



**DIPLOMARBEIT**  
Master Thesis

**Beitrag zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit unter extremen  
Temperaturbedingungen bei Normalbeton als Grundlage  
für eine Brandsimulation**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades  
eines Diplom-Ingenieurs/ einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof. Baurat.h.c. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dr.h.c. Elemer BÖLCSKEY  
Ass.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-techn. Heinrich BRUCKNER

E206

Institut für Hochbau und Technologie  
Forschungsbereich für Baustofflehre, Werkstofftechnologie  
und Brandsicherheit

eingereicht an der Technischen Universität Wien  
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Christina AQUINO

0027322

Sollingergasse 8/3/16, 1190 Wien

Wien, am 06. Nov. 2012

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Hochbau und Technologie, Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz an der Technischen Universität Wien

Ich bedanke mich sehr bei Herrn Ao.Univ.Prof.Dipl.-Ing.DDr.-techn. Elemer Bölskey für die Möglichkeit der Durchführung meiner Diplomarbeit und für die Bereitstellung sämtlicher Baustoffe und Laboreinrichtungen des Institutes.

Mein besonderer Dank gebührt Ass.Prof.Dipl.-Ing.Dr.-techn. Heinrich Bruckner und Dipl.-Ing. Johannes Kirnbauer für deren fachliche Unterstützung und hilfreichen Anregungen, die wesentlich zur Entstehung meiner Diplomarbeit beigetragen haben.

Ebenso gilt mein Dank Dipl.-Ing. Hubert Kirchberger und Ing. Hubert Mayerhofer für deren Hilfestellungen bei den Brandsimulationen und bei der Handhabung der Laboreinrichtungen, sowie meinem Studienkollegen Kaveh Zandieh für dessen tatkräftige und mentale Unterstützung.

Zuletzt gilt mein aufrichtiger Dank, welchen ich kaum in Worte fassen kann, meiner Familie und meinem Lebensgefährten, die mich während meiner gesamten Studienzeit und vor allem gegen Ende dieser, sowohl moralisch als auch finanziell unterstützt haben.

Wien, November 2012

Christina Aquino

## Kurzfassung

Reale Brände sind nicht vorhersehbar, und somit sind geplante Analysen und Messungen an realen Bränden zur Datengewinnung fast unmöglich. Um den Brandverlauf, die Brandausbreitung und den Temperaturverlauf in Bauteilen untersuchen zu können, müssen Brandversuche und numerische Experimente herangezogen werden. Auch Brandsimulationen spielen dabei eine wesentliche Rolle. Umso wichtiger ist deshalb der Kenntnisstand über die thermischen Eigenschaften von Baustoffen.

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von Normalbetonen mit quarzhaltigen Zuschlägen bei hohen Temperaturen zur weiteren Anwendung in diversen Brand-Simulationsprogrammen.

Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wird das Parallel-Heißdrahtverfahren angewendet, das auf der Ermittlung des Temperaturanstieges in einem Probekörper als Funktion der Zeit beruht. In dieser Arbeit werden die Wärmeleitfähigkeit von Probekörpern mit unterschiedlichen Feuchtegehalten bei Prüftemperaturen zwischen 90 °C und 600 °C ermittelt.

Die Ergebnisse aus den Parallel-Heißdrahtversuchen werden anschließend mit den derzeitig normativ geregelten Werten nach *EUROCODE 2* verglichen.

Ferner werden Brandversuche an Betonkörpern mit quarzhaltigem Zuschlag durchgeführt, um Vergleichstemperaturen für nachfolgende Brandsimulationen zu erhalten. Dabei werden die Temperaturverläufe in unterschiedlichen Bauteiltiefen in einseitig dem Brand ausgesetzten Probekörpern aufgezeichnet, und diese den mittels einer Simulationssoftware berechneten Temperaturen gegenübergestellt.

Die Brandraumtemperaturen sowohl bei den Brandversuchen als auch bei den Brandsimulationen entsprechen der normierten Einheits-Temperatur-Zeitkurve, welche in idealisierter Form einen realen Brand beginnend vom Flashover widerspiegelt.

**Abstract**

Real fires are unpredictable, therefore it is almost impossible to plan and do analyses or measurements to achieve information of real fires. Hence it is necessary to use the results of fire tests and numerically experiments to judge the fire performance, the fire spread or the behaviour of the temperature of the construction. Also fire simulations have a significant role in the evaluation of fires. All the more important is the knowledge of the thermal properties of building materials.

The aim of this master thesis is the determination of the thermal conductivity of normal weight concrete with quartz additives at high temperatures for the continued application in various fire simulation programs.

For the determination of the thermal conductivity the Parallel-Hot-Wire method is applied. This method determines the increase in temperature of the specimen as a function of time. During this work the thermal conductivities of specimen with different moisture contents are determined at temperatures from 90°C up to 600°C.

Afterwards the results of the Parallel-Hot-Wire tests are compared with the current data regulated by standards referred to *EUROCODE 2*.

Moreover there are fire tests on specimens of concrete with quartz additives to obtain temperatures for comparison with the results of the subsequent fire simulations. Thereby the temperatures of the specimens, which are exposed to the fire on one side, are recorded for different depths of the specimens.

The standard time-temperature curve is applied for the fire tests as well as for the fire simulations, which reflects real fires starting from the time of the flashover.

---

## Inhaltsverzeichnis

Vorwort .....	1
Kurzfassung .....	2
Abstract .....	3
Inhaltsverzeichnis.....	4
1 Einleitung .....	8
2 Grundlagen .....	10
2.1 Wärmetransport .....	10
2.1.1 Wärmeleitung.....	10
2.1.1.1 Wärmeleitfähigkeit.....	12
2.1.1.2 Temperaturleitfähigkeit und Wärmeeindringkoeffizient .....	14
2.1.1.3 Spezifische Wärmekapazität und Wärmespeichervermögen .....	14
2.1.2 Konvektion.....	15
2.1.3 Wärmestrahlung .....	16
2.1.3.1 Transmission.....	18
2.1.3.2 Absorption und Emission .....	18
2.2 Feuchtetechnische Grundlagen .....	19
2.2.1 Wasser .....	20
2.2.1.1 Wasserdampfdruck und Sättigungsdampfdruck.....	20
2.2.1.2 Relative Luftfeuchte und Kondensation.....	21
2.2.2 Wassergehalt von Stoffen.....	22
2.2.3 Wasserspeicherung und Wassertransport.....	23
2.2.3.1 Wasserdampfaufnahme .....	23
2.2.3.2 Sorptionsisotherme von Beton .....	24
2.2.3.3 Wasserdampfdiffusion.....	26
2.3 Beton.....	27
2.3.1 Thermische Eigenschaften von Beton .....	28

2.3.1.1	Rohdichte .....	28
2.3.1.2	Porosität des Zementsteins.....	29
2.3.1.3	Wassergehalt von Beton bei hohen Temperaturen .....	30
2.3.1.4	Wärmeleitfähigkeit von Beton bei hohen Temperaturen .....	32
2.3.2	Eigenschaften von Beton nach Eurocode 2.....	34
2.3.2.1	Spezifische Wärmekapazität nach EN 1992-1-2 .....	34
2.3.2.2	Rohdichte von Beton nach EN 1992-1-2.....	35
2.3.2.3	Wärmeleitfähigkeit von Beton nach EN 1992-1-2.....	36
2.4	Brandmodelle .....	37
2.4.1	Verlauf von natürlichen Bränden.....	37
2.4.2	Normbrandkurven und Design Fires .....	39
2.4.3	Einheits-Temperatur-Zeitkurve ETK .....	40
3	Versuchsplanung und Vorversuche .....	42
3.1	Voruntersuchungen .....	42
3.1.1	Betonzusammensetzung .....	42
3.1.1.1	Quarzzuschlag .....	42
3.1.1.2	Kornzusammensetzung .....	43
3.1.1.3	Bindemittel und Hydratation .....	44
3.1.1.4	Wasser-Bindemittel-Wert .....	46
3.1.2	Ausgleichsfeuchtigkeit der Versuchskörper .....	47
3.2	Versuchsplanung.....	48
3.2.1	Methoden zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit .....	48
3.2.2	Parallel - Heißdrahtverfahren.....	49
3.2.2.1	Erforderliche Prüfgeräte gemäß EN 993-15 .....	50
3.2.2.2	Probekörper für das Parallel-Heizdrahtverfahren .....	51
3.2.3	Brandversuche.....	54
3.3	Vorversuche .....	55

3.3.1	Sieblinienanalyse .....	55
3.3.2	Betonmischung .....	56
3.3.3	Druckversuche .....	57
3.3.4	Vorversuche zum Parallel – Heißdrahtverfahren .....	59
3.3.5	Brandvorversuche .....	61
3.3.6	Interpretation der Vorversuche .....	62
4	Versuchsdurchführung und Auswertung .....	64
4.1	Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit .....	64
4.1.1	Probenherstellung .....	64
4.1.2	Probenvorbereitung und Probenlagerung .....	67
4.1.3	Prüfeinrichtung .....	70
4.1.4	Prüfdurchführung .....	75
4.1.4.1	Kalibrierung des Datenloggers .....	75
4.1.4.2	Prüfanordnung und Aufstellung im Ofen .....	77
4.1.4.3	Aufheizen und Prüftemperatur .....	78
4.1.4.4	Leistungseingabe und Messung .....	79
4.1.5	Auswertung der Daten .....	81
4.1.6	Prüfergebnisse .....	88
4.1.7	Interpretation der Prüfergebnisse .....	92
4.2	Brandversuche .....	93
4.2.1	Probenherstellung und Probenvorbereitung .....	93
4.2.2	Prüfeinrichtung .....	95
4.2.3	Versuchsdurchführung .....	100
4.2.3.1	Kalibrierung des Datenloggers .....	100
4.2.3.2	Gasregelung .....	101
4.2.4	Versuchsergebnisse .....	103
4.2.5	Interpretation und Vergleich der Brandversuche .....	110

5	Brandsimulation und Vergleich.....	114
5.1	Simulationsprogramm BRTemp2D.....	114
5.1.1	Theoretische Grundlagen .....	114
5.1.2	Dateneingabe .....	115
5.1.3	Simulationsergebnisse.....	120
5.2	Interpretation und Vergleich der Simulationsergebnisse .....	121
6	Zusammenfassung und Ausblick .....	124
6.1	Zusammenfassung.....	124
6.2	Ausblick.....	129
	Literaturverzeichnis .....	130
	Normenverzeichnis.....	132
	Abbildungsverzeichnis.....	133
	Tabellenverzeichnis.....	136
	Formelverzeichnis .....	137
	Anhänge .....	138

## 1 Einleitung

Der Baustoff Beton spielt seit längerer Zeit eine wichtige Rolle im Bauwesen. Durch ständige betontechnologische Entwicklungen und Innovationen findet der Beton als Baustoff immer öfter neue Anwendungsgebiete im Hoch- und Tiefbau bzw. bestätigt und festigt seine Stellung in dessen bisherigen Einsatzbereichen. Umso wichtiger ist somit der Kenntnisstand über die Eigenschaften und das Materialverhalten von Beton, sowohl unter normalen als auch unter außergewöhnlichen Bedingungen bzw. Beanspruchungen, wie zum Beispiel Brandbeanspruchungen.

Betonfeuchte und erhöhte Temperaturen beeinflussen wesentlich die mechanischen Eigenschaften, wie die Festigkeit und auch die Verformung des Betons. Für die Brandforschung und besonders bei der Bemessung von Betontragwerken bzw. Betonbauteilen im Brandfall sind aber auch die thermischen Eigenschaften des Betons maßgebend, welche im *Eurocode 2* Teil 1 - 2, der ÖNORM EN 1992-1-2, normativ geregelt werden. Wie die mechanischen Eigenschaften werden auch die thermischen Eigenschaften des Betons von der Betonfeuchte und von den vorherrschenden Temperaturen beeinflusst.

Im Zuge dieser Arbeit wurde die Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton mit quarzhaltigem Zuschlag in Abhängigkeit von der Betonfeuchtigkeit bei erhöhten Temperaturen untersucht.

Ziel dieser Arbeit ist die Überprüfung der Werte des *Eurocodes*, d.h. die Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton mit quarzhaltigem Zuschlag theoretisch und experimentell zu erfassen, um die erhaltenen Ergebnisse mit den Werten im *Eurocode 2* zu vergleichen. Diese Werte werden verwendet, um durchgeführte Brandversuche zu simulieren und die Richtigkeit dieser Werte respektive der Werte des *Eurocodes* festzustellen bzw. widerzugeben.

Die Arbeit ist in drei Teile gegliedert, nämlich in einen theoretischen Teil, einen praktischen Teil und zuletzt in einen Simulationsteil.

Im ersten Teil der Arbeit wird ein Überblick über die Grundlagen des Wärmetransportes, über einige feuchtetechnische Größen und Begriffe und über einige Betoneigenschaften gegeben. Auch der derzeitige Erkenntnisstand über das thermische Materialverhalten von Beton bei erhöhten Temperaturen wird beschrieben.

Im darauffolgenden Teil werden zunächst das Versuchsprogramm, die Versuchseinrichtungen und die Versuchsplanung beschrieben, bis dann zu den eigentlichen Versuchen übergegangen wird.

Nach der Erläuterung der Prüfdurchführung, erfolgt die Darstellung und die Auswertung der experimentellen Ergebnisse samt Vergleich zu den normativ geregelten Werten für die Wärmeleitfähigkeit.

Den Abschluss des praktischen Teils stellen die Brandversuche dar, die ebenfalls beschrieben und interpretiert werden.

Der dritte Teil befasst sich mit der Simulation eines einseitig dem Brand ausgesetzten Betonkörpers, entsprechend den Randbedingungen aus den Brandversuchen, und es werden die mittels der Brandsimulation berechneten Temperaturkurven mit jenen aus den tatsächlichen Brandversuchen verglichen.

Im letzten Kapitel dieser Arbeit werden sowohl die Prüf- und Versuchsergebnisse als auch die Simulationsergebnisse zusammengefasst und nochmals interpretiert.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Wärmetransport

Lokale Temperaturunterschiede innerhalb eines Mediums bzw. zwischen mehreren Medien sind die Ursache für Wärmebewegungen in Richtung eines Temperaturgefälles. Es wird solange Energie übertragen, bis sich die Temperaturen im Medium bzw. zwischen den Medien angeglichen haben. Dabei erfolgt der Energieaustausch, den Aussagen des zweiten Hauptsatzes der Thermodynamik entsprechend, stets von der wärmeren Seite zur kälteren Seite.

Je nachdem, ob die Temperaturen zeitlich konstant oder veränderlich sind, unterscheidet man zwischen stationären und instationären Wärmeströmen. Der Wärmetransport erfolgt in festen Stoffen durch Wärmeleitung, in Gasen und Flüssigkeiten durch Wärmeleitung und Konvektion und bei strahlungsdurchlässigen Stoffen durch Wärmestrahlung. Somit sind die verschiedenen Arten des Wärmetransportes ([1] S. 43; [2] S. 112),

- Wärmeleitung (Konduktion)
- Wärmeströmung (Konvektion) und
- Wärmestrahlung (Radiation).

Diese können entweder allein oder miteinander kombiniert auftreten.

Bei der Berechnung des Wärmehaushaltes infolge einer Brandbelastung wird eine nichtlineare und instationäre Wärmeübertragung betrachtet ([3] S. 32).

#### 2.1.1 Wärmeleitung

In festen Stoffen erfolgt die Wärmeübertragung durch Wärmeleitung. Der Wärmeaustausch erfolgt zwischen benachbarten Molekülen, wobei die Wärmeenergie durch deren Bewegungen übertragen wird. Dabei findet kein Stofftransport statt.

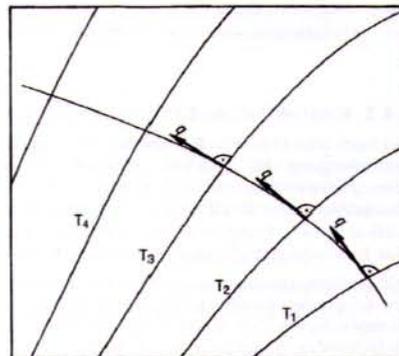
Für homogene und isotrope Werkstoffe gilt das *FOURIER*'sche Grundgesetz der Wärmeleitung (siehe Formel 2-1), welches die Beziehung zwischen der Wärmestromdichte  $q$  und der Temperaturverteilung im Körper beschreibt.

$$q = -\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n}$$

q	Wärmestromdichte
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
T	Isotherme
n	Normale zu den Isothermen

**Formel 2-1:** FOURIER'sches Grundgesetz der Wärmeleitung

In der Abbildung 2-1 sieht man, dass der Wärmestrom entgegengesetzt zur positiven Änderung des Temperaturfeldes gerichtet ist und normal zu den Isothermen verläuft.



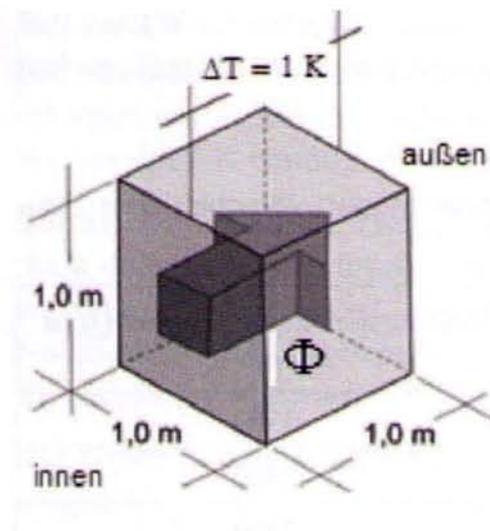
**Abbildung 2-1:** Isothermen  $T_1, \dots, T_n$  in Richtung abnehmender Temperaturen ([2] S. 113)

Größen für die Wärmeleitung bzw. Stoffgrößen für das wärmetechnische Verhalten von Baustoffen sind:

- die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$
- die Temperaturleitfähigkeit  $a$  und
- der Wärmeeindringkoeffizient  $b$ .

### 2.1.1.1 Wärmeleitfähigkeit

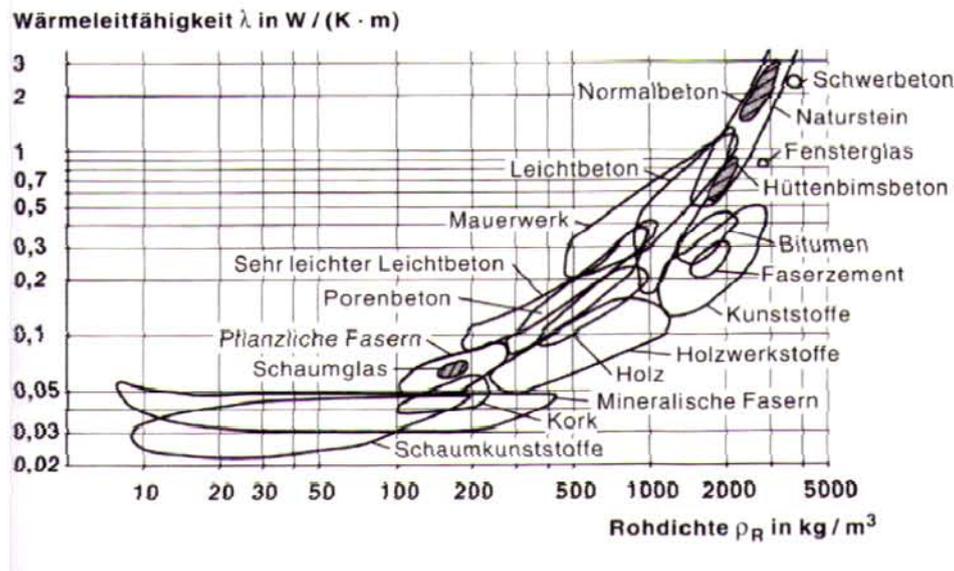
Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  (Abbildung 2-2) ist eine temperaturabhängige physikalische Materialgröße, und gibt an, welche Wärmemenge  $\Phi$  innerhalb einer Stunde bei einer Temperaturdifferenz von 1 Kelvin durch eine 1 m dicke Schicht eines Stoffes über eine Fläche von  $1 \text{ m}^2$  übertragen wird ([4] S. 34).



**Abbildung 2-2:** Definition der Wärmeleitfähigkeit ([1] S. 44)

Die Wärmeleitfähigkeit ist sehr von der physikalischen und chemischen Struktur bzw. vom Aufbau von festen Stoffen abhängig. Metalle weisen generell eine höhere Wärmeleitfähigkeit auf als Nichtmetalle, ebenso ist bei amorphen Stoffen die Wärmeleitfähigkeit kleiner als bei Stoffen mit kristalliner Struktur.

In Abbildung 2-3 ist die Wärmeleitfähigkeit verschiedener Baustoffen in Abhängigkeit von der Trockenrohdichte dargestellt.



**Abbildung 2-3:** Wärmeleitfähigkeit verschiedener Baustoffe ([1] S. 45)

Man erkennt aus Abbildung 2-3, dass sich bei mineralischen Baustoffen die  $\lambda$ -Werte ungefähr im Bereich zwischen 0,1 bis 3,0  $W/(m \cdot K)$  befinden, und mit zunehmender Porigkeit die Wärmeleitfähigkeit abnimmt. Dies ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass die in den Poren enthaltene Luft mit  $\lambda_{Luft} = 0,025 W/(m \cdot K)$  eine deutlich geringere Wärmeleitfähigkeit aufweist als der umgebende Feststoff, wobei bei gleichem Porenvolumen Stoffe mit vielen kleinen Poren einen geringeren  $\lambda$ -Wert besitzen als Stoffe mit wenigen großen Poren.

Auch der Feuchtegehalt eines Stoffes hat einen erheblichen Einfluss auf dessen Wärmeleitfähigkeit. Je größer der Wassergehalt des Baustoffes ist, desto größer ist dessen Wärmeleitfähigkeit. Eine Ursache ist, dass die Wärmeleitfähigkeit von Wasser mit  $\lambda_{Wasser} = 0,60 W/(m \cdot K)$  ungefähr 24-mal größer ist als die von Luft, und somit folglich der  $\lambda$ -Wert des feuchten Stoffes höher ist ([1] S. 44).

### 2.1.1.2 Temperaturleitfähigkeit und Wärmeeindringkoeffizient

Die Temperaturleitzahl  $a$  wird als Quotient aus dem Wärmedämmvermögen eines Stoffes und seiner Wärmespeicherfähigkeit definiert und wird nach Formel 2-2 bestimmt. Je größer die Temperaturleitfähigkeit  $a$  ist, desto größer ist die Geschwindigkeit, mit der sich die Temperaturänderung im Stoff vollzieht.

$$a = \frac{\lambda}{c \cdot \rho}$$

$a$	Temperaturleitfähigkeit in $\text{m}^2/\text{s}$
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
$c$	spezifische Wärmekapazität in $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$\rho$	Rohdichte in $\text{kg}/\text{m}^3$

**Formel 2-2:** Temperaturleitfähigkeit

Der Wärmeeindringkoeffizient  $b$  wird als Maß für die Geschwindigkeit einer Wärmeübertragung bei Berührung verwendet. Er ist abhängig von der Rohdichte  $\rho$ , der spezifischen Wärmekapazität  $c$  und der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  des Baustoffes ab und errechnet sich nach folgender Formel 2-3:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot c \cdot \rho}$$

$b$	Wärmeeindringkoeffizient in $\text{J}/(\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{s}^{1/2})$
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit in $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
$c$	spezifische Wärmekapazität in $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$\rho$	Rohdichte in $\text{kg}/\text{m}^3$

**Formel 2-3:** Wärmeeindringkoeffizient

### 2.1.1.3 Spezifische Wärmekapazität und Wärmespeichervermögen

Die spezifische Wärmekapazität  $c$  gibt an, wie viel Energie erforderlich ist, um 1 kg eines Stoffes um 1 K zu erwärmen.

Stoffe mit einer hohen spezifischen Wärmekapazität benötigen mehr Energie für die Erwärmung als Stoffe mit einer niedrigeren spezifischen Wärmekapazität, sie können jedoch auch mehr Wärmeenergie speichern und somit hohe Temperaturschwankungen besser ausgleichen.

Wasser hat mit einer spezifischen Wärmekapazität von  $c_{\text{Wasser}} = 4190 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  eine ungefähr 4-mal höhere spezifischen Wärmekapazität als Luft mit  $c_{\text{Luft}} = 1000 \text{ J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ , daraus lässt sich ebenfalls eine Abhängigkeit zwischen dem Wassergehalt und den wärmetechnischen Eigenschaften eines Baustoffes schlussfolgern [1].

Das Wärmespeichervermögen  $Q_s$  in  $\text{J}/(\text{dm}^3\cdot\text{K})$  eines Stoffes ist das Produkt aus der spezifischen Wärmekapazität  $c$  in  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$  und der Rohdichte  $\rho$  des Stoffes in  $\text{kg}/\text{dm}^3$ .

### 2.1.2 Konvektion

Durch Temperaturunterschiede im Temperaturfeld entstehen in Flüssigkeiten oder Gasen Dichteunterschiede, die Strömungen verursachen. Dabei bewegen sich Moleküle fort und führen Wärmeenergie mit. Es findet also neben einer Wärmeleitung auch eine Konvektion mit einem Stofftransport statt.

Man unterscheidet bei der Wärmeströmung zwischen erzwungener und freier Konvektion. Erzwungene Konvektion, Zwangsströmung, wird durch mechanische Hilfsmittel wie Pumpen etc. verursacht, freie Konvektion ist die natürliche Strömung. Die Konvektion wird mathematisch durch die Wärmestromdichte  $\dot{q}_{konv}$  nach dem *NEWTON*'schen Abkühlungsprozess beschrieben (Formel 2-4):

$$\dot{q}_{konv} = \alpha_c \cdot (\theta_f - \theta_s)$$

$\dot{q}_{konv}$	Wärmestromdichte in $\text{W}/\text{m}^2$
$\alpha_c$	konvektive Wärmeübergangskoeffizient in $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$
$\theta_f$	Fluidtemperatur in $^{\circ}\text{C}$
$\theta_s$	Oberflächentemperatur in $^{\circ}\text{C}$

**Formel 2-4:** NEWTON'sches Abkühlungsprozess

## Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient

Die Wärmeübertragung zwischen einem strömenden Medium, wie z. B. Luft, und einem stationärem Medium, z.B. einer Betonwand, wird als konvektiver Wärmeübergang bezeichnet. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_c$  ist stark von den gegebenen Strömungsverhältnissen abhängig. Deshalb gibt es eine Unterscheidung, ob der Wärmeübergang raumseitig mit natürlichen Strömungsverhältnissen und natürlichem Auftrieb oder im Freien mit unterschiedlichen Windverhältnissen und Geschwindigkeiten stattfindet. In Räumen wird der konvektive Wärmeübergangskoeffizient stark von der Richtung des Wärmestromes und vom natürlichen Auftrieb beeinflusst [1].

Ist der Wärmestrom aufwärts gerichtet wirkt der natürliche Auftrieb unterstützend, ist der Wärmestrom abwärts gerichtet wirkt der natürliche Auftrieb entgegen. Für einen aufwärtsgerichteten Wärmestrom kann mit einem konvektiven Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_c$  von  $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , für einen horizontalen Wärmestrom mit einem  $\alpha_c$  von  $2,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  und für einen abwärtsgerichteten Wärmestrom mit einem  $\alpha_c$  von  $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  gerechnet werden. Der konvektive Wärmeübergangskoeffizient in der Grenzschicht Luft/Beton beträgt in der Regel  $\alpha_c = 5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

Gemäß dem Eurocode 1, Teil 1 - 2, ÖNORM EN 1991-1-2, in welchem die Brandeinwirkungen auf Tragwerke geregelt wird, wird der konvektive Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_c$  für die brandabgewandte Seite von trennenden Bauteilen mit  $4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  bestimmt. Er sollte mit  $9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  angesetzt werden, wenn angenommen wird, dass er die Wärmübertragung durch Strahlung mit abdeckt. Für die brandzugewandte Seite wird der konvektive Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_c$  mit  $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  geregelt.

### 2.1.3 Wärmestrahlung

Wärme wird als elektromagnetische Strahlung von einem Körper abgegeben bzw. aufgenommen. Die Ausbreitung der Strahlung ist nicht an Materie gebunden, da sie durch elektromagnetische Wellen übertragen wird. Die Strahlungsausbreitung

ist deshalb auch im Vakuum möglich. Die Intensität und spektrale Energieverteilung der Strahlung ist von der Temperatur- und Oberflächenbeschaffenheit des Körpers abhängig. Wärmestrahlung wird von hellen Oberflächen reflektiert, von durchscheinenden transparenten Flächen durchgelassen und von dunklen Oberflächen absorbiert, genauer gesagt teilt sich die auf die Oberfläche eines Körpers auftreffende Strahlung in folgende Strahlungsleistungsanteile auf:

- Reflexion
- Transmission und
- Absorption.

Man unterscheidet zwischen der spiegelnden und der diffusen Reflexion. Eine spiegelnde oder gerichtete Reflexion liegt vor, wenn Ein- und Ausfallswinkel der Strahlung im Vergleich zu der Flächennormale gleich groß sind. Hingegen wird bei der diffusen oder nicht gerichteten Reflexion die zurückgeworfene Strahlung gleichmäßig über den gesamten Raum verteilt. Normalerweise wird nicht die gesamte auftreffende Strahlung zurückgeworfen. Ausgedrückt wird der Anteil der reflektierten Strahlung durch den Reflexionsgrad  $\rho$ . Die Absorptionsfähigkeit der Materialfläche wird durch den Absorptionsgrad  $\alpha$  beschrieben. Der Anteil der durchgelassenen Strahlung wird mit dem Transmissionsgrad  $\tau$  beschrieben [1]; [2]; [3]. Diese werden folgendermaßen bestimmt (Formel 2-5):

$$\rho = \frac{\text{reflektierte Strahlung}}{\text{auftreffende Strahlung}}$$

$$\alpha = \frac{\text{absorbierte Strahlung}}{\text{auftreffende Strahlung}}$$

$$\tau = \frac{\text{durchgelassene Strahlung}}{\text{auftreffende Strahlung}}$$

**Formel 2-5:** Reflexions-, Absorptions- und Transmissionsgrad

Zwischen dem Reflexionsgrad  $\rho$ , dem Absorptionsgrad  $\alpha$  und dem Transmissionsgrad  $\tau$  besteht nach dem *Energieerhaltungssatz* folgende Beziehung (Formel 2-6):

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

**Formel 2-6:** Beziehung zwischen Reflexions-, Absorptions- und Transmissionsgrad

### 2.1.3.1 Transmission

Nur bei transparenten Baustoffen kann eine reine Transmission mit  $\tau = 1$  auftreten. Sind Bauteile undurchsichtig beträgt der Transmissionsgrad  $\tau = 0$ .

### 2.1.3.2 Absorption und Emission

Die Strahlungsenergie eines Körpers ist von der Temperatur und den Strahlungseigenschaften der Oberfläche abhängig. Um Strahlungsprozesse besser formulieren zu können, wurde der Begriff des "schwarzen Strahlers" bzw. des "schwarzen Körpers" eingeführt, welcher als Körper definiert ist, der bei der Temperatur  $T$  die höchstmögliche Energiemenge abstrahlt. Der Schwarze Körper absorbiert dabei die gesamte auftreffende Strahlung (d.h. der Absorptionsgrad  $\alpha = 1$  und der Reflexionsgrad  $\rho = 0$ ) und wandelt diese in Wärme um. Körper mit einem Absorptionsgrad  $\alpha < 1$  werden auch als "graue Strahler" bezeichnet.

Unter dem Emissionsgrad  $\varepsilon$  (Formel 2-7) versteht man das Verhältnis, der von der Oberfläche eines grauen Körpers emittierenden spezifischen Ausstrahlung  $M$ , zu der spezifischen Ausstrahlung eines schwarzen Körpers  $M_s$ :

$$\varepsilon = \frac{M}{M_s}$$

**Formel 2-7:** Emissionsgrad

Der Emissionsgrad  $\varepsilon$  ist nicht nur vom Material, sondern auch besonders von der Oberflächenbeschaffenheit und der Farbe abhängig, da zum Beispiel farbige, glänzende oder matte Oberflächen die Strahlung von verschiedenen Wellenlängen unterschiedlich stark absorbieren.

Temperaturstrahler können über deren Oberfläche sowohl Strahlung absorbieren als auch diese emittieren. Das *KIRCHHOFF*'sche Strahlungsgesetz (Formel 2-8) besagt, dass der Emissionsgrad  $\varepsilon$  der Oberfläche des Strahles bei jeder Temperatur und für jede Wellenlänge gleich dem Absorptionsgrad  $\alpha$  der Oberfläche des Strahles ist [1]:

$$\varepsilon = \alpha$$

**Formel 2-8:** *KIRCHHOFF*'sches Strahlungsgesetz

Ein Richtwert für den Emissionsgrad  $\varepsilon$  von Betonoberflächen zwischen 0°C und 100°C beträgt 0,93 ([4] S. 37).

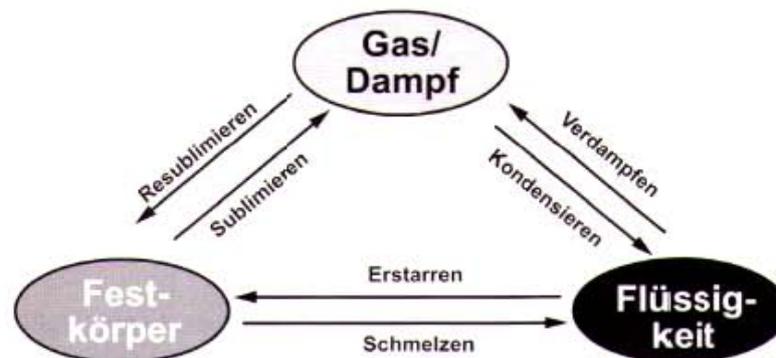
## 2.2 Feuchtetechnische Grundlagen

Wichtige wärmetechnische Baustoffeigenschaften, darunter auch die Wärmeleitfähigkeit, werden vom Wassergehalt des Stoffes beeinflusst.

Der Wasserhaushalt von Baustoffen wird durch verschiedene, meist zur gleichen Zeit ablaufenden Transport- und Speicherungsmechanismen von Wasser bestimmt. Diese sind von der Temperatur, der Feuchtigkeit der umgebenden Luft und des Betons sowie von der Porosität des Betons abhängig ([5] S. 8). Um diese Vorgänge beurteilen zu können, wird im Folgenden näher auf die Eigenschaften des Wassers eingegangen.

## 2.2.1 Wasser

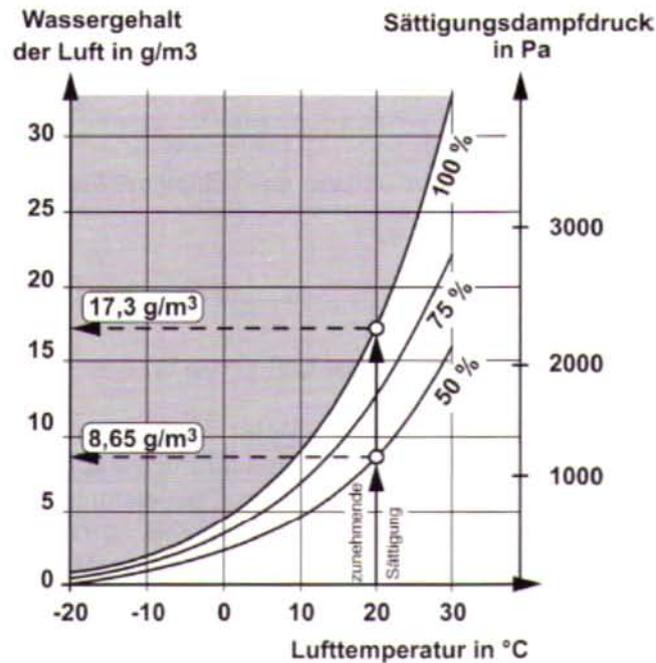
In Abhängigkeit von den Temperatur- und Druckverhältnissen kommt Wasser als Eis, flüssiges Wasser oder Wasserdampf vor. Die Phasenübergänge zwischen den einzelnen Aggregatzuständen werden in Abbildung 2-4 dargestellt. Bei Wasser liegt der Schmelzpunkt  $0\text{ °C}$  und der Siedepunkt  $100\text{ °C}$  jeweils bei einem Druck von  $1013,25\text{ hPa}$ .



**Abbildung 2-4:** Übergänge zwischen den Aggregatzuständen ([1] S. 35)

### 2.2.1.1 Wasserdampfdruck und Sättigungsdampfdruck

Beim Gefrieren von Wasser zu Eis vergrößert sich das Volumen um knapp 10 Vol.-%. Wasserdampf entsteht nicht nur bei einer Temperatur von  $100\text{ °C}$ , sondern ist bereits bei niederen Temperaturen in der Luft vorhanden und macht einen Teil des gesamten Luftdruckes aus, der als Wasserdampfdruck bezeichnet wird. Der maximal mögliche Wasserdampfdruck wird Sättigungsdampfdruck genannt. In Abbildung 2-5 sieht man, dass jedem Sättigungsdampfdruck eine bestimmte Sättigungsfeuchte entspricht. Die Sättigungsfeuchte ist die von der Luft maximal aufnehmbare Wassermenge, die sehr stark von der Lufttemperatur abhängig ist [1].



**Abbildung 2-5:** Wassergehalt der Luft und Sättigungsdampfdruck in Abhängigkeit von der Temperatur ([1] S. 35)

### 2.2.1.2 Relative Luftfeuchte und Kondensation

Die Sättigungsfeuchte entspricht bei einer Temperatur von 20 °C 17,3 g/m<sup>3</sup>, das ist die maximale Menge an Wasserdampf, die die Luft bei dieser Temperatur aufnehmen kann. Unter der relativen Luftfeuchte  $\varphi$  versteht man das Verhältnis von der vorhandenen Luftfeuchte zu der Sättigungsfeuchte bei der entsprechenden Temperatur (Formel 2-9):

$$\varphi = \frac{\text{vorhandene Luftfeuchte}}{\text{Sättigungsfeuchte}} \cdot 100 [\%]$$

**Formel 2-9:** Relative Luftfeuchte

Aus der Formel 2-9 erkennt man, dass bei der Sättigungsfeuchte die relative Luftfeuchtigkeit  $\varphi$  100% beträgt. Wird feuchte Luft abgekühlt nimmt der Wert der relativen Luftfeuchte solange zu bis die Sättigungsfeuchte erreicht wird. Kommt es nun zu einer weiteren Temperaturabsenkung kann die Luft die vorhandene Wasserdampfmenge nicht mehr vollständig aufnehmen. Die überschüssige Wassermenge kondensiert auf kühleren Oberflächen.

## 2.2.2 Wassergehalt von Stoffen

Der Wassergehalt eines Baustoffes, auch Feuchtegehalt genannt, kann entweder massebezogen oder volumenbezogen angegeben werden [1].

Unter dem massebezogenen Feuchtegehalt versteht man das Verhältnis der in der Probe enthaltenen Wassermenge  $m_w$  zu der Masse der trockenen Probe  $m_d$ , der folgendermaßen bestimmt wird (Formel 2-10):

$$h_M = \frac{m_w}{m_d} \cdot 100 \text{ [M. -\%]}$$

$h_M$	massebezogene Feuchtegehalt (englisch: humidity)
$m_w = m_h - m_d$	enthaltene Wassermenge
$m_h$	Masse der feuchten Probe
$m_d$	Masse der trockenen Probe

**Formel 2-10:** Massenbezogene Feuchtegehalt

Der Wassergehalt wird durch Wiegen der Probe zuerst im feuchten und anschließend während und nach der Trocknung im trockenen Zustand bestimmt. Die Trocknung erfolgt durch Erwärmen der Probe mit 105 °C. Die Probe verbleibt solange im Ofen bis sich die Massekonstanz der Probe eingestellt hat. Eine Massekonstanz ist erreicht, wenn sich die Masse der Probe innerhalb von 24 Stunden um maximal 0,1 M.-% verändert hat [1].

Mit dem volumenbezogenen Feuchtegehalt ist ein Vergleich zwischen Baustoffen mit unterschiedlichen Rohdichten möglich und wird mit Formel 2-11 ermittelt.

$$h_V = h_M \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} \text{ [Vol. -\%]}$$

$h_V$	volumenbezogene Feuchtegehalt
$h_M$	massebezogene Feuchtegehalt
$\rho_d$	Trockenrohddichte
$\rho_w$	Dichte von Wasser

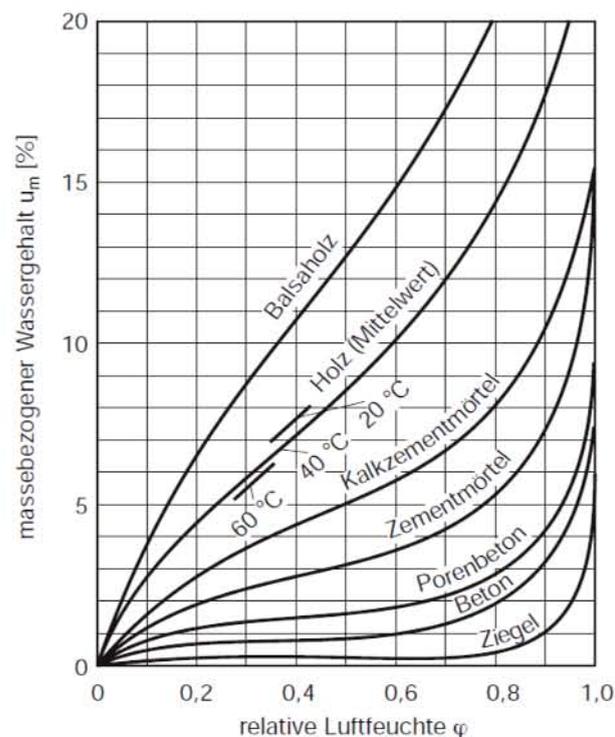
**Formel 2-11:** Volumenbezogene Feuchtegehalt

## 2.2.3 Wasserspeicherung und Wassertransport

### 2.2.3.1 Wasserdampfaufnahme

Der Wassergehalt poröser Baustoffe ist von der relativen Luftfeuchtigkeit und von der Temperatur abhängig. In Kontakt und durch Wechselwirkung mit Luft und der Umgebung tritt bei porigen Stoffen eine Sorption von Wassermolekülen im Porengefüge des Materials auf. Nach einiger Zeit in derselben Umgebung stellt sich ein Gleichgewicht für die entsprechende Situation zwischen Luftfeuchte und Stofffeuchte ein, diesen Feuchtezustand nennt man Ausgleichsfeuchte oder Gleichgewichtsfeuchte eines Stoffes. Sie wird durch die Porosität, die Porenradien und die innere Oberfläche bestimmt [5].

Der Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt eines porigen Stoffes und der relativen Luftfeuchtigkeit für eine definierte Temperatur wird durch Sorptionsisotherme beschrieben, die in Abbildung 2-6 für verschiedene Baustoffe dargestellt sind. Man unterscheidet zwischen der Adsorption, die die Aufnahme von Wasserdampf bei zunehmender Luftfeuchte beschreibt, und der Desorption, die die Abgabe von Wasserdampf bei abnehmender Luftfeuchte beschreibt.



**Abbildung 2-6:** Sorptionsisothermen verschiedener Baustoffe [6]

In porösen Baustoffen unterscheidet man zwischen chemisch gebundenem, physikalisch gebundenem und freiem Wasser [5].

Bei der Chemisorption werden Wassermoleküle an der Porenoberfläche chemisch gebunden, der dabei anfallende Anteil kann in der Regel vernachlässigt werden. Die chemische Bindung von Wasser ist irreversibel.

Durch Physisorption werden Wassermoleküle an der Porenoberfläche physikalisch gebunden. Die Ursache für die physikalische Bindung von Wasser stellen zwischenmolekulare Bindungskräfte, die sog. *van der WAALS* – Kräfte, dar. Der Vorgang ist reversibel, und es sind dabei die innere Oberfläche des Materials und die Anzahl der übereinander gelagerten Wassermolekülschichten ausschlaggebend. Mit größer werdendem Abstand zur Oberfläche werden die *VAN DER WAALS*’schen Anziehungskräfte kleiner und die Beweglichkeit der Wassermoleküle grösser. Sind diese Anziehungskräfte kaum bis gar nicht mehr vorhanden, spricht man von ungebundenem oder freiem Wasser.

In dünnen Kapillaren findet eine Kapillarkondensation statt, da der Sättigungsdampfdruck durch Oberflächenkräfte niedriger ist. Kapillarkondensation findet generell bei höheren relativen Luftfeuchten statt und ist reversibel. Zuzufolge einer zeitlichen Verzögerung bildet sich eine Hysterese zwischen Adsorptions- und Desorptionsisotherme. Ob die Hysterese zwischen der Adsorptions- und der Desorptionsisotherme deutlicher oder weniger ausgeprägt ist, ist von der Porosität, den Porenradien und der innere Oberfläche des Stoffes abhängig. Kapillarkondensation findet vor allem im Bereich höherer Luftfeuchten statt [1].

### **2.2.3.2 Sorptionsisotherme von Beton**

Wasser wird im Beton bei der Hydratation (siehe Abschnitt 3.1.1.3) in den Hydratationsprodukten, den Calciumsilikathydraten und im Calciumhydroxid, chemisch gebunden.

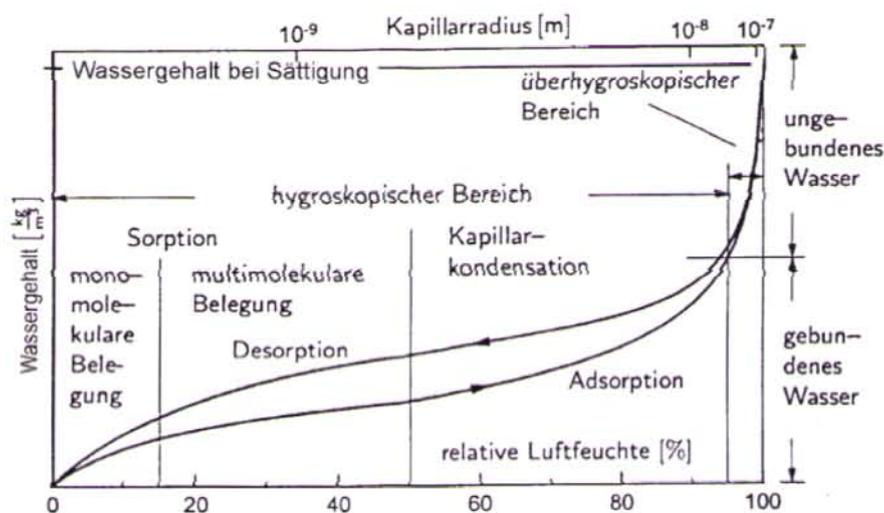
In Abbildung 2-7 ist ein Beispiel für die Sorptionsisotherme von Beton dargestellt. Es wird der Bereich bis zu einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95 % als hygroskopischer Bereich bezeichnet. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von ungefähr 15 bis 20 % ist die Oberfläche mit einer monomolekularen

Wasserschicht bedeckt, dabei wirken sehr große *VAN DER WAALS*-Kräfte. Mit steigender Luftfeuchtigkeit werden auch in tieferen Schichten Wassermoleküle angelagert, deren Bindung nicht so ausgeprägt ist.

Die kleinsten Poren sind durch Sorption bei rund. 50-%iger relativer Luftfeuchtigkeit mit Wasser aus der Luft gefüllt. Im hygroskopischen Bereich, welcher auch als Sorptionsfeuchtebereich bezeichnet wird, stellt sich in Abhängigkeit der gegebenen relativen Luftfeuchtigkeit der Ausgleichsfeuchtegehalt ein. Ab einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % wird für die Sorptionsisotherme die Kapillarkondensation ausschlaggebend.

Bei Normalbetonen nehmen die Ausgleichsfeuchten  $u_{50}$ , in Abhängigkeit der jeweiligen Betongüte, bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 % Werte zwischen 2,2 und 3,2 Prozent an. Die Gleichgewichtsfeuchten von Normalbetonen bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95 % nehmen Werte zwischen 6,1 und 7,9 Prozent an ([1] S. 357).

Der Bereich bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von über 95 % wird überhygroskopischer Bereich genannt. In diesem Bereich werden zusätzliche Kapillarkräfte wirksam, sodass der Wassergehalt stark ansteigt, und alle Mikroporen mit Wasser gefüllt werden. Wasser welches im überhygroskopischen Bereich gespeichert wird, tritt im Beton als ungebundenes Wasser auf [5].



**Abbildung 2-7:** Beispiel für eine Sorptionsisotherme von Beton [5]

Auch für Beton erkennt man in Abbildung 2-7 zwischen der Adsorptions- und der Desorptionskurve eine ausgeprägte Hysterese, für dessen Ursache vorrangig das Wasserrückhaltevermögen der sogenannten *INK-BOTTLE*-Poren verantwortlich gemacht wird. Diese Poren werden bei der Sorption stetig gefüllt, bei der Desorption aber erst dann entleert, wenn der Dampfdruck so niedrig ist, dass auch das im Porenhals kapillarkondensierte Wasser verdampft [7].

### **2.2.3.3 Wasserdampfdiffusion**

Unter Diffusion versteht man das Wandern einzelner sehr kleiner Teilchen, wie Atome, Ionen und kleinen Molekülen verursacht durch Teildruck- und Konzentrationsunterschiede. Die *BROWN*'sche Molekularbewegung, die bei Flüssigkeiten und Gasen vorkommt, ist abhängig von den Temperatur- und vom Druckverhältnissen.

Wassermoleküle in der ruhenden Luft und Wasserdampf, der in Poren von Baustoffen enthalten ist, diffundieren und bewirken einen Massenstrom in Richtung des Dampfdruckgefälles, das bedeutet von Stellen größerer zu kleinerer Wasserdampfkonzentration ([1]; [2]).

## 2.3 Beton

Beton ist ein Konglomerat aus Gesteinskörnern unterschiedlicher Größe, aus einem Bindemittel und aus Wasser. Neben diesen Grundbestandteilen kann Beton zusätzlich Zusatzmittel und Zusatzstoffe enthalten.

Das Gemisch aus unterschiedlich großen Gesteinskörnern, welches in der Regel mineralischen Ursprung aufweist, wird als Zuschlag bezeichnet. Der Zuschlag nimmt fast dreiviertel des Betonvolumens ein, und bildet somit nicht nur mengenmäßig den Hauptbestandteil, sondern beeinflusst auch die Betoneigenschaften wesentlich.

In dieser Arbeit wird gesondert auf Beton mit quarzhaltigem Zuschlag eingegangen. Zuschläge aus Quarzsand weisen eine gute chemische Beständigkeit und eine hohe Eigenfestigkeit auf. Durch die Anwendung von Quarzsand werden die mechanischen Eigenschaften, Festigkeit und Elastizitätsmodul des Betons, im Vergleich zu anderen Zuschlägen erhöht. Auch die thermischen Eigenschaften des Betons werden von den thermischen Eigenschaften des Quarzzuschlages bestimmt.

Unter Bindemittel versteht man in der Regel anorganische hydraulisch erhärtende Stoffe. In dieser Arbeit wird Beton mit Zement als Bindemittel untersucht. Der erforderliche Zementgehalt wird durch den Wasserzementwert, den Wasseranspruch des Zuschlages und den gewünschten Eigenschaften des Betons bestimmt.

Betonzusatzmittel beeinflussen chemische oder physikalische Eigenschaften des Betons. Diese werden in flüssiger, pulverförmiger oder als Granulat dem Beton in geringen Mengen zugesetzt und werden stoffmäßig nicht berücksichtigt.

Betonzusatzstoffe werden dem Beton zugegeben, um einzelne Eigenschaften, wie zum Beispiel die Verarbeitbarkeit, Dichtigkeit und Farbe des Betons, zu beeinflussen. Zusatzstoffe müssen als Volumenbestandteile berücksichtigt werden [8].

### 2.3.1 Thermische Eigenschaften von Beton

Beton ist ein nicht brennbarer Stoff, somit bleiben die Geometrie und Form von Bauteilen aus Beton unter Feuereinwirkung im Wesentlichen erhalten. Beton ist ein schlechter Wärmeleiter, dies hat zur Folge, dass bei einem Brand die entsprechenden Bauteile nur in den Randzonen bei der Brandseite verbrannt bzw. erwärmt werden, wohingegen ihre Kernbereiche nur geringe Temperaturerhöhungen erfahren. Dadurch verändern sich die mechanischen Eigenschaften unterschiedlich stark in den Randbereichen und bleiben in den Kernbereichen der Bauteile nahezu unverändert. Neben den mechanischen Baustoffeigenschaften stellen auch die thermischen Eigenschaften von Beton wie

- Rohdichte
- Feuchtigkeit
- Wärmeleitfähigkeit
- Temperaturleitfähigkeit und
- Wärmekapazität

entscheidende Parameter für das Brandverhalten und den Feuerwiderstand dar. Im Folgenden werden die wichtigsten Baustoffeigenschaften der genannten Konstruktionsbaustoffe beschrieben und diskutiert ([9], S. 211).

#### 2.3.1.1 Rohdichte

Unter der Rohdichte  $\rho$  (Formel 2-12) versteht man das Verhältnis zwischen der Masse  $m$  in kg zum Volumen  $V$  in  $m^3$ , wobei sich das Volumen aus einem Werkstoffanteil  $V_0$  und einem Luft- und Kapillarporenanteil  $V_p$  in  $m^3$  zusammensetzt:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{V_0 + V_p} \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$$

**Formel 2-12:** Rohdichte

Die Rohdichte des Festbetons ist von der Dichte des Zuschlags und des Bindemittels, vom Wassergehalt, von der Verdichtung und dem vorhandenen

Porenraum abhängig. Bei Beton wird zwischen der Rohdichte, die sich im lufttrockenen Zustand einstellt, und der Trockenrohddichte, die man durch Trocknen bis zur Massekonstanz bei 105 °C erhält, unterschieden.

Die Frischbetonrohddichte ist höher als die Festbetonrohddichte, da sich mit der Zeit die Gleichgewichtsfeuchte einstellt, und dabei ein Teil des physikalisch gebundenen Wassers verdunstet. Es verdunstet in dieser Zeit ungefähr 5 Vol.-% des vorhandenen Wassers. Bei der Ermittlung der Trockenrohddichte, ist nach der Trocknung nur noch das chemisch und teilweise physikalisch gebundene Wasser vorhanden. Deshalb sind Trockenrohddichten in der Regel um 100 bis 150 kg/m<sup>3</sup> niedriger als die Frischbetonrohddichten [8].

Die Festbetonrohddichten von Normalbetonen liegen im lufttrockenen Zustand zwischen ungefähr 2000 kg/m<sup>3</sup> und 2600 kg/m<sup>3</sup> in Abhängigkeit von den verwendeten Zuschlägen, wobei Betone mit einer Rohddichte < 2000 kg/m<sup>3</sup> als Leichtbetone und Betone mit einer Rohddichte > 2600 kg/m<sup>3</sup> als Schwerbetone bezeichnet werden. In der Regel können bei Betonen mit quarzhaltigem Zuschlag mit Werten für die Rohddichte zwischen 2200 kg/m<sup>3</sup> und 2400 kg/m<sup>3</sup> gerechnet werden [10].

Bei Beanspruchungen unter erhöhten Temperaturen nimmt die Rohddichte hauptsächlich durch Feuchtigkeitsverlust zufolge der Verdampfung von Wasser ab.

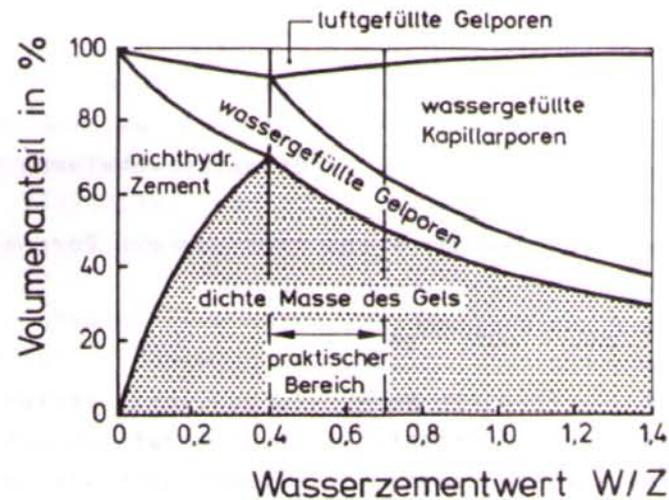
### **2.3.1.2 Porosität des Zementsteins**

Porenarten werden nach ihrer Größe unterschieden in:

- Gelporen mit mittleren Porengrößen bei 10<sup>-9</sup> m
- Kapillarporen mit mittleren Porengrößen bei 10<sup>-7</sup> bis 10<sup>-8</sup> m und
- Luft- und Verdichtungsporen mit mittleren Porengrößen im Millimeterbereich [11].

In Abbildung 2-8 wird die Verteilung der Volumina der Poren und der Gelfestmasse bezogen auf das Gesamtvolumen dargestellt. Aus der Abbildung 2-8 ist ersichtlich, dass sich im praktischen Bereich des Wasserzementwertes von

$W/Z = 0,40$  bis  $W/Z = 0,70$  der Anteil der luftgefüllten und wassergefüllten Gelporen nur leicht verringert, im Gegensatz zu dem Kapillarporenraum, der sich mit Zunahme des Wasserzementwertes schnell vergrößert.



**Abbildung 2-8:** Volumetrische Anteile in vollständig hydratisiertem Zementstein in Abhängigkeit vom Wasserzementwert [11]

Anhand Abbildung 2-8 ist eindeutig erkennbar, dass der Anteil an wassergefüllten Kapillarporen mit höherem Wasserzementwert steigt und der Anteil der wassergefüllten Gelporenwasser relativ konstant bleibt.

### 2.3.1.3 Wassergehalt von Beton bei hohen Temperaturen

In Beton kann der vorhandene Wassergehalt in einen freien, nicht gebundenen Anteil in den Kapillarporen, in einen physikalisch gebundenen Anteil in den Gelporen und in einen chemisch gebundenen Anteil in den Hydratationsprodukten unterschieden werden.

Wie bereits in Abschnitt 2.2.3.2 beschrieben, ist der Wassergehalt von Beton stark von äußeren Einflüssen, besonders der relativen Luftfeuchtigkeit geprägt. Im Nachfolgenden wird das Entwässerungsverhalten von Beton in Abhängigkeit von der Temperatur beschrieben, sowie in der Tabelle 2-1 zusammengefasst.

Das Entwässerungsverhalten von Beton bei hohen Temperaturen ist von der Dauer der Temperaturbeaufschlagung abhängig, wobei man zwischen

verdampfbarem und nicht verdampfbarem Wasser unterscheidet. Zum verdampfbaren Wasser zählen das im Beton befindliche freie Wasser und ein Teil des physikalisch gebundenen Wassers, zum nicht verdampfbaren Wasser das chemisch gebundene und der verbleibende Teil des physikalisch gebundenen Wassers. Diese Anteile sind keine festen Größen. Je höher die Temperatur ist, und je länger der Beton erhöhter Temperatur ausgesetzt ist, desto größer wird der Anteil des verdampfbaren Wassers, und umso geringer wird der Anteil des chemisch gebundenen Restwassers (siehe Abschnitt 3.1.1.3).

Bei einer längeren Einwirkung von extrem hohen Temperaturen kommt es zu Umwandlungen einzelner Hydratphasen und zu einer Abgabe des chemisch gebundenen Wassers. Die verbleibende Restwassermenge entspricht nach einer Temperaturbeaufschlagung von über 500 °C ungefähr 10 % des ursprünglichen chemisch gebundenen Wassers.

Der anfängliche Gewichtsverlust bis 100 °C ist hauptsächlich zum Verdampfen des physikalisch gebundenen Wassers aus den Grobporen zuzuordnen. Ab 100 °C verdampft gebundenes Porenwassers durch den dabei entstandenen erhöhten Dampfdruck. Dabei wird zwischen 70 °C und 110 °C das im Beton enthaltene Ettringit und zwischen 90 °C und 160 °C der vorhandene Gips zersetzt.

Ab einer Temperatur von 200 °C wird nun vor allem Wasser aus den feineren Poren freigesetzt, dabei wird chemisch gebundenes Wasser ausgetrieben. Der Einfluss des anfänglichen Wassergehaltes macht sich bis zu Temperaturen bei ungefähr 250 °C bis 300 °C bemerkbar. Durch das ausdampfende Wasser und des Strömungswiderstands des Materials wird im Inneren der Probe ein hoher Dampfdruck erzeugt, der im Temperaturbereich von 100 °C bis 400 °C abnimmt.

Zwischen Temperaturen von 450 °C und 550 °C kommt es zu einer weiteren Zersetzung elementarer Hydratationsprodukte, nämlich der nicht karbonatisierten Portlanditeile, mit einem damit verbundenem verstärkten Gewichtsverlust. Bei einer Temperatur von 573 °C kommt es zu einer Kristallumwandlung von Quarz. Bis zu einer Temperatur von 700 °C kommt es zu einer Zersetzung der CSH (Calciumsilicathydrat) – Phasen, wobei endgültig Wasser abgegeben wird ([12]; [13]).

Die Tabelle 2-1 zeigt die Umwandlungs- und Zersetzungsreaktionen von Beton in Abhängigkeit vom Temperaturbereich.

**Tabelle 2-1:** Umwandlungs- und Zersetzungsreaktion von Beton ([14] S. 316)

Temperaturbereich [°C]	Umwandlungs- oder Zersetzungsreaktion
30 – 120	Verdunstung bzw. Verdampfung von freiem und physikalisch gebundenem Wasser
100 – 300	Gelabbau, Dehydrationsbeginn
250 – 600	Abgabe des chemisch gebundenen Wassers
450 – 550	Zersetzung von Portlandit $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$
573	Nur bei Quarz: Quarzumwandlung $\beta \rightarrow \alpha \text{SiO}_2$
600 – 700	Beginn der Zersetzung der CSH-Phasen; Bildung von $\beta\text{-C}_2\text{S}$
600 – 900	Nur bei Kalkstein: Entsäuerung $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
1.200 – 1.300	Beginn des Schmelzens von Zementstein
$\geq 1.400$	Zementstein liegt als Schmelze vor

#### 2.3.1.4 Wärmeleitfähigkeit von Beton bei hohen Temperaturen

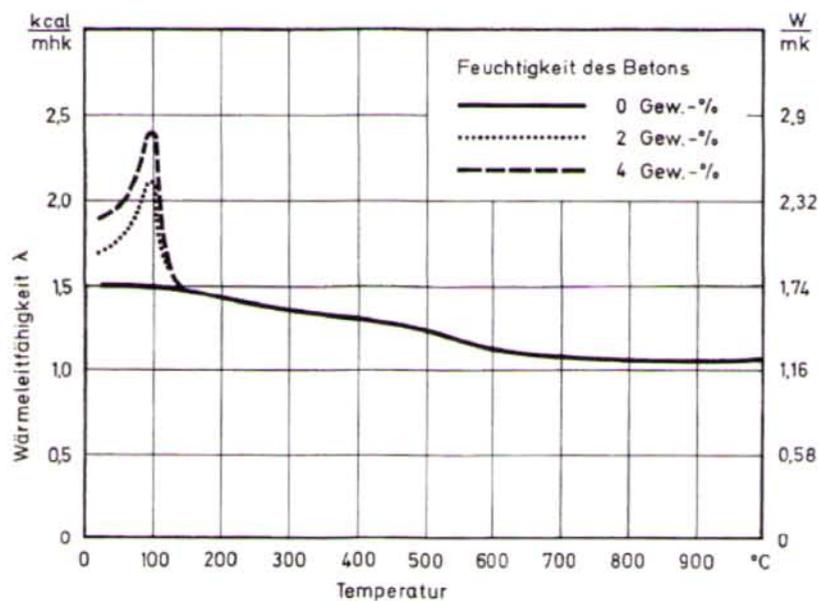
Die Wärmeleitfähigkeit von Beton ist von folgenden Parametern abhängig:

- Porengehalt und Porenart
- Rohdichte
- Wärmeleitfähigkeit der Gesteinskörnung
- Feuchtegehalt des Betons
- Temperatur.

Durch Luftporen bzw. durch ein poriges Gefüge wird der Wert der Wärmeleitfähigkeit gesenkt, dabei wirken kleinere fein verteilte Poren günstiger als grobe Poren. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt mit abnehmender Betonrohddichte ab, mit steigender Trockenrohddichte zu und mit steigendem Feuchtegehalt des Betons zu.

Da der Zuschlag volumenanteilig den Hauptbestandteil von Beton ausmacht, übt dieser einen wesentlichen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit aus. Kristalline Körner leiten die Wärme besser als solche mit amorpher oder glasiger Struktur.

Quarz besitzt innerhalb der gesteinsbildenden Mineralien die höchste Wärmeleitfähigkeit mit Werten zwischen  $6,0 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  und  $10,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  ([15], S. 174).



**Abbildung 2-9:** Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton mit quarzhaltigem Zuschlag ([16], S. 132)

In Abbildung 2-9 sieht man den Einfluss der Betonfeuchtigkeit auf die Wärmeleitfähigkeit bei Normalbeton mit quarzhaltigen Zuschlägen unter hohen Temperaturen nach *SCHNEIDER*. Es zeigt deutlich, dass der Einfluss der Feuchtigkeit des Betons sich bis zu Temperaturen von ungefähr  $140 \text{ °C}$  auswirkt.

Ab einer Temperatur um  $150 \text{ °C}$  verläuft die Wärmeleitfähigkeit annähernd linear.

Als Rechenwert für die Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton mit quarzhaltigen Zuschlägen kann  $\lambda$  mit  $1,6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$  angenommen werden.

### 2.3.2 Eigenschaften von Beton nach Eurocode 2

Im folgenden Abschnitt werden die thermischen und physikalischen Eigenschaften von Beton mit quarzhaltigen Zuschlägen, wie die spezifische Wärmekapazität  $c_p(\theta)$ , die Rohdichte  $\rho(\theta)$  und die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_c$ , nach dem *Eurocode 2*, Teil 1 - 2, der EN 1992-1-2 betrachtet.

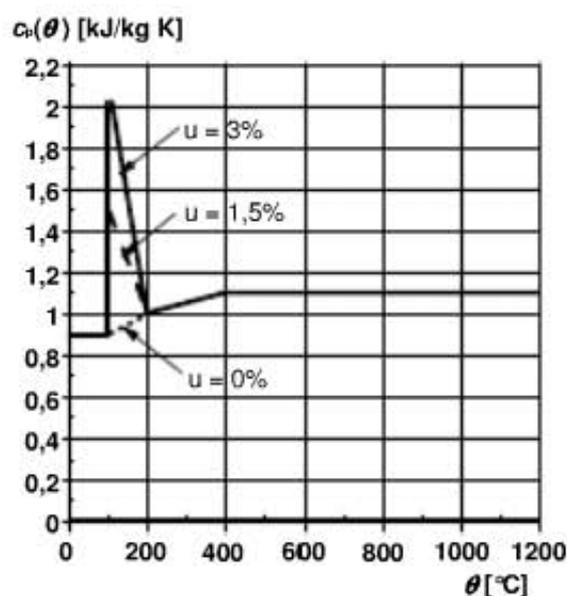
#### 2.3.2.1 Spezifische Wärmekapazität nach EN 1992-1-2

Die spezifische Wärmekapazität  $c_p(\theta)$  von trockenem Beton kann folgendermaßen bestimmt werden:

$c_p(\theta) = 900 \text{ [J/(kg}\cdot\text{K)]}$	für $20 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 100 \text{ }^\circ\text{C}$
$c_p(\theta) = 900 + (\theta - 100) \text{ [J/(kg}\cdot\text{K)]}$	für $100 \text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 200 \text{ }^\circ\text{C}$
$c_p(\theta) = 1000 + (\theta - 200)/2 \text{ [J/(kg}\cdot\text{K)]}$	für $200 \text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 400 \text{ }^\circ\text{C}$
$c_p(\theta) = 1100 \text{ [J/(kg}\cdot\text{K)]}$	für $400 \text{ }^\circ\text{C} < \theta \leq 1200 \text{ }^\circ\text{C}$

Für Betone mit quarzhaltigen Zuschlägen darf nach EN 1992-1-2 für die spezifische Wärmekapazität oben angegebene Funktion durch folgende, zwischen  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $115 \text{ }^\circ\text{C}$  liegende, konstante Werte  $c_{p,\text{peak}} = 900 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$  für eine Feuchtigkeit von  $u = 0 \text{ M.-%}$ ,  $c_{p,\text{peak}} = 1470 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$  für eine Feuchtigkeit von  $u = 1,5 \text{ M.-%}$  und  $c_{p,\text{peak}} = 2020 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$  für eine Feuchtigkeit von  $u = 3,0 \text{ M.-%}$  und einer linearen Beziehung zwischen  $115 \text{ }^\circ\text{C}$  mit  $c_{p,\text{peak}}$  und  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  mit  $c_p = 1000 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$  ergänzt werden. Werte für andere Feuchtigkeitsgehalte dürfen linear interpoliert werden.

In der folgenden Abbildung 2-10 sind diese Spitzenwerte zwischen  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $115 \text{ }^\circ\text{C}$  für die jeweilige Feuchtigkeit  $u$  dargestellt.



**Abbildung 2-10:** Spezifische Wärmekapazität nach ÖNORM EN 1992-1-2

### 2.3.2.2 Rohdichte von Beton nach EN 1992-1-2

Die Rohdichte  $\rho(\theta)$  wird bei erhöhter Temperatur, siehe Abschnitt 2.3.1, durch das Verdampfen von gebundenem Wasser beeinflusst. Sie wird für einen Beton mit quarzhaltigem Zuschlag nach EN 1992-1-2 folgendermaßen bestimmt:

$$\rho(\theta) = \rho(20\text{ °C}) \quad \text{für } 20\text{ °C} \leq \theta \leq 115\text{ °C}$$

$$\rho(\theta) = \rho(20\text{ °C}) \cdot (1 - 0,02 \cdot (\theta - 115) / 85) \quad \text{für } 115\text{ °C} < \theta \leq 200\text{ °C}$$

$$\rho(\theta) = \rho(20\text{ °C}) \cdot (0,98 - 0,03 \cdot (\theta - 200) / 200) \quad \text{für } 200\text{ °C} < \theta \leq 400\text{ °C}$$

$$\rho(\theta) = \rho(20\text{ °C}) \cdot (0,95 - 0,07 \cdot (\theta - 400) / 800) \quad \text{für } 400\text{ °C} < \theta \leq 1200\text{ °C}$$

Diese angegebene Funktion für die Rohdichte  $\rho(\theta)$  verläuft zwischen den definierten Temperaturbereichen linear. Im Temperaturbereich zwischen 115 °C und 200 °C fällt die Funktion der Rohdichte mit steigender Temperatur steil ab, wobei das Gefälle der Funktion jeweils von 200 °C bis 400 °C und von 400 °C bis 1200 °C flacher wird.

### 2.3.2.3 Wärmeleitfähigkeit von Beton nach EN 1992-1-2

Nach der EN 1992-1-2 kann die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_c$  von Betonen mit quarzhaltigem Zuschlag zwischen einem definiertem unteren und einem definiertem oberen Grenzwert festgelegt werden, und wird in den Nationalen Anhängen geregelt.

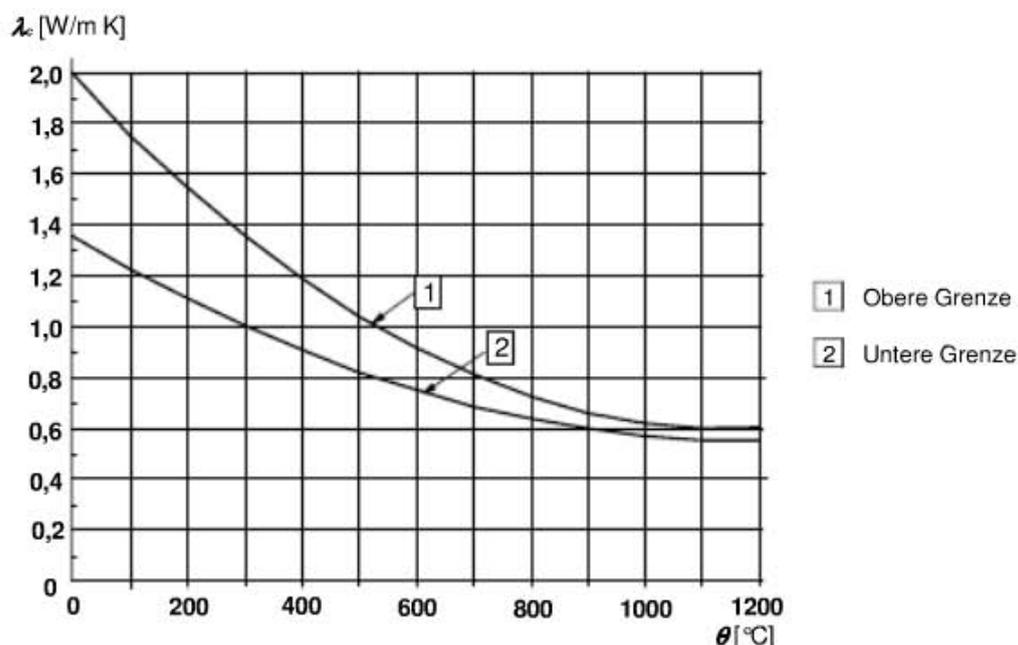
Der obere Grenzwert der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_c$  kann folgendermaßen für einen Temperaturbereich zwischen 20 °C und 1200 °C bestimmt werden:

$$\lambda_c = 2 - 0,2451 \cdot (\theta / 100) + 0,0107 \cdot (\theta / 100)^2 \quad \text{in W/(m} \cdot \text{K)}$$

und für den unteren Grenzwert kann die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_c$  folgendermaßen für einen Temperaturbereich zwischen 20 °C und 1200 °C angesetzt werden:

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136 \cdot (\theta / 100) + 0,0057 \cdot (\theta / 100)^2 \quad \text{in W/(m} \cdot \text{K)}.$$

In Abbildung 2-11 sind die Graphen für den oberen Grenzwert und den unteren Grenzwert der Wärmeleitfähigkeit dargestellt. Nach den nationalen Festlegungen zu ÖNORM EN 1992-1-2:2010 wird die thermische Leitfähigkeit für Beton mit quarzhaltigem Zuschlag mit dem unteren Grenzwert festgelegt.



**Abbildung 2-11:** Thermische Leitfähigkeit nach ÖNORM EN 1992-1-2

## 2.4 Brandmodelle

### 2.4.1 Verlauf von natürlichen Bränden

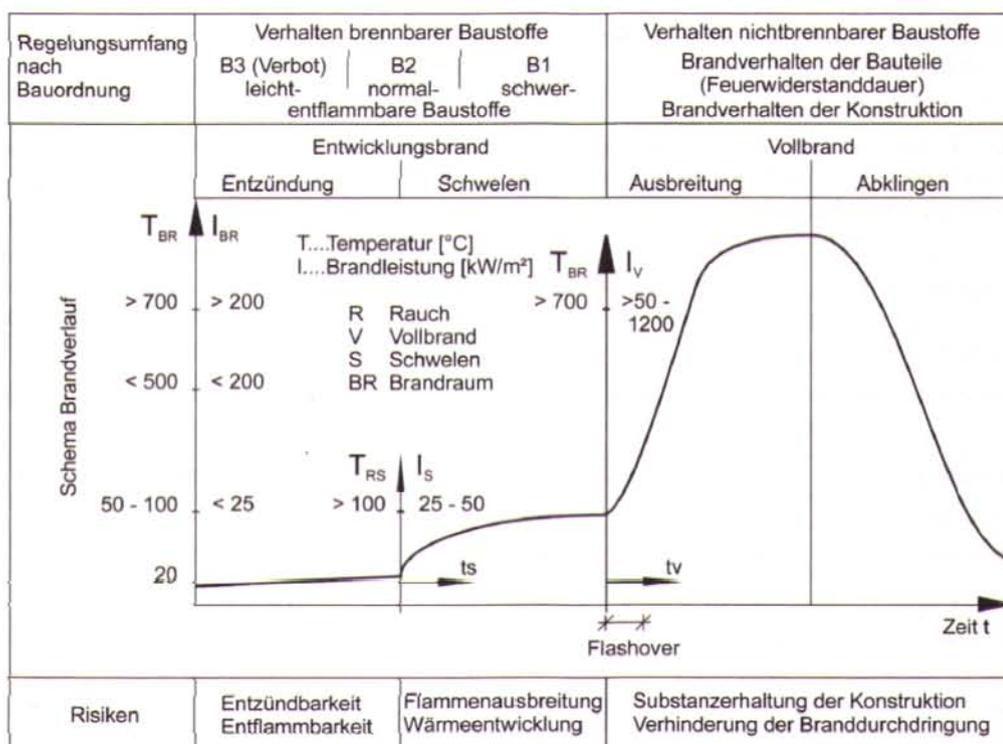
Da reale Brände nicht vorhersehbar sind, sind somit geplante messtechnische Analysen an solchen zur Datengewinnung nicht möglich. Um den Brandverlauf, die Brandausbreitung und eventuelle Brandfolgen untersuchen zu können, müssen Brandversuche und numerische Experimente herangezogen werden.

Der Verlauf eines Brandes, der in Abbildung 2-12 zu sehen ist, kann in mehrere Phasen unterteilt werden. In der ersten Phase, die als Zündphase bezeichnet wird, ist zunächst eine leichte Erwärmung festzustellen. In der darauffolgenden Phase, der sogenannten Schwelbrandphase, werden verstärkt Brandgase durch Pyrolyse gebildet. Diese Brandgase verbrennen unter Einwirkung von Luftsauerstoff und setzen Wärmeenergie frei. Mit der Freisetzung der Wärmeenergie werden die chemischen Reaktionen beschleunigt und führen so zu höheren Temperaturen bis sich Stoffe entzünden [17].

Die Schwelbrandphase kann wenige Minuten oder auch mehrere Stunden andauern und geht anschließend in einen voll entwickelten Brand über. Die Weiterentwicklung des Brandes bzw. das Ansteigen der Temperaturen kann wiederum wenige Minuten nach der Entzündung oder nach einigen Stunden erfolgen.

Bei Temperaturen von 500 bis 600 °C im Brandraum erfolgt eine schlagartige Brandausbreitung mit ungefähr 10,0 m/min, die als Flashover bezeichnet wird. In der Flashoverphase kommt es zu einer spontanen Entzündung der vorhandenen brennbaren Stoffe in Abhängigkeit der vorhandenen Temperatur und der thermischen Eigenschaften der Stoffe [18].

Nach dem Flashover steigen die Temperaturen nur noch mäßig an bis das Temperaturmaximum bei 1000 °C bis 1200 °C erreicht ist, und letztlich die Abkühlungsphase eingeleitet wird.



**Abbildung 2-12:** Brandphasen eines vollständigen Schadenfeuers ([18], S. 109)

Der Brandverlauf ist von zahlreichen Parametern abhängig, einige dieser Parameter werden im Folgenden genannt:

- Art und Menge der Brandlast
- Verteilung und Verteilungsdichte der Brandlast im Raum
- Geometrie des Brandraumes
- thermische Eigenschaften im Brandraum
- Zuluft- und Abluftöffnungen
- Löschmöglichkeiten und Löschmaßnahmen.

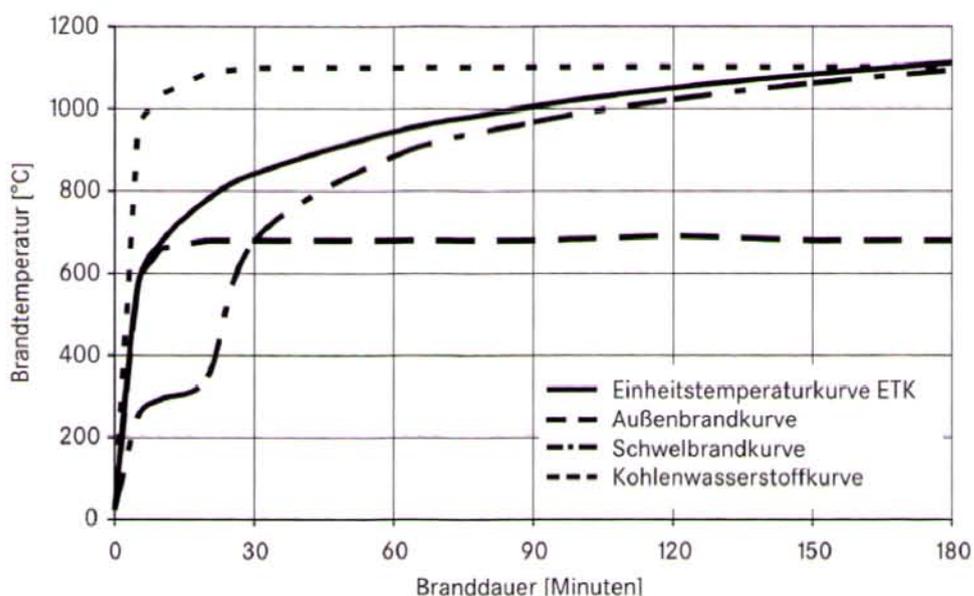
Das Bauteilverhalten im Brandfall wird durch die Feuerwiderstandsdauer gekennzeichnet. Die Feuerwiderstandsdauer ist die Zeit, während das Bauteil unter definierten Randbedingungen und Belastungen bestimmte Anforderungen erfüllen muss ([19], S. 31). Für die Beurteilung von Bauteilen im Brandfall werden Bemessungsbrände eingeführt, auf die im folgenden Abschnitt näher eingegangen wird.

## 2.4.2 Normbrandkurven und Design Fires

Design Fires sind Bemessungsbrände, die als Hilfsmittel und grober Ersatz für die Beurteilung von realen Schadensfeuern dienen. Bemessungsbrände sind definierte Brandverläufe, die von folgenden Parametern abhängig sind:

- Temperatur
- Zeit
- Energiefreisetzung
- Brandausbreitung und Brandgröße
- Produktion von toxischen Bestandteilen
- Rauchproduktion
- Zeit bis zum Erreichen bestimmter Schlüsselereignissen (z. B. Flashover)  
([20], S. 166).

Design Fires können verschiedene Brandphasen widerspiegeln, wie zum Beispiel den Brandverlauf ab dem Flashover, die auch für einen bestimmten Zeitraum festgelegt werden können. Solche Bemessungsbrände nennt man normierte Temperatur-Zeit-Kurven, die hauptsächlich in der Prüftechnik und der Tragwerksbemessung im Brandfall angewendet werden. In der unten abgebildeten Grafik (Abbildung 2-13) sind einige Beispiele von Design Fires dargestellt.



**Abbildung 2-13:** Normbrandkurven ([17], S. 54)

### 2.4.3 Einheits-Temperatur-Zeitkurve ETK

Die Einheits-Temperatur-Zeitkurve, kurz ETK, beschreibt den zeitabhängigen Temperaturverlauf im Prüfofen und wird normativ nach EN 1991-1-2 bzw. EN 1363-1 wie folgt geregelt (Formel 2-13):

$$T = 345 \cdot \log_{10} (8t + 1) + 20$$

T Ofentemperatur in °C  
t Zeit in min

**Formel 2-13:** Einheits-Temperatur-Zeitkurve ETK nach EN 1363-1

Zulässige Grenzabweichungen von der oben definierten ETK werden nach EN 1363-1 durch die prozentuale Abweichung  $d_e$  der Kurvenfläche der mittleren Ofentemperatur als Funktion der Zeit gegenüber der Kurvenfläche der Einheits-Temperaturzeitkurve definiert und folgendermaßen bestimmt (Formel 2-14):

$$d_e = \frac{A - A_s}{A_s} \cdot 100$$

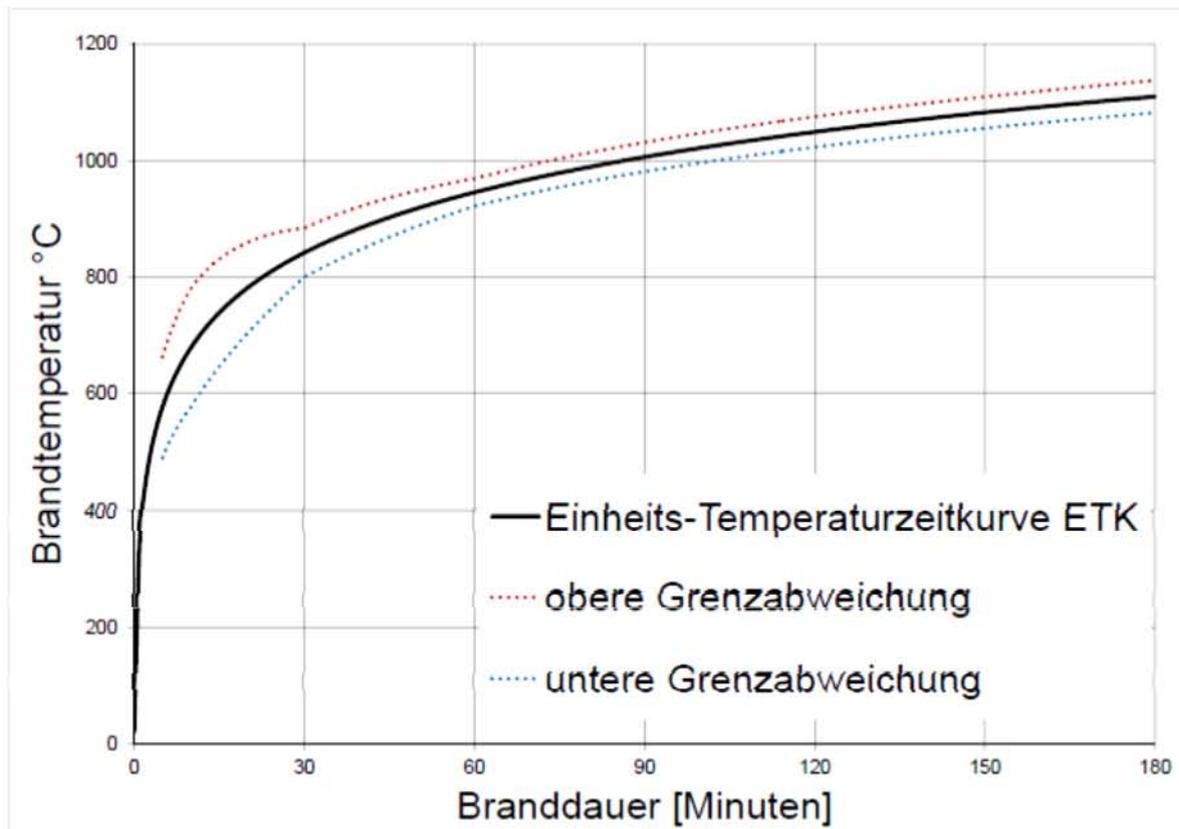
wobei  $d_e$  folgende Werte nicht überschreiten darf:

- |                                  |                        |
|----------------------------------|------------------------|
| a) 15 %                          | für $5 < t \leq 10$ ;  |
| b) $(15 - 0,5 \cdot (t-10))$ %   | für $10 < t \leq 30$ ; |
| c) $(15 - 0,083 \cdot (t-30))$ % | für $30 < t \leq 60$ ; |
| d) 2,5 %                         | für $t > 60$           |

$d_e$  prozentuale Abweichung  
A Fläche unterhalb der tatsächlichen Ofen-Temperaturzeitkurve  
 $A_s$  Fläche unterhalb der Einheits-Temperaturzeitkurve

**Formel 2-14:** Grenzabweichung zur ETK nach EN 1363-1

Der Verlauf der ETK spiegelt in idealisierter Form einen realen Brand beginnend vom Flashover wieder. Sie erfasst jedoch nicht die Abkühlphase, sondern steigt kontinuierlich an ([21], S. 81).



**Abbildung 2-14:** Einheits-Temperatur-Zeitkurve ETK nach EN 1363-1

### 3 Versuchsplanung und Vorversuche

Im folgenden Kapitel wird der praktische Teil dieser Arbeit dargestellt und beschrieben, welcher in eine Versuchsplanung und Versuchsdurchführung der Versuche zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit und in eine Versuchsplanung und Versuchsdurchführung von den durchzuführenden Brandversuchen unterteilt werden kann.

#### 3.1 Voruntersuchungen

##### 3.1.1 Betonzusammensetzung

In dieser Arbeit werden Normalbetone mit quarzhaltigen Zuschlägen ohne Zusatzmittel und ohne Zusatzstoffe untersucht. Im Nachfolgenden wird allgemein auf die Betonzusammensetzung der Prüfkörper eingegangen.

###### 3.1.1.1 Quarzzuschlag

Der für die Probekörper verwendete Zuschlag stammt aus den Quarzit-Sandwerken der *Feichtinger GmbH* in Gloggnitz.



**Abbildung 3-1:** Quarzit-Sandwerke *FEICHTINGER GmbH*

Der Bergbau Haßbach gehört zur Lagerstätte des sogenannten Semmering-Quarzits, wo der Quarzit als kristallines Gestein teilweise zerbrochen oder fallweise sogar als Sand zerrieben vorkommt. Im Waldgebiet zwischen Haßbach und Penk tritt Quarzit mit einem außergewöhnlich hohen Reinheitsgrad und einem  $\text{SiO}_2$  Anteil von 95% auf. Die Lagerstätten sind oberflächennah, an den Randzonen ist der Quarzit zu Sand zerrieben [23].

Der Abbau erfolgt im Tagbau in mehreren Etagen. Das abgebaute Material wird durch den gezielten Einsatz von vorhandenen stationären Sieblinien aufbereitet und je nach Erfordernissen mit einem Kegelmühle gebrochen oder mit einer Stabrohmühle fein vermahlen

Laut Hersteller besitzt der Zuschlag nach Ergebnissen einer chemischen Analyse folgende mineralogische Anteile [24]:

- $\text{SiO}_2$ : 90 - 97%
- $\text{Fe}_2\text{O}_3$ : 0,3 - 0,6%
- $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 2,0 – 3,5%
- $\text{CaO}$ : ca. 0,1 - 0,2%
- $\text{MgO}$ : ca. 0,15%

Organische Stoffe, Tonminerale, Nitrate oder Chloride kommen nur in vernachlässigbaren Mengen vor.

Für die Herstellung der Probekörper wird Quarzsand der Korngruppe 0/4 und Quarz-Riesel der Korngruppe 4/8 aus dem Quarzit-Sandwerk *Feichtinger* verwendet.

### 3.1.1.2 Kornzusammensetzung

Mit der Sieblinie lässt sich die Kornzusammensetzung des Zuschlages beschreiben und beurteilen. Wie in Abbildung 3-5 zu sehen ist, stellt die Abszisse die Siebweite als logarithmisches Maß für die Korngröße in Millimeter und die Ordinate den Durchgang durch das entsprechende Sieb in Prozent dar.

Es wird zwischen stetigen und unstetigen Sieblinien unterschieden. Bei Zuschlägen mit stetigen Sieblinien sind alle Korngruppen mit entsprechenden Anteilen vorhanden, sodass sich ein gleichmäßig gekrümmter Linienzug ergibt.

Von unstetigen Sieblinien spricht man, wenn eine Korngruppe oder auch mehrere Korngruppen überhaupt nicht oder nur in so geringen Mengen vorkommen, dass die Sieblinie parallel bzw. annähernd parallel zur Abszisse verläuft. Solche Kornzusammensetzungen werden auch Ausfallkörnungen genannt.

*FULLER* entwickelte eine *Idealsieblinie*, die eine größtmögliche Packungsdichte des Kornhaufwerkes, einen minimalen Zementleimbedarf, eine optimale Verarbeitbarkeit des Frischbetons und eine maximale Festigkeit aufweist ([8], S. 137). Die *Idealsieblinie* wird durch die *FULLER*-Kurve mit folgender Gleichung beschrieben (Formel 3-1):

$$A = 100 \cdot \left(\frac{d}{D}\right)^n \quad [\text{Vol.}\text{-}\%]$$

Wobei  $n = 0,5$  ist.

- A     prozentualer Siebdurchgang aller Feststoffe durch das Sieb mit der Siebweite  $d$
- d     Siebweite
- D     Größtkorndurchmesser in mm
- n     Exponent zur Beschreibung der Kornform

**Formel 3-1:** *FULLER*-Kurve

Die *FULLER*-Kurve verläuft annähernd wie eine quadratische Parabel, verändert man den Exponenten  $n$ , kann die größtmögliche Packungsdichte für diverse Kornformen erreicht werden. Somit wird für Zuschläge mit gerundeten Körnern der Exponent der *FULLER*-Kurve mit  $n \approx 0,4$  und für Zuschläge mit kantigen Körnern der Exponent mit  $n \approx 0,3$  angenommen.

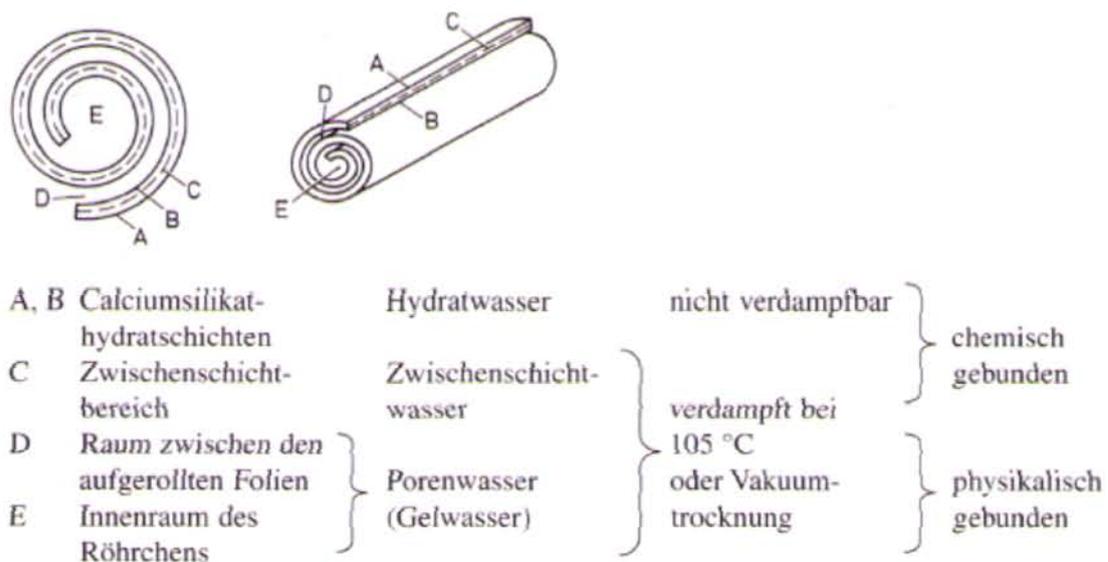
### 3.1.1.3 Bindemittel und Hydratation

Für die Herstellung der Probekörper wurde ein Portlandzement gemäß ÖNORM EN 197-1 verwendet.

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, das für den Beton notwendig ist, um die Körner des vorhandenen Zuschlages miteinander zu verkitten, wodurch der Beton seine Festigkeit erhält. Durch die Vermischung mit Luft und Wasser erfolgt im Beton eine Erhärtung des Zementleims, die auf Grund einer chemischen Reaktion

des Zements mit Wasser stattfindet. Dieser Vorgang wird auch Hydratation genannt. Bei der Hydratation wird Wasser in den Hydratationsprodukten, den Calciumsilikathydraten und im Calciumhydroxid, chemisch gebunden, bis sich das gesamte Zementkorn in Zementgel umgewandelt hat.

Das restliche Wasser im Beton befindet sich entweder als freies Wasser in den Zementsteinporen oder physikalisch gebunden als adsorptiv haftende Wassermoleküle an der Oberfläche der Hydratationsprodukte oder als chemisch gebundene Zwischenschichtwasser in den Calciumsilikathydraten, wie es in Abbildung 3-2 dargestellt ist.



**Abbildung 3-2:** Aufbau des Calciumsilikathydrats und Wasserbindung im Zementgel ([8], S. 28)

In vollständig hydratisiertem Portlandzement beträgt der bei Temperaturen von rund 1000 °C verdampfbare, chemisch gebundene Wassergehalt in der Regel ungefähr 25 Prozent seiner ursprünglichen Masse.

Als Portlandzement wird ein Zement bezeichnet, dessen einziger Hauptbestandteil gemahlener Portlandzementklinker ist und einen geringen Anteil an Calciumsulfat (Gips) aufweist. Der Gipszusatz ist notwendig um die sehr rasch reagierenden Erhärtungsprozesse des gemahlene Portlandzementklinkers bei Wasserzugabe zu verzögern.

Der verwendete Portlandzement von den Lafarge Zementwerken ist *DER CONTRAGRESS* ist gemäß EN 191-1 ein CEM I 42,5 N - SR 0 WT 27 C<sub>3</sub>A-frei. Ein Auszug aus den Produktangaben des Herstellers ist in der Tabelle 3-1 gegeben.

**Tabelle 3-1:** Auszug aus dem Datenblatt – CONTRAGRESS [25]

Eigenschaften gem. laufender Eigenüberwachung	Richtwerte
Dichte in kg/dm <sup>3</sup>	3,18
Druckfestigkeit (bei 20° C) in MPa (=N/mm <sup>2</sup> )	
1 Tag	12
2 Tage	24
7 Tage	-
28 Tage	56
Biegezugfestigkeit (bei 20° C) 28 Tage in MPa	-
Mahlfeinheit (Blainewert) in cm <sup>2</sup> /g	3.800
Erstarrungsbeginn (bei 20° C) in min	220
Bluten in cm <sup>3</sup> nach 120 min	4
Wärmeentwicklung in J/g Zement nach 15 h	190
Sulfatbeständigkeit bzw. C <sub>3</sub> A-frei	0%

#### 3.1.1.4 Wasser-Bindemittel-Wert

Wie in Abbildung 2-8 zu sehen ist, ist die Porosität und Porenverteilung des Betons sehr stark vom Wasser-Bindemittel-Wert abhängig. Ein Beton mit geringerer Porosität weist nicht nur eine höhere Dichtigkeit, sondern auch eine höhere Festigkeit auf. Eine hohe Dichtigkeit ist besonders für die Widerstandsfähigkeit gegen chemische Angriffe und mechanische Beanspruchungen wünschenswert.

Der Wasser-Bindemittel-Wert muss so niedrig gewählt werden, dass der Beton die gewünschte Festigkeit und Dauerhaftigkeit erreicht. Der Zementgehalt ist vom

Wasser-Bindemittel-Wert und dem vom Zuschlag bestimmten Wassergehalt im Zementleim abhängig ([8], S.153).

Eine vollständige Hydratation ist bei einem Wasser-Bindemittel-Wert zwischen 0,5 und 0,6 gegeben.

### 3.1.2 Ausgleichsfeuchtigkeit der Versuchskörper

Ziel dieser Arbeit ist eine experimentelle Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton mit quarzhaltigen Zuschlägen bei unterschiedlichen Ausgleichsfeuchten. Da bereits Literaturwerte für die Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton mit quarzhaltigen Zuschlägen bei unterschiedlichen Ausgleichsfeuchten (siehe Abbildung 2-9) aus experimentellen Versuchen nach SCHNEIDER [22] existieren, wurden die zu untersuchenden Ausgleichsfeuchten an diese angelehnt.

Somit ergaben sich die ungefähren Vorgaben zu den Ausgleichsfeuchten mit  $u_1 = 0$  M.-%,  $u_2 = 2,0$  M.-% und  $u_3 = 4,0$  M.-%. In dieser Arbeit wird von *darrtrockenen*, *lufttrockenen* und *feuchten* Probekörpern gesprochen.

Um die *darrtrockenen* Probekörper mit einem Feuchtegehalt von  $u_1 = 0$  M.-% zu erhalten, wurden die Probekörper in einem Trockenofen bei 105°C bis zur Massekonstanz (siehe Abschnitt 2.2.2) getrocknet.

Für die *lufttrockenen* und *feuchten* Probekörper, die eine Gleichgewichtsfeuchte von  $u_2 = 2,0$  M.-% und  $u_3 = 4,0$  M.-% einstellen sollten, wurden die Sorptionsisothermen für Beton (siehe Abbildung 2-6 und Abbildung 2-7) herangezogen. Anhand dieser Sorptionsisothermen stellt sich eine Ausgleichsfeuchtigkeit von  $u_2 = 2,0$  M.-% bei einer relativen Feuchtigkeit von ungefähr 50 % ein und bei einer relativen Feuchtigkeit von ungefähr 93 % eine Ausgleichsfeuchtigkeit von  $u_3 = 4,0$  M.-%.

## 3.2 Versuchsplanung

### 3.2.1 Methoden zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit

Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit von Stoffen sind zahlreiche Methoden und Verfahren vorhanden. Grob unterscheidet man zwischen stationären und instationären Verfahren.

Bei den stationären Verfahren werden zwei gegenüberliegende Oberflächen einer Probe auf unterschiedliche Temperaturen  $T_1$  und  $T_2$  gebracht. Nach Erreichen des stationären Zustandes bildet sich ein eindimensionales Temperaturfeld im Messbereich der Probe. Aus dem Wärmestrom  $Q$  durch den Messbereich der Temperaturdifferenz zwischen den Probenoberflächen und der Probengeometrie kann die Wärmeleitfähigkeit ermittelt werden [26]. Zu den stationären Verfahren zählen Plattenverfahren, Zylinderverfahren und Rohrverfahren.

Instationäre Verfahren weisen gegenüber stationären Verfahren kürzere Messzeiten und einfachere Messanordnungen auf. Aufgrund des sehr geringen Temperaturanstieges während der Messung kann die gemessene Wärmeleitfähigkeit mit guter Genauigkeit direkt einem Temperaturwert zugeordnet werden [26]. Es ist jedoch der mathematische Aufwand beim instationären Verfahren wesentlich größer als bei stationären Verfahren.

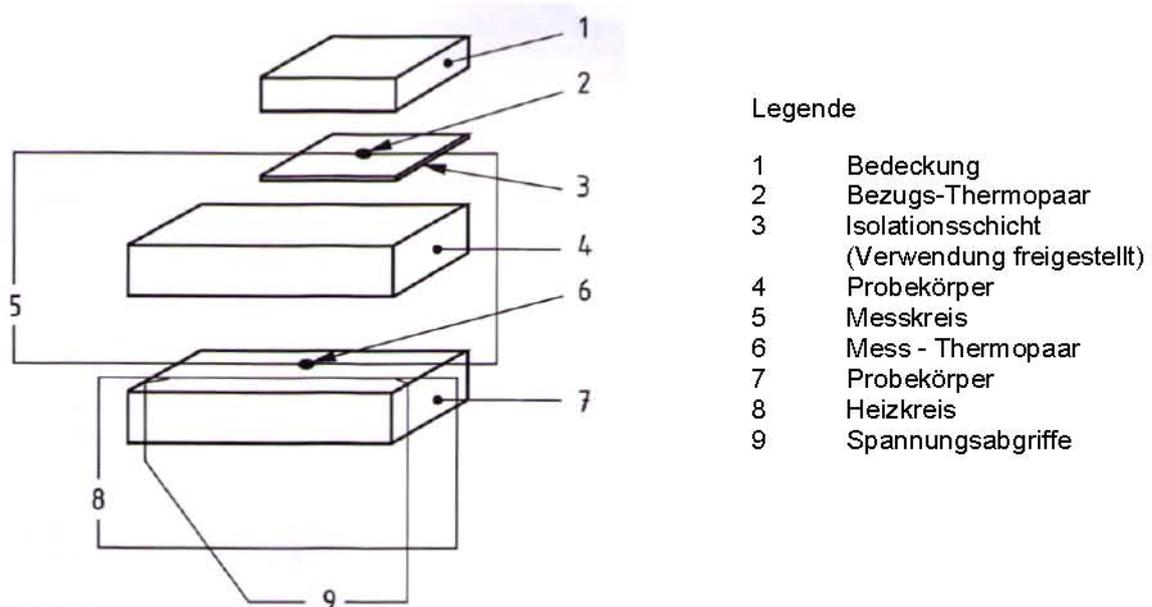
Die gängigste instationäre Methode ist das Heißdrahtverfahren (*engl.* Transient-Hot-Wire, THW), welches für gasförmige, flüssige und feste Materialien eingesetzt werden kann. Zu den Heißdrahtverfahren zählen das Kreuzdrahtverfahren, für Wärmeleitfähigkeiten kleiner als  $1,5 \text{ W / (m}\cdot\text{K)}$ , das Paralleldrahtverfahren für Wärmeleitfähigkeiten kleiner als  $25 \text{ W / (m}\cdot\text{K)}$  und die Heizdraht - Widerstandstechnik.

### 3.2.2 Parallel - Heißdrahtverfahren

Das Parallel-Heißdrahtverfahren ist ein instationäres Verfahren, das auf der Ermittlung des Temperaturanstieges in einem Probekörper als Funktion der Zeit beruht. Dabei wird der Temperaturanstieg an einer bestimmten Stelle des Probekörpers und in einem bestimmten Abstand zu einer linearen Wärmequelle (Heißdraht), die sich zwischen zwei Probekörpern befindet, gemessen und untersucht.

Generell werden die Probekörper in einem Ofen bis zu einer festgelegten Temperatur erwärmt, und diese Temperatur konstant gehalten. Durch Einleitung von elektrischem Strom wird der Heißdraht zusätzlich erwärmt und es erfolgt ein weiteres Aufheizen der Probekörper. In einem normativ definierten Abstand zum Heißdraht befindet sich ein Thermopaar, welches parallel zum Heißdraht verläuft und den durch den Heißdraht verursachten Temperaturanstieg misst.

Der Temperaturanstieg als eine Funktion der Zeit ist ein Maß für die Wärmeleitfähigkeit des Werkstoffes [ÖNORM EN 993-15]. In der Abbildung 3-3 ist der generelle Aufbau der Prüfanordnung und des Heiz- und Messkreises dargestellt.



**Abbildung 3-3:** Lage des Heiz- und Messkreises (Differential-Thermopaar-Kreis)

[ÖNORM EN 993-15]

### **3.2.2.1 Erforderliche Prüfgeräte gemäß EN 993-15**

#### ***Prüföfen***

Der Prüföfen soll elektrisch beheizt sein und muss Prüfanordnungen bis auf eine Temperatur von 1250°C bringen können. Die Temperatur darf an zwei beliebigen Punkten des Bereiches der Probekörperanordnung nicht um mehr als 10K abweichen. Die gemessene Ofentemperatur an der Außenseite der Prüfanordnung darf während der Prüfdauer (ungefähr 15 min) nicht um mehr als  $\pm 0,5$  K schwanken und muss eine Genauigkeit von  $\pm 10$  K aufweisen.

#### ***Heißdraht***

Die Länge des Heißdrahts muss mindestens die Länge der Proben aufweisen. Die Länge zwischen den Spannungsabgriffen beträgt 200 mm und soll eine Genauigkeit von  $\pm 0,5$  mm aufweisen. Die Enden des Heißdrahtes sind mit einer Spannungsquelle und die Spannungsabgriffe mit einem Digital-Multimeter verbunden.

#### ***Spannungsquelle***

Vorzugsweise soll die Spannungsquelle stabilisierte Wechselspannung liefern. Die Spannung darf während der Prüfdauer nicht um mehr als 2% schwanken.

#### ***Differential-Thermopaar***

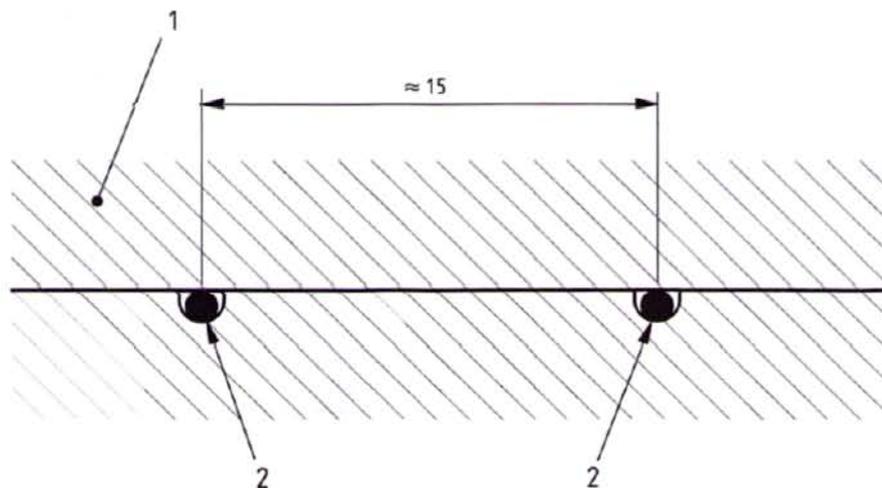
Das Differential-Thermopaar besteht aus einem Mess-Thermopaar und einem gegenüberliegenden Bezugs-Thermopaar (siehe Abbildung 3-3). Das Mess-Thermopaar befindet sich zwischen den Probekörpern und muss in einem Abstand von 15 mm mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  mm parallel zum Heißdraht verlaufen. Das Bezugs-Thermopaar liegt stabil zwischen der oberen Außenfläche des oben gelegenen Probekörpers und einer Bedeckung aus demselben Werkstoff wie dem des Probekörpers, wobei eine Isolationsschicht eingelegt werden kann.

### 3.2.2.2 Probekörper für das Parallel-Heizdrahtverfahren

Jede Prüfanordnung besteht aus zwei identischen Probekörpern mit den Abmessungen von mindestens 200 mm x 100 mm x 50 mm.

Die Oberflächen zwischen zwei Probekörpern an der Kontaktseite müssen so beschaffen sein, dass eine Oberflächenebenheit mit einer Abweichung von höchstens 0,2 mm zwischen zwei maximal 100 mm entfernten Punkten gegeben ist.

Bei dichten Werkstoffen sind Einkerbungen nur in der unteren Fläche oder sowohl in der unteren als auch in der oberen Fläche der Prüfanordnung erforderlich. Diese Einkerbungen müssen in einem Abstand von 15 mm mit einer Genauigkeit von  $\pm 1$  mm parallel verlaufen, und dienen zur Aufnahme und zur Stabilisierung der Lage des Heizdrahtes und des Thermopaars. Die Breite und die Tiefe der Einkerbungen sind entsprechend der Abmessungen des Heizdrahtes und der Thermoelemente auszuführen. In der Abbildung 3-4 ist die Anordnung der Kerben schematisch dargestellt.



**Abbildung 3-4:** Einbettung von Heizdraht und Thermopaar im Probekörper  
[ÖNORM EN 993-15]

Der Heizdraht und das Thermopaar sind zwischen die beiden Probekörper in die Einkerbungen zu legen. Der Heizdraht ist gegebenenfalls in die Einkerbungen einzukitten, wobei der Kitt aus feinzerkleinertem Probenwerkstoff mit einer kleinen Menge eines geeigneten Bindemittels zu mischen ist.

### ***Versuchsmatrix der Heizdrahtversuche***

Im Zuge der Vorrecherche wurde festgelegt, dass Parallel-Heißdrahtversuche an *darrtrockenen*, *lufttrockenen* und *feuchten* Probekörpern durchgeführt werden. Dabei werden von jeder Prüfserie (*darrtrocken*, *lufttrocken* oder *feucht*) Heißdrahtversuche bei Temperaturen von 90 °C, 100 °C, 110 °C, 125 °C, 200 °C, 400 °C und 600 °C durchgeführt.

Zur Vereinfachung wurde für die Bezeichnung der *darrtrockenen* Prüfserien "P0", abgeleitet von der Ausgleichsfeuchte, die 0 M.-% beträgt, für die Bezeichnung der *lufttrockenen* Prüfserien "P2", abgeleitet von einer zu erwartenden Ausgleichsfeuchte von ungefähr 2 M.-% und für die Bezeichnung der *feuchten* Prüfserien "P4", abgeleitet von einer zu erreichenden Ausgleichsfeuchte von ungefähr 4 M.-%, gewählt.

Von jeder "Feuchtigkeit" werden Heißdrahtversuche an jeweils zwei Prüfserien durchgeführt. Jede Prüfserie besteht aus 3 Probekörpern mit den Abmessungen 200 mm x 100 mm x 50 mm. Zusätzlich werden Probekörper für die Bestimmung der tatsächlichen Feuchtigkeit bzw. für eine eventuell zusätzlich erforderliche Prüfserie hergestellt, die mit "Z0", "Z2" und "Z4" bezeichnet werden.

Somit ergibt sich eine erforderliche Anzahl von 3 mal 3 Probekörpern je Feuchtigkeit und bei 3 unterschiedlichen Feuchten eine Gesamtanzahl von 27 Probekörpern.

Mit den Probekörpern für die Heizdrahtversuche werden gleichzeitig 3 Probewürfel für Druckversuche mit den Abmessungen 150 mm x 150 mm x 150 mm hergestellt, diese Prüfserie wird kurz mit "WD" für Würfeldruckversuch bezeichnet.

Eine Auflistung der einzelnen Prüfserien und der dazugehörigen Probekörper sowie eine Auflistung der zusätzlichen Probekörper sind in den Tabellen 3-2 und 3-3 gegeben.

**Tabelle 3-2:** Auflistung der Probekörper für die Heißdrahtversuche  
(Abmessungen 200x100x50 mm)

Bezeichnung der Prüferserie	Bezeichnung des Probekörpers	Feuchtegehalt
P0 - 1	P0-1-1	0 M.-%
	P0-1-2	
	P0-1-3	
P0 - 2	P0-2-1	
	P0-2-2	
	P0-2-3	
P2 - 1	P2-1-1	2 M.-%
	P2-1-2	
	P2-1-3	
P2 - 2	P2-2-1	
	P2-2-2	
	P2-2-3	
P4 - 1	P4-1-1	4 M.-%
	P4-1-2	
	P4-1-3	
P4 - 2	P4-2-1	
	P4-2-2	
	P4-2-3	

**Tabelle 3-3:** Auflistung der Zusatzprobekörper (Abmessungen 200x100x50 mm)

Bezeichnung der Zusatzserie	Bezeichnung des Probekörpers	Feuchtegehalt
Z0	Z0-1	0 M.-%
	Z0-2	
	Z0-3	
Z2	Z2-1	2 M.-%
	Z2-2	
	Z2-3	
Z4	Z4-1	4 M.-%
	Z4-2	
	Z4-3	
WD	WD-1	3 M.-%
	WD-2	
	WD-3	

### 3.2.3 Brandversuche

Das Ziel dieser Arbeit ist ein Vergleich von experimentell ermittelten Wärmeleitfähigkeiten von Normalbetonen mit quarzhaltigem Zuschlag zu den vorgeschlagenen Grenzwerten im *Eurocode 2*.

Dazu werden Ergebnisse aus realen Brandversuchen mit Probekörpern, die mit derselben Mischung hergestellt werden, die auch für die Probekörper der Heißdrahtversuche verwendet wird, mit den Ergebnissen aus simulierten Brandversuchen verglichen.

#### ***Versuchsmatrix der Brandversuche***

Es werden Brandversuche analog zu den Heizdrahtversuchen an *darrtrockenen*, *lufttrockenen* und *feuchten* Probekörpern durchgeführt werden. Ebenso wird für die Bezeichnung der *darrtrockenen* Prüfserien "BP0", für die Bezeichnung der *lufttrockenen* Prüfserien "BP2" und für die Bezeichnung der *feuchten* Prüfserien "BP4" gewählt, wobei die Kurzbezeichnung "BP" für Brandprobekörper steht.

Von jeder "Feuchtigkeit" werden jeweils zwei Brandversuche durchgeführt. Somit ergibt sich eine erforderliche Anzahl von 2 mal 3 Probekörpern und bei 3 unterschiedlichen Feuchten eine Gesamtanzahl von 6 Probekörpern. Die Abmessungen der Brandprobekörper betragen 300 mm x 250 mm x 100 mm. In Tabelle 5 ist eine Auflistung Brandprobekörper gegeben.

**Tabelle 3-4:** Auflistung der Brandprobekörper

Bezeichnung der Prüfserie	Bezeichnung des Probekörpers	Feuchtegehalt
BP0	BP0-1	0 M.-%
	BP0-2	
BP2	BP2-1	2 M.-%
	BP2-2	
BP4	BP4-1	4 M.-%
	BP4-2	

### 3.3 Vorversuche

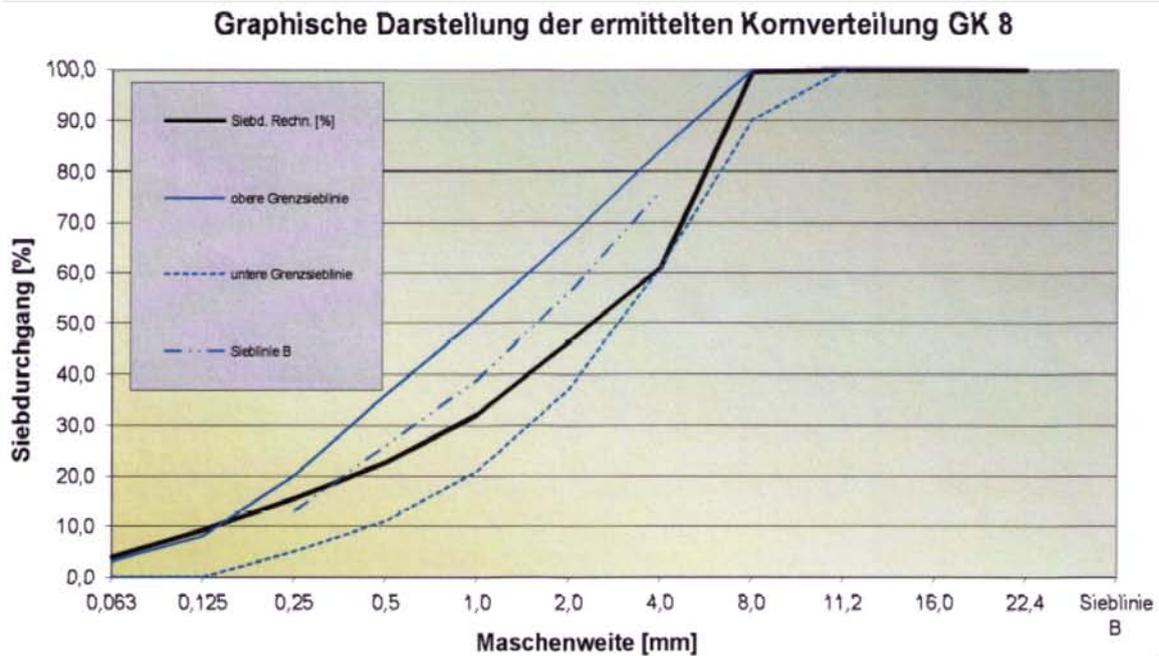
#### 3.3.1 Sieblinienanalyse

Im Zuge der Voruntersuchungen wurde mit dem aus den Quarzit-Sandwerken *Feichtinger* erworbenen Zuschlag eine Sieblinienanalyse mit Quarzsand der Korngruppe 0/4 und Quarzkantkorn der Korngruppe 4/8 durchgeführt. In der Tabelle 3-5 und der Abbildung 3-5 sind die Ergebnisse aus der Siebanalyse gemäß ÖNORM EN 933-1 dargestellt.

Die Einwaage für den Quarzsand der Korngruppe 0/4 beträgt 1453,4 g und für das Quarzkantkorn der Korngruppe 4/8 2490,6 g. Wie in der erhaltenen Sieblinie (siehe Abbildung 3-5) zu sehen ist, liegt die vorhandene Sieblinie zwischen der unteren Grenzsieblinie und der Regelsieblinie B. Solche Kornzusammensetzungen weisen in der Regel einen geringeren Wasseranspruch auf. Da sich die erhaltene Sieblinie eher im Bereich der unteren Grenzsieblinie befindet, kann von einem noch grobkornreichen Zuschlag gesprochen werden. Solche Zuschläge können eine schlechtere Verarbeitbarkeit zur Folge haben.

**Tabelle 3-5:** Ergebnisse aus der Sieblinienanalyse

Bezeichnung der Körnung:	0/1	0/4	4/8	8/11	8/16	4/16
Einwaage in [g]:	1,0	1453,4	2490,6	1,0	1,0	1,0
Siebmaschenweite [mm]	Summe der Siebrückstände in [g]					
63,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
45,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
16,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8,0	0,0	0,0	26,4	0,0	0,0	0,0
5,6	0,0	0,0				
4,0	0,0	19,4	2380,0	0,0	0,0	0,0
2,0	0,0	354,8	2434,7			0,0
1,0	0,0	673,2				
0,5	0,0	905,6				
0,25	0,0	1078,9				
0,125	0,0	1230,7				
0,063	0,0	1367,9	2466,8	0,0	0,0	0,0



**Abbildung 3-5:** Sieblinie des Quarzzuschlages der Betonmischung

### 3.3.2 Betonmischung

Die Rezeptur des projektierten Normalbetons ist mengenmäßig und anteilmäßig in der Tabelle 3-6 angeführt. Der Beton setzt sich aus folgenden Komponenten (vgl. Unterkapitel 3.1.1) zusammen:

- Quarzsand 0/4
- Quarzkantkorn 4/8
- Portlandzement CEM I, 42,5 N - SR 0 WT 27 C<sub>3</sub>A-frei
- Zugabewasser

Es wird für die Betonmischung ein Wasser-Bindemittel-Wert von  $W/B = 0,55$  gewählt.

**Tabelle 3-6:** Einwaagen der Betonmischung

Betonkomponente	Menge [kg]	Anteil [%]	Menge pro Mischung [kg]
Quarzzuschlag			
KK 0/4	1167,9	47,75	46,72
KK 4/8	758	30,99	30,32
Zuschlag gesamt	1925,9	78,74	77,04
Portlandzement			
CEM I 42,5 N	360	14,72	14,40
Zugabewasser	159,9	6,54	6,40
Gesamt	2445,8	100	97,83

### 3.3.3 Druckversuche

In einem Probestalter von 28 Tagen wurden Druckversuche an Probewürfeln, aus derselben Betonmischung wie die tatsächlichen Probekörper für die Heißdrahtversuche, durchgeführt. Für diese Prüfungen wurde eine servo-hydraulische Druckprüfmaschine der Firma *TONI TECHNIK / ZWICK ROELL* mit einer maximal möglichen Prüflast von 3000 kN (siehe Abbildung 3-6) angewendet.

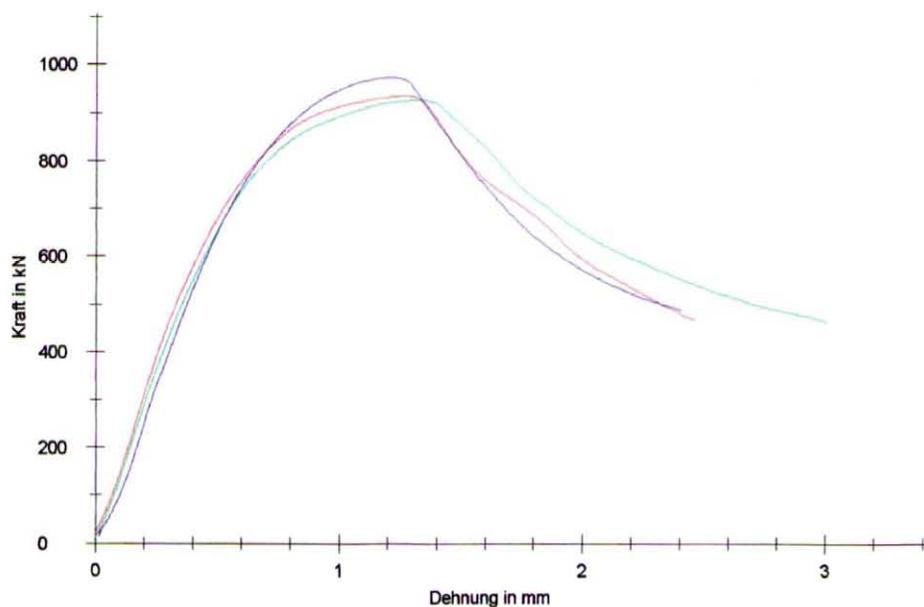
**Abbildung 3-6:** Prüfmaschine *TONI TECHNIK*

In der nachfolgenden Tabelle 3-7 sind die Ergebnisse aus den Versuchen gegeben.

**Tabelle 3-7:** Ergebnisse der Würfeldruckversuche

Nr	A mm <sup>2</sup>	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	F <sub>max</sub> kN	σ <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	S <sub>m</sub> mm
1	22530	150	151,4	932,81	41,40	0,00
2	22530	149,6	150,6	925,02	41,06	0,00
3	22935	150	152,9	972,06	42,38	0,00

Im unten dargestelltem Diagramm (Abbildung 3-7) erkennt man deutlich, dass sich ein Maximum der aufgebrachten Druckkraft bei allen drei Würfeln bei ungefähr 950 kN einstellt, die dabei auftretende Stauchung liegt bei ungefähr 1,5 Millimetern.



**Abbildung 3-7:** Kraft – Dehnungs – Diagramm der Würfeldruckversuche

Geprüft wurden die Probekörper WD-1, WD-2 und WD-3 mit Kantenlängen von 150 mm x 150 mm x 150 mm, der Mittelwert der ermittelten Druckfestigkeiten beträgt 41,61 N/mm<sup>2</sup>, mit einer Standardabweichung von 0,69 und einer Varianz von 1,65 (siehe Tabelle 3-8).

**Tabelle 3-8:** Statistik der Würfeldruckversuche

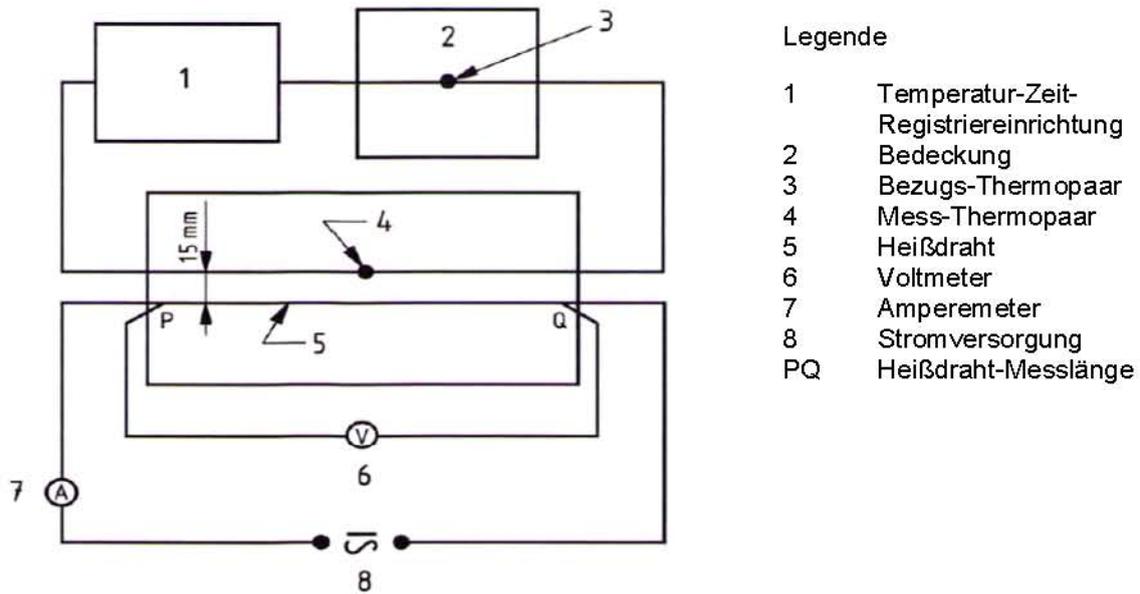
Serie n = 3	A mm <sup>2</sup>	Probendicke a0 mm	Probenbreite b0 mm	F <sub>max</sub> kN	σ <sub>m</sub> N/mm <sup>2</sup>	s <sub>m</sub> mm
$\bar{x}$	22665	149,9	151,6	943,30	41,61	0,00
s	234	0,2309	1,168	25,21	0,69	0,00
v	1,03	0,15	0,77	2,67	1,65	-

Gemäß EN 206-1 entspricht dieser Beton mit einer mittleren Würfeldruckfestigkeit von 41,61 N/mm<sup>2</sup> einer Druckfestigkeitsklasse C 30/37.

### 3.3.4 Vorversuche zum Parallel – Heißdrahtverfahren

Für diese Arbeit wurden Vorversuche zum Parallel-Heißdrahtverfahren in Anlehnung zu bereits bestehenden Vorarbeiten durchgeführt, um eine zielführende Versuchsanordnung, Kalibrierung und effektive Voreinstellung der Gerätschaften zu erlangen. Diese Vorversuche sind notwendig, um die Versuchsvorgänge zu automatisieren und um eventuell Unvorhersehbarem entgegen zu steuern.

Vor den eigentlichen Vorversuchen wurden einige "Trockenläufe" ohne tatsächlichen Probekörpern durchgeführt, um die Funktion der Versuchsanordnung zu testen. Eine schematische Darstellung der Messanordnung ist in Abbildung 3-8 abgebildet.



**Abbildung 3-8:** Einbettung von Heißdraht und Thermopaar im Probekörper  
[ÖNORM EN 993-15]

Im Zuge der Vorversuche wurden zwei Prüfserien aus jeweils drei Probekörpern, somit insgesamt 6 Probekörper, mit den Abmessungen 200 mm x 100 mm x 50 mm hergestellt.

Alle Probekörper wurden nach dem Ausschalen 7 Tage in einem Wasserbad gelagert und anschließend luftgetrocknet. Zwei der Probekörper wurden nach der Wasserbadlagerung mittels einer Steintrennmaschine mit jeweils zwei parallel, mittig verlaufenden Einkerbungen (siehe Abbildung 3-4) versehen. In einem dieser Probekörper wurde ein Heizdraht mit der entsprechenden Länge in eine der Einkerbungen verkittet, wobei der Kit ein Gemisch aus dem verwendeten Zement und Feinteilen des Quarzsandes ist.

Für die Vorversuche wurden die Probekörper in einem Trockenofen bei 105 °C bis zur Massekonstanz getrocknet, und in einem Kunststoffbehälter mit Silica Gel, der als Exsikkator dienen sollte, abgekühlt.

In den Vorversuchen wurden Heizdrahtversuche gemäß EN 993-15 an *darrtrockenen* Probekörpern bei Temperaturen von 90 °C, 200 °C und 400 °C durchgeführt, wobei eine Serie mit unverkittetem Heizdraht die Temperaturstufen 90 °C und 200 °C und die zweite Serie mit verkittetem Heizdraht 90 °C, 200 °C und 400 °C durchlief.

### 3.3.5 Brandvorversuche

Zufolge bereits vorhandener Ergebnisse von früheren Brandversuchen, bei welchen im Brandraum fallweise Temperaturdifferenzen von über 100 Kelvin auftraten, wurden Vorversuche gestartet, um die bestmöglichen Bedingungen für die Brandversuche zu erhalten, nämlich weitgehend konstante Temperaturen im Brandraum.

Zu diesem Zwecke wurden "Trockenbrandversuche", ohne Brandprobekörper, durchgeführt. Zunächst wurde an der Größe des Brandraumvolumens, den Abmessungen des Brandraumes und an der Positionierung und Regelung der Gasflamme gearbeitet, wobei verschiedene Druckregler zur Anwendung kamen.

Anschließend wurden Versuche für die Ermittlung der Lage und Positionierung der Probekörper durchgeführt, bis letztendlich im Brandraum Temperaturdifferenzen von maximal 20 Kelvin erzielt wurden.

In den Vorversuchen wurde ein *darrtrockener* Brandprobekörper mit den Abmessungen 300 mm x 250 mm x 100 mm geprüft. Für die Herstellung des Probekörpers wurde eine vorhandene Schalung aus früheren Brandversuchen verwendet, in welche bereits vor dem Betoniervorgang in den Tiefen 1 cm, 3 cm, 5 cm, 7 cm und 9 cm Thermoelemente zur Messung der jeweiligen Temperaturen im Betonkörper gespannt wurden.

Dieser Probekörper wurde 7 Tage in einem Wasserbad gelagert, in den Räumlichkeiten des Institutes luftgetrocknet und für den Vorversuch in einem Trockenofen bei 105 °C bis zur Massekonstanz getrocknet.

Der Vorversuchsprobekörper verblieb bis 24 Stunden vor dem Brandversuch im Trockenofen und kühlte in einem Kunststoffbehälter mit Silica Gel, der als Exsikkator dienen sollte, ab.

Der Brandvorversuch an einem *darrtrockenen* Brandprobekörper verlief reibungslos und es konnte im Brandraum eine Temperatur nach der Einheits-Temperatur-Zeitkurve, kurz ETK, in den zulässigen Grenzabweichungen erreicht werden.

### 3.3.6 Interpretation der Vorversuche

#### ***Erkenntnisse aus den Vorversuchen zum Heißdrahtverfahren***

Die Vorversuche ergaben, dass das Verkitten des Heizdrahtes keinen erkenntlichen Einfluss auf die Ergebnisse ausübte. Um eine sichere Aussage diesbezüglich treffen zu können, werden bei den Prüfserien der Hauptversuche jeweils eine Prüfserie mit verkittetem und eine Prüfserie mit unverkittetem Heizdraht durchgeführt.

Bei Versuchen bei den Temperaturstufen von 200 °C und 400 °C wurde festgestellt, dass trotz stundenlangem temperieren der Probe bei konstanter Temperatureingabe, der Prüfofen nicht in der Lage war die Bedingung, die Temperatur in der Probe 10 Minuten lang mit einer zulässigen Abweichung von 0,05 Kelvin konstant zu halten, nach EN 993-15 zu erfüllen.

Im Zuge der Vorversuchsplanung einigte man sich, bei Heißdrahtprüfungen bei Temperaturen ab 200 °C, auf die Anhebung der zulässigen Abweichung von 0,05 K auf 0,1 K innerhalb der letzten 10 Minuten vor der Heißdrahtprüfung, da für diese Arbeit kein alternativer Prüfofen zur Verfügung stand.

Ferner wurde festgestellt, dass die verwendeten Kupfer-Drähte der Versuchseinrichtung, trotz schützender Keramik-Ummantelung, nach längerer Temperaturbeaufschlagung, besonders bei Temperaturen über 400 °C ihre Funktionstüchtigkeit verlieren bzw. der Widerstand der Drähte sich derart erhöhte, sodass im Heizdraht keine gleichmäßige Spannung in den für die Versuche notwendigen Bereichen aufgebaut werden konnte.

Deshalb ist ein Austausch der Kupfer-Drähte nach jeder Beendigung einer Prüfserie erforderlich, um einen Spannungsabfall in der Messeinrichtung vorzubeugen.

Die Einstellungen für den Datenlogger und dessen Sensoren funktionierten einwandfrei und lückenlos.

### ***Erkenntnisse aus den Brandvorversuchen***

Die Vorversuche ergaben das optimalste Brandraumvolumen für die Abmessungen 250 mm x 440 mm x 560 mm (Breite x Höhe x Tiefe), wobei sich die Öffnung für die Gasflamme in einer ungefähren Höhe von 150 mm vom Brandraumboden befindet. Die Abluft wird über Abluftöffnungen, die sich bodennah am Ende des Brandraumes befinden, und über einen Schornstein zu der mechanischen Absauganlage geführt.

Sowohl der Brandraum als auch der Schornstein wurden aus feuerfesten Ziegeln errichtet, und an der Außenseite mit YTONG-Steinen verkleidet. Weitere Dämmmaßnahmen waren für die Prüfung des *darrtrockenen* Brandprobekörpers entsprechend der Einheits-Temperatur-Zeitkurve nicht erforderlich.

Für die Regelung der Gaszufuhr wurde ein Manometer, das bis 1,6 bar regelbar ist, verwendet. Um im Brandraum Temperaturen gemäß der Einheits-Temperatur-Zeitkurve zu erhalten, war in den ersten 5 Minuten ein Gasdruck von ungefähr 0,5 bar und in den weiteren 5 Minuten ein Gasdruck von ungefähr 0,8 bar notwendig. In den nächsten 30 Minuten (von Minute 10 bis Minute 40) war zur Erreichung der ETK ein maximaler Gasdruck von ungefähr 1,6 bar erforderlich.

Nachdem eine Temperatur von ungefähr 900 °C im Brandraum erreicht wurde, konnte der Gasdruck auf  $0,8 \text{ bar} \pm 0,1 \text{ bar}$  reduziert werden.

Die Einheits-Temperatur-Zeitkurve wurde ab Minute 15 bis Minute 35 leicht unterschritten, die Temperaturen lagen aber während des gesamten Vorversuches im Toleranzbereich.

Die Einstellungen für den Datenlogger funktionierten einwandfrei, und sowohl die Temperaturfühler im Brandraum als auch die einbetonierten Thermoelemente lieferten aussagekräftige Werte.

## 4 Versuchsdurchführung und Auswertung

### 4.1 Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit

Wie bereits in Kapitel 3, im Abschnitt 3.2.1 allgemein beschrieben, wurde zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit der Betonprobekörper das Parallel – Heißdrahtverfahren angewendet. In diesem Unterkapitel wird sowohl im Detail auf die Herstellung und Lagerung der Proben sowie auf die verwendete Prüfeinrichtung eingegangen, als auch die Versuchsdurchführung und die Auswertung beschrieben.

#### 4.1.1 Probenherstellung

Für die Herstellung der Proben wurden zunächst Schalungen angefertigt, wobei aus praktischen Gründen Schalungen für jeweils 3 Probekörper hergestellt wurden. Somit wurden insgesamt 9 Holzschalungen für jeweils 3 Probekörper mit den Abmessungen 200 mm x 100 mm x 50 mm angefertigt. Ein Beispiel solch einer Schalung ist in der Abbildung 4-1 abgebildet.



**Abbildung 4-1:** Schalung für drei Probekörper

Der Beton für die Probekörper wurde mit einem Zwangsmischer (Abbildung 4-2) gemischt. Die Anteile und Einwaagen für eine Mischung von 40 Liter Beton betragen:

- Quarzsand 0/4: 46,715 kg
- Quarzkantkorn 4/8: 30,319 kg
- Zement CEM I 42,5 N: 14,400 kg
- Wasser: 6,396 Liter

Zuerst wurde der Zuschlag, dann der Zement und das Wasser in den Mischer gefüllt. Der Mischvorgang war erst dann beendet, wenn keine Klumpen mehr vorhanden waren.



**Abbildung 4-2:** Zwangsmischer

### ***Frischbetonprüfungen***

Nach dem Mischen erfolgten einige Frischbetonprüfungen mit folgenden Ergebnissen:

- Ausbreitmaß  $\leq 340$  mm  $\rightarrow$  steife bzw. sehr steife Konsistenz
- Luftporengehalt 2,4 %

Anschließend wurde der Beton in die einzelnen Schalungen gefüllt. Während des Füllvorgangs der Schalungen, befanden sich diese auf einem Rütteltisch und wurden je nach Erfordernissen gerüttelt, um eine bestmögliche Verdichtung des Betons zu erreichen.

Die Betonprobekörper verblieben 24 Stunden in der Schalung und wurden gegen Austrocknen mit Folien bedeckt.

### ***Festbetonprüfung***

Wie bereits im Kapitel 3, Vorversuche, beschrieben, wurden Druckversuche zur Ermittlung der Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen durchgeführt. In der Abbildung 4-3 ist ein Probewürfel nach der Druckprüfung dargestellt.

Die Betonprobekörper entsprechen gemäß EN 206-1, mit einer mittleren Würfeldruckfestigkeit von  $41,61 \text{ N/mm}^2$ , einer Druckfestigkeitsklasse C 30/37.



**Abbildung 4-3:** Betonwürfel nach der Druckprüfung

#### 4.1.2 Probenvorbereitung und Probenlagerung

Nach dem Ausschalen wurden zunächst alle Probekörper 7 Tage lang in einem Wasserbad gleich gelagert. Ab dem 7. Tag variierte die Lagerung in Abhängigkeit von der gewünschten Ausgleichsfeuchtigkeit.

9 von insgesamt 27 Probekörpern (siehe Abschnitt 3.2.3, Tabellen 3-2 und 3-3) wurden mittels eines elektrischen Fliesenschneiders mit jeweils zwei parallelen Rillen, eine für den Heißdraht und eine für das Thermoelement (siehe Abbildung 4-4), versehen. In 3 von den 9 Probekörpern mit Einkerbungen wurde jeweils ein Heizdraht mit einer Länge von ungefähr 24 Zentimeter eingelegt und mit einem Kitt, aus Zement (CEM I 42,5 N), feinstem Quarzsand (Siebrückstand < 0,063 mm) und Wasser, in den Probekörper verklebt.



**Abbildung 4-4:** Probekörper für die Heißdrahtprüfung mit Einkerbungen

#### ***Lagerung der darrtrockenen Probekörper***

Die *darrtrockenen* Probekörper wurden nach 7 Tagen im Wasserbad zunächst bei Raumtemperaturen und einem relativ trockenem Klima luftgetrocknet. Ungefähr 4 Wochen vor der eigentlichen Parallel-Heißdraht-Prüfung wurden die Probekörper in einem Trockenofen bis zur Massekonstanz bei 105 °C getrocknet.

Die Probekörper verblieben bis ungefähr 24 Stunden vor der Heißdrahtprüfung im Trockenofen. Da die Probekörper im heißen Zustand nicht prüfbar sind, wurden diese zum Auskühlen am Vortag der Prüfung in einen Kunststoffbehälter mit Silica Gel gelegt, wobei der Behälter relativ luftdicht verschließbar sein sollte. Dazu wurde eine *Tupperware Box*, wie es in Abbildung 4-5 abgebildet ist, verwendet.



**Abbildung 4-5:** Probekörper im Exsikkator

#### ***Lagerung der lufttrockenen Probekörper***

Die Serien der *lufttrockenen* Probekörper wurden nach 7 Tagen im Wasserbad in einem beheizten Raum bei Temperaturen zwischen mindestens 19 °C und maximal 25 °C gelagert. In der Regel betrug die Raumtemperatur 21 °C und die relative Luftfeuchtigkeit ungefähr 50 %.

#### ***Lagerung der feuchten Probekörper***

Ein Drittel der 27 Probekörper verblieb nach 7 Tagen im Wasserbad weitere 21 Tage im Wasserbad. Nach 28 Tagen wurden diese Probekörper aus dem Wasserbad genommen und das an der Oberfläche haftende Wasser mit einem Tuch abgewischt. Anschließend wurden die Probekörper in einem Behälter über Wasser und bei einer Luftfeuchtigkeit von ungefähr 90 % bis zur Heißdrahtprüfung gelagert. Dabei wurde ein Kunststoffbehälter ungefähr 5 cm hoch mit Wasser gefüllt und in das Wasser zwei Ziegel als Auflager für den Holzrost gelegt. Die Probekörper wurden so auf den Holzrost gestapelt, dass Zwischen den Probekörpern ausreichend Luft vorhanden war und kein Kontakt zwischen Probekörper und dem Wasser im Behälter auftrat. Der Behälter wurde mit einer Platte nicht luftdicht bedeckt. Die nachfolgende Abbildung 4-6 zeigt den Behälter und die Lagerung der feuchten Probekörper.



**Abbildung 4-6:** Lagerung der feuchten Probekörper

### ***Feuchtigkeit der Probekörper***

Die Trocknung der Referenzprobekörper, die gleich wie die tatsächlichen Probekörper gelagert wurden, bis zur Massekonstanz ergaben folgende Ausgleichsfeuchten:

- die Feuchtigkeit der *darrtrockenen* Probekörper betrug vor dem Trocknen durchschnittlich 2,6 M.-%
- zum Zeitpunkt der Wärmeleitversuche betrug die Feuchtigkeit der luftgetrockneten Probekörper im Mittel 2,3 M.-%
- die Feuchtigkeiten der lufttrockenen Brandprobekörper betrug ungefähr 2,8 M.-%
- die Feuchtigkeiten der *feuchten* Probekörper betrug im Durchschnitt 6,0 M.-%

Somit wurde die gewünschte Feuchtigkeit der feuchten Probekörper von 4,0 M.-% um ungefähr 2,0 M.-% überschritten.

Da das Adsorptions- und Desorptionsverhalten von Beton unterschiedlich ist, wird vorgeschlagen, dass die feuchten Probekörper nach der Wasserbadlagerung zunächst einige Zeit an der Luft trocknen und dann anschließend über Wasser gelagert werden, um eine Ausgleichsfeuchtigkeit von ungefähr 4 M.-% zu erhalten.

### 4.1.3 Prüfeinrichtung

#### *Brennofen*

Der verwendete Elektro-Brennofen von der Firma *KITTEC* der Serie *Classic Line* (siehe Abbildung 4-7) gehört zu den Frontladermodellen, somit ist der Ofen von Vorne zu öffnen. Mit dem Brennofen können Temperaturen bis maximal 1300 °C erreicht werden.



**Abbildung 4-7:** Brennofen *KITTEC Classic Line*

Die Beheizung erfolgt durch Heizspiralen in Rillensteinen, die an den Seiten und am Ofenboden angebracht und im Wandaufbau integriert sind (siehe Abbildung 4-7). Durch diese dreiseitige Beheizung herrscht im Brennofen eine ausgeglichene Temperaturverteilung.

Im Boden und in der Decke befinden sich Abluftöffnungen. Die Öffnungen in der Ofendecke wurden verwendet, um die Thermoelemente und Stromdrähte für den Heißdraht zu der Prüfanordnung zu führen.

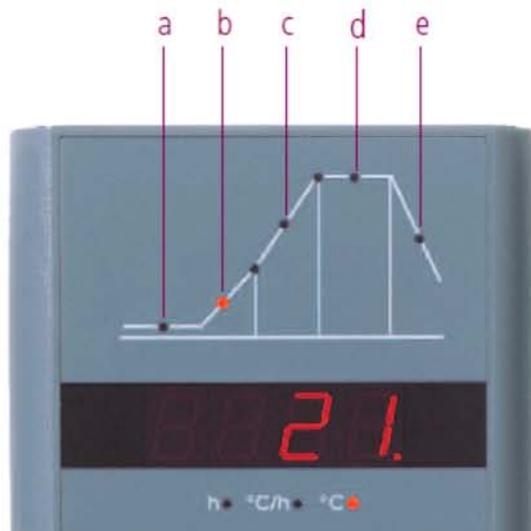


**Abbildung 4-8:** Im Inneren des *KITTEC Classic Line* Brennofens

### ***Ofensteuerung***

Der Brennofen wird mit dem Steuerelement TC 66 (siehe Abbildung 4-10) der Firma BENTRUP geregelt. Das Steuergerät kann bis zu 6 Programme speichern. Wie in Abbildung 4-9 dargestellt besteht die Brennkurve aus folgenden Abschnitten:

- a) Vorlaufzeit (maximal bis 9 Stunden 59 Minuten möglich)
- b) Aufheizen auf Zwischentemperatur (entweder geregelt von 1 bis 999°C pro Stunde oder ungeregelt "SKIP")
- c) Aufheizen auf Endtemperatur (entweder geregelt von 1 bis 999°C pro Stunde oder ungeregelt "SKIP")
- d) Haltezeit (maximal bis 9 Stunden 59 Minuten möglich)
- e) Abkühlen bis 150°C (entweder geregelt von 1 bis 999°C pro Stunde oder ungeregelt "SKIP")



**Abbildung 4-9:** BENTRUP Brennkurve [28]

Legende

- 1 Brennkurve
- 2 Programmwerte und Ofentemperatur
- 3 Programmwahl
- 4 Start-Stopp Taste (Programmstart)
- 5 Segmentanwahl und Werteänderung
- 6 Reglersicherung (0,5 A mittelträge)
- 7 Netzschalter



**Abbildung 4-10:** BENTRUP Temperaturregler [28]

### **Datenlogger**

Wie es in der Abbildung 3-8 mit 1 und 6 schematisch dargestellt ist, sind Registriereinrichtungen zur Aufzeichnung der Temperaturen, der Zeit und der Spannung erforderlich. Im Zuge dieser Arbeit wurde mit einem Multimeter der Firma *KEITHLEY Modell 2700* gearbeitet (siehe Abbildung 4-11), die sowohl als Temperatur-Zeit-Registriereinrichtung und als Voltmeter diente. Dieser Datenlogger ist in der Lage in einem bestimmten vorgegebenen Intervall, Daten, die über Sensoren erfasste Daten, zu verarbeiten und aufzuzeichnen. Die Aufzeichnungen werden mit dem auf *EXCEL* basierendem Programm *ExceLINX* durchgeführt.



**Abbildung 4-11:** *KEITHLEY 2700*, Datenlogger [27]

### **Stromversorgung**

Für die Stromversorgung des Heißdrahtes und für die Regelung der Stromstärke wurde ein Transformator, kurz Trafo, bestehend aus einem Transformator zur Herabsetzung der Spannung auf 12 Volt und einem Transformator zur Umwandlung in die erforderliche Wechselspannung verwendet.

### **Amperemeter**

Als Amperemeter wurde ein Digitalmultimeter der Firma *METTEX Modell M-4600* verwendet, wobei ein Ausgang des Amperemeters zum Trafo und der andere Ausgang zu einem Ende des Heißdrahtes führte.

In der Abbildung 4-12 sind der Transformator und der Amperemeter dargestellt.



**Abbildung 4-12:** Trafo und Amperemeter der Messanordnung

### ***Differentialthermopaar***

Gemäß EN 993-15 sollen Thermoelemente vom Typ R (Rhodium/Platin mit 13 % Platin) oder vom Typ S (Rhodium/Platin mit 10 % Platin) verwendet werden. Der Durchmesser der Drähte des Differential-Thermopaars muss gleich dem Durchmesser des Heißdrahtes sein.

Im Zuge dieser Arbeit wurden für die Versuche Thermoelemente vom Typ K verwendet. Dabei handelte es sich um isolierte Thermoleitungen der Ausführung GLGL (Doppelleiter mit Glasseide umspinnen, Adern parallel laufend mit Glasseide umflochten und Lacktränkung) mit 2 x 0,50 mm vom Typ K (NiCr-Ni) für Temperaturen bis maximal 1200 °C.

### ***Heißdraht***

Gemäß EN 993-15 ist vorzugsweise ein Draht aus Platin oder einer Platin/Rhodium – Legierung zu verwenden. Die Mindestlänge des Heißdrahtes ist gleich der Probenlänge bzw. der Länge zwischen den Spannungsabgriffen.

Für die Versuche wurde ein Widerstandsdraht *Isachrom 60* mit einer Länge von ungefähr 200 mm und einem Durchmesser von 0,5 mm verwendet, der als Heizdraht bis zu Temperaturen von maximal 1150 °C geeignet ist.

## 4.1.4 Prüfdurchführung

### 4.1.4.1 Kalibrierung des Datenloggers

Während der gesamten Versuchsdauer werden parallel die verstrichene Zeit, die Temperatur im Ofen und die Temperatur in der Probe von dem verwendeten Datenlogger, kurz *KEITHLEY* genannt, in einem Intervall von 10 Sekunden aufgezeichnet. Wie bereits im vorherigen Abschnitt erwähnt, werden die Aufzeichnungen mit der auf *EXCEL* basierenden Software *ExceLINX* durchgeführt.

In den folgenden Tabellen 4-1 bis 4-3 sind die Einstellungen für die Heißdrahtprüfung im *ExceLINX* dargestellt. Die Channels des *KEITHLEY* beschreiben die vorhandenen angeschlossenen Sensoren, nämlich dem Bezugs-Thermopaar für die Proben- und Ofentemperatur und der eingeleiteten Spannung in den Heißdraht.

**Tabelle 4-1:** *ExceLINX* DMM Configure Scanning

ExceLINX	
Task: Configure Scanning DMM Channels	
Task	Name DMM Config
	Description
	Created By TU
	Company Labor
	Date Created 22.01.2009
	Date Modified 05.04.2012
	Status/Cmds Task stopped successfully
Instrument	Device KE2700_COM1
	Password
	Slot 1 Module M7700
	Slot 2 Module Undetected
	Slot 3 Module
	Slot 4 Module
	Slot 5 Module
Front Panel Lockout On	
Setup	Line Sync Off
	Autozero On
	Display Digits 6½
	DCV Input Divider Off
	Open TC Detection Off
Temp Scale °C	
Limits	Digital Outputs Off
	Pulse Output Off
	Polarity High
	Duration 0,02 sec
	Master Latch Off

**Tabelle 4-2:** ExceLINX DMM Scan

ExceLINX	
Task: Scan DMM Channels	
Task	Name: DMM Scan
	Description:
	Created By: TU
	Company: Labor
	Date Created: 22.01.2009
	Date Modified: 05.04.2012
	Status/Cmds: Task stopped successfully
Configuration	Worksheet: DMM Config
Trigger	Model: Scan
	Source: Timer
	Delay: Auto sec
	Reading Count: INF
	Timer: 10 sec
	Monitor: None
	Monitor Limits: None
Data Location	Worksheet: Daten
	Starting Col: A
	Starting Row: 3
	Organize By: Rows
	Autoincrement: Use one table
	Auto Wrap: On
	Log File:
Format: Delimited text (comma)	
Data Display	Add Channel Tags: No
	Add Channels: Yes
	Add Units: Yes
	Scroll Display: No
	Limits: None
	Timestamp: Relative
	Update Interval: 10 msec
Task Data	

**Tabelle 4-3:** ExceLINX Channel Scan List

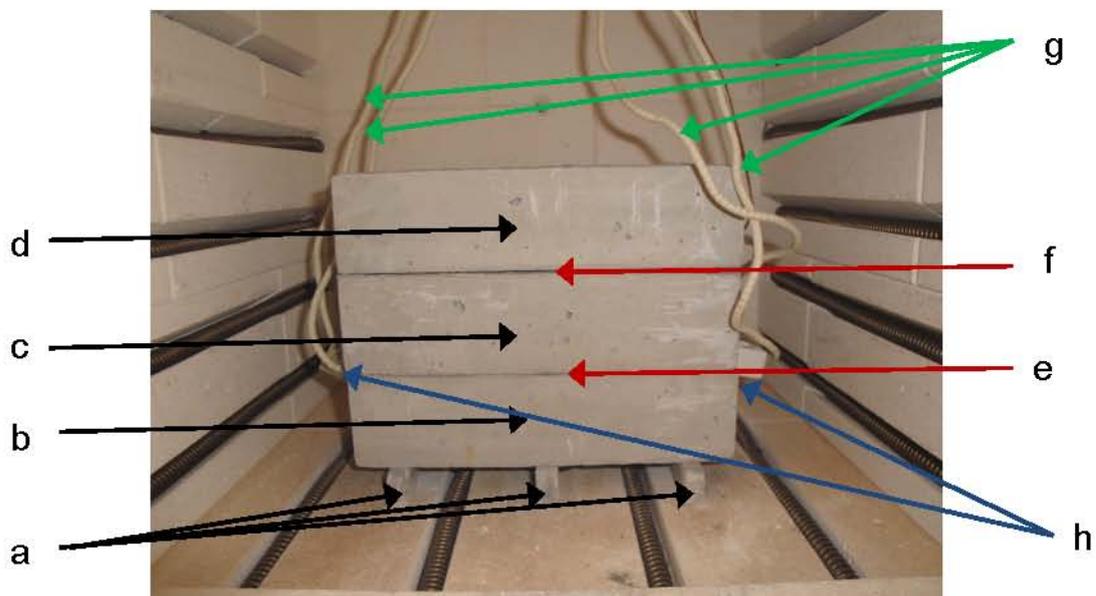
Channel Scan List																				
Channel			Measurement		Scaling				Alarm Limits						Rep Filter		Sampling			
Enb	List	Tag	Function	Range	Rel	Math	m/ref	b	U	En1	Hi1	Lo1	En2	Hi2	Lo2	Enb	Count	Rate	AC BW	Opt 1
On	110		TEMP	K	Off	None	1		X	Off			Off			Off		SLOW		INT
On	105		ACV	AUTO	Off	None				Off			Off			Off		SLOW	SLOW	Volts
On	109		TEMP	K	Off	None				Off			Off			Off		SLOW		INT

#### 4.1.4.2 Prüfanordnung und Aufstellung im Ofen

Zur Sicherstellung eines gleichmäßigen Aufheizens, ist die Prüfanordnung auf drei Auflager mit den Abmessungen 125 mm x 10 mm x 20 mm zu setzen. Da diese dem zu prüfenden Werkstoff ähnlich sein sollen, wurden die Auflager aus einem Probekörper der Vorversuchsserie hergestellt.

Die Auflager müssen auf einer Fläche von 125 mm x 10 mm stehen und parallel zu der oder 100 mm x 50 mm großen Fläche der Prüfanordnung ausgerichtet, und ca. 20 mm von diesen Flächen entfernt sein.

Die Abbildung 4-13 zeigt die Prüfanordnung des Heißdrahtversuches und die Aufstellung der Prüfanordnung auf Auflagern im Ofen.



**Abbildung 4-13:** Prüfanordnung des Heißdrahtverfahrens

Die dargestellte Prüfanordnung besteht aus:

- a) Auflager mit den Abmessungen 125 mm x 10 mm x 20 mm
- b) Probekörper mit den Abmessungen 200 mm x 100 mm x 50 mm und Einkerbungen für Heißdraht und Thermoelement
- c) Probekörper mit den Abmessungen 200 mm x 100 mm x 50 mm
- d) Bedeckung mit den Abmessungen 200 mm x 100 mm x 50 mm

- e) Lage des Heißdrahtes und des Thermoelementes zur Messung der Temperatur in der Probe
- f) Lage des Thermoelementes zur Messung der Ofentemperatur
- g) Keramikummantelte Drähte für die Stromversorgung des Heißdrahtes
- h) Klemmen für Heißdraht, Drähte und Amperemeter.

Der Heißdraht und das Thermopaar sind zwischen die beiden unteren Probekörper zu legen, wobei der Heißdraht in einer der Einkerbungen zu führen ist oder gegebenenfalls in der Einkerbung eingekittet ist. In die andere Einkerbung ist das Thermoelement so zu führen, dass die Temperatur in der Mitte des Probekörpers gemessen wird.

#### **4.1.4.3 Aufheizen und Prüftemperatur**

Der Ofen darf bis zur geforderten Prüftemperatur maximal mit einer Aufheizrate von 10 Kelvin pro Minute aufgeheizt werden. Für die Versuche wurde eine maximale Aufheizrate von 2,5 Kelvin pro Minute gewählt.

Sobald der Ofen die Prüftemperatur erreicht, ist zu überprüfen, ob die Temperatur im Bereich der gesamten Prüfanordnung gleichmäßig und konstant ist [EN 993-15]. Dabei darf das Differential-Thermopaar, also das Thermoelement in der Probe und jenes für die Ofentemperatur, während der letzten 10 min vor der Prüfung keine höhere Abweichung als 0,05 Kelvin anzeigen.

Aus den Vorversuchen war bekannt, dass diese Bedingung bei Prüftemperaturen ab 200 °C trotz stundenlangem temperieren nicht erreicht werden konnte. Deshalb wurde die zulässige Abweichung, bei den Prüftemperaturen 400 °C und 600 °C und teilweise bereits bei Prüftemperaturen von 200 °C, von 0,05 Kelvin auf 0,1 Kelvin vergrößert.

Die in den Versuchen geprüften Temperaturen waren 90 °C, 100 °C, 110 °C, 125 °C, 200 °C, 400 °C und 600 °C.

Nach einer Messung kann auf die nächste Prüftemperatur gesteigert werden, wobei auch hier der Ofen mit maximal 10 Kelvin pro Minute aufgeheizt werden darf.

#### **4.1.4.4 Leistungseingabe und Messung**

Nachdem eine konstante Prüftemperatur in den zulässigen Abweichungen erreicht wurde, wurde sofort der Heizstrom eingeschaltet. Der exakte Zeitpunkt der Leistungseingabe auf den Heißdraht wurde somit mit dem *KEITHLEY* festgehalten, und während der gesamten Prüfzeit, in Zeitabständen von 10 Sekunden, die gemessene Spannung zwischen den Spannungsabgriffen und der gemessene Strom im Heißdraht registriert. Nach der entsprechenden Prüfzeit wurde der Heizstrom unterbrochen.

Gemäß EN 993-15 sind die Ergebnisse zu verwerfen und die Prüfung zu wiederholen, wenn die Schwankung der in den Heißdraht eingebrachten elektrischen Leistung während einer Prüfung größer als 2 % ist.

Die Leistungseingabe ist so einzustellen, dass man bei einer gewählten Anzeigeempfindlichkeit einen Anzeigewert von mindestens 60 %, vorzugsweise etwa 80 % des Skalenendwertes erhält.

Leistungsstufen für einige Wärmeleitfähigkeiten sind in Tabelle 4-4 gegeben. Die Leistungsstufen beruhen auf einem Anzeigewert, der das 0,8-fache des Skalenendwertes beträgt.

Für die Leistungsermittlung in den Versuchen wurde mit einer zu erwartenden Wärmeleitfähigkeit von ungefähr  $\lambda = 1,8 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$  gerechnet. Somit ergibt sich gemäß Tabelle 4-4 eine maximale Prüfzeit von  $t_{\text{max}} = 540$  Sekunden und eine empfohlene Leistungsstufe von  $L = 24 \text{ W/m}$ .

**Tabelle 4-4:** Empfohlene Messbereiche und Leistungsstufen nach EN 993-15

Wärmeleitfähigkeit $\lambda$  W/(m · K)	Maximale Prüfzeit $t_{max}$  s	Empfohlene Leistungsstufe für Skalenbereich 0 $\mu$ V bis 50 $\mu$ V  W/m
0,1	1 200	3
0,4	1 200	6
1,0	900	15
2,0	450	30
4,0	350	60
8,0	190	120
16	100	240
25	65	375

ANMERKUNG Die Angaben in Tabelle 1 gelten für Thermopaare vom Typ „S“ (siehe 4.4) und sollten bei Verwendung eines Thermopaars vom Typ „R“ angepasst werden.

Die Leistung bzw. die Rate der Energieübertragung zwischen den Spannungsabgriffen lässt sich folgendermaßen ermitteln (Formel 4-1):

$$P = U \cdot I \quad \text{und} \quad P = L \cdot l$$

- |   |                     |   |   |
|---|---------------------|---|---|
| P | Leistung in Watt    | L | empfohlene Leistungsstufe in Watt pro Meter |
| U | Spannung in Volt    | l | Heizdrahtlänge in Meter                     |
| I | Heizstrom in Ampere |   |   |

**Formel 4-1:** Leistung

Bei einer Leistungsstufe von  $L = 27 \text{ W/m}$  und einer Heizdrahtlänge von  $l = 0,20 \text{ m}$  erhält man eine Leistung von  $P = 5,4 \text{ Watt}$ . Mit dem *OHM'schen* Gesetz kann die erforderliche Spannung ermittelt werden (Formel 4-2):

$$I = \frac{U}{R}$$

- |   |                     |
|---|---------------------|
| I | Heizstrom in Ampere |
| U | Spannung in Volt    |
| R | Widerstand in Ohm   |

**Formel 4-2:** *OHM'sches* Gesetz

Durch Umformen der Formel 4-1 und Einsetzen der Formel 4-2 erhält man für die erforderliche Spannung folgende Beziehung (Formel 4-3):

$$U = \sqrt{P \cdot R}$$

**Formel 4-3:** Spannung im Heizdraht

Mit einem Widerstand des Heizdrahtes von 5,65 Ohm pro Meter, somit einem Gesamtwiderstand von  $R = 1,13 \Omega$ , ergibt die erforderliche Spannung von  $U_{80} = 2,47$  Volt und eine erforderliche Einspeisespannung  $U = 2,47 / 0,8 \approx 3,09$  Volt.

Aus den Vorversuchen war bekannt, dass Spannungen von 3 Volt zu geringe Temperaturunterschiede in der Prüfanordnung verursachten, sodass in den Versuchen Spannungen zwischen 3,0 und 5,0 Volt in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit der Proben eingespeist werden.

#### 4.1.5 Auswertung der Daten

Wie bereits in Abschnitt 3.2.1 beschrieben ist der mathematische Aufwand bei instationären Verfahren, zu denen das Heißdrahtverfahren gehört, höher und komplexer als bei stationären Verfahren. Die Grundlage für die mathematische Lösung bildet die *FOURIER'sche* Differentialgleichung, mit der Temperatur als Unbekannte. In der folgenden Gleichung (Formel 4-4) ist eine Differentialgleichung für den dreidimensionalen, instationären und quellfreien Fall gegeben.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t}$$

**Formel 4-4:** *FOURIER'sche* Differentialgleichung

Die spezielle Lösung [26] für ein Temperaturfeld mit einer plötzlichen Wärmezufuhr  $\dot{q}$ , zum Zeitpunkt  $t = 0$  entlang einer Linie ( $z = \textit{konstant}$ ) ergibt sich zu (Formel 4-5):

$$T = \frac{\dot{q}}{4\pi\lambda} e^{-\frac{(x-x')^2+(y-y')^2}{4at}}$$

**Formel 4-5:** Spezielle Lösung der Differentialgleichung

Bei einer konstanten und kontinuierlichen Wärmezufuhr ergibt sich der Abstand  $r$  eines Punktes von der Linienquelle zu:

$$r = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2}$$

und die spezielle Lösung der Differentialgleichung zu (Formel 4-6):

$$T = \frac{\dot{q}}{4\pi\lambda} e^{-\frac{r^2}{4at}} \quad \text{bzw.} \quad T = \frac{\dot{q}}{4\pi\lambda} \cdot - Ei\left(\frac{-r^2}{4at}\right)$$

**Formel 4-6:** Spezielle Lösungen

Dabei ist der Ausdruck  $- Ei\left(\frac{-r^2}{4at}\right)$  ein Exponentialintegral der Form  $\int_x^\infty \frac{e^{-u}}{u} du$ .

Aus den zuvor genannten mathematischen Beziehungen und Formeln abgeleitet, lässt sich die Wärmeleitfähigkeit gemäß EN 993-15 mit folgender Formel 4-7 berechnen:

$$\lambda = \frac{P}{4\pi l} \cdot \frac{- Ei\left(\frac{-r^2}{4at}\right)}{\Delta\theta(t)}$$

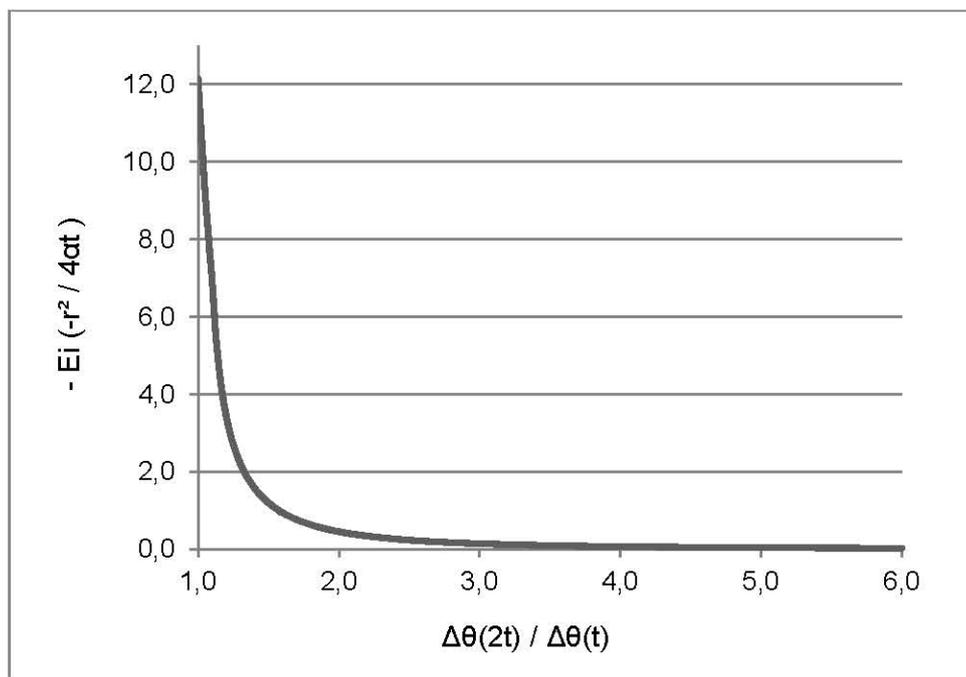
- $\lambda$  Wärmeleitfähigkeit in W/(m·K)
- $P$  Rate der Energieübertragung zwischen den Spannungsabgriffen in Volt
- $l$  Länge des Heißdrahtes in Meter
- $r$  Abstand zwischen Heißdraht und Mess-Thermopaar in Meter
- $a$  Temperaturleitfähigkeit in m<sup>2</sup>/s
- $t$  Zeit ab dem Zeitpunkt des Einschaltens des Heißstromes in Sekunden
- $\Delta\theta(t)$  Temperaturdifferenz zwischen Mess- und Bezugs-Thermopaar bei der Zeit  $t$

**Formel 4-7:** Wärmeleitfähigkeit nach EN 993-15

Werte für das Exponentialintegral sind in Abhängigkeit vom Verhältnis  $\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$  aus Tabellen zu entnehmen. Um ausreichend Messdaten zu erhalten war die Berücksichtigung von Verhältnissen unter 1,10 erforderlich. In dieser Arbeit

wurden die Werte für  $-Ei\left(\frac{-r^2}{4at}\right)$  bei Verhältnissen von  $\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$  über 1,10 aus den Tabellen der ÖNORM EN 993-15 entnommen, und bei Verhältnissen von  $\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$  zwischen 1,00 und 1,10 mit der Exponentialfunktion  $2800,8 \cdot e^{-5,552 \frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}}$  ermittelt.

Im Anhang 1 ist eine Tabelle der in dieser Arbeit angewendeten Werte des Exponentialintegrals gegeben und in der Abbildung 4-14 in Abhängigkeit von  $\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$  dargestellt.



**Abbildung 4-14:** Exponentialintegral in Abhängigkeit von  $\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$

Bei der Auswertung der Prüfdaten stieß man zunächst auf die Tatsache, dass bei den Versuchen mehrheitlich die Ofentemperatur höher war als die Temperatur in der Probe, und somit negative Temperaturdifferenzen auftraten. Dies hat zur Folge, dass der Absolutbetrag der Temperaturdifferenz ( $\Delta\theta(t)$ ) zum Zeitpunkt t nach Einschalten des Heizstromes höher ist, als die Temperaturdifferenz ( $\Delta\theta(2t)$ ) nach der doppelten Zeit nach Einschalten des Heizstromes.

Die ÖNORM EN 993-15 geht jedoch von einer zufolge des Heizstromes verursachten Erwärmung des Prüfkörpers aus, wobei sich der Prüfkörper mit

zunehmender Zeit stärker erwärmen sollte, und somit folgende Beziehung vorausgesetzt wird:

$$\Delta\theta(2t) > \Delta\theta(t) \text{ und } |\Delta\theta(2t)| > |\Delta\theta(t)|$$

wobei  $|\Delta\theta(2t)| = |\Delta\theta(t)| + (|\Delta\theta(2t)| - |\Delta\theta(t)|)$  ist, und der Ausdruck  $|\Delta\theta(2t)| - |\Delta\theta(t)|$  die zufolge des Heizstromes verursachten Erwärmung des Prüfkörpers, im Zeitraum zwischen dem Zeitpunkt  $t$  und  $2t$  nach Einschaltendes Heizstromes, darstellt.

Ist jedoch die Ofentemperatur höher als die Proben temperatur, dann nähert sich die Proben temperatur, zufolge einer durch den Heizstrom verursachten Erwärmung, an die Ofentemperatur an, und dabei  $|\Delta\theta(2t)| < |\Delta\theta(t)|$  ist.

Um ein vergleichbares Verhältnis von  $\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$  auch im negativen Bereich zu erhalten wurde mit folgender Beziehung gearbeitet:

$$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)} \cong \frac{|\Delta\theta(t)| + (|\Delta\theta(t)| - |\Delta\theta(2t)|)}{|\Delta\theta(t)|} = \frac{2 \cdot |\Delta\theta(t)| - |\Delta\theta(2t)|}{|\Delta\theta(t)|}$$

wobei hier der Ausdruck  $(|\Delta\theta(t)| - |\Delta\theta(2t)|)$  die zufolge des Heizstromes verursachten Erwärmung des Prüfkörpers, im Zeitraum zwischen dem Zeitpunkt  $t$  und  $2t$  nach Einschaltendes Heizstromes, darstellt.

Im Folgenden wird die Herleitung der angewendeten Beziehung

$$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)} \cong \frac{2 \cdot |\Delta\theta(t)| - |\Delta\theta(2t)|}{|\Delta\theta(t)|}$$

für den Fall  $|\Delta\theta(2t)| < |\Delta\theta(t)|$  beschrieben.

Unter der Annahme, dass die Erwärmung der Probe, die durch den Heizdraht verursacht wird, annähernd, zwischen den Zeitpunkten  $t$  und  $2t$  nach Einschalten des Heizstromes, linear ist, kann mit einer inhomogenen linearen Funktion in folgender Normalform gearbeitet werden (Formel 4-8):

$$y = k \cdot x + d$$

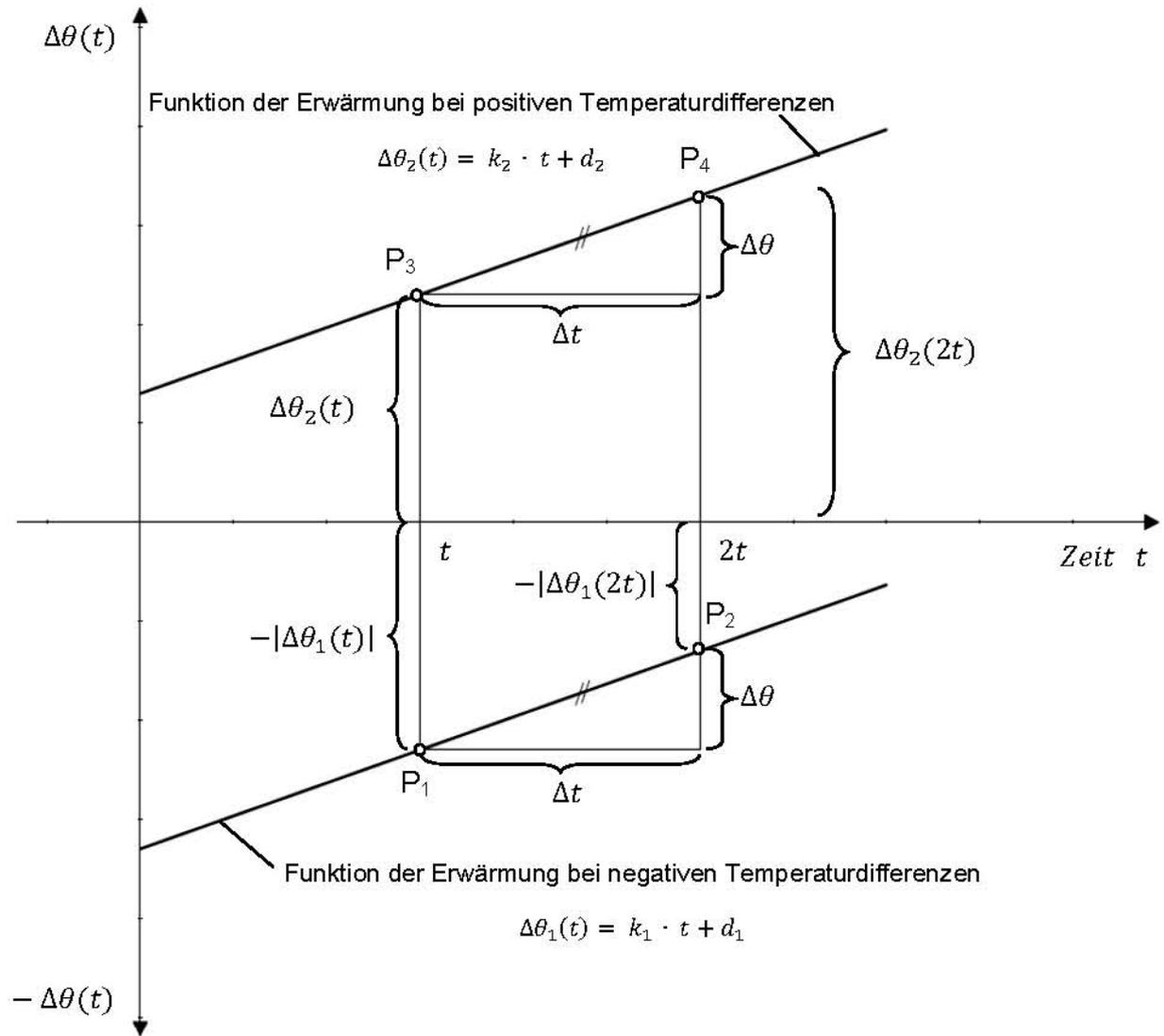
$k$  Steigung  
 $d$  Inhomogenität

**Formel 4-8:** Inhomogene lineare Funktion

In der folgenden Abbildung 4-15 sind die Zusammenhänge zwischen der Funktion der Erwärmung bei negativen Temperaturdifferenzen und der Funktion bei positiven Temperaturdifferenzen dargestellt.

Dabei sind:

$\Delta\theta(t)$  Temperaturdifferenz zwischen Ofen- und Probentemperatur zum Zeitpunkt  $t$   
 $t$  Zeitpunkt nach Einschalten des Heizstromes  
 $\Delta t$  Zeit zwischen den Zeitpunkten  $t$  und  $2t$   
 $\Delta\theta$  Differenz zwischen den Temperaturdifferenzen zum Zeitpunkt  $t$  und zum Zeitpunkt  $2t$   
 $P_1, P_2$  Punkte der Funktion  $\Delta\theta_1(t)$  bei negativen Temperaturdifferenzen  
 $P_3, P_4$  Punkte der Funktion  $\Delta\theta_2(t)$  bei positiven Temperaturdifferenzen, die für die Auswertung der Prüfergebnisse herangezogen werden



**Abbildung 4-15:** Temperaturdifferenzen in Abhängigkeit von der Zeit

Zunächst wird die inhomogene lineare Funktion  $\Delta\theta_1(t) = k_1 \cdot t + d_1$  bei negativen Temperaturdifferenzen betrachtet. Dabei stellen die Punkte  $P_1$  und  $P_2$  die jeweils ermittelten Temperaturdifferenzen zu den Zeitpunkten  $t$  und  $2t$  dar, und sind mit folgenden Koordinaten bekannt:

$$P_1 (t / -|\Delta\theta_1(t)|) \text{ und } P_2 (2t / -|\Delta\theta_1(2t)|), \text{ wobei } |\Delta\theta_1(2t)| < |\Delta\theta_1(t)| \text{ ist.}$$

Durch Einsetzen der bekannten Punkte in die Geradengleichung erhält man folgendes Gleichungssystem:

$$\text{I: } -|\Delta\theta_1(t)| = k_1 \cdot t + d_1$$

$$\text{II: } -|\Delta\theta_1(2t)| = k_1 \cdot 2t + d_1$$


---

mit den Lösungen für die Steigung  $k_1$  und für die Inhomogenität  $d_1$  zu:

$$k_1 = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{|\Delta\theta_1(t)| - |\Delta\theta_1(2t)|}{t} \quad \text{und} \quad d_1 = -2 \cdot |\Delta\theta_1(t)| + |\Delta\theta_1(2t)|$$

Die Geradengleichung bei negativen Temperaturdifferenzen ergibt sich somit zu:

$$\Delta\theta_1(t) = \frac{|\Delta\theta_1(t)| - |\Delta\theta_1(2t)|}{t} \cdot t + (-2 \cdot |\Delta\theta_1(t)| + |\Delta\theta_1(2t)|) = -|\Delta\theta_1(t)|$$

Die Gleichung der positiven Funktion lautet  $\Delta\theta_2(t) = k_2 \cdot t + d_2$  und die Koordinaten der Punkte  $P_3$  und  $P_4$  sind:

$$P_3 (t/\Delta\theta_2(t)) \quad \text{und} \quad P_4 (2t/\Delta\theta_2(2t)), \quad \text{wobei} \quad \Delta\theta_2(2t) > \Delta\theta_2(t) \text{ ist.}$$

Unter der Annahme, dass  $\Delta\theta_2(t) = |\Delta\theta_1(t)|$  ist und dass die verursachte Erwärmung im Probekörper immer gleich ist, folgt daraus, dass die Steigung

$$k_2 = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = k_1 = \frac{|\Delta\theta_1(t)| - |\Delta\theta_1(2t)|}{t} \text{ ist.}$$

Durch Einsetzen des bekannten Punktes  $P_3 (t/|\Delta\theta_1(t)|)$  und der bekannten Steigung  $k_2$  in die Geradengleichung erhält man folgendes Gleichungssystem:

$$\text{I: } |\Delta\theta_1(t)| = \frac{|\Delta\theta_1(t)| - |\Delta\theta_1(2t)|}{t} \cdot t + d_2$$

$$\text{II: } \Delta\theta_2(t) = \frac{|\Delta\theta_1(t)| - |\Delta\theta_1(2t)|}{t} \cdot 2t + d_2$$


---

mit den Lösungen für die Inhomogenität  $d_2$  und für die gesuchte Temperaturdifferenz  $\Delta\theta_2(t)$  zu:

$$d_1 = |\Delta\theta_1(2t)| \quad \text{und} \quad \Delta\theta_2(t) = 2 \cdot |\Delta\theta_1(t)| - |\Delta\theta_1(2t)|.$$

Das gesuchte positive Verhältnis ergibt sich somit zu:

$$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)} \cong \frac{\Delta\theta_2(2t)}{\Delta\theta_2(t)} = \frac{2 \cdot |\Delta\theta_1(t)| - |\Delta\theta_1(2t)|}{|\Delta\theta_1(t)|}$$

#### 4.1.6 Prüfergebnisse

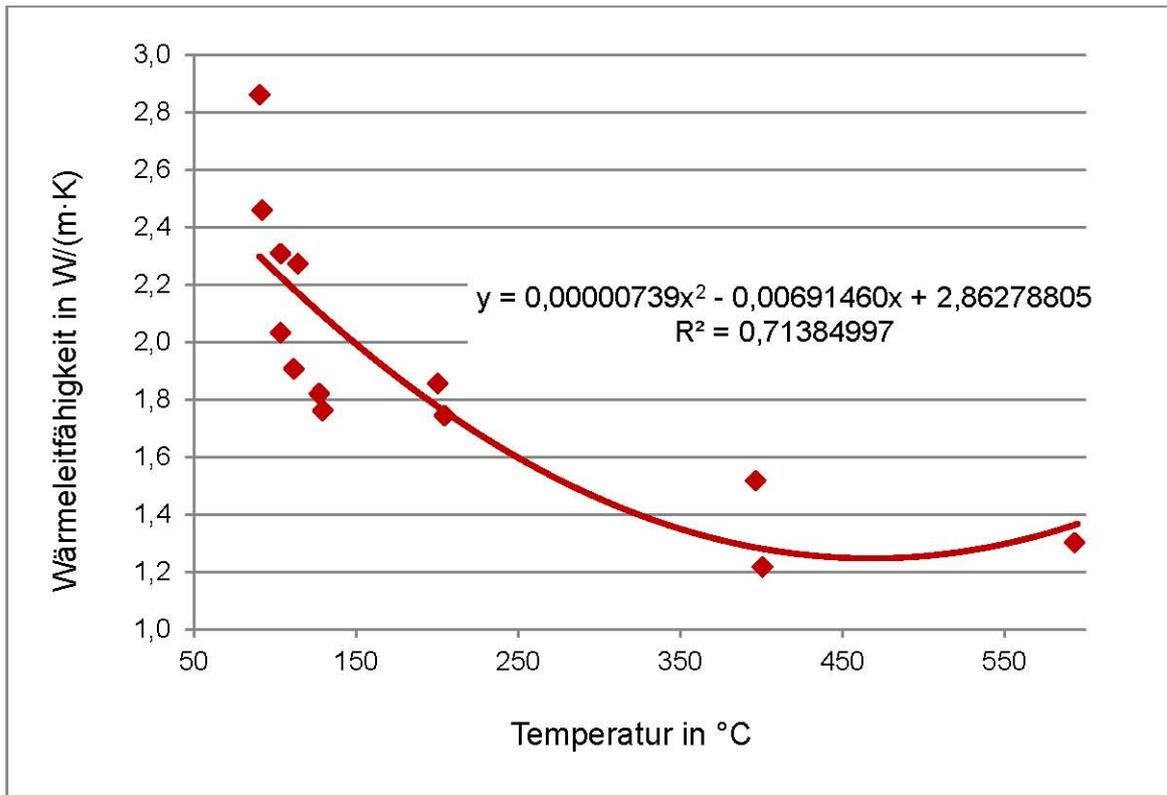
Die Auswertung der Prüfdaten und die jeweiligen Ergebnisse für die Wärmeleitfähigkeit der 6 Prüfserien bei den jeweiligen Prüftemperaturen sind in den Anhängen 2 bis 41 gegeben. In der Tabelle 4-5 sind die Ergebnisse zu den entsprechenden Prüftemperaturen aller Prüfserien der *darrtrockenen*, *lufttrockenen* und *feuchten* Proben zusammengefasst.

**Tabelle 4-5:** Ergebnisse der Heißdrahtversuche

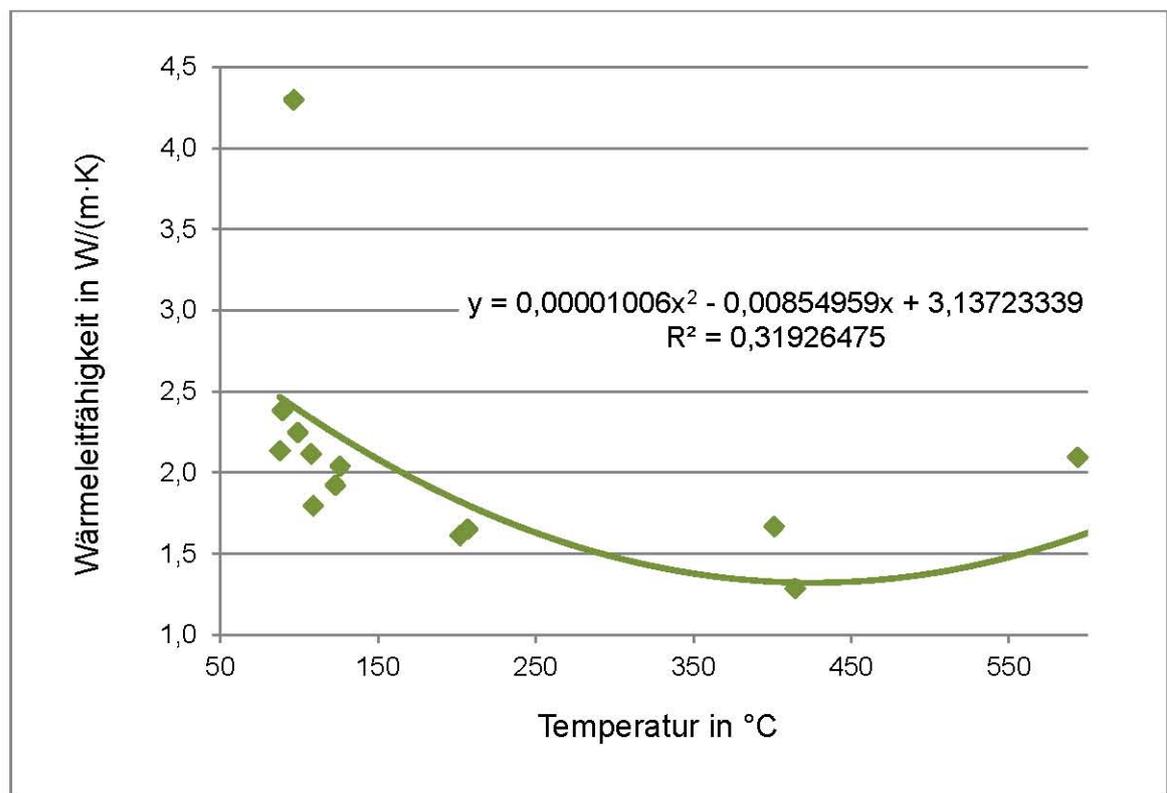
<i>darrtrockene</i> Proben		<i>lufttrockene</i> Proben		<i>feuchte</i> Proben	
P-0-1		P-2-1		P-4-1	
$\theta_c$ in °C	$\lambda_c$ in W/mK	$\theta_c$ in °C	$\lambda_c$ in W/mK	$\theta_c$ in °C	$\lambda_c$ in W/mK
88,92	1,954	90,54	2,860	87,71	2,135
96,99	2,080	103,26	2,032	96,47	4,298
110,24	1,998	111,55	1,906	107,46	2,114
125,23	1,920	127,16	1,820	122,93	1,921
195,21	1,544	200,35	1,855	206,77	1,651
393,49	1,143	396,18	1,517	414,38	1,284
588,28	0,967	592,96	1,301	616,88	1,158
P-0-2		P-2-2		P-4-2	
$\theta_c$ in °C	$\lambda_c$ in W/mK	$\theta_c$ in °C	$\lambda_c$ in W/mK	$\theta_c$ in °C	$\lambda_c$ in W/mK
-	-	91,92	2,459	89,30	2,382
102,16	2,597	103,36	2,307	99,18	2,246
111,81	2,318	114,04	2,272	108,91	1,794
127,42	2,311	129,32	1,761	125,86	2,039
202,38	2,153	204,47	1,743	201,98	1,611
396,13	1,508	400,47	1,216	401,09	1,666
591,25	1,375	-	-	593,60	2,094

Bei der Prüfserie P-0-2, bei einer Prüftemperatur von 90 °C, und bei der Prüfserie P-2-2, bei einer Prüftemperatur von 600 °C, fehlen die Ergebnisse, da es zufolge schadhafter Thermoelemente zu fehlerhaften Messungen der Ofen- und Proben temperatur kamen.





**Abbildung 4-17:** Regressionsanalyse der Prüferien P-2-1 und P-2-2



**Abbildung 4-18:** Regressionsanalyse der Prüferien P-4-1 und P-4-2

Die Regressionsanalysen ergaben folgende thermische Leitfähigkeiten:

**Darrtrockene Probe**

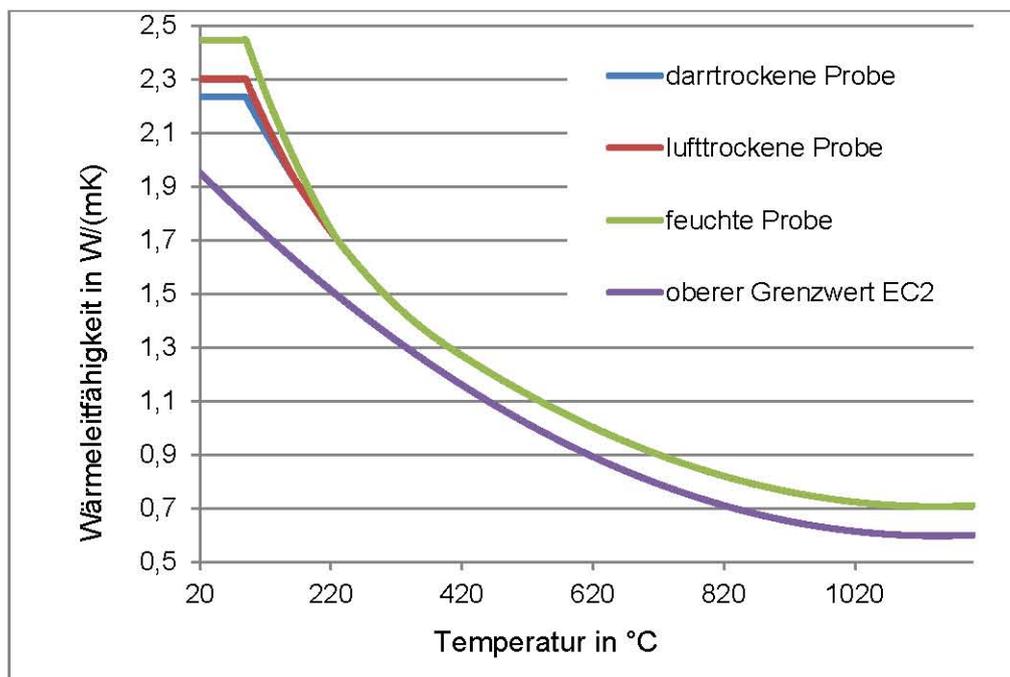
- $\lambda = 2,233$  für  $\theta < 90 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\lambda = 2,6725 - 0,5307 \cdot (\theta / 100) + 0,0470 \cdot (\theta / 100)^2$  für  $90 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta < 400 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\lambda = 2,1100 - 0,2451 \cdot (\theta / 100) + 0,0107 \cdot (\theta / 100)^2$  für  $\theta \geq 400 \text{ }^\circ\text{C}$

**Lufttrockene Probe**

- $\lambda = 2,300$  für  $\theta < 90 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\lambda = 2,8628 - 0,6915 \cdot (\theta / 100) + 0,0739 \cdot (\theta / 100)^2$  für  $90 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta \leq 160 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\lambda = 2,6725 - 0,5307 \cdot (\theta / 100) + 0,0470 \cdot (\theta / 100)^2$  für  $160 \text{ }^\circ\text{C} < \theta < 400 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\lambda = 2,1100 - 0,2451 \cdot (\theta / 100) + 0,0107 \cdot (\theta / 100)^2$  für  $\theta \geq 400 \text{ }^\circ\text{C}$

**Feuchte Probe**

- $\lambda = 2,446$  für  $\theta < 90 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\lambda = 3,1372 - 0,8550 \cdot (\theta / 100) + 0,1006 \cdot (\theta / 100)^2$  für  $90 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta < 230 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\lambda = 2,6725 - 0,5307 \cdot (\theta / 100) + 0,0470 \cdot (\theta / 100)^2$  für  $230 \text{ }^\circ\text{C} \leq \theta < 400 \text{ }^\circ\text{C}$
- $\lambda = 2,1100 - 0,2451 \cdot (\theta / 100) + 0,0107 \cdot (\theta / 100)^2$  für  $\theta \geq 400 \text{ }^\circ\text{C}$

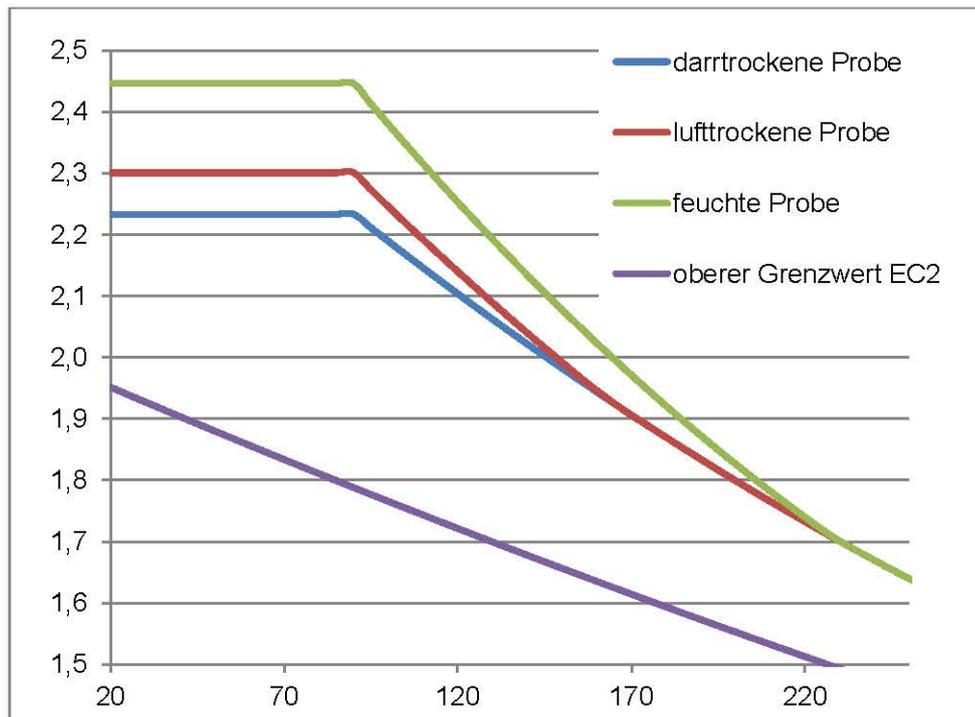


**Abbildung 4-19:** Wärmeleitfähigkeit von Beton mit quarzhaltigem Zuschlag in Abhängigkeit von der Temperatur

#### 4.1.7 Interpretation der Prüfergebnisse

In der Abbildung 4-19 und der Abbildung 4-20 erkennt man deutlich, dass sich die Wärmeleitfähigkeiten von lufttrockenen Proben bereits bei Temperaturen von 150 °C an die Wärmeleitfähigkeiten von darrtrockenen Proben angleichen, und die Wärmeleitfähigkeiten von feuchten Proben erst bei Temperaturen von 200 °C denen der darrtrockenen Proben annähern.

Die thermischen Leitfähigkeiten für Temperaturen unter 90 °C wurden als konstant mit dem Wert für die jeweilige Feuchtigkeit bei 90 °C angenommen und für Temperaturen ab 400 °C parallel zu den oberen Grenzwerten nach ÖNORM EN 1992-1-2 geführt.



**Abbildung 4-20:** Wärmeleitfähigkeiten zwischen 20 °C und 250 °C

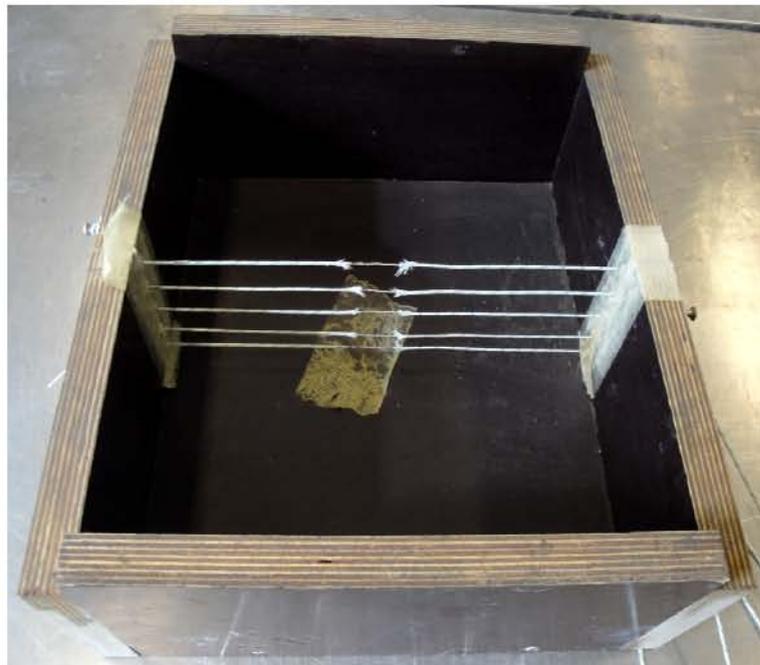
Wie erwartet liegen die empirisch erhaltenen Werte und Funktionen der Wärmeleitfähigkeiten von Beton mit quarzhaltigem Zuschlag, in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit und der Temperatur, sowohl über den unteren als auch über den oberen Grenzwerten der Wärmeleitfähigkeit nach ÖNORM EN 1992-1-2.

## 4.2 Brandversuche

Im Zuge der Hauptversuche wurden 6 Probekörper geprüft. Dabei wurde jeweils ein Brandprobekörper auf einen Brandofen platziert und von der Unterseite gemäß der Einheits-Temperatur-Zeitkurve einseitig temperiert. Die Probekörper wurden bis zu einer Branddauer von 120 Minuten bei Temperaturen gemäß der ETK geprüft. Nach Abdrehen der Gaszufuhr wurde das Abkühlverhalten der Prüfanordnung bis zur Minute 180 aufgezeichnet.

### 4.2.1 Probenherstellung und Probenvorbereitung

Für die Herstellung der Proben wurden bereits vorhandene Schalungen, für Probekörper mit den Abmessungen 300 mm x 250 mm x 100 mm, aus früheren Brandversuchen verwendet. Um die Temperaturen in unterschiedlichen Bauteiltiefen während des Brandversuches messen und aufzeichnen zu können, wurden Thermoelemente vor dem Betonieren in die Schalungen gespannt, wobei die Messung der Thermoelemente in Probekörpermitte erfolgt. In der folgenden Abbildung ist eine solche Schalung mit den jeweiligen Thermoelementen dargestellt.



**Abbildung 4-21:** Schalung für die Brandprobekörper mit Thermoelementen

Es wurden Thermoelemente in Tiefen von 1 cm, 3 cm, 5 cm, 7 cm und 9 cm in die Schalung mittels seitlich angebrachten Schrauben, an welche die Thermoelemente gewickelt wurden, gespannt.

Der Beton für die Probekörper wurde mit einem Zwangsmischer gemischt. Die Anteile und Einwaagen für eine Mischung von 40 Liter Beton betragen:

- Quarzsand 0/4: 46,715 kg
- Quarzkantkorn 4/8: 30,319 kg
- Zement CEM I 42,5 N: 14,400 kg
- Wasser: 6,396 Liter

Nach dem Mischen erfolgten einige Frischbetonprüfungen mit folgenden Ergebnissen:

- Ausbreitmaß  $\leq 340$  mm  $\rightarrow$  steife bzw. sehr steife Konsistenz
- Luftporengehalt 2,4 %.

Für die Hauptbrandversuche wurden insgesamt 6 Probekörper hergestellt.

Die Betonprobekörper verblieben 24 Stunden in der Schalung und wurden gegen Austrocknen mit Folien bedeckt.

Nach dem Ausschalen wurden zunächst alle Probekörper 7 Tage lang in einem Wasserbad gelagert. Ab dem 7. Tag variierte die Lagerung in Abhängigkeit von der gewünschten Ausgleichsfeuchtigkeit.

Analog zu den Probekörpern für die Heißdrahtversuche wurde auch bei den Brandprobekörpern zwischen darrtrockenen, lufttrockenen und feuchten Probekörpern unterschieden. Die Probenlagerung erfolgte gemäß den Beschreibungen in Abschnitt 4.1.2.

## 4.2.2 Prüfeinrichtung

### *Datenlogger*

Für die Brandversuche war eine Registriereinrichtung zur Aufzeichnung der Temperaturen und der Zeit erforderlich. Im Zuge dieser Arbeit wurde mit einem Multimeter der Firma *KEITHLEY Modell 2700* gearbeitet (siehe Abbildung 33). Die über Sensoren erfassten Daten werden mit dem Datenlogger in einem bestimmten vorgegebenen Intervall verarbeitet und aufgezeichnet. Die Aufzeichnungen werden mit dem auf *EXCEL* basierendem Programm *ExceLINX* durchgeführt.

### *Thermoelemente*

Für die Brandversuche wurden zur Messung der Bauteiltemperaturen Thermoelemente vom Typ K verwendet, die in den Probekörper einbetoniert wurden. Dabei handelte es sich um isolierte Thermoleitungen der Ausführung GLGL (Doppelleiter mit Glasseide umspinnen, Adern parallel laufend mit Glasseide umflochten und Lacktränkung) mit 2 x 0,50 mm vom Typ K (NiCr-Ni) für Temperaturen bis maximal 1200 °C.

Zur Messung der Brandraumtemperaturen wurden 4 Thermoelementfühler von dem Typ K mit einem Durchmesser von 6 mm und einer Mantellänge von 300 mm verwendet. Es wurden jeweils zwei Thermoelementfühler an einer Seite mit einem Abstand von 8 cm zueinander angeordnet (siehe Abbildung 4-22).



**Abbildung 4-22:** Anordnung der Thermoelementfühler

### **Gasversorgung**

Die Gasversorgung erfolgt durch Propan-Gasflaschen. Eine Flasche verfügt über ein Füllgewicht von 33 kg und ein Volumen von 79 Liter. Der Prüfdruck beträgt 30 bar. An der Gasflasche wurde ein bis zu 2,5 bar regelbarer Manometer angebracht.

Die Regelung für die Gaszufuhr des Brenners erfolgt über ein Manometer, das bis 1,6 bar regelbar ist.

### **Gasbrenner**

In der folgenden Abbildung 4-23 ist der verwendete Gasbrenner dargestellt. Bei diesem Gasbrenner war eine Feinregelung der Flamme, durch die Regelung der Luftzufuhr, mittels Öffnen und Schließen einer Klappe, möglich.

Bei geschlossener Klappe herrscht reines Gas vor, und es wird eine leuchtende, Flamme von geringerer Temperatur erzeugt. Mit zunehmendem Öffnen der Klappe wird mehr Luft zugemischt und es entsteht eine nicht leuchtende, rauschende, heißere Flamme.

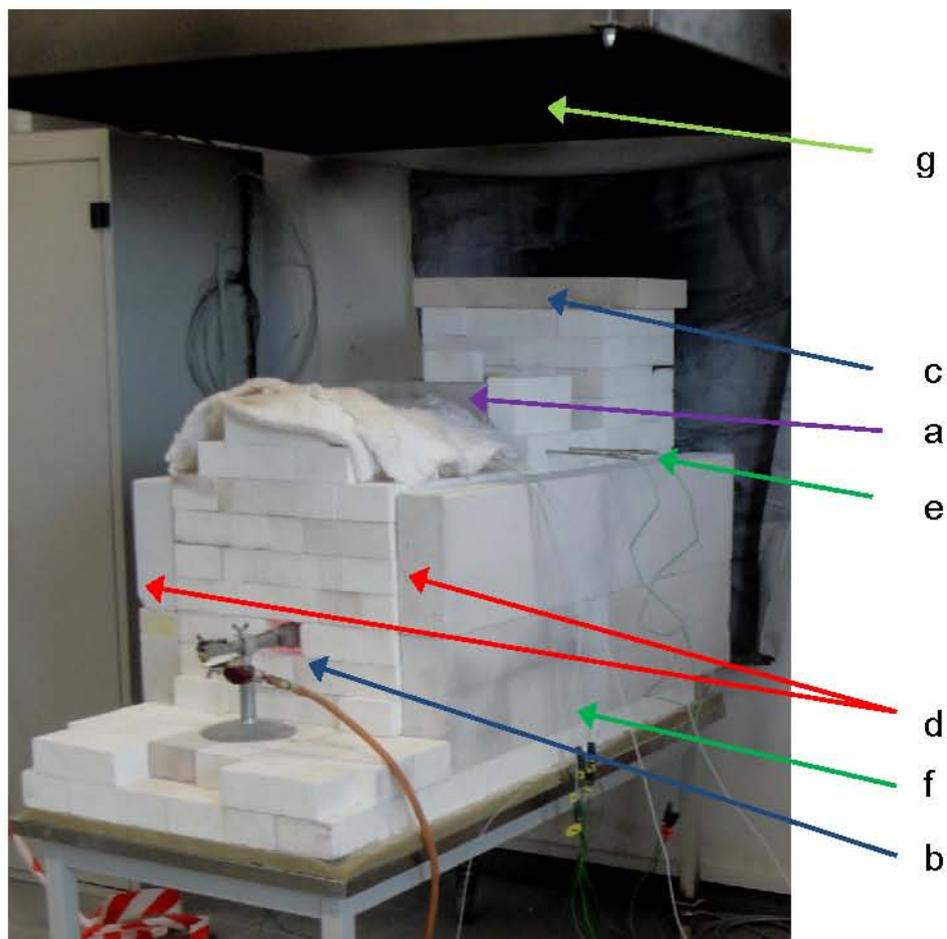


**Abbildung 4-23:** Gasbrenner

### **Brandofen**

Der Brandofen wurde aus feuerfesten Ziegeln mit den Abmessungen 230 mm x 115 mm x 65 mm aufgebaut. Eine Öffnung für den Gasbrenner befindet sich mittig in einer Höhe von 150 mm vom Brandraumboden. Die Abluft wird über bodennahe Abluftöffnungen am Ende des Brandraumes über einen Schornstein, aus feuerfesten Ziegeln, zu der mechanischen Absauganlage geführt.

Für die Brandversuche der darrtrockenen und lufttrockenen Probekörper wurde derselbe Aufbau des Brandofens wie bei den Vorversuchen angewendet, nämlich lediglich einer Brandkammer mit den Innenabmessungen 250 mm x 440 mm x 560 mm aus Feuerfeststeinen und einer Außenverkleidung aus YTONG-Steinen (siehe Abbildung 4-24).



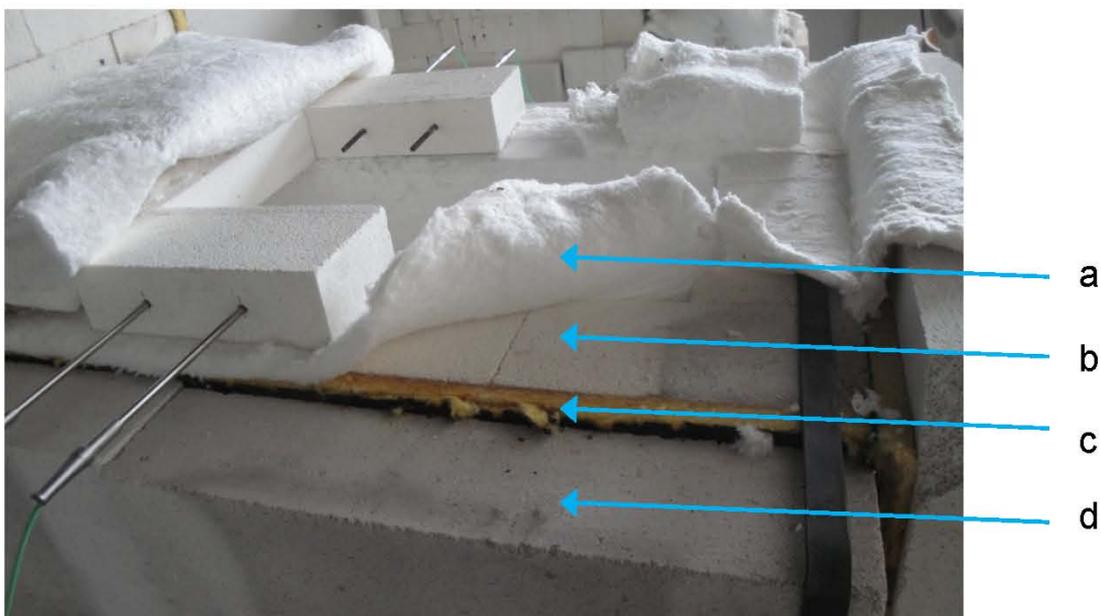
**Abbildung 4-24:** Brandofen ohne Dämmung

Die dargestellte Versuchsanordnung besteht aus:

- a) Probekörper mit den Abmessungen 300 mm x 250 mm x 100 mm
- b) Gasbrenner- Öffnung
- c) Schornstein für die Abluft
- d) YTONG – Verkleidung mit einer Stärke von 10 cm
- e) Thermoelementfühler zur Messung der Brandraumtemperatur
- f) Thermoelemente zur Messung der Bauteiltemperaturen
- g) Mechanische Abluftanlage.

Da bei den Brandversuchen der lufttrockenen Brandprobekörper die mittleren Brandraumtemperaturen ab Minute 10 bis ungefähr Minute 50, trotz einem maximalen Gasdruck von 1,6 bar, leicht unterhalb der Einheits-Temperatur-Zeitkurve lagen, wurde für die Versuchsserie der feuchten Brandprobekörper der Brandofen gedämmt. Die Dämmmaßnahmen hatten eine geringfügige Verkleinerung des Brandraumvolumens zur Folge.

In der Abbildung 4-25 ist der gedämmte Brandofen dargestellt.



**Abbildung 4-25:** Brandofen mit Dämmung

Der gedämmte Wandaufbau besteht aus:

- a) Feuerfesten Silikatmatten mit 1,25 cm
- b) Feuerfesten Ziegeln mit einer Breite von 11,5 cm
- c) Dämmplatten mit einer Stärke von 2,5 cm
- d) YTONG – Verkleidung mit einer Stärke von 10 cm.

Im Zuge der Veränderungsarbeiten wurden Brandkammer und Schornstein seitlich mit Dämmplatten versehen und der komplette Innenraum des Brandofens mit feuerfesten Silikatmatten verkleidet. Es wurden lediglich die Bereiche für die Gasbrenneröffnung und die Abluftöffnungen freigelassen (siehe Abbildung 4-26).



**Abbildung 4-26:** Innenraum des gedämmten Brandofens

Mit diesen Veränderungen konnten Brandraumtemperaturen entsprechend der Einheits-Temperatur-Zeitkurve problemlos mit einem maximalen Gasdruck von ungefähr 1,0 bar erzielt werden.

## 4.2.3 Versuchsdurchführung

### 4.2.3.1 Kalibrierung des Datenloggers

Während der gesamten Versuchsdauer werden sämtliche Temperaturen, die von den Temperatursensoren gemessen werden, mit dem *KEITHLEY* in einem Intervall von 10 Sekunden verarbeitet und mit der auf *EXCEL* basierenden Software *ExceLINX* in Echtzeit aufgezeichnet.

In den folgenden Tabellen 4-6 und 4-7 sind die Einstellungen für den Brandversuch im *ExceLINX* dargestellt. Die Channels des *KEITHLEY* beschreiben die angeschlossenen Sensoren, nämlich die Thermoelementfühler für die Ofentemperatur, die einbetonierten Thermoelemente für die Probertemperatur und den losen Thermoelementen zur Messung der Oberflächentemperaturen und der Raumtemperatur.

**Tabelle 4-6:** *ExceLINX* DMM Scan der Brandversuche

Task: Scan DMM Channels		
<b>Task</b>	Name DMM Scan	
	Description	
	Created By Baustofflehre Brandschutz	
	Company TU Wien	
	Date Created 21.05.2007	
	Date Modified 01.10.2012	
	Status/Cmds Task stopped successfully	
<b>Configuration</b>	Worksheet DMM Config	
<b>Trigger</b>	Model Scan	
	Source Timer	
	Delay Auto msec	Zeit zwischen den Scandurchläufen von einem Kanal zum nächsten
	Reading Count INF	
	Timer 10 sec	Zeit zwischen den Scandurchläufen
	Monitor None	
<b>Data Location</b>	Monitor Limits None	
	Worksheet Daten_log	Tabelle, in welche die Werte geschrieben werden
	Starting Col A	
	Starting Row 2	
	Organize By Rows	
	Autoincrement Use one table	
<b>Data Display</b>	Auto Wrap On	
	Log File	Pfad zum Logfile, bei DMMScan "Record" aktivieren
	Format Delimited text (tab)	
	Add Channel Tags No	
	Add Channels Yes	
<b>Task Data</b>	Add Units No	
	Scroll Display Yes	
	Limits None	
	Timestamp Relative	
	Update Interval 100 msec	

**Tabelle 4-7:** ExcelINX DMM Configure der Brandversuche

Task: Configure Scanning DMM Channels		
Task	Name DMM Config	
	Description	
	Created By Baustofflehre Brandschutz	
	Company TU Wien	
	Date Created 21.05.2007	
	Date Modified 01.10.2012	
Status/Cmds Task stopped successfully		
Instrument	Device MODEL_2700_at_COM1*	
	Password	
	Slot 1 Module M7700*	
	Slot 2 Module M7708*	
	Slot 3 Module	
	Slot 4 Module	
Slot 5 Module		
Front Panel Lockout	On	
Setup	Line Sync	Off
	Autozero	On
	Display Digits	6½
	DCV Input Divider	Off
	Open TC Detection	Off
Temp Scale	°C	
Limits	Digital Outputs	Off
	Pulse Output	Off
	Polarity	High
	Duration	0.02 sec
	Master Latch	Off

Channel Scan List																								
Enb	Channel		Measurement		Scaling			Alarm Limits				Rep Filter		Sampling		Options								
	List	Tag	Function	Range	Rel	Math	miref	b	U	En1	H1	Lo1	En2	H2	Lo2	Enb	Count	Rate	AC BW	Opt 1	Opt 2	Opt 3	Opt 4	
On	201-204	Ofen	TEMP	K	Off	None			Off			Off				Off		FAST		INT				
On	205-210	Probe	TEMP	K	Off	None			Off			Off				Off		FAST		INT				
On	211	Raum	TEMP	K	Off	None			Off			Off				Off		FAST		INT				
On	212-213	Rand	TEMP	K	Off	None			Off			Off				Off		FAST		INT				

#### 4.2.3.2 Gasregelung

Für die Regelung der Gaszufuhr wurde ein Manometer mit einem Regelbereich zwischen 0,0 und 1,6 bar verwendet.

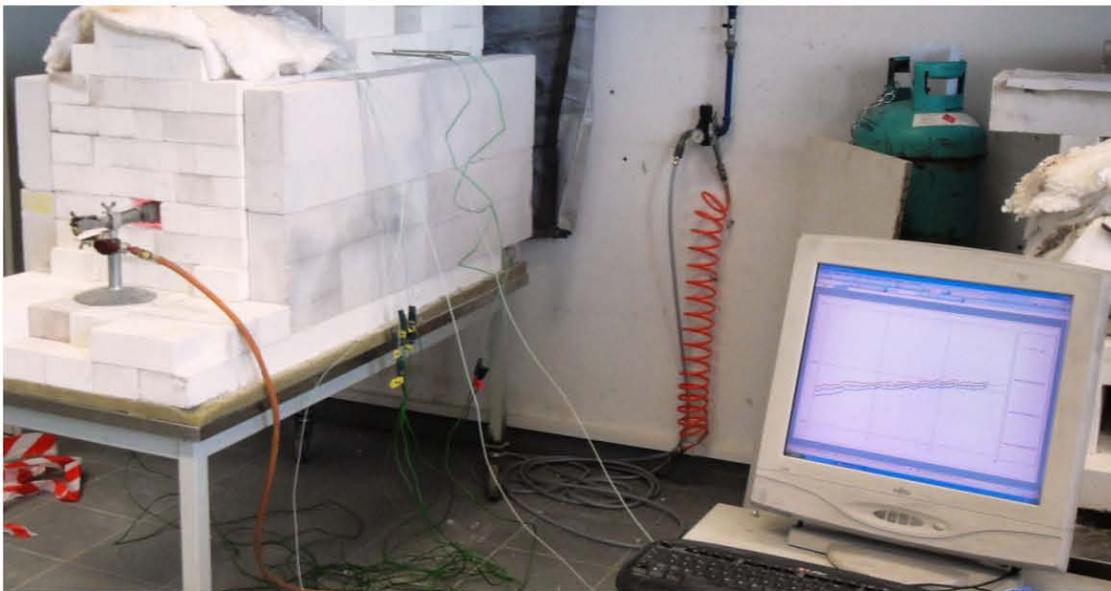
Anhand von EXCEL-Tabellen bzw. EXCEL-Diagrammen, die während des Versuchs in Echtzeit alle 10 Sekunden aktualisiert wurden, konnte die Gaszufuhr entsprechend der ETK gesteuert werden.

Zur Feinregelung der Gaszufuhr behalf man sich EXCEL-Diagrammen, die für bestimmte Zeitabschnitte galten, nämlich:

- 1) von 0 bis 5 Minuten
- 2) von 5 bis 10 Minuten
- 3) von 10 bis 15 Minuten
- 4) von 15 bis 30 Minuten

- 5) von 30 bis 45 Minuten
- 6) von 45 bis 60 Minuten
- 7) von 60 bis 75 Minuten
- 8) von 75 bis 90 Minuten
- 9) von 90 bis 120 Minuten

In der folgenden Abbildung 4-27 ist die Versuchsanordnung während eines Brandversuches einer lufttrockenen Probe dargestellt, in welcher das auf dem Monitor in Echtzeit aktualisierte, dargestellte EXCEL-Diagramm zur Regelung der Gaszufuhr, zu sehen ist.



**Abbildung 4-27:** Brandversuch

**Gasdrücke beim ungedämmten Brandofen:**

Wie aus den Vorversuchen bekannt wurde die Gaszufuhr beim ungedämmten Ofen mit folgenden Gasdrücken geregelt:

- 1) von 0 bis 5 Minuten mit ungefähr 0,5 bar
- 2) von 5 bis 10 Minuten mit ungefähr 0,8 bar
- 3) von 10 bis ungefähr 60 Minuten mit 1,6 bar
- 4) von 60 bis 120 Minuten mit 0,8 bar  $\pm$  0,1 bar.

### ***Gasdrücke beim gedämmten Brandofen:***

Da im ungedämmten Brandraum trotz maximaler Gaszufuhr, bereits bei lufttrockenen Proben mit einem Feuchtegehalt von ungefähr 3,0 M.-%, während der Verdampfungsphase die Einheits-Temperatur-Zeitkurve leicht unterschritten wurde, wurde der Brandraum mit feuerfesten Silikatmatten ausgekleidet (siehe Abschnitt 4.2.2). Somit wurde ein Entweichen der Brandraumhitze verhindert und die erforderlichen Brandraumtemperaturen erzielt.

Die Gaszufuhr des gedämmten Ofens wurde mit folgenden Gasdrücken geregelt:

- 1) von 0 bis 5 Minuten mit ungefähr 0,4 bar
- 2) von 5 bis 10 Minuten mit ungefähr 0,5 bar
- 3) von 10 bis ungefähr 40 Minuten mit 0,8 bar
- 4) von 40 bis 120 Minuten mit 0,6 bar  $\pm$  0,1 bar.

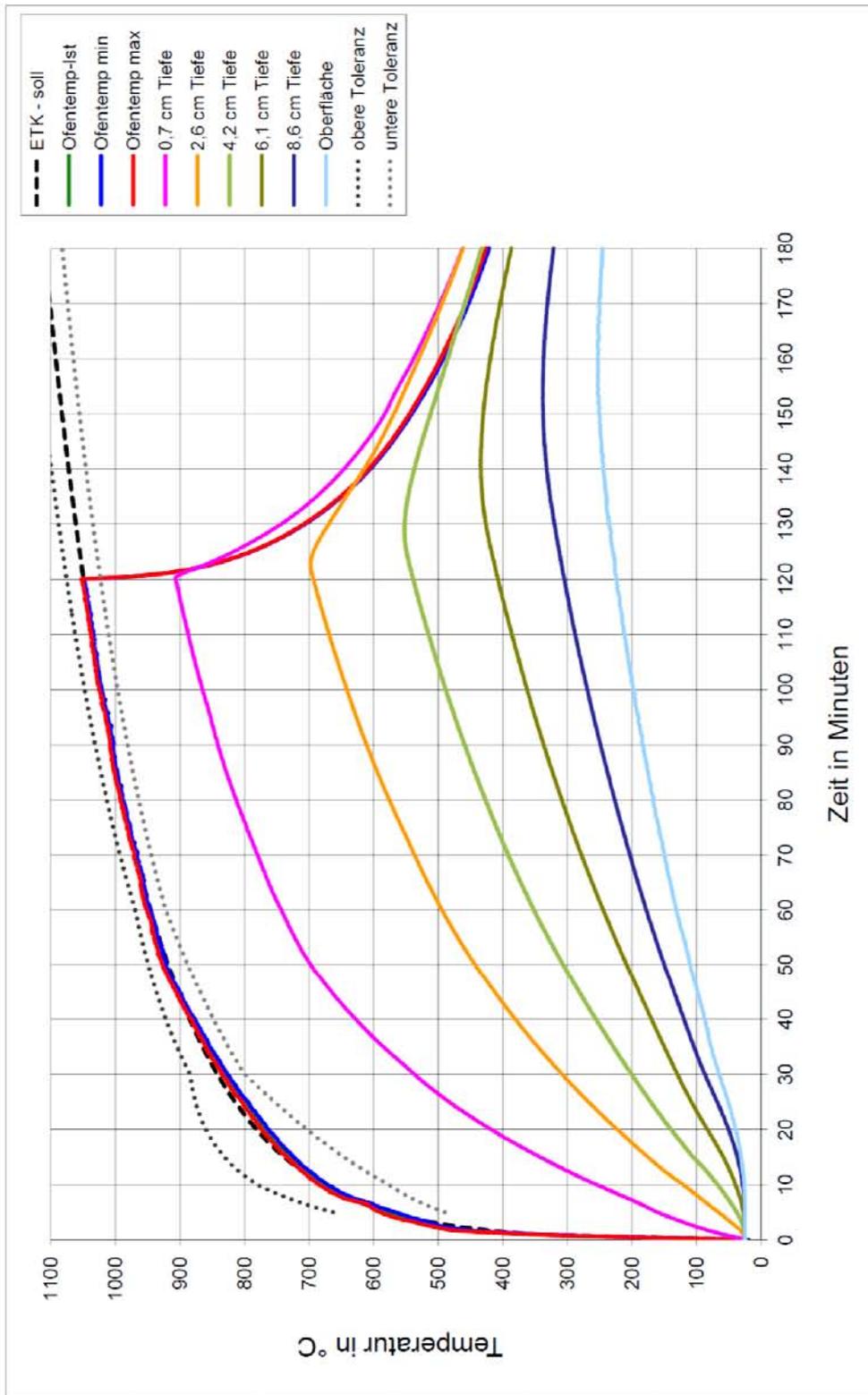
Der Vergleich der Gasdrücke der beiden Ofenvarianten zeigt deutlich, dass der Gasverbrauch bei der gedämmten Variante um fast die Hälfte geringer ist, als bei der ungedämmten Variante, obwohl höhere Temperaturen erzielt werden können.

#### **4.2.4 Versuchsergebnisse**

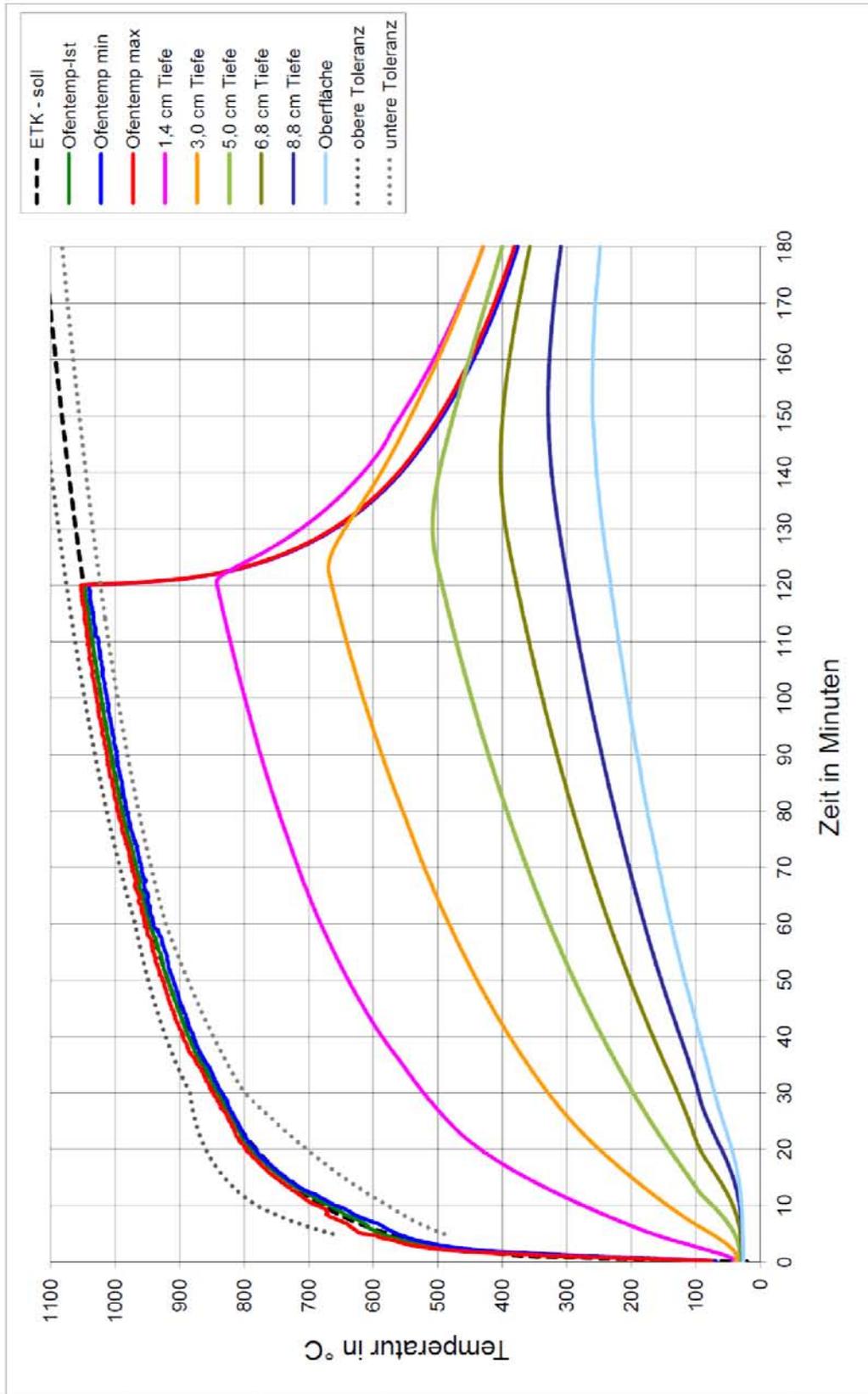
Die Brandraumtemperaturen wurden über 4 Thermoelementfühler, die im Bereich unterhalb des Probekörpers positioniert waren, gemessen. In den Ergebnisdiagrammen stellt die Ofentemperatur-*Ist* die gemittelte Temperatur der 4 Temperaturfühler dar. Die Ofentemperatur-*Min* bzw. die Ofentemperatur-*Max* sind jeweils die kälteste bzw. die wärmste gemessene Temperatur der 4 Thermoelementfühler.

Die gemessenen Bauteiltemperaturen über die Zeit sind ebenfalls in den Ergebnisdiagrammen in Abhängigkeit von der jeweiligen Bauteiltiefe dargestellt. Die genauen Bauteiltiefen wurden nach Beendigung aller Brandversuche ermittelt, indem die Probekörper mittig aufgeschnitten und die Lage der einbetonierten Thermoelemente gemessen wurde.

Die gemessenen Temperaturen während der Brandversuche sind in der Abbildung 4-28 bis Abbildung 4-33 dargestellt.

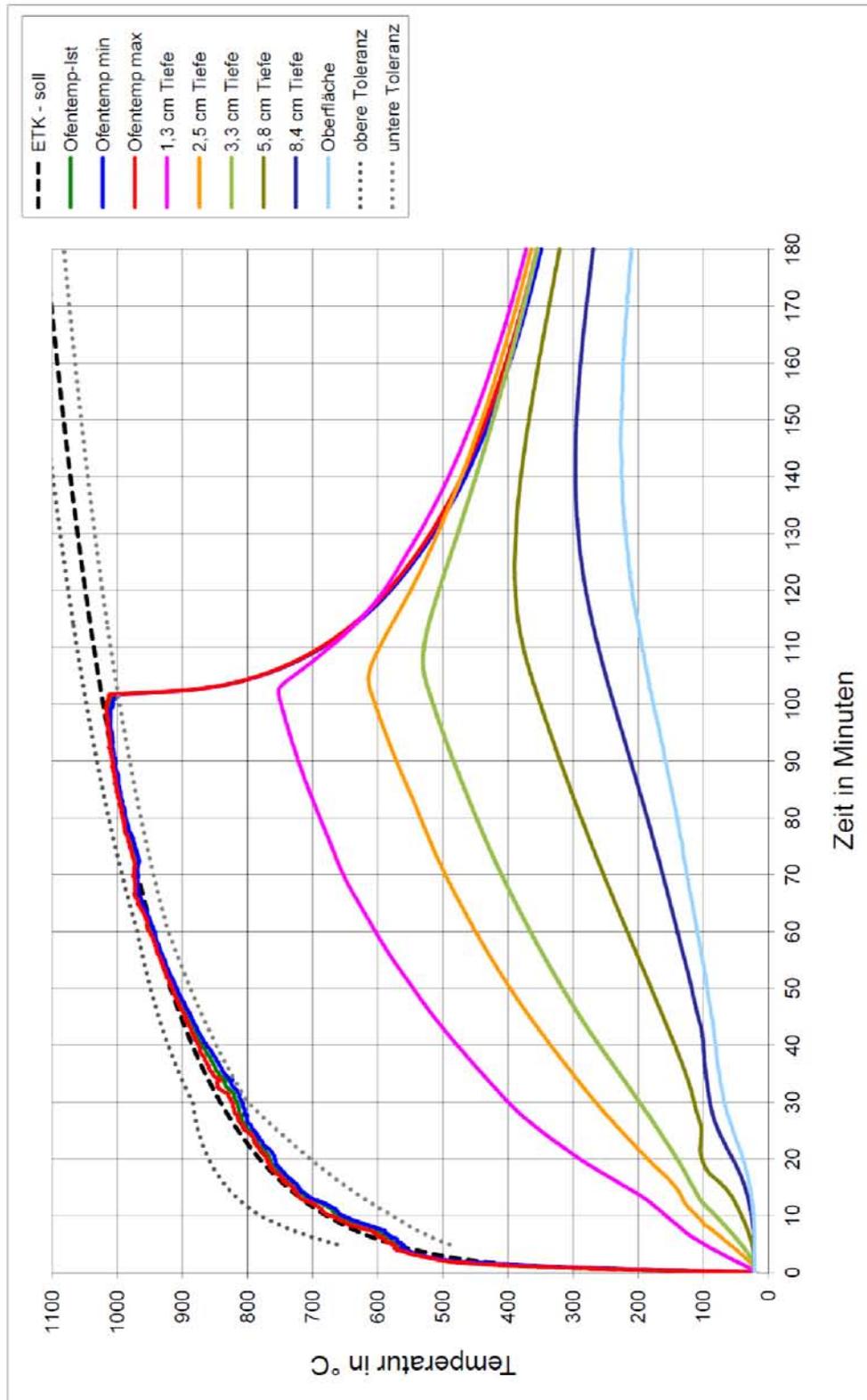


**Abbildung 4-28:** Brandversuch BP-0-1

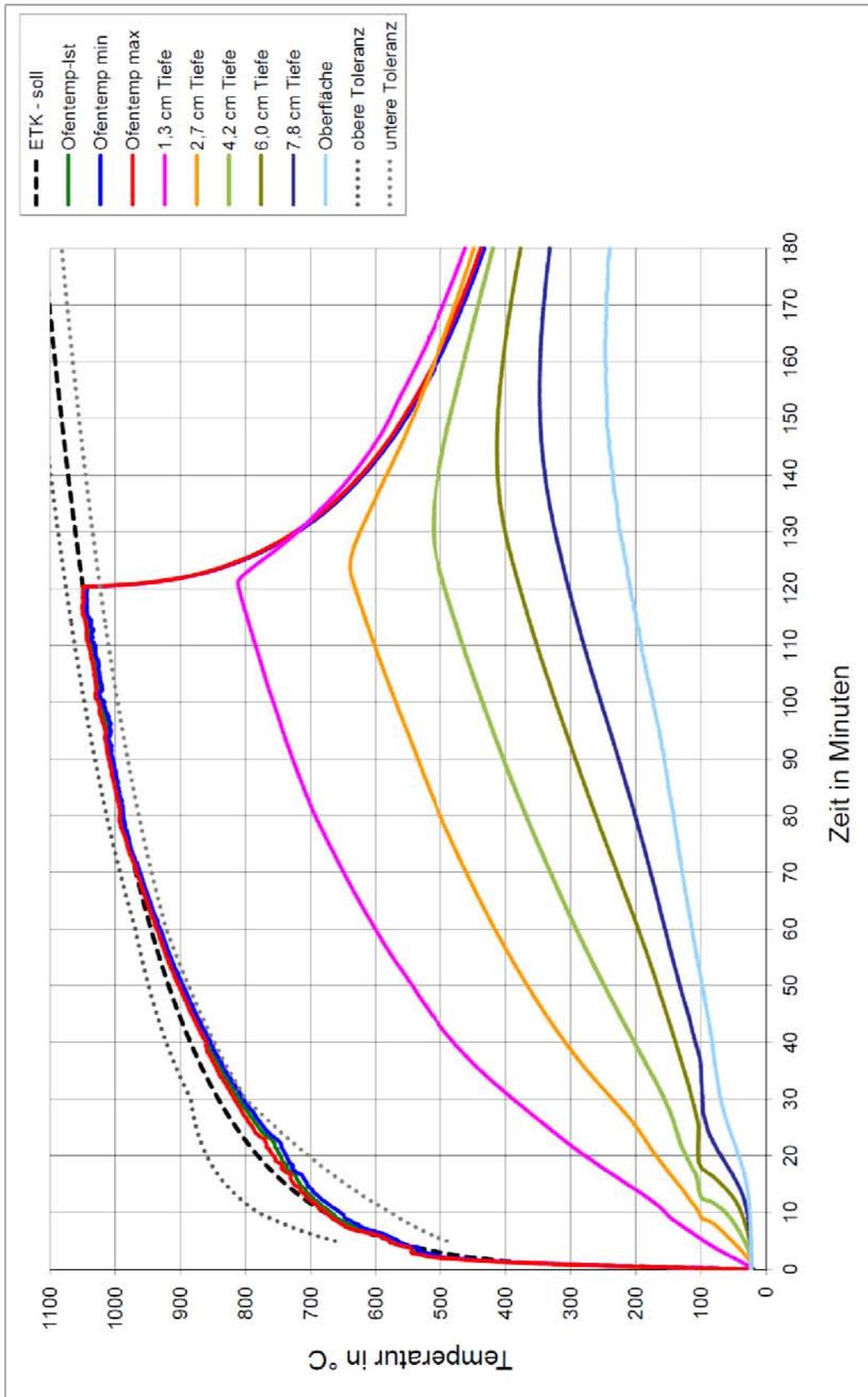


**Abbildung 4-29:** Brandversuch BP-0-2

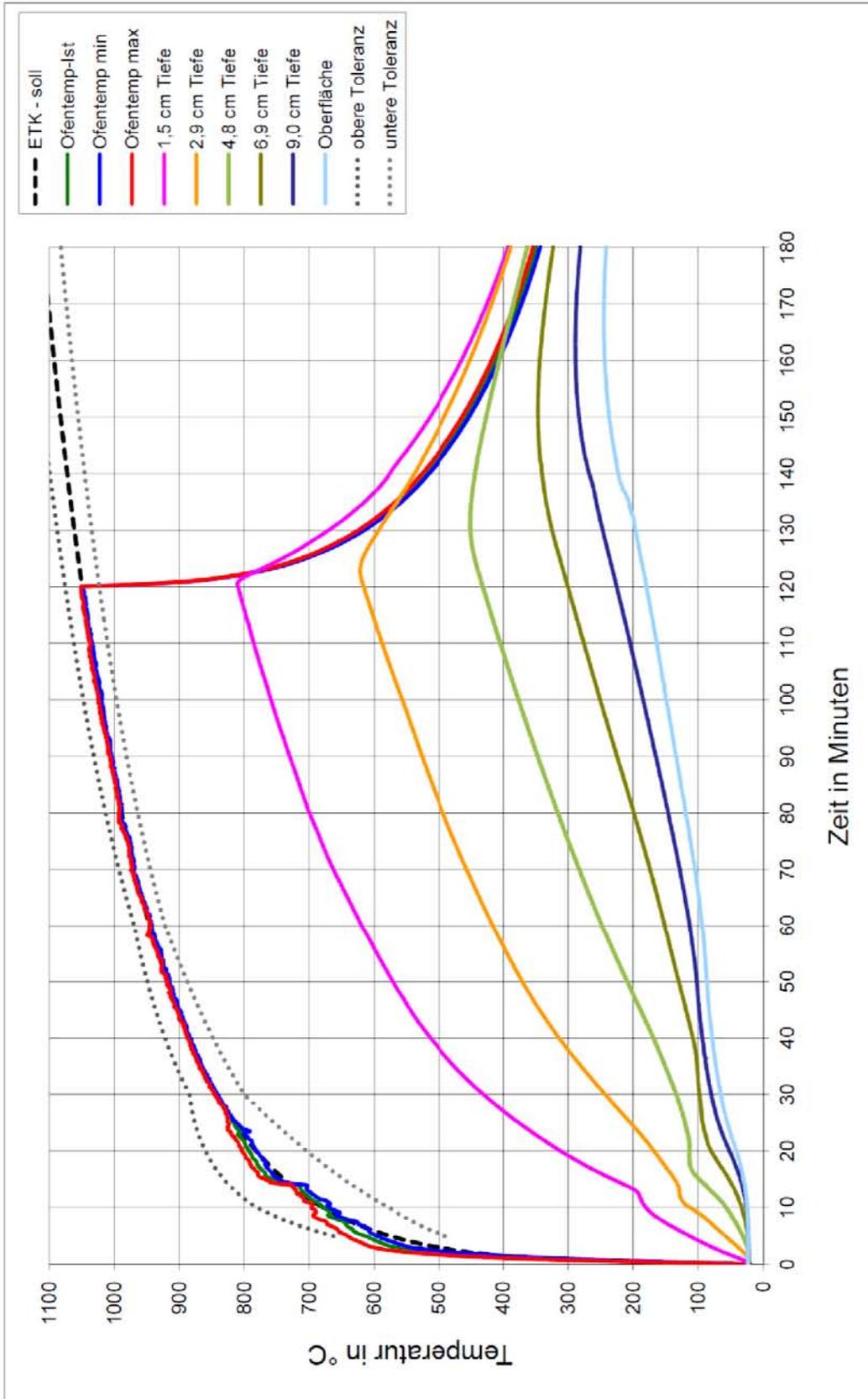
Dieser Versuch BP 2-1 musste vorzeitig abgebrochen werden, da die Gasversorgung über die Gasflasche zu Ende ging.



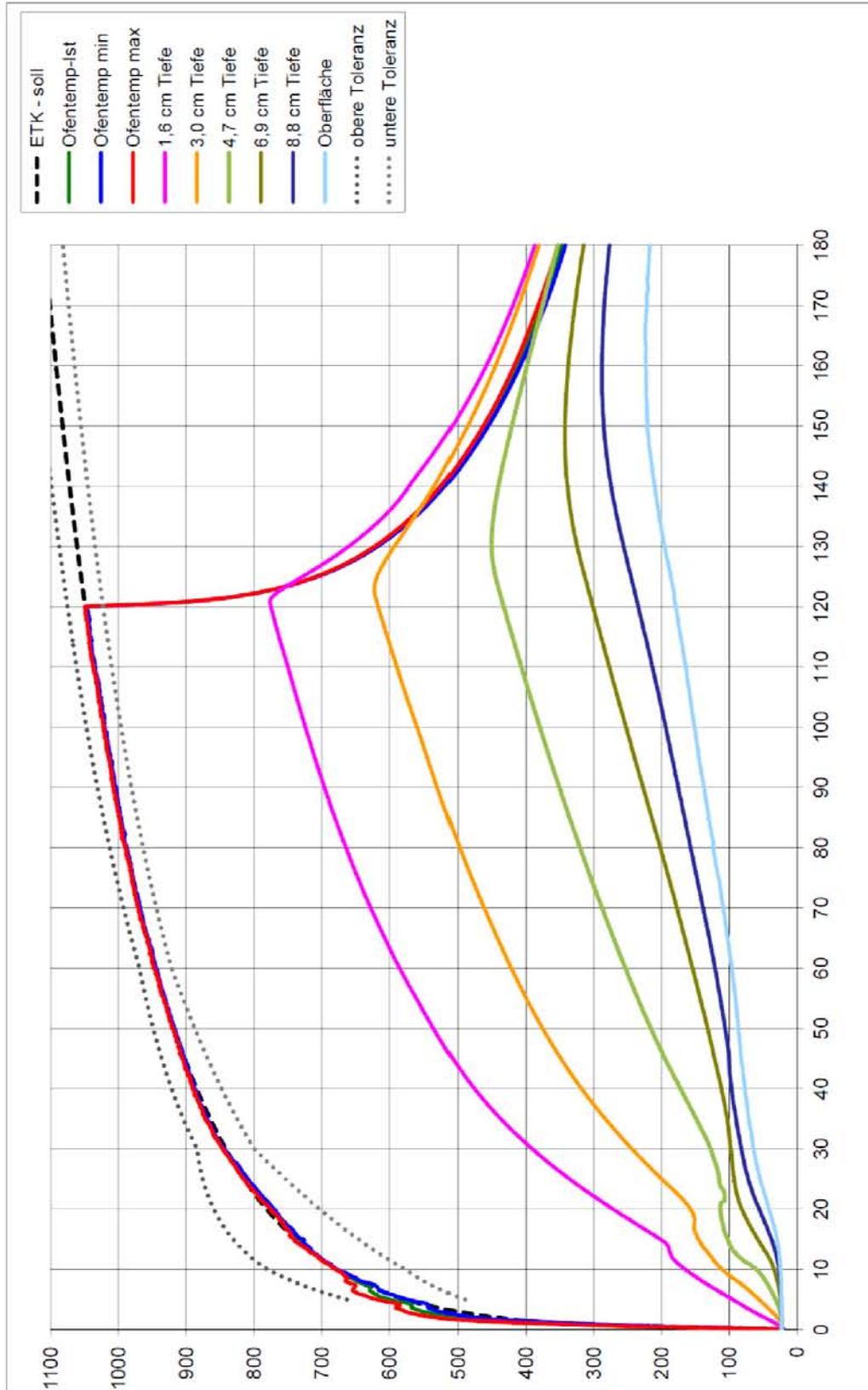
**Abbildung 4-30:** Brandversuch BP-2-1



**Abbildung 4-31:** Brandversuch BP-2-2



**Abbildung 4-32:** Brandversuch BP-4-1



**Abbildung 4-33:** Brandversuch BP-4-2

#### 4.2.5 Interpretation und Vergleich der Brandversuche

In den Abbildungen 4-28 bis 4-33 erkennt man deutlich den Unterschied zwischen den einzelnen Feuchtegehalten. Je feuchter eine Probe ist, desto mehr Wasser verdampft, und umso länger dauert die Verdampfungsphase an.

Bei ungefähren Temperaturen von 105 °C sieht man in Abhängigkeit von der jeweiligen Bauteiltiefe eine mehr oder weniger ausgeprägte Stagnation des Temperaturanstieges, da die zugeführte Energie zur Umwandlung des verdampfbaren Wassers in Wasserdampf benötigt wird.

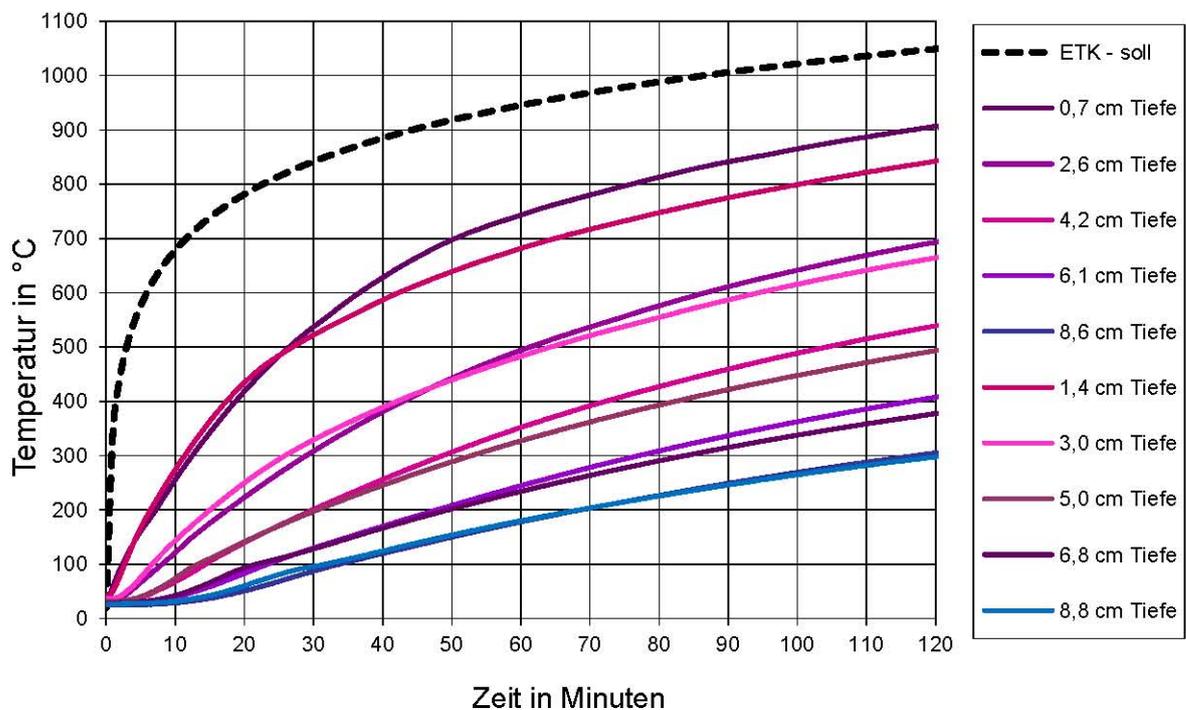
Das Wasser wandert in Richtung der kälteren Seite und verdampft durch Poren oder rinnt aus Rissen im Bauteil heraus. Ein Teil des Wassers verdampft in den Brandraum, wodurch leichte Temperaturveränderungen im Brandraum verursacht werden. Hat das Wasser keine Möglichkeit aus dem Bauteil zu verdampfen, z.B. bei sehr dichtem Beton, kommt es zu Abplatzungen. Bei keinem der 6 Brandversuche kam es zu Abplatzungen. In der nachfolgenden Abbildung 4-34 erkennt man deutlich den Wasseraustritt aus entstandenen Dehnrissen während des Brandversuches.



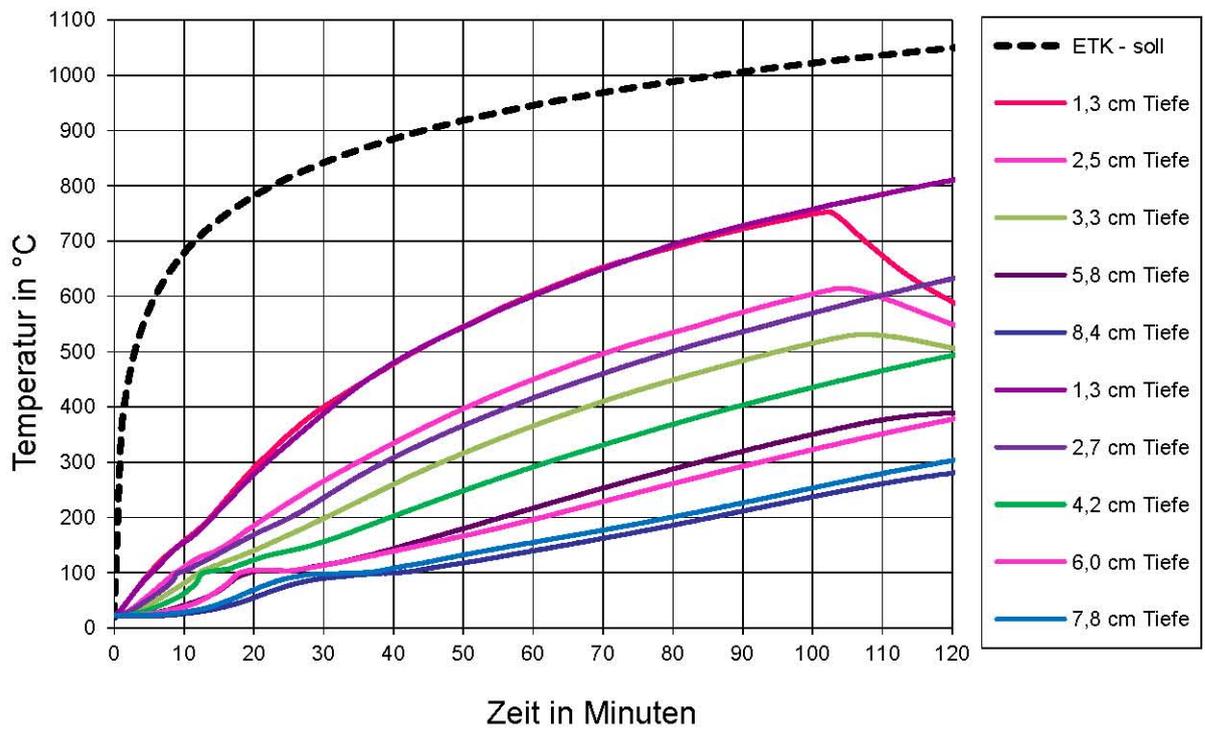
**Abbildung 4-34:** Brandversuch an einem feuchten Probekörper

In den Abbildungen 4-35 bis 4-37 sind die Temperaturverläufe in Abhängigkeit der jeweiligen Feuchtigkeit bzw. Lagerung gegeben. Die Abbildungen zeigen deutlich, dass sich die erhaltenen Temperaturverläufe bei den jeweiligen Feuchtigkeiten ähnlich bzw. gleich verhalten. Lediglich die unterschiedlichen Bauteiltiefen führen zu Unterschieden in den Temperaturkurven.

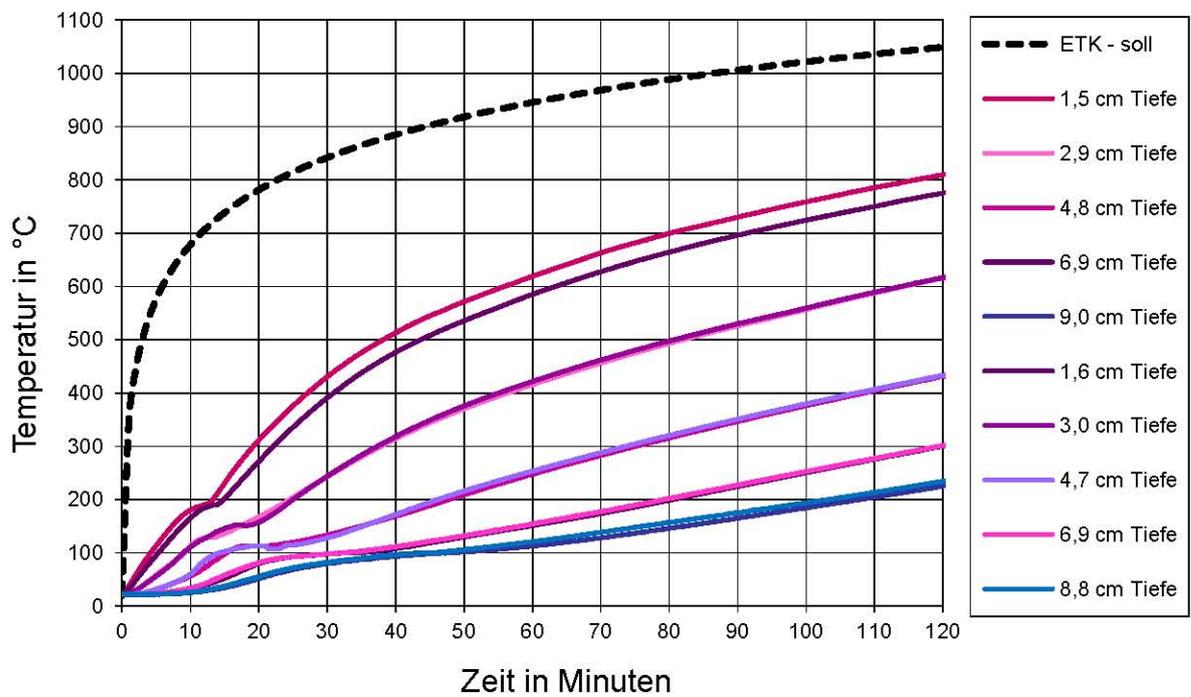
In der Abbildung 4-37, in der die Ergebnisse der Brandversuche mit *feuchten* Probekörpern dargestellt sind, sind die Temperaturkurven des Versuches BP-4-1 mit den Temperaturkurven des Versuches BP-4-2 fast identisch, da sich in diesen Probekörpern die Thermoelemente in nahezu identischen Bauteiltiefen befanden.



**Abbildung 4-35:** Temperaturverläufe der Brandversuche BP-0-1 und BP-0-2



**Abbildung 4-36:** Temperaturverläufe der Brandversuche BP-2-1 und BP-2-2

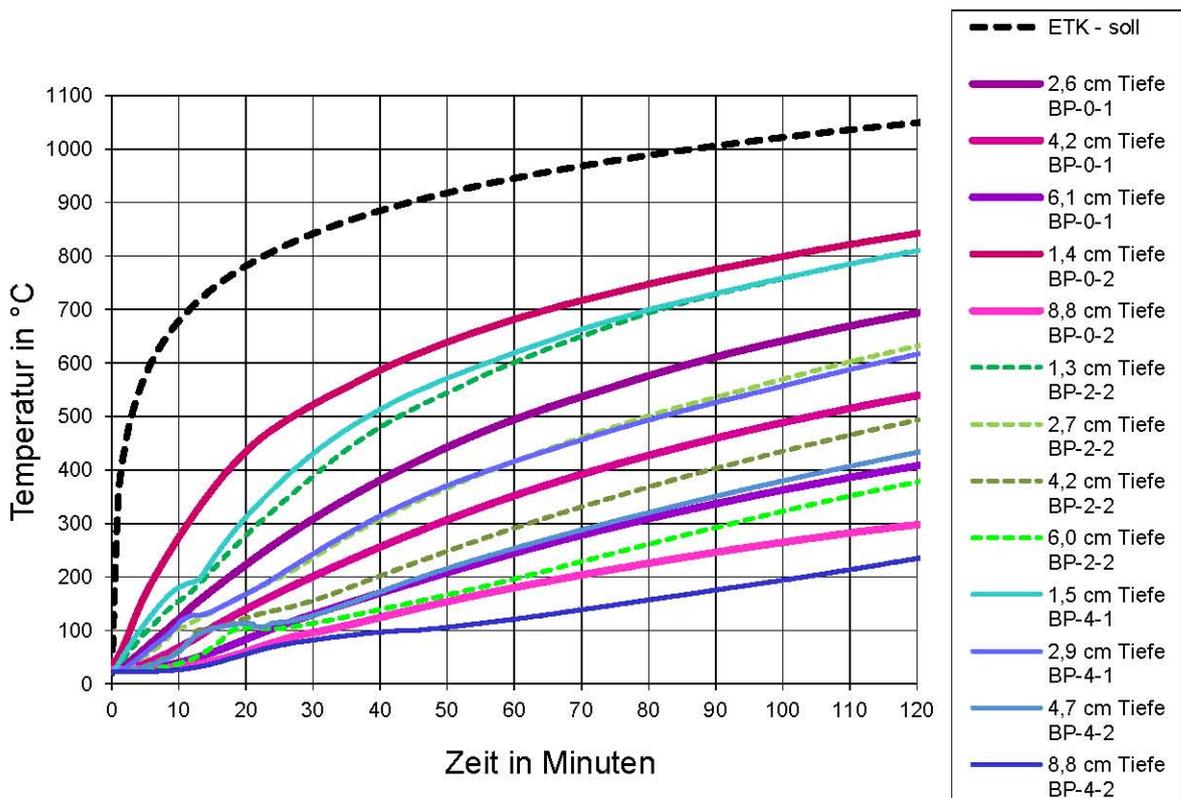


**Abbildung 4-37:** Temperaturverläufe der Brandversuche BP-4-1 und BP-4-2

In der folgenden Abbildung 4-38 ist ein Vergleich zwischen den Temperaturkurven der *darrtrockenen*, *lufttrockenen* und *feuchten* Probekörper gegeben. Hierbei wurden teilweise identische bzw. ähnliche Bauteiltiefen gewählt, um die Temperaturverläufe besser vergleichen zu können.

Die Abbildung 4-38 zeigt deutlich, dass die Temperaturen bei den *darrtrockenen* Probekörpern erwartungsgemäß am höchsten sind. Zwischen den *lufttrockenen* und *feuchten* Probekörpern lässt sich erst bei tieferen Bauteildicken (ab ungefähr 4,0 cm) ein Unterschied erkennen, wobei die gemessenen Temperaturen in den *feuchten* Probekörpern niedriger sind als die in den *lufttrockenen* Probekörpern.

Dieser Sachverhalt kann so gedeutet werden, dass bei höheren Feuchtegehalten die spezifische Wärmekapazität höher ist, demzufolge die Temperaturleitfähigkeit bei feuchten Proben zwischen Temperaturen von 100°C und 200°C niedriger ist, als bei trockenen Proben, und somit der Temperaturanstieg bei feuchten Proben während der Verdampfungsphase etwas langsamer stattfindet.



**Abbildung 4-38:** Vergleich der Brandversuche

## 5 Brandsimulation und Vergleich

In diesem Kapitel wird ein kurzer Einblick über die Grundlagen und die Anwendung des Brandsimulationsprogrammes *BRTemp2D* gegeben. Anschließend erfolgt ein Vergleich mit den aus den Versuchen ermittelten Daten mit den Ergebnissen des Simulationsprogrammes.

### 5.1 Simulationsprogramm *BRTemp2D*

Das Brandsimulationsprogramm *BRTemp2D* Version 1.1 wurde von *Th. Bednar* geschrieben.

#### 5.1.1 Theoretische Grundlagen

In diesem Programm wird das Bauteilverhalten unter Brandbeanspruchung über eine mathematische Behandlung des instationären Wärmeleitproblems numerisch ermittelt.

Dabei wird das Temperaturfeld mit folgender partieller Differentialgleichung gelöst (Formel 5-1):

$$c(w, T) \cdot \rho(w, T) \cdot \frac{\partial T(\vec{x}, t)}{\partial t} = \nabla \lambda(w, T) \nabla T(\vec{x}, t)$$

$w$	Feuchtigkeitsgehalt
$T$	Temperatur
$\rho(w, T)$	Dichte in kg/m <sup>3</sup>
$c(w, T)$	spezifische Wärmekapazität in J/(kg K)
$\lambda(w, T)$	Wärmeleitfähigkeit in W/(m K)

**Formel 5-1:** Differentialgleichung im Simulationsprogramm

Der Feuchtegehalt dient nur zur Ermittlung der Materialdaten und wird während der Berechnung nicht verändert.

Als Randbedingungen werden der konvektive Wärmeübergang und der Strahlungswärmeübergang mit folgender Gleichung berücksichtigt:

$$\alpha_{konv} \cdot (T_{Air} - T_{Oberfl}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{rad}^4 - T_{Oberfl}^4) = -\lambda(w, T) \nabla T(\vec{x}, t)$$

$\alpha_{konv}$	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient in $W/(m^2 K)$
$T_{Air}$	Lufttemperatur in $^{\circ}C$
$T_{Oberfl}$	Oberflächentemperatur in $^{\circ}C$
$T_{rad}$	Strahlungstemperatur in $^{\circ}C$
$\varepsilon$	effektiver Emissionsgrad
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8}$ in $W/(m^2 K^4)$

**Formel 5-2:** Randbedingungen des Simulationsprogramm

### 5.1.2 Dateneingabe

Die Daten werden über Eingabedatenfiles als Textdateien eingegeben, die die Materialeigenschaften und Geometrie des Bauteils bzw. eine Zuordnung der Randbedingungen und der Definition der Ausgabe enthalten. Diese Eingabefiles wurden in *EXCEL* geschrieben und als ein *ASCII*-Text abgespeichert (Tabstoppgetrennt \*.txt). Im Folgenden werden die einzelnen Eingabefiles kurz beschrieben.

#### **Materialdatenfiles:**

Die Materialdaten beschreiben das thermische Verhalten des zu simulierenden Baustoffes in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit und der Temperatur.

Dazu werden die Dichte  $\rho(w, T)$  in  $kg/m^3$ , die spezifische Wärmekapazität  $c(w, T)$  in  $J/kg K$  und die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda(w, T)$  in  $W/(m K)$  als Matrize in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes  $w$  und der Temperatur  $T$  in Form von Textfiles eingegeben. Der Feuchtegehalt  $w$  wird als massenbezogener Feuchtigkeitsgehalt in M-% und die Temperatur in  $^{\circ}C$  angegeben.

Dabei entsprechen die Spalten der Matrix den unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalten und die Zeilen den verschiedenen Temperaturstufen.

Im Zuge dieser Arbeit wurden Simulationen mit den thermischen Eigenschaften gemäß dem *EUROCODE 2*, die bereits im Kapitel 2 (Abschnitt 2.3.2) beschrieben wurden, durchgeführt, wobei gemäß *ÖNORM B 1992-1-2* mit dem unteren Grenzwert für die Wärmeleitfähigkeit von Normalbetonen gerechnet wurde.

Zum Vergleich wurden ebenfalls Simulationen mit den aus den Parallel-Heißdrahtversuchen ermittelten Wärmeleitfähigkeiten (siehe Abschnitt 4.1.6) durchgeführt. Hierbei wurden lediglich die Werte für die Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit der Feuchtigkeit und der Temperatur verändert, die Werte für die Dichte  $\rho(w,T)$  und die spezifische Wärmekapazität  $c(w,T)$  wurden gemäß ÖNORM EN 1992-1-2 angenommen.

Die in den Simulationen angewendeten Feuchtigkeiten sind:

- 0,0 M.-% für die *lufttrockenen* Probekörper
- 3,0 M.-% für die *lufttrockenen* Probekörper
- 6,0 M.-% für die *lufttrockenen* Probekörper

In der folgenden Tabelle ist ein Materialdatenfile beispielhaft dargestellt.

**Tabelle 5-1:** Auszug eines Materialdatenfiles

Beispiel											
150	150	150	Farbe_RGB								
0	Typ_der_Materialdateneingabe_(0=dichte, spezWKP, lambda)										
10	Anzahl_der_Feuchtestützstellen										
250	Anzahl_der_Temperaturstützstellen										
Dichte		0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	6
	20	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300
	25	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300	2300
	1260	2011.93	2011.93	2011.93	2011.93	2011.93	2011.93	2011.93	2011.93	2011.93	2011.93
	1265	2010.92	2010.92	2010.92	2010.92	2010.92	2010.92	2010.92	2010.92	2010.92	2010.92
SpezWKP		0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	6
	20	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
	25	900	900	900	900	900	900	900	900	900	900
	1260	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
	1265	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100
Lambda		0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	6
	20	2.233	2.246	2.260	2.273	2.287	2.300	2.321	2.342	2.363	2.446
	25	2.233	2.246	2.260	2.273	2.287	2.300	2.321	2.342	2.363	2.446
	1260	0.706	0.706	0.706	0.706	0.706	0.706	0.706	0.706	0.706	0.706
	1265	0.706	0.706	0.706	0.706	0.706	0.706	0.706	0.706	0.706	0.706

**Randbedingungsfiles:**

Die Randbedingungen beschreiben die Brandraumtemperaturen und Umgebungtemperaturen in Abhängigkeit von der Zeit und den Wärmetransport über Konvektion und Radiation.

Es werden die Lufttemperatur  $T_{Air}$  in °C, die Strahlungstemperatur  $T_{rad}$  in °C, der konvektive Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_{konv}$  in  $W/(m^2 \cdot K)$  und der effektiver Emissionsgrad  $\varepsilon$  in Abhängigkeit der Zeit  $t$  in Stunden in Form von Textfiles eingegeben.

Für die Luft- und Strahlungstemperaturen wurde die ETK angewendet.

Gemäß der ÖNORM EN 1991-1-2 wurde für die Simulationen der konvektive Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_c$  für die brandabgewandte Seite mit  $4 W/(m^2 \cdot K)$  und für die brandzugewandte Seite mit  $25 W/(m^2 \cdot K)$  angenommen.

Die Werte für den effektiven Emissionsgrad  $\varepsilon$  wurden für die Simulationen gemäß EN 1992-1-2 für die brandzugewandte Seite mit 0,7 und für die brandabgewandte Seite mit 0,0 angenommen.

In der folgenden Tabelle ist ein Randbedingungsfile beispielhaft dargestellt.

**Tabelle 5-2:** Auszug eines Randbedingungsfiles

zeit	Lufttemperatur	AlphaKonv	Beispiel Strahlungstemp	Epsilon
0	20	25	20	0.7
0.002777778	146.95	25	146.9519909	0.7
0.005555556	214.67	25	214.6736435	0.7
0.008333333	261.14	25	261.1446515	0.7
0.011111111	296.56	25	296.5631595	0.7
0.013888889	325.19	25	325.1892705	0.7
0.016666667	349.21	25	349.2136658	0.7
0.019444444	369.91	25	369.9129515	0.7
0.022222222	388.10	25	388.0966424	0.7
0.025	404.31	25	404.3104565	0.7
0.027777778	418.94	25	418.9397843	0.7
0.030555556	432.27	25	432.2669281	0.7
0.033333333	444.50	25	444.5048779	0.7
0.036111111	455.82	25	455.818295	0.7
0.038888889	466.34	25	466.3371111	0.7
0.041666667	476.17	25	476.1656567	0.7
0.044444444	485.39	25	485.3889741	0.7
0.047222222	494.08	25	494.0772974	0.7
0.05	502.29	25	502.289303	0.7

**Eingabefiles:**

Das Eingabefile ist für die Eingabe der Geometrie, der Materialzuordnungen, der Zuordnung der Randbedingungen zu den jeweiligen Rändern, der Definition von Rekorderpositionen und der Ausgabelinien zuständig.

In der folgenden Tabelle ist ein Eingabefile beispielhaft dargestellt.

**Tabelle 5-3:** Auszug eines Eingabefiles

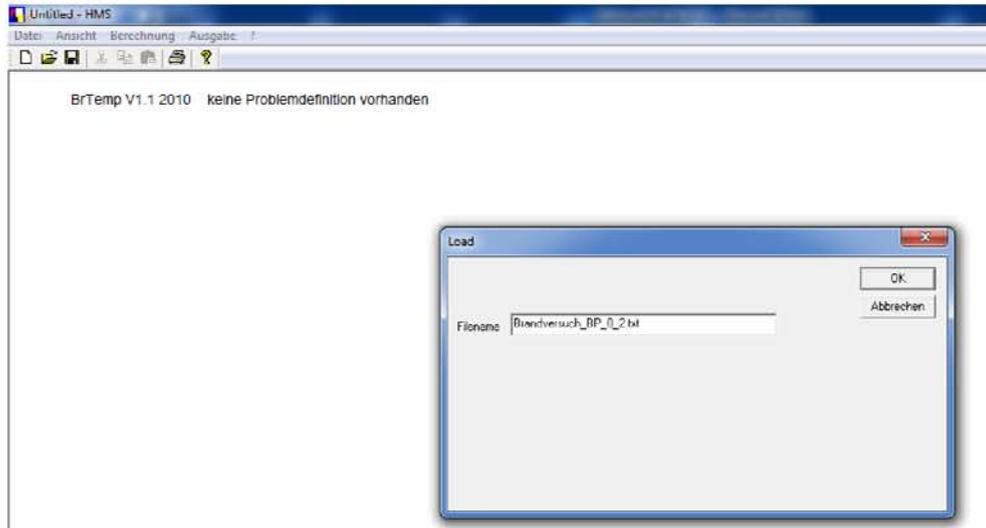
Eingabefile_Brandversuch_BP_0_1		Brandversuch_BP_0_1	
3	Anzahl_Teilungen_x_Richtung		
0.09	0.1	0.09	Länge
1	1	1	Dehnung
9	10	9	Zellen
2	Anzahl_Teilungen_y_Richtung		
0.05	0.05		Länge
1	1		Dehnung
10	10		Zellen
1	Anzahl_Blöcke		
0	0	3	2
			Lamda_gemessen 20. M 0.0
			Betonkörper
3	Anzahl_Randbedingungen_Typ		
1	0		Schnittflächen
3	ETK.txt		Brandraum
3	kalte_Seite.txt		Nebenraum
2	Anzahl_Ränder		
0	2	3	2
0	0	3	0
			3
			2
			Oberseite_Probekörper
			Unterseite_Probekörper
6	Anzahl_Recorderpositionen		
0.14	0.0		Brandraum
0.14	0.007		0.7_cm
0.14	0.026		2.6_cm
0.14	0.042		4.2_cm
0.14	0.061		6.1_cm
0.14	0.086		8.6_cm

Das Eingabefile ist folgendermaßen aufgebaut:

- Geometrie des Bauteils in einem gewählten Raster
- Zugehörige Materialdatenfile
- Feuchtigkeit des Bauteils
- Zugeordnete Randbedingungen
- Definierte Temperatur-Messstellen.

**Simulation:**

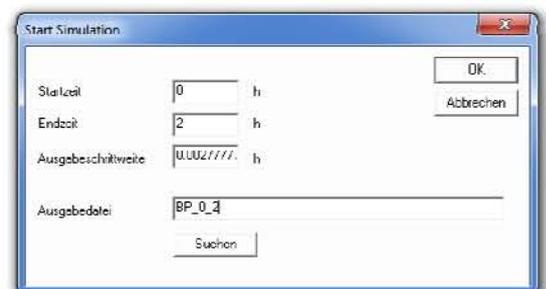
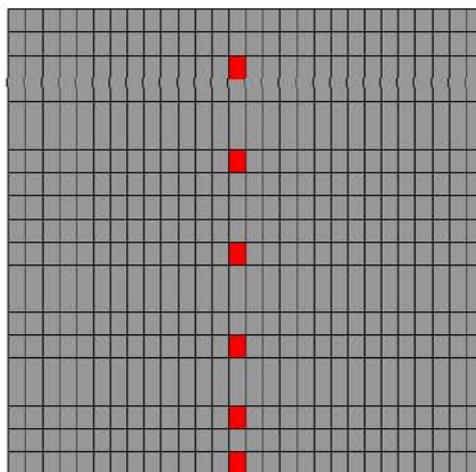
Um die Simulation starten zu können, muss zunächst das entsprechende Eingabefile geladen werden. In der folgenden Abbildung 5-1 ist dies dargestellt.



**Abbildung 5-1:** Eingabemaske im *BRTemp2D*

Vor dem Start der Simulation werden die Start- und Endzeit, das Ausgabe- bzw. Messintervall und der Name der Ausgabedatei definiert. Die roten Kästchen im Betonraster (siehe Abbildung 5-2) stellen die definierten Messpositionen dar.

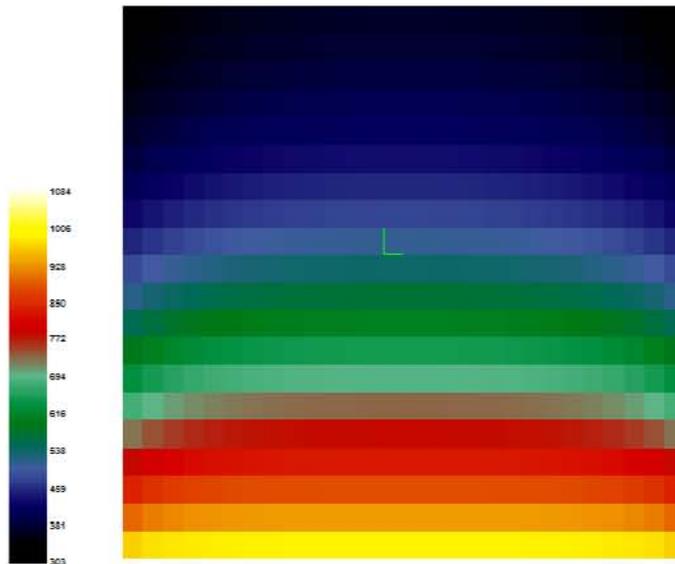
DrTemp V1.1 2010 Definitionsfile: Brandversuch\_DP\_0\_2.bt Berechnung 0 Zeitpunkt 0.000000 sek 0.000000 dt 0.000000 KHz0 KHz0 Feld:  
AnzX:28 AnzY:20 steps:0 failsteps:0 mathemosteps:0  
Darstellung Fold: Material/Randbedingung



**Abbildung 5-2:** Start der Simulation

In der folgenden Abbildung 5-3 ist der simulierte Temperaturverlauf im Bauteil dargestellt.

BrTemp V1.1 2010 Definitionsfile: Brandversuch\_BP\_0\_2.txt Berechnung 1 Zeitpunkt 1.997zeit 7190.000000 dt 4.311527 KntX14 KntY12 Feld:Temperaturfeld  
 AnzX 28 AnzY 20 steps 12684 failsteps12 matherrorsteps0  
 Darstellung Feld: Temperatur °C



**Abbildung 5-3:** Temperaturverlauf nach der Brandsimulation

### 5.1.3 Simulationsergebnisse

Es wurden 6 Simulationen mit den empirisch ermittelten Wärmeleitfähigkeiten aus den Heißdrahtversuchen und 6 Simulationen mit den unteren Grenzwerten der Wärmeleitfähigkeit nach ÖNORM EN 1992-1-2 durchgeführt.

Für die Simulationen wurden die entsprechenden Tiefen und Feuchtigkeiten aus den 6 durchgeführten Brandversuchen BP-0-1 bis BP-4-2 (siehe Abbildungen 4-28 bis 4-33) verwendet.

Die berechneten Temperaturen aus den Brandsimulationen mit den ermittelten Wärmeleitfähigkeiten "BP" sind in den Anhängen 42 bis 47 und aus den Brandsimulationen "EC2" mit den Wärmeleitfähigkeiten aus dem *EUROCODE 2* in den Anhängen 48 bis 53 dargestellt.

## 5.2 Interpretation und Vergleich der Simulationsergebnisse

In den Abbildungen 5-4 bis 5-6 sind die Ergebnisse aus den Brandversuchen (BP-0-1, BP-2-2 und BP-4-1) und jeweils die dazugehörigen Simulationen (BP\_0\_1, BP\_2\_2 und BP\_4\_1) mit den ermittelten Wärmeleitfähigkeiten bzw. die Simulationen (EC2\_0\_1, EC2\_2\_2 und EC2\_4\_1) mit den unteren Grenzwerten der Wärmeleitfähigkeit nach EN 1992-1-2 dargestellt.

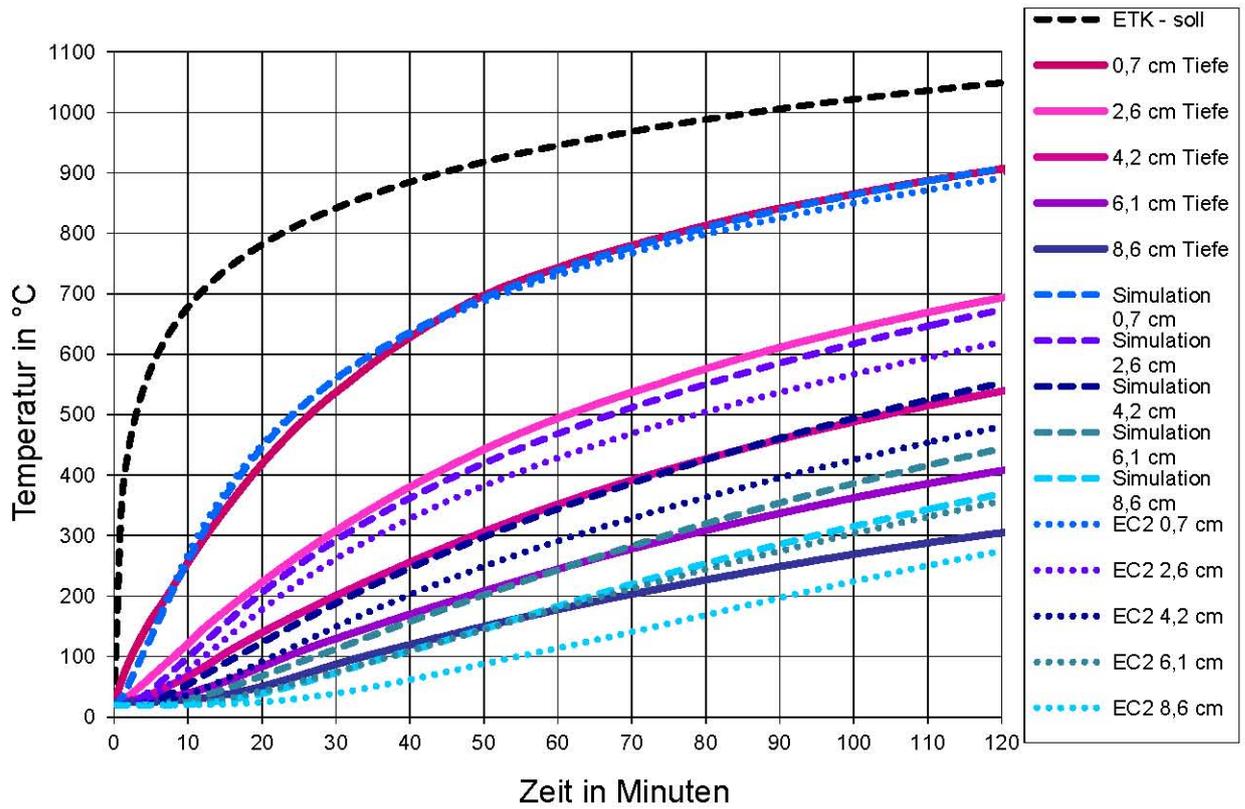
Generell liegen die berechneten Temperaturen aus den Simulationen mit den ermittelten Wärmeleitfähigkeiten aus den Heißdrahtversuchen näher an den tatsächlichen Temperaturen als die Simulationsergebnisse mit dem unteren Grenzwert nach *EC2*.

Mit zunehmender Bauteiltiefe liegen die berechneten Temperaturen nach *EC2*, mit jeweils wachsendem Unterschied und mit einer maximalen Temperaturdifferenz von ungefähr 100 °C, unterhalb der gemessenen Temperaturen.

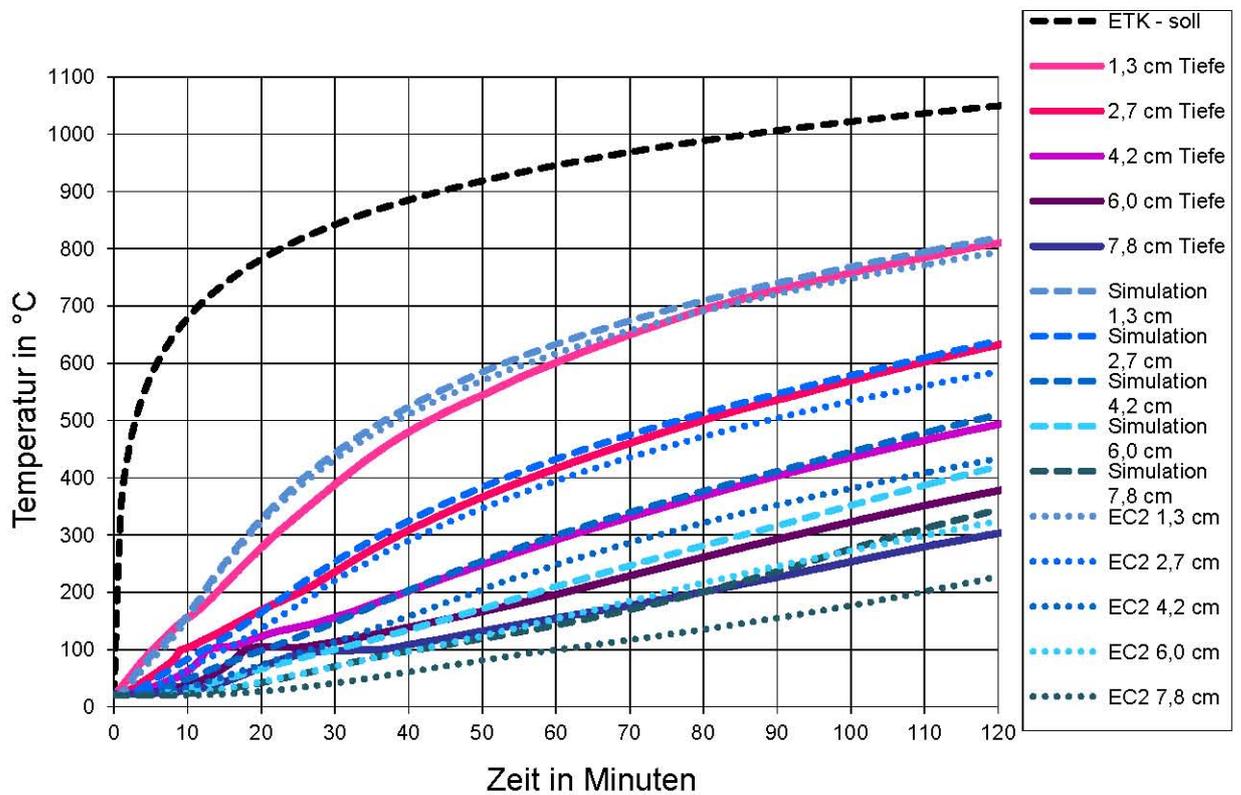
Hingegen treffen generell, bis auf einige Ausnahmen, die simulierten Temperaturen mit den ermittelten Wärmeleitfähigkeiten die gemessenen Temperaturen aus den Brandversuchen auch unabhängig von der Bauteiltiefe, mit maximalen Temperaturunterschieden von ungefähr 50°C.

Folglich sollten die Werte der thermischen Leitfähigkeiten nach *EC2* insbesondere bei Normalbetonen mit quarzhaltigen Zuschlägen erhöht werden, oder sollten zumindest mit den oberen Grenzwerten für die Wärmeleitfähigkeit nach *EC2* angenommen werden.

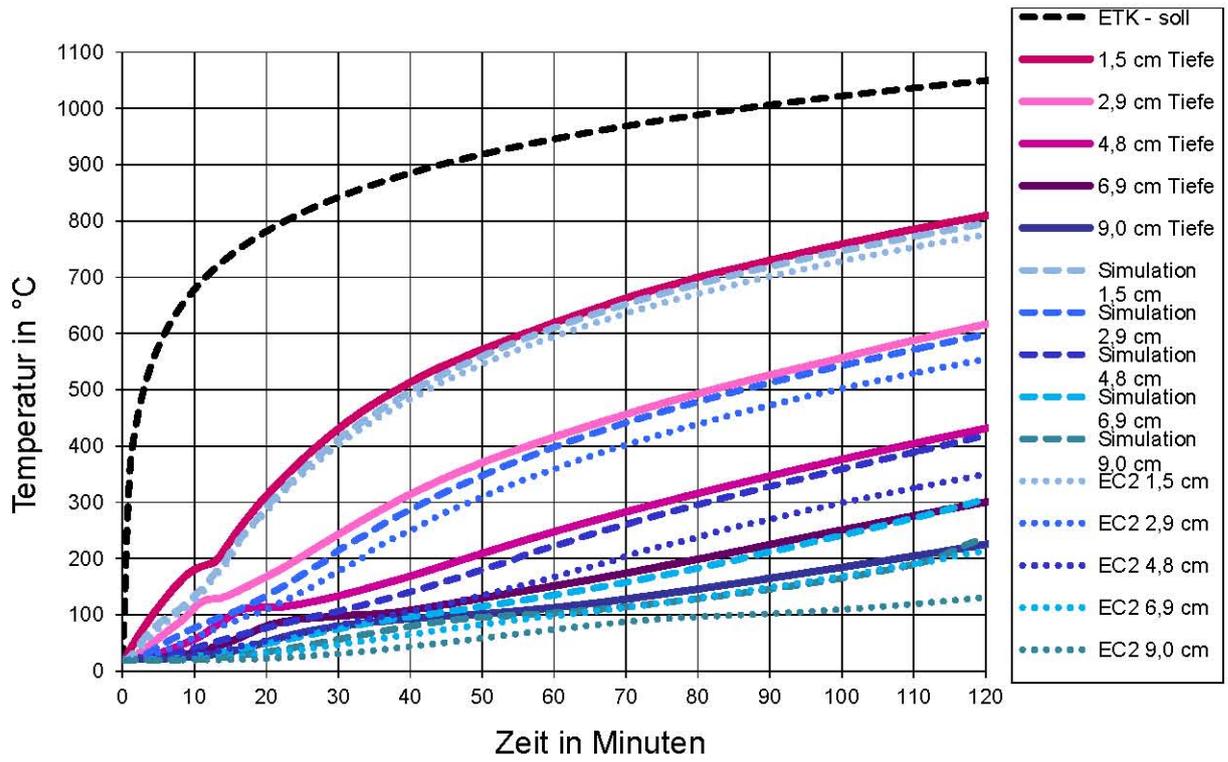
In den folgenden Abbildungen 5-4 bis 5-6 stellen die durchgehenden Kurven die gemessenen Temperaturen aus den Brandversuchen dar, die strichlierten Kurven die mit den gemessenen Wärmeleitfähigkeiten simulierten Temperaturen und die punktierten Kurven stellen die berechneten Temperaturen mit den Werten nach *EC2* dar.



**Abbildung 5-4:** Vergleich der Serie BP-0-1, BP\_0\_1 und EC2\_0\_1



**Abbildung 5-5:** Vergleich der Serie BP-2-2, BP\_2\_2 und EC2\_2\_2



**Abbildung 5-6:** Vergleich der Serie BP-4-1, BP\_4\_1 und EC2\_4\_1

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

### 6.1 Zusammenfassung

Ziel der vorliegenden Arbeit war die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von Normalbetonen mit quarzhaltigen Zuschlägen bei hohen Temperaturen zur weiteren Anwendung in diversen Brand-Simulationsprogrammen, wobei gleichzeitig ein Vergleich mit den derzeitig normativ geregelten Werten nach *EUROCODE 2* stattfinden sollte.

Die Betonprobekörper wurden aus einer Mischung mit einem Quarzzuschlag mit einem  $\text{SiO}_2$ -Anteil von 95% und einem Portlandzement hergestellt. Die verwendeten Mischungen mit einem Wasser-Bindemittelwert von 0,55 lieferten folgende Frischbetoneigenschaften:

- Ausbreitmaß  $\leq 340$  mm  $\rightarrow$  steife bzw. sehr steife Konsistenz
- Luftporengehalt 2,4 %

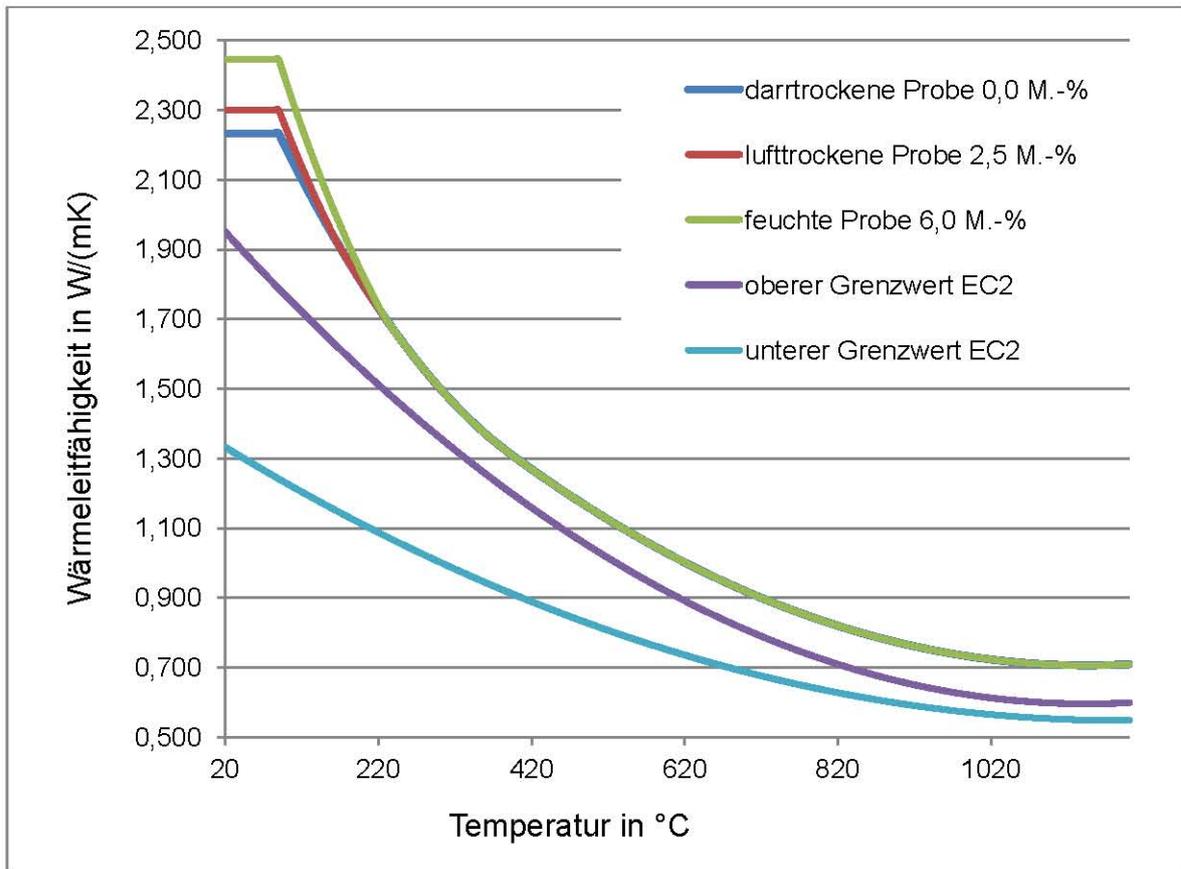
Die mittlere Würfeldruckfestigkeit des Betons nach 28 Tagen betrug  $41,61 \text{ N/mm}^2$  und entsprach somit einer Druckfestigkeitsklasse C 30/37.

Die hergestellten Probekörper wurden nach einer 7-tägigen Wasserlagerung entweder luftgetrocknet und anschließend darrgetrocknet, nur luftgetrocknet oder in einem Behälter über Wasser gelagert. Die somit erhaltenen Feuchtegehalte der Probekörper betragen ungefähr 0 M.-%, 2,5 M.-%, 3,0 M.-% und 6,0 M.-%.

Zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit wurde das Paralleldrahtverfahren gemäß ÖNORM EN 993-15, welches für Baustoffe mit Wärmeleitfähigkeiten kleiner als  $25 \text{ W / (m}\cdot\text{K)}$  geeignet ist, angewendet. Bei diesem instationärem Verfahren basiert die Auswertung auf einer speziellen Lösung einer *FOURIER'schen* Differentialgleichung.

Im Zuge dieser Arbeit wurden jeweils die Wärmeleitfähigkeit von Probekörpern mit Feuchtegehalten von 0 M.-%, 2,5 M.-% und 6,0 M.-% bei ungefähren Prüftemperaturen von  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $110 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $125 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  und  $600 \text{ }^\circ\text{C}$  mit dem Parallel-Heißdraht-Verfahren ermittelt.

In der nachfolgenden Abbildung 6-1 sind die mit dem Parallel-Heißdraht-Verfahren ermittelten Wärmeleitfähigkeiten im Vergleich zu den oberen und unteren Grenzwerten dargestellt:



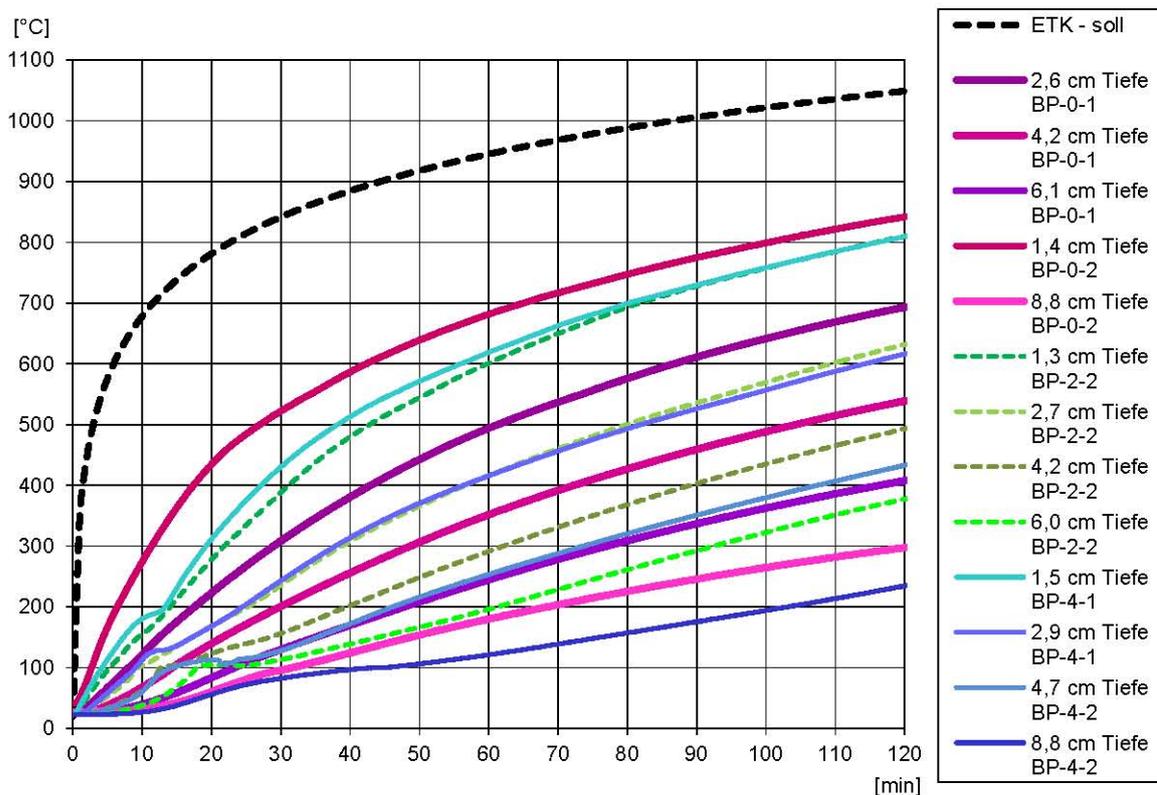
**Abbildung 6-1:** Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten

Die ausgewerteten Versuchsergebnisse lieferten Wärmeleitfähigkeiten in Abhängigkeit von der Temperatur und dem jeweiligen Feuchtegehalt, die oberhalb der oberen Grenzwerte der Wärmeleitfähigkeit nach ÖNORM EN 1992-1-2 liegen. Der Einfluss des Feuchtegehaltes ist dabei bis zu Temperaturen von 230 °C bemerkbar.

Um diese empirisch ermittelten Wärmeleitfähigkeiten auch Vergleichen zu können, wurden Brandversuche an Probekörpern, mit derselben Zusammensetzung und ähnlichen Feuchtegehalten wie die der Probekörper für die Heißdrahtversuche, durchgeführt.

Die Brandprobekörper wurden bis zu einer Branddauer von 120 Minuten bei Temperaturen gemäß der Einheits-Temperatur-Zeitkurve geprüft. Dabei wurden die im Probekörper mit zunehmender Branddauer ansteigenden Temperaturen in ungefähren Tiefen von 1 cm, 3 cm, 5 cm, 7 cm und 9 cm in einem Intervall von 10 Sekunden aufgezeichnet. Die Brandprobekörper wiesen zum Zeitpunkt der Versuche Feuchtegehalte von 0 M.-%, 3,0 M.-% und 6,0 M.-% auf.

Ein Vergleich der Brandversuche zwischen repräsentativen Ergebnissen der jeweiligen Feuchtegehalte ist in der folgenden Abbildung 6-2 dargestellt:



**Abbildung 6-2:** Vergleich der Brandversuche

Die Temperaturmessungen zeigten, dass die Temperaturen bei den bis zur Massekonstanz getrockneten Probekörpern am höchsten waren. Dieser Sachverhalt kann so gedeutet werden, dass bei höheren Feuchtegehalten die spezifische Wärmekapazität höher ist, demzufolge die Temperaturleitfähigkeit bei feuchten Proben zwischen Temperaturen von 100°C und 200°C niedriger als bei trockenen Proben ist, und somit der Temperaturanstieg bei feuchten Proben langsamer stattfindet.

Den Abschluss dieser Arbeit bilden die durchgeführten Brandsimulationen mit der Simulationssoftware *BRTemp2D Version 1.1*.

Es wurden Simulationen mit den thermischen Eigenschaften gemäß *EUROCODE 2* durchgeführt, wobei gemäß der nationalen Festlegungen nach *ÖNORM B 1992-1-2* mit dem unteren Grenzwert für die Wärmeleitfähigkeit von Normalbetonen gerechnet wurde.

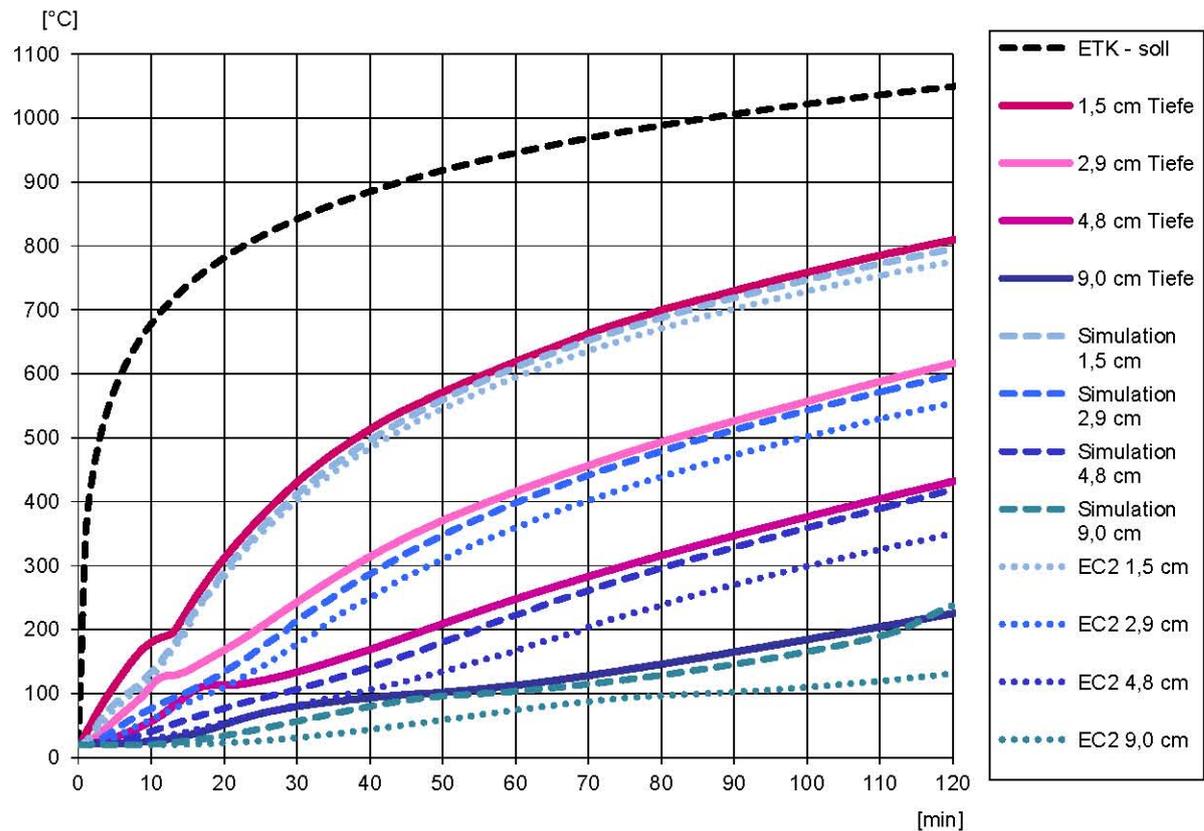
Es wurden ebenfalls Simulationen mit den aus den Parallel-Heißdrahtversuchen ermittelten Wärmeleitfähigkeiten durchgeführt, wobei im Vergleich zu den Simulationen nach *EC2* lediglich die Werte für die Wärmeleitfähigkeiten verändert wurden.

Gemäß der *ÖNORM EN 1991-1-2* wurde für die Simulationen der konvektive Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha_c$  für die brandabgewandte Seite mit  $4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  und für die brandzugewandte Seite mit  $25 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  angenommen.

Die Werte für den effektiven Emissionsgrad  $\varepsilon$  wurden für die Simulationen gemäß *EN 1992-1-2* für die brandzugewandte Seite mit 0,7 und für die brandabgewandte Seite mit 0,0 angenommen.

In der Regel lieferten die Simulationen Temperaturkurven, die den tatsächlichen Temperaturverläufen aus den Brandversuchen relativ gut entsprechen, wobei die berechneten Temperaturen aus den Simulationen mit den Werten aus den Heißdrahtversuchen näher an den tatsächlichen Temperaturen als die Simulationsergebnisse mit dem unteren Grenzwert nach *EC2* lagen.

In der folgenden Abbildung 6-3 ist ein repräsentativer Vergleich zwischen den Temperaturkurven aus den Brandversuchen, den simulierten Temperaturen mit den ermittelten Wärmeleitfähigkeiten aus den Parallel-Heißdraht-Versuchen und den Simulationen mit den Werten nach *EC2* dargestellt.



**Abbildung 6-3:** Vergleich der Brandsimulationen

Mit zunehmender Bauteiltiefe wächst die Abweichung der simulierten Temperaturen nach *EC2* zu den Temperaturverläufen aus den Brandversuchen, bei den Simulationen mit den Werten aus den Heißdrahtversuchen ist hingegen kein signifikantes Verhalten der Temperaturabweichungen zu erkennen.

Aus den Versuchs- und Simulationsergebnissen lassen sich zusammenfassend folgende Schlussfolgerungen ziehen, nämlich dass die Simulationen mit den ermittelten Wärmeleitfähigkeiten realitätsgetreuere Ergebnisse liefern, als jene mit den unteren Grenzwerten für die Wärmeleitfähigkeit nach *EC2*.

Deshalb wird vorgeschlagen, dass für Brandsimulationen mit Normalbetonen mit quarzhaltigen Zuschlägen nicht die unteren Grenzwerte, sondern die oberen Grenzwerte für die thermische Leitfähigkeit nach ÖNORM EN 1992-1-2 angewendet werden.

## 6.2 Ausblick

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurden zahlreiche, sehr zeitintensive und aufwendige Versuche durchgeführt.

Die anfängliche Vermutung, dass die Wärmeleitfähigkeiten von feuchten Betonen höher liegen, als die in den Normen geregelten Werten, wurde zwar mit den Versuchs- und Simulationsergebnissen dieser Arbeit bestätigt, um jedoch vollkommen zutreffende Aussagen treffen zu können, sind auf jeden Fall weitere Versuche erforderlich.

Zusätzliche Parallel-Heißdraht-Versuche sind nicht nur zufolge der relativ kleinen Menge an Messdaten erforderlich, sondern sind diese auch notwendig, um die Richtigkeit des nach ÖNORM EN 993-15 veränderten Heißdrahtverfahrens zu bestätigen, da Drähte aus Platin oder einer Platin/Rhodium – Legierung bzw. Thermoelemente von dem Typ R (Rhodium/Platin mit 13 % Platin) oder von dem Typ S (Rhodium/Platin mit 10 % Platin) nicht im Rahmen der finanziellen Möglichkeiten lagen.

Um den Versuchsaufwand etwas zu verringern, ist eine detaillierte und weit vorausblickende Versuchsplanung unumgänglich. Es muss damit gerechnet werden, dass die geforderte Konstanz der Prüftemperatur erst nach ungefähr 2 bis 3 Stunden nach Erreichen der Prüftemperatur erzielt wird. Deshalb ist vor allem bei Prüftemperaturen ab 120 °C ein Nachtstart des Prüfofens zu empfehlen.

Außerdem wird vorgeschlagen, dass für das Thermoelement zur Messung der Ofentemperatur ebenfalls eine Einkerbung im oberen Probekörper der Prüfanordnung vorgesehen wird, um ähnliche Bedingungen im Differential-Thermopaar herzustellen.

Ferner wird vorgeschlagen, dass sämtliche Probekörper am selben Tag betoniert werden, um ähnliche bzw. gleiche Betoneigenschaften zu erzielen. Da jedoch das Fassungsvermögen der gängigen Mischer nicht ausreichend ist, um Beton für sämtliche Probekörper herzustellen, können Unterschiede in den einzelnen Mischungen nicht ausgeschlossen werden.

---

## Literaturverzeichnis

- [1] *Neroth G., Vollenschaar D.*: Wendehorst Baustoffkunde, 27. Auflage; Vieweg+Teubner Verlag; 2011
- [2] *Fischer H.-M., Jenisch R., Stohrer M., Homann M., Freymuth H., Richter E., Häußel P.*: Lehrbuch der Bauphysik; 6. Auflage; Vieweg+Teubner Verlag; 2008
- [3] *Mannsfeld T.-R.*: Tragverhalten von Stahlbetonflächentragwerken unter Berücksichtigung der temperaturbedingten Nichtlinearitäten im Brandfall; Dissertation veröffentlicht als Heft 18 in der Schriftenreihe des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau Fachbereich D, Abteilung Bauingenieurwesen Bergische Universität Wuppertal; 2011  
urn:nbn:de:hbz:468-20120426-131436-1  
[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn:nbn:de:hbz:468-20120426-131436-1>]
- [4] *Willems W.-M., Schild K., Dinter S., Stricker D.*: Formeln und Tabellen der Bauphysik, 1. Auflage; Vieweg Verlag; 2007
- [5] *Ungricht H.*, Wasserhaushalt und Chlorideintrag in Beton - Einfluss der Exposition und der Betonzusammensetzung, Dissertation an der Eidgenössischen Technischen Hochschule ETH Zürich, 2004  
[<http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-004875590>]
- [6] Feuchteschutz,  
[<http://www.beton.org/fileadmin/pdfpool/feuchteschutz.pdf>]
- [7] *Budelmann H.*: Verhalten von Beton bei mäßig erhöhten Betriebstemperaturen, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 404; Beuth Verlag; 1989
- [8] *Grübl P., Weigler H., Sieghart K.*: Beton – Arten, Herstellung und Eigenschaften, 2. Auflage; Ernst und Sohn Verlag; 2001
- [9] *Schneider U., Franssen J.-M., Lebeda C.*: Baulicher Brandschutz – Nationale und Europäische Normung, Bauordnungsrecht, Praxisbeispiele, 2. Auflage; Bauwerk Verlag; 2008
- [10] Wikipedia:  
[<http://de.wikipedia.org/wiki/Beton#Rohdichten>]
- [11] *Budelmann H.*: Zum Einfluss erhöhter Temperatur auf Festigkeit und Verformung von Beton mit unterschiedlichen Feuchtegehalten, Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig; 1987
- [12] *Manns W., Neubert B.*: Beton – Wassergehalt von Beton bei Temperaturen von 100 °C bis 500 °C im Bereich des Wasserdampfpartialdruckes von 0 bis 5,0 MPa, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 403; Beuth Verlag; 1989

- [13] *Thiener K.-C.*: Festigkeit und Verformung von Beton bei hoher Temperatur und biaxialer Beanspruchung – Versuche und Modelbildung, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 437; Beuth Verlag; 1994
- [14] *Schneider U., Horvath*: Brandschutz Praxis – in Tunnelbauten, 1. Auflage; Bauwerk Verlag; 2006
- [15] *Bergmeister K., Fingerloos F., Wörner J.-D.*: Beton Kalender – Kraftwerke, Faserbeton, Band 4; Ernst & Sohn Verlag; 2011
- [16] *Schneider U., Lebeda C.*: Baulicher Brandschutz – Brand- und Explosionsschutz, Band 4; Kohlhammer Verlag; 2000
- [17] *Werner U.-J.*: Bautechnischer Brandschutz – Planung, Bemessung, Ausführung, 1. Auflage; Birkhäuser Verlag; 2004
- [18] *Schneider U.*: Grundlagen der Ingenieurmethoden im Brandschutz; 1. Auflage; Werner Verlag; 2002
- [19] *Kordina K., Meyer-Ottens C.*: Beton Brandschutz Handbuch, 2. Auflage; Verlag Bau + Technik; 1999
- [20] *Schneider U., Hegger T., Max U., Mehl F., Seifert U., Wathling K.-D.*: Ingenieurmethoden im Baulichen Brandschutz; 5. Auflage; Expert Verlag; 2007
- [21] *Dehn F., König G., Marzahn G.*: Konstruktionswerkstoffe im Bauwesen; Ernst & Sohn Verlag; 2003
- [22] *Schneider U.*: Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 337; Ernst & Sohn Verlag; 1982
- [23] Quarzit-Sandwerke Feichtinger, Produkte  
[<http://www.quarzit.at/fei-main.php?page=bergbau&sn=2&ban=produkte>]
- [24] Quarzit-Sandwerke Feichtinger, Analyse  
[<http://www.quarzit.at/fei-main.php?page=analyse&sn=6&ban=analyse>]
- [25] Lafarge Zementwerke, Datenblatt  
[[http://www.lafarge.at/uploads/tx\\_templavoila/pdb\\_contragress\\_schwarz\\_gelb\\_01.pdf](http://www.lafarge.at/uploads/tx_templavoila/pdb_contragress_schwarz_gelb_01.pdf)]
- [26] *Wulf R.*: Wärmeleitfähigkeit von hitzebeständigen und feuerfesten Dämmstoffen - Untersuchungen zu Ursachen für unterschiedliche Messergebnisse bei Verwendung verschiedener Messverfahren, Dissertation an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg; 2009  
[<http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:105-9458830>]

- [27] Keithley, Datenlogger  
 [<http://www.keithley.de/products/data/datalogger/?mn=2700E>]
- [28] Bentrup, TC 66  
 [[http://www.kittec.de/images/BAs/tc\\_44\\_tc66\\_tc88\\_de\\_en.pdf](http://www.kittec.de/images/BAs/tc_44_tc66_tc88_de_en.pdf)]

## Normenverzeichnis

- ÖNORM EN 1991-1-2 Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke  
 Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke; Ausgabe: 2009-08-01
- ÖNORM EN 1992-1-2 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken  
 Teil1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Ausgabe: 2010-09-01
- ÖNORM B 1992-1-2 Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken  
 Teil1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; Nationale Festlegungen zur ÖNORM EN 1992-1-2 und nationale Erläuterungen; Ausgabe: 2011-11-15
- ÖNORM EN 1363-1 Feuerwiderstandsprüfungen  
 Teil1: Allgemeine Anforderungen; Ausgabe: 2012-09-01
- ÖNORM EN 993-15 Prüfverfahren für dichte geformte feuerfeste Erzeugnisse - Teil 15: Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit nach dem Heißdraht- (parallel-) Verfahren; Ausgabe 2003-10-01
- ÖNORM EN 197-1 Zement  
 Teil1: Zusammensetzung, Anforderung und Konformitätskriterien von Normalzement;  
 Ausgabe: 2011-10-15
- ÖNORM EN 206-1 Beton  
 Teil1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Ausgabe: 2005-11-01

## Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 2-1:</b> Isothermen $T_1, \dots, T_n$ in Richtung abnehmender Temperaturen ([2] S. 113).....	11
<b>Abbildung 2-2:</b> Definition der Wärmeleitfähigkeit ([1] S. 44).....	12
<b>Abbildung 2-3:</b> Wärmeleitfähigkeit verschiedener Baustoffe ([1] S. 45) .....	13
<b>Abbildung 2-4:</b> Übergänge zwischen den Aggregatzuständen ([1] S. 35) .....	20
<b>Abbildung 2-5:</b> Wassergehalt der Luft und Sättigungsdampfdruck in Abhängigkeit von der Temperatur ([1] S. 35).....	21
<b>Abbildung 2-6:</b> Sorptionsisothermen verschiedener Baustoffe [6].....	23
<b>Abbildung 2-7:</b> Beispiel für eine Sorptionsisotherme von Beton [5].....	25
<b>Abbildung 2-8:</b> Volumetrische Anteile in vollständig hydratisiertem Zementstein in Abhängigkeit vom Wasserzementwert [11].....	30
<b>Abbildung 2-9:</b> Wärmeleitfähigkeit von Normalbeton mit quarzhaltigem Zuschlag ([16], S. 132) .....	33
<b>Abbildung 2-10:</b> Spezifische Wärmekapazität nach <i>ÖNORM EN 1992-1-2</i> .....	35
<b>Abbildung 2-11:</b> Thermische Leitfähigkeit nach <i>ÖNORM EN 1992-1-2</i> .....	36
<b>Abbildung 2-12:</b> Bandphasen eines vollständigen Schadenfeuers ([18], S. 109) .....	38
<b>Abbildung 2-13:</b> Normbrandkurven ([17], S. 54) .....	39
<b>Abbildung 2-14:</b> Einheits-Temperatur-Zeitkurve ETK nach EN 1363-1 .....	41
<b>Abbildung 3-1:</b> Quarzit-Sandwerke <i>FEICHTINGER GmbH</i> .....	42
<b>Abbildung 3-2:</b> Aufbau des Calciumsilikathydrats und Wasserbindung im Zementgel ([8], S. 28).....	45
<b>Abbildung 3-3:</b> Lage des Heiz- und Messkreises (Differential-Thermopaar- Kreis) [ÖNORM EN 993-15] .....	49
<b>Abbildung 3-4:</b> Einbettung von Heizdraht und Thermopaar im Probekörper [ÖNORM EN 993-15] .....	51
<b>Abbildung 3-5:</b> Sieblinie des Quarzzuschlages der Betonmischung.....	56
<b>Abbildung 3-6:</b> Prüfmaschine <i>TONI TECHNIK</i> .....	57
<b>Abbildung 3-7:</b> Kraft – Dehnungs – Diagramm der Würfeldruckversuche .....	58
<b>Abbildung 3-8:</b> Einbettung von Heißdraht und Thermopaar im Probekörper [ÖNORM EN 993-15] .....	60
<b>Abbildung 4-1:</b> Schalung für drei Probekörper .....	64
<b>Abbildung 4-2:</b> Zwangsmischer.....	65

---

<b>Abbildung 4-3:</b>	Betonwürfel nach der Druckprüfung .....	66
<b>Abbildung 4-4:</b>	Probekörper für die Heißdrahtprüfung mit Einkerbungen .....	67
<b>Abbildung 4-5:</b>	Probekörper im Exsikkator .....	68
<b>Abbildung 4-6:</b>	Lagerung der feuchten Probekörper .....	69
<b>Abbildung 4-7:</b>	Brennofen <i>KITTEC Classic Line</i> .....	70
<b>Abbildung 4-8:</b>	Im Inneren des <i>KITTEC Classic Line</i> Brennofens .....	71
<b>Abbildung 4-9:</b>	<i>BENTRUP</i> Brennkurve [28] .....	72
<b>Abbildung 4-10:</b>	<i>BENTRUP</i> Temperaturregler [28] .....	72
<b>Abbildung 4-11:</b>	<i>KEITHLEY 2700</i> , Datenlogger [27] .....	73
<b>Abbildung 4-12:</b>	Trafo und Amperemeter der Messanordnung .....	74
<b>Abbildung 4-13:</b>	Prüfanordnung des Heißdrahtverfahrens .....	77
<b>Abbildung 4-14:</b>	Exponentialintegral in Abhängigkeit von $\Delta\theta(2t)\Delta\theta(t)$ .....	83
<b>Abbildung 4-15:</b>	Temperaturdifferenzen in Abhängigkeit von der Zeit .....	86
<b>Abbildung 4-16:</b>	Regressionsanalyse der Prüfserien P-0-1 und P-0-2 .....	89
<b>Abbildung 4-17:</b>	Regressionsanalyse der Prüfserien P-2-1 und P-2-2 .....	90
<b>Abbildung 4-18:</b>	Regressionsanalyse der Prüfserien P-4-1 und P-4-2 .....	90
<b>Abbildung 4-19:</b>	Wärmeleitfähigkeit von Beton mit quarzhaltigem Zuschlag in Abhängigkeit von der Temperatur .....	91
<b>Abbildung 4-20:</b>	Wärmeleitfähigkeiten zwischen 20 °C und 250 °C .....	92
<b>Abbildung 4-21:</b>	Schalung für die Brandprobekörper mit Thermoelementen .....	93
<b>Abbildung 4-22:</b>	Anordnung der Thermoelementfühler .....	95
<b>Abbildung 4-23:</b>	Gasbrenner .....	96
<b>Abbildung 4-24:</b>	Brandofen ohne Dämmung .....	97
<b>Abbildung 4-25:</b>	Brandofen mit Dämmung .....	98
<b>Abbildung 4-26:</b>	Innenraum des gedämmten Brandofens .....	99
<b>Abbildung 4-27:</b>	Brandversuch .....	102
<b>Abbildung 4-28:</b>	Brandversuch BP-0-1 .....	104
<b>Abbildung 4-29:</b>	Brandversuch BP-0-2 .....	105
<b>Abbildung 4-30:</b>	Brandversuch BP-2-1 .....	106
<b>Abbildung 4-31:</b>	Brandversuch BP-2-2 .....	107
<b>Abbildung 4-32:</b>	Brandversuch BP-4-1 .....	108
<b>Abbildung 4-33:</b>	Brandversuch BP-4-2 .....	109
<b>Abbildung 4-34:</b>	Brandversuch an einem feuchten Probekörper .....	110

---

<b>Abbildung 4-35:</b>	Temperaturverläufe der Brandversuche BP-0-1 und BP-0-2..	111
<b>Abbildung 4-36:</b>	Temperaturverläufe der Brandversuche BP-2-1 und BP-2-2..	112
<b>Abbildung 4-37:</b>	Temperaturverläufe der Brandversuche BP-4-1 und BP-4-2..	112
<b>Abbildung 4-38:</b>	Vergleich der Brandversuche .....	113
<b>Abbildung 5-1:</b>	Eingabemaske im <i>BRTemp2D</i> .....	119
<b>Abbildung 5-2:</b>	Start der Simulation.....	119
<b>Abbildung 5-3:</b>	Temperaturverlauf nach der Brandsimulation .....	120
<b>Abbildung 5-4:</b>	Vergleich der Serie BP-0-1, BP_0_1 und EC2_0_1 .....	122
<b>Abbildung 5-5:</b>	Vergleich der Serie BP-2-2, BP_2_2 und EC2_2_2 .....	122
<b>Abbildung 5-6:</b>	Vergleich der Serie BP-4-1, BP_4_1 und EC2_4_1 .....	123
<b>Abbildung 6-1:</b>	Vergleich der Wärmeleitfähigkeiten.....	125
<b>Abbildung 6-2:</b>	Vergleich der Brandversuche .....	126
<b>Abbildung 6-3:</b>	Vergleich der Brandsimulationen .....	128

---

## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 2-1:</b>	Umwandlungs- und Zersetzungsreaktion von Beton ([14] S. 316). .....	32
<b>Tabelle 3-1:</b>	Auszug aus dem Datenblatt – CONTRAGRESS [25].....	46
<b>Tabelle 3-2:</b>	Auflistung der Probekörper für die Heißdrahtversuche (Abmessungen 200x100x50 mm).....	53
<b>Tabelle 3-3:</b>	Auflistung der Zusatzprobekörper (Abmessungen 200x100x50 mm).....	53
<b>Tabelle 3-4:</b>	Auflistung der Brandprobekörper .....	54
<b>Tabelle 3-5:</b>	Ergebnisse aus der Sieblinienanalyse .....	55
<b>Tabelle 3-6:</b>	Einwaagen der Betonmischung.....	57
<b>Tabelle 3-7:</b>	Ergebnisse der Würfeldruckversuche .....	58
<b>Tabelle 3-8:</b>	Statistik der Würfeldruckversuche .....	59
<b>Tabelle 4-1:</b>	<i>ExceLINUX</i> DMM Configure Scanning .....	75
<b>Tabelle 4-2:</b>	<i>ExceLINUX</i> DMM Scan .....	76
<b>Tabelle 4-3:</b>	<i>ExceLINUX</i> Channel Scan List .....	76
<b>Tabelle 4-4:</b>	Empfohlene Messbereiche und Leistungsstufen nach EN 993-15. .....	80
<b>Tabelle 4-5:</b>	Ergebnisse der Heißdrahtversuche.....	88
<b>Tabelle 4-6:</b>	<i>ExceLINUX</i> DMM Scan der Brandversuche .....	100
<b>Tabelle 4-7:</b>	<i>ExceLINUX</i> DMM Configure der Brandversuche .....	101
<b>Tabelle 5-1:</b>	Auszug eines Materialdatenfiles.....	116
<b>Tabelle 5-2:</b>	Auszug eines Randbedingungsfiles .....	117
<b>Tabelle 5-3:</b>	Auszug eines Eingabefiles .....	118

---

**Formelverzeichnis**

<b>Formel 2-1:</b>	FOURIER`sches Grundgesetz der Wärmeleitung .....	11
<b>Formel 2-2:</b>	Temperaturleitfähigkeit .....	14
<b>Formel 2-3:</b>	Wärmeeindringkoeffizient .....	14
<b>Formel 2-4:</b>	NEWTON`sches Abkühlungsprozess .....	15
<b>Formel 2-5:</b>	Reflexions-, Absorptions- und Transmissionsgrad .....	17
<b>Formel 2-6:</b>	Beziehung zwischen Reflexions-, Absorptions- und Transmissionsgrad .....	18
<b>Formel 2-7:</b>	Emissionsgrad .....	18
<b>Formel 2-8:</b>	KIRCHHOFF`sches Strahlungsgesetz .....	19
<b>Formel 2-9:</b>	Relative Luftfeuchte .....	21
<b>Formel 2-10:</b>	Massenbezogene Feuchtegehalt .....	22
<b>Formel 2-11:</b>	Volumenbezogene Feuchtegehalt .....	22
<b>Formel 2-12:</b>	Rohdichte .....	28
<b>Formel 2-13:</b>	Einheits-Temperatur-Zeitkurve ETK nach EN 1363-1 .....	40
<b>Formel 2-14:</b>	Grenzabweichung zur ETK nach EN 1363-1 .....	40
<b>Formel 3-1:</b>	<i>FULLER</i> -Kurve .....	44
<b>Formel 4-1:</b>	Leistung .....	80
<b>Formel 4-2:</b>	<i>OHM`sches</i> Gesetz .....	80
<b>Formel 4-3:</b>	Spannung im Heizdraht .....	81
<b>Formel 4-4:</b>	<i>FOURIER`sche</i> Differentialgleichung .....	81
<b>Formel 4-5:</b>	Spezielle Lösung der Differentialgleichung .....	82
<b>Formel 4-6:</b>	Spezielle Lösungen .....	82
<b>Formel 4-7:</b>	Wärmeleitfähigkeit nach EN 993-15 .....	82
<b>Formel 4-8:</b>	Inhomogene lineare Funktion .....	85
<b>Formel 5-1:</b>	Differentialgleichung im Simulationsprogramm .....	114
<b>Formel 5-2:</b>	Randbedingungen des Simulationsprogramm .....	115

---

## Anhänge

<b>Anhang 1:</b> Werte für das Exponentialintegral - $Ei(-r^2 / 4\alpha t)$ .....	140
<b>Anhang 2:</b> Auswertung der Prüfserie P-0-1 bei 88,92 °C .....	141
<b>Anhang 3:</b> Auswertung der Prüfserie P-0-1 bei 96,99 °C .....	142
<b>Anhang 4:</b> Auswertung der Prüfserie P-0-1 bei 110,24 °C .....	143
<b>Anhang 5:</b> Auswertung der Prüfserie P-0-1 bei 125,23 °C .....	144
<b>Anhang 6:</b> Auswertung der Prüfserie P-0-1 bei 195,21 °C .....	145
<b>Anhang 7:</b> Auswertung der Prüfserie P-0-1 bei 393,49 °C .....	146
<b>Anhang 8:</b> Auswertung der Prüfserie P-0-1 bei 588,28 °C .....	147
<b>Anhang 9:</b> Auswertung der Prüfserie P-0-2 bei 102,16 °C .....	148
<b>Anhang 10:</b> Auswertung der Prüfserie P-0-2 bei 111,81 °C .....	149
<b>Anhang 11:</b> Auswertung der Prüfserie P-0-2 bei 127,42 °C .....	150
<b>Anhang 12:</b> Auswertung der Prüfserie P-0-2 bei 202,38 °C .....	151
<b>Anhang 13:</b> Auswertung der Prüfserie P-0-2 bei 396,13 °C .....	152
<b>Anhang 14:</b> Auswertung der Prüfserie P-0-2 bei 591,25 °C .....	153
<b>Anhang 15:</b> Auswertung der Prüfserie P-2-1 bei 90,54 °C .....	154
<b>Anhang 16:</b> Auswertung der Prüfserie P-2-1 bei 103,26 °C .....	155
<b>Anhang 17:</b> Auswertung der Prüfserie P-2-1 bei 111,55 °C .....	156
<b>Anhang 18:</b> Auswertung der Prüfserie P-2-1 bei 127,16 °C .....	157
<b>Anhang 19:</b> Auswertung der Prüfserie P-2-1 bei 200,35 °C .....	158
<b>Anhang 20:</b> Auswertung der Prüfserie P-2-1 bei 396,18 °C .....	159
<b>Anhang 21:</b> Auswertung der Prüfserie P-2-1 bei 592,96 °C .....	160
<b>Anhang 22:</b> Auswertung der Prüfserie P-2-2 bei 91,92 °C .....	161
<b>Anhang 23:</b> Auswertung der Prüfserie P-2-2 bei 103,36 °C .....	162
<b>Anhang 24:</b> Auswertung der Prüfserie P-2-2 bei 114,04 °C .....	163
<b>Anhang 25:</b> Auswertung der Prüfserie P-2-2 bei 129,32 °C .....	164
<b>Anhang 26:</b> Auswertung der Prüfserie P-2-2 bei 204,47 °C .....	165
<b>Anhang 27:</b> Auswertung der Prüfserie P-2-2 bei 400,47 °C .....	166
<b>Anhang 28:</b> Auswertung der Prüfserie P-4-1 bei 87,71 °C .....	167
<b>Anhang 29:</b> Auswertung der Prüfserie P-4-1 bei 96,47 °C .....	168
<b>Anhang 30:</b> Auswertung der Prüfserie P-4-1 bei 107,46 °C .....	169
<b>Anhang 31:</b> Auswertung der Prüfserie P-4-1 bei 122,93 °C .....	170
<b>Anhang 32:</b> Auswertung der Prüfserie P-4-1 bei 206,77 °C .....	171

---

<b>Anhang 33:</b> Auswertung der Prüfserie P-4-1 bei 414,38 °C .....	172
<b>Anhang 34:</b> Auswertung der Prüfserie P-4-1 bei 616,88 °C .....	173
<b>Anhang 35:</b> Auswertung der Prüfserie P-4-2 bei 89,30 °C .....	174
<b>Anhang 36:</b> Auswertung der Prüfserie P-4-2 bei 99,18 °C .....	175
<b>Anhang 37:</b> Auswertung der Prüfserie P-4-2 bei 108,91 °C .....	176
<b>Anhang 38:</b> Auswertung der Prüfserie P-4-2 bei 125,86 °C .....	177
<b>Anhang 39:</b> Auswertung der Prüfserie P-4-2 bei 201,98°C .....	178
<b>Anhang 40:</b> Auswertung der Prüfserie P-4-2 bei 401,09 °C .....	179
<b>Anhang 41:</b> Auswertung der Prüfserie P-4-2 bei 593,60 °C .....	180
<b>Anhang 42:</b> Simulation BP_0_1 .....	181
<b>Anhang 43:</b> Simulation BP_0_2 .....	182
<b>Anhang 44:</b> Simulation BP_2_1 .....	183
<b>Anhang 45:</b> Simulation BP_2_2 .....	184
<b>Anhang 46:</b> Simulation BP_4_1 .....	185
<b>Anhang 47:</b> Simulation BP_4_2 .....	186
<b>Anhang 48:</b> Simulation EC2_0_1 .....	187
<b>Anhang 49:</b> Simulation EC2_0_2 .....	188
<b>Anhang 50:</b> Simulation EC2_2_1 .....	189
<b>Anhang 51:</b> Simulation EC2_2_2 .....	190
<b>Anhang 52:</b> Simulation EC2_4_1 .....	191
<b>Anhang 53:</b> Simulation EC2_4_2 .....	192

Anhang 1: Werte für das Exponentialintegral -  $Ei(-r^2 / 4\alpha t)$ 

$\Delta\theta(2t)/\Delta\theta(t)$	$- Ei(-r^2 / 4\alpha t)$	$\Delta\theta(2t)/\Delta\theta(t)$	$- Ei(-r^2 / 4\alpha t)$	$\Delta\theta(2t)/\Delta\theta(t)$	$- Ei(-r^2 / 4\alpha t)$
		1,50	1,1945	2,00	0,4496
1,01	11,4684	1,51	1,1646	2,01	0,4428
1,02	10,8439	1,52	1,1358	2,02	0,4360
1,03	10,2533	1,53	1,1081	2,03	0,4295
1,04	9,6949	1,54	1,0814	2,04	0,4230
1,05	9,1669	1,55	1,0557	2,05	0,4168
1,06	8,6677	1,56	1,0310	2,06	0,4106
1,07	8,1956	1,57	1,0071	2,07	0,4046
1,08	7,7493	1,58	0,9641	2,08	0,3987
1,09	7,3272	1,59	0,9619	2,09	0,3929
1,10	6,9287	1,60	0,9405	2,10	0,3873
1,11	6,2966	1,61	0,9197	2,11	0,3818
1,12	5,7689	1,62	0,8897	2,12	0,3764
1,13	5,3213	1,63	0,8803	2,13	0,3711
1,14	4,9366	1,64	0,8616	2,14	0,3659
1,15	4,6021	1,65	0,8434	2,15	0,3608
1,16	4,3085	1,66	0,8259	2,16	0,3558
1,17	4,0483	1,67	0,8089	2,17	0,3510
1,18	3,8162	1,68	0,7924	2,18	0,3462
1,19	3,6077	1,69	0,7764	2,19	0,3415
1,20	3,4192	1,70	0,7609	2,20	0,3369
1,21	3,2480	1,71	0,7459	2,21	0,3324
1,22	3,0918	1,72	0,7313	2,22	0,3280
1,23	2,9485	1,73	0,7171	2,23	0,3237
1,24	2,8166	1,74	0,7034	2,24	0,3194
1,25	2,6949	1,75	0,6900	2,25	0,3162
1,26	2,5820	1,76	0,6770	2,26	0,3112
1,27	2,4772	1,77	0,6644	2,27	0,3072
1,28	2,3795	1,78	0,6521	2,28	0,3032
1,29	2,2883	1,79	0,6402	2,29	0,2994
1,30	2,2028	1,80	0,6286	2,30	0,2956
1,31	2,1227	1,81	0,6173	2,31	0,2919
1,32	2,0473	1,82	0,6063	2,32	0,2882
1,33	1,9764	1,83	0,5956	2,33	0,2846
1,34	1,9094	1,84	0,5852	2,34	0,2811
1,35	1,8461	1,85	0,5750	2,35	0,2776
1,36	1,7863	1,86	0,5652	2,36	0,2742
1,37	1,7295	1,87	0,5555	2,37	0,2709
1,38	1,6757	1,88	0,5461	2,38	0,2676
1,39	1,6245	1,89	0,5370	2,39	0,2644
1,40	1,5758	1,90	0,5280	2,40	0,2613
1,41	1,5295	1,91	0,5193	2,41	0,2582
1,42	1,4852	1,92	0,5108	2,42	0,2551
1,43	1,4431	1,93	0,5025	2,43	0,2521
1,44	1,4028	1,94	0,4944	2,44	0,2491
1,45	1,3642	1,95	0,4865	2,45	0,2462
1,46	1,3274	1,96	0,4788	2,46	0,2434
1,47	1,2920	1,97	0,4712	2,47	0,2406
1,48	1,2582	1,98	0,4639	2,48	0,2378
1,49	1,2257	1,99	0,4567	2,49	0,2351

Anhang 2: Auswertung der Prüfsreihe P-0-1 bei 88,92 °C

Prüfsreihe P-0-1 darrtrockene Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 88,92 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 $P = U \cdot I$

Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs $(\Delta\theta(2t))$ [K]	abs $(\Delta\theta(t))$ [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	3,40	5,10	94,42	88,92	-5,51	88,92	-5,49	5,52	5,51	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	3,41	5,11	94,41	88,92	-5,49	88,95	-5,45	5,53	5,49	1,01	11,46840	4,24657	
30,00	60,00	3,40	5,10	94,40	88,93	-5,48	89,09	-5,31	5,65	5,48	1,03	10,25330	3,80077	
40,00	80,00	3,39	5,08	94,40	88,95	-5,45	89,28	-5,11	5,80	5,45	1,06	8,66770	3,21088	
50,00	100,00	3,41	5,12	94,39	89,01	-5,38	89,50	-4,88	5,88	5,38	1,09	7,32720	2,77482	
60,00	120,00	3,42	5,13	94,40	89,09	-5,31	89,68	-4,72	5,90	5,31	1,11	6,29660	2,42001	
70,00	140,00	3,42	5,13	94,39	89,20	-5,19	89,87	-4,52	5,86	5,19	1,13	5,32130	2,09344	
80,00	160,00	3,39	5,09	94,39	89,28	-5,11	90,02	-4,35	5,86	5,11	1,15	4,60210	1,82425	
90,00	180,00	3,39	5,09	94,39	89,40	-4,99	90,15	-4,23	5,75	4,99	1,15	4,60210	1,86911	
100,00	200,00	3,41	5,11	94,38	89,50	-4,88	90,28	-4,09	5,66	4,88	1,16	4,30850	1,79711	
110,00	220,00	3,39	5,08	94,39	89,59	-4,79	90,40	-3,98	5,60	4,79	1,17	4,04830	1,70722	
120,00	240,00	3,43	5,15	94,39	89,68	-4,72	90,52	-3,87	5,56	4,72	1,18	3,81620	1,65748	
130,00	260,00	3,42	5,13	94,38	89,78	-4,59	90,62	-3,76	5,43	4,59	1,18	3,81620	1,69472	
140,00	280,00	3,46	5,18	94,39	89,87	-4,52	90,71	-3,68	5,36	4,52	1,19	3,60770	1,64629	
150,00	300,00	3,45	5,18	94,38	89,94	-4,44	90,82	-3,56	5,32	4,44	1,20	3,41920	1,58740	
160,00	320,00	3,46	5,18	94,37	90,02	-4,35	90,89	-3,50	5,19	4,35	1,19	3,60770	1,71099	
170,00	340,00	3,44	5,16	94,37	90,08	-4,29	90,98	-3,40	5,17	4,29	1,21	3,24800	1,55449	
180,00	360,00	3,41	5,11	94,37	90,15	-4,23	91,06	-3,34	5,11	4,23	1,21	3,24800	1,56276	
190,00	380,00	3,42	5,13	94,38	90,21	-4,17	91,13	-3,28	5,05	4,17	1,21	3,24800	1,59116	
200,00	400,00	3,43	5,14	94,38	90,28	-4,09	91,18	-3,23	4,95	4,09	1,21	3,24800	1,62430	
210,00	420,00	3,38	5,08	94,37	90,35	-4,03	91,25	-3,15	4,90	4,03	1,22	3,09180	1,55143	
220,00	440,00	3,39	5,09	94,38	90,40	-3,98	91,30	-3,11	4,84	3,98	1,22	3,09180	1,57344	
230,00	460,00	3,38	5,07	94,38	90,46	-3,92	91,37	-3,06	4,78	3,92	1,22	3,09180	1,59224	
240,00	480,00	3,41	5,11	94,39	90,52	-3,87	91,42	-2,99	4,74	3,87	1,23	2,94850	1,54959	
250,00	500,00	3,40	5,10	94,38	90,58	-3,80	91,46	-2,97	4,64	3,80	1,22	3,09180	1,64792	
260,00	520,00	3,44	5,16	94,38	90,62	-3,76	91,52	-2,92	4,59	3,76	1,22	3,09180	1,69117	
270,00	540,00	3,38	5,07	94,38	90,67	-3,71	91,57	-2,86	4,55	3,71	1,23	2,94850	1,60489	
280,00	560,00	3,40	5,10	94,39	90,71	-3,68	91,62	-2,81	4,54	3,68	1,24	2,81660	1,55477	
290,00	580,00	3,44	5,16	94,39	90,75	-3,64	91,68	-2,77	4,52	3,64	1,24	2,81660	1,58639	

**1,954 W/mK**

## Anhang 3: Auswertung der Prüfsreihe P-0-1 bei 96,99 °C

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
Temp. Probe = 96,99 °C  
Heizstrom I = 1,50 A  
 $P = U \cdot I$

Zeit t	Zeit 2t	U	P	Temp. Ofen	Temp. (t)	$\Delta\theta(t)$	Temp. (2t)	$\Delta\theta(2t)$	abs ( $\Delta\theta(2t)$ )	abs ( $\Delta\theta(t)$ )	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	$\lambda$ - Mittelwert
[s]	[s]	[Volt]	[Watt]	[°C]	[°C]	[K]	[°C]	[K]	[K]	[K]			[W/mK]	[W/mK]
10,00	20,00	3,48	5,22	103,92	96,99	-6,93	97,04	-6,88	6,99	6,93	1,01	11,46840	3,43328	
20,00	40,00	3,49	5,23	103,92	97,04	-6,88	97,17	-6,76	7,00	6,88	1,02	10,84390	3,27971	
30,00	60,00	3,39	5,09	103,93	97,09	-6,83	97,37	-6,57	7,10	6,83	1,04	9,69490	2,87268	
40,00	80,00	3,40	5,10	103,93	97,17	-6,76	97,58	-6,37	7,15	6,76	1,06	8,66770	2,59965	
50,00	100,00	3,39	5,09	103,94	97,27	-6,67	97,76	-6,18	7,17	6,67	1,07	8,19560	2,48511	
60,00	120,00	3,39	5,08	103,94	97,37	-6,57	97,92	-6,02	7,11	6,57	1,08	7,74930	2,38607	
70,00	140,00	3,36	5,04	103,93	97,48	-6,45	98,08	-5,87	7,03	6,45	1,09	7,32720	2,27666	
80,00	160,00	3,37	5,06	103,95	97,58	-6,37	98,23	-5,72	7,02	6,37	1,10	6,92870	2,18813	
90,00	180,00	3,37	5,06	103,93	97,67	-6,26	98,36	-5,60	6,93	6,26	1,11	6,29660	2,02260	
100,00	200,01	3,37	5,06	103,94	97,76	-6,18	98,47	-5,48	6,88	6,18	1,11	6,29660	2,05132	
110,00	220,00	3,37	5,06	103,94	97,85	-6,09	98,59	-5,37	6,81	6,09	1,12	5,76890	1,90609	
120,00	240,00	3,37	5,05	103,94	97,92	-6,02	98,69	-5,28	6,77	6,02	1,12	5,76890	1,92596	
130,00	260,00	3,39	5,08	103,94	98,01	-5,93	98,79	-5,16	6,69	5,93	1,13	5,32130	1,81570	
140,00	280,00	3,37	5,06	103,95	98,08	-5,87	98,87	-5,10	6,64	5,87	1,13	5,32130	1,82398	
150,00	300,00	3,35	5,03	103,96	98,15	-5,81	98,96	-5,02	6,60	5,81	1,14	4,93660	1,70077	
160,00	320,00	3,38	5,08	103,96	98,23	-5,72	99,03	-4,96	6,49	5,72	1,13	5,32130	1,87753	
170,00	340,00	3,39	5,09	103,95	98,30	-5,65	99,12	-4,88	6,43	5,65	1,14	4,93660	1,76800	
180,00	360,00	3,36	5,03	103,95	98,36	-5,60	99,20	-4,80	6,39	5,60	1,14	4,93660	1,76730	
190,00	380,00	3,36	5,04	103,95	98,42	-5,54	99,27	-4,74	6,33	5,54	1,14	4,93660	1,78692	
200,00	400,00	3,36	5,04	103,95	98,47	-5,48	99,35	-4,67	6,29	5,48	1,15	4,60210	1,68388	
210,00	420,00	3,34	5,01	103,96	98,52	-5,44	99,40	-4,64	6,24	5,44	1,15	4,60210	1,68672	
220,00	440,00	3,35	5,03	103,96	98,59	-5,37	99,48	-4,57	6,16	5,37	1,15	4,60210	1,71402	
230,00	460,00	3,35	5,03	103,97	98,63	-5,33	99,54	-4,52	6,15	5,33	1,15	4,60210	1,72699	
240,00	480,00	3,36	5,04	103,97	98,69	-5,28	99,60	-4,47	6,09	5,28	1,15	4,60210	1,74833	
250,00	500,00	3,35	5,02	103,97	98,74	-5,22	99,66	-4,43	6,01	5,22	1,15	4,60210	1,75921	
260,00	520,00	3,39	5,08	103,95	98,79	-5,16	99,70	-4,40	5,93	5,16	1,15	4,60210	1,80125	

**2,080 W/mK**

Anhang 4: Auswertung der Prüfsreihe P-0-1 bei 110,24 °C

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 110,24 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 $P = U \cdot I$

Prüfsreihe P-0-1 darrtrockene Probe

Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs $(\Delta\theta(2t))$ [K]	abs $(\Delta\theta(t))$ [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	3,45	5,17	116,33	110,24	-6,09	110,28	-6,06	6,12	6,09	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	3,45	5,18	116,34	110,28	-6,06	110,41	-5,91	6,22	6,06	1,03	10,25330	3,48349	
30,00	60,00	3,43	5,14	116,33	110,33	-5,99	110,61	-5,73	6,26	5,99	1,04	9,69490	3,30828	
40,00	80,00	3,44	5,16	116,32	110,41	-5,91	110,81	-5,53	6,29	5,91	1,06	8,66770	3,00920	
50,00	100,00	3,43	5,15	116,33	110,52	-5,81	111,03	-5,30	6,32	5,81	1,09	7,32720	2,58428	
60,00	120,00	3,42	5,12	116,34	110,61	-5,73	111,18	-5,13	6,32	5,73	1,10	6,92870	2,46703	
70,00	140,00	3,42	5,13	116,33	110,74	-5,60	111,34	-5,00	6,20	5,60	1,11	6,29660	2,29793	
80,00	160,00	3,42	5,13	116,34	110,81	-5,53	111,49	-4,86	6,20	5,53	1,12	5,76890	2,12847	
90,00	180,00	3,42	5,13	116,35	110,93	-5,41	111,61	-4,73	6,10	5,41	1,13	5,32130	2,00762	
100,00	200,00	3,44	5,16	116,33	111,03	-5,30	111,74	-4,59	6,02	5,30	1,13	5,32130	2,05941	
110,00	220,00	3,41	5,12	116,33	111,10	-5,23	111,84	-4,50	5,97	5,23	1,14	4,93660	1,92187	
120,00	240,00	3,44	5,16	116,31	111,18	-5,13	111,95	-4,39	5,87	5,13	1,14	4,93660	1,97572	
130,00	260,00	3,42	5,13	116,33	111,27	-5,07	112,04	-4,30	5,84	5,07	1,15	4,60210	1,85555	
140,00	280,00	3,41	5,12	116,34	111,34	-5,00	112,13	-4,20	5,79	5,00	1,16	4,30850	1,75594	
150,00	300,00	3,44	5,16	116,33	111,42	-4,91	112,23	-4,12	5,70	4,91	1,16	4,30850	1,80000	
160,00	320,00	3,42	5,13	116,35	111,49	-4,86	112,30	-4,04	5,68	4,86	1,17	4,04830	1,70077	
170,00	340,00	3,42	5,13	116,34	111,54	-4,80	112,39	-3,97	5,62	4,80	1,17	4,04830	1,72205	
180,00	360,00	3,42	5,13	116,34	111,61	-4,73	112,46	-3,91	5,55	4,73	1,17	4,04830	1,74667	
190,00	380,00	3,40	5,10	116,34	111,67	-4,68	112,54	-3,83	5,52	4,68	1,18	3,81620	1,65642	
200,00	400,00	3,41	5,12	116,33	111,74	-4,59	112,61	-3,77	5,40	4,59	1,18	3,81620	1,69346	
210,00	420,00	3,42	5,13	116,34	111,79	-4,55	112,68	-3,70	5,41	4,55	1,19	3,60770	1,61719	
220,00	440,00	3,40	5,10	116,34	111,84	-4,50	112,74	-3,64	5,36	4,50	1,19	3,60770	1,62857	
230,00	460,00	3,42	5,13	116,33	111,90	-4,43	112,83	-3,57	5,29	4,43	1,19	3,60770	1,66207	
240,00	480,00	3,40	5,10	116,34	111,95	-4,39	112,89	-3,53	5,25	4,39	1,20	3,41920	1,58142	
250,00	500,00	3,41	5,12	116,34	111,99	-4,35	112,95	-3,46	5,23	4,35	1,20	3,41920	1,60177	
260,00	520,00	3,43	5,14	116,34	112,04	-4,30	113,02	-3,41	5,18	4,30	1,21	3,24800	1,54654	
270,00	540,00	3,43	5,14	116,34	112,08	-4,26	113,07	-3,39	5,14	4,26	1,21	3,24800	1,55835	
280,00	560,00	3,43	5,15	116,34	112,13	-4,20	113,13	-3,32	5,08	4,20	1,21	3,24800	1,58396	

1,998 W/mK

## Anhang 5: Auswertung der Prüfsreihe P-0-1 bei 125,23 °C

Prüfsreihe P-0-1      darrtrockene Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
Temp. Probe = 125,23 °C  
Heizstrom I = 1,50 A  
P = U · I

Zeit	Zeit 2t	U	P	Temp. Ofen	Temp. (t)	Temp. (2t)	$\Delta\theta(t)$	$\Delta\theta(2t)$	abs. $(\Delta\theta(t))$	abs. $(\Delta\theta(2t))$	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	$\lambda$ - Mittelwert
[s]	[s]	[Volt]	[Watt]	[°C]	[°C]	[°C]	[K]	[K]	[K]	[K]			[W/mK]	[W/mK]
10,00	20,00	3,43	5,14	132,13	125,23	125,24	-6,90	-6,89	6,90	6,90	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	3,41	5,12	132,13	125,24	125,32	-6,89	-6,82	6,89	6,89	1,01	11,4684	3,386	3,386
30,00	60,00	3,42	5,13	132,12	125,27	125,49	-6,85	-6,65	6,85	7,06	1,03	10,2533	3,055	3,055
40,00	80,00	3,42	5,14	132,14	125,32	125,70	-6,82	-6,45	6,82	7,19	1,05	9,1669	2,748	2,748
50,00	100,00	3,42	5,12	132,13	125,41	125,90	-6,72	-6,24	6,72	7,20	1,07	8,1966	2,487	2,487
60,00	120,00	3,40	5,10	132,14	125,49	126,06	-6,65	-6,07	6,65	7,23	1,09	7,3272	2,237	2,237
70,00	140,00	3,41	5,12	132,14	125,60	126,23	-6,54	-5,92	6,54	7,15	1,09	7,3272	2,283	2,283
80,00	160,00	3,42	5,13	132,15	125,70	126,36	-6,45	-5,77	6,45	7,12	1,10	6,9287	2,192	2,192
90,00	180,00	3,42	5,13	132,15	125,80	126,51	-6,35	-5,63	6,35	7,07	1,11	6,2966	2,026	2,026
100,00	200,00	3,38	5,07	132,13	125,90	126,63	-6,24	-5,50	6,24	6,98	1,12	5,7689	1,866	1,866
110,00	220,00	3,39	5,09	132,13	125,97	126,75	-6,16	-5,38	6,16	6,94	1,13	5,3213	1,749	1,749
120,00	240,00	3,42	5,13	132,14	126,06	126,85	-6,07	-5,28	6,07	6,87	1,13	5,3213	1,788	1,788
130,00	260,00	3,42	5,13	132,14	126,16	126,96	-5,99	-5,18	5,99	6,80	1,14	4,9366	1,683	1,683
140,00	280,00	3,43	5,15	132,15	126,23	127,05	-5,92	-5,09	5,92	6,76	1,14	4,9366	1,708	1,708
150,00	300,00	3,42	5,13	132,13	126,31	127,14	-5,82	-5,00	5,82	6,63	1,14	4,9366	1,734	1,734
160,00	320,00	3,43	5,14	132,14	126,36	127,23	-5,77	-4,91	5,77	6,64	1,15	4,6021	1,632	1,632
170,00	340,00	3,45	5,17	132,14	126,43	127,34	-5,70	-4,80	5,70	6,61	1,16	4,3085	1,555	1,555
180,00	360,00	3,42	5,13	132,14	126,51	127,41	-5,63	-4,76	5,63	6,50	1,16	4,3085	1,564	1,564
190,00	380,00	3,42	5,13	132,15	126,58	127,47	-5,57	-4,68	5,57	6,46	1,16	4,3085	1,581	1,581
200,00	400,00	3,45	5,17	132,13	126,63	127,56	-5,50	-4,61	5,50	6,39	1,16	4,3085	1,613	1,613
210,00	420,00	3,44	5,16	132,14	126,68	127,64	-5,46	-4,53	5,46	6,38	1,17	4,0483	1,523	1,523
220,00	440,00	3,44	5,16	132,13	126,75	127,69	-5,38	-4,49	5,38	6,26	1,16	4,3085	1,646	1,646
230,00	460,00	3,44	5,17	132,13	126,79	127,77	-5,34	-4,42	5,34	6,26	1,17	4,0483	1,558	1,558
240,00	480,00	3,45	5,17	132,13	126,85	127,83	-5,28	-4,37	5,28	6,19	1,17	4,0483	1,578	1,578
250,00	500,00	3,45	5,17	132,14	126,90	127,87	-5,23	-4,34	5,23	6,13	1,17	4,0483	1,591	1,591
260,00	520,00	3,45	5,18	132,13	126,96	127,94	-5,18	-4,28	5,18	6,08	1,17	4,0483	1,612	1,612
270,00	540,00	3,46	5,19	132,14	126,99	128,00	-5,14	-4,22	5,14	6,07	1,18	3,8162	1,532	1,532

**1,920 W/mK**

Anhang 6: Auswertung der Prüfsreihe P-0-1 bei 195,21 °C

Prüfsreihe P-0-1 darrtrockene Probe

Lange Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 195,21 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 $P = U \cdot I$

Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs $(\Delta\theta(2t))$ [K]	abs $(\Delta\theta(t))$ [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	10,08	3,53	5,30	206,74	195,21	-11,53	195,22	-11,52	11,54	11,53	1,00	#NV	#NV	#NV
20,00	40,00	3,53	5,29	206,74	195,22	-11,52	195,28	-11,46	11,57	11,52	1,00	#NV	#NV	#NV
30,00	60,00	3,46	5,18	206,74	195,23	-11,51	195,44	-11,30	11,73	11,51	1,02	10,84390	1,94235	10,84390
40,00	80,00	3,49	5,24	206,75	195,28	-11,46	195,61	-11,14	11,79	11,46	1,03	10,25330	1,86573	10,25330
50,00	100,00	3,50	5,24	206,73	195,35	-11,37	195,80	-10,93	11,81	11,37	1,04	9,69490	1,77895	9,69490
60,00	120,00	3,40	5,10	206,74	195,44	-11,30	195,98	-10,76	11,84	11,30	1,05	9,16690	1,64542	9,16690
70,00	140,00	3,39	5,09	206,74	195,53	-11,21	196,14	-10,61	11,81	11,21	1,05	9,16690	1,65674	9,16690
80,00	160,00	3,40	5,09	206,75	195,61	-11,14	196,27	-10,49	11,80	11,14	1,06	8,66770	1,57707	8,66770
90,00	180,00	3,40	5,09	206,73	195,71	-11,02	196,43	-10,33	11,71	11,02	1,06	8,66770	1,59427	8,66770
100,00	200,00	3,41	5,11	206,73	195,80	-10,93	196,56	-10,20	11,66	10,93	1,07	8,19560	1,52426	8,19560
110,01	220,01	3,40	5,10	206,73	195,90	-10,83	196,69	-10,09	11,58	10,83	1,07	8,19560	1,53426	8,19560
120,00	240,00	3,40	5,10	206,75	195,98	-10,76	196,80	-9,97	11,56	10,76	1,07	8,19560	1,54645	8,19560
130,00	260,00	3,41	5,11	206,75	196,07	-10,68	196,90	-9,87	11,49	10,68	1,08	7,74930	1,47504	7,74930
140,00	280,01	3,40	5,09	206,75	196,14	-10,61	197,00	-9,79	11,43	10,61	1,08	7,74930	1,47973	7,74930
150,00	300,00	3,42	5,13	206,75	196,22	-10,53	197,10	-9,69	11,37	10,53	1,08	7,74930	1,50143	7,74930
160,00	320,00	3,41	5,12	206,76	196,27	-10,49	197,19	-9,60	11,37	10,49	1,08	7,74930	1,50450	7,74930
170,00	340,00	3,40	5,11	206,76	196,37	-10,39	197,29	-9,50	11,28	10,39	1,09	7,32720	1,43246	7,32720
180,00	360,00	3,41	5,11	206,76	196,43	-10,33	197,36	-9,44	11,23	10,33	1,09	7,32720	1,44254	7,32720
190,00	380,00	3,41	5,12	206,76	196,51	-10,25	197,44	-9,38	11,13	10,25	1,09	7,32720	1,45482	7,32720
200,01	400,01	3,42	5,13	206,76	196,56	-10,20	197,52	-9,30	11,11	10,20	1,09	7,32720	1,46613	7,32720
210,00	420,00	3,42	5,13	206,78	196,62	-10,15	197,59	-9,25	11,06	10,15	1,09	7,32720	1,47385	7,32720
220,00	440,00	3,42	5,13	206,78	196,69	-10,09	197,67	-9,18	11,01	10,09	1,09	7,32720	1,48317	7,32720
230,00	460,00	3,40	5,10	206,77	196,74	-10,03	197,75	-9,10	10,96	10,03	1,09	7,32720	1,48365	7,32720
240,00	480,00	3,40	5,10	206,77	196,80	-9,97	197,81	-9,04	10,90	9,97	1,09	7,32720	1,49028	7,32720
250,00	500,00	3,40	5,10	206,76	196,85	-9,91	197,88	-8,98	10,85	9,91	1,09	7,32720	1,49965	7,32720
260,00	520,00	3,39	5,09	206,77	196,90	-9,87	197,94	-8,93	10,82	9,87	1,10	6,92870	1,42128	6,92870
270,00	540,00	3,40	5,11	206,77	196,95	-9,82	198,01	-8,87	10,76	9,82	1,10	6,92870	1,43390	6,92870
280,00	560,00	3,40	5,11	206,80	197,00	-9,79	198,09	-8,80	10,79	9,79	1,10	6,92870	1,43712	6,92870

1,544 W/mK

Anhang 7: Auswertung der Prüfsreihe P-0-1 bei 393,49 °C

Prüfsreihe P-0-1      darrtrockene Probe

Lange Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 393,49 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 $P = U \cdot I$

Zeit t	Zeit Zt	U	P	Temp. Ofen	Temp. (t)	$\Delta\theta(t)$	Temp. (Zt)	$\Delta\theta(Zt)$	abs $(\Delta\theta(Zt))$	abs $(\Delta\theta(t))$	$\frac{\Delta\theta(Zt)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	$\lambda$ - Mittelwert
[s]	[s]	[Volt]	[Watt]	[°C]	[°C]	[K]	[°C]	[K]	[K]	[K]			[W/mK]	[W/mK]
10,00	20,00	3,48	5,22	410,48	393,49	-16,98	393,51	-17,01	17,01	16,98	1,00	#NV	#NV	#NV
20,00	40,00	3,62	5,43	410,51	393,51	-17,01	393,56	-16,94	17,07	17,01	1,00	#NV	#NV	#NV
30,00	60,00	3,50	5,25	410,50	393,54	-16,96	393,68	-16,81	17,10	16,96	1,01	11,46840	1,41222	11,46840
40,00	80,00	3,44	5,16	410,50	393,56	-16,94	393,83	-16,68	17,20	16,94	1,02	10,84390	1,31394	10,84390
50,00	100,00	3,44	5,16	410,51	393,63	-16,89	394,00	-16,50	17,28	16,89	1,02	10,84390	1,31873	10,84390
60,00	120,00	3,42	5,14	410,50	393,68	-16,81	394,15	-16,34	17,29	16,81	1,03	10,25330	1,24651	10,25330
70,00	140,00	3,42	5,13	410,49	393,75	-16,74	394,31	-16,18	17,31	16,74	1,03	10,25330	1,25083	10,25330
80,00	160,00	3,41	5,12	410,51	393,83	-16,68	394,45	-16,05	17,31	16,68	1,04	9,69490	1,18440	9,69490
90,00	180,00	3,41	5,12	410,50	393,92	-16,58	394,58	-15,89	17,26	16,58	1,04	9,69490	1,19203	9,69490
100,00	200,00	3,41	5,11	410,49	394,00	-16,50	394,71	-15,76	17,24	16,50	1,04	9,69490	1,19452	9,69490
110,00	220,00	3,43	5,15	410,48	394,07	-16,41	394,84	-15,62	17,20	16,41	1,05	9,16690	1,14422	9,16690
120,00	240,00	3,44	5,17	410,49	394,15	-16,34	394,96	-15,49	17,19	16,34	1,05	9,16690	1,15339	9,16690
130,00	260,00	3,44	5,16	410,49	394,23	-16,26	395,08	-15,39	17,13	16,26	1,05	9,16690	1,15813	9,16690
140,00	280,00	3,42	5,13	410,48	394,31	-16,18	395,19	-15,27	17,09	16,18	1,06	8,66770	1,09449	8,66770
150,00	300,00	3,44	5,16	410,48	394,37	-16,11	395,30	-15,18	17,04	16,11	1,06	8,66770	1,10403	8,66770
160,00	320,00	3,45	5,17	410,49	394,45	-16,05	395,39	-15,06	17,03	16,05	1,06	8,66770	1,11154	8,66770
170,00	340,00	3,45	5,17	410,48	394,52	-15,96	395,48	-14,98	16,94	15,96	1,06	8,66770	1,11675	8,66770
180,00	360,00	3,43	5,15	410,47	394,58	-15,89	395,59	-14,87	16,91	15,89	1,06	8,66770	1,11811	8,66770
190,00	380,00	3,43	5,14	410,46	394,65	-15,81	395,66	-14,81	16,82	15,81	1,06	8,66770	1,12059	8,66770
200,00	400,00	3,43	5,15	410,47	394,71	-15,76	395,75	-14,71	16,80	15,76	1,07	8,19560	1,06622	8,19560
210,00	420,00	3,43	5,14	410,45	394,78	-15,67	395,84	-14,61	16,73	15,67	1,07	8,19560	1,06999	8,19560
220,00	440,00	3,43	5,14	410,46	394,84	-15,62	395,89	-14,58	16,65	15,62	1,07	8,19560	1,07291	8,19560
230,00	460,00	3,44	5,15	410,45	394,90	-15,55	395,98	-14,49	16,61	15,55	1,07	8,19560	1,08078	8,19560
240,00	480,00	3,44	5,16	410,44	394,96	-15,49	396,05	-14,40	16,58	15,49	1,07	8,19560	1,08622	8,19560
250,00	500,00	3,42	5,14	410,46	395,01	-15,45	396,12	-14,32	16,57	15,45	1,07	8,19560	1,08429	8,19560
260,00	520,00	3,43	5,14	410,47	395,08	-15,39	396,19	-14,27	16,51	15,39	1,07	8,19560	1,08974	8,19560
270,00	540,00	3,43	5,15	410,48	395,13	-15,35	396,25	-14,22	16,48	15,35	1,07	8,19560	1,09402	8,19560
280,00	560,00	3,44	5,16	410,46	395,19	-15,27	396,30	-14,16	16,37	15,27	1,07	8,19560	1,10195	8,19560
290,00	580,00	3,43	5,15	410,48	395,24	-15,23	396,39	-14,09	16,38	15,23	1,08	7,74930	1,04187	7,74930
300,00	600,00	3,42	5,13	410,48	395,30	-15,18	396,44	-14,04	16,32	15,18	1,08	7,74930	1,04177	7,74930
310,00	620,00	3,43	5,14	410,47	395,35	-15,12	396,49	-14,00	16,23	15,12	1,07	8,19560	1,10924	8,19560
320,00	640,00	3,43	5,15	410,45	395,39	-15,06	396,55	-13,93	16,19	15,06	1,07	8,19560	1,11573	8,19560

**1,143 W/mK**

Anhang 8: Auswertung der Prüfsreihe P-0-1 bei 588,28 °C

Prüfsreihe P-0-1 darrtrockene Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 588,28 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U · I

Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs $(\Delta\theta(2t))$ [K]	abs $(\Delta\theta(t))$ [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	3,44	5,17	608,29	588,28	-20,00	588,28	-20,01	20,01	20,00	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	3,45	5,17	608,29	588,28	-20,00	588,33	-19,96	20,06	20,01	1,00	#NV	#NV	
30,00	60,00	3,39	5,09	608,29	588,29	-19,99	588,38	-19,89	20,10	19,99	1,01	11,46840	1,16095	
40,00	80,00	3,41	5,11	608,29	588,33	-19,96	588,53	-19,75	20,17	19,96	1,01	11,46840	1,16788	
50,00	100,00	3,40	5,10	608,27	588,35	-19,93	588,69	-19,59	20,26	19,93	1,02	10,84390	1,10391	
60,00	120,00	3,41	5,11	608,27	588,38	-19,89	588,80	-19,45	20,33	19,89	1,02	10,84390	1,10857	
70,00	140,00	3,44	5,16	608,29	588,46	-19,83	588,99	-19,30	20,36	19,83	1,03	10,25330	1,06221	
80,00	160,00	3,44	5,16	608,28	588,53	-19,75	589,17	-19,12	20,38	19,75	1,03	10,25330	1,06598	
90,00	180,00	3,44	5,16	608,30	588,61	-19,69	589,32	-18,95	20,44	19,69	1,04	9,69490	1,01083	
100,00	200,00	3,42	5,13	608,28	588,69	-19,59	589,43	-18,80	20,37	19,59	1,04	9,69490	1,01058	
110,00	220,01	3,44	5,17	608,27	588,74	-19,53	589,59	-18,69	20,36	19,53	1,04	9,69490	1,02051	
120,00	240,00	3,43	5,15	608,25	588,80	-19,45	589,77	-18,52	20,39	19,45	1,05	9,16690	0,96495	
130,00	260,00	3,45	5,17	608,26	588,88	-19,38	589,91	-18,38	20,38	19,38	1,05	9,16690	0,97298	
140,00	280,00	3,44	5,17	608,29	588,99	-19,30	590,02	-18,26	20,33	19,30	1,05	9,16690	0,97642	
150,00	300,00	3,45	5,18	608,29	589,10	-19,19	590,19	-18,13	20,25	19,19	1,06	8,66770	0,93043	
160,00	320,00	3,45	5,17	608,28	589,17	-19,12	590,32	-18,00	20,23	19,12	1,06	8,66770	0,93302	
170,00	340,00	3,44	5,16	608,29	589,25	-19,04	590,42	-17,85	20,23	19,04	1,06	8,66770	0,93497	
180,00	360,00	3,44	5,16	608,27	589,32	-18,95	590,53	-17,76	20,14	18,95	1,06	8,66770	0,93880	
190,00	380,00	3,44	5,16	608,26	589,38	-18,88	590,66	-17,65	20,11	18,88	1,07	8,19560	0,89084	
200,00	400,00	3,45	5,17	608,24	589,43	-18,80	590,77	-17,55	20,06	18,80	1,07	8,19560	0,89664	
210,00	420,00	3,44	5,16	608,24	589,52	-18,72	590,86	-17,43	20,01	18,72	1,07	8,19560	0,89939	
220,00	440,00	3,45	5,18	608,28	589,59	-18,69	590,95	-17,33	20,04	18,69	1,07	8,19560	0,90320	
230,00	460,00	3,45	5,18	608,29	589,71	-18,58	591,02	-17,28	19,88	18,58	1,07	8,19560	0,90885	
240,00	480,00	3,45	5,18	608,29	589,77	-18,52	591,15	-17,16	19,87	18,52	1,07	8,19560	0,91180	
250,00	500,00	3,44	5,15	608,30	589,86	-18,44	591,24	-17,05	19,83	18,44	1,08	7,74930	0,86176	
260,00	520,00	3,45	5,18	608,29	589,91	-18,38	591,30	-17,00	19,76	18,38	1,08	7,74930	0,86854	
270,00	540,00	3,46	5,19	608,28	589,99	-18,30	591,38	-16,93	19,66	18,30	1,07	8,19560	0,92433	
280,00	560,00	3,46	5,19	608,29	590,02	-18,26	591,47	-16,83	19,70	18,26	1,08	7,74930	0,87603	
290,00	580,00	3,46	5,19	608,30	590,10	-18,20	591,55	-16,74	19,65	18,20	1,08	7,74930	0,87960	
300,00	600,00	3,45	5,18	608,32	590,19	-18,13	591,67	-16,66	19,59	18,13	1,08	7,74930	0,88081	

0,967 W/mK

Anhang 9: Auswertung der Prüfsreihe P-0-2 bei 102,16 °C

Prüfsreihe P-0-2 darthrockene Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 102,16 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U · I

Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs $(\Delta\theta(2t))$ [K]	abs $(\Delta\theta(t))$ [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	3,45	5,17	106,55	102,16	-4,39	102,20	-4,35	4,43	4,39	1,01	11,4684D	5,37809	
20,00	40,00	3,40	5,10	106,55	102,20	-4,35	102,28	-4,27	4,43	4,35	1,02	10,8439D	5,05662	
30,00	60,00	3,40	5,10	106,55	102,23	-4,32	102,40	-4,15	4,49	4,32	1,04	9,69490	4,55429	
40,00	80,00	3,40	5,10	106,56	102,28	-4,28	102,52	-4,04	4,53	4,28	1,06	8,66770	4,10494	
50,00	100,00	3,39	5,09	106,54	102,35	-4,19	102,66	-3,88	4,51	4,19	1,07	8,19560	3,95596	
60,00	120,00	3,39	5,09	106,56	102,40	-4,16	102,78	-3,77	4,54	4,16	1,09	7,32720	3,56529	
70,00	140,00	3,39	5,08	106,54	102,47	-4,07	102,90	-3,64	4,49	4,07	1,10	6,92870	3,44584	
80,00	160,00	3,38	5,07	106,54	102,52	-4,02	102,99	-3,55	4,49	4,02	1,12	5,76890	2,89606	
90,00	180,00	3,40	5,10	106,54	102,60	-3,94	103,10	-3,44	4,44	3,94	1,13	5,32130	2,74334	
100,00	200,00	3,40	5,10	106,53	102,66	-3,87	103,19	-3,35	4,40	3,87	1,14	4,93660	2,58593	
110,00	220,00	3,40	5,09	106,54	102,71	-3,83	103,29	-3,25	4,41	3,83	1,15	4,60210	2,43580	
120,00	240,00	3,40	5,10	106,55	102,78	-3,76	103,38	-3,17	4,36	3,76	1,16	4,30850	2,32521	
130,00	260,00	3,41	5,11	106,54	102,84	-3,70	103,45	-3,09	4,31	3,70	1,16	4,30850	2,36991	
140,00	280,00	3,39	5,09	106,53	102,90	-3,63	103,53	-3,00	4,25	3,63	1,17	4,04830	2,25887	
150,00	300,01	3,39	5,09	106,53	102,96	-3,57	103,60	-2,93	4,22	3,57	1,18	3,81620	2,16230	
160,00	320,00	3,41	5,11	106,53	102,99	-3,54	103,67	-2,86	4,22	3,54	1,19	3,60770	2,07313	
170,00	340,00	3,41	5,12	106,54	103,06	-3,48	103,74	-2,80	4,17	3,48	1,20	3,41920	1,99762	
180,00	360,00	3,41	5,12	106,52	103,10	-3,42	103,81	-2,71	4,13	3,42	1,21	3,24800	1,93205	
190,00	380,00	3,41	5,12	106,53	103,16	-3,37	103,88	-2,65	4,08	3,37	1,21	3,24800	1,96374	
200,00	400,00	3,40	5,10	106,53	103,19	-3,35	103,93	-2,61	4,09	3,35	1,22	3,09180	1,87376	
210,00	420,00	3,40	5,10	106,54	103,25	-3,29	104,00	-2,54	4,04	3,29	1,23	2,94850	1,81708	
220,00	440,00	3,39	5,09	106,54	103,29	-3,25	104,06	-2,48	4,01	3,25	1,24	2,81660	1,75798	
230,00	460,00	3,37	5,05	106,54	103,33	-3,20	104,10	-2,43	3,97	3,20	1,24	2,81660	1,76775	
240,01	480,01	3,38	5,07	106,54	103,38	-3,16	104,17	-2,37	3,96	3,16	1,25	2,69490	1,71798	
250,00	500,00	3,40	5,10	106,54	103,41	-3,14	104,20	-2,34	3,93	3,14	1,25	2,69490	1,74426	
260,00	520,00	3,39	5,09	106,53	103,45	-3,08	104,24	-2,29	3,87	3,08	1,26	2,58200	1,69756	
270,00	540,00	3,39	5,09	106,53	103,48	-3,04	104,28	-2,25	3,84	3,04	1,26	2,58200	1,71806	
280,00	560,00	3,40	5,10	106,53	103,53	-3,01	104,32	-2,21	3,80	3,01	1,26	2,58200	1,74262	
290,00	580,00	3,39	5,08	106,54	103,55	-2,99	104,37	-2,17	3,81	2,99	1,27	2,47720	1,67527	

**2,597 W/mK**

Anhang 10: Auswertung der Prüfsreihe P-0-2 bei 111,81 °C

Prüfsreihe P-0-2 darrtrockene Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 111,81 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U · I

Zeit [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	$\Delta\theta(t)$ [K]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs ( $\Delta\theta(2t)$ ) [K]	abs ( $\Delta\theta(t)$ ) [K]	$\Delta\theta(2t) / \Delta\theta(t)$	Koeffi- zienten	Wärmeleit- fähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	3,34	5,01	116,29	111,81	-4,48	-4,48	-4,48	4,47	4,48	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	3,44	5,16	116,27	111,86	-4,46	-4,46	-4,41	4,52	4,46	1,01	11,46840	5,27971	
30,00	60,00	3,46	5,19	116,26	111,84	-4,43	-4,43	-4,28	4,57	4,43	1,03	10,25330	4,78466	
40,00	80,00	3,44	5,15	116,26	111,86	-4,40	-4,40	-4,14	4,66	4,40	1,06	8,66770	4,03749	
50,00	100,00	3,44	5,16	116,27	111,92	-4,35	-4,35	-4,00	4,70	4,35	1,08	7,74930	3,65743	
60,00	120,00	3,46	5,19	116,28	111,98	-4,30	-4,30	-3,88	4,71	4,30	1,10	6,92870	3,33139	
70,00	140,00	3,45	5,18	116,29	112,06	-4,24	-4,24	-3,76	4,71	4,24	1,11	6,29660	3,06321	
80,00	160,00	3,45	5,17	116,27	112,12	-4,15	-4,15	-3,63	4,67	4,15	1,13	5,32130	2,64211	
90,00	180,00	3,46	5,19	116,28	112,20	-4,08	-4,08	-3,53	4,63	4,08	1,13	5,32130	2,69264	
100,00	200,00	3,45	5,18	116,27	112,27	-4,00	-4,00	-3,40	4,60	4,00	1,15	4,60210	2,36936	
110,00	220,00	3,44	5,17	116,27	112,32	-3,95	-3,95	-3,31	4,59	3,95	1,16	4,30850	2,24344	
120,00	240,00	3,45	5,18	116,26	112,40	-3,86	-3,86	-3,18	4,54	3,86	1,18	3,81620	2,03610	
130,00	260,00	3,44	5,17	116,28	112,46	-3,82	-3,82	-3,12	4,52	3,82	1,18	3,81620	2,05455	
140,00	280,00	3,44	5,16	116,28	112,53	-3,75	-3,75	-3,02	4,47	3,75	1,19	3,60770	1,97533	
150,00	300,00	3,45	5,17	116,29	112,57	-3,71	-3,71	-2,95	4,48	3,71	1,21	3,24800	1,80036	
160,00	320,00	3,45	5,17	116,28	112,64	-3,63	-3,63	-2,87	4,40	3,63	1,21	3,24800	1,83876	
170,00	340,00	3,44	5,16	116,27	112,70	-3,56	-3,56	-2,78	4,35	3,56	1,22	3,09180	1,78181	
180,00	360,00	3,46	5,18	116,29	112,75	-3,54	-3,54	-2,75	4,33	3,54	1,22	3,09180	1,79914	
190,00	380,00	3,45	5,17	116,29	112,82	-3,48	-3,48	-2,68	4,28	3,48	1,23	2,94850	1,74490	
200,00	400,00	3,44	5,16	116,30	112,87	-3,43	-3,43	-2,62	4,23	3,43	1,23	2,94850	1,76690	
210,00	420,00	3,43	5,15	116,29	112,92	-3,37	-3,37	-2,55	4,19	3,37	1,24	2,81660	1,71066	
220,00	440,00	3,44	5,15	116,32	112,96	-3,35	-3,35	-2,53	4,17	3,35	1,24	2,81660	1,72237	
230,00	460,00	3,45	5,18	116,31	113,04	-3,27	-3,27	-2,47	4,07	3,27	1,25	2,69490	1,69667	
240,00	480,00	3,46	5,20	116,32	113,08	-3,24	-3,24	-2,42	4,06	3,24	1,25	2,69490	1,72143	
250,00	500,00	3,45	5,18	116,33	113,12	-3,20	-3,20	-2,38	4,03	3,20	1,26	2,58200	1,66071	
260,00	520,00	3,46	5,19	116,33	113,16	-3,16	-3,16	-2,30	4,02	3,16	1,27	2,47720	1,61676	
270,00	540,00	3,46	5,20	116,33	113,20	-3,13	-3,13	-2,26	4,00	3,13	1,28	2,37950	1,56982	
280,00	560,00	3,45	5,17	116,34	113,26	-3,08	-3,08	-2,21	3,95	3,08	1,28	2,37950	1,58711	
290,00	580,00	3,43	5,15	116,34	113,30	-3,04	-3,04	-2,16	3,92	3,04	1,29	2,28830	1,53950	
300,00	600,00	3,44	5,17	116,36	113,34	-3,01	-3,01	-2,11	3,91	3,01	1,30	2,20280	1,50232	

**2,318 W/mK**

Anhang 11: Auswertung der Prüfsreihe P-0-2 bei 127,42 °C

Prüfsreihe P-0-2      darrtrockene Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 127,42 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U · I

Zeit t	Zeit Zt	U	P	Temp. Ofen	Temp. (t)	Δθ(t)	Temp. (Zt)	Δθ(Zt)	abs (Δθ(Zt))	abs (Δθ(t))	Δθ(t) / Δθ(Zt)	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit λ	λ - Mittelwert
[s]	[s]	[Volt]	[Watt]	[°C]	[°C]	[K]	[°C]	[K]	[K]	[K]		#NV	[W/mK]	[W/mK]
10,00	20,00	3,32	4,98	132,55	127,42	-5,12	127,41	-5,13	5,11	5,12	1,00	#NV	#NV	#NV
20,00	40,00	3,32	4,98	132,54	127,41	-5,13	127,47	-5,07	5,19	5,13	1,01	11,46840	4,42845	4,42845
30,00	60,00	3,47	5,20	132,56	127,44	-5,13	127,58	-4,98	5,27	5,13	1,03	10,25330	4,14100	4,14100
40,00	80,00	3,47	5,21	132,56	127,47	-5,09	127,72	-4,85	5,33	5,09	1,05	9,16690	3,73496	3,73496
50,00	100,00	3,43	5,14	132,55	127,52	-5,03	127,86	-4,69	5,37	5,03	1,07	8,19560	3,33383	3,33383
60,00	120,00	3,42	5,13	132,56	127,58	-4,98	127,99	-4,57	5,39	4,98	1,08	7,74930	3,17475	3,17475
70,00	140,00	3,44	5,17	132,56	127,65	-4,91	128,11	-4,45	5,37	4,91	1,09	7,32720	3,06593	3,06593
80,00	160,00	3,44	5,16	132,56	127,72	-4,84	128,23	-4,33	5,35	4,84	1,11	6,29660	2,86986	2,86986
90,00	180,00	3,44	5,16	132,56	127,78	-4,78	128,35	-4,21	5,36	4,78	1,12	5,76890	2,47468	2,47468
100,00	200,00	3,45	5,17	132,57	127,86	-4,71	128,46	-4,11	5,30	4,71	1,13	5,32130	2,32527	2,32527
110,00	220,00	3,43	5,15	132,56	127,92	-4,64	128,55	-4,01	5,28	4,64	1,14	4,93660	2,17652	2,17652
120,00	240,00	3,42	5,13	132,58	127,99	-4,60	128,65	-3,93	5,26	4,60	1,14	4,93660	2,19295	2,19295
130,00	260,00	3,42	5,13	132,59	128,06	-4,53	128,73	-3,86	5,20	4,53	1,15	4,60210	2,07395	2,07395
140,00	280,00	3,43	5,14	132,57	128,11	-4,47	128,80	-3,77	5,16	4,47	1,16	4,30850	1,97393	1,97393
150,00	300,00	3,43	5,14	132,57	128,16	-4,41	128,89	-3,68	5,13	4,41	1,16	4,30850	1,99936	1,99936
160,00	320,00	3,43	5,14	132,58	128,23	-4,35	128,93	-3,64	5,05	4,35	1,16	4,30850	2,02868	2,02868
170,00	340,00	3,43	5,14	132,59	128,29	-4,31	129,00	-3,59	5,02	4,31	1,17	4,04830	1,92211	1,92211
180,00	360,00	3,42	5,13	132,60	128,35	-4,24	129,07	-3,53	4,96	4,24	1,17	4,04830	1,94864	1,94864
190,00	380,00	3,42	5,13	132,61	128,39	-4,21	129,13	-3,48	4,94	4,21	1,17	4,04830	1,96368	1,96368
200,00	400,00	3,42	5,13	132,61	128,46	-4,15	129,18	-3,43	4,87	4,15	1,17	4,04830	1,99039	1,99039
210,00	420,00	3,41	5,12	132,60	128,51	-4,10	129,25	-3,36	4,84	4,10	1,18	3,81620	1,89756	1,89756
220,00	440,00	3,43	5,14	132,59	128,55	-4,04	129,32	-3,27	4,80	4,04	1,19	3,60770	1,82629	1,82629
230,00	460,00	3,43	5,14	132,60	128,59	-4,01	129,37	-3,23	4,79	4,01	1,19	3,60770	1,83890	1,83890
240,00	480,00	3,42	5,13	132,59	128,65	-3,94	129,42	-3,17	4,71	3,94	1,20	3,41920	1,77189	1,77189
250,00	500,00	3,42	5,14	132,62	128,67	-3,94	129,48	-3,14	4,75	3,94	1,20	3,41920	1,77164	1,77164
260,00	520,00	3,42	5,13	132,62	128,73	-3,89	129,56	-3,06	4,72	3,89	1,21	3,24800	1,70637	1,70637
270,00	540,00	3,41	5,11	132,61	128,77	-3,84	129,59	-3,02	4,67	3,84	1,21	3,24800	1,71960	1,71960
280,00	560,00	3,41	5,12	132,60	128,80	-3,79	129,64	-2,96	4,63	3,79	1,22	3,09180	1,66013	1,66013
290,00	580,00	3,43	5,14	132,61	128,83	-3,78	129,69	-2,92	4,65	3,78	1,23	2,94850	1,59251	1,59251
300,00	600,00	3,43	5,15	132,60	128,89	-3,72	129,74	-2,86	4,57	3,72	1,23	2,94850	1,62505	1,62505

**2,311 W/mK**

Anhang 12: Auswertung der Prüfsreihe P-0-2 bei 202,38 °C

Prüfsreihe P-0-2 darrtrockene Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 202,38 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U \* I

Zeit t	Zeit 2t	U	P	Temp. Ofen	Temp. (t)	Temp. (2t)	abs (Δθ(2t))	abs (Δθ(t))	Δθ(2t) / Δθ(t)	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit λ	λ - Mittelwert
[s]	[s]	[Volt]	[Watt]	[°C]	[°C]	[°C]	[K]	[K]	[K]	#NV	[W/mK]	[W/mK]
10,00	20,00	3,39	5,08	209,17	202,38	202,37	-6,80	6,78	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	3,38	5,08	209,16	202,37	202,41	-6,75	6,83	1,01	11,46840	3,41046	
30,00	60,00	3,47	5,20	209,16	202,38	202,50	-6,66	6,90	1,02	10,84390	3,31047	
40,00	80,00	3,47	5,20	209,17	202,41	202,61	-6,55	6,97	1,03	10,25330	3,13923	
50,00	100,00	3,42	5,13	209,16	202,45	202,74	-6,41	6,99	1,04	9,69490	2,95162	
60,00	120,00	3,41	5,12	209,16	202,50	202,88	-6,28	7,03	1,06	8,66770	2,65056	
70,00	140,00	3,43	5,14	209,17	202,57	202,99	-6,18	7,03	1,06	8,66770	2,68396	
80,00	160,00	3,43	5,14	209,16	202,61	203,11	-6,05	7,04	1,08	7,74930	2,42044	
90,00	180,00	3,44	5,16	209,17	202,68	203,21	-5,96	7,03	1,08	7,74930	2,44903	
100,00	200,00	3,43	5,15	209,18	202,74	203,32	-5,86	7,02	1,09	7,32720	2,33342	
110,00	220,00	3,42	5,14	209,16	202,81	203,43	-5,73	6,98	1,10	6,92870	2,22772	
120,00	240,00	3,42	5,13	209,16	202,88	203,52	-5,64	6,93	1,10	6,92870	2,25231	
130,00	260,00	3,42	5,13	209,15	202,93	203,59	-5,56	6,88	1,11	6,29660	2,06795	
140,00	280,00	3,41	5,11	209,13	202,99	203,68	-5,45	6,83	1,11	6,29660	2,08653	
150,00	300,00	3,43	5,14	209,14	203,06	203,75	-5,39	6,77	1,11	6,29660	2,11952	
160,00	320,00	3,42	5,13	209,12	203,11	203,84	-5,29	6,74	1,12	5,76890	1,95760	
170,00	340,00	3,41	5,12	209,14	203,16	203,90	-5,25	6,72	1,12	5,76890	1,96340	
180,00	360,00	3,41	5,12	209,15	203,21	203,98	-5,17	6,70	1,13	5,32130	1,82460	
190,00	380,00	3,42	5,12	209,15	203,27	204,04	-5,11	6,66	1,13	5,32130	1,84295	
200,00	400,00	3,41	5,11	209,13	203,32	204,11	-5,01	6,59	1,14	4,93660	1,73075	
210,00	420,00	3,42	5,13	209,15	203,36	204,15	-5,00	6,59	1,14	4,93660	1,74146	
220,00	440,00	3,42	5,14	209,15	203,43	204,20	-4,95	6,49	1,13	5,32130	1,90210	
230,00	460,00	3,43	5,14	209,15	203,45	204,28	-4,87	6,53	1,15	4,60210	1,65111	
240,00	480,00	3,43	5,15	209,15	203,52	204,34	-4,81	6,45	1,15	4,60210	1,67371	
250,00	500,00	3,42	5,13	209,15	203,56	204,40	-4,75	6,44	1,15	4,60210	1,68025	
260,00	520,00	3,42	5,13	209,15	203,59	204,44	-4,70	6,40	1,15	4,60210	1,69267	
270,00	540,00	3,42	5,13	209,16	203,65	204,48	-4,67	6,34	1,15	4,60210	1,70703	
280,00	560,00	3,43	5,14	209,15	203,68	204,52	-4,63	6,30	1,15	4,60210	1,72149	
290,00	580,00	3,43	5,14	209,17	203,73	204,57	-4,59	6,28	1,16	4,30850	1,62182	
300,00	600,00	3,43	5,15	209,14	203,75	204,62	-4,53	6,26	1,16	4,30850	1,63570	

**2,153 W/mK**

Anhang 13: Auswertung der Prüfsreihe P-0-2 bei 396,13 °C

Prüfsreihe P-0-2      darrtrockene Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 396,13 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U · I

Zeit [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs ( $\Delta\theta(2t)$ ) [K]	abs ( $\Delta\theta(t)$ ) [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	3,24	4,86	408,29	396,13	-12,16	396,15	-12,14	12,18	12,16	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	3,35	5,02	408,29	396,15	-12,14	396,18	-12,11	12,17	12,14	1,00	#NV	#NV	
30,00	60,00	3,37	5,06	408,29	396,14	-12,15	396,23	-12,07	12,24	12,15	1,01	11,46840	1,89884	
40,00	80,00	3,45	5,18	408,30	396,18	-12,12	396,33	-11,97	12,27	12,12	1,01	11,46840	1,94944	
50,00	100,00	3,43	5,15	408,27	396,20	-12,08	396,48	-11,80	12,36	12,08	1,02	10,84390	1,83834	
60,00	120,00	3,35	5,02	408,28	396,23	-12,05	396,61	-11,67	12,43	12,05	1,03	10,25330	1,70021	
70,00	140,00	3,39	5,09	408,27	396,26	-12,01	396,73	-11,54	12,47	12,01	1,04	9,69490	1,63473	
80,01	160,01	3,37	5,06	408,29	396,33	-11,96	396,87	-11,42	12,49	11,96	1,05	9,16690	1,54371	
90,00	180,00	3,38	5,07	408,31	396,43	-11,88	396,95	-11,36	12,39	11,88	1,04	9,69490	1,64573	
100,00	200,00	3,42	5,14	408,29	396,48	-11,81	397,08	-11,21	12,42	11,81	1,05	9,16690	1,58544	
110,00	220,00	3,37	5,05	408,29	396,55	-11,75	397,18	-11,12	12,38	11,75	1,05	9,16690	1,56744	
120,00	240,00	3,40	5,10	408,29	396,61	-11,69	397,27	-11,02	12,36	11,69	1,06	8,66770	1,50605	
130,00	260,00	3,38	5,07	408,31	396,70	-11,61	397,37	-10,94	12,29	11,61	1,06	8,66770	1,50538	
140,00	280,00	3,45	5,17	408,30	396,73	-11,57	397,47	-10,83	12,31	11,57	1,06	8,66770	1,54136	
150,00	300,00	3,46	5,18	408,29	396,80	-11,49	397,54	-10,75	12,24	11,49	1,06	8,66770	1,55522	
160,00	320,00	3,44	5,16	408,30	396,87	-11,44	397,65	-10,65	12,22	11,44	1,07	8,19560	1,47194	
170,00	340,00	3,44	5,17	408,29	396,93	-11,36	397,74	-10,55	12,17	11,36	1,07	8,19560	1,48282	
180,00	360,00	3,47	5,20	408,28	396,95	-11,33	397,81	-10,47	12,20	11,33	1,08	7,74930	1,41527	
190,00	380,00	3,43	5,14	408,27	396,99	-11,28	397,92	-10,35	12,21	11,28	1,08	7,74930	1,40565	
200,00	400,00	3,41	5,12	408,30	397,08	-11,21	397,98	-10,32	12,11	11,21	1,08	7,74930	1,40779	
210,00	420,00	3,42	5,12	408,28	397,15	-11,13	398,07	-10,21	12,05	11,13	1,08	7,74930	1,41961	
220,00	440,00	3,44	5,16	408,28	397,18	-11,10	398,16	-10,12	12,08	11,10	1,09	7,32720	1,35381	
230,00	460,00	3,44	5,16	408,27	397,24	-11,04	398,22	-10,05	12,02	11,04	1,09	7,32720	1,36430	
240,00	480,00	3,46	5,19	408,28	397,27	-11,01	398,24	-10,04	11,98	11,01	1,09	7,32720	1,37538	
250,00	500,00	3,45	5,17	408,28	397,34	-10,94	398,29	-9,99	11,89	10,94	1,09	7,32720	1,37834	
260,00	520,00	3,39	5,09	408,28	397,37	-10,91	398,35	-9,92	11,89	10,91	1,09	7,32720	1,36038	
270,00	540,00	3,42	5,13	408,28	397,43	-10,85	398,45	-9,83	11,87	10,85	1,09	7,32720	1,37914	
280,00	560,00	3,44	5,16	408,25	397,47	-10,78	398,50	-9,75	11,82	10,78	1,10	6,92870	1,31802	
290,00	580,00	3,44	5,16	408,24	397,49	-10,75	398,57	-9,67	11,83	10,75	1,10	6,92870	1,32179	
300,00	600,00	3,39	5,09	408,26	397,54	-10,72	398,61	-9,65	11,78	10,72	1,10	6,92870	1,30913	

**1,508 W/mK**

Anhang 14: Auswertung der Prüfsreihe P-0-2 bei 591,25 °C

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 591,25 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 $P = U \cdot I$

Prüfsreihe P-0-2 darrtrockene Probe

Zeit [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs $\Delta\theta(2t)$ [K]	abs $\Delta\theta(t)$ [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	3,04	4,57	604,96	591,25	-13,71	591,27	-13,69	13,72	13,71	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	3,21	4,82	604,95	591,27	-13,66	591,37	-13,58	13,78	13,68	1,01	11,46840	1,60751	
30,00	60,00	3,23	4,85	604,95	591,29	-13,66	591,42	-13,54	13,78	13,66	1,01	11,46840	1,62021	
40,00	80,00	3,41	5,12	604,96	591,37	-13,60	591,51	-13,45	13,74	13,60	1,01	11,46840	1,71854	
50,00	100,00	3,44	5,16	604,96	591,39	-13,57	591,64	-13,33	13,82	13,57	1,02	10,84390	1,63919	
60,00	120,00	3,45	5,17	604,95	591,42	-13,53	591,88	-13,07	14,00	13,53	1,03	10,25330	1,55825	
70,00	140,00	3,42	5,13	604,93	591,45	-13,48	592,08	-12,86	14,11	13,48	1,05	9,16690	1,38832	
80,00	160,00	3,54	5,31	604,91	591,51	-13,40	592,14	-12,77	14,03	13,40	1,05	9,16690	1,44405	
90,00	180,00	3,51	5,26	604,91	591,56	-13,35	592,25	-12,64	14,05	13,35	1,05	9,16690	1,43832	
100,00	200,00	3,53	5,30	604,90	591,64	-13,27	592,38	-12,52	14,01	13,27	1,06	8,66770	1,37824	
110,00	220,00	3,53	5,30	604,93	591,78	-13,15	592,51	-12,42	13,89	13,15	1,06	8,66770	1,38942	
120,00	240,00	3,55	5,32	604,94	591,88	-13,05	592,63	-12,31	13,79	13,05	1,06	8,66770	1,40572	
130,00	260,00	3,61	5,41	604,96	592,02	-12,94	592,77	-12,19	13,69	12,94	1,06	8,66770	1,44273	
140,00	280,00	3,59	5,39	604,95	592,08	-12,87	592,86	-12,07	13,67	12,87	1,06	8,66770	1,44516	
150,00	300,00	3,54	5,32	604,95	592,15	-12,80	592,96	-11,97	13,63	12,80	1,07	8,66770	1,43227	
160,00	320,00	3,54	5,31	604,89	592,14	-12,75	593,09	-11,81	13,70	12,75	1,07	8,19560	1,35672	1,375 W/mK
170,00	340,00	3,57	5,36	604,90	592,22	-12,68	593,21	-11,69	13,67	12,68	1,08	7,74930	1,30260	
180,00	360,00	3,54	5,31	604,86	592,26	-12,60	593,27	-11,59	13,61	12,60	1,08	7,74930	1,29848	
190,00	380,00	3,53	5,29	604,85	592,31	-12,54	593,46	-11,37	13,71	12,54	1,09	7,32720	1,22937	
200,00	400,00	3,47	5,21	604,86	592,38	-12,46	593,49	-11,37	13,59	12,46	1,09	7,32720	1,21668	
210,00	420,00	3,48	5,21	604,86	592,48	-12,38	593,51	-11,35	13,42	12,38	1,08	7,74930	1,29849	
220,00	440,00	3,49	5,24	604,84	592,51	-12,33	593,70	-11,15	13,51	12,33	1,10	6,92870	1,17063	
230,01	460,01	3,50	5,25	604,83	592,53	-12,30	593,73	-11,10	13,49	12,30	1,10	6,92870	1,17713	
240,00	480,00	3,49	5,24	604,83	592,63	-12,20	593,76	-11,07	13,34	12,20	1,09	7,32720	1,25235	
250,00	500,00	3,50	5,25	604,86	592,68	-12,18	593,80	-11,06	13,31	12,18	1,09	7,32720	1,25724	
260,00	520,00	3,48	5,23	604,86	592,77	-12,09	593,85	-11,02	13,17	12,09	1,09	7,32720	1,25987	
270,00	540,00	3,50	5,25	604,84	592,81	-12,03	593,86	-10,98	13,08	12,03	1,09	7,32720	1,27340	
280,00	560,00	3,52	5,28	604,83	592,88	-11,95	593,95	-10,88	13,03	11,95	1,09	7,32720	1,28677	
290,00	580,00	3,51	5,27	604,86	592,92	-11,94	593,97	-10,89	13,00	11,94	1,09	7,32720	1,28609	
300,00	600,00	3,52	5,28	604,86	592,98	-11,88	594,05	-10,80	12,96	11,88	1,09	7,32720	1,29615	

Anhang 15: Auswertung der Prüfserie P-2-1 bei 90,54 °C

Prüfserie P-2-1 Lufttrockene Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 90,54 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 $P = U \cdot I$

Zeit t	Zeit 2t	U	P	Temp. Ofen	Temp. (t)	$\Delta\theta(t)$	Temp. (2t)	$\Delta\theta(2t)$	abs (M(2t))	abs (Δθ(2t))	$\Delta\theta(2t) / \Delta\theta(t)$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit λ	λ - Mittelwert
[s]	[s]	[Volt]	[Watt]	[°C]	[°C]	[K]	[°C]	[K]	[K]	[K]			[W/mK]	[W/mK]
10,00	20,00	3,69	5,54	93,55	90,54	-3,02	90,58	-2,98	3,05	3,02	1,01	11,46840	8,37838	
20,00	40,00	3,73	5,60	93,55	90,58	-2,98	90,82	-2,73	3,22	2,98	1,08	7,74930	5,79602	
30,00	60,00	3,79	5,68	93,55	90,68	-2,87	91,15	-2,40	3,34	2,87	1,16	4,30850	3,39357	
40,00	80,00	3,86	5,79	93,54	90,82	-2,72	91,40	-2,14	3,30	2,72	1,21	3,24800	2,74689	
50,00	100,00	3,57	5,35	93,57	90,97	-2,60	91,63	-1,94	3,25	2,60	1,25	2,69490	2,21019	
60,00	120,00	3,56	5,34	93,54	91,15	-2,39	91,81	-1,74	3,05	2,39	1,27	2,47720	2,20112	
70,00	140,00	3,55	5,32	93,55	91,27	-2,28	91,95	-1,59	2,96	2,28	1,30	2,20280	2,04915	
80,00	160,00	3,61	5,41	93,54	91,40	-2,14	92,07	-1,47	2,81	2,14	1,31	2,12270	2,13728	
90,00	180,00	3,59	5,38	93,54	91,52	-2,02	92,20	-1,34	2,70	2,02	1,33	1,97640	2,09314	
100,00	200,00	3,56	5,35	93,54	91,63	-1,91	92,30	-1,24	2,58	1,91	1,35	1,84610	2,05312	
110,00	220,00	3,62	5,44	93,55	91,73	-1,82	92,40	-1,14	2,50	1,82	1,37	1,72950	2,05524	
120,00	240,00	3,52	5,28	93,54	91,81	-1,73	92,49	-1,05	2,42	1,73	1,40	1,57580	1,90833	
130,00	260,00	3,63	5,45	93,54	91,88	-1,66	92,56	-0,98	2,33	1,66	1,41	1,52950	2,00432	
140,00	280,00	3,61	5,42	93,54	91,95	-1,59	92,62	-0,93	2,26	1,59	1,42	1,48520	2,01126	
150,00	300,00	3,61	5,42	93,54	92,02	-1,52	92,66	-0,88	2,15	1,52	1,42	1,48520	2,10946	
160,00	320,00	3,60	5,40	93,54	92,07	-1,47	92,69	-0,85	2,08	1,47	1,42	1,48520	2,17265	
170,00	340,00	3,60	5,40	93,55	92,14	-1,41	92,73	-0,82	2,00	1,41	1,42	1,48520	2,25994	
180,00	360,00	3,68	5,53	93,54	92,20	-1,34	92,78	-0,76	1,92	1,34	1,44	1,40280	2,30270	
190,00	380,00	3,59	5,38	93,55	92,25	-1,30	92,84	-0,71	1,88	1,30	1,45	1,36420	2,25363	
200,00	400,00	3,56	5,34	93,56	92,30	-1,26	92,86	-0,69	1,82	1,26	1,45	1,36420	2,30946	
210,00	420,00	3,65	5,47	93,54	92,36	-1,18	92,89	-0,65	1,71	1,18	1,45	1,36420	2,52108	
220,00	440,00	3,63	5,45	93,56	92,40	-1,15	92,90	-0,65	1,65	1,15	1,43	1,44310	2,71505	
230,00	460,00	3,47	5,20	93,56	92,46	-1,10	92,91	-0,65	1,55	1,10	1,41	1,52950	2,87067	
240,00	480,00	3,53	5,29	93,55	92,49	-1,05	92,92	-0,63	1,48	1,05	1,40	1,57580	3,15286	
250,00	500,00	3,45	5,17	93,55	92,53	-1,02	92,91	-0,64	1,39	1,02	1,37	1,72950	3,50395	
260,00	520,00	3,46	5,19	93,56	92,56	-1,00	92,91	-0,64	1,35	1,00	1,35	1,84610	3,83281	
270,00	540,00	3,41	5,12	93,56	92,60	-0,96	92,91	-0,64	1,28	0,96	1,33	1,97640	4,18574	

**2,860 W/mK**

Anhang 16: Auswertung der Prüfserie P-2-1 bei 103,26 °C

Prüfserie P-2-1 Lufttrockene Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 103,26 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U · I

Zeit [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs $(\Delta\theta(2t))$ [K]	abs $(\Delta\theta(t))$ [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	4,45	6,67	106,68	103,26	-3,42	103,27	-3,41	3,44	3,42	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	4,53	6,80	106,67	103,27	-3,40	103,45	-3,22	3,59	3,40	1,05	9,16690	7,27927	
30,00	60,00	4,31	6,46	106,68	103,33	-3,35	103,79	-2,88	3,81	3,35	1,14	4,93660	3,79425	
40,00	80,00	4,12	6,18	106,66	103,45	-3,21	104,04	-2,62	3,79	3,21	1,18	3,81620	2,92744	
50,00	100,00	3,94	5,91	106,67	103,61	-3,07	104,23	-2,44	3,69	3,07	1,20	3,41920	2,62006	
60,00	120,00	3,98	5,97	106,67	103,79	-2,87	104,48	-2,19	3,56	2,87	1,24	2,81660	2,32722	
70,00	140,00	4,14	6,22	106,69	103,92	-2,76	104,73	-1,95	3,57	2,76	1,29	2,28830	2,04846	
80,00	160,00	4,30	6,45	106,68	104,04	-2,64	104,95	-1,73	3,55	2,64	1,34	1,90940	1,85826	
90,00	180,00	4,45	6,67	106,68	104,15	-2,53	105,13	-1,55	3,51	2,53	1,39	1,62450	1,70229	
100,00	200,00	4,25	6,38	106,68	104,23	-2,45	105,28	-1,40	3,50	2,45	1,43	1,44310	1,49350	
110,00	220,00	3,96	5,94	106,69	104,36	-2,33	105,41	-1,28	3,38	2,33	1,45	1,36420	1,38162	
120,00	240,00	4,01	6,01	106,68	104,48	-2,20	105,54	-1,14	3,26	2,20	1,48	1,25820	1,36648	
130,00	260,00	4,02	6,03	106,68	104,62	-2,06	105,65	-1,02	3,09	2,06	1,50	1,19450	1,39236	
140,00	280,00	4,00	6,01	106,67	104,73	-1,94	105,76	-0,91	2,97	1,94	1,53	1,10810	1,36622	
150,00	300,00	3,96	5,95	106,68	104,83	-1,85	105,85	-0,83	2,87	1,85	1,55	1,05570	1,35074	
160,00	320,00	3,91	5,87	106,68	104,95	-1,73	105,95	-0,74	2,73	1,73	1,58	0,96410	1,29834	
170,00	340,00	3,95	5,93	106,68	105,04	-1,64	106,04	-0,64	2,63	1,64	1,61	0,91970	1,32620	
180,00	360,00	3,91	5,87	106,68	105,13	-1,55	106,14	-0,54	2,56	1,55	1,65	0,84340	1,27105	
190,00	380,00	3,92	5,88	106,68	105,19	-1,49	106,19	-0,49	2,49	1,49	1,67	0,80890	1,27084	
200,00	400,00	3,93	5,90	106,68	105,28	-1,40	106,26	-0,42	2,38	1,40	1,70	0,76090	1,27532	
210,00	420,00	3,99	5,99	106,68	105,35	-1,33	106,32	-0,36	2,30	1,33	1,73	0,71710	1,28804	

**2,032 W/mK**

Anhang 17: Auswertung der Prüfserie P-2-1 bei 111,55 °C

Prüfserie P-2-1      lufttrockene Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 111,55 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U \* I

Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs $(\Delta\theta(2t))$ [K]	abs $(\Delta\theta(t))$ [K]	$\Delta\theta(2t) / \Delta\theta(t)$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	3,57	5,36	115,44	111,55	111,56	-3,89	-3,88	3,90	3,89	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	4,00	6,00	115,44	111,56	111,71	-3,88	-3,72	4,03	3,88	1,04	9,69490	5,96705	
30,00	60,00	3,98	5,97	115,43	111,60	112,05	-3,83	-3,39	4,27	3,83	1,12	5,76890	3,57639	
40,00	80,00	4,02	6,04	115,42	111,71	112,41	-3,70	-3,00	4,40	3,70	1,19	3,60770	2,33959	
50,00	100,00	4,12	6,18	115,43	111,87	112,73	-3,56	-2,71	4,42	3,56	1,24	2,81660	1,94279	
60,00	120,00	3,93	5,89	115,43	112,05	112,98	-3,38	-2,45	4,31	3,38	1,28	2,37950	1,65040	
70,00	140,00	3,90	5,85	115,44	112,23	113,19	-3,21	-2,25	4,17	3,21	1,30	2,20280	1,59709	
80,00	160,00	3,96	5,94	115,43	112,41	113,38	-3,01	-2,05	3,98	3,01	1,32	2,04730	1,60604	
90,00	180,00	3,85	5,78	115,42	112,58	113,54	-2,85	-1,88	3,81	2,85	1,34	1,90940	1,54216	
100,00	200,00	3,93	5,89	115,43	112,73	113,68	-2,70	-1,74	3,66	2,70	1,36	1,78630	1,54988	
110,00	220,00	3,93	5,89	115,42	112,85	113,82	-2,58	-1,61	3,54	2,58	1,38	1,67570	1,52560	
120,00	240,00	3,85	5,78	115,42	112,98	113,96	-2,44	-1,46	3,42	2,44	1,40	1,57580	1,48328	
130,00	260,00	3,96	5,94	115,42	113,09	114,06	-2,33	-1,35	3,30	2,33	1,42	1,48520	1,50854	
140,00	280,00	4,01	6,02	115,43	113,19	114,17	-2,24	-1,26	3,21	2,24	1,44	1,40280	1,50273	
150,00	300,00	3,81	5,72	115,43	113,29	114,27	-2,14	-1,16	3,11	2,14	1,46	1,32740	1,41374	
160,00	320,00	4,01	6,01	115,42	113,38	114,37	-2,04	-1,05	3,03	2,04	1,49	1,22570	1,43851	
170,00	340,00	3,88	5,82	115,43	113,46	114,44	-1,96	-0,98	2,94	1,96	1,50	1,19450	1,41051	
180,00	360,00	4,00	6,00	115,43	113,54	114,53	-1,89	-0,90	2,88	1,89	1,52	1,13580	1,43453	
190,00	380,00	3,96	5,93	115,42	113,62	114,60	-1,80	-0,82	2,79	1,80	1,55	1,05570	1,38310	
200,00	400,00	3,89	5,84	115,43	113,68	114,67	-1,75	-0,76	2,73	1,75	1,57	1,00710	1,34070	
210,00	420,00	3,95	5,92	115,42	113,77	114,74	-1,65	-0,68	2,62	1,65	1,59	0,96190	1,37388	

**1,906 W/mK**

Anhang 18: Auswertung der Prüfserie P-2-1 bei 127,16 °C

Prüfserie P-2-1      lufttrockene Probe

Länge Heißeisdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 127,16 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U · I

Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	Δθ(t) [K]	Temp. (2t) [°C]	Δθ(2t) [K]	abs (Δθ(2t)) [K]	abs (Δθ(t)) [K]	Δθ(2t) / Δθ(t)	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	λ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	3,96	5,94	131,82	127,16	-4,66	127,17	-4,65	4,67	4,66	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	3,96	5,95	131,82	127,17	-4,65	127,34	-4,48	4,81	4,65	1,04	9,69490	4,93469	
30,00	60,00	4,08	6,12	131,83	127,21	-4,62	127,70	-4,13	5,10	4,62	1,11	6,29660	3,32170	
40,00	80,00	4,02	6,03	131,84	127,34	-4,50	128,07	-3,76	5,24	4,50	1,16	4,30850	2,29882	
50,00	100,00	3,86	5,80	131,84	127,49	-4,34	128,38	-3,46	5,23	4,34	1,20	3,41920	1,81547	
60,00	120,00	3,92	5,87	131,83	127,70	-4,13	128,63	-3,19	5,07	4,13	1,23	2,94850	1,66847	
70,00	140,00	3,86	5,78	131,83	127,89	-3,93	128,85	-2,98	4,89	3,93	1,24	2,81660	1,64811	
80,00	160,00	3,88	5,81	131,83	128,07	-3,76	129,05	-2,78	4,74	3,76	1,26	2,58200	1,58873	
90,00	180,00	3,80	5,70	131,84	128,24	-3,60	129,24	-2,60	4,61	3,60	1,28	2,37950	1,49692	
100,00	200,00	3,87	5,81	131,83	128,38	-3,45	129,41	-2,42	4,48	3,45	1,30	2,20280	1,47522	
110,00	220,00	3,84	5,75	131,83	128,51	-3,32	129,57	-2,26	4,38	3,32	1,32	2,04730	1,41204	
120,00	240,00	4,02	6,03	131,84	128,63	-3,21	129,69	-2,16	4,27	3,21	1,33	1,97640	1,47597	
130,00	260,00	3,86	5,79	131,84	128,75	-3,09	129,80	-2,04	4,15	3,09	1,34	1,90940	1,42145	
140,00	280,00	4,29	6,44	131,84	128,85	-2,99	129,90	-1,95	4,04	2,99	1,35	1,84610	1,58070	
150,00	300,00	3,97	5,96	131,84	128,95	-2,89	129,98	-1,86	3,92	2,89	1,36	1,78630	1,46708	
160,00	320,00	3,87	5,80	131,84	129,05	-2,78	130,06	-1,78	3,79	2,78	1,36	1,78630	1,48073	
170,00	340,00	3,92	5,88	131,83	129,16	-2,68	130,18	-1,65	3,70	2,68	1,38	1,67570	1,46646	
180,00	360,00	3,95	5,92	131,83	129,24	-2,59	130,27	-1,56	3,62	2,59	1,40	1,57580	1,43230	
190,00	380,00	4,16	6,23	131,84	129,33	-2,51	130,35	-1,49	3,53	2,51	1,41	1,52950	1,51095	
200,00	400,00	4,01	6,02	131,83	129,41	-2,42	130,42	-1,41	3,44	2,42	1,42	1,48520	1,46752	
210,00	420,00	3,92	5,88	131,84	129,49	-2,35	130,51	-1,33	3,37	2,35	1,43	1,44310	1,43448	
220,00	440,00	3,93	5,89	131,83	129,57	-2,26	130,57	-1,27	3,26	2,26	1,44	1,40280	1,45451	

**1,820 W/mK**

Anhang 19: Auswertung der Prüfserie P-2-1 bei 200,35 °C

Prüfserie P-2-1 lufttrockene Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 200,35 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 $P = U \cdot I$

Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta t(t)$ [K]	$\Delta t(2t)$ [K]	abs $(\Delta t(2t))$ [K]	abs $(\Delta t(t))$ [K]	$\frac{\Delta t(2t)}{\Delta t(t)}$	Koeffi- zienten	Wärmeleit- fähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	3,68	5,51	208,36	200,35	-8,01	-8,00	8,03	8,01	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	3,67	5,51	208,35	200,37	-7,98	-7,85	8,12	7,98	1,02	#NV	#NV	
30,00	60,00	3,72	5,59	208,35	200,41	-7,94	-7,56	8,32	7,94	1,05	#NV	#NV	
40,00	80,00	3,63	5,45	208,37	200,50	-7,87	-7,30	8,44	7,87	1,07	#NV	#NV	
50,00	100,00	3,62	5,43	208,35	200,63	-7,72	-7,02	8,41	7,72	1,09	#NV	#NV	
60,00	120,00	3,72	5,57	208,35	200,78	-7,56	-6,81	8,32	7,56	1,10	6,92870	2,03174	
70,00	140,00	3,78	5,67	208,36	200,92	-7,44	-6,65	8,23	7,44	1,11	6,29660	1,90841	
80,00	160,00	3,97	5,95	208,36	201,07	-7,29	-6,49	8,09	7,29	1,11	6,29660	2,04422	
90,00	180,00	4,09	6,14	208,36	201,20	-7,17	-6,34	7,99	7,17	1,12	5,76890	1,96549	
100,00	200,00	4,06	6,09	208,35	201,32	-7,02	-6,21	7,84	7,02	1,12	5,76890	1,99047	
110,00	220,00	3,96	5,93	208,37	201,43	-6,94	-6,11	7,76	6,94	1,12	5,76890	1,96358	
120,00	240,00	3,87	5,81	208,37	201,54	-6,83	-6,00	7,66	6,83	1,12	5,76890	1,96256	
130,00	260,00	3,82	5,73	208,36	201,61	-6,75	-5,89	7,60	6,75	1,13	5,32130	1,79851	
140,00	280,00	3,84	5,76	208,38	201,71	-6,66	-5,82	7,50	6,66	1,13	5,32130	1,83085	
150,00	300,00	3,82	5,73	208,36	201,81	-6,55	-5,73	7,38	6,55	1,13	5,32130	1,84970	
160,00	320,00	3,84	5,76	208,36	201,87	-6,49	-5,64	7,34	6,49	1,13	5,32130	1,87774	
170,00	340,00	3,86	5,79	208,36	201,96	-6,41	-5,60	7,22	6,41	1,13	5,32130	1,91212	
180,00	360,00	3,80	5,70	208,37	202,02	-6,35	-5,53	7,17	6,35	1,13	5,32130	1,90067	
190,00	380,00	3,88	5,82	208,38	202,08	-6,30	-5,46	7,14	6,30	1,13	5,32130	1,95656	
200,00	400,00	3,85	5,78	208,37	202,14	-6,23	-5,34	7,11	6,23	1,14	4,93660	1,82154	
210,00	420,00	3,83	5,75	208,37	202,20	-6,17	-5,25	7,09	6,17	1,15	4,60210	1,70705	
220,00	440,00	3,88	5,83	208,38	202,26	-6,12	-5,15	7,10	6,12	1,16	4,30850	1,63147	
230,00	460,00	3,90	5,86	208,38	202,32	-6,06	-5,05	7,07	6,06	1,17	4,04830	1,55623	
240,00	480,00	3,86	5,80	208,37	202,36	-6,01	-4,96	7,05	6,01	1,17	4,04830	1,55438	

1,855 W/mK

Anhang 20: Auswertung der Prüfserie P-2-1 bei 396,18 °C

Prüfserie P-2-1 lufttrockene Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 396,18 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U · I

Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs $(\Delta\theta(2t))$ [K]	abs $(\Delta\theta(t))$ [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	3,83	5,74	409,71	396,18	-13,53	396,16	-13,55	13,55	13,53	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	3,96	5,94	409,68	396,16	-13,52	396,23	-13,45	13,59	13,52	1,01	11,46840	2,00326	
30,00	60,00	3,97	5,96	409,70	396,16	-13,54	396,46	-13,24	13,85	13,54	1,02	10,84390	1,89839	
40,00	80,01	4,05	6,08	409,73	396,23	-13,50	396,76	-12,97	14,03	13,50	1,04	9,69490	1,73595	
50,00	100,00	3,99	5,98	409,70	396,34	-13,36	397,07	-12,63	14,08	13,36	1,05	9,16690	1,63434	
60,00	120,01	4,11	6,16	409,71	396,46	-13,25	397,32	-12,39	14,11	13,25	1,06	8,66770	1,60421	
70,00	140,00	4,01	6,02	409,74	396,62	-13,11	397,55	-12,18	14,04	13,11	1,07	8,19560	1,49605	
80,00	160,00	4,03	6,05	409,75	396,76	-12,99	397,72	-12,03	13,95	12,99	1,07	8,19560	1,51842	
90,00	180,00	3,98	5,97	409,77	396,92	-12,85	397,91	-11,86	13,84	12,85	1,08	7,74930	1,43203	
100,00	200,00	4,02	6,03	409,78	397,07	-12,71	398,10	-11,68	13,73	12,71	1,08	7,74930	1,46200	
110,00	220,00	3,96	5,94	409,76	397,21	-12,55	398,23	-11,53	13,57	12,55	1,08	7,74930	1,46022	
120,00	240,00	4,02	6,03	409,78	397,32	-12,46	398,41	-11,37	13,55	12,46	1,09	7,32720	1,41100	
130,00	260,00	4,06	6,09	409,79	397,45	-12,34	398,52	-11,27	13,42	12,34	1,09	7,32720	1,43806	
140,00	280,00	4,05	6,08	409,78	397,55	-12,23	398,62	-11,16	13,30	12,23	1,09	7,32720	1,44944	
150,00	300,00	4,02	6,03	409,78	397,65	-12,13	398,76	-11,02	13,24	12,13	1,09	7,32720	1,44850	
160,00	320,00	4,05	6,07	409,76	397,72	-12,04	398,85	-10,90	13,17	12,04	1,09	7,32720	1,47016	
170,00	340,00	4,06	6,09	409,75	397,81	-11,94	398,97	-10,78	13,10	11,94	1,10	6,92870	1,40698	
180,00	360,00	4,02	6,03	409,78	397,91	-11,87	399,06	-10,73	13,02	11,87	1,10	6,92870	1,39967	
190,00	380,00	4,04	6,05	409,79	398,00	-11,79	399,11	-10,68	12,90	11,79	1,09	7,32720	1,49697	
200,00	400,00	4,06	6,12	409,79	398,10	-11,69	399,21	-10,58	12,80	11,69	1,10	6,92870	1,44228	
210,00	420,00	4,00	6,00	409,76	398,15	-11,61	399,29	-10,47	12,75	11,61	1,10	6,92870	1,42431	
220,00	440,00	3,98	5,97	409,77	398,23	-11,54	399,40	-10,37	12,71	11,54	1,10	6,92870	1,42589	
230,00	460,00	3,95	5,93	409,79	398,32	-11,47	399,48	-10,32	12,63	11,47	1,10	6,92870	1,42547	
240,00	480,00	3,98	5,97	409,76	398,41	-11,35	399,54	-10,22	12,48	11,35	1,10	6,92870	1,45107	
250,00	500,00	4,02	6,03	409,74	398,46	-11,28	399,61	-10,13	12,43	11,28	1,10	6,92870	1,47381	

**1,517 W/mK**

Anhang 21: Auswertung der Prüfserie P-2-1 bei 592,96 °C

Prüfserie P-2-1 Lufttrockene Probe

Lange Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 592,96 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U · I

Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta H(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta H(2t)$ [K]	abs $(\Delta H(2t))$ [K]	abs $(\Delta H(t))$ [K]	$\frac{\Delta H(2t)}{\Delta H(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	3,75	5,62	608,63	592,96	-15,67	592,95	-15,68	15,68	15,67	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	3,99	5,98	608,62	592,95	-15,67	593,02	-15,60	15,75	15,67	1,00	#NV	#NV	
30,00	60,00	3,97	5,96	608,62	592,97	-15,65	593,21	-15,41	15,89	15,65	1,02	10,84390	1,64222	
40,00	80,00	3,89	5,83	608,60	593,02	-15,57	593,47	-15,13	16,02	15,57	1,03	10,25330	1,52850	
50,00	100,00	3,88	5,81	608,60	593,12	-15,48	593,73	-14,87	16,09	15,48	1,04	9,69490	1,44857	
60,00	120,00	3,80	5,71	608,63	593,21	-15,41	593,97	-14,66	16,17	15,41	1,05	9,16690	1,35057	
70,00	140,00	3,82	5,73	608,63	593,35	-15,28	594,20	-14,42	16,13	15,28	1,06	8,66770	1,29447	
80,00	160,00	3,88	5,81	608,67	593,47	-15,20	594,36	-14,31	16,08	15,20	1,06	8,66770	1,31932	
90,00	180,00	3,88	5,83	608,67	593,58	-15,09	594,54	-14,13	16,04	15,09	1,06	8,66770	1,33184	
100,00	200,00	3,96	5,93	608,70	593,73	-14,97	594,74	-13,96	15,98	14,97	1,07	8,19560	1,29238	
110,00	220,00	3,67	5,51	608,70	593,87	-14,83	594,92	-13,78	15,89	14,83	1,07	8,19560	1,21038	
120,00	240,00	3,83	5,74	608,65	593,97	-14,68	595,09	-13,56	15,81	14,68	1,08	7,74930	1,20623	
130,00	260,00	4,03	6,05	608,68	594,05	-14,62	595,18	-13,50	15,75	14,62	1,08	7,74930	1,27533	
140,00	280,00	3,96	5,94	608,67	594,20	-14,47	595,34	-13,33	15,60	14,47	1,08	7,74930	1,26540	
150,00	300,00	3,93	5,89	608,69	594,25	-14,44	595,43	-13,26	15,62	14,44	1,08	7,74930	1,25748	
160,00	320,00	3,96	5,94	608,67	594,36	-14,31	595,54	-13,12	15,50	14,31	1,08	7,74930	1,27914	
170,00	340,00	3,77	5,66	608,67	594,44	-14,22	595,68	-12,98	15,46	14,22	1,09	7,32720	1,15996	
180,00	360,00	3,96	5,94	608,66	594,54	-14,12	595,83	-12,83	15,41	14,12	1,09	7,32720	1,22617	
190,00	380,00	3,93	5,89	608,66	594,64	-14,02	595,86	-12,80	15,24	14,02	1,09	7,32720	1,22473	
200,00	400,00	3,88	5,82	608,69	594,74	-13,95	595,97	-12,72	15,18	13,95	1,09	7,32720	1,21572	
210,00	420,00	4,18	6,26	608,68	594,82	-13,86	596,06	-12,61	15,11	13,86	1,09	7,32720	1,31746	
220,00	440,00	3,90	5,85	608,67	594,92	-13,76	596,13	-12,55	14,97	13,76	1,09	7,32720	1,23877	
230,00	460,00	3,82	5,73	608,68	595,00	-13,68	596,23	-12,45	14,91	13,68	1,09	7,32720	1,22174	
240,01	480,02	4,08	6,12	608,71	595,09	-13,62	596,28	-12,43	14,81	13,62	1,09	7,32720	1,31053	

**1,301 W/mK**

Anhang 22: Auswertung der Prüfserie P-2-2 bei 91,92 °C

Prüfserie P-2-2 Lufttrockene Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 91,92 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U · I

Zeit t	Zeit 2t	U	P	Temp. Ofen	Temp. (t)	$\Delta t(t)$	Temp. (2t)	$\Delta t(2t)$	abs $(\Delta t(2t))$	abs $(\Delta t(t))$	$\frac{\Delta t(2t)}{\Delta t(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	$\lambda$ - Mittelwert
[s]	[s]	[Volt]	[Watt]	[°C]	[°C]	[K]	[°C]	[K]	[K]	[K]	$\frac{\Delta t(2t)}{\Delta t(t)}$		[W/mK]	[W/mK]
10,00	20,00	3,53	5,30	94,37	91,92	-2,45	91,93	-2,44	2,46	2,45	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	3,92	5,88	94,36	91,93	-2,43	91,96	-2,40	2,46	2,43	1,01	11,46840	11,03158	
30,00	60,00	3,93	5,90	94,35	91,93	-2,42	92,11	-2,24	2,60	2,42	1,07	8,19560	7,95934	
40,00	80,00	3,92	5,87	94,35	91,96	-2,39	92,30	-2,05	2,74	2,39	1,14	4,93660	4,81869	
50,01	100,01	3,93	5,89	94,35	92,01	-2,34	92,52	-1,83	2,84	2,34	1,22	3,09160	3,10326	
60,00	120,00	3,91	5,87	94,32	92,11	-2,22	92,72	-1,61	2,82	2,22	1,27	2,47720	2,61131	
70,00	140,00	3,89	5,84	94,33	92,20	-2,13	92,91	-1,42	2,84	2,13	1,33	1,97640	2,15608	
80,00	160,00	3,93	5,90	94,31	92,30	-2,01	93,09	-1,23	2,79	2,01	1,39	1,62450	1,89781	
90,00	180,00	3,91	5,86	94,31	92,42	-1,90	93,25	-1,06	2,73	1,90	1,44	1,40280	1,72481	
100,00	200,00	3,90	5,85	94,30	92,52	-1,79	93,39	-0,92	2,66	1,79	1,49	1,22570	1,59695	
110,00	220,01	3,94	5,91	94,30	92,62	-1,68	93,54	-0,76	2,60	1,68	1,55	1,05570	1,47865	
120,00	240,00	3,93	5,90	94,30	92,72	-1,58	93,67	-0,63	2,53	1,58	1,60	0,94050	1,39630	
130,00	260,00	3,93	5,90	94,31	92,81	-1,50	93,80	-0,51	2,48	1,50	1,66	0,82590	1,29633	
140,00	280,00	3,92	5,88	94,31	92,91	-1,40	93,91	-0,40	2,40	1,40	1,72	0,73130	1,22574	
150,00	300,00	3,91	5,86	94,30	92,99	-1,30	94,01	-0,29	2,32	1,30	1,78	0,65210	1,16748	
160,00	320,00	3,91	5,87	94,29	93,09	-1,21	94,12	-0,18	2,24	1,21	1,85	0,57500	1,11270	
170,00	340,00	3,95	5,92	94,28	93,16	-1,12	94,23	-0,06	2,19	1,12	1,95	0,48650	1,02110	
180,00	360,00	3,95	5,93	94,29	93,25	-1,04	94,31	0,02	2,10	1,04	2,02	0,43600	0,99116	
190,00	380,00	3,95	5,93	94,29	93,33	-0,96	94,40	0,12	2,03	0,96	2,12	0,37640	0,92782	
200,00	400,00	3,95	5,92	94,28	93,39	-0,90	94,48	0,19	1,99	0,90	2,22	0,32800	0,86196	
210,00	420,00	3,94	5,91	94,28	93,47	-0,81	94,56	0,28	1,90	0,81	2,35	0,27760	0,80736	

**2,459 W/mK**

Anhang 23: Auswertung der Prüfserie P-2-2 bei 103,36 °C

Prüfserie P-2-2 lufttrockene Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 103,36 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U · I

Zeit [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta t(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta t(2t)$ [K]	abs $(\Delta t(2t))$ [K]	abs $(\Delta t(t))$ [K]	$\frac{\Delta H(2t)}{\Delta t(2t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	3,86	5,79	105,80	103,36	-2,43	103,37	-2,42	2,45	2,43	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	3,92	5,88	105,79	103,37	-2,42	103,42	-2,37	2,46	2,42	1,02	10,84390	10,49768	
30,00	60,00	3,90	5,85	105,78	103,37	-2,41	103,59	-2,20	2,63	2,41	1,09	7,32720	7,07064	
40,00	80,00	3,89	5,83	105,78	103,42	-2,36	103,78	-1,99	2,72	2,36	1,16	4,30850	4,23741	
50,00	100,00	3,93	5,89	105,78	103,48	-2,30	103,96	-1,82	2,79	2,30	1,21	3,24800	3,31026	
60,00	120,00	3,92	5,88	105,76	103,59	-2,18	104,16	-1,61	2,75	2,18	1,26	2,58200	2,77330	
70,00	140,00	3,91	5,86	105,76	103,68	-2,08	104,34	-1,42	2,75	2,08	1,32	2,04730	2,29259	
80,00	160,00	3,89	5,84	105,74	103,78	-1,95	104,51	-1,23	2,68	1,95	1,37	1,72950	2,05540	
90,00	180,00	3,94	5,91	105,73	103,86	-1,87	104,66	-1,07	2,67	1,87	1,43	1,44310	1,81707	
100,00	200,00	3,93	5,90	105,72	103,96	-1,76	104,80	-0,92	2,59	1,76	1,48	1,25820	1,68072	
110,00	220,00	3,93	5,90	105,73	104,06	-1,66	104,92	-0,80	2,53	1,66	1,52	1,13580	1,60059	
120,00	240,00	3,93	5,89	105,71	104,16	-1,55	105,04	-0,66	2,44	1,55	1,57	1,00710	1,52402	<b>2,307 W/mK</b>
130,00	260,00	3,90	5,84	105,70	104,25	-1,45	105,17	-0,53	2,37	1,45	1,64	0,86160	1,38400	
140,00	280,00	3,90	5,85	105,69	104,34	-1,35	105,27	-0,43	2,28	1,35	1,68	0,79240	1,36449	
150,00	300,00	3,91	5,86	105,70	104,42	-1,28	105,37	-0,33	2,23	1,28	1,74	0,70340	1,28109	
160,00	320,00	3,92	5,88	105,69	104,51	-1,18	105,48	-0,22	2,15	1,18	1,82	0,60630	1,19764	
170,00	340,00	3,90	5,85	105,68	104,59	-1,09	105,56	-0,13	2,06	1,09	1,88	0,54610	1,16232	
180,00	360,00	3,91	5,86	105,69	104,66	-1,02	105,64	-0,04	2,00	1,02	1,96	0,47880	1,09115	
190,00	380,00	3,92	5,88	105,69	104,71	-0,97	105,73	0,05	1,99	0,97	2,05	0,41680	1,00300	
200,00	400,00	3,90	5,85	105,67	104,80	-0,87	105,81	0,14	1,88	0,87	2,16	0,35580	0,94753	
210,00	420,00	3,95	5,93	105,67	104,86	-0,81	105,88	0,21	1,84	0,81	2,26	0,31120	0,90250	
220,00	440,00	3,94	5,91	105,66	104,92	-0,74	105,97	0,30	1,78	0,74	2,41	0,25820	0,82061	
230,00	460,00	3,94	5,91	105,66	104,98	-0,68	106,04	0,36	1,73	0,68	2,57	0,21500	0,74760	

Anhang 24: Auswertung der Prüfserie P-2-2 bei 114,04 °C

Prüfserie P-2-2      lufttrockene Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 114,04 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U · I

Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	Δθ(t) [K]	Temp. (2t) [°C]	Δθ(2t) [K]	abs (Δθ(2t)) [K]	abs (Δθ(t)) [K]	Δθ(2t) / Δθ(t)	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit λ [W/mK]	λ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	3,50	5,24	116,91	114,04	-2,87	114,05	-2,86	2,88	2,87	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	3,72	5,59	116,90	114,05	-2,85	114,09	-2,81	2,89	2,85	1,01	11,46840	8,93986	
30,00	60,00	3,88	5,83	116,91	114,05	-2,86	114,22	-2,69	3,03	2,86	1,06	8,66770	7,02339	
40,00	80,00	3,94	5,91	116,89	114,09	-2,80	114,41	-2,48	3,11	2,80	1,11	6,29660	5,29440	
50,00	100,00	3,93	5,90	116,89	114,15	-2,74	114,60	-2,28	3,19	2,74	1,17	4,04830	3,47021	
60,00	120,00	3,91	5,87	116,87	114,22	-2,65	114,80	-2,07	3,23	2,65	1,22	3,09180	2,72909	
70,00	140,00	3,90	5,85	116,87	114,32	-2,55	114,98	-1,89	3,22	2,55	1,26	2,58200	2,35582	
80,00	160,00	3,93	5,90	116,86	114,41	-2,45	115,16	-1,69	3,20	2,45	1,31	2,12270	2,03283	
90,00	180,00	3,92	5,89	116,85	114,50	-2,35	115,32	-1,53	3,16	2,35	1,35	1,84610	1,84365	
100,00	200,00	3,92	5,87	116,85	114,60	-2,24	115,47	-1,38	3,11	2,24	1,39	1,62450	1,69449	
110,00	220,00	3,91	5,86	116,83	114,71	-2,12	115,62	-1,21	3,02	2,12	1,43	1,44310	1,58963	
120,00	240,00	3,90	5,85	116,81	114,80	-2,01	115,75	-1,07	2,95	2,01	1,47	1,29200	1,49568	
130,00	260,00	3,90	5,85	116,82	114,89	-1,93	115,88	-0,95	2,92	1,93	1,51	1,16460	1,40243	
140,00	280,00	3,89	5,83	116,82	114,98	-1,83	115,99	-0,83	2,84	1,83	1,55	1,05570	1,33486	
150,00	300,00	3,94	5,91	116,80	115,08	-1,73	116,10	-0,71	2,74	1,73	1,59	0,96190	1,30993	
160,00	320,00	3,94	5,91	116,80	115,16	-1,64	116,19	-0,61	2,66	1,64	1,63	0,88030	1,26505	
170,00	340,00	3,94	5,91	116,80	115,24	-1,56	116,31	-0,49	2,63	1,56	1,68	0,79240	1,19223	
180,00	360,00	3,94	5,91	116,81	115,32	-1,49	116,40	-0,42	2,57	1,49	1,72	0,73130	1,15018	
190,00	380,00	3,93	5,90	116,80	115,42	-1,38	116,48	-0,32	2,44	1,38	1,77	0,66440	1,12900	
200,00	400,00	3,92	5,89	116,79	115,47	-1,33	116,56	-0,23	2,42	1,33	1,82	0,60630	1,07143	
210,00	420,00	3,92	5,87	116,79	115,54	-1,24	116,64	-0,15	2,34	1,24	1,88	0,54610	1,02493	
220,00	440,00	3,92	5,88	116,79	115,62	-1,17	116,72	-0,07	2,27	1,17	1,94	0,49440	0,98889	
230,00	460,00	3,92	5,89	116,78	115,68	-1,10	116,77	-0,02	2,19	1,10	1,98	0,46390	0,98440	
240,00	480,00	3,93	5,89	116,79	115,75	-1,05	116,84	0,05	2,15	1,05	2,05	0,41680	0,93231	

**2,272 W/mK**

Anhang 25: Auswertung der Prüfserie P-2-2 bei 129,32 °C

Prüfserie P-2-2      lufttrockene Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 129,32 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U \* I

Zeit [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs $(\Delta\theta(2t))$ [K]	abs $(\Delta\theta(t))$ [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	3,91	5,86	132,57	129,32	-3,25	129,32	-3,25	3,25	3,25	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	3,90	5,85	132,56	129,32	-3,24	129,37	-3,19	3,30	3,24	1,02	#NV	#NV	
30,00	60,00	3,90	5,85	132,57	129,34	-3,23	129,52	-3,05	3,42	3,23	1,06	#NV	#NV	
40,00	80,00	3,92	5,89	132,55	129,37	-3,17	129,71	-2,84	3,51	3,17	1,11	6,29660	4,64643	
50,00	100,01	3,89	5,83	132,55	129,43	-3,12	129,91	-2,64	3,59	3,12	1,15	4,60210	3,42556	
60,00	120,00	3,89	5,83	132,53	129,52	-3,01	130,10	-2,43	3,58	3,01	1,19	3,60770	2,78172	
70,00	140,00	3,89	5,83	132,51	129,60	-2,91	130,29	-2,22	3,59	2,91	1,24	2,81660	2,24985	
80,00	160,00	3,91	5,86	132,50	129,71	-2,79	130,43	-2,08	3,50	2,79	1,26	2,58200	2,15935	
90,00	180,00	3,92	5,88	132,50	129,80	-2,69	130,59	-1,91	3,48	2,69	1,29	2,28830	1,98626	
100,00	200,00	3,91	5,87	132,49	129,91	-2,58	130,74	-1,75	3,41	2,58	1,32	2,04730	1,85534	
110,00	220,00	3,90	5,84	132,47	129,99	-2,48	130,88	-1,59	3,36	2,48	1,36	1,78630	1,67577	
120,00	240,00	3,92	5,88	132,47	130,10	-2,37	130,99	-1,47	3,27	2,37	1,38	1,67570	1,65107	
130,00	260,00	3,92	5,88	132,47	130,16	-2,29	131,12	-1,35	3,24	2,29	1,41	1,52950	1,56077	
140,00	280,00	3,92	5,88	132,46	130,29	-2,17	131,25	-1,20	3,14	2,17	1,45	1,36420	1,46935	
150,00	300,00	3,92	5,88	132,43	130,35	-2,08	131,34	-1,09	3,08	2,08	1,48	1,25820	1,41322	
160,00	320,00	3,92	5,88	132,45	130,43	-2,02	131,43	-1,02	3,02	2,02	1,50	1,19450	1,38396	
170,00	340,00	3,92	5,88	132,44	130,51	-1,93	131,55	-0,89	2,96	1,93	1,54	1,08140	1,31337	
180,00	360,00	3,91	5,86	132,43	130,59	-1,84	131,65	-0,78	2,90	1,84	1,58	0,96410	1,22104	
190,00	380,00	3,90	5,84	132,44	130,65	-1,78	131,72	-0,71	2,85	1,78	1,60	0,94050	1,22805	
200,00	400,00	3,91	5,86	132,43	130,74	-1,69	131,81	-0,62	2,75	1,69	1,63	0,88030	1,21640	
210,00	420,00	3,91	5,86	132,43	130,80	-1,64	131,90	-0,53	2,74	1,64	1,67	0,80890	1,15366	
220,00	440,00	3,93	5,90	132,42	130,88	-1,55	131,97	-0,45	2,64	1,55	1,71	0,74590	1,13060	
230,00	460,00	3,93	5,90	132,43	130,94	-1,48	132,05	-0,38	2,59	1,48	1,75	0,69000	1,09312	
240,00	480,00	3,94	5,91	132,41	130,99	-1,41	132,10	-0,31	2,52	1,41	1,78	0,65210	1,08407	
250,00	500,00	3,91	5,87	132,42	131,06	-1,36	132,17	-0,25	2,48	1,36	1,82	0,60630	1,03703	

**1,761 W/mK**

Anhang 26: Auswertung der Prüfserie P-2-2 bei 204,47 °C

Prüfserie P-2-2 Lufttrockene Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 204,47 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U \* I

Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs $(\Delta\theta(2t))$ [K]	abs $(\Delta\theta(t))$ [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	3,97	5,96	209,88	204,47	204,48	-5,41	-5,40	5,42	5,41	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	3,96	5,94	209,87	204,48	204,50	-5,39	-5,36	5,42	5,39	1,00	#NV	#NV	
30,00	60,00	3,94	5,91	209,87	204,49	204,57	-5,39	-5,30	5,47	5,39	1,02	#NV	#NV	
40,00	80,00	3,93	5,89	209,87	204,50	204,81	-5,37	-5,06	5,68	5,37	1,06	#NV	#NV	
50,00	100,00	3,91	5,87	209,86	204,56	204,99	-5,31	-4,88	5,74	5,31	1,08	#NV	#NV	
60,00	120,00	3,95	5,92	209,85	204,57	205,15	-5,28	-4,70	5,86	5,28	1,11	6,29660	2,81092	
70,00	140,00	3,93	5,90	209,85	204,69	205,30	-5,16	-4,55	5,77	5,16	1,12	5,76890	2,62286	
80,00	160,00	3,93	5,89	209,85	204,81	205,49	-5,04	-4,37	5,72	5,04	1,13	5,32130	2,47553	
90,00	180,00	3,93	5,89	209,83	204,90	205,65	-4,93	-4,18	5,68	4,93	1,15	4,60210	2,18856	
100,00	200,00	3,91	5,87	209,84	204,99	205,80	-4,85	-4,03	5,67	4,85	1,17	4,04830	1,94942	
110,00	220,00	3,92	5,89	209,83	205,06	205,93	-4,76	-3,90	5,63	4,76	1,18	3,81620	1,87588	
120,00	240,00	3,92	5,88	209,83	205,15	206,08	-4,68	-3,75	5,61	4,68	1,20	3,41920	1,71030	
130,00	260,00	3,92	5,88	209,82	205,22	206,19	-4,60	-3,63	5,57	4,60	1,21	3,24800	1,65326	
140,00	280,00	3,92	5,88	209,81	205,30	206,33	-4,52	-3,48	5,55	4,52	1,23	2,94850	1,52704	
150,00	300,00	3,94	5,91	209,82	205,38	206,42	-4,44	-3,40	5,48	4,44	1,23	2,94850	1,56067	
160,00	320,00	3,91	5,86	209,82	205,49	206,53	-4,33	-3,29	5,37	4,33	1,24	2,81660	1,51814	
170,00	340,00	3,92	5,88	209,81	205,58	206,66	-4,23	-3,16	5,31	4,23	1,25	2,69490	1,49019	
180,00	360,00	3,94	5,91	209,81	205,65	206,74	-4,16	-3,07	5,25	4,16	1,26	2,58200	1,45959	
190,00	380,00	3,93	5,89	209,82	205,73	206,82	-4,08	-2,99	5,17	4,08	1,27	2,47720	1,42132	
200,00	400,00	3,93	5,90	209,82	205,80	206,89	-4,02	-2,93	5,10	4,02	1,27	2,47720	1,44862	
210,00	420,00	3,92	5,87	209,82	205,87	206,99	-3,95	-2,83	5,07	3,95	1,28	2,37950	1,40698	
220,00	440,00	3,90	5,85	209,82	205,93	207,10	-3,89	-2,72	5,05	3,89	1,30	2,20280	1,31918	
230,00	460,00	3,90	5,85	209,82	206,04	207,16	-3,78	-2,66	4,91	3,78	1,30	2,20280	1,35442	
240,00	480,00	3,90	5,85	209,82	206,08	207,26	-3,74	-2,56	4,91	3,74	1,31	2,12270	1,32247	

1,743 W/mK

Anhang 27: Auswertung der Prüfserie P-2-2 bei 400,47 °C

Prüfserie P-2-2 lufttrockene Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 400,47 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U \* I

Zeit t	Zeit 2t	U	P	Temp. Ofen	Temp. (t)	$\Delta\theta(t)$	Temp. (2t)	$\Delta\theta(2t)$	abs $(\Delta\theta(2t))$	abs $(\Delta\theta(t))$	$\Delta\theta(2t) / \Delta\theta(t)$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	$\lambda$ - Mittelwert
[s]	[s]	[Volt]	[Watt]	[°C]	[°C]	[K]	[°C]	[K]	[K]	[K]			[W/mK]	[W/mK]
10,00	20,00	3,37	5,05	410,33	400,47	-9,86	400,48	-9,85	9,87	9,86	1,00	#NV	#NV	#NV
20,00	40,00	3,70	5,55	410,32	400,48	-9,84	400,47	-9,85	9,85	9,84	1,00	#NV	#NV	#NV
30,00	60,00	3,97	5,96	410,33	400,48	-9,85	400,52	-9,81	9,89	9,85	1,00	#NV	#NV	#NV
40,00	80,00	4,00	6,00	410,33	400,47	-9,87	400,59	-9,74	9,99	9,87	1,01	#NV	#NV	#NV
50,00	100,00	3,87	5,80	410,33	400,48	-9,85	400,73	-9,60	10,11	9,85	1,03	#NV	#NV	#NV
60,01	120,01	3,89	5,84	410,33	400,52	-9,81	400,86	-9,46	10,15	9,81	1,04	#NV	#NV	#NV
70,00	140,00	3,92	5,87	410,31	400,53	-9,78	401,04	-9,27	10,29	9,78	1,05	#NV	#NV	#NV
80,00	160,00	3,90	5,85	410,31	400,59	-9,72	401,21	-9,11	10,33	9,72	1,06	#NV	#NV	#NV
90,00	180,00	3,90	5,85	410,31	400,65	-9,67	401,38	-8,93	10,40	9,67	1,08	#NV	#NV	#NV
100,00	200,00	3,90	5,85	410,31	400,73	-9,58	401,55	-8,77	10,40	9,58	1,09	#NV	#NV	#NV
110,00	220,00	3,89	5,84	410,32	400,81	-9,51	401,70	-8,62	10,40	9,51	1,09	#NV	#NV	#NV
120,00	240,00	3,91	5,86	410,32	400,86	-9,45	401,87	-8,44	10,46	9,45	1,11	6,29660	1,55326	1,261 W/mK
130,00	260,00	3,92	5,88	410,32	400,96	-9,36	402,01	-8,30	10,41	9,36	1,11	6,29660	1,57405	
140,00	280,00	3,92	5,88	410,32	401,04	-9,27	402,15	-8,17	10,37	9,27	1,12	5,76890	1,45611	
150,00	300,00	3,94	5,91	410,32	401,13	-9,19	402,29	-8,03	10,35	9,19	1,13	5,32130	1,36243	
160,00	320,00	3,91	5,87	410,30	401,21	-9,09	402,43	-7,87	10,31	9,09	1,13	5,32130	1,36641	
170,00	340,00	3,92	5,87	410,31	401,29	-9,02	402,56	-7,76	10,28	9,02	1,14	4,93660	1,27933	
180,00	360,00	3,92	5,89	410,31	401,38	-8,93	402,69	-7,62	10,24	8,93	1,15	4,60210	1,20714	
190,00	380,00	3,93	5,89	410,31	401,47	-8,84	402,81	-7,50	10,18	8,84	1,15	4,60210	1,21986	
200,00	400,01	3,90	5,86	410,31	401,55	-8,76	402,93	-7,38	10,14	8,76	1,16	4,30850	1,14596	
210,00	420,00	3,89	5,84	410,32	401,63	-8,69	403,04	-7,28	10,10	8,69	1,16	4,30850	1,15206	
220,00	440,01	3,92	5,88	410,33	401,70	-8,63	403,16	-7,17	10,09	8,63	1,17	4,04830	1,09755	
230,00	460,01	3,93	5,89	410,32	401,78	-8,54	403,26	-7,06	10,02	8,54	1,17	4,04830	1,11086	
240,00	480,00	3,93	5,89	410,31	401,87	-8,44	403,35	-6,96	9,91	8,44	1,18	3,81620	1,05982	
250,01	500,01	3,92	5,88	410,32	401,95	-8,38	403,46	-6,86	9,89	8,38	1,18	3,81620	1,06568	

## Anhang 28: Auswertung der Prüfserie P-4-1 bei 87,71 °C

Prüfserie P-4-1      feuchte Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 87,71 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 $P = U \cdot I$

Zeit t	Zeit 2t	U	P	Temp. Ofen	Temp. (t)	$\Delta\theta(t)$	Temp. (2t)	$\Delta\theta(2t)$	abs ( $\Delta\theta(2t)$ )	abs ( $\Delta\theta(t)$ )	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	$\lambda$ - Mittelwert
[s]	[s]	[Volt]	[Watt]	[°C]	[°C]	[K]	[°C]	[K]	[K]	[K]			[W/mK]	[W/mK]
10,00	20,00	4,10	6,15	89,64	87,71	-1,93	87,72	-1,90	1,97	1,93	1,02	10,84390	13,73276	
20,00	40,00	4,10	6,15	89,62	87,72	-1,90	88,05	-1,55	2,24	1,90	1,18	3,81620	4,93068	
30,00	60,00	4,10	6,14	89,62	87,86	-1,75	88,40	-1,17	2,34	1,75	1,33	1,97640	2,75338	
40,00	80,00	4,08	6,12	89,60	88,05	-1,55	88,69	-0,85	2,26	1,55	1,45	1,36420	2,13993	
50,00	100,00	4,08	6,11	89,58	88,23	-1,35	88,94	-0,57	2,13	1,35	1,58	0,96410	1,73302	
60,00	120,00	4,07	6,11	89,57	88,40	-1,17	89,16	-0,33	2,01	1,17	1,72	0,73130	1,51553	
70,00	140,00	4,12	6,18	89,56	88,54	-1,01	89,35	-0,14	1,89	1,01	1,86	0,56520	1,36852	
80,00	160,00	4,11	6,16	89,54	88,69	-0,85	89,52	0,05	1,65	0,85	1,94	0,49440	1,43094	
90,00	180,00	4,10	6,15	89,53	88,82	-0,71	89,65	0,16	1,26	0,71	1,78	0,65210	2,24247	
100,00	200,00	4,09	6,14	89,51	88,94	-0,57	89,77	0,30	0,85	0,57	1,47	1,29200	5,50372	
110,00	220,00	4,09	6,13	89,50	89,06	-0,44	89,88	0,40	1,27	0,44	2,91	0,15230	0,84983	
120,00	240,00	4,08	6,12	89,49	89,16	-0,33	89,97	0,49	1,15	0,33	3,49	0,09360	0,69010	
130,00	260,00	4,12	6,18	89,50	89,25	-0,25	90,05	0,57	1,08	0,25	4,27	0,05550	0,53763	
140,00	280,00	4,11	6,17	89,49	89,35	-0,14	90,15	0,68	0,97	0,14	6,79	0,02370	0,40841	
150,00	300,00	4,11	6,17	89,49	89,44	-0,05	90,21	0,72	0,82	0,05	17,73	0,02370	1,26427	
160,00	320,00	4,08	6,12	89,48	89,52	0,05	90,30	0,82	0,82	0,05	16,96	0,02370	1,19970	
170,00	340,00	4,12	6,19	89,47	89,59	0,12	90,35	0,86	0,86	0,12	7,07	0,02370	0,48077	
180,00	360,00	4,14	6,20	89,49	89,65	0,16	90,41	0,91	0,91	0,16	5,68	0,02710	0,41821	
190,00	380,00	4,12	6,18	89,46	89,72	0,26	90,48	0,97	0,97	0,26	3,73	0,07860	0,74472	
200,00	400,00	4,11	6,17	89,47	89,77	0,30	90,54	1,02	1,02	0,30	3,37	0,10250	0,83390	
210,00	420,00	4,13	6,20	89,46	89,84	0,38	90,58	1,05	1,05	0,38	2,78	0,17270	1,12409	
220,00	440,00	4,11	6,17	89,48	89,88	0,40	90,65	1,11	1,11	0,40	2,78	0,17270	1,06305	

**2,135 W/mK**

Anhang 29: Auswertung der Prüfserie P-4-1 bei 96,47 °C

Prüfserie P-4-1 feuchte Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 96,47 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 $P = U \cdot I$

Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs $(\Delta\theta(2t))$ [K]	abs $(\Delta\theta(t))$ [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	4,26	6,39	99,82	96,47	-3,35	96,58	-3,24	3,46	3,35	1,03	10,25330	7,78579	
20,00	40,00	4,10	6,16	99,82	96,58	-3,24	96,97	-2,81	3,67	3,24	1,13	5,32130	4,02309	
30,00	60,00	4,11	6,17	99,80	96,79	-3,00	97,26	-2,49	3,52	3,00	1,17	4,04830	3,30836	
40,00	80,00	4,14	6,20	99,78	96,97	-2,81	97,48	-2,26	3,36	2,81	1,20	3,41920	3,00455	
50,00	100,00	4,13	6,19	99,78	97,13	-2,65	97,61	-2,10	3,20	2,65	1,21	3,24800	3,01728	
60,00	120,00	4,13	6,19	99,76	97,26	-2,49	97,70	-2,02	2,97	2,49	1,19	3,60770	3,56362	
70,00	140,00	4,11	6,17	99,76	97,40	-2,36	97,74	-1,96	2,77	2,36	1,17	4,04830	4,20552	
80,00	160,00	4,09	6,14	99,74	97,48	-2,26	97,80	-1,89	2,63	2,26	1,16	4,30850	4,65810	
90,00	180,00	4,15	6,22	99,73	97,55	-2,18	97,84	-1,85	2,51	2,18	1,15	4,60210	5,23006	
100,00	200,00	4,17	6,25	99,71	97,61	-2,10	97,88	-1,80	2,40	2,10	1,14	4,93660	5,84746	
110,00	220,00	4,14	6,22	99,72	97,65	-2,07	97,92	-1,75	2,39	2,07	1,15	4,60210	5,49889	
120,00	240,00	4,13	6,19	99,72	97,70	-2,02	97,96	-1,74	2,29	2,02	1,14	4,93660	6,03426	
130,00	260,00	4,11	6,16	99,71	97,73	-1,97	98,00	-1,68	2,26	1,97	1,15	4,60210	5,71878	
140,00	280,00	4,13	6,19	99,70	97,74	-1,96	98,04	-1,65	2,27	1,96	1,16	4,30850	5,42591	
150,00	300,00	4,12	6,18	99,69	97,79	-1,90	98,08	-1,60	2,21	1,90	1,16	4,30850	5,56242	
160,00	320,00	4,12	6,19	99,69	97,80	-1,89	98,15	-1,52	2,26	1,89	1,20	3,41920	4,44974	
170,00	340,00	4,15	6,22	99,68	97,82	-1,87	98,22	-1,46	2,27	1,87	1,22	3,09180	4,09975	
180,00	360,00	4,14	6,21	99,68	97,84	-1,85	98,31	-1,38	2,32	1,85	1,26	2,58200	3,44706	
190,00	380,00	4,11	6,17	99,68	97,84	-1,84	98,40	-1,29	2,38	1,84	1,30	2,20280	2,94676	
200,00	400,00	4,11	6,17	99,68	97,88	-1,80	98,51	-1,18	2,41	1,80	1,34	1,90940	2,60802	
210,00	420,00	4,11	6,16	99,69	97,89	-1,80	98,61	-1,09	2,51	1,80	1,40	1,57580	2,14546	
220,00	440,00	4,11	6,17	99,67	97,92	-1,75	98,71	-0,99	2,51	1,75	1,44	1,40280	1,96770	

**4,298 W/mK**

Anhang 30: Auswertung der Prüfserie P-4-1 bei 107,46 °C

Prüfserie P-4-1 feuchte Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m

Temp. Probe = 107,46 °C

Heizstrom I = 1,50 A

P = U · I

Zeit [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs $(\Delta\theta(2t))$ [K]	abs $(\Delta\theta(t))$ [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	4,21	6,31	111,70	107,46	-4,23	107,47	-4,20	4,26	4,23	1,01	11,46840	6,79969	
20,00	40,00	4,16	6,25	111,67	107,47	-4,20	107,61	-4,03	4,37	4,20	1,04	9,69490	5,73154	
30,00	60,00	4,13	6,20	111,65	107,50	-4,15	107,88	-3,72	4,58	4,15	1,10	6,92870	4,11799	
40,00	80,00	4,10	6,15	111,64	107,61	-4,03	108,17	-3,42	4,65	4,03	1,15	4,60210	2,79295	
50,00	100,00	4,15	6,22	111,63	107,73	-3,89	108,44	-3,14	4,65	3,89	1,19	3,60770	2,29366	
60,00	120,00	4,15	6,23	111,60	107,88	-3,72	108,66	-2,90	4,54	3,72	1,22	3,09180	2,05974	
70,00	140,00	4,15	6,23	111,59	108,01	-3,58	108,85	-2,69	4,46	3,58	1,25	2,69490	1,86683	
80,00	160,00	4,15	6,23	111,59	108,17	-3,42	109,03	-2,51	4,33	3,42	1,27	2,47720	1,79577	
90,00	180,00	4,14	6,21	111,59	108,31	-3,28	109,19	-2,33	4,23	3,28	1,29	2,28830	1,72254	
100,00	200,00	4,12	6,19	111,58	108,44	-3,14	109,33	-2,20	4,08	3,14	1,30	2,20280	1,72629	
110,00	220,00	4,13	6,19	111,55	108,55	-3,00	109,45	-2,07	3,93	3,00	1,31	2,12270	1,74242	
120,00	240,00	4,14	6,21	111,56	108,66	-2,90	109,57	-1,95	3,85	2,90	1,33	1,97640	1,68250	
130,00	260,00	4,14	6,21	111,55	108,76	-2,79	109,68	-1,84	3,74	2,79	1,34	1,90940	1,69342	
140,00	280,00	4,15	6,23	111,55	108,85	-2,69	109,78	-1,74	3,64	2,69	1,35	1,84610	1,69960	
150,00	300,00	4,16	6,24	111,55	108,95	-2,59	109,87	-1,65	3,53	2,59	1,36	1,78630	1,71022	
160,00	320,00	4,15	6,22	111,54	109,03	-2,51	109,96	-1,57	3,45	2,51	1,38	1,67570	1,66371	
170,00	340,00	4,16	6,23	111,54	109,11	-2,43	110,05	-1,49	3,37	2,43	1,39	1,62450	1,66014	
180,00	360,00	4,14	6,21	111,52	109,19	-2,33	110,12	-1,42	3,24	2,33	1,39	1,62450	1,72118	
190,00	380,00	4,13	6,20	111,53	109,27	-2,26	110,20	-1,34	3,18	2,26	1,41	1,52950	1,66996	
200,00	400,00	4,19	6,28	111,53	109,33	-2,20	110,29	-1,27	3,14	2,20	1,42	1,48520	1,68254	
210,00	420,00	4,16	6,24	111,52	109,39	-2,13	110,33	-1,20	3,05	2,13	1,44	1,40280	1,63780	
220,00	440,00	4,14	6,21	111,52	109,45	-2,07	110,40	-1,17	2,97	2,07	1,43	1,44310	1,72402	

**2,114 W/mK**

Anhang 31: Auswertung der Prüfserie P-4-1 bei 122,93 °C

Prüfserie P-4-1      feuchte Probe

Lange Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 122,93 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U \* I

Zeit t	Zeit 2t	U	P	Temp. Ofen	Temp. (t)	$\Delta\theta(t)$	Temp. (2t)	$\Delta\theta(2t)$	abs $(\Delta\theta(2t))$	abs $(\Delta\theta(t))$	$\Delta\theta(2t) / \Delta\theta(t)$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$	$\lambda$ - Mittelwert
[s]	[s]	[Volt]	[Watt]	[°C]	[°C]	[K]	[°C]	[K]	[K]	[K]		#NV	[W/mK]	[W/mK]
10,00	20,00	4,16	6,24	128,16	122,93	-5,22	122,91	-5,23	5,23	5,22	1,00	1,00	#NV	
20,00	40,00	4,13	6,20	128,14	122,91	-5,23	123,01	-5,10	5,36	5,23	1,03	10,25330	4,83228	
30,00	60,00	4,16	6,23	128,13	122,92	-5,22	123,31	-4,77	5,67	5,22	1,09	7,32720	3,48230	
40,00	80,00	4,15	6,22	128,11	123,01	-5,10	123,62	-4,44	5,75	5,10	1,13	5,32130	2,58494	
50,00	100,00	4,13	6,19	128,09	123,15	-4,94	123,89	-4,16	5,72	4,94	1,16	4,30850	2,14700	
60,00	120,00	4,14	6,21	128,08	123,31	-4,77	124,14	-3,89	5,65	4,77	1,18	3,81620	1,97799	
70,00	140,00	4,14	6,21	128,08	123,46	-4,62	124,36	-3,66	5,58	4,62	1,21	3,24800	1,73605	
80,00	160,00	4,14	6,21	128,06	123,62	-4,44	124,55	-3,46	5,43	4,44	1,22	3,09180	1,71799	
90,00	180,00	4,13	6,20	128,04	123,76	-4,29	124,73	-3,27	5,30	4,29	1,24	2,81660	1,62133	
100,00	200,00	4,16	6,25	128,05	123,89	-4,16	124,90	-3,11	5,21	4,16	1,25	2,69490	1,60948	
110,00	220,00	4,16	6,25	128,03	124,02	-4,01	125,04	-2,96	5,06	4,01	1,26	2,58200	1,59914	
120,01	240,02	4,15	6,22	128,03	124,14	-3,89	125,18	-2,83	4,95	3,89	1,27	2,47720	1,57624	
130,00	260,00	4,14	6,21	128,03	124,25	-3,78	125,30	-2,71	4,85	3,78	1,28	2,37950	1,55529	
140,00	280,00	4,14	6,21	128,03	124,36	-3,66	125,41	-2,59	4,73	3,66	1,29	2,28830	1,54361	
150,00	300,00	4,14	6,21	128,02	124,46	-3,57	125,53	-2,50	4,63	3,57	1,30	2,20280	1,52678	
160,00	320,00	4,13	6,20	128,01	124,55	-3,46	125,62	-2,41	4,51	3,46	1,30	2,20280	1,56936	
170,00	340,00	4,15	6,23	128,02	124,63	-3,39	125,72	-2,31	4,46	3,39	1,32	2,04730	1,49761	
180,00	360,00	4,15	6,22	128,01	124,73	-3,27	125,82	-2,22	4,33	3,27	1,32	2,04730	1,54768	
190,00	380,00	4,19	6,29	128,01	124,82	-3,19	125,90	-2,14	4,24	3,19	1,33	1,97640	1,54943	
200,00	400,00	4,15	6,23	128,01	124,90	-3,11	125,98	-2,07	4,15	3,11	1,33	1,97640	1,57581	
210,00	420,00	4,15	6,22	128,00	124,97	-3,04	126,05	-2,00	4,08	3,04	1,34	1,90940	1,55574	
220,00	440,00	4,15	6,23	128,00	125,04	-2,96	126,14	-1,91	4,01	2,96	1,35	1,84610	1,54531	

**1,921 W/mK**

Anhang 32: Auswertung der Prüfserie P-4-1 bei 206,77 °C

Prüfserie P-4-1 feuchte Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 206,77 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U · I

Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs $(\Delta\theta(2t))$ [K]	abs $(\Delta\theta(t))$ [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	4,08	6,13	215,72	206,77	-8,95	206,85	-8,87	9,04	8,95	1,01	11,46840	3,12189	
20,00	40,00	4,10	6,16	215,72	206,85	-8,87	207,13	-8,56	9,19	8,87	1,04	9,69490	2,67662	
30,00	60,00	4,12	6,18	215,71	206,97	-8,73	207,48	-8,22	9,25	8,73	1,06	8,66770	2,43880	
40,00	80,00	4,11	6,16	215,69	207,13	-8,56	207,81	-7,88	9,23	8,56	1,08	7,74930	2,21893	
50,00	100,00	4,11	6,16	215,69	207,32	-8,37	208,13	-7,54	9,20	8,37	1,10	6,92870	2,02875	
60,00	120,00	4,14	6,21	215,70	207,48	-8,22	208,41	-7,28	9,16	8,22	1,11	6,29660	1,89467	
70,00	140,00	4,14	6,21	215,69	207,66	-8,03	208,66	-7,02	9,04	8,03	1,13	5,32130	1,63781	
80,00	160,00	4,13	6,20	215,70	207,81	-7,88	208,88	-6,80	8,97	7,88	1,14	4,93660	1,54443	
90,00	180,00	4,12	6,18	215,68	207,97	-7,71	209,09	-6,58	8,84	7,71	1,15	4,60210	1,46833	
100,00	200,00	4,13	6,19	215,67	208,13	-7,54	209,28	-6,39	8,69	7,54	1,15	4,60210	1,50230	
110,00	220,00	4,12	6,19	215,67	208,26	-7,41	209,48	-6,19	8,63	7,41	1,16	4,30850	1,43081	
120,00	240,00	4,13	6,20	215,69	208,41	-7,28	209,65	-6,04	8,52	7,28	1,17	4,04830	1,37264	
130,00	260,00	4,14	6,20	215,66	208,54	-7,12	209,81	-5,87	8,38	7,12	1,18	3,81620	1,32231	
140,00	280,00	4,14	6,20	215,68	208,66	-7,02	209,96	-5,72	8,32	7,02	1,19	3,60770	1,26893	
150,00	300,00	4,11	6,16	215,67	208,77	-6,90	210,09	-5,60	8,21	6,90	1,19	3,60770	1,28152	
160,00	320,00	4,15	6,22	215,68	208,88	-6,80	210,22	-5,47	8,12	6,80	1,19	3,60770	1,31421	
170,00	340,00	4,14	6,21	215,66	208,99	-6,67	210,36	-5,34	8,00	6,67	1,20	3,41920	1,26703	
180,00	360,00	4,14	6,21	215,67	209,09	-6,58	210,48	-5,22	7,94	6,58	1,21	3,24800	1,22029	
190,00	380,00	4,14	6,21	215,66	209,21	-6,45	210,60	-5,10	7,79	6,45	1,21	3,24800	1,24507	
200,00	400,00	4,15	6,22	215,67	209,28	-6,39	210,70	-4,99	7,80	6,39	1,22	3,09180	1,19685	
210,00	420,00	4,14	6,21	215,67	209,38	-6,29	210,80	-4,90	7,68	6,29	1,22	3,09180	1,21465	

**1,651 W/mK**

Anhang 33: Auswertung der Prüfserie P-4-1 bei 414,38 °C

Prüfserie P-4-1 feuchte Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 414,38 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U \* I

Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs ( $\Delta\theta(2t)$ ) [K]	abs ( $\Delta\theta(t)$ ) [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	3,77	5,66	429,24	414,38	-14,87	414,35	-14,90	14,90	14,87	1,00	#NV	#NV	#NV
20,00	40,00	4,06	6,09	429,25	414,35	-14,90	414,41	-14,80	14,99	14,90	1,01	11,46840	1,86601	1,86601
30,00	60,00	4,09	6,14	429,23	414,36	-14,86	414,60	-14,59	15,14	14,86	1,02	10,84390	1,78103	1,78103
40,00	80,00	4,08	6,11	429,21	414,41	-14,80	414,90	-14,29	15,31	14,80	1,03	10,25330	1,66571	1,66571
50,00	100,00	4,05	6,08	429,23	414,48	-14,75	415,18	-14,01	15,49	14,75	1,05	9,16690	1,50408	1,50408
60,00	120,00	4,04	6,06	429,19	414,60	-14,59	415,46	-13,71	15,47	14,59	1,06	8,66770	1,43217	1,43217
70,00	140,00	4,05	6,07	429,20	414,75	-14,45	415,73	-13,44	15,46	14,45	1,07	8,19560	1,37094	1,37094
80,00	160,00	4,04	6,06	429,19	414,90	-14,29	415,97	-13,19	15,39	14,29	1,08	7,74930	1,30720	1,30720
90,00	180,00	4,04	6,05	429,18	415,04	-14,14	416,21	-12,95	15,32	14,14	1,09	7,32720	1,25685	1,25685
100,00	200,00	4,03	6,04	429,19	415,18	-14,01	416,41	-12,74	15,27	14,01	1,09	7,32720	1,26687	1,26687
110,00	220,00	4,01	6,02	429,19	415,34	-13,85	416,62	-12,53	15,16	13,85	1,09	6,92870	1,21029	1,21029
120,00	240,00	4,01	6,02	429,18	415,46	-13,71	416,79	-12,36	15,07	13,71	1,10	6,92870	1,21029	1,21029
130,00	260,00	4,02	6,03	429,18	415,59	-13,58	416,97	-12,17	14,99	13,58	1,10	6,92870	1,22369	1,22369
140,00	280,00	4,02	6,04	429,17	415,73	-13,44	417,15	-11,99	14,89	13,44	1,11	6,29660	1,12519	1,12519
150,00	300,00	4,02	6,04	429,16	415,84	-13,32	417,29	-11,86	14,78	13,32	1,11	6,29660	1,13527	1,13527
160,00	320,00	4,04	6,06	429,16	415,97	-13,19	417,45	-11,69	14,68	13,19	1,11	6,29660	1,15068	1,15068
170,00	340,00	4,03	6,04	429,16	416,09	-13,07	417,58	-11,55	14,59	13,07	1,12	5,76890	1,06058	1,06058
180,00	360,00	4,03	6,04	429,16	416,21	-12,95	417,70	-11,42	14,47	12,95	1,12	5,76890	1,07143	1,07143
190,00	380,00	4,02	6,04	429,16	416,31	-12,85	417,83	-11,29	14,41	12,85	1,12	5,76890	1,07854	1,07854
200,00	400,00	4,01	6,01	429,16	416,41	-12,74	417,96	-11,16	14,32	12,74	1,12	5,76890	1,08278	1,08278
210,00	420,00	4,03	6,04	429,16	416,51	-12,65	418,06	-11,06	14,23	12,65	1,13	5,32130	1,01104	1,01104
220,00	440,00	4,03	6,04	429,15	416,62	-12,53	418,16	-10,95	14,11	12,53	1,13	5,32130	1,02020	1,02020

1,284 W/mK

## Anhang 34: Auswertung der Prüfserie P-4-1 bei 616,88 °C

Prüfserie P-4-1      feuchte Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
Temp. Probe = 616,88 °C  
Heizstrom I = 1,50 A  
P = U · I

Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs ( $\Delta\theta(2t)$ ) [K]	abs ( $\Delta\theta(t)$ ) [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffi- zienten	Wärmeleit- fähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	3,63	5,44	635,88	616,88	616,92	-19,00	-18,95	19,04	19,00	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	3,63	5,44	635,87	616,92	616,91	-18,95	-18,96	18,96	18,95	1,00	#NV	#NV	
30,00	60,00	3,61	5,42	635,86	616,91	617,03	-18,95	-18,85	19,05	18,95	1,01	11,46840	1,30547	
40,00	80,00	3,65	5,48	635,87	616,91	617,19	-18,96	-18,68	19,23	18,96	1,01	11,46840	1,31874	
50,00	100,00	3,57	5,36	635,85	616,96	617,34	-18,90	-18,52	19,27	18,90	1,02	10,84390	1,22317	
60,00	120,01	3,68	5,51	635,88	617,03	617,54	-18,85	-18,34	19,36	18,85	1,03	10,25330	1,19311	
70,00	140,00	3,69	5,54	635,87	617,12	617,72	-18,75	-18,16	19,34	18,75	1,03	10,25330	1,20450	
80,00	160,00	3,65	5,48	635,87	617,19	617,90	-18,68	-17,97	19,40	18,68	1,04	9,69490	1,13089	
90,00	180,00	3,65	5,47	635,86	617,30	618,02	-18,56	-17,85	19,27	18,56	1,04	9,69490	1,13777	
100,00	200,00	3,67	5,50	635,85	617,34	618,18	-18,52	-17,70	19,34	18,52	1,04	9,69490	1,14595	
110,00	220,00	3,71	5,56	635,89	617,45	618,33	-18,44	-17,55	19,33	18,44	1,05	9,16690	1,10062	
120,00	240,00	3,78	5,66	635,89	617,54	618,42	-18,34	-17,44	19,25	18,34	1,05	9,16690	1,12597	
130,00	260,00	3,71	5,56	635,87	617,65	618,54	-18,22	-17,37	19,07	18,22	1,05	9,16690	1,11266	
140,00	280,00	3,74	5,61	635,87	617,72	618,67	-18,16	-17,24	19,07	18,16	1,05	9,16690	1,12618	
150,00	300,00	3,79	5,69	635,89	617,81	618,75	-18,08	-17,16	18,99	18,08	1,05	9,16690	1,14762	
160,00	320,00	3,72	5,58	635,87	617,90	618,86	-17,97	-17,04	18,90	17,97	1,05	9,16690	1,13211	
170,00	340,00	3,84	5,76	635,87	617,95	618,93	-17,92	-16,97	18,88	17,92	1,05	9,16690	1,17303	
180,00	360,00	3,71	5,57	635,87	618,02	619,00	-17,85	-16,87	18,83	17,85	1,05	9,16690	1,13753	
190,00	380,00	3,72	5,58	635,88	618,10	619,10	-17,78	-16,81	18,75	17,78	1,05	9,16690	1,14369	
200,00	400,00	3,69	5,53	635,87	618,18	619,22	-17,70	-16,68	18,71	17,70	1,06	8,66770	1,07830	
210,00	420,00	3,64	5,46	635,88	618,25	619,29	-17,63	-16,61	18,65	17,63	1,06	8,66770	1,06779	
220,00	440,00	3,73	5,60	635,88	618,33	619,32	-17,55	-16,58	18,51	17,55	1,05	9,16690	1,16327	

**1,158 W/mK**

Anhang 35: Auswertung der Prüfserie P-4-2 bei 89,30 °C

Prüfserie P-4-2 feuchte Probe

Lange Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 89,30 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 $P = U \cdot I$

Zeit [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs ( $\Delta\theta(2t)$ ) [K]	abs ( $\Delta\theta(t)$ ) [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	4,30	6,45	91,61	89,30	-2,31	89,42	-2,19	2,44	2,31	1,05	9,16590	10,18447	
20,00	40,00	4,22	6,33	91,61	89,42	-2,19	89,80	-1,80	2,58	2,19	1,18	3,81620	4,40177	
30,00	60,00	4,22	6,33	91,61	89,59	-2,03	90,10	-1,50	2,56	2,03	1,26	2,58200	3,20817	
40,00	80,00	4,18	6,28	91,59	89,80	-1,80	90,35	-1,23	2,36	1,80	1,31	2,12270	2,95336	
50,00	100,00	4,21	6,32	91,60	89,97	-1,64	90,54	-1,03	2,24	1,64	1,37	1,72950	2,65885	
60,00	120,00	4,24	6,37	91,60	90,10	-1,50	90,73	-0,84	2,33	1,50	1,56	1,03100	1,74423	
70,00	140,00	4,18	6,28	91,60	90,23	-1,37	90,89	-0,68	2,05	1,37	1,50	1,19450	2,17872	
80,00	160,00	4,18	6,26	91,58	90,35	-1,23	91,05	-0,52	1,75	1,23	1,42	1,48520	3,00445	
90,00	180,00	4,19	6,28	91,58	90,44	-1,14	91,18	-0,39	1,53	1,14	1,34	1,90940	4,19456	
100,00	200,00	4,19	6,29	91,58	90,54	-1,03	91,33	-0,24	1,27	1,03	1,23	2,94850	7,14753	
110,00	220,00	4,22	6,34	91,58	90,63	-0,94	91,43	-0,13	1,75	0,94	1,86	0,56520	1,51132	
120,00	240,00	4,20	6,30	91,57	90,73	-0,84	91,52	-0,04	1,63	0,84	1,95	0,48650	1,45741	
130,00	260,00	4,20	6,31	91,56	90,80	-0,76	91,62	0,07	1,59	0,76	2,10	0,38730	1,28639	
140,00	280,00	4,20	6,30	91,57	90,89	-0,68	91,71	0,17	1,53	0,68	2,24	0,31940	1,17847	
150,00	300,00	4,19	6,29	91,55	90,99	-0,56	91,79	0,24	1,36	0,56	2,44	0,24910	1,11955	
160,00	320,00	4,18	6,27	91,57	91,05	-0,52	91,90	0,35	1,39	0,52	2,67	0,19310	0,92646	
170,00	340,00	4,16	6,24	91,56	91,14	-0,43	91,96	0,41	1,26	0,43	2,96	0,14540	0,84712	
180,00	360,00	4,23	6,34	91,57	91,18	-0,39	92,07	0,52	1,30	0,39	3,34	0,10510	0,68264	
190,00	380,00	4,24	6,36	91,56	91,25	-0,31	92,18	0,63	1,25	0,31	4,03	0,06430	0,52491	
200,00	400,00	4,20	6,30	91,57	91,33	-0,24	92,23	0,66	1,15	0,24	4,74	0,04250	0,43966	
210,00	420,00	4,16	6,24	91,56	91,36	-0,20	92,34	0,79	1,19	0,20	5,91	0,02460	0,30382	
220,00	440,00	4,24	6,37	91,57	91,43	-0,13	92,40	0,82	1,09	0,13	8,13	0,02370	0,44596	

**2,382 W/mK**

Anhang 36: Auswertung der Prüfserie P-4-2 bei 99,18 °C

Prüfserie P-4-2 feuchte Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 99,18 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 $P = U \cdot I$

Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs $(\Delta\theta(2t))$ [K]	abs $(\Delta\theta(t))$ [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffi- zienten	Wärmeleit- fähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	4,19	6,28	102,78	99,18	-3,61	99,25	-3,53	3,69	3,61	1,02	10,84390	7,50976	
20,00	40,00	4,20	6,29	102,78	99,25	-3,53	99,47	-3,28	3,78	3,53	1,07	8,19560	5,81458	
30,00	60,00	4,20	6,30	102,77	99,36	-3,40	99,74	-3,01	3,79	3,40	1,11	6,29660	4,64190	
40,00	80,00	4,19	6,29	102,75	99,47	-3,28	100,03	-2,72	3,83	3,28	1,17	4,04830	3,09138	
50,00	100,00	4,17	6,26	102,75	99,62	-3,13	100,29	-2,45	3,82	3,13	1,22	3,09180	2,45950	
60,00	120,00	4,17	6,25	102,76	99,74	-3,01	100,49	-2,22	3,80	3,01	1,26	2,58200	2,13138	
70,00	140,00	4,25	6,38	102,74	99,90	-2,84	100,72	-1,97	3,71	2,84	1,31	2,12270	1,89539	
80,00	160,00	4,18	6,27	102,74	100,03	-2,72	100,92	-1,81	3,63	2,72	1,34	1,90940	1,75289	
90,00	180,00	4,20	6,30	102,74	100,15	-2,59	101,08	-1,63	3,55	2,59	1,37	1,72950	1,67397	
100,00	200,00	4,21	6,32	102,74	100,29	-2,45	101,25	-1,46	3,43	2,45	1,40	1,57580	1,61947	
110,00	220,00	4,22	6,33	102,71	100,40	-2,32	101,39	-1,41	3,22	2,32	1,39	1,62450	1,76597	
120,00	240,00	4,18	6,26	102,71	100,49	-2,22	101,53	-1,25	3,20	2,22	1,44	1,40280	1,57168	
130,00	260,00	4,21	6,31	102,72	100,63	-2,08	101,65	-1,09	3,08	2,08	1,48	1,25820	1,51633	
140,00	280,00	4,21	6,31	102,70	100,72	-1,97	101,77	-0,98	2,97	1,97	1,50	1,19450	1,51980	
150,00	300,00	4,18	6,26	102,69	100,82	-1,87	101,86	-0,86	2,88	1,87	1,54	1,08140	1,44111	
160,00	320,00	4,16	6,24	102,72	100,92	-1,81	101,96	-0,74	2,88	1,81	1,59	0,96190	1,32086	
170,00	340,00	4,23	6,34	102,70	101,02	-1,68	102,05	-0,65	2,71	1,68	1,61	0,91970	1,37949	
180,00	360,00	4,20	6,29	102,71	101,08	-1,63	102,14	-0,58	2,68	1,63	1,65	0,84340	1,29679	
190,00	380,00	4,21	6,31	102,70	101,17	-1,52	102,21	-0,50	2,55	1,52	1,67	0,80890	1,33180	
200,00	400,00	4,23	6,34	102,70	101,25	-1,46	102,29	-0,43	2,48	1,46	1,70	0,76090	1,31589	
210,00	420,00	4,20	6,30	102,74	101,32	-1,42	102,36	-0,37	2,47	1,42	1,74	0,70340	1,24150	
220,00	440,00	4,22	6,33	102,80	101,39	-1,41	102,44	-0,28	2,53	1,41	1,80	0,62860	1,12433	

**2,246 W/mK**

Anhang 37: Auswertung der Prüfserie P-4-2 bei 108,91 °C

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 108,91 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U · I

Prüfserie P-4-2 feuchte Probe

Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs $(\Delta\theta(2t))$ [K]	abs $(\Delta\theta(t))$ [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
												#NV	#NV	
10,00	20,00	4,21	6,31	112,50	108,91	-3,59	108,91	-3,59	3,59	3,59	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	4,18	6,27	112,50	108,91	-3,59	109,08	-3,43	3,76	3,59	1,05	9,16690	6,36617	
30,00	60,00	4,18	6,27	112,51	108,95	-3,56	109,45	-3,06	4,06	3,56	1,14	4,93660	3,45624	
40,01	80,02	4,23	6,35	112,49	109,82	-3,41	109,82	-2,67	4,16	3,41	1,22	3,09180	2,28845	
50,00	100,00	4,23	6,34	112,49	109,25	-3,25	110,18	-2,32	4,18	3,25	1,29	2,28830	1,77679	
60,00	120,01	4,21	6,32	112,50	109,45	-3,05	110,47	-2,02	4,08	3,05	1,34	1,90940	1,57317	
70,00	140,00	4,20	6,30	112,48	109,65	-2,83	110,74	-1,75	3,92	2,83	1,38	1,67570	1,48198	
80,00	160,00	4,18	6,27	112,48	109,82	-2,66	110,95	-1,53	3,78	2,66	1,42	1,48520	1,39627	
90,00	180,00	4,18	6,27	112,48	110,01	-2,47	111,15	-1,33	3,62	2,47	1,46	1,32740	1,33773	
100,00	199,99	4,24	6,36	112,47	110,18	-2,29	111,32	-1,14	3,44	2,29	1,50	1,19450	1,31890	
110,00	220,00	4,22	6,33	112,48	110,32	-2,16	111,47	-1,01	3,31	2,16	1,53	1,10810	1,29365	
120,00	240,00	4,22	6,33	112,45	110,47	-1,98	111,61	-0,84	3,11	1,98	1,57	1,00710	1,28251	
130,00	260,00	4,22	6,34	112,48	110,58	-1,90	111,74	-0,74	3,05	1,90	1,61	0,91970	1,22233	
140,01	280,01	4,20	6,29	112,48	110,74	-1,75	111,88	-0,61	2,89	1,75	1,65	0,84340	1,20801	
150,00	300,00	4,21	6,32	112,46	110,85	-1,61	111,98	-0,49	2,73	1,61	1,70	0,76090	1,18787	
160,00	320,00	4,16	6,24	112,46	110,95	-1,50	112,10	-0,36	2,65	1,50	1,76	0,67700	1,11758	
170,00	340,00	4,16	6,25	112,47	111,04	-1,42	112,19	-0,28	2,57	1,42	1,80	0,62860	1,09741	
180,00	360,00	4,19	6,29	112,46	111,15	-1,31	112,26	-0,20	2,42	1,31	1,85	0,57500	1,10029	

**1,794 W/mK**

Anhang 38: Auswertung der Prüfserie P-4-2 bei 125,86 °C

Prüfserie P-4-2 feuchte Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 125,86 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U \* I

Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs ( $\Delta\theta(2t)$ ) [K]	abs ( $\Delta\theta(t)$ ) [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	4,17	6,26	128,79	125,86	-2,93	125,88	-2,91	2,96	2,93	1,01	11,46840	9,73691	
20,00	40,01	4,18	6,26	128,79	125,88	-2,90	126,09	-2,69	3,11	2,90	1,07	8,19560	7,03783	
30,00	60,00	4,22	6,33	128,78	125,95	-2,83	126,47	-2,31	3,34	2,83	1,18	3,81620	3,40284	
40,00	80,01	4,22	6,33	128,77	126,09	-2,68	126,83	-1,94	3,42	2,68	1,28	2,37950	2,23297	
50,01	100,01	4,21	6,31	128,77	126,29	-2,49	127,14	-1,64	3,34	2,49	1,34	1,90940	1,92860	
60,00	120,00	4,17	6,26	128,78	126,47	-2,31	127,40	-1,38	3,24	2,31	1,40	1,57580	1,69772	
70,00	140,00	4,17	6,25	128,77	126,66	-2,11	127,62	-1,15	3,07	2,11	1,45	1,36420	1,60963	
80,00	160,00	4,15	6,23	128,77	126,83	-1,94	127,83	-0,94	2,94	1,94	1,52	1,13580	1,45278	
90,00	180,00	4,22	6,32	128,76	126,98	-1,78	128,01	-0,75	2,81	1,78	1,58	0,96410	1,36011	
100,00	200,00	4,23	6,34	128,78	127,14	-1,64	128,18	-0,60	2,68	1,64	1,63	0,88030	1,35192	
110,00	220,00	4,21	6,32	128,79	127,26	-1,52	128,32	-0,47	2,58	1,52	1,69	0,77640	1,28151	
120,00	240,00	4,22	6,32	128,77	127,40	-1,37	128,45	-0,32	2,42	1,37	1,77	0,66440	1,22033	
130,00	260,01	4,21	6,31	128,78	127,52	-1,26	128,58	-0,20	2,32	1,26	1,84	0,58520	1,16766	
140,00	280,00	4,15	6,23	128,78	127,62	-1,16	128,68	-0,10	2,22	1,16	1,92	0,51080	1,09239	
150,00	300,00	4,24	6,36	128,77	127,75	-1,02	128,81	0,04	2,00	1,02	1,96	0,47880	1,18594	
160,00	320,00	4,20	6,30	128,78	127,83	-0,95	128,90	0,12	1,78	0,95	1,88	0,54610	1,43824	
170,00	340,00	4,20	6,29	128,78	127,93	-0,85	128,99	0,21	1,49	0,85	1,76	0,67700	1,99443	
180,00	360,00	4,20	6,31	128,79	128,01	-0,78	129,07	0,28	1,83	0,78	2,36	0,27420	0,88358	
190,00	380,00	4,24	6,36	128,77	128,11	-0,66	129,16	0,39	1,71	0,66	2,58	0,21260	0,81246	
200,00	400,00	4,23	6,34	128,78	128,18	-0,60	129,24	0,46	1,67	0,60	2,76	0,17610	0,73488	
210,00	420,00	4,22	6,33	128,78	128,25	-0,53	129,32	0,54	1,59	0,53	3,03	0,13640	0,65297	
220,00	440,00	4,21	6,32	128,78	128,32	-0,46	129,39	0,61	1,53	0,46	3,31	0,10760	0,58641	

**2,039 W/mK**

Anhang 39: Auswertung der Prüfserie P-4-2 bei 201,98°C

Prüfserie P-4-2 feuchte Probe

Lange Heißdraht L = 0,20 m

Temp. Probe = 201,98 °C

Heizstrom I = 1,50 A

P = U \* I

Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs ( $\Delta\theta(2t)$ ) [K]	abs ( $\Delta\theta(t)$ ) [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	4,30	6,44	206,17	201,98	-4,19	201,99	-4,18	4,20	4,19	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	4,31	6,47	206,16	201,99	-4,17	202,17	-3,99	4,34	4,17	1,04	9,69490	5,96981	
30,00	60,00	4,41	6,61	206,17	202,02	-4,14	202,54	-3,62	4,66	4,14	1,13	5,32130	3,38035	
40,00	80,00	4,20	6,31	206,15	202,17	-3,98	202,95	-3,20	4,76	3,98	1,20	3,41920	2,15475	
50,00	100,00	4,19	6,29	206,17	202,34	-3,84	203,30	-2,88	4,79	3,84	1,25	2,69490	1,75721	
60,00	120,00	4,17	6,26	206,15	202,54	-3,61	203,59	-2,57	4,66	3,61	1,29	2,28830	1,57741	
70,00	140,01	4,23	6,35	206,15	202,75	-3,40	203,86	-2,29	4,52	3,40	1,33	1,97640	1,46641	
80,00	160,00	4,19	6,29	206,16	202,95	-3,21	204,10	-2,07	4,36	3,21	1,36	1,78630	1,39140	
90,00	180,00	4,19	6,28	206,15	203,14	-3,01	204,32	-1,83	4,19	3,01	1,39	1,62450	1,34924	
100,00	200,00	4,14	6,22	206,15	203,30	-2,85	204,52	-1,63	4,07	2,85	1,43	1,44310	1,25124	
110,01	220,01	4,17	6,26	206,15	203,44	-2,71	204,70	-1,45	3,98	2,71	1,47	1,29200	1,18578	
120,00	240,00	4,21	6,31	206,16	203,59	-2,57	204,87	-1,28	3,85	2,57	1,50	1,19450	1,16765	
130,00	260,00	4,19	6,28	206,16	203,74	-2,42	205,02	-1,13	3,70	2,42	1,53	1,10810	1,14633	
140,00	280,00	4,21	6,31	206,14	203,86	-2,28	205,19	-0,95	3,60	2,28	1,58	0,96410	1,06293	
150,00	300,00	4,15	6,23	206,16	203,99	-2,17	205,32	-0,84	3,51	2,17	1,61	0,91970	1,04889	
160,00	320,00	4,20	6,30	206,15	204,10	-2,06	205,46	-0,70	3,42	2,06	1,66	0,82590	1,00625	
170,00	340,00	4,20	6,31	206,15	204,22	-1,92	205,59	-0,56	3,29	1,92	1,71	0,74590	0,97222	
180,00	360,00	4,19	6,29	206,15	204,32	-1,83	205,69	-0,46	3,20	1,83	1,75	0,69000	0,94418	
190,00	380,00	4,18	6,27	206,16	204,43	-1,73	205,81	-0,35	3,11	1,73	1,80	0,62860	0,90470	
200,00	400,00	4,17	6,26	206,16	204,52	-1,64	205,94	-0,22	3,06	1,64	1,86	0,56520	0,85624	

1,611 W/mK

Anhang 40: Auswertung der Prüfserie P-4-2 bei 401,09 °C

Prüfserie P-4-2 feuchte Probe

Lange Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 401,09 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U · I

Zeit [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs $(\Delta\theta(2t))$ [K]	abs $(\Delta\theta(t))$ [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	3,66	5,49	407,84	401,09	-6,75	401,10	-6,74	6,76	6,75	1,00	#NV	#NV	
20,00	40,00	3,98	5,97	407,85	401,10	-6,75	401,18	-6,67	6,82	6,75	1,01	11,46840	4,03904	
30,00	60,00	4,17	6,25	407,83	401,13	-6,70	401,42	-6,41	6,98	6,70	1,04	9,69490	3,60057	
40,00	80,00	4,18	6,28	407,83	401,18	-6,65	401,72	-6,11	7,20	6,65	1,08	7,74930	2,90790	
50,00	100,00	4,19	6,29	407,82	401,29	-6,53	402,02	-5,80	7,27	6,53	1,11	6,29660	2,41197	
60,00	120,00	4,21	6,31	407,81	401,42	-6,39	402,30	-5,50	7,28	6,39	1,14	4,93660	1,94070	
70,00	140,00	4,22	6,33	407,83	401,55	-6,28	402,58	-5,26	7,31	6,28	1,16	4,30850	1,72671	
80,00	160,00	4,21	6,32	407,81	401,72	-6,09	402,84	-4,97	7,20	6,09	1,18	3,81620	1,57612	
90,00	180,00	4,18	6,27	407,81	401,87	-5,94	403,06	-4,76	7,12	5,94	1,20	3,41920	1,43711	
100,00	200,00	4,21	6,32	407,81	402,02	-5,79	403,27	-4,55	7,03	5,79	1,21	3,24800	1,41155	
110,00	220,00	4,22	6,33	407,80	402,15	-5,65	403,45	-4,34	6,95	5,65	1,23	2,94850	1,31624	
120,00	240,00	4,20	6,30	407,80	402,30	-5,49	403,65	-4,15	6,83	5,49	1,24	2,81660	1,28585	
130,00	260,00	4,17	6,26	407,80	402,44	-5,35	403,81	-3,99	6,72	5,35	1,26	2,58200	1,20072	
140,00	280,00	4,22	6,33	407,81	402,58	-5,23	403,99	-3,82	6,64	5,23	1,27	2,47720	1,19335	
150,00	300,00	4,21	6,32	407,79	402,72	-5,08	404,13	-3,66	6,49	5,08	1,28	2,37950	1,17803	
160,00	320,00	4,22	6,34	407,79	402,84	-4,95	404,27	-3,52	6,38	4,95	1,29	2,28830	1,16584	
170,00	340,00	4,24	6,36	407,78	402,95	-4,83	404,40	-3,38	6,28	4,83	1,30	2,20280	1,15423	
180,00	360,00	4,21	6,31	407,77	403,06	-4,72	404,53	-3,24	6,19	4,72	1,31	2,12270	1,12984	
190,00	380,00	4,20	6,30	407,77	403,17	-4,60	404,65	-3,13	6,07	4,60	1,32	2,04730	1,11637	
200,00	400,00	4,19	6,28	407,77	403,27	-4,51	404,78	-2,99	6,03	4,51	1,34	1,90940	1,05903	
210,00	420,00	4,19	6,28	407,76	403,37	-4,39	404,88	-2,88	5,90	4,39	1,34	1,90940	1,08695	
220,00	440,00	4,19	6,29	407,76	403,45	-4,30	405,01	-2,75	5,86	4,30	1,36	1,78630	1,03904	

**1,666 W/mK**

Anhang 41: Auswertung der Prüfserie P-4-2 bei 593,60 °C

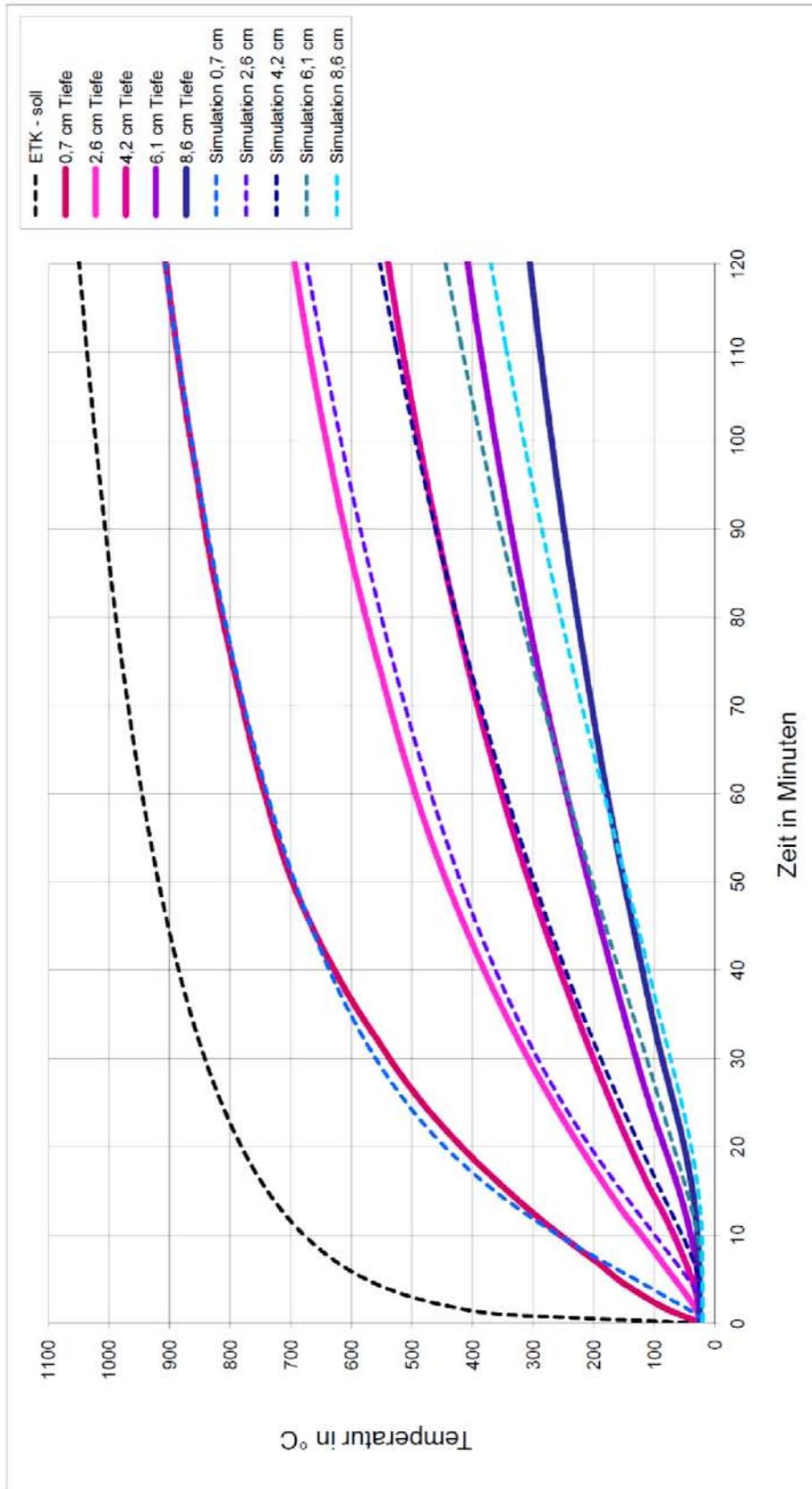
Prüfserie P-4-2 feuchte Probe

Länge Heißdraht L = 0,20 m  
 Temp. Probe = 593,60 °C  
 Heizstrom I = 1,50 A  
 P = U · I

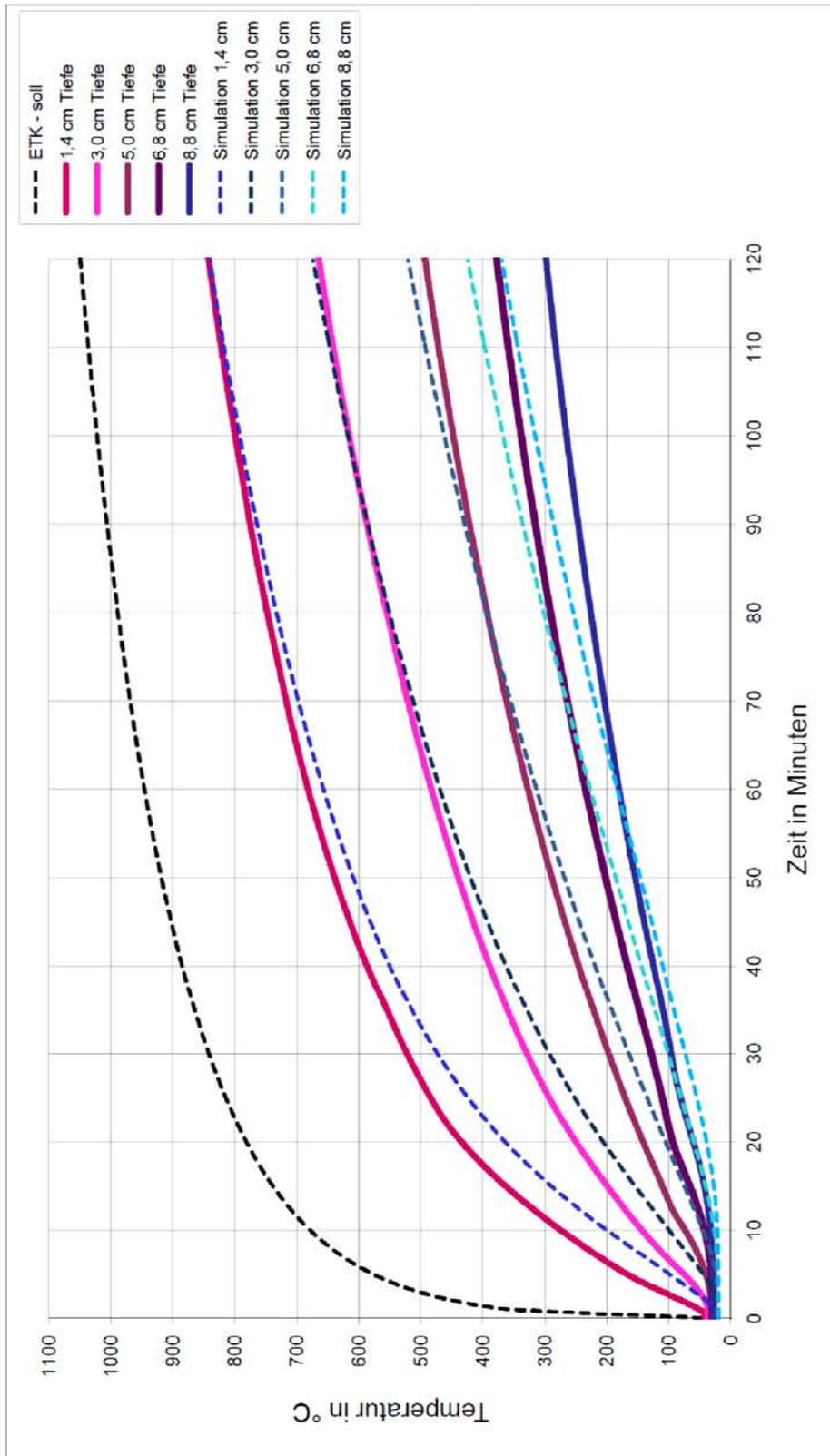
Zeit t [s]	Zeit 2t [s]	U [Volt]	P [Watt]	Temp. Ofen [°C]	Temp. (t) [°C]	$\Delta\theta(t)$ [K]	Temp. (2t) [°C]	$\Delta\theta(2t)$ [K]	abs $(\Delta\theta(2t))$ [K]	abs $(\Delta\theta(t))$ [K]	$\frac{\Delta\theta(2t)}{\Delta\theta(t)}$	Koeffizienten	Wärmeleitfähigkeit $\lambda$ [W/mK]	$\lambda$ - Mittelwert [W/mK]
10,00	20,00	3,90	5,85	600,71	593,60	-7,11	593,72	-7,05	7,16	7,11	1,01	11,46840	3,75395	
20,00	40,00	3,89	5,83	600,66	593,61	-7,05	593,71	-6,90	7,19	7,05	1,02	10,84390	3,57029	
30,00	60,00	3,89	5,84	600,60	593,63	-6,97	593,70	-6,69	7,25	6,97	1,04	9,69490	3,23018	
40,00	80,00	3,89	5,83	600,58	593,67	-6,90	593,69	-6,53	7,28	6,90	1,05	9,16690	3,08140	
50,00	100,01	3,90	5,85	600,58	593,74	-6,84	593,68	-6,39	7,28	6,84	1,07	8,19560	2,78815	
60,00	120,00	3,89	5,84	600,53	593,84	-6,69	593,69	-6,18	7,20	6,69	1,08	7,74930	2,69033	
70,00	140,00	3,89	5,83	600,52	593,92	-6,60	593,68	-5,95	7,24	6,60	1,10	6,92870	2,43633	
80,00	160,00	3,95	5,93	600,54	594,00	-6,53	593,68	-5,79	7,27	6,53	1,11	6,29660	2,27410	
90,00	180,00	3,96	5,94	600,57	594,12	-6,46	593,65	-5,56	7,36	6,46	1,14	4,93660	1,80821	
100,00	200,00	3,95	5,92	600,60	594,20	-6,39	593,65	-5,44	7,35	6,39	1,15	4,60210	1,69479	
110,00	220,00	3,94	5,92	600,62	594,32	-6,30	593,65	-5,32	7,29	6,30	1,16	4,30650	1,60934	
120,00	240,00	3,95	5,92	600,61	594,42	-6,18	593,65	-5,30	7,07	6,18	1,14	4,93660	1,87994	
130,00	260,00	3,93	5,90	600,56	594,49	-6,08	593,64	-5,20	6,95	6,08	1,14	4,93660	1,90696	
140,00	280,00	3,94	5,90	600,55	594,60	-5,95	593,64	-5,06	6,84	5,95	1,15	4,60210	1,81629	
150,00	300,00	3,95	5,93	600,58	594,69	-5,89	593,62	-4,80	6,98	5,89	1,19	3,60770	1,44465	
160,00	320,01	3,95	5,93	600,57	594,78	-5,79	593,61	-4,69	6,89	5,79	1,19	3,60770	1,47000	
170,00	340,00	3,96	5,94	600,54	594,86	-5,68	593,62	-4,57	6,79	5,68	1,20	3,41920	1,42257	
180,00	360,00	3,95	5,93	600,51	594,95	-5,56	593,62	-4,48	6,63	5,56	1,19	3,60770	1,53065	
190,00	380,00	3,93	5,89	600,50	595,02	-5,48	593,63	-4,38	6,58	5,48	1,20	3,41920	1,46365	
200,00	400,00	3,95	5,92	600,53	595,09	-5,44	593,61	-4,32	6,55	5,44	1,21	3,24800	1,40803	
210,00	420,01	3,94	5,91	600,54	595,17	-5,37	593,60	-4,24	6,50	5,37	1,21	3,24800	1,42250	
220,00	440,00	3,96	5,94	600,55	595,23	-5,32	593,62	-4,13	6,51	5,32	1,22	3,09180	1,37366	

**2,094 W/mK**

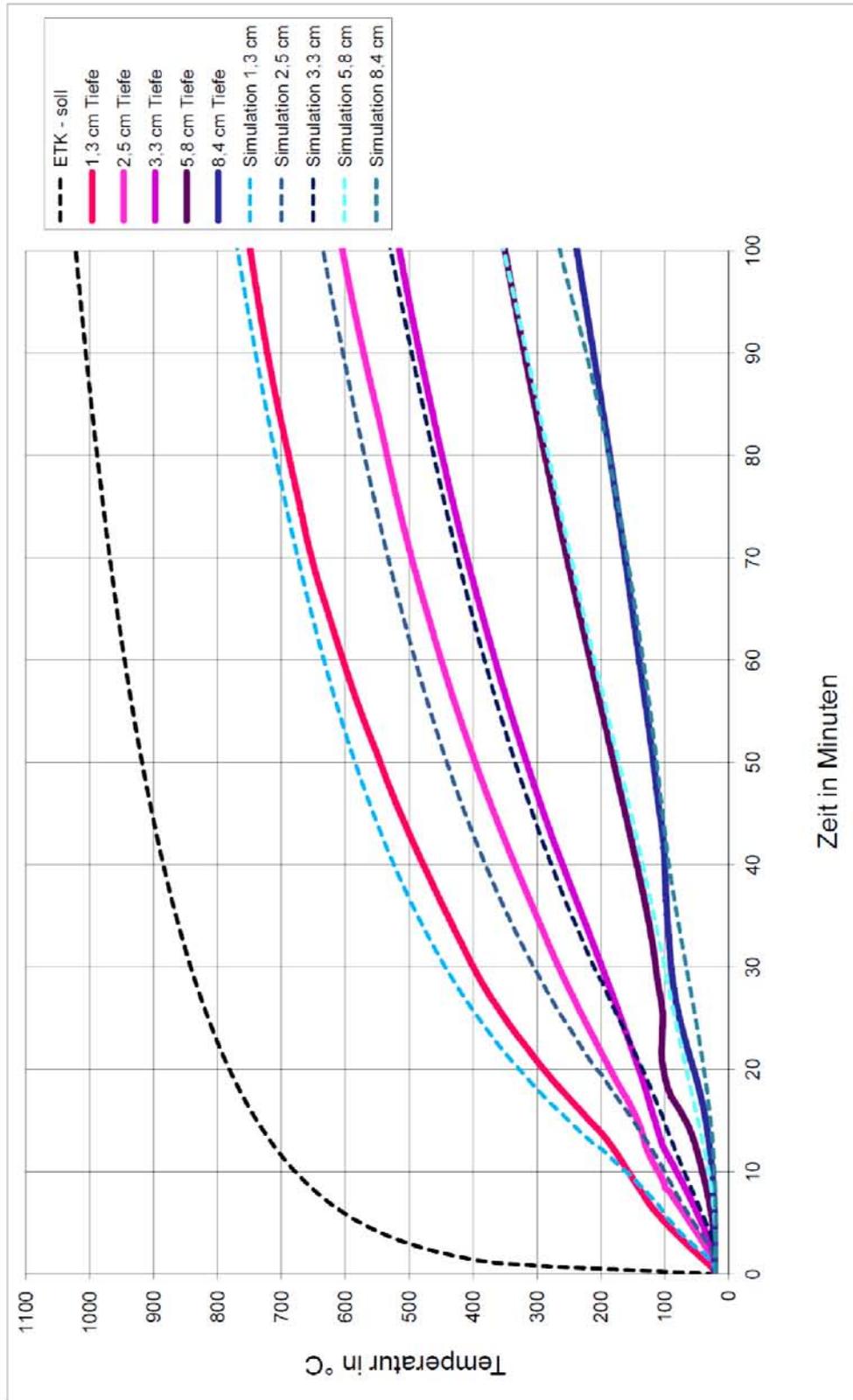
Anhang 42: Simulation BP\_0\_1



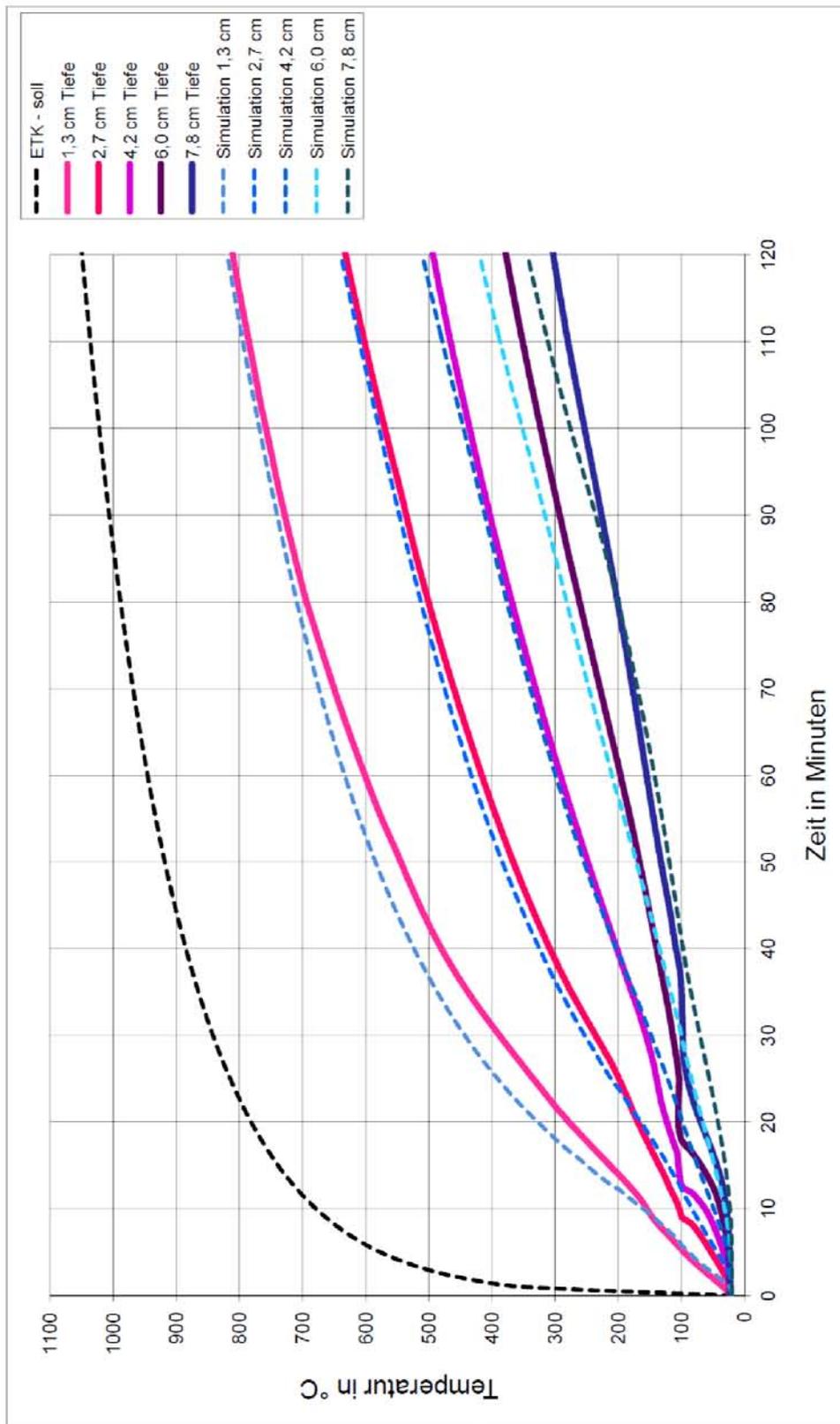
Anhang 43: Simulation BP\_0\_2



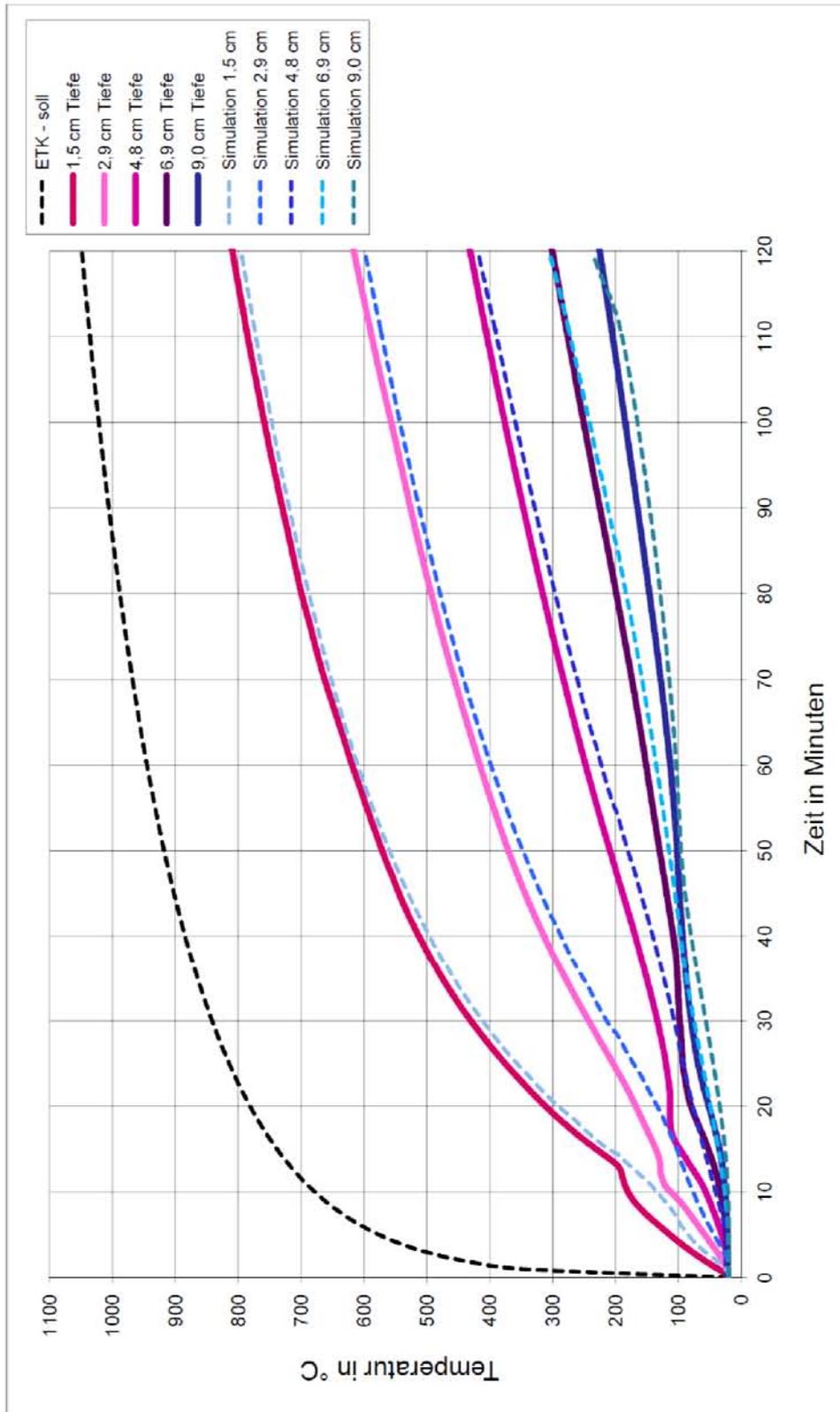
Anhang 44: Simulation BP\_2\_1



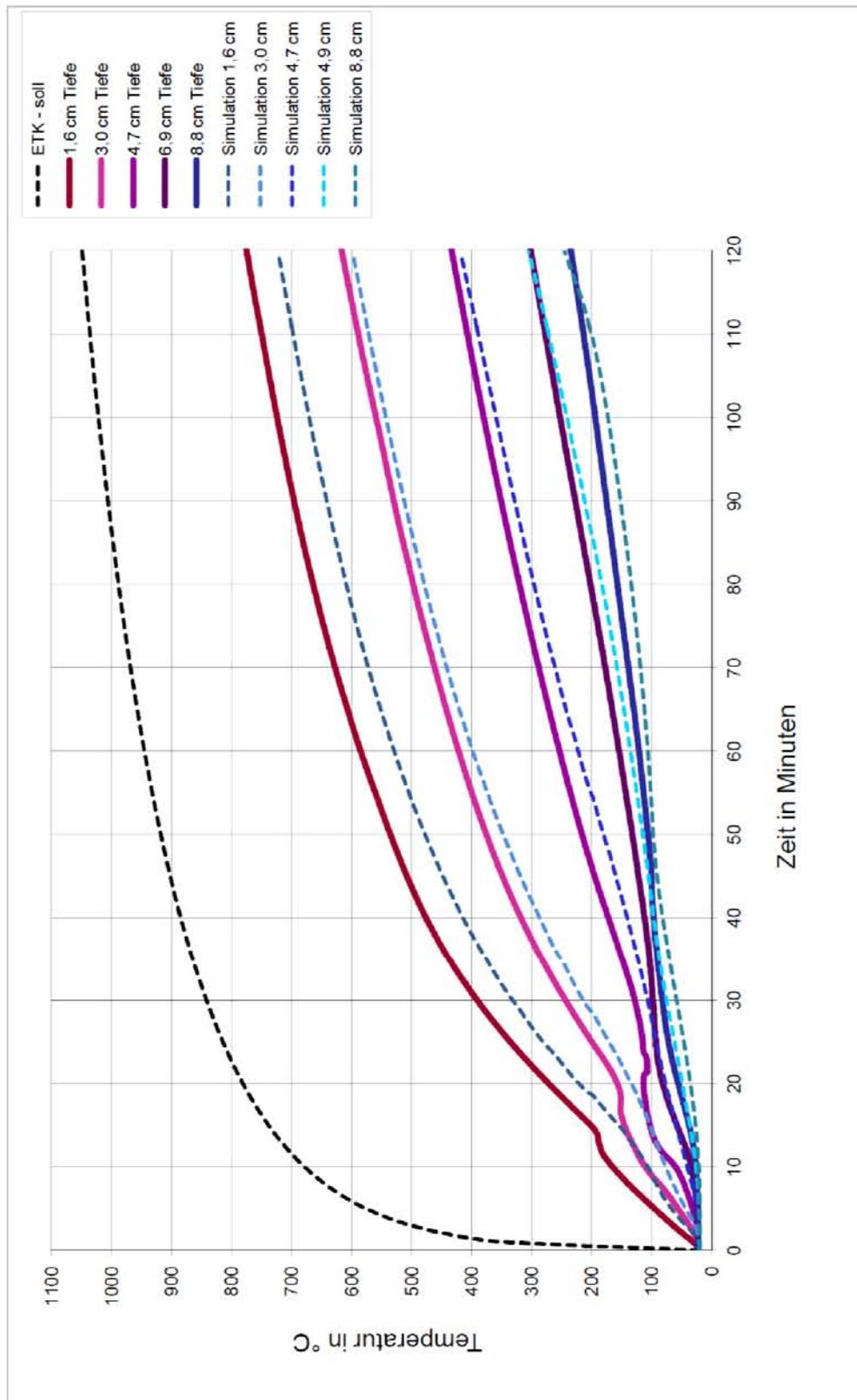
Anhang 45: Simulation BP\_2\_2



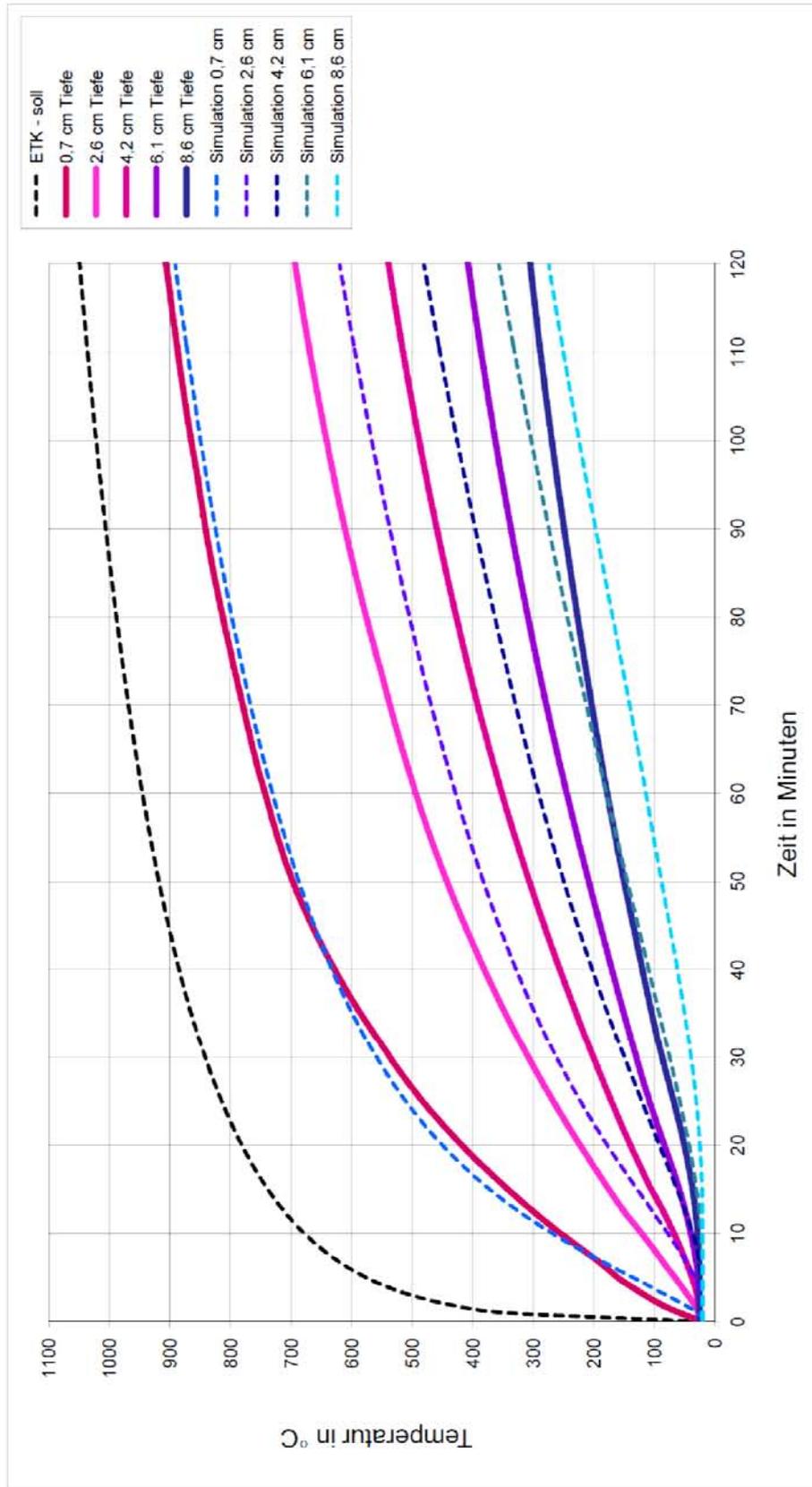
Anhang 46: Simulation BP\_4\_1



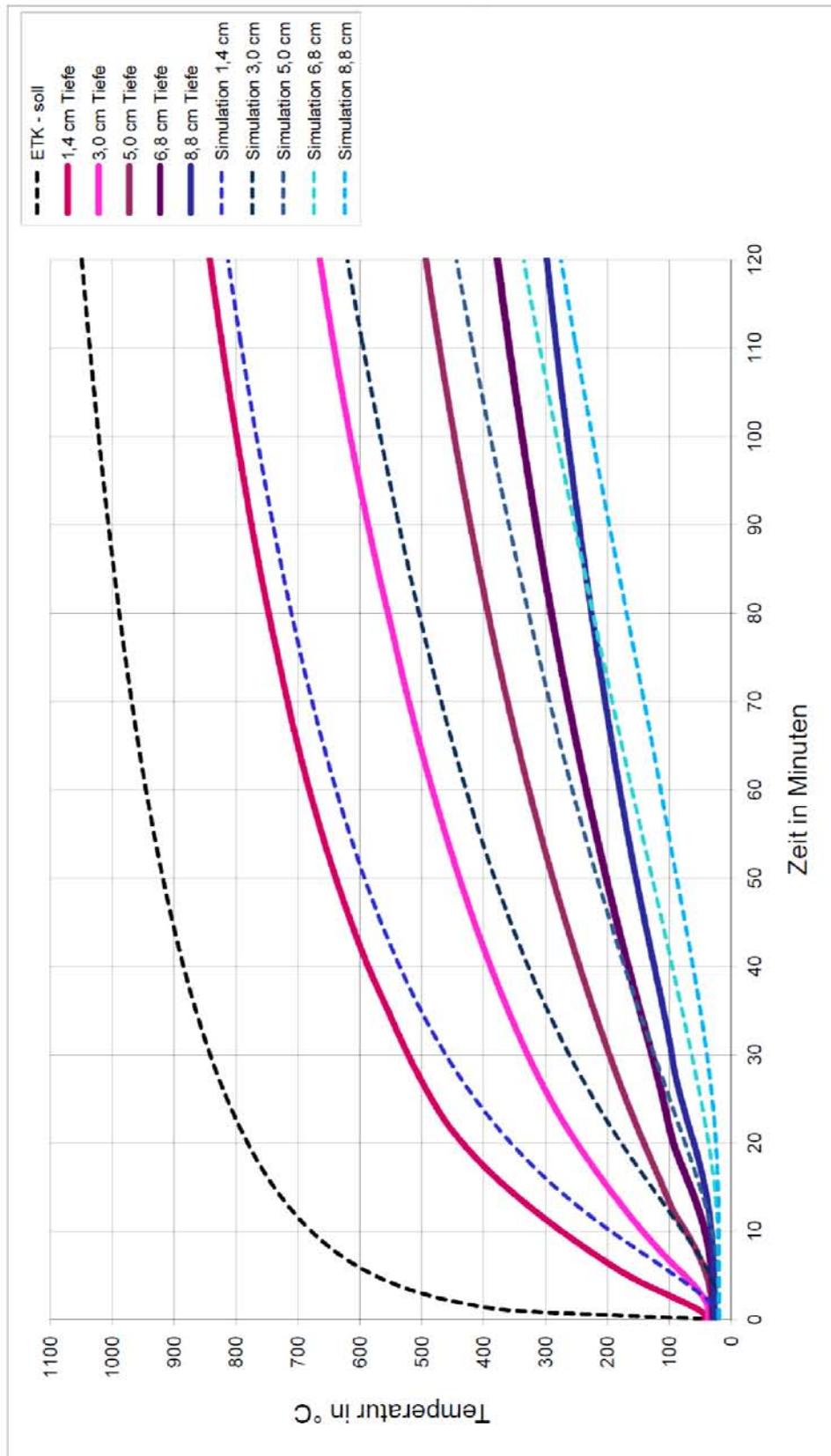
Anhang 47: Simulation BP\_4\_2



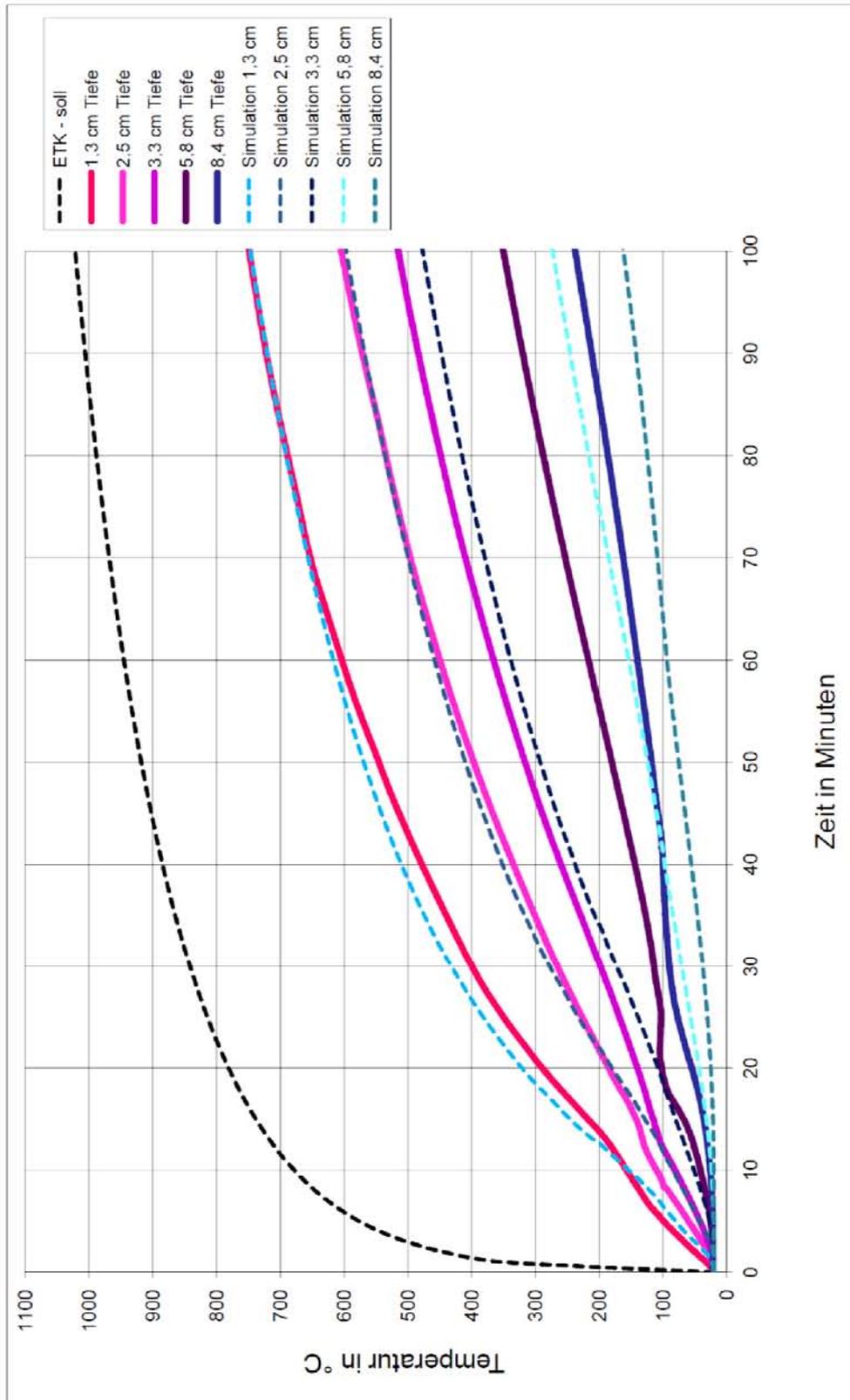
Anhang 48: Simulation EC2\_0\_1



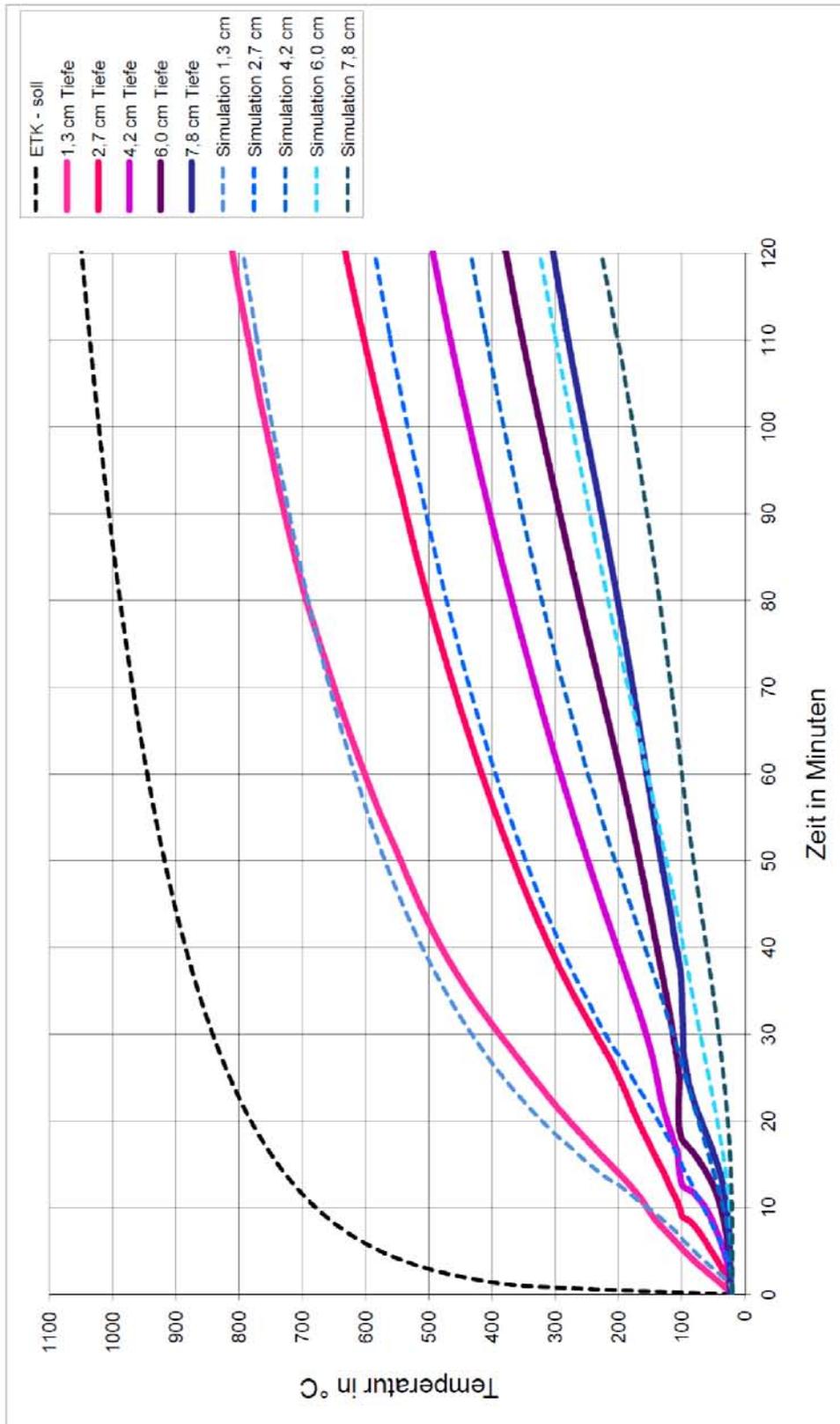
## Anhang 49: Simulation EC2\_0\_2



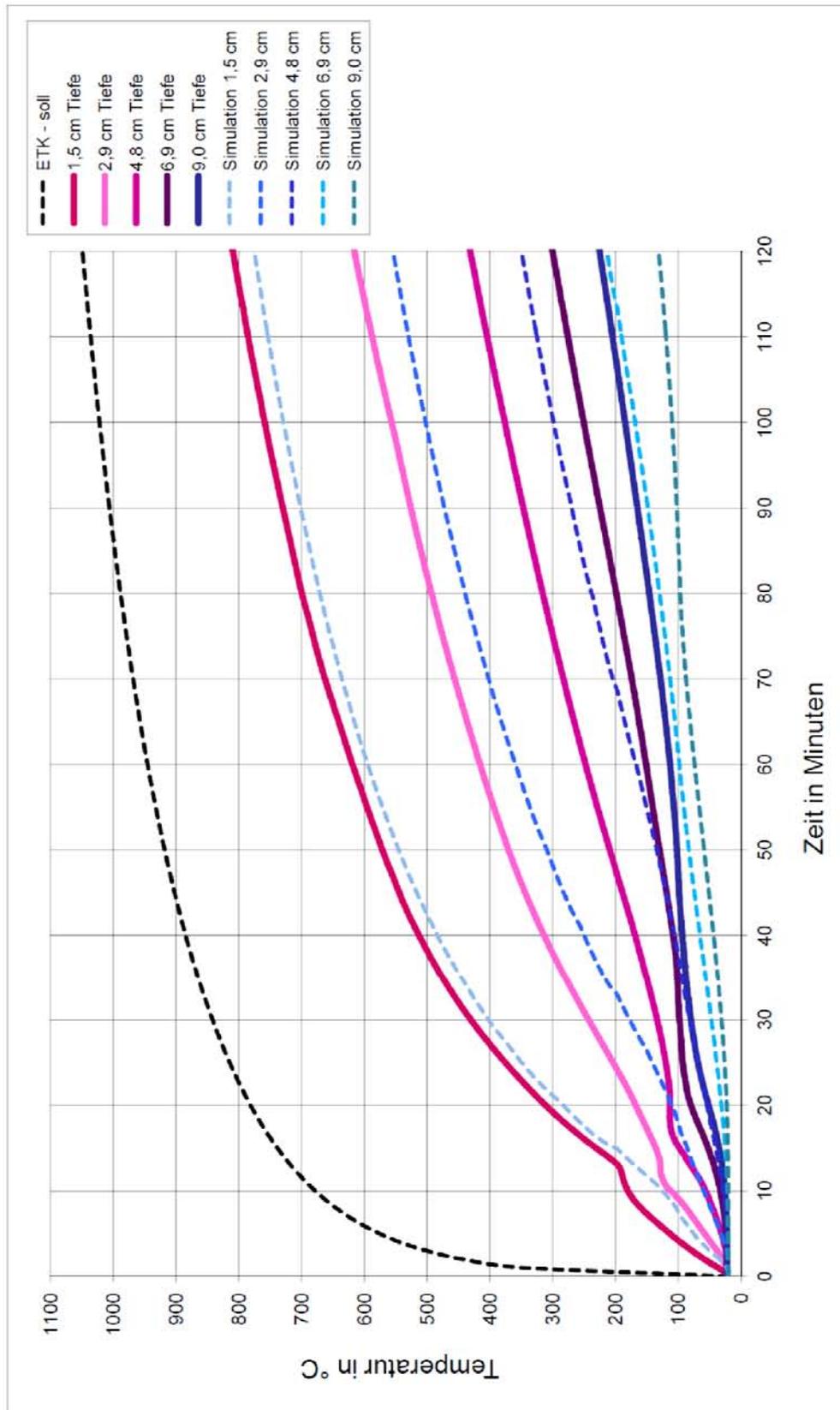
Anhang 50: Simulation EC2\_2\_1



Anhang 51: Simulation EC2\_2\_2



Anhang 52: Simulation EC2\_4\_1



Anhang 53: Simulation EC2\_4\_2

