dieser Abschreckmethode wird der Temperaturunterschied zwischen Rohraußen- und -innen reduziert. Das bedeutet, dass das Innenhärten ähnlich schnell einsetzt wie das Außenhärten.

Zudem wurden die Abkühlungsbedingungen für die Innenquench variiert und neue Varianten untersucht. Auf Grund dieser Simulationsergebnisse konnte festgestellt werden, dass die effizienteste Abschreckvariante, jene mit der Außen- und der zweifachen Innenabkühlung, ist.



Die Abschrecksimulationen in der vorliegenden Arbeit liefern Temperaturberechnungen und zeigen auf wo noch Verbesserungspotential vorhanden ist. Für weitere Entwicklungsstufen der vorhandenen Abkühlanlage stellt diese Diplomarbeit eine wertvolle Basis dar.



Literaturverzeichnis

- [1] Baehr, H. D./ Stephan, K.: *Wärme und Stoffübertragung*.
Springer-Verlag, Berlin/ Heidelberg/ New York, 1998 (3. Auflage)
- [2] Wagner, W.: *Wärmeübertragung*.
Vogel-Verlag, Würzburg, 2004 (6. Auflage)
- [3] Langeheinecke, K./ Jany, P./ Thieleke, G.: *Thermodynamik für Ingenieure*.
Vieweg u. Teubner-Verlag, Wiesbaden, 2008 (7. Auflage)
- [4] Dobrinski, P/ Krakau, G/ Vogel, A.: *Physik für Ingenieure*.
Teubner-Verlag, 2006 (11. Auflage)
- [5] Merker, G. P.: *Konvektive Wärmeübertragung*.
Springer-Verlag, Berlin/ Heidelberg/ New York, 1987
- [6] Böge, A.: *Handbuch Maschinenbau*.
Vieweg & Sohn-Verlag, Wiesbaden, 2007 (18. Auflage)
- [7] Herwig, H.: *Wärmeübertragung A-Z (VDI-Buch)*.
Springer-Verlag Berlin/ Heidelberg/ New York, 2000
- [8] Maaß, R.: *Untersuchung zur Wärmeübertragung beim Abschreckhärten*.
Dissertation 1988, Technische Universität Clausthal
- [9] Reiners, U.: *Wärmeübertragung durch Spritzwasserkühlung heißer Oberflächen im Bereich der stabilen Filmverdampfung*. Dissertation 1987, Technische Universität Clausthal
- [10] Viscorova, R.: *Untersuchung des Wärmeübergangs bei der Spritzwasserkühlung unter Berücksichtigung des Einflusses der Verzunderung*.
Dissertation-2007, Technische Universität Clausthal
- [11] Puschmann, F.: *Experimentelle Untersuchung der Spraykühlung zur Qualitätsverbesserung durch definierte Einstellung des Wärmeübergangs*.
Dissertation-2003; Otto von Guericke Universität Magdeburg



- [12] Jeschar, R./ Maibücher, L.: *Experimentelle Untersuchung des Wärmeübergangs bei der Verdampfungskühlung im Sprühnebel*. Forschungsbericht, TU-Clausthal
- [13] Wendelstorf, R./ Spitzer, K.H./ Wendelstorf, J.: *Effect of oxide layers on spray water cooling heat transfer at high surface temperatures*.
International Journal of Heat and Mass Transfer Nr.51 4892-4901 (2008)
- [14] Wendelstorf, R./ Spitzer, K.H./ Wendelstorf, J.: *Spray water cooling heat transfer at high temperatures and liquid mass fluxes*.
International Journal of Heat and Mass Transfer Nr.51 4902-4910 (2008)
- [15] Verein Deutscher Ingenieure: *VDI- Wärmeatlas*
Springer-Verlag Berlin 2006
- [16] Hardin, R.A./ Beckermann, C.: *Simulation of Heat Treatment Distortion*.
The University of Iowa
- [17] Bathe, K.J.: *Finite-Elemente-Methode*.
Springer-Verlag Heidelberg/ New York/ Tokyo, 1986
- [18] Jaluria, Y./ Torrance, K.E.: *Computational Heat Transfer*.
Hemisphere Publishing Corporation, Washington/ New York/ London
- [19] *ABAQUS Standard User`s Manual, Version 6.8*
ABAQUS Inc., 2008- Software-Dokumentation
- [20] Fischer, F.D./ Antretter, T.: *Methode der Finiten Elemente-Grundlagen und Erweiterung*. Vorlesungsskriptum Institut für Mechanik, Montanuniversität Leoben
- [21] *Computer Aided Simulation of Heat treatment C.A.S.H.*
Ergebnisbericht zum BMBF-Verbundprojekt, 2005



-
- [22] Demirel, C.: *Experimentelle Untersuchung und Simulation des Abschreckprozesses von bauteilähnlichen Geometrie aus G-ALSiMg*.
Dissertation-2009, Technische Universität Berlin
- [23] Hornbogen, E.: *Werkstoffe Aufbau und Eigenschaften*.
Springer-Verlag Berlin/ Heidelberg/ New York, 2006 (8. Auflage)
- [24] Bargel, H.J./ Schulz, G.: *Werkstoffkunde*.
Springer-Verlag Berlin/ Heidelberg/ New York, 2000 (7. Auflage)
- [25] Hirsch, K./ Stiele, H.: *Grundlagen der Wärmebehandlung & Härtetechnik*
(2006), in: <http://www.efd-haertereie.de/pdf/HH-R01-D01-Haerten-Grundlagen.pdf>, 09.05.2010
- [26] Brainerd, W.S./ Goldberg, C.H.: *Fortran 90*.
Oldenbourg-Verlag München/ Wien 1994
- [27] Kolinsky, H.: *Programmieren in Fortran 90/95*. Skript; Universität Bayreuth



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Schema Vergütungsanlage bei Voestalpine Tubulars Kindberg.....	3
Abbildung 1.2: Innenraum Härteofen mit Gasbrennern; gehärtetes Rohr.	4
Abbildung 1.3: Wasserquenchanlage bzw. Kühlanlage.....	5
Abbildung 1.4: Innenlanze vorne und Detail des Düsenkopfes	6
Abbildung 1.5: Schematische Darstellung der Lösungsstrategie.....	7
Abbildung 2.1: Wärmeübertragungsmechanismen	10
Abbildung 2.2: Kontrollvolumen mit Wärmestrom in x-Richtung.....	11
Abbildung 2.3: Wärmeleitung und Temperaturverlauf durch eine Rohrwand.	15
Abbildung 2.4: Grenzschichtströmung längs einer ebenen Wand mit Geschwindigkeits- und Temperaturprofil.	18
Abbildung 2.5: Wärmeübergang in der stabilen Filmverdampfung.....	22
Abbildung 2.6: Wärmeübergangskoeffizient α und Wärmestromdichte q bei der Spritzwasserkühlung mit einer Wasserbeaufschlagungsdichte $V_s=10 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$	24
Abbildung 3.1: ZTU-Schaubild für den Werkstoff Ck45 mit unterschiedlichen Abkühlraten .	28
Abbildung 3.2: Schematische Darstellung eines Temperatur-Zeitverlaufes beim Härten mit Gefügeumwandlung.	30
Abbildung 4.1: Unterteilung des Berechnungsgebietes in finite Elemente.....	32
Abbildung 4.2: Modell Außenquench	35
Abbildung 4.3: Simulationsmodell Außen-und Innenquench	36
Abbildung 4.4: Originalkörper und 2D-axialsymmetrische Geometrie	38
Abbildung 4.5: Approximation des temperaturabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten α ; a) α -konstante, b) lineare Approximation.	41
Abbildung 4.6: Polynomfunktion-4.Grades als Approximation an die Verdampfungskurve mit $V_s=10 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$	42
Abbildung 4.7: Exponentialfunktionen als Annäherung an die Nukiyama-Kurve	43
Abbildung 4.8: Fit-Funktionen für Wärmeübergangszahlen α nach Gleichung (4.6).	45
Abbildung 4.9: Wärmestromdichten q für verschiedene Wasserbeaufschlagungsmengen V_s . 46	
Abbildung 4.10: FE-Netz des Berechnungsgebietes	47



Abbildung 5.1: Temperaturprofil: Rohrstirnfläche Außenquench (AQ) $V_S=72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$	49
Abbildung 5.2: Temperaturprofil: Rohrmitte Außenquench (AQ) $V_S=72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$	51
Abbildung 5.3: Temperaturprofil: Rohrende Außenquench (AQ) $V_S=72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$	51
Abbildung 5.4: Gegenüberstellung der Temperaturwerte für die Außenquench (AQ); Wasserbeaufschlagungsdichte $V_S=72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$	53
Abbildung 5.5: Temperaturfeld im Rohr für verschiedene Zeitpunkte beim Außenquench.....	54
Abbildung 5.6: Temperaturverläufe: Rohrstirnfläche Außenquench (AQ) $V_S=72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ und Innenquench (IQ) $V_S=325 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$; WS_i bewegte Innenwärmesenke.....	56
Abbildung 5.7: Temperaturverläufe: Rohrmitte Außenquench (AQ) $V_S=72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ und Innenquench (IQ) $V_S=325 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$; WS_i bewegte Innenwärmesenke.....	58
Abbildung 5.8: Temperaturverläufe: Rohrende Außenquench (AQ) $V_S=72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ und Innenquench (IQ) $V_S=325 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$; WS_i bewegte Innenwärmesenke.....	58
Abbildung 5.9: Gegenüberstellung der Temperaturwerte für die Kombination Außenquench (AQ) und Innenquench (IQ); Wasserbeaufschlagungsdichte-Außen $V_S=72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$, Wasserbeaufschlagungsdichte-Innen $V_S=325 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$	59
Abbildung 5.10: Temperaturfeld im Rohr für verschiedene Zeitpunkte bei Außen- und Innenkühlung.....	61
Abbildung 5.11: Temperaturprofil: Rohrstirnfläche Außenquench $V_S=72 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ und Innenquench $V_S=280 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$	62
Abbildung 5.12: Vergleich der Temperaturprofile: Abbildung 5.1 mit Abbildung 5.11.....	63
Abbildung 5.13: Variation der Netzdichte für Konvergenzbetrachtung; a) Basisnetz, b) Netz radial um Faktor zwei verdichtet, c) Netz längs um Faktor zwei verdichtet.....	64
Abbildung 5.14: Temperaturverläufe in der Rohrstirnfläche f. unterschiedliche Netzdichten. 65	
Abbildung 5.15: Temperaturverläufe am Rohrende für unterschiedliche Netzdichten.	65
Abbildung 6.1: Rohrstirnfläche: Gegenüberstellung Außenkühlung (AQ) mit Außen- u. Innenkühlung (AQ-IQ), M_S Martensitstarttemperatur.	67
Abbildung 6.2: Rohrmitte: Gegenüberstellung Außenkühlung mit Außen- u. Innenkühlung. .69	
Abbildung 6.3: Rohrende: Gegenüberstellung Außenkühlung mit Außen- u. Innenkühlung... 70	
Abbildung 6.4: Gegenüberstellung der einzelnen Abschreckvarianten; Außenquench AQ-72 mit Außen- u. Innenquench AQ-72 u. IQ-325.	71
Abbildung 6.5: Erste Modifikation; Länge der Innenwärmesenke l_{Si} verdoppelt.	72
Abbildung 6.6: Rohrstirnfläche: Außen- u. Innenkühlung, Länge der Innenwärmesenke $l_{Si}=400 \text{ mm}$; M_S Martensitstarttemperatur.	73
Abbildung 6.7: Berechnungsmodell mit zwei Innenwärmesenke.....	74
Abbildung 6.8: Rohrstirnfläche: Außen- u. Innenkühlung mit zwei Innenwärmesenken.....	75
Abbildung 6.9: Rohrintemperaturen- T_I für unterschiedliche Abkühlvariationen.	76
	89



Abbildung 6.10: Mittlere Rohrtemperaturen- T_2 für unterschiedliche Abkühlvariationen. 77
Abbildung 6.11: Rohraußentemperaturen- T_3 für unterschiedliche Abkühlvariationen. 77
Abbildung 6.12: Temperaturwerte im Stahlrohr für unterschiedliche Abschreckvarianten. 79

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Dimensionslose Kenngrößen der Wärmeübertragung 21
Tabelle 4.1: Werkstoffkennwerte für die untersuchte Stahllegierung..... 39
Tabelle 6.1: Temperaturmesswerte für die Rohraußenseite T_3 alle Angaben in [°C]..... 81



Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
α	Wärmeübergangskoeffizient/ Wärmeübergangszahl	$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
α_L	Wärmeübergangszahl-Luft	1
α_S	Stoffeigenschaft	1
δ	Grenzschichtdicke, Dicke	m
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$
ρ	Dichte	kg m^{-3}
σ	Elektrische Leitfähigkeit	$\Omega^{-1} \text{m}^{-1}$
ν	Kinematische Viskosität	$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$

Symbol	Bedeutung	Einheit
A	Fläche	m^2
AQ	Außenquench/ Außenkühlung	1
IQ	Innenquench/ Innenkühlung	1
c_p	Spezifische Wärmekapazität	$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
g	Erdbeschleunigung	m s^{-2}
h	Spezifische Enthalpie	J kg^{-1}
L	Charakteristische Länge, Länge	m
m	Masse	kg
Q	Wärmemenge	J
\dot{Q}	Wärmestrom	W
q	Wärmestromdichte	W m^{-1}
T	Temperatur	$^{\circ}\text{C}$
V_S	Wasserbeaufschlagungsdichte bzw. - Wasserbeaufschlagungsmenge	$\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$
w	Fluidgeschwindigkeit	m s^{-1}



Anhang A

Auszug Input-File: Außen- und Innenquench

```
*Heading
** Job name: Außen- und Innenquench Model name: Model-1
** Generated by: Abaqus/CAE Version 6.8-3
*Preprint, echo=NO, model=NO, history=NO, contact=NO
**
** PARTS
**
*Part, name=stahlrohr
*Node
  1, 0.0782499984,      0.
  2, 0.0806249976,      0.
  3, 0.0829999968,      0.
  4, 0.0853750035,      0.
.....
.....
21607, 0.0925000012,      6.
21608, 0.0948750004,      6.
21609, 0.0972499996,      6.
.....
.....
*Element, type=DCAX4
  1,  1,  2, 11, 10
  2,  2,  3, 12, 11
  3,  3,  4, 13, 12
  4,  4,  5, 14, 13
  5,  5,  6, 15, 14
.....
.....
19199, 21598, 21599, 21608, 21607
19200, 21599, 21600, 21609, 21608
*Nset, nset=_PickedSet2, internal, generate
  1, 21609,  1
*Elset, elset=_PickedSet2, internal, generate
  1, 19200,  1
** Section: Section-1
*Solid Section, elset=_PickedSet2, material=Legstahl-RN33L
```



*End Part

**

** ASSEMBLY

**

*Assembly, name=Assembly

**

*Instance, name=stahlrohr-1, part=stahlrohr

*End Instance

**

*Nset, nset=_PickedSet4, internal, instance=stahlrohr-1, generate
1, 21609, 1

*Elset, elset=_PickedSet4, internal, instance=stahlrohr-1, generate
1, 19200, 1

*Elset, elset=_rohr-aussen_S2, internal, instance=stahlrohr-1, generate
8, 19200, 8

*Surface, type=ELEMENT, name=rohr-aussen
_rohr-aussen_S2, S2

*Elset, elset=_rohr-innen_S4, internal, instance=stahlrohr-1, generate
1, 19193, 8

*Surface, type=ELEMENT, name=rohr-innen
_rohr-innen_S4, S4

*End Assembly

**

** MATERIALS

**

*Material, name=Legstahl-RN33L

*Conductivity

39.09, 25.

36.92, 300.

33.29, 500.

28.48, 700.

25.78, 800.

26.15, 900.

27.3, 1000.

*Density

7736.05, 25.

7648.28, 300.

7572.05, 500.

7485.77, 700.

7498.19, 800.



7448.4, 900.
7396.99, 1000.
*Specific Heat
455.33, 25.
567.57, 300.
683.3, 500.
1099.33, 700.
818.89, 800.
574.35, 900.
643.05, 1000.
**
** PREDEFINED FIELDS
**
** Name: Predefined Field-1 Type: Temperature
*Initial Conditions, type=TEMPERATURE
_PickedSet4, 880.
** -----
**
** STEP: rohr-quench
**
*Step, name=rohr-quench, inc=10000
Rohr-AQ-IQ
*Heat Transfer, end=PERIOD
0.1, 100., , ,
**
*Sfilm
rohr-innen,fnu,1,1
rohr-aussen,fnu,1,1
** OUTPUT REQUESTS
**
*Restart, write, frequency=0
**
** FIELD OUTPUT: F-Output-1
**
*Output, field, variable=PRESELECT
*Output, history, frequency=0
*End Step



Subroutine SFILM „bewegte Wärmesenke“

C23456789012345678901234567890123456789012345678901234567890123456789012

```
SUBROUTINE FILM(H,SINK,TEMP,KSTEP,KINC,TIME,NOEL,NPT,  
1 COORDS, JLTYP, FIELD, NFIELD, SNAME, NODE, AREA)  
C  
C   INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'  
C  
C   DIMENSION H(2), TIME(2), COORDS(3), FIELD(NFIELD)  
C   CHARACTER*80 SNAME  
C  
C  
C   Siedetemperatur-Wasser  
C     Tsi = 100D0  
C  
C   Temperaturdifferenz  
C     Tdif = TEMP-Tsi  
C  
C   Rohrinnendurchmesser  
C     Ri = 0.07825D0  
C  
C   Waermeuebergangskoeffizient- Fitfunktion  
C  
C     IF( COORDS(1) .GT. Ri) THEN  
C  
C   Senke-1  
C     v1 = 0.2D0  
C     h01 = -1.05D0  
C     b1 = 1.026D0  
C     y1 = v1*TIME(2)+h01  
C  
C   Senke-2  
C     v2 = v1  
C     h02 = -2.496D0  
C     y2 = v2*TIME(2)+h02  
C     b2 = b1  
C  
C   Senke-3  
C  
C     v3 = v1  
C     h03 = -3.942D0
```



$$y3 = v3 * \text{TIME}(2) + h03$$

$$b3 = b1$$

C

C Senke-4

$$v4 = v1$$

$$h04 = -5.388D0$$

$$y4 = v4 * \text{TIME}(2) + h04$$

$$b4 = b1$$

C

C Senke-5

$$v5 = v1$$

$$h05 = -6.834D0$$

$$y5 = v5 * \text{TIME}(2) + h05$$

$$b5 = b1$$

C

C Senke-6

$$v6 = v1$$

$$h06 = -8.28D0$$

$$y6 = v6 * \text{TIME}(2) + h06$$

$$b6 = b1$$

C

C Senke-7

$$v7 = v1$$

$$h07 = -9.726D0$$

$$y7 = v7 * \text{TIME}(2) + h07$$

$$b7 = b1$$

C

C Senke-8

$$v8 = v1$$

$$h08 = -11.172D0$$

$$y8 = v8 * \text{TIME}(2) + h08$$

$$b8 = b1$$

C

IF (COORDS(2) .GE. y1 .AND. COORDS(2) .LE. y1+b1) THEN

$$H(1) = 190.0D0 + \tanh(72.0D0/8.0D0) * (140.0D0 * 72.0D0 *$$

$$1 \quad (1.0D0 - 72.0D0 * \text{Tdif}/220000.0D0) + 3.26D0 * \text{Tdif} ** (2.0D0) *$$

$$1 \quad (1.0D0 - \tanh(\text{Tdif}/128.0D0)))$$

$$H(2) = 0.0D0$$

$$\text{SINK} = 20.0D0$$

ELSEIF (COORDS(2) .GE. y2 .AND. COORDS(2) .LE. y2+b2) THEN



```
H(1)= 190.0D0+tanh(72.0D0/8.0D0)*(140.0D0*72.0D0*
1 (1.0D0-72.0D0*Tdif/220000.0D0)+3.26D0*Tdif**(2.0D0)*
1 (1.0D0-tanh(Tdif/128.0D0)))
H(2)= 0.0D0
SINK = 20.0D0
ELSEIF ( COORDS(2) .GE. y3 .AND. COORDS(2) .LE. y3+b3) THEN
H(1)= 190.0D0+tanh(72.0D0/8.0D0)*(140.0D0*72.0D0*
1 (1.0D0-72.0D0*Tdif/220000.0D0)+3.26D0*Tdif**(2.0D0)*
1 (1.0D0-tanh(Tdif/128.0D0)))
H(2)= 0.0D0
SINK = 20.0D0
ELSEIF ( COORDS(2) .GE. y4 .AND. COORDS(2) .LE. y4+b4) THEN
H(1)= 190.0D0+tanh(72.0D0/8.0D0)*(140.0D0*72.0D0*
1 (1.0D0-72.0D0*Tdif/220000.0D0)+3.26D0*Tdif**(2.0D0)*
1 (1.0D0-tanh(Tdif/128.0D0)))
H(2)= 0.0D0
SINK = 20.0D0
ELSEIF ( COORDS(2) .GE. y5 .AND. COORDS(2) .LE. y5+b5) THEN
H(1) = 190.0D0+tanh(72.0D0/8.0D0)*(140.0D0*72.0D0*
1 (1.0D0-72.0D0*Tdif/220000.0D0)+3.26D0*Tdif**(2.0D0)*
1 (1.0D0-tanh(Tdif/128.0D0)))
H(2)= 0.0D0
SINK = 20.0D0
ELSEIF ( COORDS(2) .GE. y6 .AND. COORDS(2) .LE. y6+b6) THEN
H(1) = 190.0D0+tanh(72.0D0/8.0D0)*(140.0D0*72.0D0*
1 (1.0D0-72.0D0*Tdif/220000.0D0)+3.26D0*Tdif**(2.0D0)*
1 (1.0D0-tanh(Tdif/128.0D0)))
H(2)= 0.0D0
SINK = 20.0D0
ELSEIF ( COORDS(2) .GE. y7 .AND. COORDS(2) .LE. y7+b7) THEN
H(1)= 190.0D0+tanh(72.0D0/8.0D0)*(140.0D0*72.0D0*
1 (1.0D0-72.0D0*Tdif/220000.0D0)+3.26D0*Tdif**(2.0D0)*
1 (1.0D0-tanh(Tdif/128.0D0)))
H(2)= 0.0D0
SINK = 20.0D0
ELSEIF ( COORDS(2) .GE. y8 .AND. COORDS(2) .LE. y8+b8) THEN
H(1)= 190.0D0+tanh(72.0D0/8.0D0)*(140.0D0*72.0D0*
1 (1.0D0-72.0D0*Tdif/220000.0D0)+3.26D0*Tdif**(2.0D0)*
1 (1.0D0-tanh(Tdif/128.0D0)))
H(2)= 0.0D0
```



```
SINK = 20.0D0
ELSE
C Luftkuehlung
  H(1) = 40.0D0
  H(2) = 0.0D0
  SINK = 20.0D0
  END IF
C
  ELSE
C Innensenke
  v0 = 0.2D0
  h0 = -0.4D0
  b0 = 0.2D0
  y0 = v0*TIME(2)+h0
  IF ( COORDS(2) .GE. y0 .AND. COORDS(2) .LE. y0+b0) THEN
    H(1)= 190.0D0+tanh(325.0D0/8.0D0)*(140.0D0*325.0D0*
1    (1.0D0-325.0D0*Tdif/2700000.0D0)+3.26D0*Tdif**(2.0D0)*
1    (1.0D0-tanh(Tdif/128.0D0)))
    H(2)= 0.0D0
    SINK = 20.0D0
  ELSE
C Luftkuehlung
    H(1) = 40.0D0
    H(2) = 0.0D0
    SINK = 20.0D0
  END IF
END IF
RETURN
END
```



Anhang B

Zusammenstellungszeichnung der Abschreckeinrichtung