

# TU

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN

## DIPLOMARBEIT

### Master's Thesis

Untersuchung des Feuchtetransportes in Holz im Brandfall  
bei Verwendung von ingenieurmäßigen Holzverbindungen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines Diplom-Ingenieurs  
unter der Leitung von

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Dr. h.c. Ulrich SCHNEIDER

Univ.Ass. Dipl.-Ing. Josef WOLFSGRUBER

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Heinrich BRUCKNER

E206

Institut für Hochbau und Technologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Mario HALPER

9726096

Kapellenweg 16, 7531 Kemeten

Wien, im November 2008

---

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort	iv
Kurzfassung	v
Abstract	vi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Zielsetzung	2
1.2 Gliederung der Arbeit	3
2 Grundlagen	4
2.1 Aufbau von Holz	4
2.1.1 Makroskopischer Aufbau	4
2.1.2 Mikroskopischer Aufbau	7
2.1.3 Chemischer Aufbau	9
2.2 Ausgewählte Eigenschaften von Holz	10
2.2.1 Feuchteverhalten von Holz	10
2.2.2 Dichte von Holz	19
2.2.3 Thermische Eigenschaften	20
2.2.4 Elektrische Eigenschaften	22
2.3 Verbindungsmittel	24
2.3.1 Zimmermannsmäßige Holzverbindungen	25
2.3.2 Ingenieurmäßige Holzverbindungen	25
2.4 Brandverhalten von Holz	27
2.4.1 Entstehung und Ausbreitung von Bränden	27
2.4.2 Klassifizierung des Brandverhaltens von Holz und Holzbaustoffen	28
2.4.3 Zeitlicher Ablauf von Bränden	30
2.4.4 Vorgänge beim Abbrand von Holz	32
2.4.5 Abbrandgeschwindigkeiten von Holz	37
2.4.6 Ermittlung der Abbrandtiefe nach Eurocode 5	40
2.4.7 Verlauf der thermischen Eigenschaften bei Brandbeanspruchung	42
3 Versuchsplanung	44
3.1 Versuchsanlage	44
3.1.1 Standort der Versuchsanlage	44
3.1.2 Aufbau des Prüfofens	44
3.2 Probekörper	47
3.2.1 Konstruktion der Probekörper	48
3.2.2 Konditionierung der Probekörper	50
3.2.3 Nomenklatur der Probekörper	51
3.3 Messeinrichtungen	52

---

3.3.1	Überwachung der Umgebungstemperatur	52
3.3.2	Messeinrichtungen des Prüfofens	53
3.3.3	Messeinrichtungen am Prüfkörper	53
3.4	Messgrößen	56
3.4.1	Holzfeuchte	56
3.4.2	Rohdichte	56
3.4.3	Temperatur	57
3.4.4	Sauerstoffkonzentration	57
3.4.5	Holzmasseverlust während des Brandversuches	57
3.4.6	Abbrandtiefe	59
3.5	Versuchsbeanspruchung der Probekörper	59
3.6	Brandversuchsprotokoll	59
3.7	Darstellung der Messergebnisse	60
4	Versuchsvorbereitung	61
4.1	Herstellung der Probekörper	61
4.1.1	Bestandteile der Probekörper	61
4.1.2	Fertigung der Probekörper	63
4.2	Vorbereitung der Prüfeinrichtungen	65
4.2.1	Prüfofen	65
4.2.2	Messeinrichtungen	65
4.3	Vorversuche	69
4.3.1	Bestimmung der Holzfeuchte	69
4.3.2	Bestimmung von Rohdichte und Darrdichte	71
4.3.3	Brandversuch Nr. 0 (Vorversuch)	75
5	Brandversuche und Interpretation	84
5.1	Versuchsprogramm	84
5.2	Durchführung und Auswertung der Brandversuche	86
5.3	Zusammenstellung und Interpretation der Versuchsergebnisse	93
5.3.1	Änderung des Holzfeuchtegehalts	93
5.3.2	Masseverlust und verbleibende Restfeuchte	97
5.3.3	Temperaturverlauf	99
5.3.4	Sauerstoffkonzentration der Brandkammeratmosphäre	101
5.3.5	Abbrandtiefe und Abbrandrate	103
6	Zusammenfassung und Ausblick	107
7	Literatur	110
	Anhang 1	113
	Anhang 2	120
	Anhang 3	217

## Vorwort

Diese Diplomarbeit wurde am Institut für Hochbau und Technologie – Zentrum für Baustoffforschung, Werkstofftechnik und Brandschutz der Technischen Universität Wien unter der Leitung von O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Dr. h.c. Ulrich Schneider verfasst.

Für die umfassende Betreuung bei der Erstellung meiner Arbeit und die tatkräftige Unterstützung bei der Versuchsausführung möchte ich mich herzlich bei Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Heinrich Bruckner und bei Univ.Ass. Dipl.-Ing. Josef Wolfsgruber bedanken.

Bei meiner Freundin Birgit Elisabeth Schuhmann bedanke ich mich für das Korrekturlesen der Diplomarbeit und für die vielen motivierenden Worte während des Verfassens der Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden, die mich im Verlauf meines Studiums immer unterstützt haben.

## Kurzfassung

Holz ist ein hygroskopischer, brennbarer Baustoff. Verschiedene Untersuchungen haben gezeigt, dass der Anteil an Wasser in der Holzsubstanz in direktem Zusammenhang mit der Abbrandgeschwindigkeit steht.

In dieser Diplomarbeit wird das Abbrandverhalten von Holz bei Vorhandensein einer wasserdampfdichten Sperrschicht, wie sie beim Einsatz metallischer Holzverbindungsmitel auftritt, untersucht. Um den Einfluss dieser Sperrschicht interpretieren zu können, werden Brandversuche an Probekörpern aus Fichtenholz mit ausgewählten Holzfeuchtegehalten durchgeführt. Die Prüfung der Probekörper, die mit und ohne Wasserdampfsperre aus dünner Reinaluminiumfolie ausgestattet sind, erfolgt unter genormter Brandbeanspruchung. Im Rahmen der Versuche wurden der sich ändernde Holzfeuchtegehalt, das Temperaturprofil an verschiedenen Messstellen des Probenholzes und die Sauerstoffkonzentration in der Brandkammer des Prüfofens ermittelt.

## Abstract

Wood is a hygroscopic and combustible building material. Various investigations have shown that the proportion of water in wood is in direct correlation with the burning rate of wood.

This master's thesis deals with the combustion behaviour of wood in the presence of a vapour-proof barrier layer, as it would occur when metallic timber junctions are used. In order to interpret the influence of this barrier, fire tests on spruce specimen with different humidity are conducted. Specimens with and without water vapour barriers consisting of thin layers of pure aluminium are tested under standardized burning conditions. As part of the tests, changes of humidity, temperature profiles at different measuring points of the samples and the oxygen concentration in the fire chamber of the testing furnace are determined.

# 1 Einleitung

Der Rohstoff Holz wird seit tausenden von Jahren für die unterschiedlichsten Zwecke eingesetzt. Archäologische Funde beweisen, dass Holz bereits vor 390.000 Jahren von den Menschen als Brennstoff verwendet wurde. Entsprechend der Meinung von Fachleuten stellt der kontrollierte Umgang mit Feuer den wichtigsten Schritt für die beginnende Entwicklung der menschlichen Kultur und Zivilisation dar.

Durch seine Stabilität und dennoch einfache Bearbeitbarkeit wurde Holz sehr bald als Grundstoff für die Herstellung von Alltagsgegenständen herangezogen. Erste primitive Werkzeuge, Jagdwaffen oder Gefäße zeugen von den Handfertigkeiten der Menschen der damaligen Zeit. Neu entwickelte Techniken und ein besseres Verständnis im Umgang mit dem Werkstoff führten zur Errichtung der ersten Hütten und Bauten. Seine „Blüte“ erlangte der Baustoff Holz im kunstvollen Schiffsbau der letzten zwei Jahrtausende.

Aufgrund der arbeitsintensiven Ernte geriet der thermische Einsatz von Holz in Vergessenheit. Der einst wichtigste Brennstoff hatte gegenüber fossilen Brennstoffen wie Erdöl und Erdgas immer häufiger das Nachsehen. Durch das verstärkte Umweltbewusstsein der letzten Jahre und den hohen Maschineneinsatz bei der Produktion, ist nun auch im Bereich der thermischen Verwertung ein Aufschwung deutlich erkennbar.

Heute zählt Holz zu den wichtigsten Rohstoffen überhaupt. Die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten führen dazu, dass die jährliche Holzproduktion jene von Stahl und Beton bei weitem übertrifft. Zudem erfreut sich der natürliche, nachhaltige und nachwachsende Rohstoff seit geraumer Zeit wieder verstärkter Beliebtheit.

Die Verwendung von Holz als Baustoff war stets en vogue. Vor allem bei der Überbrückung von größeren Spannweiten mit leichten und schnell herzustellenden Konstruktionen, fiel über Jahrtausende die erste Wahl auf Holz. Bis vor dem Ersten Weltkrieg zählten tragende Holzdecken zum Stand der Technik. Gegenwärtig sind Dachstühle aus Holz oder Holzwerkstoffen die weit verbreitete Praxis bei der Herstellung von Steildächern.

Aufgrund neuer Regelungen, die unter anderem die Errichtung mehrgeschossiger Wohnbauten aus Holz im Stadtgebiet von Wien ermöglichen, wird die Verwendung von Holz

als Baustoff weiter forciert. Daraus folgt, dass der Einsatz des normalbrennbaren<sup>1</sup> Baustoffs den Anforderungen des baulichen Brandschutzes in allen Punkten zu entsprechen hat.

Im Brandfall ist das Verhalten von Holz äußerst berechenbar, da durch den geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten kritische Spannungsumlagerungen und Beschädigungen von benachbarten Bauteilen ausgeschlossen werden können. Um die festgelegte Brandwiderstandsdauer von unverkleideten Bauteilen zu gewährleisten, wird der tragende Querschnitt um ein bestimmtes Maß vergrößert. Mit genormten Abbrandraten in der Größenordnung von 0,50 bis 1,00 mm/min, lassen sich unverkleidete Querschnitte für den Brandfall auf einfache Weise dimensionieren (S.26 /1/).

Bauteile aus Holz oder Holzwerkstoffen werden heute fast ausschließlich mit metallischen Verbindungsmitteln zu Bauteilgruppen oder Bauwerken zusammengefügt. Die klassischen zimmermannsmäßigen Holzverbindungen finden aufgrund ihrer arbeitsintensiven Herstellung nur mehr in Sonderfällen Verwendung.

## 1.1 Motivation und Zielsetzung

Durch den vorrangigen Einsatz von metallischen Verbindungsmitteln wie Nagel- und Bolzenverbindungen, Dübel, Nagelplatten, Nagelbleche, etc. im Holzbau ergibt sich ein nicht zu unterschätzender Einfluss auf das Brandverhalten von Tragwerken. Aufgrund der hohen Wärmeleitfähigkeit und der Wirkung als Sperrschicht gegen Wasserdampfdiffusion ist diesen Einbauten im Brandfall besonderes Augenmerk zu schenken.

Das Ziel der Diplomarbeit ist, den Einfluss einer metallischen Sperrschicht auf den Feuchtestrom in Holz im Brandfall zu analysieren und die Änderung der Abbrandrate in den sperrschichtnahen Schichten zu untersuchen.

---

<sup>1</sup> Entsprechend den Angaben der ÖNORM B 3800-1 ist Holz für übliche Bauzwecke als normalbrennbarer Baustoff (B2) zu klassifizieren (/3/).

## 1.2 Gliederung der Arbeit

Nach den einführenden Worten zu Motivation und Zielsetzung der Diplomarbeit, befasst sich Kapitel 2 neben dem elementaren Aufbau von Holz, mit ausgewählten Holzeigenschaften, mit möglichen Verbindungsmitteln und mit dem Brandverhalten von Holz im Detail.

In Kapitel 3 erfolgt die ausführliche Planung der Brandversuche. Grundlegende Spezifikationen der Versuchsanlage, der Aufbau der Probekörper und die wesentlichen Parameter für die Durchführung der Brandversuche werden darin erläutert.

Das Hauptaugenmerk in Kapitel 4 liegt auf der Vorbereitung der Probekörper und den Versuchseinrichtungen für die geplanten Versuchsserien. Anhand von Vorversuchen werden wichtige Kenngrößen des Probenholzes bestimmt und die theoretischen Annahmen der Versuchsplanung überprüft.

Den wesentlichen Kern der Diplomarbeit bildet Kapitel 5, in dem nach den Festlegungen der Versuchsplanung und den Erkenntnissen aus dem Vorversuch anhand von 22 Brandversuchen der Einfluss einer Wasserdampfsperrschicht auf das Abbrandverhalten von Holz untersucht wird.

Abschließend beinhaltet Kapitel 6 eine Zusammenfassung der gewonnen Erkenntnisse und einen Ausblick auf zukünftige Untersuchungen.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Aufbau von Holz

Als Holz wird der feste Gewebeanteil (Stamm und Äste), der sich um die Sprossachsen bildet, bezeichnet. Dieses Dauergewebe setzt sich aus dem Rindengewebe und dem Holzgewebe zusammen.

Holz ist aus einer Vielzahl unterschiedlicher Zellen aufgebaut. Zellverbände die denselben Aufbau und die gleiche Funktion aufweisen, werden zu einem Gewebetyp zusammengefasst. Es wird zwischen Leitgewebe, Festigungs- und Speichergewebe unterschieden. Die für den Gewebeaufbau zuständigen Zelltypen werden in Abschnitt 2.1.2 erläutert.

#### 2.1.1 Makroskopischer Aufbau

Makroskopisch gesehen besteht ein Holzstamm aus mehreren Schichten und Strukturelementen die unterschiedliche Funktionen übernehmen. Abbildung 2.1 zeigt den Aufbau von Holz anhand der drei Hauptschnitte (Querschnitt, Radialschnitt und Tangentialschnitt). Beginnend vom Zentrum (Markstrang) bis zur Epidermis (Rinde) des Holzstammes werden folgende Bestandteile unterschieden:

- Mark

Der zentral gelegene - meist nur ein bis zwei Millimeter dicke - Markstrang dient dem jungen Spross zur Speicherung von Nährstoffen und zum Wasser- und Nährstofftransport. Mit fortschreitendem Holzwachstum stirbt der Markstrang ab. Aus holzwirtschaftlicher Sicht ist er ohne Bedeutung.

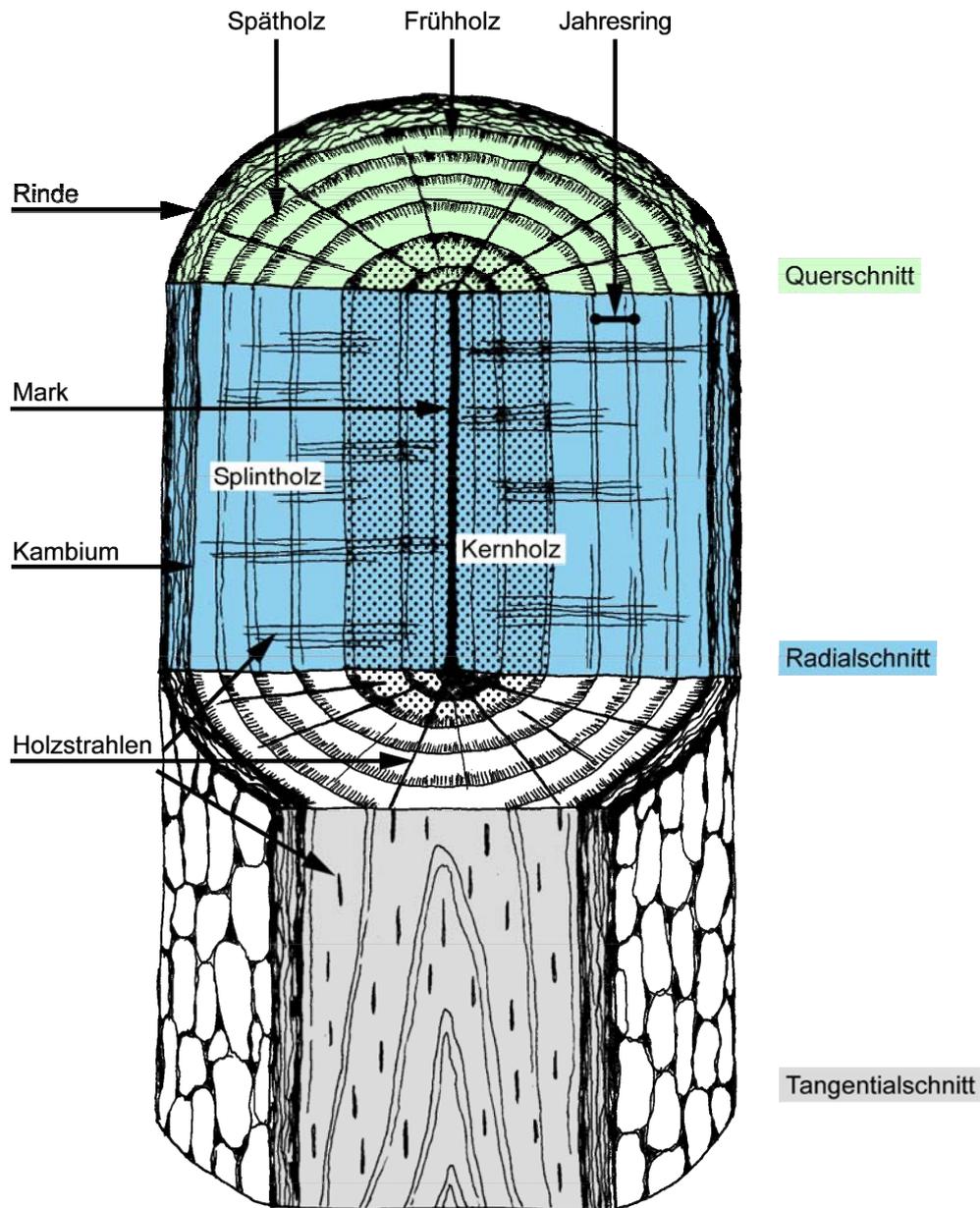


Abbildung 2.1: Makroskopischer Aufbau von Holz anhand der drei Schnittebenen eines Nadelholzstammes (S.II-15 /14/)

- Holzmasse (Kern- und Splintholz)

Der Holzquerschnitt besteht zu mehr als 95 % aus Holzmasse, die sich aus dem Kern- und Splintholz zusammensetzt.

Während in jungen Bäumen der gesamte Stammquerschnitt für den Wassertransport herangezogen wird, sind in alternden Bäumen nur mehr die äußeren Jahresringe dafür zuständig. Der offenporige, helle, wasserführende Anteil der Holzmasse wird als

Splintholz bezeichnet. Der innen liegende Bereich, der kein Wasser leitet, wird Kernholz genannt.

Kernholz entsteht durch die so genannte Verkernung, die bei Laubhölzern durch die Bildung von Thyllen gekennzeichnet ist. Dabei handelt sich um Füllzellen deren blasenförmige Ausstülpungen in benachbarte Gefäße wachsen und sie luftdicht verschließen. Im Unterschied dazu verkernen Nadelhölzer durch den Tüpfelverschluss. Dabei werden die ventilähnlichen Verbindungen zwischen den Zellen (Tüpfel) mit Extraktstoffen (Harze, Wachse, etc.) luftdicht verklebt (vgl. Abschnitt 2.1.2.1).

Der Verkernungsprozess führt dazu, dass die Wasserleitfunktion der inneren Holzsubstanz unterbunden und das Kernholz gebildet wird. Die meist dunkle Färbung des Kerns ergibt sich durch die Einlagerung von Harzen, Farb- und Gerbstoffen, sowie durch Oxidationsvorgänge.

- Jahresringe (Früh- und Spätholz)

Um den Markstrang werden die vom Kambium gebildeten Holzzellen angelagert, die bedingt durch die jahreszeitlich bestimmten Wachstumsperioden die Jahresringe - bestehend aus Früh- und Spätholz - bilden. Das helle, porenreiche Frühholz dient in erster Linie dem Wasser- und Nährstofftransport, während durch das dunklere, schwerere Spätholz die Festigkeit des Holzes bestimmt wird.

- Holzstrahlen

Bei Holzstrahlen (Markstrahlen) handelt es sich um radial angeordnete Holzzellen, die sich vom Mark bis zum Kambium erstrecken. Neben dem horizontalen Wasser- und Nährstofftransport dienen sie der Speicherung von Reservestoffen und erhöhen die Festigkeit von Holz.

- Kambium

Das Kambium ist eine dünne Schicht zwischen dem Splint und dem Bast. In ihr findet die durch Hormone gesteuerte Zellteilung statt. Dabei werden Rindenzellen nach außen und Holzzellen nach innen in den Splint abgeschieden. Das Kambium wird

daher auch als Dickenzuwachsschicht oder Bildungsgewebe bezeichnet.

- Rinde

Die Rinde ist die äußerste Schicht des Holzstammes und schützt den lebenden Teil des Baumes vor mechanischen Beschädigungen, Temperatureinflüssen und Schädlingen. Sie besteht aus der Außenrinde (Borke) und der Innenrinde (Bast).

Der Bast ist der lebende Teil der Rinde und wird durch das Kambium ständig mit Holzzellen versorgt. Durch das Wachstum des Baumes dehnt sich die spröde Borke aus und bricht auf. Die dahinter freiliegenden Bastzellen sterben ab und schließen die Außenrinde.

### 2.1.2 Mikroskopischer Aufbau

Aus mikroskopischer Sicht ist Holz aus Zellen aufgebaut, die sich in ihrer Form, Größe und Funktion grundlegend voneinander unterscheiden. Die Hauptfunktionen, die die verschiedenen Zellen im Holz übernehmen sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Funktionen der unterschiedlichen Zellenarten

Funktion	Nadelholz	Laubholz
leiten	Tracheiden des Frühholzes	Tracheen
stützen	Tracheiden des Spätholzes	Sklerenchym
speichern	Parenchym	Parenchym

Während bei der makroskopischen Beurteilung des Holzaufbaus keine Differenzierung von Laub- und Nadelholz vorgenommen wurde, ist im Hinblick auf den mikroskopischen Zellaufbau und die Zellanordnung eine Unterscheidung erforderlich.

### 2.1.2.1 Nadelholz

Die entwicklungsgeschichtlich älteren Nadelhölzer sind im Gegensatz zu den Laubhölzern aus nur zwei Zelltypen aufgebaut, den Tracheiden und den Parenchymzellen. Tracheiden sind lang gestreckte Zellen, die mit 90 bis 95 % den Hauptbestandteil von Nadelholz bilden. Neben dem Transport von Wasser und Nährstoffen sind sie für die Festigkeit des Holzgefüges verantwortlich. Die Tracheiden sind hohl und durch so genannte Tüpfel miteinander verbunden. Über die Tüpfel findet der Wasseraustausch zwischen den einzelnen Zellen statt. Die Verbindung von zwei aneinander liegenden Tracheiden erfolgt durch Hoftüpfel (vgl. Abbildung 2.2). Diese Tüpfel besitzen im Unterschied zu einfachen Tüpfeln eine doppelte aufgestülpte Zellwand mit einer kleinen Öffnung, die als Porus bezeichnet wird. Zwischen den Zellwänden befindet sich an dünnen Fasern hängend eine Scheibe (Torus). Legt sich der Torus durch Druckunterschiede an den Porus an, ist das Ventil geschlossen und der Wasseraustausch wird blockiert. Durch das Verkleben der geschlossenen Tüpfel mit Ausscheidungen, wie z. B. Harzen, kommt es zur Verkernung und dadurch zur Bildung von Kernholz.

Der zweite im Nadelholz vorkommende Zellentypus sind die Parenchymzellen. Es handelt sich dabei um axial (Strangparenchym) oder radial (Strahlenparenchym) ausgerichtete, dünnwandige Zellen, die der Speicherung von Nährstoffen dienen. Die Parenchymzellen sind deutlich kürzer als die Tracheiden und ebenfalls durch Tüpfel mit einander verbunden. Im Gegensatz zu den Hoftüpfeln der Tracheiden sind diese Tüpfel einfacher aufgebaut. Den einfachen Tüpfeln (vgl. Abbildung 2.2) fehlt die Auswölbung der Zellwand im Bereich des Torus (/12/ /13/ /14/).

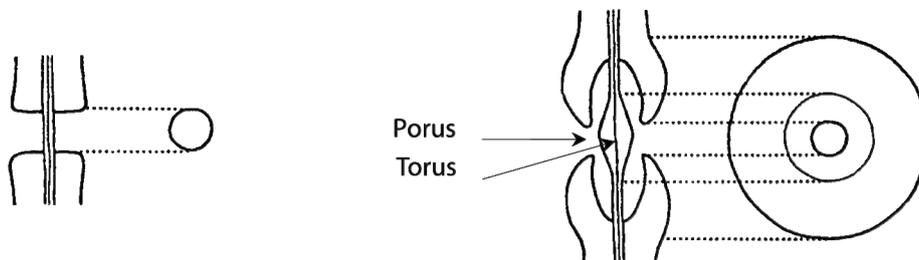


Abbildung 2.2: Einfacher Tüpfel (links) und Hoftüpfel (rechts) (S.II-18 /14/)

### 2.1.2.2 Laubholz

Die Laubhölzer besitzen im Vergleich zu den Nadelhölzern einen komplexeren Aufbau. Ihr Holzgefüge besteht aus einer Vielzahl unterschiedlicher Zelltypen. Die längsgerichteten Sklerenchymzellen bilden den Hauptbestandteil von Laubholz. Dabei handelt es sich um Fasern, die in ihrer Funktion den Tracheiden der Nadelhölzer sehr ähnlich sind. Neben ihrer Hauptaufgabe, die Holzsubstanz zu festigen übernehmen sie auch Funktionen des Wassertransports im Laubholz.

Laubhölzer besitzen neben Tracheiden auch röhrenförmige Zellen - die Tracheen. Es handelt sich dabei um Gefäße, die den wesentlichen Teil der Wasserleitung übernehmen. Sie werden im Querschnitt eines Holzstückes als Poren wahrgenommen und sind ein wichtiges Merkmal für die Holzbestimmung. Die Verteilung der Tracheen im Früh- und Spätholz ist für verschiedene Laubholzarten spezifisch und führt zur Einteilung in ringporige, halbringporige und zerstreutporige Laubhölzer.

Für den vertikalen Safttransport sind Tracheen oben und unten offen oder an leiterförmigen Gefäßöffnungen miteinander verbunden. Der horizontale Wasseraustausch erfolgt über Tüpfel. Das Zellwachstum ist wie bei den Tracheiden des Nadelholzes, vor der Aufnahme ihrer eigentlichen Funktion abgeschlossen und sie sterben ab.

Die Parenchymzellen dienen der Speicherung von Nährstoffen. Sie bilden die radial angeordneten Holzstrahlen und können auch axial ausgerichtet sein (/12/ /14/).

### 2.1.3 Chemischer Aufbau

Die chemische Zusammensetzung von Holz wird, wie bei allen Pflanzen, durch die drei Grundelemente Kohlenstoff (~50 %), Sauerstoff (~43 %) und Wasserstoff (~6%) bestimmt. In geringem Ausmaß sind auch Stickstoff und Mineralien (~1 %) enthalten. Dieser elementare Aufbau ist unter Annahme geringfügiger Abweichungen für alle Holzarten gleich. Im Gegensatz dazu zeigen sich im molekularen Aufbau von Holz erhebliche Unterschiede.

Der Hauptbestandteil der Holzsubstanz sind die Holozellulose und das Lignin. In geringeren Mengen sind auch Extraktstoffe und Asche im Holz zu finden. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick der chemischen Bestandteile getrennt nach Nadel- und Laubholz.

Tabelle 2.2: Chemische Bestandteile von Nadelholz und Laubholz (/33/)

		Nadelholz	Laubholz
Holozellulose	Zellulose	42 – 49 %	42 – 51 %
	Hemizellulose	24 – 30 %	27 – 40 %
Lignin		25 – 30 %	18 – 40 %
Extraktstoffe <sup>2</sup>		2 – 9 %	1 – 10%
Asche		0,2 – 0,8 %	

Die Holozellulose ist die Gerüstsubstanz der Zellwände und ist für die hohe axiale Zugfestigkeit von Holz verantwortlich. Holozellulose gliedert sich in die Zellulose und die Hemizellulose (Holzpolyosen). Die Zellulose ist aus langen Molekülen aufgebaut, während die Hemizellulose aus kurzen, verzweigten Molekülen besteht. Die Druckfestigkeit von Holz wird vor allem durch das Lignin bestimmt. Es lagert sich im Zellulosegerüst der Zellwände an und bewirkt dessen Verholzung (Lignifizierung).

## 2.2 Ausgewählte Eigenschaften von Holz

Die in diesem Kapitel erläuterten Eigenschaften beziehen sich ausschließlich - in direkter oder indirekter Weise - auf den Feuchte- und Wärmetransport in Holz. Elastomechanische Eigenschaften werden in dieser Arbeit nicht behandelt.

### 2.2.1 Feuchteverhalten von Holz

Das Verhalten von Holz gegenüber Feuchtigkeit ist von zentraler Bedeutung. Die hohe Bereitschaft des kapillarporösen, hygroskopischen Baustoffes, Feuchtigkeit in seine Struktur aufzunehmen und diese wieder langsam abzugeben nimmt Einfluss auf nahezu alle Eigenschaft von Holz.

---

<sup>2</sup> Harze, Wachse, Gerbstoffe, Terpene, Phenole, Fette, Zucker, Eiweiß

Die maßgebende Kenngröße für das Verhalten von Holz gegenüber Feuchtigkeit ist der Holzfeuchtegehalt, der entsprechend folgender Gleichung berechnet wird:

$$u = \frac{m_u - m_0}{m_0} * 100 \text{ [%]}$$

Dabei ist

$u$  Holzfeuchte in [%]

$m_u$  Masse des feuchten Holzes im Gleichgewichtszustand in [g]

$m_0$  Masse des darrtrockenen Holzes, d.h. bei  $u = 0 \text{ %}$  in [g]

#### 2.2.1.1 Sorptionsverhalten von Holz

Aufgrund seiner hohen Affinität gegenüber Wassermolekülen zeigt Holz ein ausgeprägtes Sorptionsverhalten. Wasser wird aus feuchter Umgebungsluft aufgenommen (Adsorption) oder an trockene Luft abgegeben (Desorption), bis ein entsprechendes Holzfeuchtegleichgewicht erreicht ist. Diese Wechselwirkung bleibt bis zu einer relativen Luftfeuchtigkeit von 100 % bestehen. Danach ist der Fasersättigungsbereich erreicht und eine weitere Wasseraufnahme nur durch einen direkten Flüssigkeitszutritt möglich.

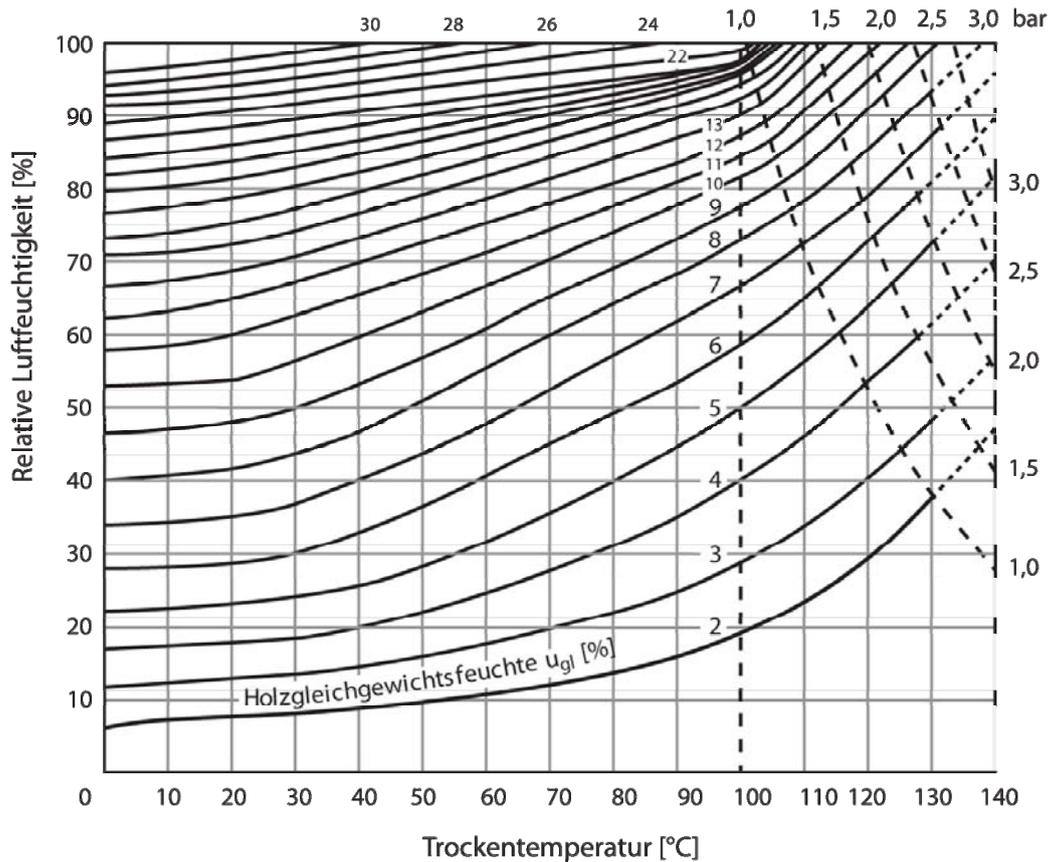


Abbildung 2.3: Sorptionsisothermen (S.103 /22/)

Das Erreichen des Gleichgewichtszustandes ist vor allem von der Rohdichte der Holzart und der Holztemperatur abhängig. Diese beiden Faktoren ermöglichen es, einem Holzstück bei festgelegter Temperatur und Luftfeuchte einen Holzfeuchtewert zuzuweisen. Werden die Ergebnisse für unterschiedliche Luftfeuchtewerte in Abhängigkeit zur Temperatur aufgezeichnet, erhält man Linien gleicher Holzfeuchte (vgl. Abbildung 2.3). Diese so genannten Sorptionsisothermen können für die Bewertung der Adsorption und Desorption von Feuchtigkeit herangezogen werden. Da Holz Wasser langsamer abgibt als es wieder aufnimmt, entsteht ein Hysterese-Effekt. Daraus folgt, dass die Werte der Holzfeuchtigkeit bei der Desorption um ein bis zwei Prozent höher liegen als bei der Adsorption.

Das Wasseraufnahmeverhalten von Holz wird in zwei Teilbereiche gegliedert (hygroskopischer Bereich und Wassersättigungsbereich), die sich hinsichtlich der Aufnahme des Wassers unterscheiden (vgl. Abbildung 2.4).

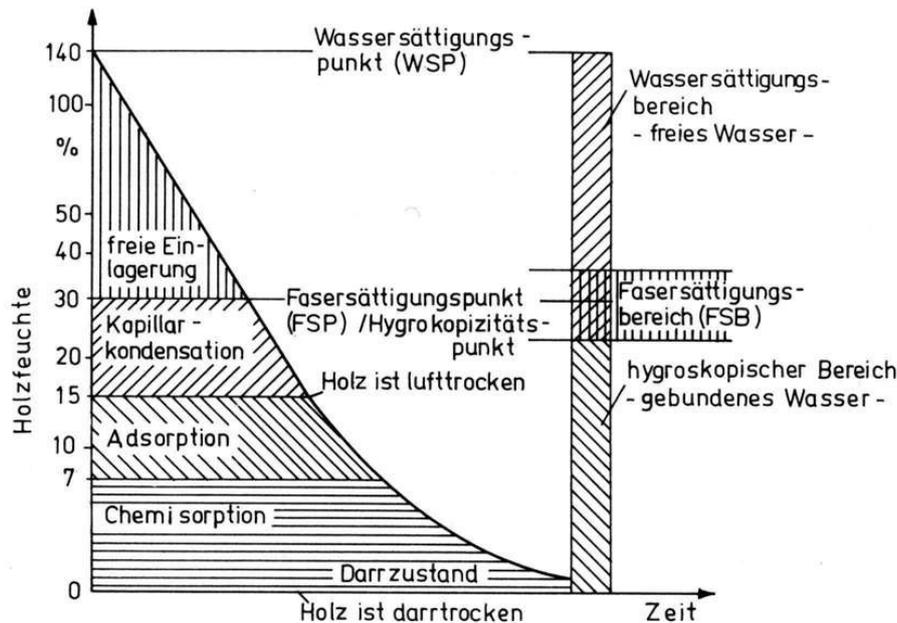


Abbildung 2.4: Sorptionsverhalten von Holz (S.IV-3 /14/)

Kennzeichnend für den hygroskopischen Bereich ist die Bindung des Wassers durch physikalische und chemische Kräfte an der Oberfläche und an den Kapillaren der Zellwände. Durch die zwischen der Zellwand und den Wassermolekülen wirkenden Bindungskräfte ist das gebundene Wasser nur mit hohem energetischem Aufwand aus dem Holzquerschnitt zu entfernen.

Die Bindung des Wassers im hygroskopischen Bereich erfolgt durch die folgenden drei Mechanismen:

- Chemisorption

Im Bereich von 0 bis 7 % Holzfeuchtigkeit erfolgt die Bindung des Wassers an der Oberfläche der Zellen durch molekulare Anziehungskräfte. Eine einschichtige Wassermolekülschicht lagert sich an der Zellwandoberfläche an.

- Adsorption (Dampfadsorption)  
Bis zu vier weitere Wassermolekülschichten werden durch elektromagnetische Anziehungskräfte an die Zellwandoberfläche gebunden. Die Adsorption findet in einem Holzfeuchtebereich von etwa 7 bis 15 % statt.
- Kapillarkondensation  
Die Kapillarkondensation setzt bei einer Holzfeuchtigkeit von 15 % ein und endet mit dem Erreichen des Fasersättigungspunktes. Dabei führt die Senkung von Dampfteilrücken zur Füllung der kapillaren Zellstrukturen mit Wasser.

Entsprechend der Darstellung in Abbildung 2.4 erstreckt sich der hygroskopische Bereich bis zum Fasersättigungsbereich. In diesem Abschnitt sind die Zellwände vollständig gesättigt und aufgequollen. Die weitere Wasseraufnahme kann nur durch die Einlagerung von Wasser in die Zellhohlräume des Holzes erfolgen.

Bei heimischen Hölzern liegt der Bereich der Fasersättigung zwischen 22 und 35 % Holzfeuchte (vgl. Tabelle 2.3) und ist von der Temperatur und dem hygroskopischen Verhalten der Zellwand abhängig.

Im Unterschied zum hygroskopischen Bereich unterliegt das freie Wasser im Wassersättigungsbereich kapillarphysikalischen Gesetzmäßigkeiten. Durch die fehlenden molekularen Bindungskräfte kann es einfacher aus dem Querschnitt entfernt werden.

Tabelle 2.3: Fasersättigungsbereich heimischer Hölzer (S.100 /22/)

Holzart	Fasersättigung [%]
Robinie, Eiche	22 - 24
Lärche, Douglasie, Kiefer	26 - 28
Tanne, Fichte	30 - 34
Buche, Birke	32 - 35

Sind alle Zellwände gesättigt und die Zellenhohlräume mit Wasser gefüllt, ist der Wassersättigungspunkt erreicht. Der Maximalwert der Holzfeuchte ist von der Rohdichte abhängig und bewegt sich zwischen 770 % (Balsaholz) und 31 % (Pockholz<sup>3</sup>) (S.III-5 /14/).

#### 2.2.1.2 Wassertransport durch Diffusion und Kapillarität

Im hygrokopischen Bereich erfolgt der Wassertransport im Holz vorwiegend durch Diffusion. Bei Bestehen eines Wasserdampfdruckgefälles wandern die Wasserdampfmoleküle in Bereiche mit geringer Wasserdampfkonzentration.

Die Dampfleitfähigkeit  $\delta_d$  von Holz steigt mit zunehmendem Wassergehalt und Rohdichte. Mit ihr wird jene Wassermenge, die in einer Stunde durch eine Fläche von 1 m<sup>2</sup> bei 1 Pa Druckunterschied, entlang einer Diffusionsstrecke von einem Meter tritt, beschrieben. Die Dampfleitfähigkeit von Fichtenholz liegt lotrecht zur Faser bei 0,035 bis 0,015 mg/mhPa. Üblich ist jedoch die Angabe der dimensionslosen Diffusionswiderstandszahl  $\mu$ . Sie ist definiert als Verhältniszahl der Dampfleitfähigkeit der Luft<sup>4</sup> zur Dampfleitfähigkeit eines Werkstoffes und gibt an um wievielfach größer der Diffusionswiderstand des Stoffes im Vergleich zu einer gleich dicken Luftschicht bei gleicher Temperatur ist (S.58-62 /25/).

Bei heimischen Bauhölzern beträgt die Diffusionswiderstandszahl ca. 40.

Der Flüssigkeitstransport im Bereich der Wassersättigung erfolgt durch Kapillarkräfte. Dabei steigt das Wasser in Kapillaren (Poren) mit einem Porenradius zwischen 0,1  $\mu\text{m}$  und 1 mm. Dieser Effekt wird von der Oberflächenspannung des Wassers und der Grenzflächenkraft zwischen Flüssigkeit und Feststoff bestimmt. Je enger die Poren umso weiter kann die Flüssigkeit transportiert werden. Die Kenngröße der Wasserleitung durch Kapillarität ist der Wasseraufnahmekoeffizient  $w$  gemessen in  $[\text{kg}/\text{m}^2 \text{ s}^{-1/2}]$ . Aufgrund des anisotropen Aufbaus von Holz variieren die Werte entsprechend ihrer Hauptrichtungen.

---

<sup>3</sup> Pockholz ist eine tropische, sehr harzreiche Holzart mit einer Darrdichte von 0,95 bis 1,30 g/cm<sup>3</sup>.

<sup>4</sup> Die Dampfleitfähigkeit der Luft beträgt an ruhender Luft bei einem Druck von 101325 Pa und einer Temperatur von 0 °C 0,639 mg/mhPa (S.62 /25/).

Der Wasseraufnahmekoeffizient für Fichte beträgt längs 0,017, radial 0,003 und tangential 0,004  $\text{kg/m}^2 \text{s}^{-1/2}$  (S.III-8 /14/).

### 2.2.1.3 Quellen und Schwinden

Bei einer Änderung der Holzfeuchtigkeit im hygroskopischen Bereich, d.h. unter dem Fasersättigungspunkt, finden Quell- und Schwindvorgänge statt. Im darüber liegenden Fasersättigungsbereich sind kaum Dimensionsänderungen zu erwarten.

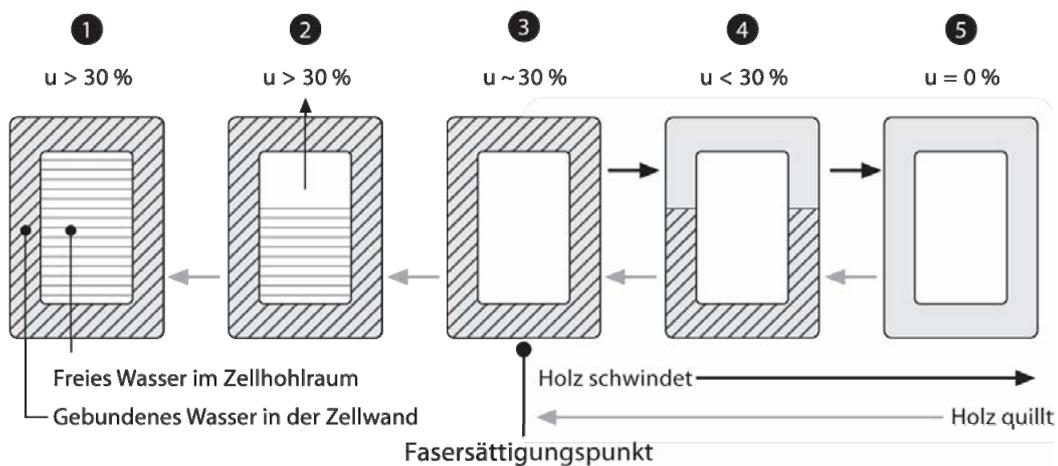


Abbildung 2.5: Wasserabgabe und Wasseraufnahme der Holzzellen (/15/)

Wie in Abbildung 2.5 dargestellt, wird beim Quellen Feuchtigkeit aufgenommen und beim Schwinden abgegeben. Die damit verbundenen Querschnittsänderungen sind aufgrund des anisotropen Aufbaus von Holz in den drei Hauptrichtungen sehr verschieden. In Faserlängsrichtung sind die Formänderungen am geringsten. In Richtung der Markstrahlen (radial) quillt oder schwindet Holz 10 bis 20-mal und in tangentialer Richtung 15 bis 30-mal stärker als in Längsrichtung. Das Schwind- und Quellverhalten ist grundsätzlich von der Holzart abhängig und nimmt mit steigender Rohdichte zu. Schweres Holz mit hoher Rohdichte besteht im Verhältnis zu leichtem porenreichen Holz aus mehr quellfähiger Zellsubstanz.

Die Kenngröße für die feuchteabhängige Dimensionsänderung von Holz ist das Quell- oder Schwindmaß. Damit wird die prozentuelle Längenzunahme oder Längenabnahme im

hygroskopischen Bereich beschrieben. Das maximale Quellmaß für ausgewählte heimische Holzarten ist Tabelle 2.4 zu entnehmen.

Tabelle 2.4: Maximales Quellmaß von ausgewählten Holzarten nach DIN 52184 (S.III-19 /14/),  
Mittlere Darrdichte ausgewählter Holzarten (S.25 /24/)

Holzart	mittlere Darrdichte	maximales Quellmaß		
		längs	radial	tangential
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]	[%]	[%]
Fichte	0,43	0,2 – 0,4	3,7	8,5
Kiefer	0,49	0,2 – 0,4	4,2	8,3
Lärche	0,65	0,1 – 0,3	3,4	8,5
Buche	0,68	0,2 – 0,6	6,2	13,4
Eiche	0,65	0,3 – 0,6	4,6	10,9

#### 2.2.1.4 Methoden zur Ermittlung des Holzfeuchtegehalts

Zur Bestimmung des Holzfeuchtegehalts können zwei unterschiedliche Verfahren herangezogen werden.

Die direkten Verfahren (z.B. die Darrmethode) arbeiten mit der Trennung des Wassers von der Holzsubstanz, während die indirekten Verfahren (z.B. die elektrische Widerstandsmessung) physikalische Gesetzmäßigkeiten zur Bestimmung der Holzfeuchte anwenden. Die Eichung indirekter Messmethoden erfolgt mit Hilfe direkter Verfahren. Im Folgenden werden die beiden genannten Methoden näher erläutert (/26/).

##### Die Darrmethode

Bei der Darrmethode handelt es sich um ein direktes Messverfahren. Eine feuchte Holzprobe wird im Darrschrank unter heißer Umluft bei  $103 \pm 2$  °C bis zum Erreichen der Massekonstanz<sup>5</sup> getrocknet. Der Feuchtegehalt ergibt sich aus der Differenz zwischen der zuvor bestimmten Feuchtmasse  $m_u$  und der Masse der wasserlosen Holzsubstanz  $m_0$  (Darrmasse) (/35/). Die Dauer der Trocknung ist von der Holzfeuchte und den Abmessungen

<sup>5</sup> Die Massekonstanz gilt als erreicht, wenn die Masse nach zwei Wiegevorgängen innerhalb von 2 Stunden um nicht mehr als 0,1 % abweicht (/35/).

des Probenholzes abhängig und kann für Späne oder Holzmehl wenige Stunden und für große Probenstücke mehrere Tage betragen.

Die Genauigkeit der Messmethode steht in direktem Zusammenhang mit der Genauigkeit der verwendeten Waage. Durch das Entweichen von leicht flüchtigen Holzbestandteilen kann die Präzision des Messverfahrens negativ beeinflusst werden. Die Anwendung der Darmmethode ist bei einem Wassergehalt von 0 bis 100 % möglich.

Für die Ermittlung der Holzfeuchtigkeit des Probenmaterials wird die auf Seite 11 angeführte Gleichung herangezogen.

### Die elektrische Widerstandsmessung

Die elektrische Widerstandsmessung nutzt zur Bestimmung der Holzfeuchte den Zusammenhang zwischen elektrischer Leitfähigkeit und Holzfeuchtegehalt (vgl. Abschnitt 2.2.4). Im Gegensatz zu den indirekten Messmethoden ist dieses Verfahren nicht auf die stationäre Anwendung beschränkt. Messungen an kleinen Probekörpern und an Tragstrukturen können problemlos durchgeführt werden.

Bei den am Markt befindlichen Messgeräten handelt es sich zumeist um kleine batteriebetriebene Handgeräte. Je nach Ausstattung lassen sich die Einflussgrößen - Holzart und Holztemperatur - über Schalter direkt am Gerät einstellen. Die Messung erfolgt über zwei Elektroden die in das Holz eingeschlagen oder eingeschraubt werden. Der Holzfeuchtwert kann direkt am Display des Messgerätes abgelesen werden. Für die Messrichtung (längs oder quer zum Faserverlauf) sind die Herstellerangaben verpflichtend.

Im Bereich zwischen 7 und 30 % Holzfeuchtigkeit erreichen diese Messgeräte mit einer Genauigkeit von 1 bis 2 % befriedigende Ergebnisse (/36/). Unterhalb von 7 % Holzfeuchte sind aufgrund der chemischen Anziehungskräfte zwischen Wassermolekülen und Zellwand (Chemisorption) keine aussagekräftigen Widerstandsmessungen möglich. Im überhygroskopischen Bereich ( $u > 30\%$ ) schwindet die angegebene Genauigkeit zunehmend mit steigender Holzfeuchte. Der Einsatz von Holzfeuchtemessgeräten muss unter Einhaltung der Verwendungsvorschrift des Geräteherstellers erfolgen um weitere Fehlereinflüsse zu vermeiden.

### 2.2.2 Dichte von Holz

Die Rohdichte ist eine weitere wichtige Kenngröße von Holz. Sie beeinflusst wie die Holzfeuchte beinahe alle anderen Eigenschaften. Durch die ausgeprägte Hygroskopizität<sup>6</sup> von Holz ist die Dichte besonders feuchtigkeitsabhängig und wird daher immer unter Angabe des Holzfeuchtegehalts angeschrieben. Je porenreicher ein Holz ist, umso geringer ist die Rohdichte und umgekehrt.

Dementsprechend bewegen sich die Maximalwerte für darrtrockenes Holz im Mittel zwischen 0,13 g/cm<sup>3</sup> (Balsa) und 1,30 g/cm<sup>3</sup> (Pockholz) (S.32-37 /22/).

Folgende Einteilung kann getroffen werden:

- Darrdichte  $\rho_0$   
Rohdichte bei einem Holzfeuchtegehalt von 0 % (darrtrocken).
- Norm-Rohdichte  $\rho_{12}$   
Rohdichte für das Holzfeuchtegleichgewicht nach Lagerung bei Normklima (20 °C, 65 % rLF). Für bautechnisch relevante Vollhölzer liegt der Wert der Holzfeuchte um 12 %.
- Rohdichte  $\rho_u$   
Rohdichte bei einem bestimmten Holzfeuchtegehalt.
- Reindichte  $r$   
Als Reindichte wird die Dichte des darrtrockenen Holzes ohne Porenanteil bezeichnet, also die Dichte der reinen Holzsubstanz, die für alle Hölzer ca. 1,50 g/cm<sup>3</sup> beträgt.

Die Rohdichte berechnet sich nach folgender Formel:

$$\rho_u = \frac{m_u}{V} \text{ [g/cm}^3\text{]}$$

---

<sup>6</sup> Die Hygroskopizität beschreibt die Wasseraufnahmebereitschaft eines Stoffes.

Dabei ist

- $\rho_u$  Rohdichte von Holz in Abhängigkeit der Holzfeuchte in [g/cm<sup>3</sup>]
- $m_u$  Holzmasse in Abhängigkeit der Holzfeuchte in [g]
- $V$  gemessenes Volumen in [cm<sup>3</sup>]

Einige Werte für die mittlere Darrdichte ausgewählter heimischer Hölzer sind in Tabelle 2.4 zusammengefasst.

## 2.2.3 Thermische Eigenschaften

### 2.2.3.1 Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität, Wärmeausdehnung

#### Wärmeleitfähigkeit $\lambda$

Die Wärmeleitfähigkeit eines Stoffes wird durch die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  beschrieben. Das ist jene Wärmemenge, die durch einen Würfel von 1 m Kantenlänge bei einem Temperaturunterschied von 1 K in einer Stunde fließt. Die Wärmeleitfähigkeit von Holz steigt mit zunehmender Rohdichte und anwachsendem Feuchtegehalt. Verglichen mit anderen Konstruktionsbaustoffen ist die Wärmeleitfähigkeit von Holz sehr klein. Diese Tatsache zeigt sich in der langsamen Wärmeausbreitung im Brandfall und der damit verbundenen geringen Abbrandgeschwindigkeit sowie durch die hervorragenden Wärmedämmeigenschaften von Holz und Holzwerkstoffen.

Die Wärmeleitfähigkeit für Fichte, Tanne und Kiefer liegt bei ca. 0,13 W/mK. Für Buche und Eiche beträgt der Wert 0,20 W/mK. Im Vergleich dazu weist Stahlbeton eine Wärmeleitfähigkeit von 2,32 W/mK und Stahl Werte über 41 W/mK auf (/27/).

#### Wärmekapazität $c$

Die Wärmekapazität definiert jene Wärmemenge die erforderlich ist, um 1 kg eines Stoffes um 1 K zu erwärmen. Holz hat - unabhängig von der Holzart - im darrtrockenen Zustand eine

spezifische Wärmekapazität  $c$  von 1,3 kJ/kgK. Sie steigt mit zunehmendem Holzfeuchtegehalt an und beträgt bei  $u = 100\%$  etwa 2,8 kJ/kgK (S.III-14 /14/).

Die Werte für  $c$  sind im Vergleich zu Stahl ( $c \sim 0,45$  kJ/kgK) und Beton ( $c \sim 1,08$  kJ/kgK) relativ hoch (S.203-206 /25/). Dieser Umstand und eine niedrige Wärmeleitfähigkeit qualifizieren Holz und Holzwerkstoffe für den Einsatz als Dämmstoff.

### Wärmeausdehnung $\alpha_T$

Wie alle Baustoffe besitzt auch Holz die Eigenschaft sich bei Erwärmung auszudehnen und bei Abkühlung seine Abmessungen zu verringern. Die Dimensionsänderung lässt sich mit Hilfe des Wärmeausdehnungskoeffizienten  $\alpha_T$  nach folgender Beziehung berechnen:

$$\Delta l_T = \alpha_T \cdot l \cdot \Delta T \text{ [mm]}$$

Dabei ist

$\Delta l_T$  Längenänderung infolge einer Temperaturänderung  $\Delta T$  in [mm]

$\alpha_T$  Wärmeausdehnungskoeffizient in [1/K]

$l$  Grundlänge vor der Temperaturänderung in [mm]

$\Delta T$  Temperaturänderung in [K]

Der Wärmeausdehnungskoeffizient  $\alpha_T$  bezeichnet die Änderung einer Abmessungsdimension bei einer Temperaturänderung von 1 K. Abhängig von der Holzart und Faserrichtung beträgt  $\alpha_T$  zum Beispiel für Fichtenholz senkrecht zur Faser  $34,1 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  und in Faserrichtung  $5,41 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (S.699 /13/).

Bedingt durch den geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten in Längsrichtung sind Beschädigungen benachbarter Bauteile im Brandfall auszuschließen.

### 2.2.3.2 Brandverhalten

Aufgrund seiner Inhaltsstoffe zählt Holz zu den brennbaren Baustoffen. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit und die nur langsam brennende, poröse Kohleschicht die sich im Brandfall bildet, zeigt Holz ein überaus berechenbares Abbrandverhalten.

Das Brandverhalten von Holz wird in Abschnitt 2.4 detailliert beschrieben.

## 2.2.4 Elektrische Eigenschaften

### 2.2.4.1 Elektrischer Widerstand

Holz stellt im darrtrockenen Zustand einen ausgezeichneten Isolator dar. Mit steigendem Wassergehalt nimmt der Widerstand sehr schnell ab.

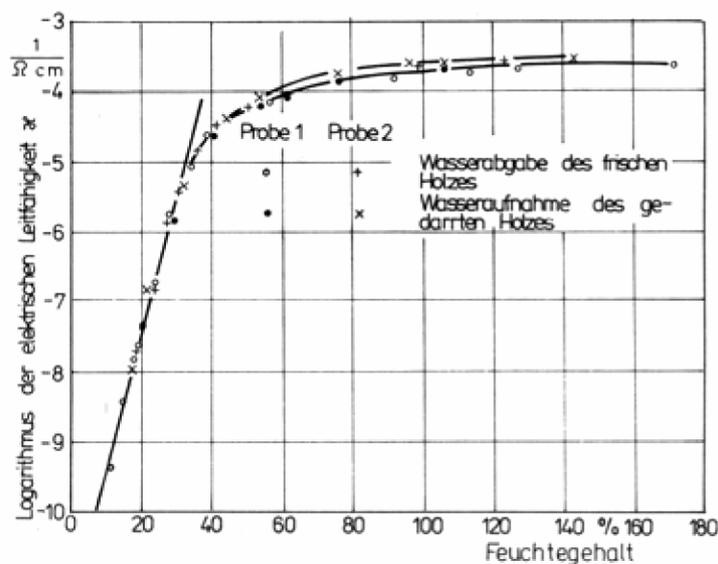


Abbildung 2.6: Einfluss des Feuchtegehalts auf die elektrische Leitfähigkeit von Redwood [S.527 /12/]

Untersuchungen haben gezeigt, dass bei Holzfeuchtewerten zwischen 7 und 30 % ein annähernd linearer Zusammenhang mit dem Logarithmus der elektrischen Leitfähigkeit besteht (vgl. Abbildung 2.6). In diesem Bereich ist eine rasante Abnahme des Widerstandes bei zunehmendem Wassergehalt zu beobachten. Im Vergleich dazu nimmt die Leitfähigkeit im überhygroskopischen Bereich ( $u > 30\%$ ) mit steigendem Feuchtegehalt nur langsam zu

und nähert sich schließlich asymptotisch der Leitfähigkeit von Trinkwasser. Beträgt der Holzfeuchtewert weniger als 7 % (Chemisorption), sind Widerstandsmessungen mit sehr großen Schwankungen behaftet. Tabelle 2.5 enthält Widerstandsmesswerte einiger Holzarten in Abhängigkeit der Messrichtung (/12/).

Tabelle 2.5: Ohmscher Widerstand von Hölzern in Abhängigkeit von der Faserrichtung (S.530 /12/)

Holzart	Holzfeuchte	Ohmscher Widerstand		
		longitudinal	radial	tangential
	[%]	[MΩ]	[MΩ]	[MΩ]
Rotceder	14,0	9	22	24
Sitkafichte	15,7	10	18	20
Alaskaceder	15,6	18	27	27
Douglasie	15,3	11	21	23

#### 2.2.4.2 Dielektrische Eigenschaften von Holz

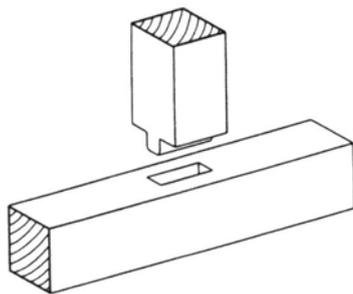
Wird ein Stück Holz mit einem elektrischen Feld bestimmter Frequenz und Stärke beaufschlagt, beginnen sich die molekularen Ladungsträger in Feldrichtung auszurichten. Diese Polarisation ist neben der Frequenz des elektrischen Feldes und der Temperatur des Holzes auch von der Holzfeuchtigkeit abhängig.

Die dielektrische Eigenschaft eines Stoffes beschreibt den Einfluss, den ein elektrisches Feld auf diesen Stoff ausübt, wenn es von ihm durchdrungen wird. Als Maß für die Durchlässigkeit dieses Stoffes wird die Dielektrizitätszahl  $\epsilon$  definiert.

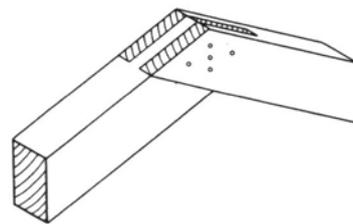
Darrtrockenes Eichenholz hat senkrecht zur Faserrichtung eine Dielektrizitätszahl von 2,46 und in Längsrichtung von 3,64. Durch die Aufnahme von Wasser ( $\epsilon = 81$ ) steigt die Dielektrizitätszahl von Holz an. Kapazitive Messverfahren nutzen diese Eigenschaft zur Bestimmung der Holzfeuchte (/12/).

## 2.3 Verbindungsmittel

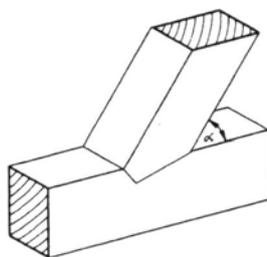
Um aus einzelnen Holzbauteilen ganze Bauteilgruppen und in weiterer Folge Bauwerke errichten zu können, bedarf es ausgeklügelter Verbindungstechniken. Es wird zwischen den klassischen zimmermannsmäßigen Holzverbindungen, die ohne metallische Elemente ihr auslangen finden, und den ingenieurmäßigen Holzverbindungen unterschieden.



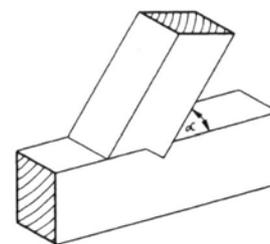
Einfacher Zapfen  
zur Lagesicherung von Druckgliedern



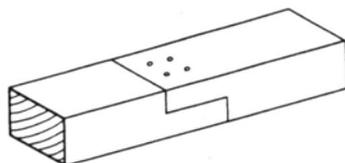
Scherzapfen  
Firstausbildung eines Sparrendaches



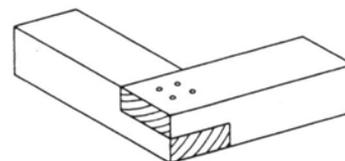
Einfacher Versatz



Rückversatz  
bei kurzem Vorholz



Gerades Blatt



Eckblatt  
zur Verbindung von Mauerbänken im Eckbereich

Abbildung 2.7: Ausgewählte zimmermannsmäßige Holzverbindungen (/24/)

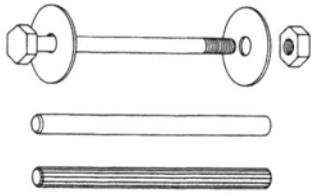
### 2.3.1 Zimmermannsmäßige Holzverbindungen

Klassische zimmermannsmäßige Holzverbindungen werden aufgrund ihrer arbeits- und kostenintensiven Herstellung nur noch in Ausnahmefällen verwendet. Die überlieferten Techniken kommen heute vor allem im Rahmen von Sanierungsarbeiten oder wenn Stahlelemente das ästhetische Erscheinungsbild stören würden zum Einsatz. Oft werden sie auch dort verwendet, wo metallische Verbindungsmittel das ästhetische Erscheinungsbild stören würden. Zu den gebräuchlichsten Holzverbindungen zählen Zapfen, Versatz oder Blatt (vgl. Abbildung 2.7).

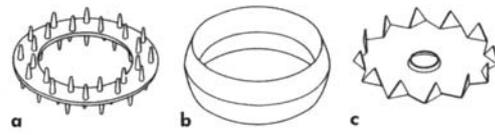
Durch den Einsatz moderner CNC-Fräsmaschinen können derartige Verbindungen mittlerweile sehr kostengünstig und mit höchster Präzision hergestellt werden. Nachteile, wie die Querschnittsreduktion und unklare Spannungsverteilungen in den Verbindungen, können dadurch allerdings nicht vermieden werden.

### 2.3.2 Ingenieurmäßige Holzverbindungen

Ingenieurmäßige Holzverbindungen sind durch den Einsatz von metallischen Elementen oder Klebstoffen gekennzeichnet. Die Verwendung industriell vorgefertigter Verbindungsteile hat den Holzbau wesentlich rationalisiert. Auf dem Markt steht eine große Anzahl von Produkten für die unterschiedlichsten Anwendungen zur Verfügung, beginnend bei einfachen Nägeln oder Schrauben, Nagelplatten, Stabdübel, Passbolzen, Bolzen, Nagelplatten, Nagelblechen, Knotenblechen bis hin zu Blechformteilen (vgl. Abbildung 2.8). Letztere werden aufgrund ihrer vielfältigen Ausführungsvarianten als Ersatz für zimmermannsmäßige Verbindungen herangezogen.

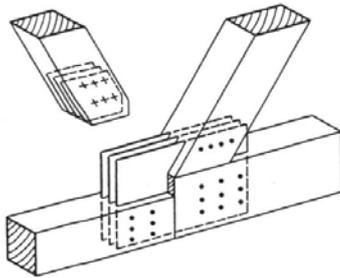


Schraubdübel (o.), Passdübel (u.)



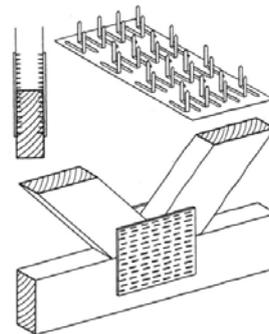
Dübel

System Geka (a), System Appel (b), System Bulldog (c)



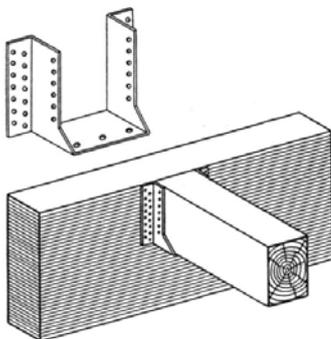
Knotenblech zur Ausbildung eines Fachwerkknotens

System Greim

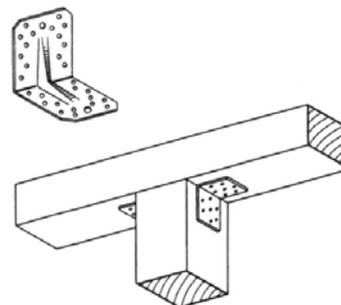


Nagelplatte

System Gang-Nail



Balkenschuh



Winkelbeschlag

Abbildung 2.8: Ausgewählte ingenieurmäßige Verbindungsmittel (/24/)

## 2.4 Brandverhalten von Holz

### 2.4.1 Entstehung und Ausbreitung von Bränden

Die „Technischen Richtlinien der österreichischen Brandverhütungsstelle – TRVB A 101“ definieren den Brand wie folgt (S.1 /2/):

*„Unter Brand versteht man ein Feuer, das auf keinem bestimmungsmäßigen Herd entstanden ist oder sich über diesen hinaus ausbreitet und Sachschäden verursacht hat, wobei Feuer als äußere Erscheinungsform der Verbrennung definiert ist.“*

Die Entstehung von Bränden kann durch technische (z.B. Kabelbrand infolge eines Kurzschlusses) oder natürliche (z.B. Blitzschlag) Ursachen, sowie durch bewusstes menschliches Fehlverhalten (Brandstiftung) ausgelöst werden. In diesem Zusammenhang stellen Brände kein zweckdienliches oder nutzbares Feuer dar, wie es z.B. in einem Ofen kontrolliert abbrennen würde, sondern definieren ein so genanntes Schadensfeuer.

Im Hinblick auf die äußere Erscheinungsform und die Energiefreisetzung eines Brandes lässt sich eine Einteilung, wie in Tabelle 2.6 dargestellt, vornehmen.

Tabelle 2.6: Unterscheidungskriterien von Bränden (S.41 /21/)

Äußere Erscheinungsform	Flammbrand	Verbrennung von Gasen und Dämpfen
	Glutbrand	Verbrennung fester, entgaster Stoffe
Energiefreisetzung	Schwelbrand	Brandintensität 0 bis 50 kW/m <sup>2</sup>
	Fortentwickelter Brand	Brandintensität 50 bis 150 kW/m <sup>2</sup>
	Vollbrand	Brandintensität 150 bis 1200 kW/m <sup>2</sup>

Der Abbrand eines 20 m<sup>2</sup> großen, normal möblierten Zimmers würde z.B. etwa 300 kW/m<sup>2</sup> Energie freisetzen (S.41 /21/).

Zur Entstehung eines Brandes müssen sowohl stoffliche als auch energetische Voraussetzungen erfüllt werden. Dazu zählen das Vorhandensein eines brennbaren Stoffes, ausreichend Sauerstoff und deren passendes Mengen- bzw. Mischungsverhältnis. Neben den materiellen Bedingungen ist aus energetischer Sicht ausreichend Zündenergie aufzubringen um den Brennvorgang zu starten. Als Schwellenwerte der Zündenergie gelten die Zündtemperatur an der sich ein Stoff entzündet, und die Mindestverbrennungstemperatur an der die Verbrennung gerade noch stattfindet (S.42-44 /21/).

In Tabelle 2.7 sind die Zündtemperaturen einiger brennbarer Stoffe bei Vorhandensein einer Pilotflamme angeführt.

Tabelle 2.7: Zündtemperaturen brennbarer Stoffe bei Vorhandensein einer Pilotflamme (S.44 /21/)

	Stoff	Temperatur
		[°C]
flüssige Stoffe	Aceton	540
	Benzin	470 – 530
	Spiritus	425 – 650
	Terpentinöl	275
feste Stoffe	Braunkohle	250 - 280
	<b>Holz</b>	<b>220 - 320</b>
	Koks	500 - 640
	Papier	360

Bei der Verbrennung wird der Zustand eines brennbaren Stoffes unter Oxidation mit Sauerstoff und der Abgabe von Wärmeenergie verändert. Verbrennt Holz, entstehen feste und gasförmige Verbrennungsprodukte.

#### 2.4.2 Klassifizierung des Brandverhaltens von Holz und Holzbaustoffen

Um das Verhalten von Baustoffen im Brandfall einheitlich quantifizieren zu können, kommen genormte Prüfverfahren zur Anwendung. Anhand dieser Prüfungen erfolgt die Klassifizierung in die jeweilige Brennbarkeitsklasse, Qualmbildungsklasse und Tropfenbildungsklasse nach ÖNORM B 3800-1 (/3/).

Es werden zwei Brennbarkeitsklassen unterschieden:

- Brennbarkeitsklasse A : nichtbrennbare Baustoffe
- Brennbarkeitsklasse B : brennbare Baustoffe
  - Brennbarkeitsklasse B1 : schwerbrennbare Baustoffe
  - Brennbarkeitsklasse B2 : normalbrennbare Baustoffe
  - Brennbarkeitsklasse B3 : leichtbrennbare Baustoffe

Die als Brandranderscheinungen definierte Qualmbildung und Tropfenbildung werden in je drei Klassen eingeteilt, Q1 bis Q3 und Tr1 bis Tr3 (/3/).

Holz zählt zu den brennbaren Baustoffen und wird entsprechend seinen Eigenschaften in die Klasse B eingestuft. Unbehandeltes Holz gilt als normal qualmend (Q2) und nicht tropfend (Tr1).

Das Holz von Eiche, Rotbuche und Esche, mit einer Abmessung von mindestens 15 mm und mineralisch gebundene Holzwolleleichtbauplatten gemäß ÖNORM B 6021 mit einer Dicke von mindestens 8 mm, gelten ohne Nachweis als schwerbrennbar (B1) (/3/ /8/).

Holz und Holzwerkstoffe die mindestens 2 mm dick sind, gelten ohne Nachweis als normalbrennbar (B2) (/3/).

Infolge der Harmonisierung der europäischen Normenlandschaft gelangen gemäß ÖNORM EN 13501-1 neue Prüfverfahren und Klassifizierungsmodelle zur Anwendung (/5/). Die ÖNORM B 3806 hat diese neuen Regelungen bereits übernommen (/4/). Durch die Änderung der Prüfmethode ist eine direkte Vergleichbarkeit der Klassifizierungen gemäß ÖNORM B 3800-1 allerdings nicht gegeben (/3/).

In Zukunft wird die Brennbarkeit eines Baustoffes in sieben Klassen geregelt und die Begleiterscheinungen, wie Qualm- und Tropfenbildung, in je drei Klassen.

Um den Prüfungs- und Zertifizierungsaufwand reduzieren zu können, werden von der Europäischen Kommission Baustoffe mit bekanntem Brandverhalten per Entscheid ohne

zusätzliche Prüfung zugelassen. Tabelle 2.8 zeigt die Klassifikation von Bauholz und Brettschichtholz gemäß den Beschlüssen der Europäischen Kommission (/6/ /7/).

Tabelle 2.8: Klassifizierung von Bauholz und Brettschichtholz gemäß ÖNORM EN 13501-1 (/6/ /7/)

	Produktdetails	Mindestdichte	Mindestgesamtdicke	Klasse
		[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm]	
Bauholz	Visuell und maschinell sortiertes Bauholz mit rechteckigem oder rundem Querschnitt	350	22	D-s2, d0
Brettschichtholz	Brettschichtholzprodukte gemäß EN 14080	380	40	D-s2, d0
D-s2, d0 ... normal entflammbar – normal qualmend, kein brennendes Abtropfen				

### 2.4.3 Zeitlicher Ablauf von Bränden

Abbrandvorgänge und Abbrandverläufe sind äußerst komplex und von den verschiedensten Faktoren abhängig. Vor allem die Art des brennbaren Stoffes und das Sauerstoffangebot sind von entscheidender Bedeutung. Zudem nehmen die Zündquelle und die Verteilung der Brandlast wesentlichen Einfluss auf den zeitlichen und thermischen Verlauf eines Brandes.

Im zeitlichen Verlauf wird ein Brand durch die vier Brandphasen - Entzündung, Schwelen, Ausbreitung und Abklingen - charakterisiert. Die Zeitdauer der einzelnen Phasen kann je nach Schadensfeuer sehr verschieden sein. Abbildung 2.9 zeigt den typischen Verlauf eines Schadensfeuers. Der Übergang vom Entstehungsbrand zum fortentwickelten Brand wird Flashover genannt. Da sich in diesem Zeitraum die Brandgase explosionsartig entzünden, ist die Teilphase durch einen sprunghaften Temperaturanstieg gekennzeichnet.

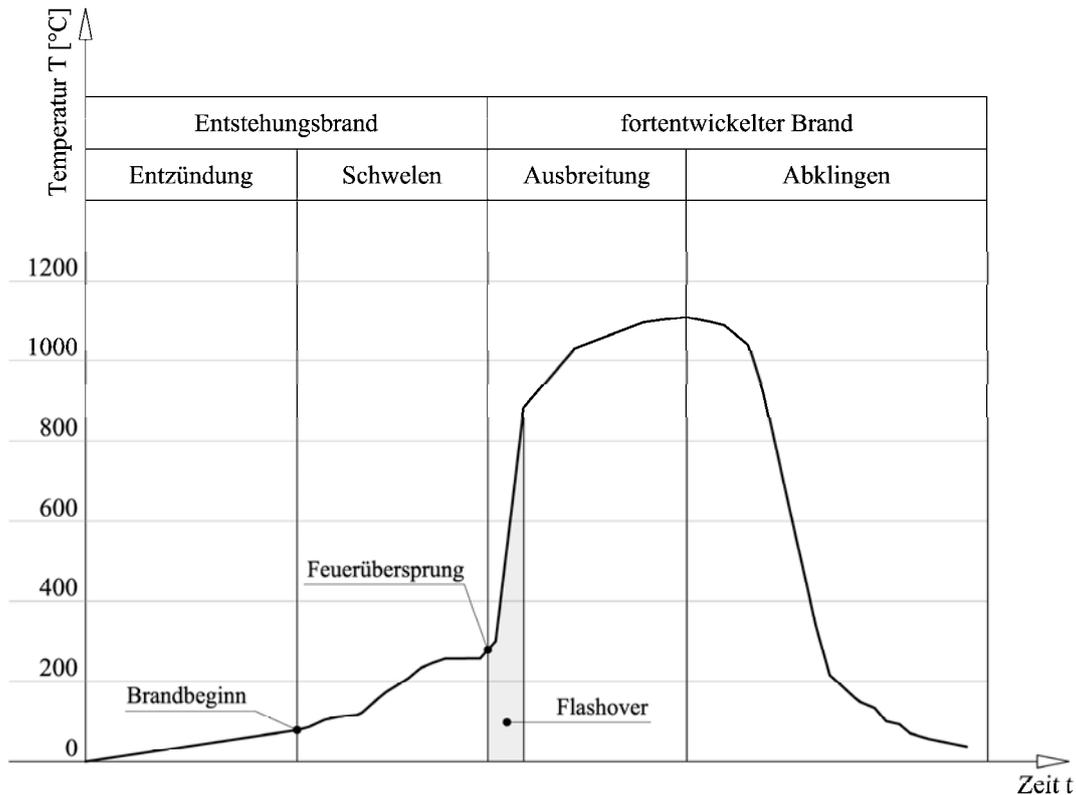


Abbildung 2.9: Phasen des Abbrandes (S.4 /34/)

Die Komplexität von natürlichen Bränden führte dazu, den Temperaturanstieg bei Brandversuchen durch eine vereinfachte Kennlinie zu beschreiben. Die genormte Einheits-Temperaturzeitkurve, kurz ETK genannt, wird vor allem zur Prüfung der Brandbeständigkeit von Bauteilen herangezogen und mit folgender Formel errechnet:

$$T = 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1) + 20 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Dabei ist

$T$  Mittlere Ofentemperatur nach der Versuchszeit  $t$  in  $^\circ\text{C}$

$t$  Versuchszeit in [min]

Bei Versuchsabläufen nach Norm, unter Einhaltung von festgelegten Toleranzen, muss der mittlere Temperaturanstieg in der Brandkammer nach der Einheits-Temperaturzeitkurve

erfolgen. In Abbildung 2.10 wird der grafische Verlauf der ETK mit den normativen Schranken dargestellt (/9/).

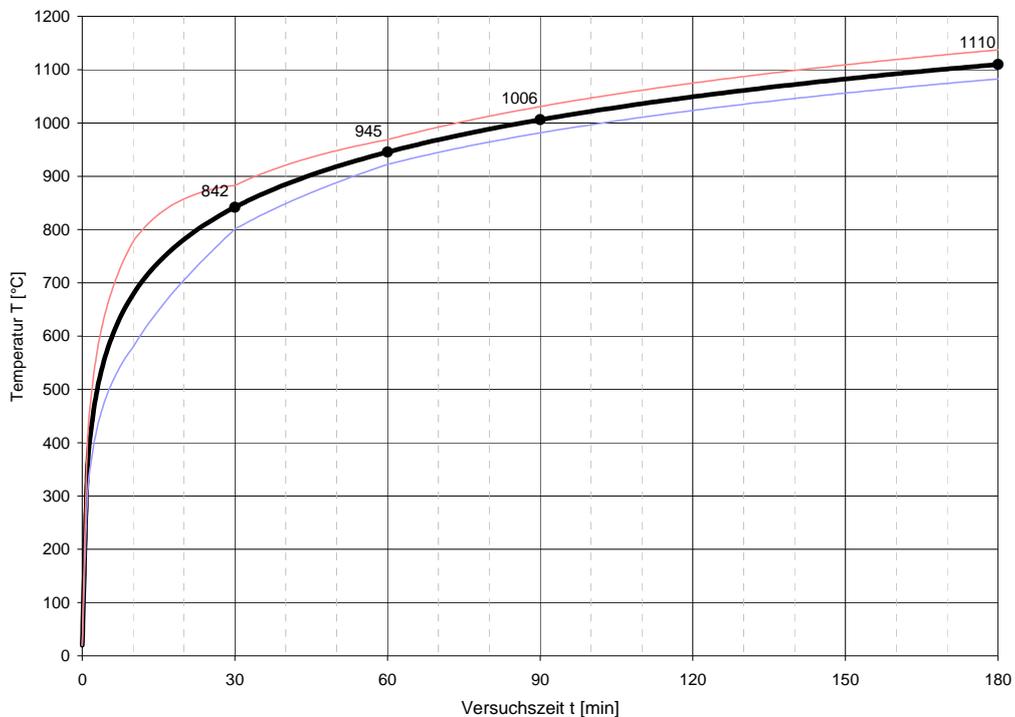


Abbildung 2.10: Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) gemäß ÖNORM EN 1363-2 (/9/)

Neben der Einheits-Temperaturzeitkurve finden sich in ÖNORM EN 1363-2 spezielle Aufheizkurven, wie die Kohlenwasserstoffkurve, die Außenbrandkurve oder die Schwellbrandkurve, die das Brandverhalten von bestimmten Stoffen unter bestimmten Voraussetzungen besser als die ETK beschreiben (/10/).

#### 2.4.4 Vorgänge beim Abbrand von Holz

Der Abbrand von Holz ist durch drei Phasen charakterisiert, die stets in der in Tabelle 2.9 aufgezeigten Reihenfolge ablaufen. Aufgrund verschiedenster Einflüsse kann die Dauer der einzelnen Phasen sehr variieren.

Tabelle 2.9: Abbrandphasen von Holz

Phase	Temperaturbereiche	Charakteristik der Abbrandphase
Trocknungsphase	< 150 °C	Wasser entweicht als Wasserdampf
Ausgasungsphase	150 – 300°C	Leicht entzündliche Holzgase (Pyrolysegase) entweichen
Ausbrandphase	300 – 900 °C	Holzkohle entsteht und wird abgebaut

Mit der einsetzenden Erwärmung von gesundem, lufttrockenem Holz beginnt die erste Abbrandphase. In dieser Trocknungsphase wird das oberflächliche und in den Zellhohlräumen gespeicherte Wasser dem Holz entzogen. Die Temperatur steigt in dieser Teilphase kaum über 100 °C hinaus und bleibt solange auf diesem Niveau, bis das gesamte Wasser verdampft ist. Durch den Verlust der Holzfeuchtigkeit schwindet der Querschnitt.

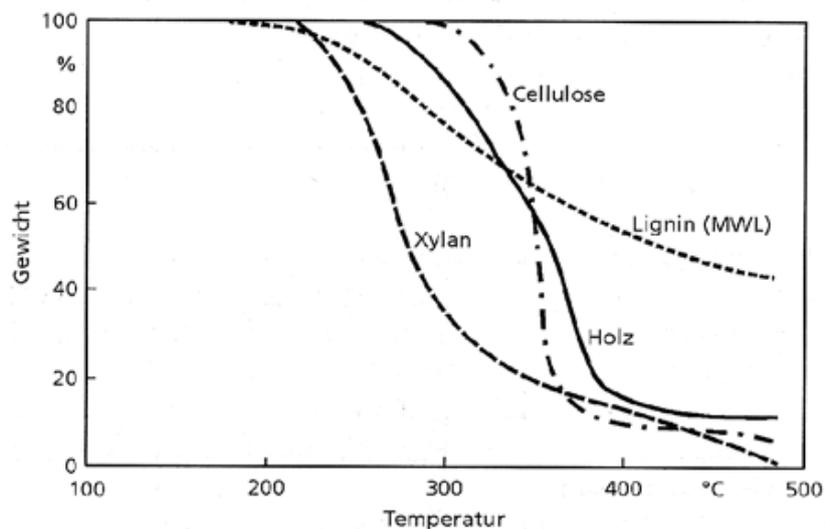


Abbildung 2.11: Thermische Zersetzung von Holz als Funktion der Pyrolysetemperatur (S.45 /18/)

In weiterer Folge steigt die Temperatur im Querschnitt an. Bereits ab einer Temperatur von 60 °C entstehen die ersten Abbauprodukte der Holzsubstanz. Die eigentliche thermische Zersetzung - die Pyrolyse - der Holzbestandteile beginnt jedoch erst bei Temperaturen von 160 °C bis 180 °C (/17/). Die Pyrolyse setzt die flüchtigen und leicht brennbaren Bestandteile der Holzsubstanz durch die Zersetzung chemischer Verbindungen frei und bildet das Pyrolysegas (Holzgas). Das Pyrolysegas besteht primär aus brennbaren Bestandteilen wie Kohlenmonoxid, Wasserstoff und organischen Verbindungen. Durch die fortschreitende Zersetzung der Holzinhaltstoffe werden die Hemizellulosen (Xylan) und das Lignin

frühzeitig abgebaut, während der Abbau von Zellulose erst ab etwa 300 °C einsetzt (vgl. Abbildung 2.11). An der dem Feuer zugewandeten Seite des Holzes bildet sich die so genannte Pyrolysezone, eine drei bis vier Millimeter dicke Schicht, in der augenblicklich die Pyrolyse stattfindet (/19/).

Mit zunehmender Erhöhung der Temperatur nimmt die Intensität der Abbaureaktionen stetig zu, bis diese Zersetzungsreaktionen bei einer Temperatur von 250 bis 300 °C mehr Wärme erzeugen als sie verbrauchen. In diesem Moment erreicht der Entgasungsvorgang seinen Höhepunkt und das Holzgas zündet. Die Reaktionen gehen dadurch von der endothermen in die exotherme Phase über. Ab diesem Zeitpunkt muss keine Energie mehr von außen zugeführt werden um die Verbrennungsvorgänge aufrecht zu erhalten.

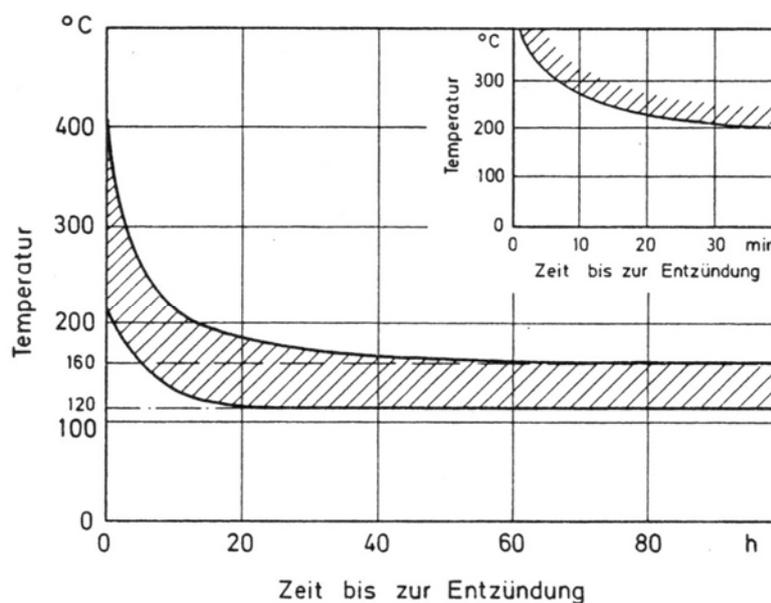


Abbildung 2.12: Entzündungstemperatur von unbehandeltem Holz ( $\rho \geq 400 \text{ kg/m}^3$  bei  $u \sim 15 \%$ ) in Abhängigkeit von der Zeit (S.46 /28/)

Die Entzündungstemperatur ist von verschiedenen Faktoren abhängig. Während feine Holzspäne durch die Vergrößerung der Reaktionsoberfläche bereits bei Temperaturen unter 250 °C plötzlich entzünden können, lassen sich Entflammungen von Holz nach lang anhaltender thermischer Behandlung bereits ab Temperaturen von 120 °C realisieren (vgl. Abbildung 2.12). Weitere Einflussfaktoren auf die Höhe der Entzündungstemperatur sind die Rohdichte und der Holzfeuchtegehalt (vgl. Abschnitt 2.4.5).

In der Ausgasungsphase gehen rund 85 % der Holzmasse in Form von Wasser, Kohlendioxid und Pyrolysegas verloren, wobei etwa 70 % der Energie des Holzes freigesetzt werden (vgl. Abbildung 2.14). Die Pyrolysephase dauert bis ca. 600 °C an.

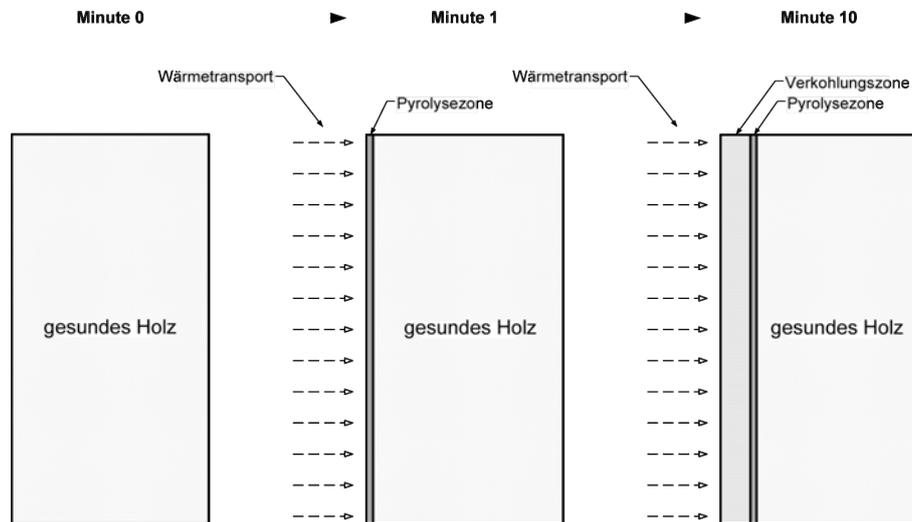


Abbildung 2.13: Wärmetransport beim Abbrand von Holz (S.16 /19/)

In der darauf folgenden Ausbrandphase wandert die Pyrolysezone fortlaufend in das Holzinnere und bildet hinter sich eine kohlenstoffreiche Holzkohleschicht (vgl. Abbildung 2.13). Die Holzkohle ist das Endprodukt der Ausgasungsphase. Mit einem Kohlenstoffanteil von rund 90 % verbrennt sie bei Temperaturen von über 600 °C und weist nur etwa 20 % der ursprünglichen Rohdichte des Holzes auf. Durch die geringe Wärmeleitfähigkeit von  $\lambda = 0,03$  W/mK (/37/) stellt die Verkohlungszone eine Wärmedämmschicht für das gesunde Holz dar und verringert dadurch die Abbrandgeschwindigkeit. Der Wärmetransport erfolgt nun nicht mehr alleine durch Strahlung und Konvektion, sondern zusätzlich durch Wärmeleitung (/17/ /19/).

Da der Abbrand der schützenden Holzkohle langsamer verläuft als die Abbaureaktionen in der Pyrolysezone, beginnt sich ein annähernd stationäres Gleichgewicht einzustellen. Das hat zur Folge, dass die anfänglich hohe Abbrandrate durch den gleich bleibenden Wärmedurchlasswiderstand der Holzkohleschichten einen konstanten Zustand einnimmt (/19/).

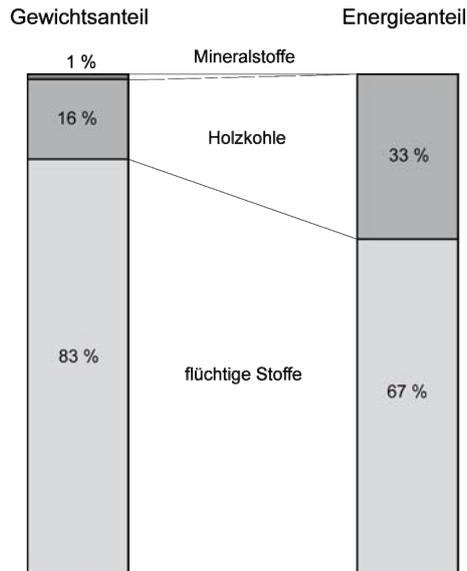


Abbildung 2.14: Gewichts- und Energieanteil der festen und flüchtigen Stoffe in Holz (S.55 /16/)

Der Abbrand erfolgt solange die stofflichen oder die energetischen Voraussetzungen erfüllt sind (vgl. Abschnitt 2.4.1). Am Ende der Ausbrandphase bleiben lediglich 0,5 % der ursprünglichen Holzmasse in Form von Asche zurück.

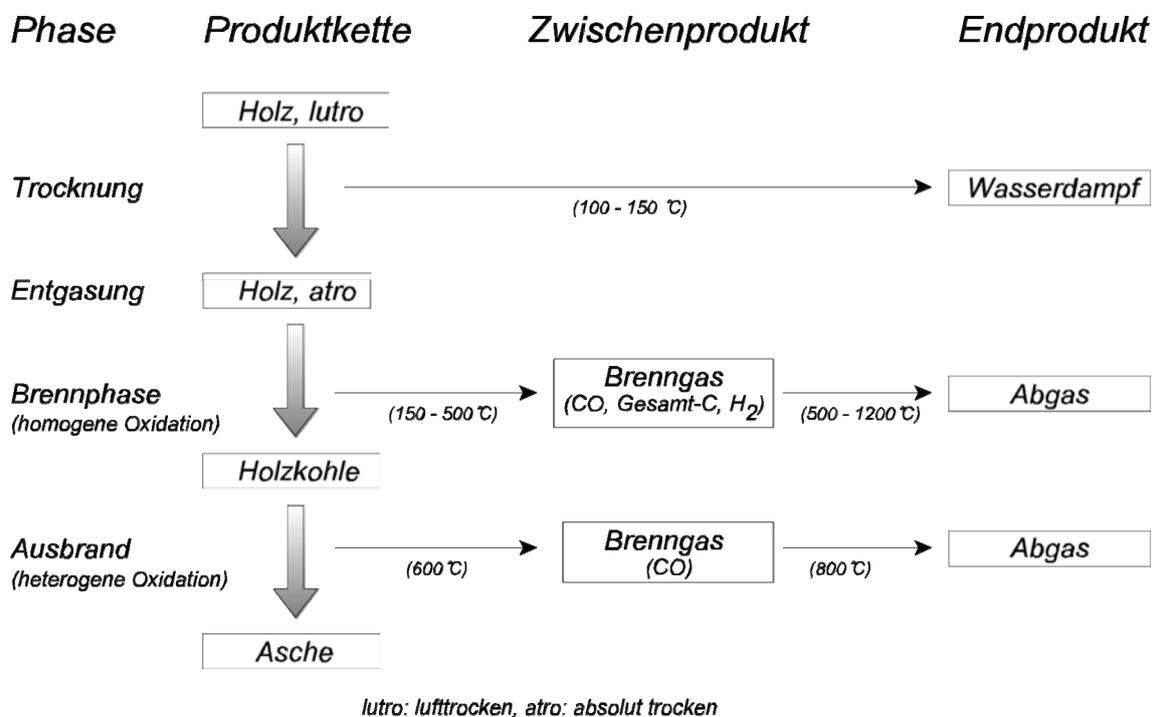


Abbildung 2.15: Schematischer Verlauf der bei der Holzverbrennung ablaufenden Vorgänge (S.6 /17/)

In Abbildung 2.15 werden die beschriebenen Vorgänge bei der thermischen Zersetzung von Holz zusammenfassend dargestellt.

### 2.4.5 Abbrandgeschwindigkeiten von Holz

Die Abbrandgeschwindigkeit oder Abbrandrate ist die wichtigste Kenngröße zur Beurteilung des Verhaltens von Holz im Brandfall. Sie wird durch den Quotienten von Abbrandtiefe je Zeiteinheit, in der Einheit [mm/min], angegeben.

Tabelle 2.10 veranschaulicht die Abbrandraten von Bauholz und Holzwerkstoffen entsprechend ÖNORM B 3800-4.

Tabelle 2.10: Abbrandgeschwindigkeit von Holz und Holzwerkstoffen gemäß ÖNORM B 3800-4 (/11/)

	Werkstoff	Abbrandgeschwindigkeit
		[mm/min]
Gutes Bauholz	Eiche	0,50
	Fichte KVH, sowie Brettschichtholz	0,65
	Kiefer	0,75
Holzspanplatten	Rohdichte 600 bis 700 kg/m <sup>3</sup>	0,80
	Rohdichte über 700 kg/m <sup>3</sup>	0,70
Sperrholzplatten	Rotbuche	0,80
	Fichte	0,80
Holzfaserplatten	Holzfaserplatten, hart	0,65
	Holzfaserplatte, porös	2,00

Die Abbrandgeschwindigkeit ist vor allem von folgenden Faktoren abhängig:

- Holzart, Inhaltsstoffe
- Holzfeuchte
- Rohdichte
- Sauerstoffangebot bei der Verbrennung
- Geschichte des Temperaturverlaufs
- Querschnittsgeometrie (Verhältnis von Oberfläche zu Volumen).

Je nach Holzart liegen die Holzinhaltsstoffe in einer bestimmten Verteilung vor. Eine erhöhte Konzentration an leichtbrennbaren flüchtigen Extraktstoffen (Harze, Terpene, usw.) führt zu einer Erhöhung der Abbrandgeschwindigkeit.

Der anatomische Aufbau nimmt ebenfalls Einfluss darauf. So wird bei Fichtenholz das Entweichen der Pyrolysegase durch die geschlossenen Tracheiden behindert, während die vielen offenen Gefäße der zerstreutporigen Buche die Entgasung beschleunigen. Die ringporige Eiche hingegen hemmt durch ihre Porenstruktur das Entweichen von Holzgas (S.31 /28/).

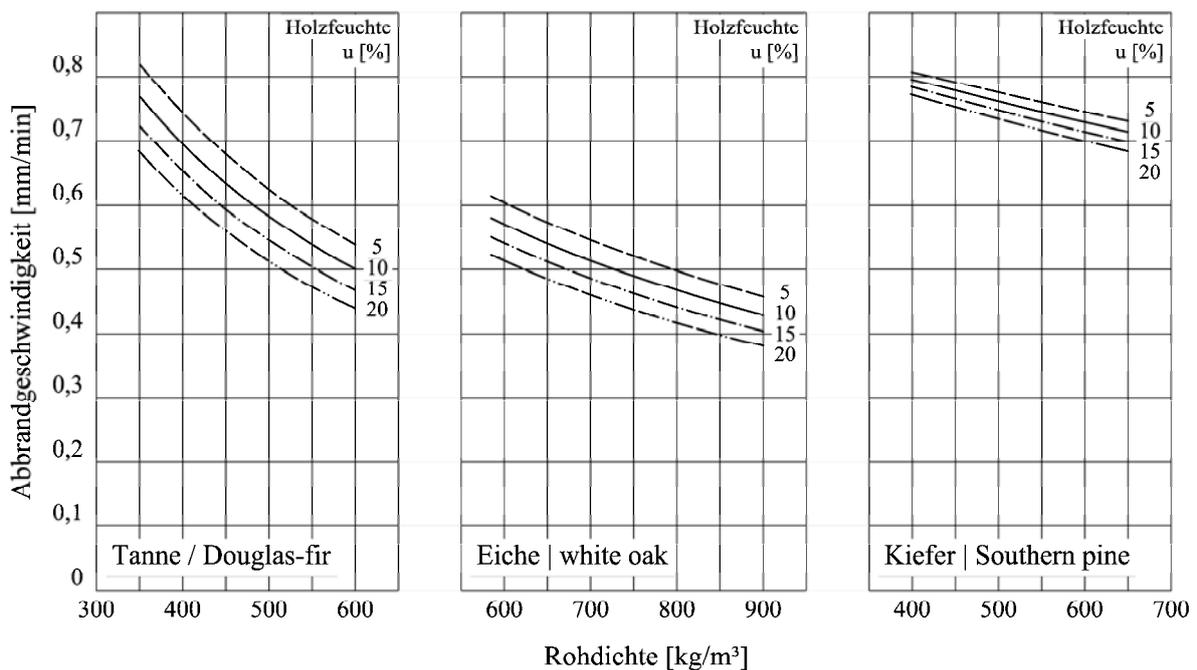


Abbildung 2.16: Abbrandgeschwindigkeiten von Tanne, Eiche und Kiefer in Abhängigkeit von Holzfeuchte und Rohdichte (S.14-16 /20/).

Die Abbrandgeschwindigkeit von Holz wird durch den Anteil an Holzfeuchtigkeit wesentlich beeinflusst. Ein hoher Wassergehalt führt in erster Linie zu einer Verlängerung der ersten Abbrandphase (Trocknungsphase) und reduziert die Abbrandtemperatur um die für die Wasserverdampfung benötigte Wärmeenergie erheblich. Zusätzlich entstehen beim Verbrennen von „nassem“ Holz gesundheitsschädliche gasförmige Verbrennungsprodukte.

Abbildung 2.16 zeigt die Ergebnisse von Untersuchungen zur Abbrandgeschwindigkeit an Tanne, Eiche und Kiefer. Die Abhängigkeit der Abbrandrate vom Holzfeuchtegehalt, von der

Rohdichte und der Holzart ist eindeutig erkennbar. Den Einfluss der Holzfeuchtigkeit und der Rohdichte auf das Abbrandverhalten belegen ebenso die Werte in Tabelle 2.11. Im Vergleich zum leichten Fichtenholz lassen sich die höheren Abbrandraten von Buchenholz mit den eingangs erwähnten Unterschieden im anatomischen Aufbau erklären.

Tabelle 2.11: Abbrandrate  $v$  [mm/min] von verschiedenen Hölzern bei Brandbeanspruchung nach der Einheits-Temperaturzeitkurve (S.473-480 /23/)

Holzart	Holzfeuchte $u$	Rohdichte $\rho$	Abbrandrate $v$ kontinuierlich gemessen	Abbrandrate $v$ am Versuchsende gemessen
	[%]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mm/min]	[mm/min]
Fichte	8	433	0,74	0,71
	20	459	0,68	0,63
Buche	8	700	0,82	0,80
	20	689	0,76	0,72
Meranti <sup>7</sup>	8	544	0,65	0,59
	20	559	0,59	0,56

Weitere Versuchsergebnisse sind in Abbildung 2.17 zusammengefasst. Die dargestellten Werte wurden anlässlich eines internationalen Symposiums in Finnland präsentiert (/30/) und durch weitere Untersuchungen ergänzt (/20/ /28/ /29/). Die Auswirkungen der Rohdichten von Nadel- und Laubholz auf die Abbrandrate sind deutlich erkennbar. Bedingt durch die Unterschiede im mikroskopischen Aufbau (Porengröße und Porenverteilung), ist die Abbrandgeschwindigkeit von schwerem Bongossi<sup>8</sup> ( $\rho \sim 1,10 \text{ g/cm}^3$ ) verglichen mit Eiche relativ hoch.

Im Zuge der Bearbeitung des Eurocode 5 wurden am Institut für Holzforschung, München weitere Erkenntnisse über die Abhängigkeit der Abbrandgeschwindigkeit gewonnen (/31/).

<sup>7</sup> Tropisches Hartholz

<sup>8</sup> Tropisches Hartholz

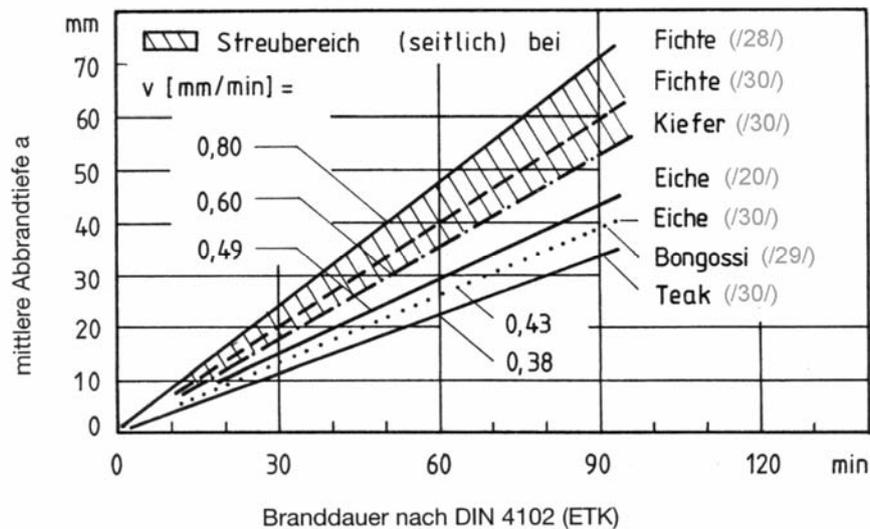


Abbildung 2.17: Abbrandtiefe und Abbrandgeschwindigkeit verschiedener Hölzer bei Brandbeanspruchung nach der Einheits-Temperaturkurve (S.50 /28/)

#### 2.4.6 Ermittlung der Abbrandtiefe nach Eurocode 5

Gesundes, tragfähiges Holz wird durch Brandbeanspruchung abgebaut. Die Dicke der Abbauschicht wird als Abbrandtiefe bezeichnet. Eurocode 5 definiert die Abbrandgrenze mit der 300 °C – Isotherme.

Entsprechend Eurocode 5 Teil 1-2 lässt sich die Abbrandtiefe für den eindimensionalen Abbrand nach folgender Beziehung berechnen (vgl. Abbildung 2.18(a)) (/1/):

$$d_{\text{char},0} = \beta_0 \cdot t \text{ [mm]}$$

Dabei ist

- $d_{\text{char},0}$  Bemessungswert der Abbrandtiefe für eindimensionalen Abbrand in [mm]
- $\beta_0$  Bemessungswert der eindimensionalen Abbrandrate bei genormter Brandbeanspruchung entsprechend Tabelle 2.12 in [mm/min]
- $t$  Zeitdauer der Brandbeanspruchung [min]

Tabelle 2.12: Bemessungswerte der Abbrandraten  $\beta_0$  und  $\beta_n$  für Bauholz (/1/)

Holzart	$\beta_0$	$\beta_n$
	[mm/min]	[mm/min]
Nadelholz und Buche		
Brettschichtholz mit einer charakteristischen Rohdichte von $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Vollholz mit einer charakteristischen Rohdichte von $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,8
Laubholz		
Vollholz oder Brettschichtholz mit einer charakteristischen Rohdichte von $\geq 290 \text{ kg/m}^3$	0,65	0,7
Vollholz oder Brettschichtholz mit einer charakteristischen Rohdichte von $\geq 450 \text{ kg/m}^3$	0,50	0,55

Um den Abbrand im Eckbereich und die Rissbildung bei Feuereinwirkung zu berücksichtigen, beschreibt Eurocode 5 die ideelle Abbrandtiefe (vgl. Abbildung 2.18b) (S.26 /1/):

$$d_{\text{char},n} = \beta_n \cdot t \text{ [mm]}$$

Dabei ist

$d_{\text{char},n}$  Bemessungswert der ideellen Abbrandtiefe in [mm]

$\beta_n$  Bemessungswert der ideellen Abbrandrate bei genormter Brandbeanspruchung entsprechend Tabelle 2.12 in [mm/min]

$t$  Zeitdauer der Brandbeanspruchung [min]

Für Hölzer mit einer Rohdichte zwischen  $290 \text{ kg/m}^3$  und  $450 \text{ kg/m}^3$  dürfen die Werte in Tabelle 2.12 linear interpoliert werden.

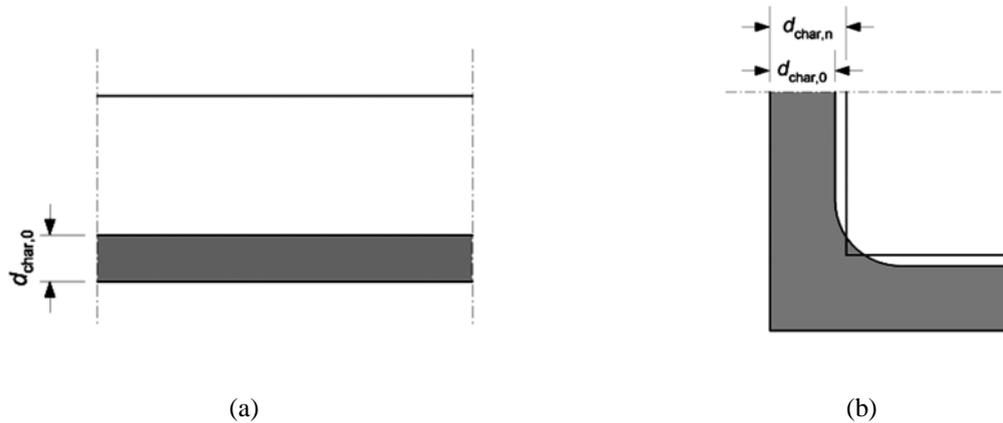


Abbildung 2.18: Eindimensionale Abbrandtiefe (a) und ideale Abbrandtiefe (b) (S.24–25 /1/)

### 2.4.7 Verlauf der thermischen Eigenschaften bei Brandbeanspruchung

In Abschnitt 2.2.3 wurden bereits die wichtigsten thermischen Eigenschaften von Holz beschrieben. Bei Brandbeanspruchung unterliegen die Wärmeleitfähigkeit und die Wärmekapazität mit steigender Temperatur enormen Schwankungen (vgl. Abbildung 2.19 und Abbildung 2.20). Die in den Abbildungen dargestellten Werte sind für Nadelhölzer gültig (/1/).

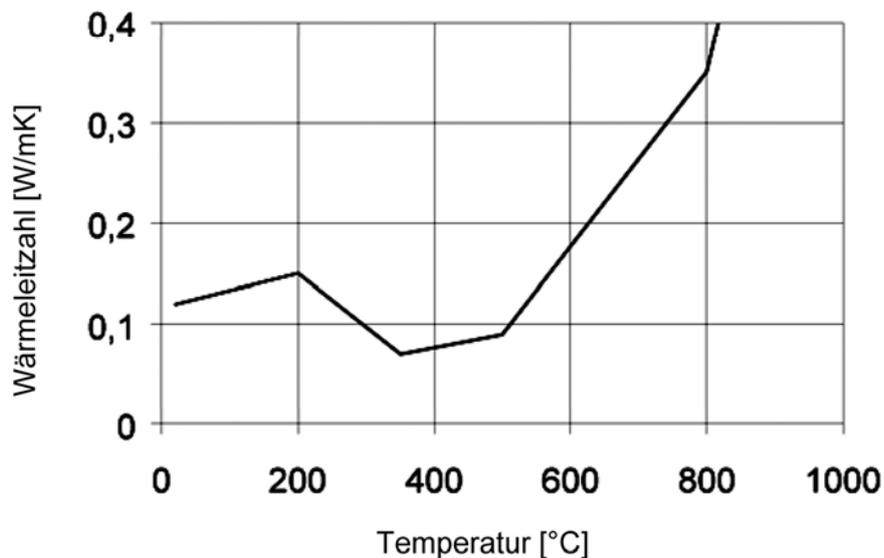


Abbildung 2.19: Temperaturabhängige Wärmeleitfähigkeit für Holz und Holzkohle (S.52 /1/)

Der in Abbildung 2.20 sprunghafte Anstieg bei 100 °C wird durch den hohen Wärmeenergiebedarf, der für die Verdunstung der Holzfeuchtigkeit notwendig ist, verursacht. Die schraffierte Fläche stellt die Energie in [kJ] pro Masse der Holzfeuchtigkeit in [kg] dar.

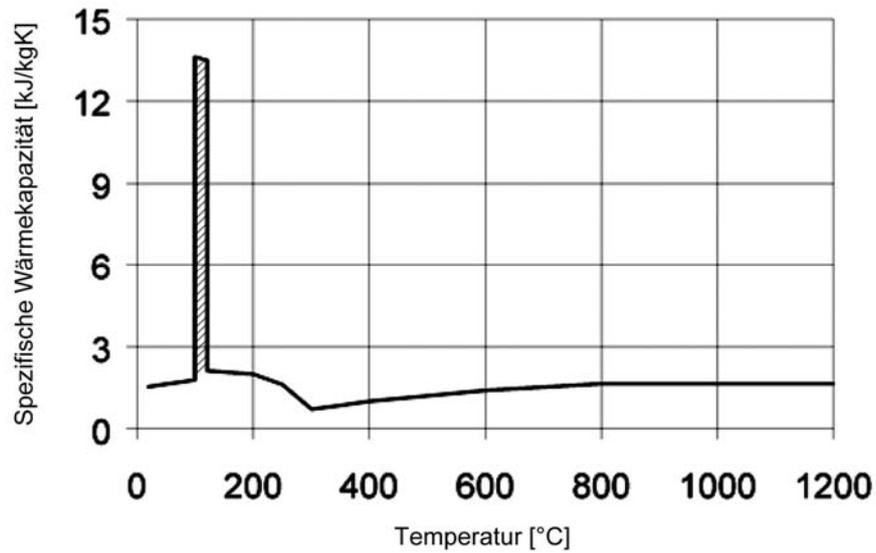


Abbildung 2.20: Temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität für Holz und Holzkohle (S.53 /1/)

## 3 Versuchsplanung

Nach dem theoretischen Teil dieser Arbeit, in dem die Grundlagen zur gestellten Thematik erläutert wurden, befasst sich das nachstehende Kapitel mit der Planung der Brandversuche.

Anhand der Versuche sollen die folgenden zentralen Fragen geklärt werden:

- Wie ändert sich der Feuchtestrom in Holz im Brandfall wenn eine metallische Sperrschicht vorhanden ist?
- Wie ändert sich die Abbrandrate von Holz an den sperrschichtnahen Schichten?

### 3.1 Versuchsanlage

#### 3.1.1 Standort der Versuchsanlage

Der Prüfofen und die erforderlichen Messeinrichtungen zur Durchführung der Brandversuche werden im Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie – Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien aufgebaut.

#### 3.1.2 Aufbau des Prüfofens

Die Konstruktion und die verwendeten Baustoffe für den Prüfofen entsprechen in weiten Teilen den Anforderungen der ÖNORM EN 1363-1. Da es sich jedoch um keine Feuerwiderstandsprüfungen im Sinne dieser ÖNORM handelt, bietet der Prüfofen ausschließlich die Möglichkeit einer einseitigen, horizontalen Brandbeanspruchung des Prüfkörpers.

Der Prüfofen ist auf einem Sockel aus Normalformatziegeln errichtet um den Hitzeeintrag auf den Unterbau zu verringern. Die Wände der Brandkammer und der komplette Brennertunnel, über den die indirekte Brandbeanspruchung initiiert wird, bestehen aus so genannten Feuerleichtsteinen der Firma *Rath*. Diese Steine, mit dem Markennamen *Porrath*, haben eine Mindestrohichte von  $0,80 \text{ g/cm}^3$  und sind für eine Temperaturbeanspruchung von  $1430^\circ\text{C}$

klassifiziert. Den oberen waagrechten Abschluss der Brandkammer bilden 10 cm dicke Porenbetonsteine der Firma *Ytong/Xella*.

Entsprechend den Spezifikationen der ÖNORM EN 1363-1, besitzen mindestens 70 % der für den Ofen verwendeten Baustoffe eine Dichte von weniger als 1000 kg/m<sup>3</sup> und eine Mindestdicke von 50 mm (/9/).

Alle Einzelteile des Prüfofens werden im Fugenverband ohne Verwendung von Mörtel verarbeitet.

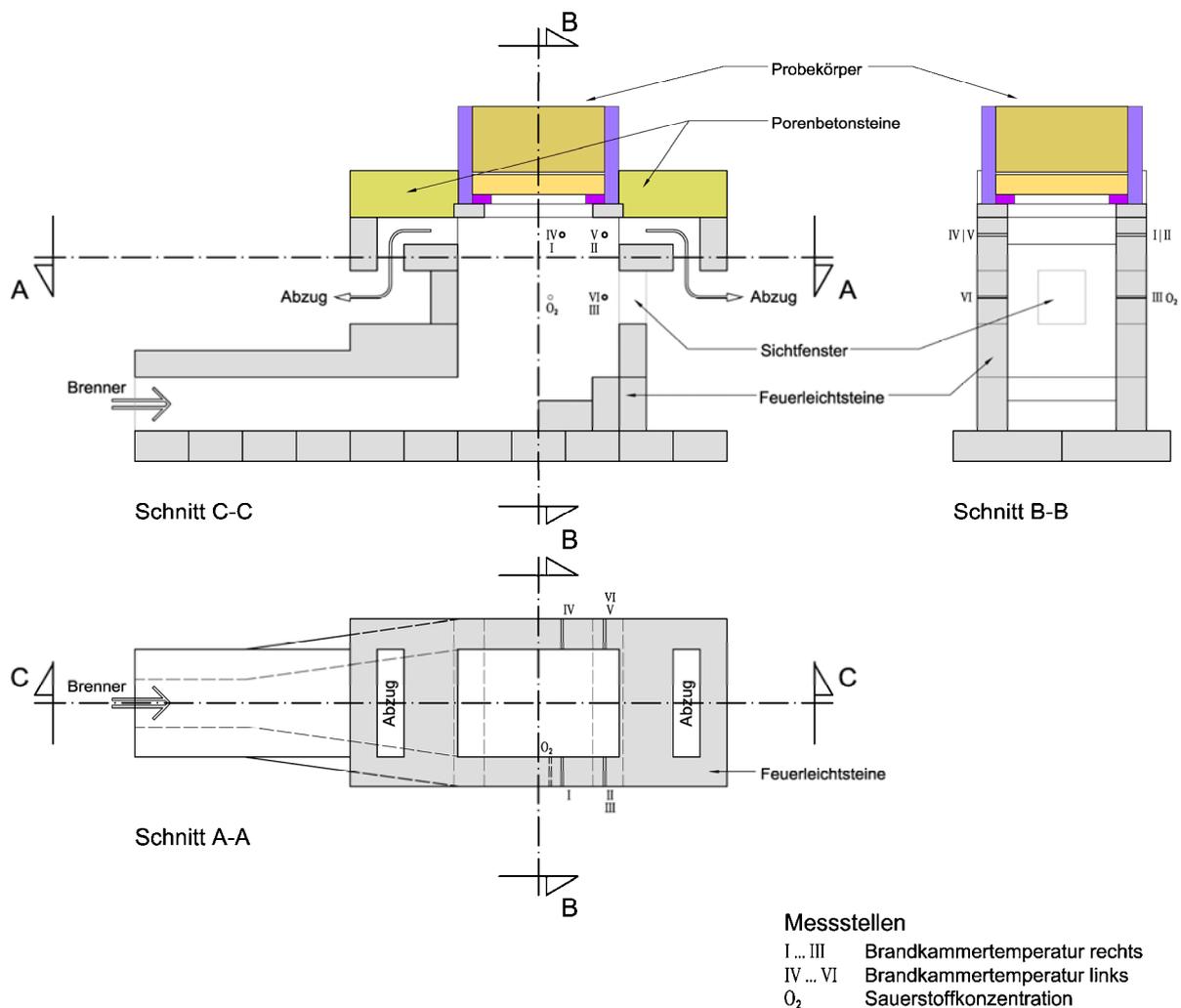


Abbildung 3.1: Konstruktion des Prüfofens

Ein Sichtfenster an der Rückseite des Ofens bietet die Möglichkeit den Probekörper während des Versuchverlaufs visuell zu kontrollieren. Die Öffnung ist im Normalfall durch einen

bearbeiteten Feuerleichtstein verschlossen. Zwei symmetrisch angeordnete Abzüge führen die heißen Brandgase aus der Brandkammer ab. Die Konstruktion des Prüfofens ist Abbildung 3.1 zu entnehmen. Eine maßstäbliche Skizze mit Angabe der Abmessungen befindet sich in Anhang 1.

Über den Brennertunnel wird der Prüfofen mittels eines Propan-Gasbrenners betrieben. Den erforderlichen Verbrennungssauerstoff erhält die Flamme über eine kleine Öffnung am Brennerrohr. In Abbildung 3.2 ist der detaillierte Aufbau des Brenners dargestellt. Die Flamme wird manuell gestartet und über den Gas-Druckregler gesteuert.

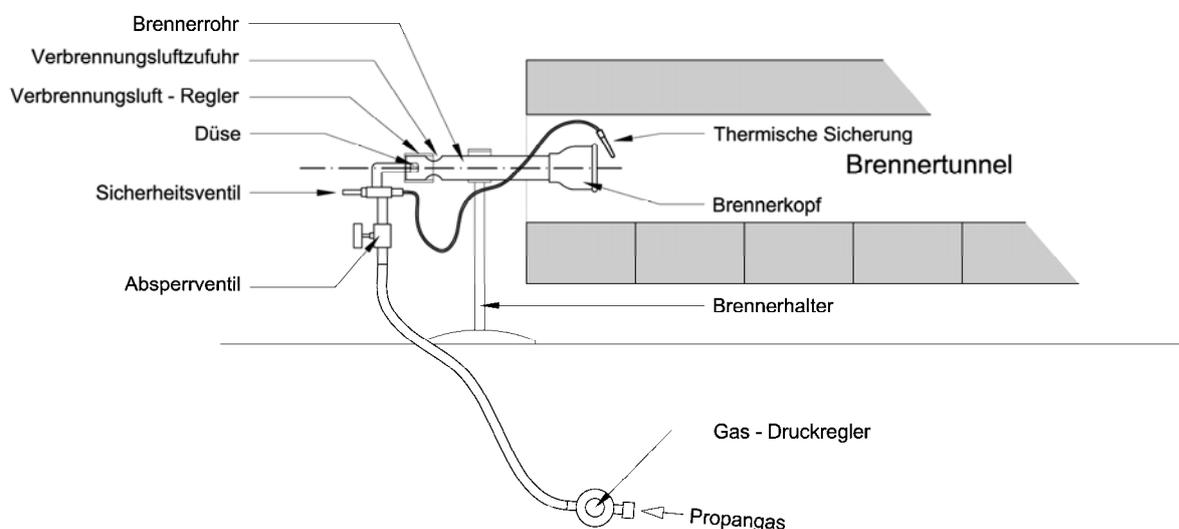


Abbildung 3.2: Propangasbrenner

Die Probekörper werden zwischen den beiden Porenbetonsteinen ohne zusätzliche Auflast auf den Prüfofen aufgelegt (vgl. Abbildung 3.1). Um ein unkontrolliertes Entweichen heißer Brandgase zu verhindern, ist es notwendig, die Konstruktionssteine dicht an die Steinwolleverkleidung des Probekörpers anzulegen.

Während der Versuchsdurchführung und der Abkühlphase befindet sich der Prüfofen unter einer ventilierten Abzugsesse, die die heißen Brandgase ins Freie abführt.

Die am und im Prüfofen befindlichen Messeinrichtungen werden in Abschnitt 3.3.1 näher erläutert.

## 3.2 Probekörper

Für die vorgesehenen Versuchsreihen werden die Einzelteile der Probekörper in den institutseigenen Probenvorbereitungsräumen hergestellt und nach der entsprechenden klimatischen Konditionierung endmontiert.

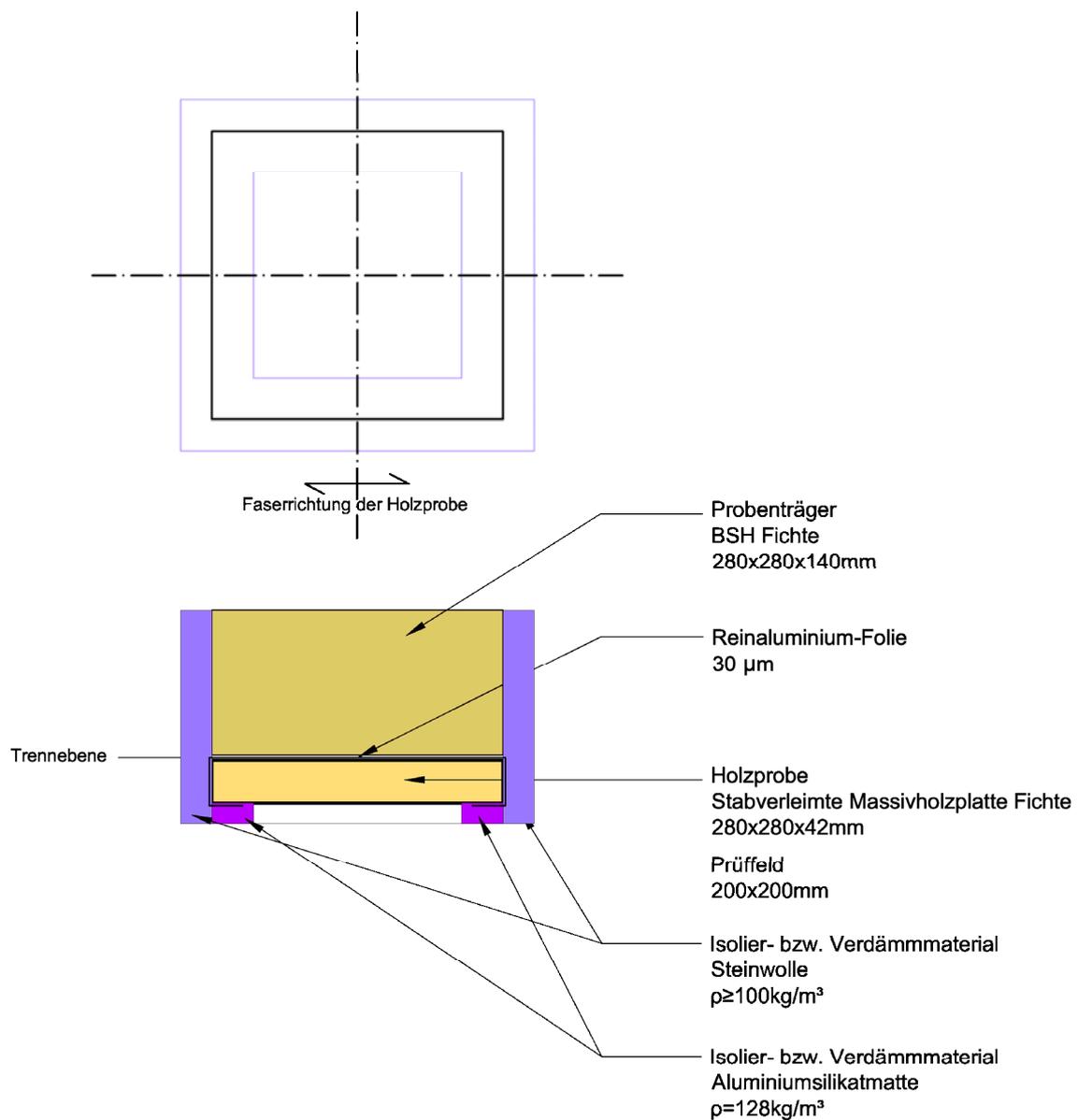


Abbildung 3.3: Schichtaufbau des Probekörpers

### 3.2.1 Konstruktion der Probekörper

Der Aufbau der Probekörper erfolgt symmetrisch um die Achse der Brandbeanspruchung. Für die Brandversuche werden zwei Grundtypen von Probekörpern hergestellt. Diese unterscheiden sich durch das Vorhandensein einer 30  $\mu\text{m}^9$  dicken Reinaluminiumfolie zwischen Probenholz und Probenträger. Abbildung 3.3 zeigt den schematischen Aufbau der Probekörper in Grundriss und Schnitt.

Die Folie stellt die wasserdampfdichte Schicht dar, wie sie bei der Verwendung von ingenieurmäßigen Holzverbindungen auftreten würde.

In Tabelle 3.1 werden die für die beiden Grundtypen eingesetzten Bauteile entsprechend des Schichtaufbaus ausführlich beschrieben.

Tabelle 3.1: Aufbau der Probekörper

Grundtyp des Probekörpers	Bauteil	Beschreibung
0	Probenholz	Stabverleimte Massivholzplatte aus Fichtenholz 42 mm Das Probenholz wird mit einer Tischkreissäge in einer Größe von 280 x 280 mm aus dem Plattenmaterial zugeschnitten.
	Probenträger	Brettschichtholz (BSH) aus Fichtenholz 140 mm Der Probenträger wird mit einer Tischkreissäge in einer Größe von 280 x 280 mm zugeschnitten. Bei der Herstellung der Probekörper ist darauf zu achten, dass die Faserrichtung des BSH quer zur Faser des Probenholzes verläuft.
1	Probenholz	Stabverleimte Massivholzplatte aus Fichtenholz 42 mm Das Probenholz wird mit einer Tischkreissäge aus dem Plattenmaterial in einer Größe von 280 x 280 mm zugeschnitten.
	Aluminiumfolie	Reinaluminiumfolie 30 $\mu\text{m}$ Die Folie wird mit einem scharfen Messer auf ein Maß von 400 x 400 mm zugeschnitten.
	Probenträger	Brettschichtholz (BSH) aus Fichtenholz 140 mm Der Probenträger wird mit einer Tischkreissäge in einer Größe von 280 x 280 mm zugeschnitten. Bei der Herstellung der Probekörper ist darauf zu achten, dass die Faserrichtung des BSH quer zur Faser des Probenholzes verläuft.

<sup>9</sup> 1  $\mu\text{m}$  entspricht 0,001 mm bzw.  $10^{-6}$  m

Um das seitliche Austreten von Wasserdampf während des Brandversuches zu verhindern, wird die Aluminiumfolie um die Flanken des Probenholzes herumgezogen und die Eckbereiche werden mit Aluminiumklebeband versiegelt.

Für die fugenlose Verdämmung des Probekörpers zum Prüfofen sorgt ein 20 mm dicker Streifen aus Aluminiumsilikat, der das 280 x 280 mm Probenholz auf ein freies Prüffeld von 200 x 200 mm reduziert. Aus wärmetechnischen Überlegungen und zur Verhinderung von ungewollten Brandgasaustritten erhält der Probekörper an den Seiten ebenfalls eine Steinwolleverkleidung (vgl. Abbildung 3.3).

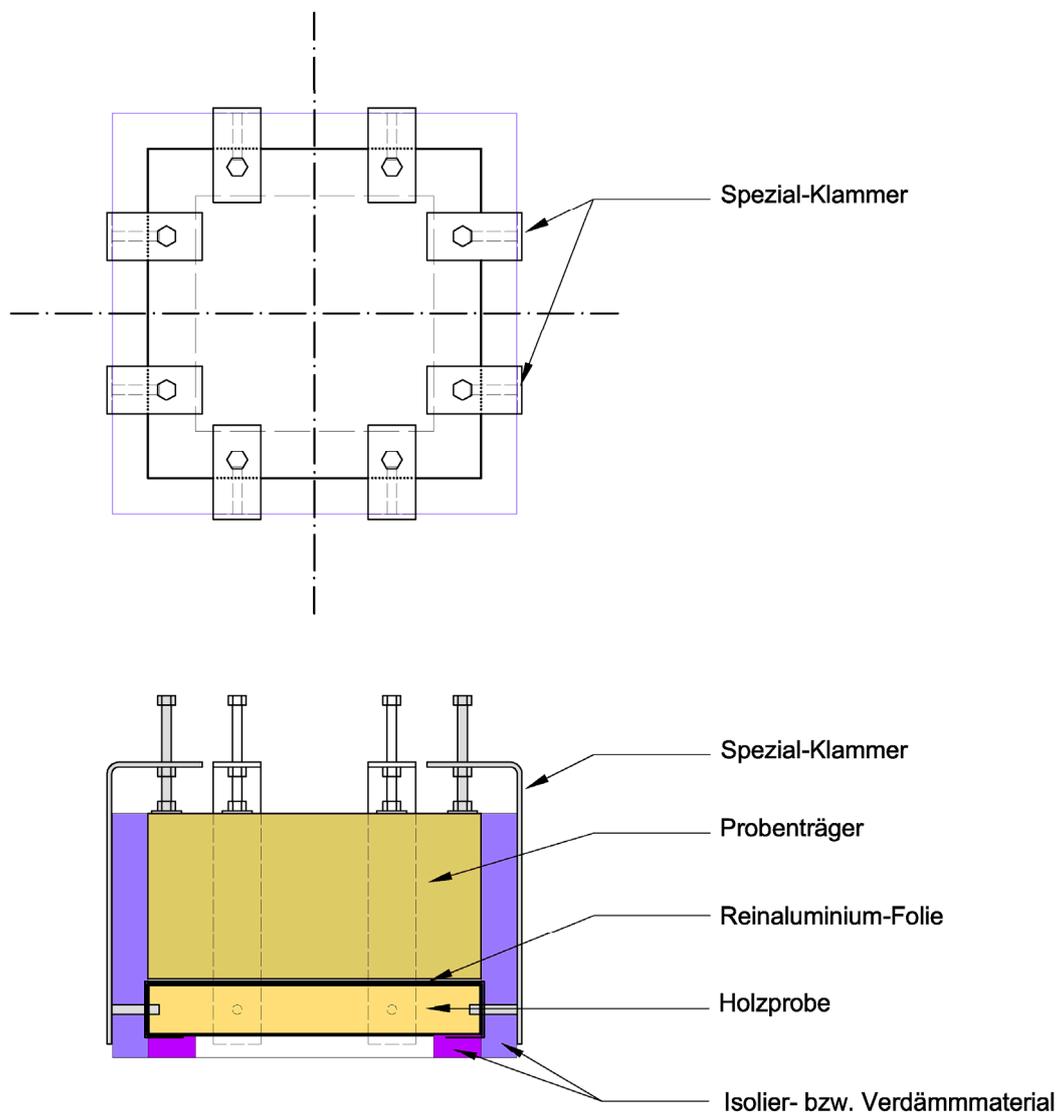


Abbildung 3.4: Anordnung der Halteklammern

Die einzelnen Bestandteile der Probekörper werden mit acht speziell gefertigten Klammern so miteinander verbunden, dass die Verbindungsmittel keinen maßgeblichen Einfluss auf den Versuchsablauf ausüben können. Die Haltestifte der Klammern greifen in 8 mm Bohrungen 10 mm tief in das Probenholz ein. Abbildung 3.4 zeigt die Anordnung der Halteklammern am Probekörper.

Detaillierte und vermaßte Skizzen der Probekörperbestandteile sind Anhang 1 zu entnehmen.

### 3.2.2 Konditionierung der Probekörper

Vor dem Zuschnitt werden das Probenholz und der Probenträger bei 20 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % in der Klimakammer ca. eine Woche vorkonditioniert.

Anschließend werden die Holzteile, die Aluminiumfolie und das Isolier- bzw. Verdämmmaterial auf Maß gebracht und mit den benötigten Bohrungen für die Endmontage versehen. Die Lagerung der einzelnen Holzbestandteile im Klimaschrank in der gewählten Klimasituation erfolgt so lange, bis der gewünschte Gleichgewichtszustand hergestellt ist. Die verschiedenen Klimasituationen, einschließlich der angestrebten Gleichgewichtsholzfeuchte sind Tabelle 3.2 zu entnehmen.

Der Gleichgewichtszustand gilt als erreicht, wenn sich die Masse des Probenholzes in einem Zeitraum von zwei Stunden um nicht mehr als 0,1 % ändert.

Tabelle 3.2: Klimasituation der Holzteile des Probeköpers

Klimasituation	Atmosphäre im Klimaschrank	Anmerkungen
T	103 °C	Darrtrockener Zustand mit einer Holzfeuchte von $u_{gl} = 0\%$
A	20 °C bei 65 % rLF <sup>10</sup>	Die Klimasituation entspricht dem Normklima bei der Prüfung von Holzbaustoffen. Die Holzfeuchte $u_{gl} \sim 12\%$ ergibt sich aus dem Gleichgewichtsfeuchtediagramm (vgl. Abbildung 2.3).
B	25 °C bei 80 % rLF	Die Holzfeuchte $u_{gl} \sim 18\%$ ergibt sich aus dem Gleichgewichtsfeuchtediagramm (vgl. Abbildung 2.3).

<sup>10</sup> rLF ... relative Luftfeuchtigkeit

Zur Bestimmung der Holzfeuchte und der Rohdichte des Probenholzes werden aus den stabverleimten Massivholzplatten drei Holzprismen mit den Abmessungen 100 x 100 x 42 mm für jede der beiden Klimasituationen A und B gefertigt. Diese werden im Klimaschrank bis zum Erreichen des Sorptionsgleichgewichtes gelagert.

Die Probekörper in Klimasituation T dienen dazu, den möglichen Einfluss der Aluminiumfolie auf das Abbrandverhalten zu erfassen.

### 3.2.3 Nomenklatur der Probekörper

Von jedem Probekörper werden drei Stück mit identischem Aufbau hergestellt, die vor dem Brandversuch in der gleichen Atmosphäre im Klimaschrank gelagert werden.

Tabelle 3.3: Nomenklatur der Probekörper

	Probekörper- Bezeichnung	Beschreibung
Ohne Aluminiumfolie	0.T.01	Probekörper 01   gelagert bei Klima T   ohne Aluminiumfolie
	0.T.02	Probekörper 02   gelagert bei Klima T   ohne Aluminiumfolie
	0.T.03	Probekörper 03   gelagert bei Klima T   ohne Aluminiumfolie
	0.A.01	Probekörper 01   gelagert bei Klima A   ohne Aluminiumfolie
	0.A.02	Probekörper 02   gelagert bei Klima A   ohne Aluminiumfolie
	0.A.03	Probekörper 03   gelagert bei Klima A   ohne Aluminiumfolie
	0.B.01	Probekörper 01   gelagert bei Klima B   ohne Aluminiumfolie
	0.B.02	Probekörper 02   gelagert bei Klima B   ohne Aluminiumfolie
	0.B.03	Probekörper 03   gelagert bei Klima B   ohne Aluminiumfolie
Mit Aluminiumfolie	1.T.01	Probekörper 01   gelagert bei Klima T   mit Aluminiumfolie
	1.T.02	Probekörper 02   gelagert bei Klima T   mit Aluminiumfolie
	1.T.03	Probekörper 03   gelagert bei Klima T   mit Aluminiumfolie
	1.A.01	Probekörper 01   gelagert bei Klima A   mit Aluminiumfolie
	1.A.02	Probekörper 02   gelagert bei Klima A   mit Aluminiumfolie
	1.A.03	Probekörper 03   gelagert bei Klima A   mit Aluminiumfolie
	1.B.01	Probekörper 01   gelagert bei Klima B   mit Aluminiumfolie
	1.B.02	Probekörper 02   gelagert bei Klima B   mit Aluminiumfolie
	1.B.03	Probekörper 03   gelagert bei Klima B   mit Aluminiumfolie

Tabelle 3.3 gibt einen Überblick über die herzustellenden Prüflinge und deren Bezeichnungen. Folglich stehen sechsmal drei Probekörper zur Verfügung, die sich hinsichtlich ihrer Konstruktion oder Holzfeuchte voneinander unterscheiden.

### 3.3 Messeinrichtungen

Entsprechend den Angaben der ÖNORM EN 1363-1 sind mindestens fünf Minuten vor Beginn der Prüfung die Anfangstemperaturen aller Temperaturmesseinrichtungen zu überprüfen und die Bezugstemperaturen aufzuzeichnen. Zudem muss die Temperatur der Ofenthermoelemente  $30 \pm 20$  °C betragen. Die Temperatur der Thermoelemente an der unbeflammten Seite des Probenholzes darf  $20 \pm 10$  °C nicht überschreiten und muss innerhalb von  $\pm 5$  °C der Umgebungstemperatur im Versuchslabor liegen (/9/).

Die Temperaturverläufe der eingesetzten NiCr-Ni Thermoelemente (Typ K) werden mit EDV-Unterstützung aufgezeichnet. Als Schnittstelle zwischen den Thermoelementen und dem Personalcomputer dient ein Multimeter der Firma *Keithley* mit der Typenbezeichnung *2700 Multimeter*.

#### 3.3.1 Überwachung der Umgebungstemperatur

Die Überwachung der Lufttemperatur im Labor erfolgt mit einem NiCr-Ni Thermoelement (Typ K) in einem horizontalen Abstand von ein bis drei Metern zum Prüfofen. Die Raumtemperatur von  $20 \pm 10$  °C darf gemäß ÖNORM EN 1363-1 während der Prüfung um nicht mehr als 5 °C sinken oder um mehr als 20 °C steigen (/9/).

Abbildung 3.5 zeigt ein typisches NiCr-Ni Thermoelement wie es bei Brandprüfungen eingesetzt wird. Die beiden Messdrähte sind mit einer Glasseidenisolierung überzogen und in ein Glasfasergeflecht gebettet. Der Durchmesser der beiden Litzen beträgt 0,50 mm.



Abbildung 3.5: Typisches NiCr-Ni Thermoelement mit Steckverbinder

### 3.3.2 Messeinrichtungen des Prüfofens

Während der gesamten Versuchsdauer wird neben der Brandkammertemperatur auch der Sauerstoffgehalt in der Brandkammer gemessen.

Zur Temperaturmessung in der Brandkammer werden je drei Thermoelemente an der linken und der rechten Brandkammerwand über Bohrungen in den Prüfofen eingebracht. Die Lage dieser Temperatur-Messstellen I bis VI am Prüfofen ist in Abbildung 3.1 ersichtlich. Die Thermoelemente ragen 35 mm frei in die Brandkammer und werden in dieser Position fixiert.

Die Messung der Sauerstoffkonzentration in der Verbrennungsraumatmosfera erfolgt mit einem Abgasanalysegerät der Type *Testo 330-2 LL* von der Firma *Testo*. Entsprechend den Angaben des Herstellers wird die Messsonde an der Position O<sub>2</sub>, wie in Abbildung 3.1 dargestellt, in den Prüfofen eingesetzt.

### 3.3.3 Messeinrichtungen am Prüfkörper

Am Prüfkörper werden die Temperatur in unterschiedlichen Tiefen und die Holzfeuchtigkeit nach dem elektrischen Widerstandsmessverfahren knapp unter der Trennebene über den gesamten Versuchsverlauf gemessen.

In das Probenholz und den Probenträger werden zwei Sätze NiCr-Ni Thermoelemente ohne Verwendung von Klebemittel in gefräste Nuten (ca. 1 x 2 mm) eingelegt. Jeder Satz besteht aus drei Thermoelementen und wird in der Diagonale eines 50 x 50 mm Rasters in einem Abstand von 50 mm zum Prüffeldrand positioniert. Zur Messung der Temperatur im Probenholz ist es notwendig, diese oberflächennahen Messpunkte durch zweimal zwei Thermoelemente zu ergänzen, die über 2 mm Bohrungen in das Probenholz eingeführt werden. Die Messung erfolgt in einer Tiefe von 14 mm und 28 mm in einem Abstand von 75 mm vom Prüffeldrand.

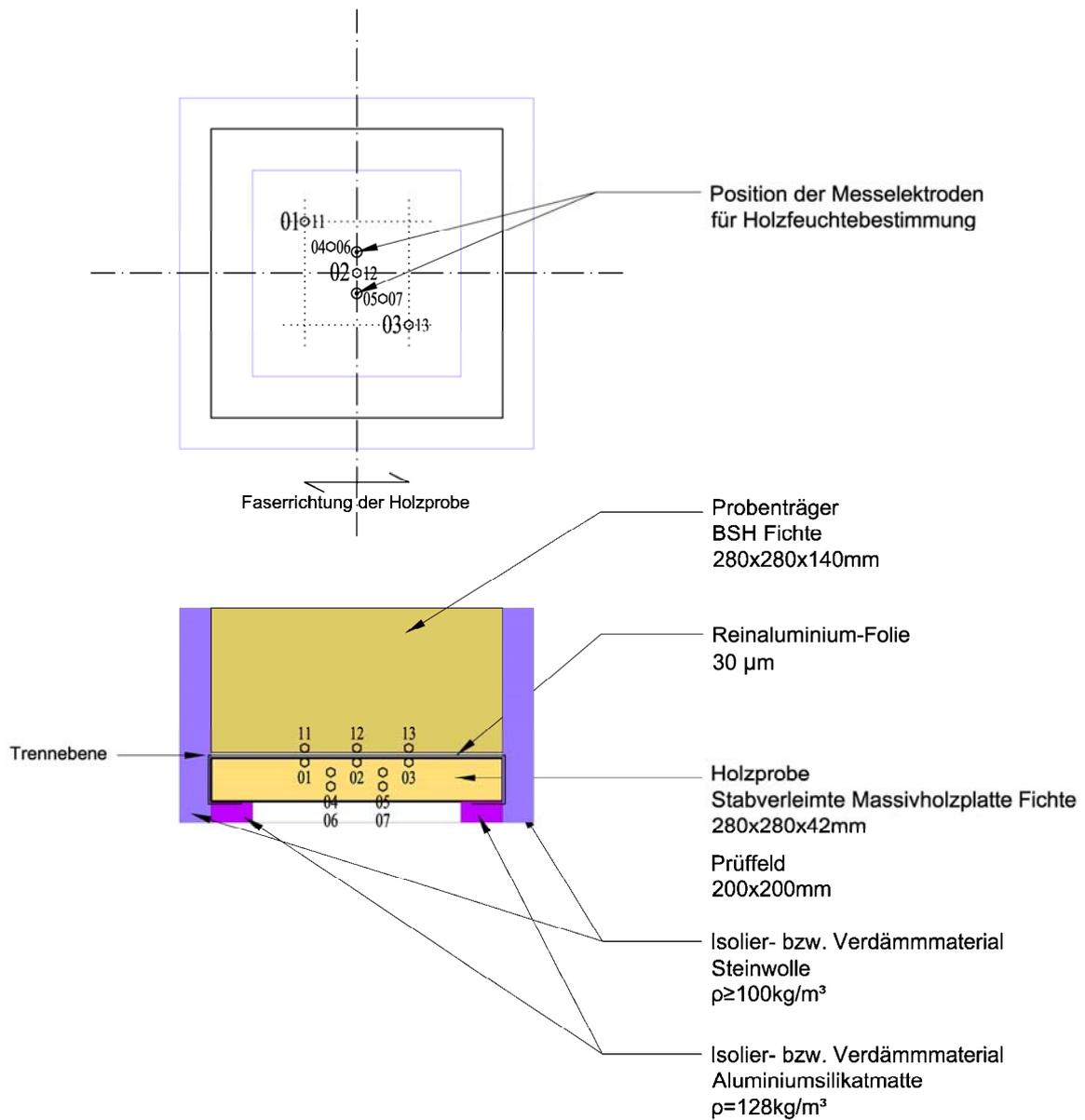
Wie Abbildung 3.6 zeigt, befinden sich die Thermoelemente 01 bis 07 im Probenholz unter dem Trennfugenhorizont und die Thermoelemente 11 bis 13 im Probenholzträger darüber.

Die Messdrähte werden hinter der Steinwolle-Verkleidung aus dem Probekörper geführt und mit dem EDV-System verbunden.

Im Zuge des Brandversuches wird die Holzfeuchtigkeit quer zum Faserverlauf mit Hilfe des Widerstandsmessverfahrens ermittelt. Zum Einsatz gelangt ein Holzfeuchtemessgerät der Firma *Bollmann* mit der Typenbezeichnung *Combo 200*.

Die beiden Einsteckelektroden werden entsprechend den Vorschriften des Herstellers in zwei gefräste Nuten (ca. 4 x 4 mm) an der unbeflammten Seite knapp unterhalb der Trennfuge eingelegt, 5 mm tief in das Probenholz eingeschlagen und mit der Messleitung und dem Messgerät verbunden. Die Position der Messelektroden am Probekörper ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

Die verwendete Holzart (Fichte) und die Temperaturkompensation im Bereich von 0 bis 100 °C sind direkt am Gerät einzustellen.



#### Temperaturmessstellen an der Probe | Position der Thermoelemente Typ K

- 01 ... 07 Temperaturmessung an der unbeflammten Seite des Probenholzes  
d.h. direkt unter der Trennebene
- 11 ... 13 Temperaturmessung an der Unterseite des Probenträgers  
d.h. direkt über der Trennebene

Abbildung 3.6: Positionierung der NiCr-Ni Thermoelemente am Probekörper

## 3.4 Messgrößen

### 3.4.1 Holzfeuchte

Die Holzfeuchte wird anhand von Holzprismen mit einer Abmessungen von 100 x 100 x 42 mm, nach dem Erreichen des Gleichgewichtszustandes, bei einer Lagerung in ausgewählten Versuchsatmosphären ermittelt (vgl. Abschnitt 3.2.2). Die Berechnung erfolgt mit der in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Gleichung.

Das Probenholz, der Probenträger und der vollständig zusammengebaute Probekörper werden vor und nach dem Brandversuch gewogen. Die Änderungen der Messwerte lassen auf den Gewichtsverlust beim Abbrand des Probenholzes und auf etwaige Schwankungen der Holzfeuchte des Probenträgers schließen. Die Änderung der Holzfeuchte des Probenholzes im Versuchsverlauf wird, wie in Abschnitt 3.3.3 beschrieben, mit einem Holzfeuchtemessgerät registriert.

Nach Abschluss des Versuches wird aus dem Probenholz das Kernstück in der Größe von 150 x 150 mm herausgeschnitten, um die im Holz verbleibende Restfeuchte nach der Darrmethode bestimmen zu können.

### 3.4.2 Rohdichte

Da die Rohdichte von Holz maßgeblich vom Feuchtegehalt abhängig ist, wird sie stets unter Angabe der Holzfeuchte angeschrieben.

In den Vorversuchen wird die Rohdichte der in den Klimaten A und B gelagerten Holzproben anhand der unter Abschnitt 3.2.2 und Abschnitt 3.4.1 angesprochenen Holzquader, nach Erreichen des Feuchtegleichgewichts ermittelt. Zusätzlich muss die Dichte an den darrtrockenen Holzprismen (Darrdichte) festgestellt werden.

Die Berechnung der Rohdichte bzw. Darrdichte erfolgt nach der in Abschnitt 2.2.2 erläuterten Beziehung.

Die Werte der Holzdicke werden wie folgt indiziert:

- [T]  $\rho_T$  daartrocken  $u=0\%$
- [A]  $\rho_A$  Klima  $20^\circ\text{C}$  | 65% rLF  $u\sim 12\%$
- [B]  $\rho_B$  Klima  $20^\circ\text{C}$  | 85% rLF  $u\sim 18\%$ .

### 3.4.3 Temperatur

Temperaturen während des Brandversuches werden mit NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und über ein EDV-System im zeitlichen Verlauf aufgezeichnet.

Gemessen werden:

- die Lufttemperatur im Brandlabor
- die Temperatur in der Brandkammer
- die Temperatur des Probekörpers in mehreren Ebenen

### 3.4.4 Sauerstoffkonzentration

Laut ÖNORM EN 1363-1 muss die Ofenatmosphäre einen Mindestsauerstoffgehalt von 4% aufweisen, wenn Probekörper ohne brennbare Anteile geprüft werden (/9/).

Da Holz zu über 95 % aus brennbaren Bestandteilen besteht, verbrennt es unter einer deutlich höheren Sauerstoffkonzentration. Der Sauerstoffgehalt in der Verbrennungsraumluft wird mit dem unter Abschnitt 3.3.2 angeführten Messgerät bestimmt.

### 3.4.5 Holzmasseverlust während des Brandversuches

Mit einer speziell konstruierten Wiegeeinrichtung kann die Abnahme der Probekörpermasse während des Brandversuches bestimmt werden. Abbildung 3.7 zeigt die einzelnen Bestandteile der Wiegeeinrichtung und deren Anordnung.

Die Konstruktion besteht aus einer Halterung, in der der Probekörper mit vier Schrauben befestigt wird, aus einer höhenjustierbaren Tragrolle in einer Tragvorrichtung und einer elektronischen Waage, auf der die Belastungsstütze lagert.

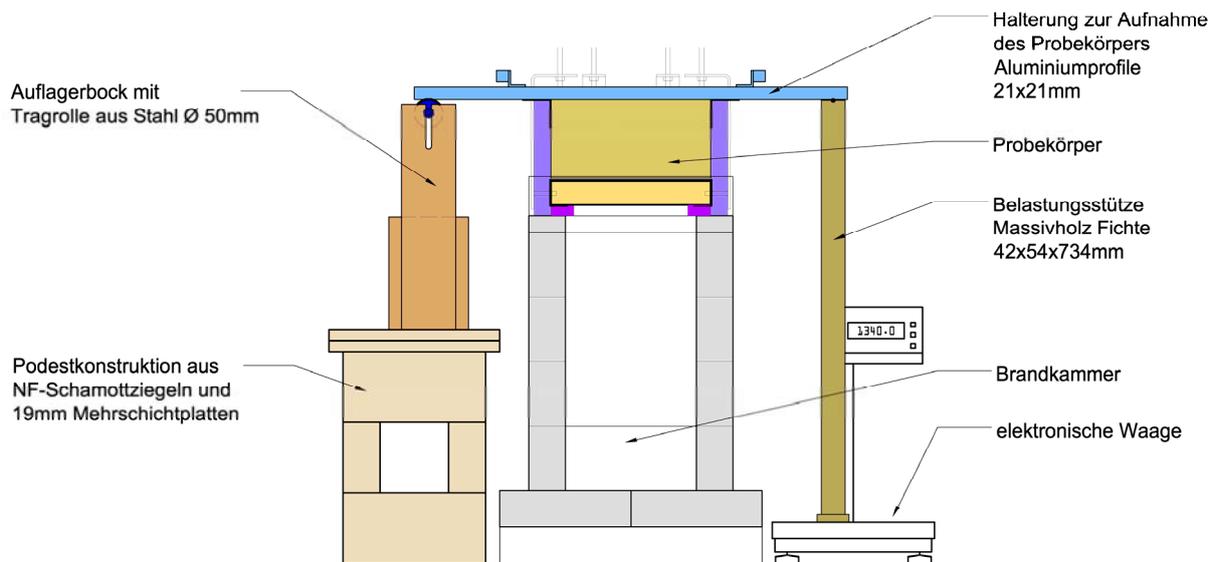


Abbildung 3.7: Bestandteile und Arrangement der Wiegeeinrichtung zur Messung des Masseverlustes

Die Waage wird vor dem Beginn des Prüfzyklus unter voller Auflast des Probekörpers auf „Null“ gestellt. Infolge der Brandbeanspruchung reduziert sich die Masse des Probekörpers durch den Verlust von Holzfeuchte und den Abbau der Holzsubstanz kontinuierlich. Der halbe<sup>11</sup> Wert dieses Masseverlustes ist an der Waage ablesbar.

<sup>11</sup> Da die Auflagersituation einem Träger auf zwei Stützen entspricht, werden die Auflagerkräfte an der Tragrolle und an der Belastungsstütze jeweils um den halben Masseverlust reduziert. Dadurch ergibt sich der gesamte Masseverlust als doppelter Anzeigewert.

### 3.4.6 Abbrandtiefe

Aus der Mitte des beflamnten Holzquerschnitts werden mit der Kreissäge zwei 50 mm breite Probenholzstreifen quer zum Faserverlauf herausgeschnitten. An neun Messpunkten, die im Raster von 5 x 5 cm angeordnet sind, wird die Dicke der verbliebenen unbeschädigten Holzschicht bestimmt und gemittelt. Die Abbrandtiefe ergibt sich aus der Differenz der Holzdicke vor dem Versuch und dem gemessenen Wert am Versuchsende.

Die Berechnung der Abbrandrate oder Abbrandgeschwindigkeit erfolgt durch Division von ermittelter Abbrandtiefe und der Zeitspanne zwischen Beginn und Ende der Brandbeanspruchung.

## 3.5 Versuchsbeanspruchung der Probekörper

Die Probekörper werden im gesamten Versuchsverlauf ausschließlich thermisch belastet.

Im Versuchszeitraum von 0 bis 30 Minuten wird die Temperatur in der Brandkammer nach der Aufheizkurve (Einheits-Temperaturzeitkurve) gemäß ÖNORM EN 1363-1, unter Einhaltung der zulässigen Abweichungen gesteigert. Dadurch ergibt sich nach 30 Minuten eine mittlere Brandraumtemperatur von 842 °C (/9/).

Die kontinuierliche Kontrolle der Brandkammertemperatur ist dabei von besonderer Bedeutung.

## 3.6 Brandversuchsprotokoll

Um eine strukturierte Aufzeichnung der Messergebnisse während des Versuchsablaufs zu gewährleisten, werden alle Werte in eigens dafür angefertigten Brandversuchsprotokollen festgehalten. Sämtliche Protokolle befinden sich in Anhang 2.

### 3.7 Darstellung der Messergebnisse

Nachstehend sind alle, für die Darstellung der Messergebnisse relevanten Messgrößen aufgelistet.

Messgröße	Variable	Einheit	Darstellung	Anmerkung
Abmessungen der Probe	$a \times b \times h$	[mm]	Tabelle	
Rohdichte	$\rho_O, \rho_A, \rho_B$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Tabelle	
Holzfeuchte vor dem Versuch	$u_A, u_B$	[%]	Tabelle	
Holzfeuchte während des Brandversuches	$u_x$	[%]	Tabelle, u - t Diagramm	x...Type und Nummer des Probekörpers
Holzfeuchte nach dem Versuch	$u_A, u_B$	[%]	Tabelle	
Temperatur im Prüflabor	$T_{Lab.}$	[°C]	T-t Diagramm	
Temperatur in der Brandkammer	$T_1 \dots T_{VI}$	[°C]	T-t Diagramm	Errechnen der mittleren Brandkammertemperatur
Temperatur an der Probe	$T_{01} \dots T_{13}$	[°C]	T-t Diagramm	
Sauerstoffkonzentration	$O_2$	[%]	$O_2$ - t Diagramm	
Abbrandtiefe	$d_{char}$	[mm]	Tabelle, Trend	→ Errechnen der Abbrandgeschwindigkeit
Abbrandgeschwindigkeit	$\beta$	[mm/min]	Tabelle, Trend	
Verlust der Holzmasse	$\Delta m$	[g/10 min]	Tabelle, Diagramm	
Zeit Versuchsbeginn	$t_A$	[hh:mm]	Tabelle	
Zeit Versuchsende	$t_E$	[hh:mm]	Tabelle	

## 4 Versuchsvorbereitung

Im Rahmen der Versuchsvorbereitung werden die Probekörper hergestellt und Vorversuche im Hinblick auf die geplanten Versuchsreihen durchgeführt.

### 4.1 Herstellung der Probekörper

Die einzelnen Probekörper unterscheiden sich durch den Einbau einer Sperrschicht aus Reinaluminiumfolie zwischen Probenholz und Probenträger und durch ihre klimatische Konditionierung.

#### 4.1.1 Bestandteile der Probekörper

Alle Bestandteile der Probekörper werden entsprechend der Beschreibung in Abschnitt 3.2.1 konfektioniert. Die Versuchsobjekte erhalten Bohrungen zur Aufnahme der Haltestifte der Spezial-Klammern sowie Bohrungen und Fräsungen zur Einbringung der Thermoelemente und der Messelektroden für die Holzfeuchtebestimmung.

Zu den Hauptbestandteilen eines Probekörpers zählen das Probenholz, der Probenträger und die wasserdampfdichte Sperrschicht (vgl. Abbildung 4.1). Nachfolgend werden diese Elemente näher erläutert.

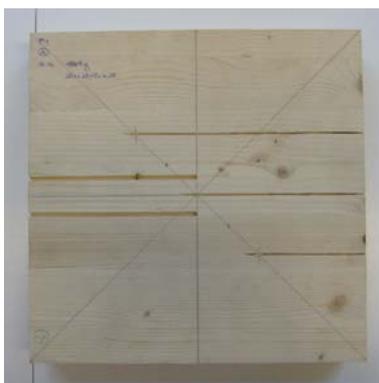
Beim Probenholz (Vorholz) handelt es sich um eine 42 mm dicke stabverleimte Fichtenholzplatte üblicher Bauholzqualität (Güteklasse AB) mit glatter, gehobelter Oberfläche (vgl. Abbildung 4.1(a)). Aus dem Plattenmaterial werden 28,0 x 28,0 cm große Prüflinge zugeschnitten. Für die Aufnahme der Messeinrichtungen sind fünf längliche Vertiefungen an der Probenholzoberfläche und vier Bohrungen parallel zur Oberfläche erforderlich. Abbildung 4.1(a) zeigt links im Bild die beiden Rillen (4,5 mm tief und 4,0 mm breit), in die die Holzfeuchtemesselektroden ( $\varnothing$  3,5 mm) eingelegt werden. Da die Messung der Holzfeuchte quer zur Faser erfolgt, müssen die Rillen entlang der Holzfaser verlaufen. Die

Thermoelemente 01 bis 03, die der Temperaturmessung knapp unter der Sperrschicht dienen, werden in die drei länglichen Kerben (1 x 2 mm) im Vorholz eingebracht (vgl. Abbildung 4.1(a) rechts). Für die Herstellung der unterschiedlichen Rillen werden eine Oberfräse mit einem 4 mm Nutfräskopf und ein Winkelschleifer mit einer 1 mm Edelstahltrennscheibe verwendet. Um jeglichen Kontakt mit der Aluminiumfolie oder den anderen Thermoelementen auszuschließen, ist es notwendig, die Messspitzen der Thermoelemente am Ende der Kerben in drei Millimeter tiefen Bohrungen ( $\varnothing$  1,5 mm) zu versenken.

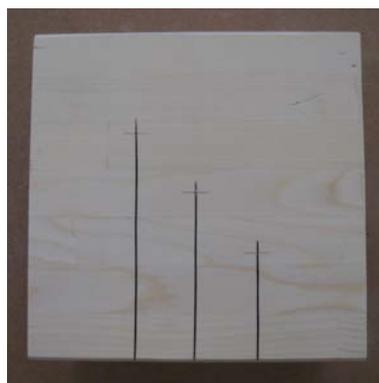
Über vier weitere Bohrungen ( $\varnothing$  2 mm) an zwei gegenüberliegenden Stirnseiten des Vorholzes erfolgt die Messung der Temperatur im Probenholz. Die Bohrlöcher werden ausgehend von der beflaminten Seite in einem Abstand von 14 mm und 28 mm waagrecht in das Probenholz getrieben. Ihre exakte Position kann der vermaßten Skizze in Anhang 1 entnommen werden. Die Befestigung der Halteklammern macht zwei zusätzliche 10 mm tiefe Bohrungen ( $\varnothing$  8 mm) an jeder Probenholzstirnseite erforderlich (vgl. Skizze „Aufbau des Probekörpers“ in Anhang 1).

Der Probenträger (Rückholz) ist ein Fichten-Brettschichtholz mit einer Stärke von 14 cm und wird entsprechend dem Probenholz auf 28 x 28 cm zugeschnitten.

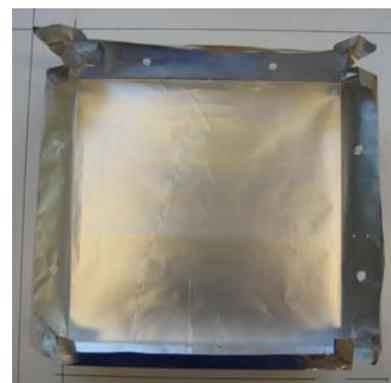
Für die oberflächennahe Temperaturmessung müssen drei parallele Vertiefungen vorhanden sein. Ihre Positionierung und Herstellung erfolgt analog zu der des Probenholzes.



(a) Probenholz



(b) Probenträger



(c) Sperrschicht

Abbildung 4.1: Hauptbestandteile der Probekörper

Als wasserdampfdichte Sperrschicht zwischen dem Probenholz und dem Probenträger dient eine Reinaluminiumfolie mit einer Stärke von 30 µm (vgl. Abbildung 4.1(c)). 45,0 x 45,0 cm große Blätter werden zunächst grob zugeschnitten.

Die Anpassung des Verdämm- und Isoliermaterials wird entsprechend den angegebenen Abmessungen in Anhang 1, mit einem scharfen Messer vorgenommen.

Für die Temperaturmessung werden 150 Stück Thermoelemente vorbereitet. Die Länge des zugeschnittenen NiCr-Ni Messdrahtes mit einem Drahtdurchmesser von 0,50 mm je Litze beträgt 1,25 m. An beiden Enden wird die Glasfaser-Isolierung vorsichtig entfernt um die Litzen freizulegen. Während an einem Ende die Montage des 2-poligen Steckverbinders erfolgt, werden am anderen Ende die beiden Drähte sorgfältig miteinander verdrillt. Eine ca. 10 mm lange Messspitze entsteht. Abbildung 3.5 zeigt ein fertiges Thermoelement. Damit Verbindungsfehler mit den Messleitungen des Multimeters vermieden werden, ist es notwendig alle eingesetzten Thermoelemente eindeutig zu beschriften.

Zudem müssen aufgrund der mehrmaligen Verwendung der Thermoelemente beschädigte Drahtabschnitte entfernt und die Messspitzen vor jedem Versuch erneuert werden.

#### 4.1.2 Fertigung der Probekörper

Der Zusammenbau der Probekörper erfolgt nach einem genau festgelegten Fertigungsschema unmittelbar vor jedem Brandversuch.

Dazu werden alle Thermoelemente in die dafür vorgesehenen Nuten und Bohrungen eingebracht, wodurch sich zehn Temperaturmessstellen je Probekörper ergeben. Entspricht der Probekörper dem Grundtyp 1 (vgl. Tabelle 3.1 in Abschnitt 3.2.1), wird eine Aluminiumfolie in die Trennebene zwischen Vor- und Rückholz eingelegt. In diesem Fall ist bei den Thermoelementen 01 bis 07 auf eine vorsichtige Durchdringung der Sperrschicht des Probenholzes zu achten. Eventuell entstandene Fehlstellen werden mit Aluminium-Klebeband sorgfältig verschlossen. Um den unkontrollierten Austritt von Feuchtigkeit zu vermeiden, wird die Alufolie über die Flanken gezogen (vgl. Abbildung 4.2(a)) und mit einem scharfen

Messer der umlaufende Überstand auf 20 mm gekürzt. Die Versiegelung aller offenen Stellen erfolgt mit Aluminium-Klebeband.

Besonderes behutsam ist der Einbau der beiden Elektroden zur Holzfeuchtemessung vorzunehmen. Die Elektroden werden vor der endgültigen Montage in die dafür vorgesehenen Führungsnuten gelegt und leicht in das Holz eingedrückt ohne es zu spalten.

Die Platzierung des Probenholzes und des Probenträgers erfolgt in der Form, dass sich die Thermoelemente 01 bis 03 des Probenholzes mit den Thermoelementen 11 bis 13 des Probenträgers decken.

Im nächsten Schritt wird die Steinwolle-Dämmung an den Flanken des Probekörpers befestigt, indem die Haltebolzen der Spezial-Klammern (vgl. Abbildung 4.2(a) und (b)) durch die Steinwolle geführt werden und in die dafür vorgesehenen Bohrungen des Probenholzes eingreifen. Durch das Anziehen der Schrauben an den Klammern werden Vor- und Rückholz aufeinander gepresst und die Verdämmung in Position gehalten. Besonderes Augenmerk ist auf die Messdrähte zu legen. Sie führen zwischen dem Holz und der Steinwolle aus dem Probekörper und dürfen nicht beschädigt werden. Abschließend erfolgt die Montage der Messelektroden durch 5,0 mm tiefes Einschlagen in das Probenholz und die Anbringung der 40 mm breiten Verdämmung aus Aluminiumsilikatmatten (vgl. Abbildung 4.2(c)).



(a) Unterseite des Probekörpers



(b) Probekörper



(c) Verdämmung des Probekörpers

Abbildung 4.2: Fertigung des Probekörpers

Abbildung 4.2(b) und (c) zeigen einen endmontierten Probekörper kurz vor dem Brandversuch.

## 4.2 Vorbereitung der Prüfeinrichtungen

### 4.2.1 Prüfofen

Der im Brandlabor vorhandene Prüfofen muss aufgrund von Abnutzungserscheinungen vollständig zerlegt und entsprechend der unter Abschnitt 3.1.2 beschriebenen Konstruktion neu aufgebaut werden. Der Aufbau des Ofens geht auf Vorarbeiten, die im Zuge von verschiedenen Diplomarbeiten und Dissertationen durchgeführt wurden, zurück. Abbildung 4.3 zeigt den neu aufgebauten Prüfofen samt Brenner im Brandlabor, der für die dieser Diplomarbeit zugrunde liegenden Versuchsserien verwendet wird.

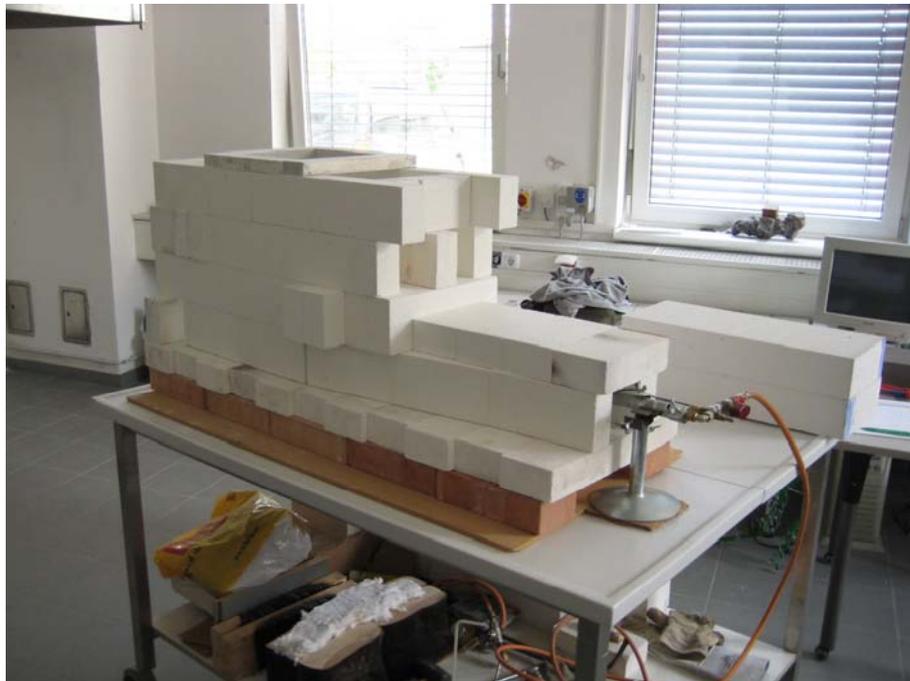


Abbildung 4.3: Prüfofen samt Propangas-Brenner

### 4.2.2 Messeinrichtungen

#### Temperaturmessung

Die Temperaturen im Labor, in der Brandkammer und am Probekörper werden mit Thermoelementen des Typs K (NiCr-Ni) gemessen. Die automatische Aufzeichnung der

Messwerte erfolgt über ein EDV-System (vgl. Abbildung 4.4). Als Schnittstelle zwischen dem Personalcomputer und den Thermoelementen kommt ein Digitalmultimeter der *Fa. Keithley* zum Einsatz (vgl. Abschnitt 3.3).

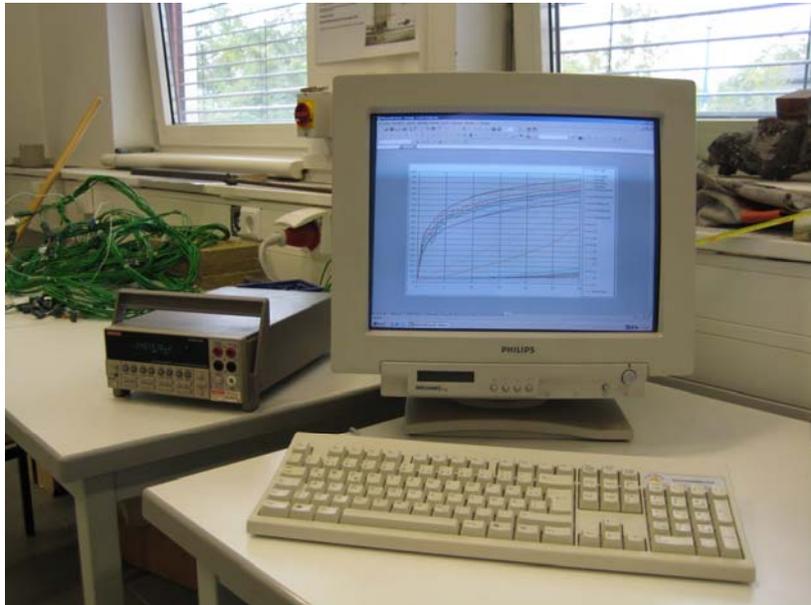


Abbildung 4.4: Temperaturmesseinrichtung

### Sauerstoffmessung

Die Sauerstoffkonzentration in der Brandkammer wird mit einem Abgasanalysegeräte (vgl. Abbildung 4.5) der *Fa. Testo* gemessen. Neben dem O<sub>2</sub>-Gehalt der Verbrennungsluft können zusätzlich der Gehalt an Kohlendioxid, Kohlenmonoxid und Stickoxiden automatisch bestimmt und die Luftüberschusszahl  $\lambda^{12}$ , die ein Maß für die Vollständigkeit der Verbrennung darstellt, ermittelt werden.

Nach einer eingangs durchgeführten Nullmessung erfolgen alle weiteren Messungen in Abständen von jeweils zehn Minuten über die gesamte Versuchsdauer.

---

<sup>12</sup> Bei einer Luftüberschusszahl von  $\lambda = 1,0$  ist die stöchiometrische Verbrennungsgleichung genau erfüllt, d.h. alle Moleküle des Brennstoffes oxidieren vollständig mit dem Luftsauerstoff. Vollständige Verbrennungen laufen daher mit einer Luftüberschusszahl von  $\lambda \geq 1,0$  ab. Für Holzfeuerungen wird ein Werte von  $\lambda = 1,7$  angestrebt, da in diesem Bereich die Kohlenmonoxidkonzentration ein Minimum erreicht (S. 26 /32/).



Abbildung 4.5: Messung des Sauerstoffgehalts

### Holzfeuchtemessung

Die Veränderung der Holzfeuchtigkeit während des Brandversuches wird mit einem Holzfeuchtemessgerät der *Fa. Bollmann* festgehalten (vgl. Abschnitt 3.3.3). Um den Einfluss der sich ändernden Holztemperatur zu berücksichtigen, muss diese entsprechend kompensiert werden. Die Kompensationstemperatur ergibt sich aus dem Mittelwert der Thermoelemente 01 bis 03, die sich direkt unterhalb der Trennebene befinden. Vor jeder Ablesung werden die Werte händisch, direkt am Messgerät eingegeben. Abbildung 4.6(a) zeigt das verwendete Holzfeuchtemessgerät und Abbildung 4.6(b) die Position der beiden Messsonden am Probekörper.



(a) Holzfeuchtemessgerät



(b) Position der Messsonden am Probekörper

Abbildung 4.6: Holzfeuchtemessung

### Messung des Masseverlustes während des Brandversuches

Um den Masseverlust während des Brandversuches bestimmen zu können, wird der Probekörper mit einer Haltevorrichtung aus Aluminiumprofilen verschraubt und zweiseitig gelagert. Der schematische Aufbau der Messvorrichtung und die Durchführung der Messung sind in Abschnitt 3.4.5 angeführt. Abbildung 4.7 zeigt die Messvorrichtung am Brandofen, wie sie bei ersten Funktionstests mit einem Prüfgewicht, verwendet wurde.

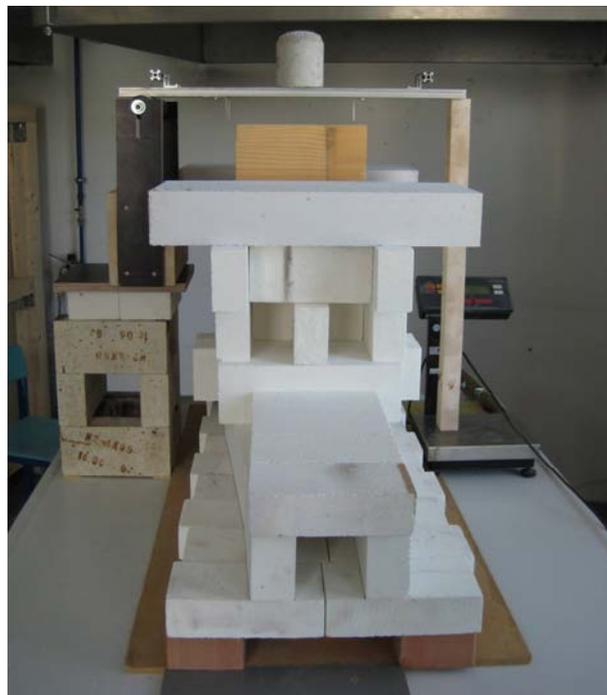


Abbildung 4.7: Messvorrichtung zur Ermittlung des Masseverlustes

## 4.3 Vorversuche

Anhand der Vorversuche sollen die Annahmen der Versuchsplanung (vgl. Kapitel 3) auf ihre Plausibilität und Durchführbarkeit untersucht und grundlegende Kennwerte des verwendeten Probenholzes ermittelt werden.

### 4.3.1 Bestimmung der Holzfeuchte

Die Holzquader zur Holzfeuchtebestimmung werden, wie in Abschnitt 3.2.2 und Abschnitt 3.4.1 beschrieben, bis zum Erreichen des Feuchtegleichgewichts im Klimaschrank bei entsprechender Temperatur und Luftfeuchte gelagert, um anschließend die Bestimmung des Feuchtgewichts mit Hilfe einer Präzisionswaage durchführen zu können. Zur Ermittlung der Darrmasse werden die Holzquader im Darrschrank bei 103 °C bis zum Erreichen ihrer Massekonstanz gelagert und erneut gewogen. In Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 sind die Ergebnisse der Holzfeuchtebestimmung zusammengefasst. Die Anmerkung in der letzten Spalte der beiden Tabellen soll darauf hinweisen, aus welcher Massivholzplatte (P1 bis P3) der Holzquader entnommen wurde.

Die Ergebnisse und Auswertungen der Holzfeuchteermittlung für die Klimasituation A (20 °C bei 65 % rLF) sind in Tabelle 4.1 übersichtlich dargestellt. Der Mittelwert der Holzfeuchte liegt bei 9,82 % und somit 2,18 % unter dem in Tabelle 3.2 angestrebten Gleichgewichtsfeuchtegehalt von 12 % (vgl. Abschnitt 3.2.2).

Tabelle 4.1: Bestimmung der Holzfeuchte an Holzquadern für Klima A

Nr.	Masse Klima A	Masse darrtrocknen	Holzfeuchte Klima A	Anmerkung
	[g]	[g]	[%]	
1	193,71	175,82	10,18	Probe aus Platte 1
2	201,07	182,96	9,90	Probe aus Platte 1
3	196,78	178,64	10,15	Probe aus Platte 1
4	196,27	178,90	9,71	Probe aus Platte 2
5	204,75	186,73	9,65	Probe aus Platte 2
6	163,11	149,13	9,37	Probe aus Platte 2
7	181,20	165,35	9,59	Probe aus Platte 3
8	196,49	178,60	10,02	Probe aus Platte 3
9	180,97	164,81	9,81	Probe aus Platte 3

In Tabelle 4.2 sind die Ergebnisse der Holzfeuchtebestimmung für Klima B (20 °C bei 85 % rLF) zusammengefasst. Der Durchschnittswert der Holzfeuchte liegt hier bei 17,98 % und stimmt mit der Annahme nach dem Sorptionsgleichgewichtsdiagramm von 18 % (vgl. Tabelle 3.2 in Abschnitt 3.2.2) sehr gut überein.

Tabelle 4.2: Bestimmung der Holzfeuchte an Holzquadern für Klima B

Nr.	Masse Klima B	Masse darrtrocknen	Holzfeuchte Klima B	Anmerkung
	[g]	[g]	[%]	
1	185,29	156,24	18,59	Probe aus Platte 1
2	198,49	168,80	17,59	Probe aus Platte 1
3	190,17	160,76	18,29	Probe aus Platte 1
4	213,99	181,36	17,99	Probe aus Platte 2
5	192,70	162,87	18,32	Probe aus Platte 2
6	209,14	177,90	17,56	Probe aus Platte 2
7	180,86	152,79	18,37	Probe aus Platte 3
8	215,18	183,44	17,30	Probe aus Platte 3
9	212,34	180,19	17,84	Probe aus Platte 3

Da Holz ein inhomogener Baustoff ist, sind auftretende Schwankungen in den Feuchtegehalten der einzelnen Holzquader normal. Die Schwankungsbreite der Werte in Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 beträgt bis zu 1 %.

#### 4.3.2 Bestimmung von Rohdichte und Darrdichte

Zur Bestimmung der Rohdichte und Darrdichte werden die zuvor für die Holzfeuchtebestimmung verwendeten Holzquader herangezogen und nach Erreichen ihrer Massekonstanz mit einer Schiebelehre vermessen. Die für die Berechnung erforderlichen Werte der Prüfkörpermasse werden Tabelle 4.1 und Tabelle 4.2 entnommen.

Tabelle 4.3 und Tabelle 4.4 veranschaulichen die Ergebnisse der Roh- und Darrdichtebestimmung der Holzquader die in Klima A gelagert wurden. Bei einer mittleren Holzfeuchte von 9,82 % ergibt sich der Mittelwert der Rohdichte zu  $0,449 \text{ g/cm}^3$ . Die mittlere Darrdichte beträgt  $0,428 \text{ g/cm}^3$ .

Tabelle 4.3: Bestimmung der Rohdichte  $\rho_A$  an Holzquadern für Klima A

Nr.	Abmessungen Klima A			Volumen Klima A	Masse Klima A	Rohdichte Klima A	Anmerkung
	[cm]						
1	9,98	10,03	4,22	422,42	193,71	0,459	Probe aus Platte 1
2	10,02	10,04	4,22	424,54	201,07	0,474	Probe aus Platte 1
3	10,03	10,04	4,23	425,97	196,78	0,462	Probe aus Platte 1
4	9,98	10,05	4,23	424,26	196,27	0,463	Probe aus Platte 2
5	9,96	10,04	4,24	423,99	204,75	0,483	Probe aus Platte 2
6	9,99	10,04	4,25	426,27	163,11	0,383	Probe aus Platte 2
7	9,99	10,03	4,24	424,85	181,20	0,427	Probe aus Platte 3
8	10,00	10,01	4,23	423,42	196,49	0,464	Probe aus Platte 3
9	9,99	10,00	4,24	423,58	180,97	0,427	Probe aus Platte 3

Tabelle 4.4: Bestimmung der Darrdichte  $\rho_0$  an Holzquadern für Klima A

Nr.	Abmessungen darrtrocken			Volumen darrtrocken [cm <sup>3</sup> ]	Masse darrtrocknen [g]	Darrdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Anmerkung
	[cm]						
1	9,98	9,84	4,12	404,60	175,82	0,435	Probe aus Platte 1
2	10,01	9,82	4,14	406,95	182,96	0,450	Probe aus Platte 1
3	10,02	9,76	4,12	402,92	178,64	0,443	Probe aus Platte 1
4	9,97	9,79	4,13	403,11	178,90	0,444	Probe aus Platte 2
5	9,94	9,77	4,13	401,08	186,73	0,466	Probe aus Platte 2
6	9,97	9,85	4,14	406,57	149,13	0,367	Probe aus Platte 2
7	9,99	9,82	4,17	409,08	165,35	0,404	Probe aus Platte 3
8	9,99	9,82	4,17	409,08	178,60	0,437	Probe aus Platte 3
9	9,98	9,74	4,17	405,35	164,81	0,407	Probe aus Platte 3

Die Ergebnisse der Dichtebestimmung für die Holzquader der Klimasituation B sind Tabelle 4.5 und Tabelle 4.6 zu entnehmen. Der Durchschnittswert der Rohdichte bei 17,98 % Holzfeuchte ergibt 0,456 g/cm<sup>3</sup>. Die mittlere Darrdichte beträgt 0,418 g/cm<sup>3</sup>.

Tabelle 4.5: Bestimmung der Rohdichte  $\rho_B$  an Holzquadern für Klima B

Nr.	Abmessungen Klima B			Volumen Klima B [cm <sup>3</sup> ]	Masse Klima B [g]	Rohdichte Klima B [g/cm <sup>3</sup> ]	Anmerkung
	[cm]						
1	10,01	10,26	4,30	441,62	185,29	0,420	Probe aus Platte 1
2	10,01	10,28	4,26	438,37	198,49	0,453	Probe aus Platte 1
3	9,98	10,20	4,27	434,67	190,17	0,438	Probe aus Platte 1
4	10,00	10,28	4,29	441,01	213,99	0,485	Probe aus Platte 2
5	10,01	10,26	4,29	440,59	192,70	0,437	Probe aus Platte 2
6	9,99	10,18	4,27	434,25	209,14	0,482	Probe aus Platte 2
7	10,02	10,22	4,28	438,29	180,86	0,413	Probe aus Platte 3
8	10,02	10,18	4,28	436,58	215,18	0,493	Probe aus Platte 3
9	10,01	10,27	4,29	441,02	212,34	0,481	Probe aus Platte 3

Tabelle 4.6: Bestimmung der Darrdichte  $\rho_0$  an Holzquadern für Klima B

Nr.	Abmessungen darrtrocken			Volumen darrtrocken [cm <sup>3</sup> ]	Masse darrtrocknen [g]	Darrdichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Anmerkung
	[cm]						
1	9,99	9,82	4,12	404,18	156,24	0,387	Probe aus Platte 1
2	10,00	9,81	4,14	406,13	168,80	0,416	Probe aus Platte 1
3	9,97	9,83	4,13	404,76	160,76	0,397	Probe aus Platte 1
4	9,99	9,80	4,13	404,34	181,36	0,449	Probe aus Platte 2
5	9,99	9,86	4,14	407,80	162,87	0,399	Probe aus Platte 2
6	9,96	9,84	4,11	402,81	177,90	0,442	Probe aus Platte 2
7	10,00	9,88	4,10	405,08	152,79	0,377	Probe aus Platte 3
8	10,00	9,88	4,09	404,09	183,44	0,454	Probe aus Platte 3
9	10,00	9,81	4,15	407,12	180,19	0,443	Probe aus Platte 3

Da die Versuchskörper aus stabverleimten Massivholzplatten gefertigt sind, ergeben sich - bedingt durch die Astigkeit und vor allem durch die unterschiedlichen Jahresringabstände der Einzelstäbe - Abweichungen von bis zu 8 % um den Mittelwert der Dichte.

Abbildung 4.8 und Abbildung 4.9 zeigen die Holzquader die zur Bestimmung des Holzfeuchtegehalts und der Dichte verwendet wurden.



Abbildung 4.8: Holzquader zur Bestimmung von Holzfeuchte und Dichte für Klima A



Abbildung 4.9: Holzquader zur Bestimmung von Holzfeuchte und Dichte für Klima B

### 4.3.3 Brandversuch Nr. 0 (Vorversuch)

Brandversuch Nr. 0 (Vorversuch) dient dazu, die in der Versuchsplanung (vgl. Abschnitt 3) festgelegten Parameter auf ihre Plausibilität und Durchführbarkeit zu prüfen und erste Handfertigkeiten für die weitere Versuchsdurchführung zu erlangen.

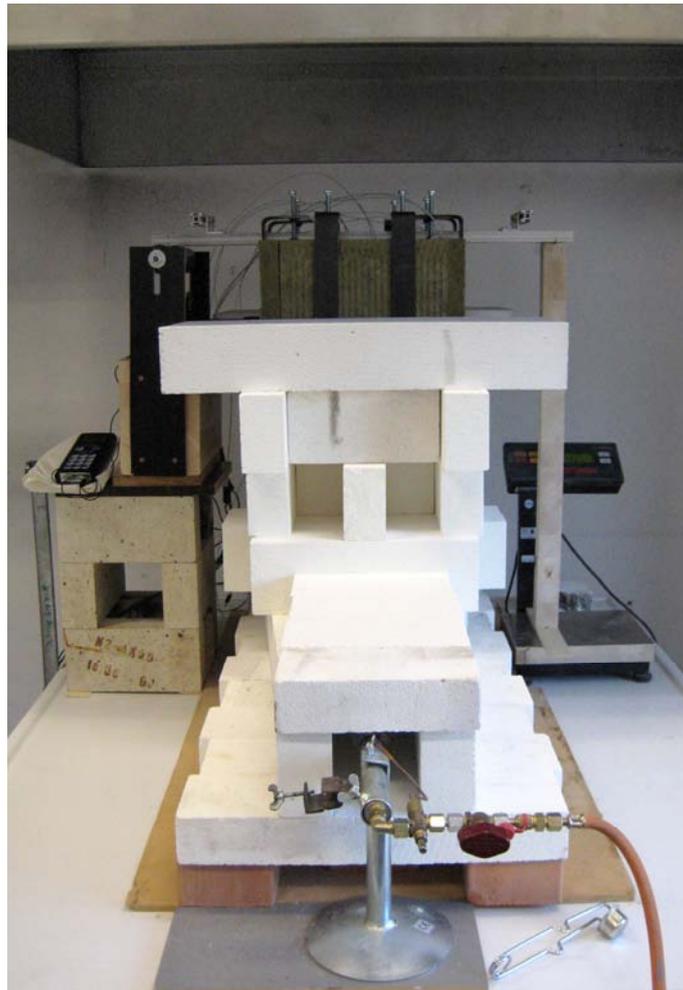


Abbildung 4.10: Versuchsanordnung für Probekörper 1.A.00 (P1)

#### 4.3.3.1 Probekörper 1.A.00 (P1)

Entsprechend den Vorschriften von Abschnitt 3.2.3 werden das Probenholz und der Probenträger für Probekörper 1.A.00 (P1) bei Klima A (20 °C bei 65 % rLF) bis zum Erreichen des Sorptionsgleichgewichts gelagert. Beim Zusammenbau wird eine Aluminium-

folie als wasserdampfdichte Sperrschicht in die Trennebene des Probekörpers eingelegt.

Die in Klammern angeführte Zusatzinformation bezeichnet die Plattennummer (P1 bis P3), aus der das Probenholz gefertigt wurde. Dadurch können die zuvor ermittelten Werte für Holzdicke und Rohdicke dem Prüfkörper zugeordnet werden.

#### 4.3.3.2 Versuchsdurchführung

Der Probekörper wird auf dem Prüfofen platziert und an die Messeinrichtungen zur Temperaturmessung und Holzfeuchtebestimmung angeschlossen (vgl. Abbildung 4.10). Um die einwandfreie Funktion der applizierten Thermoelemente zu gewährleisten, werden die Temperaturmesseinrichtungen vor dem Brandversuch in einem 10-minütigen Testlauf überprüft.

Alle relevanten Daten der Versuchsdurchführung werden in einem zweiseitigen Brandversuchsprotokoll (vgl. Abbildung 4.11 und Abbildung 4.12) festgehalten. Die Werte der automatisierten Temperaturlaufzeichnung sind davon ausgenommen.

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 0**

Datum: 18.06.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. J. Wolfgruber

<b>Probekörper:</b>
<b>1.A.00</b> (P1)

Versuchsbeginn:	18:32 h	Temperatur im Labor:	26,0 °C
Versuchsende:	19:02 h	Temperatur im Labor:	26,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	12057,0 g
	Masse nach dem Versuch	(wegen Zuschnitt nicht gemessen) g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	4265,0 g
	Masse nach dem Versuch	4271,0 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1507,0 g
	Masse nach dem Versuch	(Zuschnitt auf 15x15cm) 325,5 g
	Masse darrtrocken	(Zuschnitt auf 15x15cm) 310,6 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		9,82 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
10,4	10,3	10,1	10,6	23,1	24,5	22,6
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		4,80 %				

**Massekontrolle Probekörper**

Masse vor dem Versuch		12057,0 g				
Masseverlust nach t Minuten in [g]						
0	5	10	15	20	25	30
0	230	1010	1340	1860	2780	2870

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,9 %				
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
20,9	12,3	6,9	6,2	6,1	6,0	5,9

**Abbrandtiefe**

Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	27,2 mm				
--	---------	--	--	--	--

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	27	26	26	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	27	26	27	
	28	29	29	

**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs****ad Masse**

Der Zuschnitt des Probenholzes nach dem Brandversuch dauert etwa 3 Minuten. In diesem Zeitraum schreiten der Abbau von Holzsubstanz und die Verdunstung der Verbliebenen Restfeuchte weiter voran. Die Werte werden verfälscht!

**ad Massekontrolle:**

Die ermittelten Werte der Massekontrolle sind nicht plausibel. Bei Berechnung des Masseverlustes für 30 Minuten Brandeinwirkung auf das Prüffeld (20 x 20 cm) unter Annahme der genormten Abbrandbrandrate von 0,65 mm/min ergibt sich lediglich ein Verlust rund 300g.

Abbildung 4.12: Brandversuchsprotokoll Nr.: 0 (Vorversuch) – Seite 2

Die Dauer der Brandeinwirkung wird mit 30 Minuten gewählt, damit nach Abschluss der Befuerung die verbleibende Restfeuchte nachgewiesen werden kann. Abbildung 4.13 zeigt die Temperaturverläufe für Probekörper 1.A.00 (P1) bei 30-minütiger Brandbeanspruchung.

Anhand der Temperaturprofile von Thermoelement 06 und 07 sind die Haltepunkte bei 100 °C, an denen das im Probenholz gebundene Wasser verdampft, eindeutig zu erkennen.

Auffällig erscheint zudem die Ausbildung von zwei Temperaturplateaus der Thermoelemente 06 und 07, die im Bereich zwischen 350 und 400°C liegen.

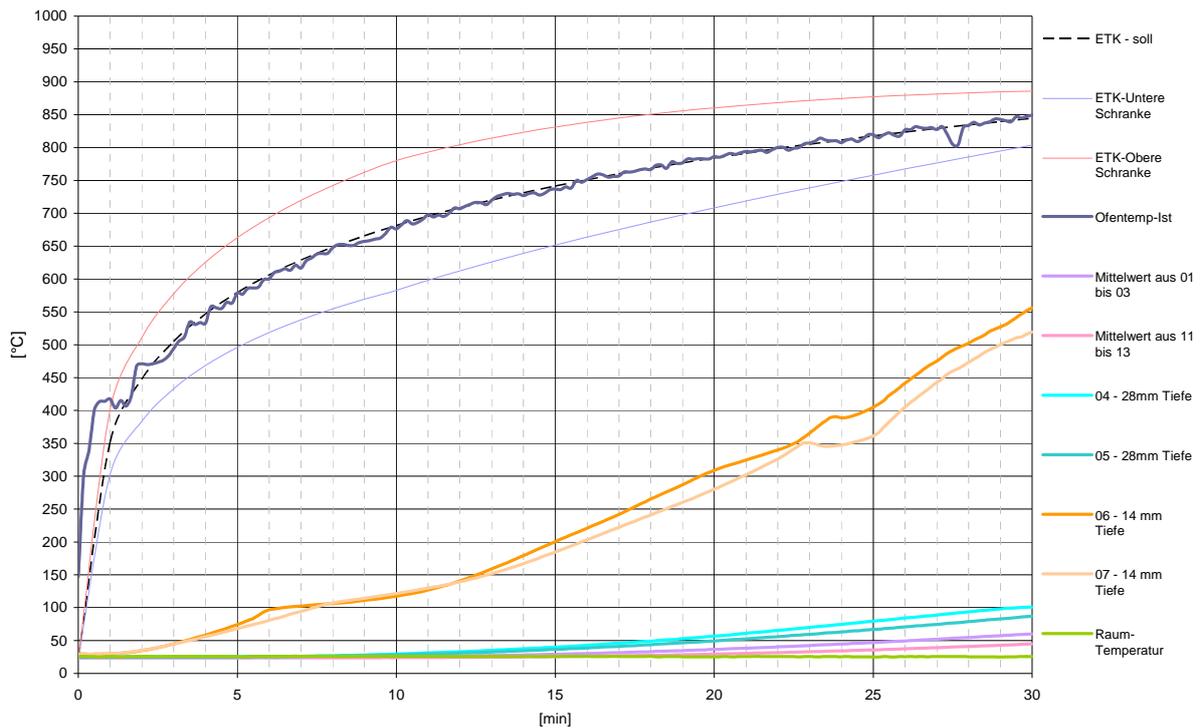


Abbildung 4.13: Temperaturverlauf von Brandversuch Nr.: 0 (Vorversuch)

Abbildung 4.14 stellt den Blick auf den brennenden Probekörper im Zuge einer Sichtkontrolle durch die geöffnete Sichtluke während des Brandversuches dar. Als Reaktion auf die Öffnung des Sichtfensters fällt die Temperatur in der Brandkammer in der 27-igsten Minute kurzfristig ab (vgl. Abbildung 4.13).

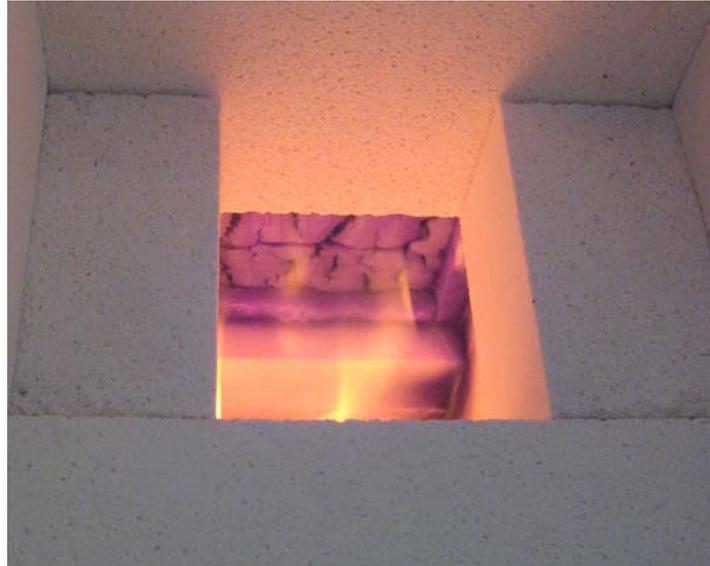
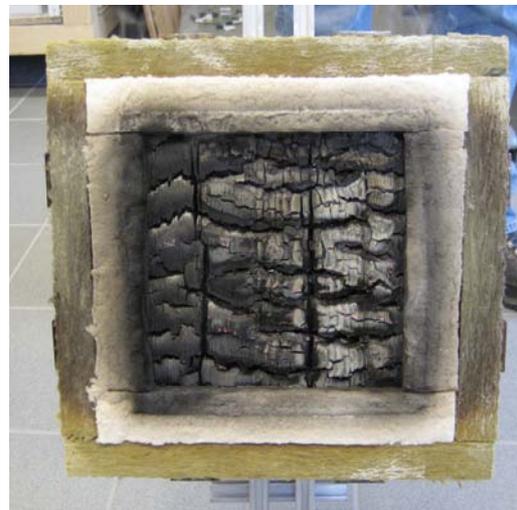


Abbildung 4.14: Blick in die Brandkammer während des Brandversuches

In Abbildung 4.15 ist das charakteristische Rissbild nach dem Abbrand von Probekörper 1.A.00 (P1) zu sehen. Beim Vergleich der Aufnahmen zeigt sich, dass die beiden breiten Längsrisse entlang zweier Leimfugen entstanden sind.



(a) Probenholz vor dem Brandversuch



(b) Probeholz nach dem Brandversuch

Abbildung 4.15: Probenholz 1.A.00 vor und nach dem Brandversuch

Tabelle 4.7 können neben den bereits im Versuchprotokoll angeführten Sauerstoffkonzentrationen, weitere Messwerte, wie der Anteil an Kohlendioxid, Kohlenmonoxid, Stickoxiden und die Luftüberschusszahl  $\lambda$ , entnommen werden.

Tabelle 4.7: Analyse der Brandkammeratmosphäre

1.A.00 (P1)								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	$\lambda$	CO <sub>unv</sub> <sup>13</sup>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
18.06.2008 18:32	20,8	-	-	-	-	-	-	0,0
18.06.2008 18:37	12,3	8,41	62	43	2,41	104	10,1	4,1
18.06.2008 18:42	6,9	Werte nicht gespeichert						
18.06.2008 18:47	6,6	13,92	193	222	1,46	324	79,7	53,3
18.06.2008 18:52	6,2	14,31	43	51	1,42	72	71,3	49
18.06.2008 18:57	6,1	14,4	23	27	1,41	38	67,2	46,5
18.06.2008 19:02	5,9	14,5	9	11	1,4	15	72,6	50,6

Abbildung 4.16 zeigt den zur Bestimmung der Abbrandtiefe aufgeschnittenen abgebrannten Kern des Probenholzquerschnittes.

An neun Messpunkten im Raster von 5 x 5 cm wird die Stärke des verbleibenden gesunden Restholzes gemessen. Die Ergebniswerte werden in das Messprotokoll eingetragen und gemittelt. Für den Probekörper 1.A.00 ergibt sich bei einer Brandeinwirkungsdauer von 30 Minuten eine verbleibende mittlere Holzstärke von 27,2 mm, eine Abbrandtiefe von 14,8 mm und eine Abbrandgeschwindigkeit von 0,49 mm/min.

<sup>13</sup> CO<sub>unv</sub> bezeichnet den Kohlenmonoxidgehalt der Abgase bei einer Luftüberschusszahl  $\lambda$  von 1.

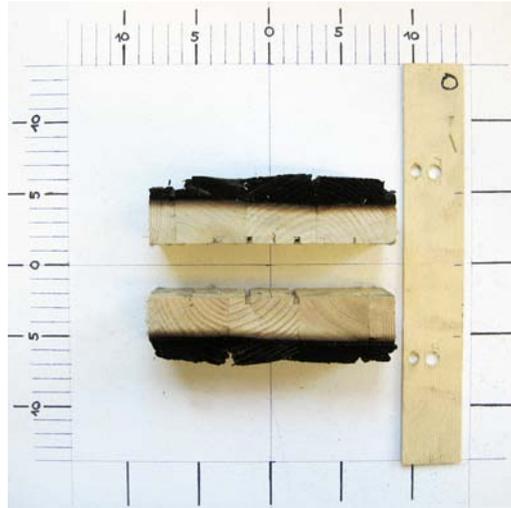


Abbildung 4.16: Kernquerschnitt des Probekörpers

#### 4.3.3.3 Erkenntnisse aus dem Brandversuch

Aufgrund der Erkenntnisse, die im Rahmen der Versuchsdurchführung gewonnen wurden, sind folgende Punkte der Versuchsplanung zu ändern:

1. Bestimmung der verbleibenden Holzfeuchte nach dem Abbrand (vgl. Abschnitt 3.4.1)

In der Versuchsplanung wurde festgelegt, dass die verbleibende Holzfeuchte nach dem Abbrand an einem 15 x 15 cm großen Kernstück des Probenholzes zu bestimmen ist. Da der Zeitbedarf für die Demontage, den Zuschnitt und die Wiegung des Probenholzes etwa 3 bis 4 Minuten beträgt und der Abbau der Holzsubstanz sowie der Verlust an Feuchtigkeit in diesem Zeitraum weiter fortschreiten, werden die Ergebnisse im hohen Maß verzerrt. Der Masseverlust des Probenholzes liegt in dieser Zeitspanne bei etwa 3,5 bis 5 g/min.

Bei allen weiteren Brandversuchen wird von der Entnahme des Kernes abgesehen und die Holzfeuchte vom gesamten Probenholz bestimmt. Die dadurch ermittelten Feuchtwerte sind folglich in Relation zu allen ausstehenden Versuchen zu sehen. Um den fortschreitenden Abbau der Holzsubstanz zu stoppen, wird das Probenholz sofort nach dem Wiegen mit Wasser vorsichtig abgelöscht.

## 2. Holzmasseverlust während des Brandversuches (vgl. Abschnitt 3.4.5)

Im Verlauf des Brandversuches ist sehr schnell zu erkennen, dass die Messwerte der Massekontrolle nicht plausibel sind. Bei einer 30-minütigen Brandbeanspruchung ergibt die Berechnung des Verlustes mit einer genormten Abbrandrate von 0,65 mm/min, bezogen auf die Fläche des Prüffeldes von 20 x 20 cm, einen Masseabbau von etwa 300 g. Der mit Hilfe der Wiegeeinrichtung ermittelte Masseverlust, der am Ende der Brandbeanspruchung vorliegt, ist mit 2870 g annähernd zehnmal so hoch als der zuvor berechnete Wert. Vor allem der bei der Brandeinwirkung entstehende Ofendruck entlastet den Probekörper und führt zu einer Erhöhung der Anzeige. Die Steifigkeit des Verdämmmaterials, die inhomogene Masseverteilung im Probekörper und die Verlagerung des Masseschwerpunkts bei ungleichmäßigem Abbrand nehmen ebenfalls Einfluss auf die Anzeigewerte.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wird die Messung des Masseverlustes während des Brandverlaufes bei den folgenden Versuchen ausgesetzt.

## 5 Brandversuche und Interpretation

### 5.1 Versuchsprogramm

Entsprechend den Festlegungen in der Versuchsplanung (vgl. Abschnitt 3) und den Erkenntnissen aus dem Vorversuch (vgl. Abschnitt 4.3), wird das Abbrandverhalten von Holz an insgesamt 22 Probekörpern untersucht.

Zusätzlich zu den 18 Probekörpern für die 30-minütigen Brandversuche (vgl. Tabelle 3.3 in Abschnitt 3.2.3) werden je zwei Probekörper für Klima A und Klima B mit einer 60-minütigen Brandbelastung nach ETK geprüft. Aufgrund der längeren Brandeinwirkung erreicht die Temperatur bei diesen Probenhölzern an der feuerabgewandten Seite über 100 °C. Durch das längere Verweilen der Messkurve auf dem 100 °C – Temperaturniveau sollen weitere Erkenntnisse über den Einfluss der Wasserdampfspererschicht gewonnen werden.

Das Prüfprogramm zu den Brandversuchen ist in den Tabellen 5.1, 5.2 und 5.3 enthalten. In der zweiten Spalte der jeweiligen Tabelle ist die Bezeichnung der Massivholzplatte (P1 bis P3) enthalten, aus der das Probenholz gefertigt wurde. Dadurch ist es möglich, den Probenhölzern die in den Vorversuchen ermittelten Werte der Holzfeuchte und Rohdichte zuzuordnen. Die letzten Spalte weist die Nummer des zugehörigen Brandversuchsprotokolls aus.

Tabelle 5.1: Probekörperserie T

<b>Probekörperserie T: daartrocken</b>			
Anzahl der Probekörper: 6			
Probekörper- Bezeichnung		Dauer der Brandeinwirkung	Brandversuchsprotokoll- Nr.
0.T.01	P3	30 min	9
0.T.02	P2	30 min	19
0.T.03	P1	30 min	21
1.T.01	P2	30 min	6
1.T.02	P3	30 min	20
1.T.03	P1	30 min	22

Neben den Temperaturverläufen und Fotoaufnahmen des Probenholzes sind die Protokolle chronologisch in Anhang 2 aufgelistet.

Tabelle 5.2: Probekörperserie A

<b>Probekörperserie A: 20 °C bei 65 % rLF</b>			
Anzahl der Probekörper: 8			
Probekörper- Bezeichnung		Dauer der Brandeinwirkung	Brandversuchsprotokoll- Nr.
0.A.01	P1	30 min	4
0.A.02	P2	30 min	7
0.A.03	P3	30 min	8
0.A.04	P1	60 min	16
1.A.01	P1	30 min	3
1.A.02	P2	30 min	5
1.A.03	P3	30 min	10
1.A.04	P2	60 min	15

Tabelle 5.3: Probekörperserie B

<b>Probekörperserie B: 20 °C bei 85 % rLF</b>			
Anzahl der Probekörper: 8			
Probekörper- Bezeichnung		Dauer der Brandeinwirkung	Brandversuchsprotokoll- Nr.
0.B.01	P1	30 min	2
0.B.02	P2	30 min	13
0.B.03	P3	30 min	12
0.B.04	P2	60 min	17
1.B.01	P1	30 min	1
1.B.02	P2	30 min	14
1.B.03	P3	30 min	11
1.B.04	P3	60 min	18

Detaillierte Erklärungen zur Nomenklatur der Probekörper finden sich in Tabelle 3.3 (vgl. Abschnitt 3.2.3).

## 5.2 Durchführung und Auswertung der Brandversuche

Stellvertretend für die 22 Brandprüfungen wird anhand von Probekörper 1.A.02 (P2) der Versuchsablauf beschrieben. Die Durchführung der verbleibenden 21 Versuche erfolgt nach denselben Vorgaben. In den einzelnen Brandversuchsprotokollen werden die Ergebnisse und Messwerte der jeweiligen Versuche festgehalten. Sie sind mit den dazugehörigen Temperaturprofilen in Anhang 2 enthalten.

Der Probekörper 1.A.02 (P2) stammt aus der Versuchsserie A (20 °C bei 65 % rLF) und ist mit einer wasserdampfdichten Sperrschicht (Aluminiumfolie) versehen. Die im Vorversuch gemessene mittlere Rohdichte des Probenholzes beträgt 0,449 g/cm<sup>3</sup> bei 9,82 % Holzfeuchte (vgl. Abschnitt 4.3).

Die Einzelteile werden gemäß den Angaben in Abschnitt 4.1 gewogen und anschließend zum Probekörper zusammengebaut. Vor der Positionierung auf dem Prüfofen und dem Anschluss der zugehörigen Messeinrichtungen ist die Gesamtmasse des Probekörpers zu bestimmen.

Der Beginn des 30-minütigen Brandversuches wird mit der Entzündung des Propan- gasbrenners eingeleitet. Während in den ersten Minuten ein steiler Anstieg der Temperatur in der Brandkammer erkennbar ist, flacht die Kurve ab der fünften Minute langsam ab. Mit einer zweiminütigen Verzögerung nehmen die Messwerte der Thermoelemente 06 und 07, die 14 mm hinter der brandbelasteten Probenholzoberfläche liegen, zu. In Minute sieben beginnt sich in 28 mm Tiefe die Temperatur der Thermoelement 04 und 05 zu erhöhen. Schließlich folgen ab Minute fünfzehn die oberflächlichen Thermoelemente 01 bis 03 und 11 bis 13 (vgl. Abbildung 5.1).

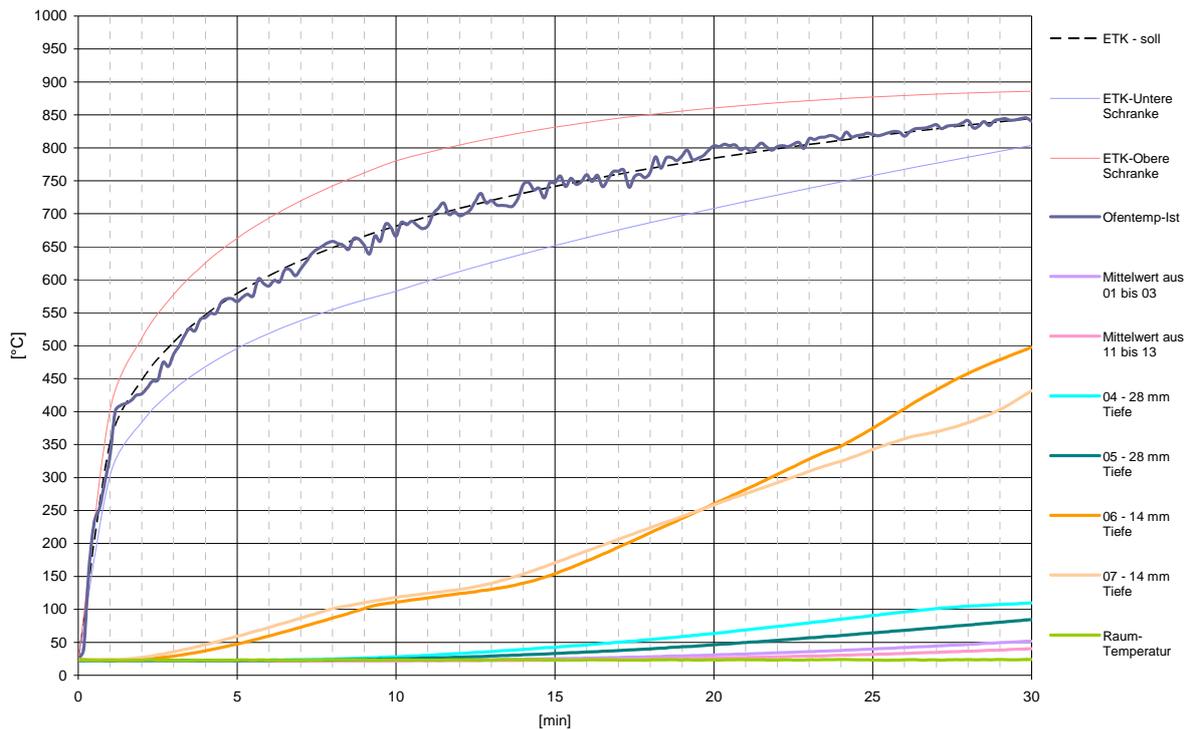


Abbildung 5.1: Temperaturverlauf von Probekörper 1.A.02 in Brandversuch Nr. 5

Sobald ein Probenholzthermoelement 100 °C erreicht, verringert sich der weitere Anstieg der Temperaturmesswerte. Zu diesem Zeitpunkt wird die Wärmeenergie für die Verdampfung des im Probenholz gebundenen Wassers benötigt. Die Folge ist eine kurzfristige Verzögerung der weiteren Wärmeaufnahme. Dieser Effekt lässt sich sehr gut anhand der Thermoelemente 06 und 07 in Abbildung 5.1 nachvollziehen.

Mit der beginnenden 26. Minute flacht der Temperaturverlauf von Thermoelement 07 im Bereich von 350 bis 400 °C erneut kurz ab.

Während des Brandversuches wird der Holzfeuchtegehalt des Probenholzes nach dem elektrischen Widerstandsmessverfahren bestimmt. Die Messungen werden in den ersten fünfzehn Minuten in fünfminütigem Abstand und danach alle 2,5 Minuten durchgeführt. Die Kompensation der Holztemperatur erfolgt kurz vor jeder Messung direkt am Messgerät durch Eingabe des Temperaturmittels von Thermoelemente 01 bis 03.

Der für den Probekörper 1.A.02 ermittelte Holzfeuchteverlauf wird in Abbildung 5.2 dargestellt. Wie erwartet, bleibt der Feuchtegehalt in der Anfangsphase des Versuches konstant auf seinem Startwert von ca. 11 %. Ab der zwanzigsten Minute ist ein steiler Anstieg der Kurve bis zum Erreichen seines Maximums von 23,9 % zu beobachten.

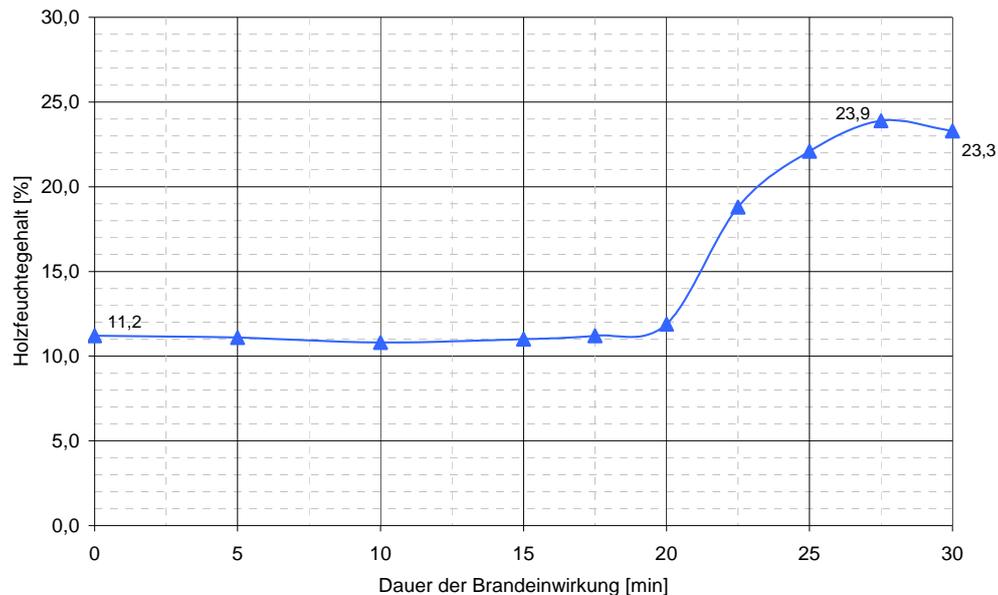


Abbildung 5.2: Änderung der Holzfeuchte von Probekörper 1.A.02 im Verlauf des Brandversuches

Nach der 30-minütigen Brandeinwirkung gemäß Einheits-Temperaturkurve (ETK), gilt der Brandversuch als abgeschlossen. Der Probekörper wird vom Prüfofen genommen, gewogen und sofort in seine Einzelteile zerlegt, um die verbleibende Restmasse des Probenholzes und die Masse des Probenträgers bestimmen zu können. Der fortschreitende Abbau der Holzsubstanz des noch glühenden Probenholzes wird durch vorsichtiges Ablöschen mit Wasser gestoppt. Abbildung 5.3(a) und (b) zeigen das Probenholz vor und nach der Brandeinwirkung.



Abbildung 5.3: Probenholz 1.A.02 vor (a) und nach (b) dem Brandversuch

Nach dem Darrtrocknen des Probenholzes werden die Restfeuchte und die Stärke des verbliebenen, gesunden Restholzes ermittelt. Die Messung der Restholzdicke erfolgt an neun Messpunkten des aufgeschnittenen Probenholzkerns im Raster von 5 x 5 cm (vgl. Abbildung 5.4). Im Vergleich zum ursprünglich 42 mm starken Probenholz ergibt sich aus der mittleren verbliebenen Holzdicke eine Abbrandtiefe von 15,2 mm. Daraus lässt sich für die 30-minütige Brandbeanspruchung eine Abbrandgeschwindigkeit von 0,51 mm/min errechnen.



Abbildung 5.4: Rissbild (a) und Abbrandtiefe (b) von Probekörper 1.A.02

Abbildung 5.5 zeigt die dem Probenholz zugewandte Seite der Sperrschicht kurz nach der Demontage des Probekörpers. Es ist ersichtlich, dass das Wasser versucht bei einer Temperaturerhöhung den Probenholzquerschnitt dampfförmig zu verlassen und sich an der Wasserdampfsperre zu stauen beginnt. Aufgrund des Temperaturunterschiedes von Wasserdampf und Aluminiumfolie kommt es zur Kondensation. Es wäre auch denkbar, dass die in der Luft gebundene Feuchtigkeit aufgrund von Druckunterschieden in Bereich der Aluminiumfolie ausfällt.

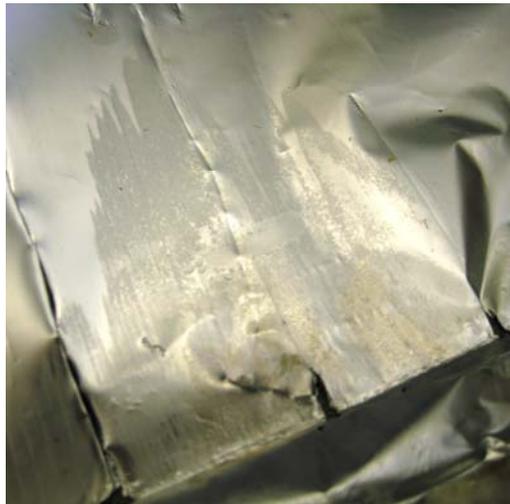


Abbildung 5.5: Kondensierte Holzfeuchte an der wasserdampfdichten Sperrschicht

Die Messung der Sauerstoffkonzentration in der Brandkammer erfolgt in zehnmünütigen Abständen. Eine halbe Minute vor der eigentlichen Ablesung des Wertes wird die Messsonde im Prüfofen platziert und der Messvorgang gestartet. Die Ergebnisse der Abgasanalyse sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst.

Tabelle 5.4: Messwerte der Abgasanalyse von Brandversuch Nr. 5

<b>1.A.02 (P2)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	$\lambda$	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
30.06.2008 11:34	20,7	-	-	0	-	-	-	0
30.06.2008 11:46	9,7	10,92	123	111	1,86	206	79,6	41,8
30.06.2008 11:56	7,5	13,05	11	12	1,56	19	74	46,4
30.06.2008 12:06	7,9	12,66	2	2	1,6	3	72,8	44,3

Abbildung 5.6 und Abbildung 5.7 zeigen das zweiseitige Brandversuchsprotokoll, in dem alle relevanten Daten des Brandversuches enthalten sind.

### BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 5

Datum: 30.06.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. J. Wolfsgruber

<b>Probekörper:</b>
<b>1.A.02</b> (P2)

Versuchsbeginn:	11:36 h	Temperatur:	22,0 °C
Versuchsende:	12:06 h	Temperatur:	24,0 °C

#### Masse

Probekörper	Masse vor dem Versuch	11025,5 g
	Masse nach dem Versuch	10818,4 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	4576,8 g
	Masse nach dem Versuch	4578,8 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1501,8 g
	Masse nach dem Versuch	1278,5 g
	Masse daartrocken	1174,9 g

#### Holzfeuchte

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		9,82 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
11,2	11,1	10,8	11	11,9	22,1	23,3
		11,2		18,8		23,9
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		8,82 %				

Abbildung 5.6: Brandversuchsprotokoll Nr.: 5 – Seite 1

Die Berechnung des Masseverlustes von Prüfobjekt 1.A.02 (P2) ergibt für den gesamten Probekörper 207,1 g und für das Probenholz 223,3 g. Der Unterschied von 16,2 g erklärt sich

aus der Verwendung von zwei unterschiedlichen Waagen und den Ungenauigkeiten bei der Messung (die Masse des Probenholz wurde mit einer Präzisionslaborwaage ermittelt) sowie der Abgabe der im Verdämmmaterial gebundenen Feuchtigkeit über den Versuchsverlauf.

#### Temperaturverlauf

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

#### Sauerstoffkonzentration im Brandraum

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch	20,7 %		
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]			
0	10	20	30
20,7	9,7	7,5	7,9

#### Abbrandtiefe

Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	26,8 mm
--	---------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	27	27	28	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	27	27	27	
	26	26	26	

#### Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs

##### ad Holzfeuchte

Die im Probenholz verbliebene Holzfeuchte kondensiert am kalten Fliesenboden.

## 5.3 Zusammenstellung und Interpretation der Versuchsergebnisse

Für die Ergebnisinterpretation werden die Messdaten aus den 22 Brandversuchen zusammengefasst und in folgender Reihenfolge diskutiert:

- Änderung des Holzfeuchtegehalts
- Masseverlust und verbleibende Restfeuchte
- Temperaturverlauf
- Sauerstoffkonzentration der Brandkammeratmosphäre
- Abbrandtiefe und Abbrandrate

### 5.3.1 Änderung des Holzfeuchtegehalts

Die Bestimmung des Feuchtegehalts erfolgt nach dem elektrischen Widerstandsmessverfahren. Dabei wird die Holztemperatur unmittelbar vor jeder Messung direkt am Gerät kompensiert. Die Messergebnisse aus den Brandversuchen der drei Versuchsserien sind in Abbildung 5.8, Abbildung 5.9 und Abbildung 5.10 dargestellt.

Die Messung der Holzfeuchte für die darrtrockenen Probekörper der Serie T startet bei Anfangswerten von ca. 5 %, obwohl in diesem Zustand kein Wasser im Holz vorhanden ist<sup>14</sup>. Da die Messungen jedoch im Bereich der Chemisorption (vgl. Abschnitt 2.2.1.1) stattfinden, sind sie starken Schwankungen und Fehlereinflüssen unterworfen. Die in Abbildung 5.8 dargestellten Werte sind daher nicht als absolut anzusehen. Sie geben nur die relative Änderung der Holzfeuchte während des Brandversuches wieder.

---

<sup>14</sup> Laut Herstellerangaben sind mit dem eingesetzten Gerät Messungen ab 4,0 % Holzfeuchte möglich.

In der Anfangsphase der Brandversuche sind kaum Änderungen der Holzfeuchtwerte zu erkennen. Die Messkurven der Probekörperserien T und A verlaufen im ersten Drittel der Versuchsdauer annähernd konstant. Bei den Probekörpern der Serie B ist ein Anstieg der Werte ab der zwanzigsten Minute zu beobachten.

Im Zuge des Brandverlaufs wandert die sich hinter der Pyrolysezone bildende Feuchtefront in Richtung der wasserdampfdichten Sperrschicht. Sie erhöht sukzessive die Holzfeuchtigkeit in den dem Brand abgekehrten Bereichen. Sobald der Wasserdampf die Trennebene des Probekörpers erreicht, kondensiert er an der Unterseite der Aluminiumfolie bzw. des Probenträgers und führt zu einer lokalen Erhöhung des Wassergehalts. Die teilweise großen Schwankungen der Holzfeuchtwerte sind vor allem auf die ungleichmäßige Feuchtekonzentration im Messfeld zurückzuführen. Zudem scheinen auch Undichtheiten der Aluminiumfolie an den Flanken des Probekörpers Einfluss auf die Werte zu nehmen.

Tendenziell ist in allen drei Versuchsreihen ein Anstieg der Holzfeuchtigkeit über den Zeitverlauf der Brandversuche zu beobachten. Aufgrund der weiten Streuung der Messwerte kann der Feuchtezuwachs zahlenmäßig jedoch nicht eindeutig quantifiziert werden.

In Abbildung 5.8, Abbildung 5.9, Abbildung 5.10 und Abbildung 5.11 sind die Messwerte der Holzfeuchtigkeit der Probekörper ohne Sperrschicht mit einem Quadrat ■ und die Werte der Prüflinge mit Sperrschicht mit einem Dreieck ▲ markiert.

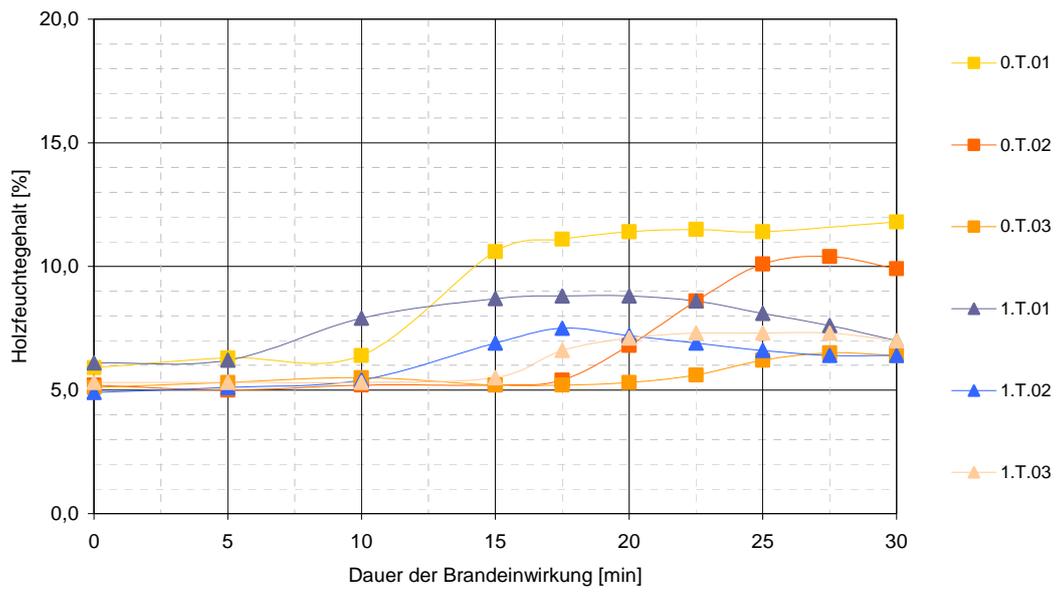


Abbildung 5.8: Holzfeuchtegehalt der Probekörperserie T

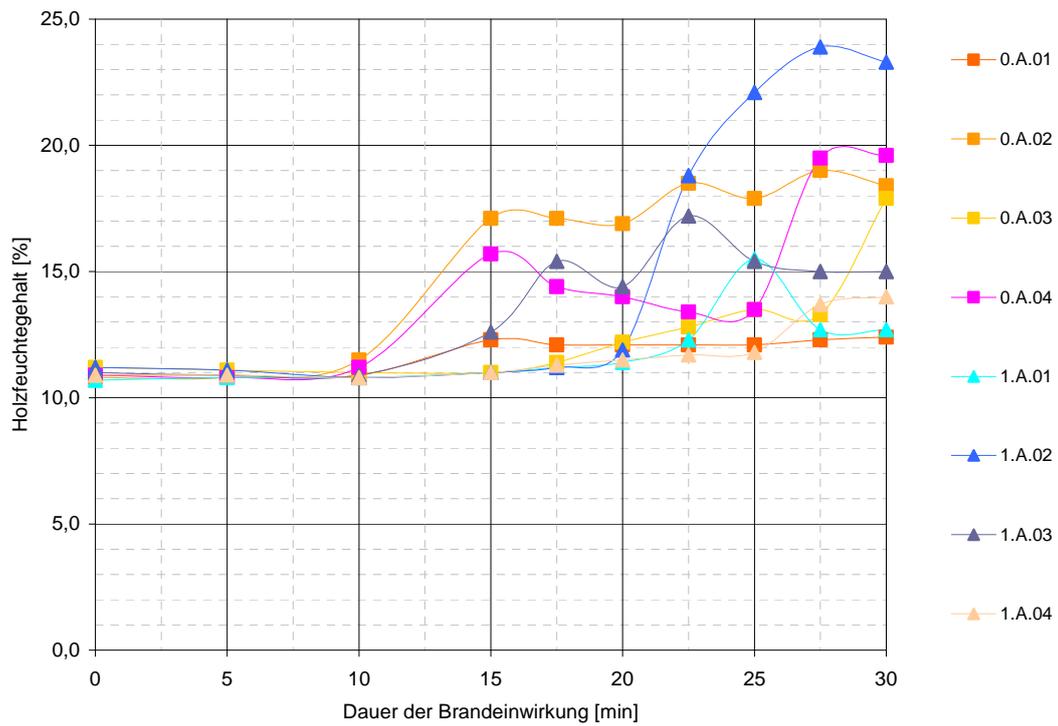


Abbildung 5.9: Holzfeuchtegehalt der Probekörperserie A

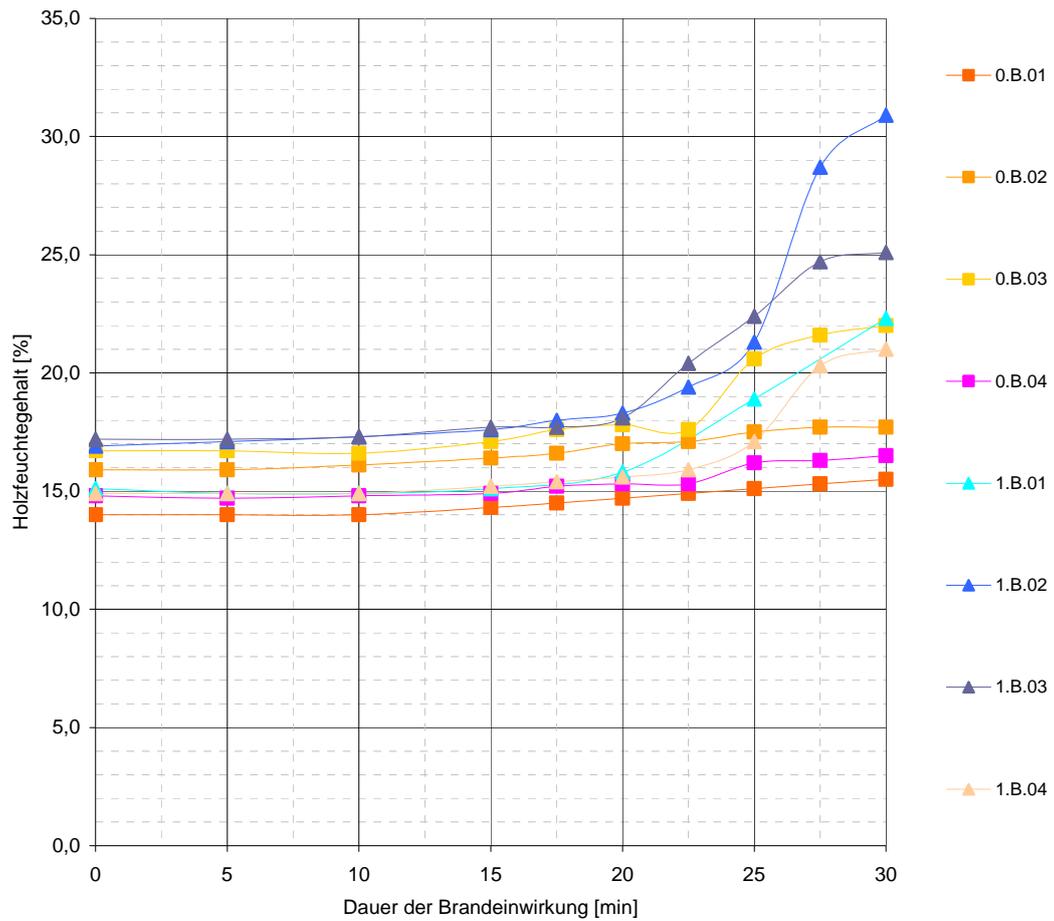


Abbildung 5.10: Holzfeuchtegehalt der Probekörperserie B

Zusammenfassend sind die errechneten mittleren Holzfeuchtwerte der drei Probekörperserien (T, A und B) in Abbildung 5.11 dargestellt.

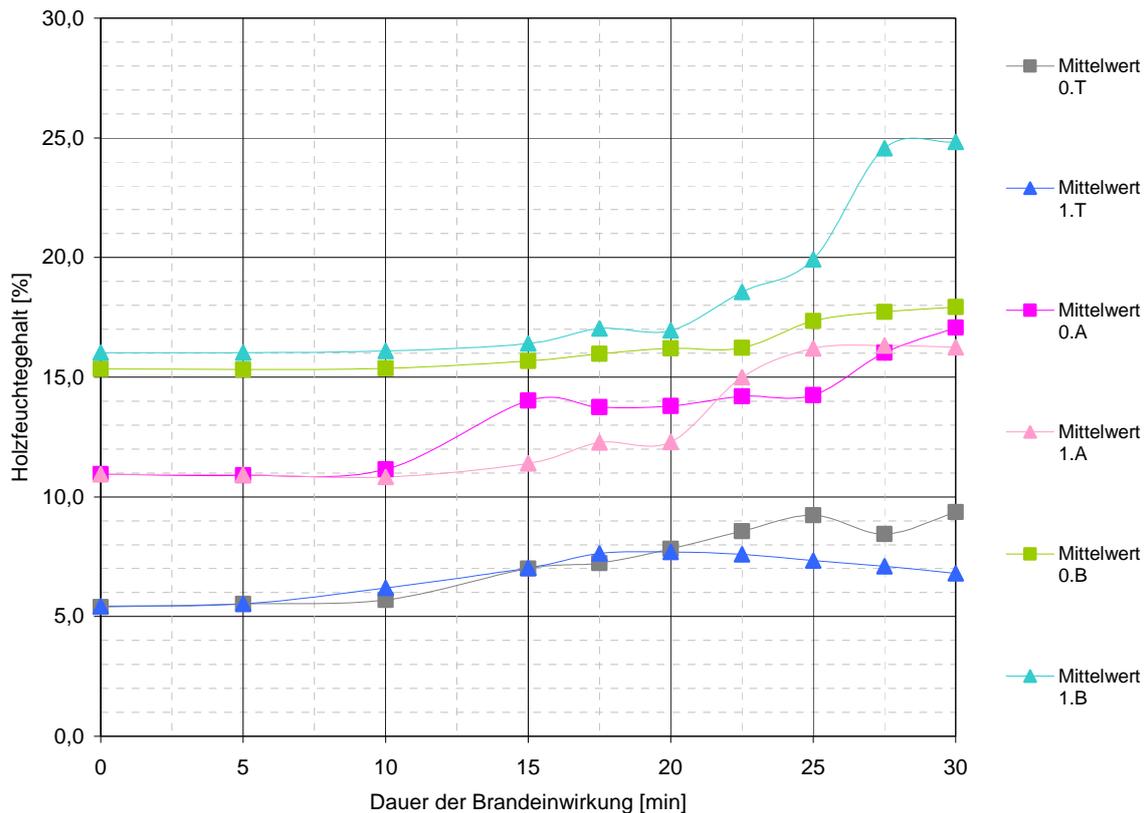


Abbildung 5.11: Mittlerer Holzfeuchteverlauf der drei Versuchserien (T, A und B)

### 5.3.2 Masseverlust und verbleibende Restfeuchte

Der Abbrand des Probenholzes geht mit dem Verlust der Holzmasse und dem der Holzfeuchte einher (vgl. Tabelle 5.5 und Tabelle 5.6).

In der Analyse der Messwerte zeigt sich, dass die Wasserdampfsperre kaum Einfluss auf die verbleibende Restfeuchte des Holzes nimmt. Obwohl die Ergebnisse für die Probekörper mit metallischer Sperrschicht tendenziell höher sind, kann aufgrund der sehr geringen Unterschiede der Messwerte keine eindeutige Aussage bezüglich der Restfeuchte getroffen werden. Gleiches gilt für die Werte des Masseverlustes für Probekörper der Serie A und B.

Bei der Probekörperserie T (vgl. Tabelle 5.5 – Klima T) und den Probekörpern die mit 60-minütiger Brandbelastung geprüft wurden (vgl. Tabelle 5.6), ist ein geringerer Masseabbau bei den Proben mit Sperrschicht eindeutig erkennbar. Im Mittel beträgt dieser Unterschied für

die Probekörper der Serie T 18,1 g. Bei den Probekörpern die unter 60-minütiger Brandbelastung geprüft wurden (vgl. Tabelle 5.6), beträgt die Differenz des Masseverlustes in Klima A 103,9 g und in Klima B 85,2 g.

Tabelle 5.5: Masseverlust und verbleibende Restfeuchte des Probenholzes bei 30-minütiger Brandbeanspruchung

	Probekörper- Bezeichnung	Masseverlust	Mittlere Holzfeuchte vor dem Versuch	Verbliebene Restfeuchte	Mittlere verbliebene Restfeuchte
		[g]	[%]	[%]	[%]
Klima T	0.T.01	242,8	0,00	1,25	0,86
	0.T.02	283,2		0,75	
	0.T.03	291,8		0,59	
	1.T.01	239,9	0,00	0,96	0,76
	1.T.02	260,7		0,71	
	1.T.03	262,8		0,60	
Klima A	0.A.01	214,2	9,82	8,15	8,33
	0.A.02	202,3		8,53	
	0.A.03	236,8		8,30	
	1.A.01	217,7	9,82	8,83	8,76
	1.A.02	223,3		8,82	
	1.A.03	219,4		8,62	
Klima B	0.B.01	215,4	17,98	12,01	13,26
	0.B.02	219,3		13,69	
	0.B.03	215,1		14,07	
	1.B.01	241,6	17,98	12,85	13,80
	1.B.02	206,7		13,88	
	1.B.03	209,9		14,66	

Tabelle 5.6: Masseverlust und verbleibende Restfeuchte des Probenholzes bei 60-minütiger Brandbeanspruchung

	Probekörper- Bezeichnung	Masseverlust	Mittlere Holzfeuchte vor dem Versuch	Verbliebene Restfeuchte
		[g]	[%]	[%]
Klima A	0.A.04	734,7	9,82	3,33
	1.A.04	630,8	9,82	3,12
Klima B	0.B.04	678,3	17,98	5,53
	1.B.04	593,1	17,98	5,13

### 5.3.3 Temperaturverlauf

Die Temperatur in der Brandkammer wird entsprechend der Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) gesteigert. Mit einer Verzögerung von ca. ein bis drei Minuten, beginnen die Messwerte der oberflächennahen Thermoelemente 06 und 07 langsam zu steigen. Danach folgen je nach Feuchtegehalt des Probenholzes die restlichen acht Thermoelemente in verschiedenen zeitlichen Abständen. Bedingt durch den anatomischen Aufbau, die ungleichmäßige Feuchteverteilung im Probenholz und die Ungenauigkeiten bei der Positionierung der Thermoelemente, differieren die Werte in einer Messebene um bis zu 150 °C (vgl. z.B. Temperaturverlauf der Thermoelemente 06 und 07 in Brandversuch Nr. 8 in Anhang 2).

Mit dem Erreichen der 100 °C-Zone nimmt der Temperaturanstieg ab oder stagniert sogar. Ab diesem Zeitpunkt wird ein Großteil der eingebrachten Wärmeenergie für die Verdampfung des im Probenholz gebundenen Wassers herangezogen. Die Dauer des Verdampfungsvorganges ist vom Wassergehalt im Holz abhängig. Der Zeitbedarf für Proben der Serie A ( $u = 9,82\%$ ) beträgt etwa fünf Minuten und für Proben der Serie B ( $u = 17,98\%$ ) bis zu zehn Minuten. Bei den darrtrockenen Probekörpern der Serie T ( $u = 0\%$ ) ist kein Haltepunkt erkennbar. Ein Einfluss der Wasserdampfspererschicht kann nicht nachgewiesen werden.

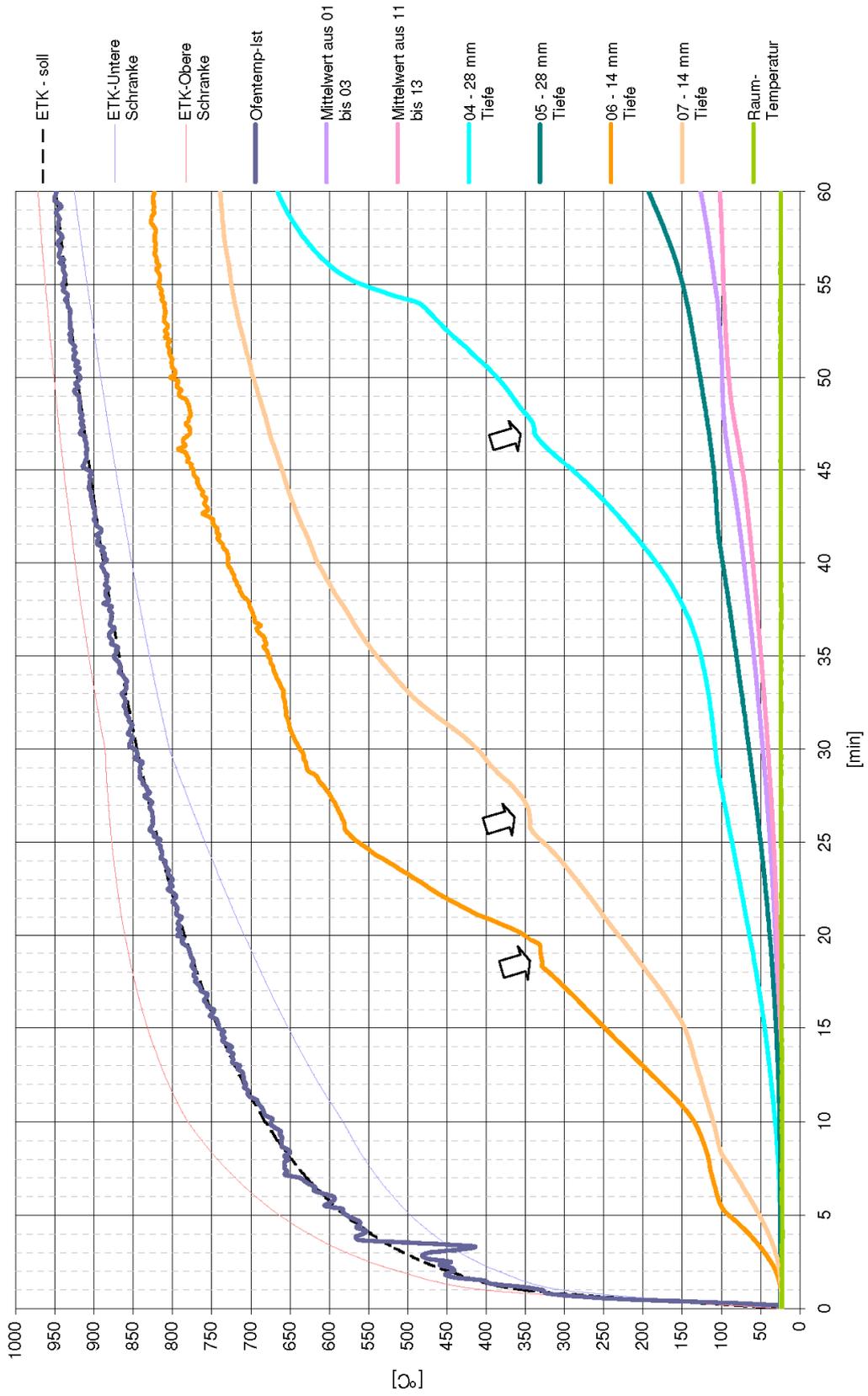


Abbildung 5.12: Temperaturverlauf von Probekörper 0.B.04 in Brandversuch Nr. 17

Der weitere Temperaturverlauf ergibt unabhängig vom Wassergehalt, bei ca. 60 % der Probekörper zusätzliche Haltepunkte zwischen 310 und 350 °C (vgl. Abbildung 5.12). Bei einigen Versuchen ist sogar ein regelrechter Temperaturabfall um wenige Grade zu verzeichnen. Nach gründlicher Recherche kann dieses Phänomens in erster Linie auf den Energieverbrauch bei der Zersetzung der Zellulose zurückgeführt werden. Wie in Kapitel 2 erläutert, beginnt der langsame Abbau der Zellulose bei Temperaturen um 300 °C und nimmt bei ca. 350 °C schlagartig zu (vgl. Abbildung 2.11). Zu diesem Zeitpunkt werden pro Minuten ca. 7,5 mg Zellulose abgebaut (S.183 /38/). Die für den abrupten Umsatz der Zellulose benötigte Wärmeenergie wird der umgebenden Holzmasse entzogen, wodurch eine Reduktion des Temperaturanstieges eintritt.

Die tabellarische Auswertung der Brandversuche zu diesem Phänomen ist in Anhang 3 enthalten.

#### 5.3.4 Sauerstoffkonzentration der Brandkammeratmosphäre

Die anfängliche Sauerstoffkonzentration in der Brandkammer entspricht dem Sauerstoffgehalt der Umgebungsluft und beträgt bei allen drei Versuchsserien ca. 21,0 %. Durch das Zünden des Brenners sinkt der Wert an der Messstelle im Prüfofen innerhalb von zehn Minuten auf ein Drittel der Anfangskonzentration ab. Er bleibt über die restliche Versuchsdauer, unabhängig vom Feuchtegehalt des Probekörpers, bei 5 bis 10 % konstant. Die Messwerte sind in Abbildung 5.13, Abbildung 5.14 und Abbildung 5.15 grafisch dargestellt. Die Werte der Probekörper ohne Sperrschicht werden mit einem Quadrat ■ und die Messwerte der Probekörper mit Sperrschicht mit einem Dreieck ▲ symbolisiert.

Die vollständige Analyse der Brandraumatmosfera in tabellarischer Form kann Anhang 2 entnommen werden.

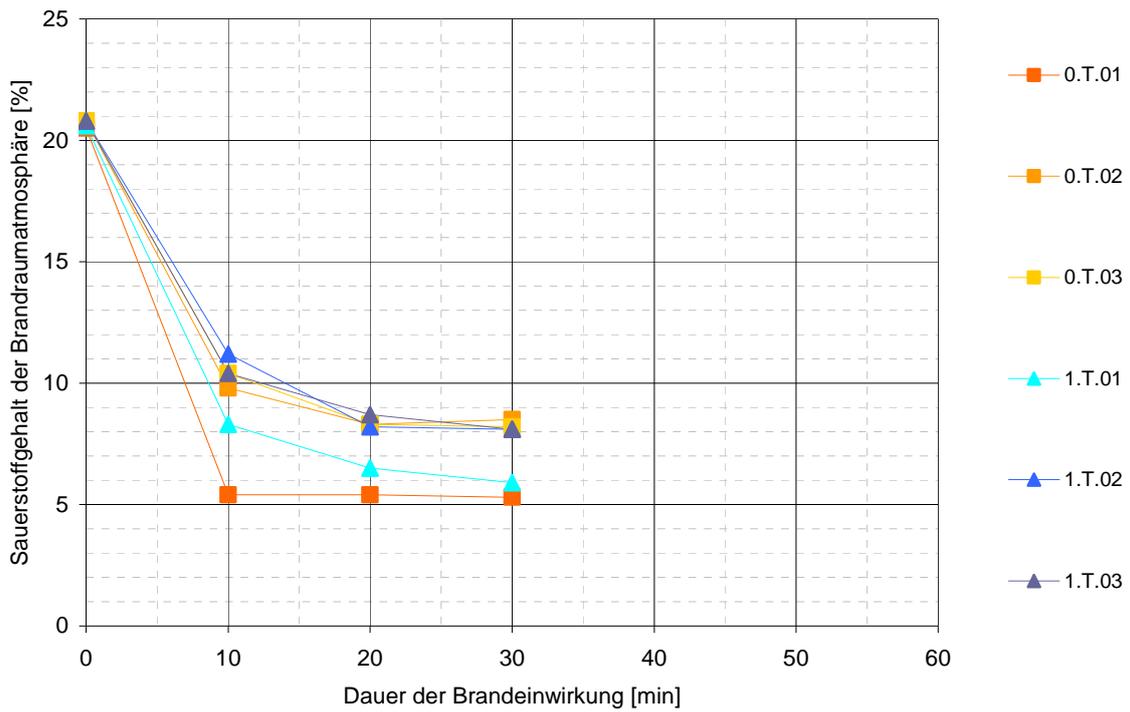


Abbildung 5.13: Sauerstoffkonzentration im Brandraum der Probekörperserie T

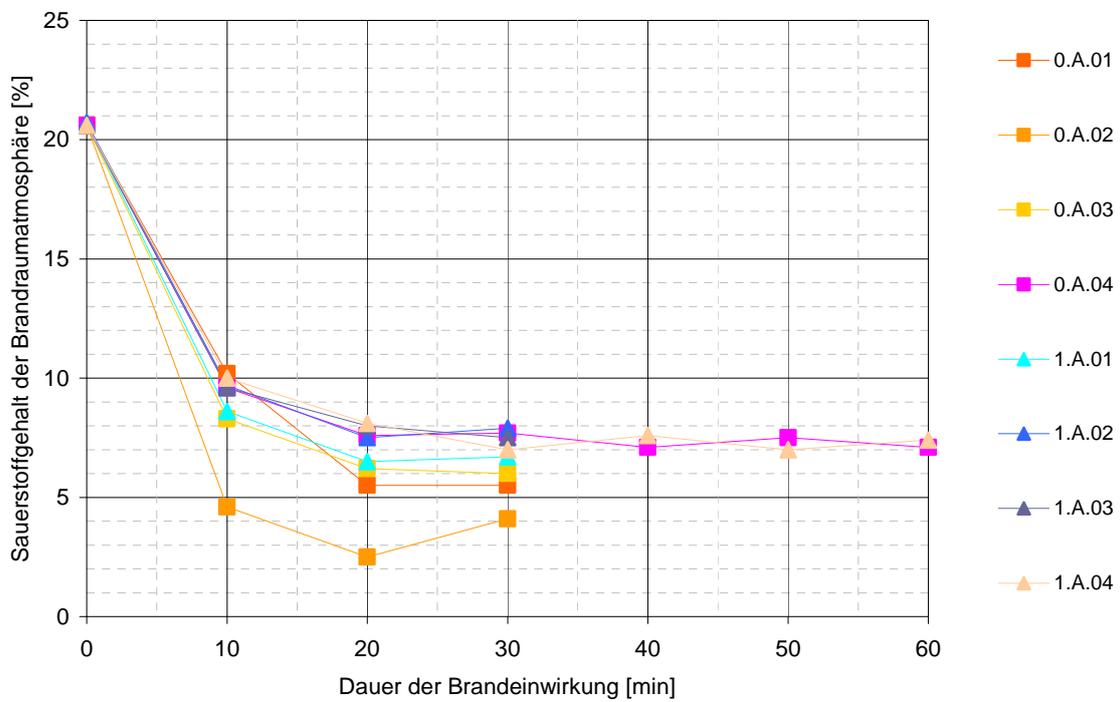


Abbildung 5.14: Sauerstoffkonzentration im Brandraum der Probekörperserie A

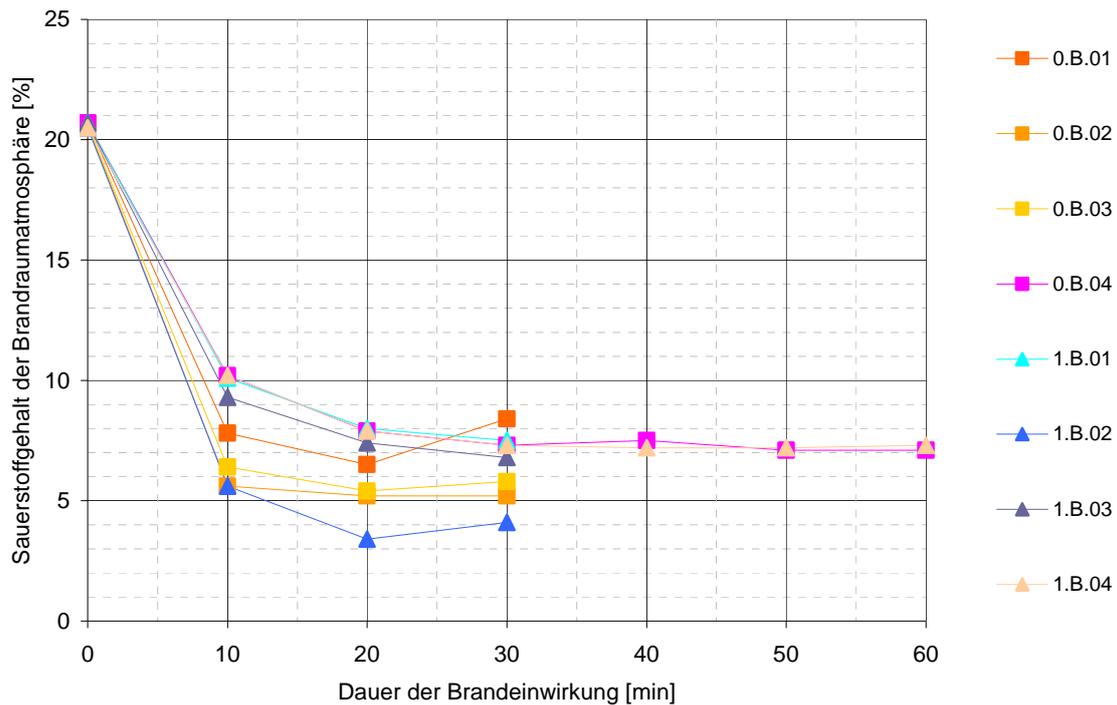


Abbildung 5.15: Sauerstoffkonzentration im Brandraum der Probekörperserie B

### 5.3.5 Abbrandtiefe und Abbrandrate

Nach Beendigung der Brandversuche erfolgt abschließend die Bestimmung der Abbrandtiefe und Abbrandrate. Dafür werden die Probenhölzer quer zur Faserrichtung aufgeschnitten und die verbliebene, gesunde Holzschichtdicke im Raster von 5 x 5 cm an neun Punkten gemessen. Die daraus resultierenden Werte werden für die Berechnung der Abbrandtiefe und Abbrandrate, bezogen auf die ursprüngliche Probenholzstärke von 42 mm, herangezogen. Abbildung 5.16 und Tabelle 5.7 zeigen die Ergebnisse dieser Auswertung für die 30-minütigen Brandversuche.

Grundsätzlich ist in der Darstellung kein Einfluss der wasserdampfdichten Sperrschicht auf die Abbrandrate erkennbar. Die genaue Betrachtung zeigt jedoch, dass die Abbrandraten der Probekörperserien T und A mit Aluminiumfolie (1.T und 1.A) sogar höher liegen als jene der Probekörper ohne Sperrschicht. Die Messwerte bewegen sich allerdings in sehr engen Bereichen. Aufgrund der natürlichen Streuung der Probenhölzer ist es nicht möglich, genauere Aussagen zu treffen.

Die Abbrandrate von Probekörpern der Klimasituation T (0.T und 1.T) liegt deutlich über den Werten der Probekörper der Serie A und B. Nachdem im darrtrockenen Probenholz kein Wasser gebunden ist, wird die für die Verdunstung des Wassers benötigte Wärmeenergie für den Abbau der Holzsubstanz verwendet. Daraus resultiert eine Erhöhung der Abbrandrate von bis zu 25 % (vgl. Abbildung 5.16).

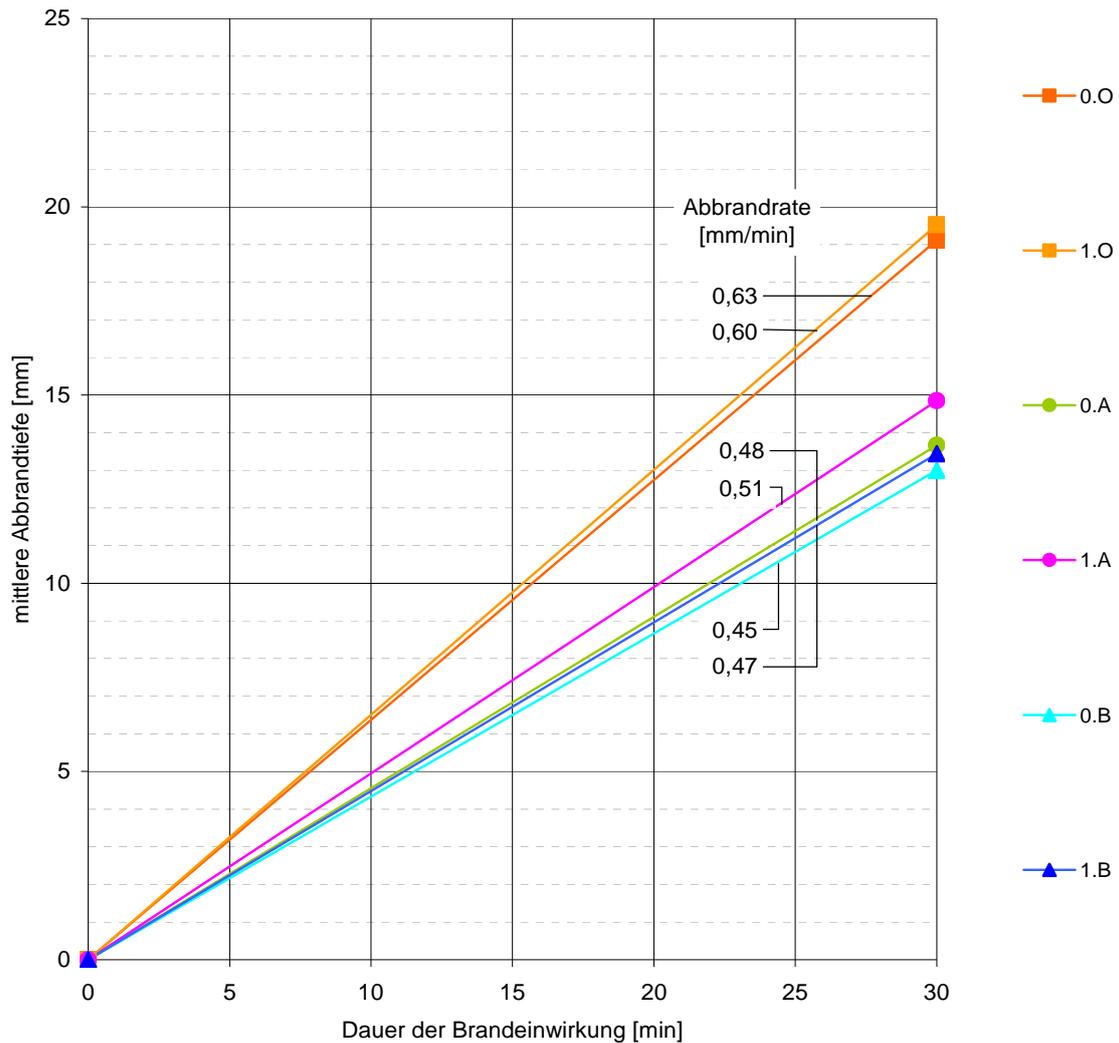


Abbildung 5.16: Mittlere Abbrandtiefe und Abbrandrate bei 30-minütiger Brandbeanspruchung

Tabelle 5.7: Abbrandtiefe und Abbrandrate bei 30-minütiger Brandbeanspruchung

	Probekörper- Bezeichnung	verbliebene Holzstärke	Abbrandtiefe	mittlere Abbrandtiefe	mittlere Abbrandrate
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm/min]
Klima T	0.T.01	24,1	17,9	18,97	0,63
	0.T.02	21,3	20,7		
	0.T.03	23,2	18,8		
	1.T.01	18,6	18,6	18,03	0,60
	1.T.02	22,4	19,6		
	1.T.03	21,6	20,4		
Klima A	0.A.01	28,4	13,6	18,56	0,48
	0.A.02	28,6	13,4		
	0.A.03	28,0	14,0		
	1.A.01	27,2	14,8	19,17	0,51
	1.A.02	26,8	15,2		
	1.A.03	27,4	14,6		
Klima B	0.B.01	28,6	13,4	17,42	0,45
	0.B.02	29,7	12,3		
	0.B.03	28,8	13,2		
	1.B.01	27,3	14,7	18,17	0,47
	1.B.02	29,6	12,4		
	1.B.03	28,8	13,2		

Die Messwerte der 60-minütigen Brandversuche sind in Abbildung 5.17 und Tabelle 5.8 zusammengefasst. Es ist ersichtlich, dass auch bei doppelter Brandbeanspruchungsdauer der Einfluss der Sperrschicht auf die Abbrandrate bei unterschiedlichen Holzfeuchtwerten der Probekörper nicht eindeutig beurteilt werden kann.

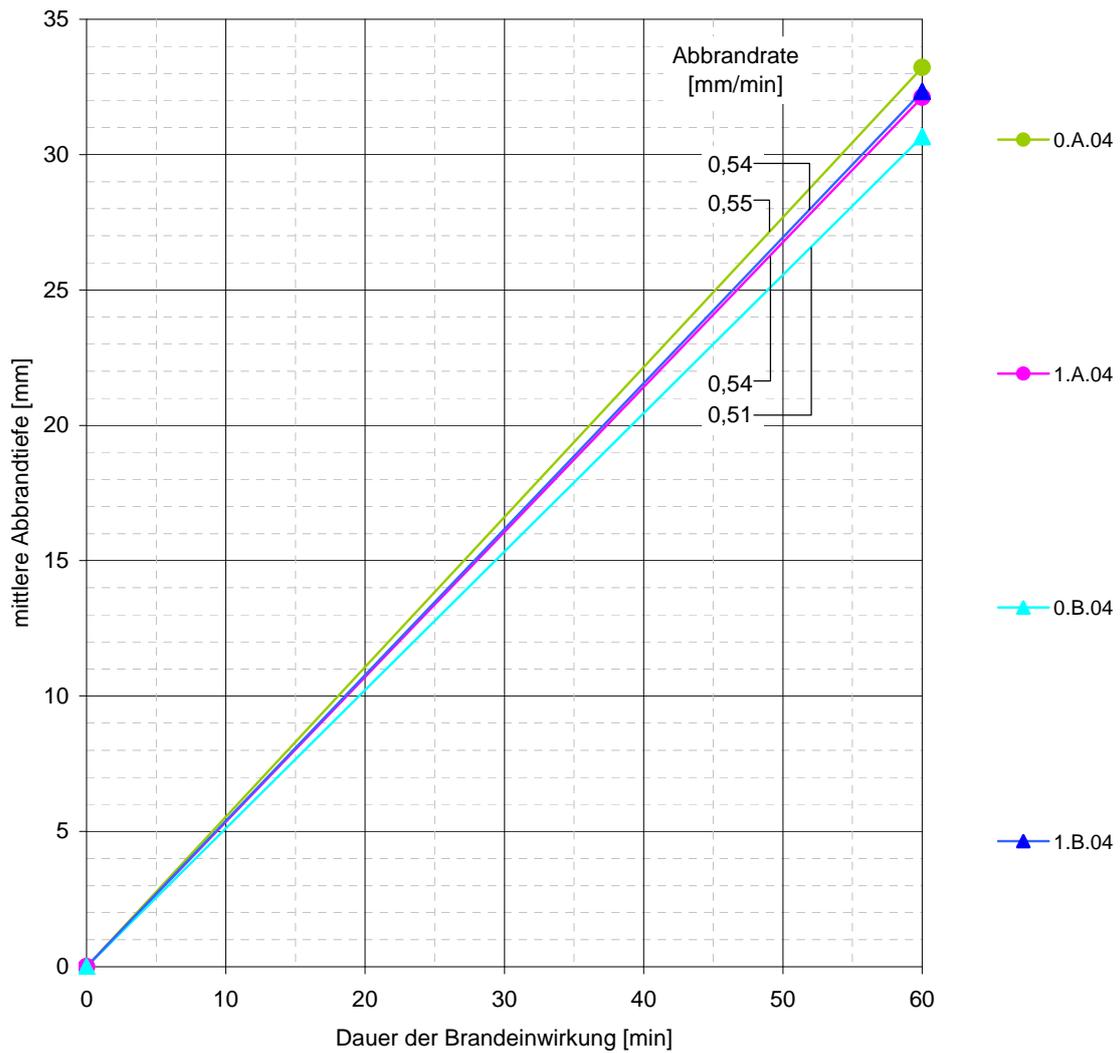


Abbildung 5.17: Abbrandtiefe und Abbrandrate bei 60-minütiger Brandbeanspruchung

Tabelle 5.8: Abbrandtiefe und Abbrandrate bei 60-minütiger Brandbeanspruchung

	Probekörper-Bezeichnung	verbliebene Holzstärke	Abbrandtiefe	Abbrandrate
		[mm]	[mm]	[mm/min]
Klima A	0.A.04	8,8	33,2	0,55
	1.A.04	9,9	32,1	0,54
Klima B	0.B.04	11,3	30,7	0,51
	1.B.04	9,7	32,3	0,54

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Zahlreiche Untersuchungen belegen den Einfluss, den die Holzfeuchte, die Rohdichte und der anatomische Aufbau von Holz auf das Brandverhalten ausüben. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass sich der natürliche Baustoff Holz im Brandfall sehr berechenbar verhält und ein plötzliches Versagen, wie z.B. bei ungeschützten Stahlkonstruktionen, ausgeschlossen werden kann.

Aufgrund des weit verbreiteten Einsatzes von metallischen Verbindungsmitteln ist es notwendig, theoretische Überlegungen bezüglich der Interaktion von Stahlelementen und Holz im Brandfall mit Hilfe von Versuchen zu bewerten. Das Hauptaugenmerk sollte dabei auf die hohe Wärmeleitfähigkeit dieser Elemente und ihre Wirkung als Sperrschicht gegen Wasserdampfdiffusion gelegt werden.

In der vorliegenden Diplomarbeit wurde anhand von 22 Brandversuchen der Einfluss einer wasserdampfdichten Sperrschicht auf den Feuchtetransport in Holz und der damit verbundenen Änderung der Abbrandrate in den sperrschichtnahen Schichten untersucht. Die Prüfung erfolgte an 18 Probekörpern mit einer 30-minütigen und 4 weiteren Probekörper mit einer 60-minütigen Brandbelastung (ETK) gemäß ÖNORM B 3800-1.

Während elf Probekörper mit einer Wasserdampfsperre (dünne Aluminiumfolie) in der Trennebene ausgestattet waren (Grundtyp 1), erfolgte die Untersuchung des Brandverhaltens an den restlichen Probekörpern des Grundtyps 0, ohne Sperrschicht. Die drei Versuchsserien – Serie T ( $u = 0\%$ ), Serie A ( $u = 9,78\%$ ), Serie B ( $u = 17,98\%$ ) – unterschieden sich jeweils in ihren Holzfeuchtwerten. Im Verlauf der Brandprüfungen wurden die Temperaturverläufe am Probekörper und in der Brandkammer, die Änderung der Holzfeuchtigkeit des Probenholzes unmittelbar unter der Aluminiumfolie und die Sauerstoffkonzentration in der Brandkammer in festgelegten Zeitabständen aufgezeichnet. Weitere Erkenntnisse konnten nach den Brandversuchen aus der Ermittlung der Abbrandtiefe, der Abbrandgeschwindigkeit, des Masseverlustes und der verbliebenen Restfeuchte gewonnen werden.

Wie die Auswertung der Messgrößen für die 30-minütigen Brandversuche zeigt, beeinflusst die Sperrschicht das Abbrandverhalten des Probenholzes kaum. Obwohl ein Anstieg der

Holzfeuchtwerte nach etwa 20 Minuten Branddauer zu erkennen war, konnte aufgrund der großen Streuung der Messwerte keine quantitative Aussage getroffen werden.

Die verschiedenen Holzfeuchtwerte der Versuchsserien und die Sperrschicht haben ebenfalls keine Auswirkung auf die Messwerte der Sauerstoffkonzentration der Brandkammeratmosphäre gezeigt. Der anfängliche O<sub>2</sub>-Gehalt im Prüfofen entsprach der Sauerstoffkonzentration der Umgebungsluft (~ 21 %). Mit der beginnenden Brandeinwirkung fielen die Messwerte und lagen ab der zehnten Minute für alle drei Versuchsserien bei 5 bis 10 %.

Bei ca. 60 % der Versuche bildete sich im Temperaturverlauf der Brandprüfungen neben dem Haltepunkt (bei 100 °C) für die Verdunstung des gebundenen Wassers, ein zusätzlicher Haltepunkt zwischen 310 bis 350 °C. In diesem Bereich konnte eine Verringerung des Temperaturanstieges an den 14 mm hinter der ursprünglichen Holzoberfläche platzierten Messstellen 06 und 07 verzeichnet werden. Daraus ist zu schließen, dass die Wärmeenergie für den Abbau der Zellulose eingesetzt wird.

Nach den Brandversuchen wurde der Masseverluste bestimmt und die verbliebene Restfeuchte am geprüften Probenholz ermittelt. Während die Abnahme der Holzmasse bei den Probekörperserien A und B keine Wirkung der Folieneinlage erkennen ließ, lagen die Messwerte für die Proben der Serie T ohne Sperrschicht im Mittel um 7 % höher. Daraus kann geschlossen werden, dass bereits bei 100 °C (Trocknung von Holz) thermische Veränderungen in der Zellulose ablaufen, welche das Brandverhalten von Holz negativ beeinflussen. Obwohl die in den Probekörpern mit Sperrschicht verbliebene Restfeuchte tendenziell höher lag, als für Proben ohne Wasserdampfbarriere, konnte auch hier aufgrund der Streuung der Werte keine eindeutige Aussage über die Auswirkung der Sperrschicht getroffen werden.

Die Auswertung der Messdaten für den Masseverlust der Probekörperserien A und B bei 30-minütiger Brandeinwirkung führt zum selben Ergebnis.

Im Gegensatz dazu, wiesen die Messwerte des Masseverlustes der 60-minütigen Versuche eindeutig auf einen Einfluss der Alufolie hin. Aufgrund der geringen Probekörperanzahl muss diese Aussage jedoch relativiert werden.

Zudem brachten die Ergebnisse aus der Ermittlung der Abbrandtiefe und der Abbrandrate der 30-minütigen Brandversuche keinen Hinweis auf die Wirkung der Sperrschicht. Bedingt

durch das fehlende Wasser lag die Abbrandrate der darrtrockenen Probekörperserie T - unabhängig von der Wasserdampfsperre - im Mittel ca. 25 % über den Messwerten von Serie A und B.

Zusammenfassend zeigen die Ergebnisse der drei Versuchsreihen, dass die wasserdampfdichte Sperrschicht einen geringen Einfluss auf die Holzfeuchtwerte ausübt, aber die Abbrandrate nicht beeinflusst. Aufgrund der wesentlichen Unterschiede im anatomischen Aufbau der Versuchskörper, unterliegen die ermittelten Messwerte zu großen Schwankungen, um quantitative Aussagen treffen zu können. Für künftige Brandversuche auf diesem Gebiet ist Folgendes zu beachten:

Probendicke	Bei 30-minütigen Brandversuchen sollte die Dicke des Probenholzes 60 mm und bei 60-minütiger Brandbelastung 100 mm betragen.
Sperrschichttiefe	Die wasserdampfdichte Sperrschicht sollte bei Versuchen mit 30 Minuten Branddauer in einer Tiefe von 50 mm und bei 60-minütigen Brandprüfungen in einer Tiefe 80 mm eingebracht werden.
Feuchtemessung	Neben dem Einsatz des Widerstandsmessverfahrens zur Bestimmung der Holzfeuchtigkeit, könnten durch die Verwendung von kapazitiven Messmethoden aussagekräftigere Ergebnisse erzielt werden. Die Positionierung der Messelektroden sollte in Bohrungen direkt im Probenholz erfolgen und nicht oberflächlich.
Ablöschung des Probenholzes	Um den fortschreitenden Abbau der Holzsubstanz und die Verdampfung der verbliebenen Restfeuchte nach dem Brandversuch zu stoppen, sollte das Probenholz mit Kohlendioxid (CO <sub>2</sub> -Schnee) anstelle von Wasser abgelöscht werden.
Massebestimmung	Die Bestimmung der Masse während des Brandversuches sollte kontinuierlich über die Versuchsdauer erfolgen. Besonderes Augenmerk ist auf die im Prüfofen herrschenden Druckverhältnisse zu legen.

## 7 Literatur

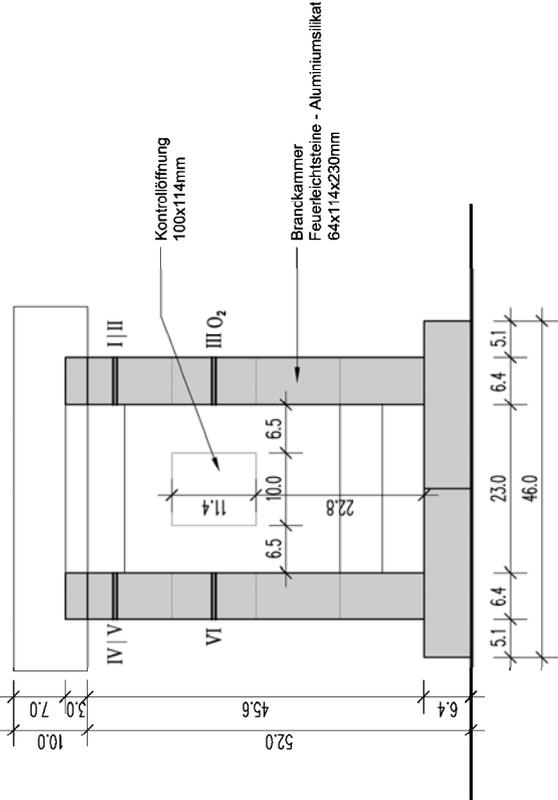
Nr.	Autor	Titel, Auflage, Verlag, Ort, Jahr
/1/	N.N.	ÖNORM EN 1995-1-2 Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Bemessung für den Brandfall - Nationale Festlegungen zur ÖNORM EN 1995-1-2 und nationale Erläuterungen, Österreichisches Normungsinstitut, 2006.
/2/	N.N.	TRVB 101 Grundlagen für die Beurteilung der Brand- und Explosionsgefährlichkeit, Technische Richtlinien vorbeugender Brandschutz, Österreichischer Bundesfeuerwehrverband, 1967.
/3/	N.N.	ÖNORM B 3800-1 Brandverhalten von Materialien, ausgenommen Bauprodukte - Teil 1: Anforderungen, Prüfungen und Beurteilungen, Österreichisches Normungsinstitut, Zurückgezogen am 01.07.2004.
/4/	N.N.	ÖNORM B 3806 Brandverhalten von Materialien, ausgenommen Bauprodukte - Teil 1: Anforderungen, Prüfungen und Beurteilungen, Österreichisches Normungsinstitut, 2005.
/5/	N.N.	ÖNORM EN 13501-1 Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 1: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten, Österreichisches Normungsinstitut, 2007.
/6/	N.N.	Amtsblatt der Europäischen Union L201/25, Entscheidung der Europäischen Kommission vom 07.08.2003 zur Festlegung der Brandverhaltensklassen für bestimmte Bauprodukte, 2003.
/7/	N.N.	Amtsblatt der Europäischen Union L208, Entscheidung der Europäischen Kommission vom 09.08.2005 zur Festlegung der Brandverhaltensklassen für bestimmte Bauprodukte, 2005.
/8/	N.N.	ÖNORM B 6021 Dämmstoffe für den Wärme- und/oder Schallschutz im Hochbau - Holzwolle-Dämmplatten WW und Holzwolle-Mehrschicht-Dämmplatten WW-C, Österreichisches Normungsinstitut, 2003.
/9/	N.N.	ÖNORM EN 1363-1 Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Österreichisches Normungsinstitut, 2000.
/10/	N.N.	ÖNORM EN 1363-2 Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 2: Alternative und ergänzende Verfahren, Österreichisches Normungsinstitut, 2000.
/11/	N.N.	ÖNORM B 3800-4 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Bauteile: Einreihung in die Brandwiderstandsklassen, Österreichisches Normungsinstitut, 2000.
/12/	Kollmann, F.	Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, 2. Auflage, Erster Band, Springer-Verlag, München, 1982.
/13/	Hiese, W.	Baustoffkenntnis – Kapitel 17: Holz und Holzbaustoffe, 13. Auflage, Werner-Verlag, Minden, 1995.
/14/	Niemz, P.	Holzphysik – Skript zur Vorlesung, IfB Institut für Baustoffe – Holzphysik, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, 2006.
/15/	Kohl, A. Bastian, K. Neizel, E.	Baufachkunde Teil 1 – Grundlagen, 17. Auflage, Teubner-Verlag, 1981.

/16/	Ebert, H. P.	Heizen mit Holz, 9. Auflage, Ökobuch Verlag, Staufen bei Freiburg i.Br., 2004.
/17/	Lasselsberger, L.	Stand der Technik der Holzfeuerungen, Bundesanstalt für Landtechnik, Wieselburg, 2000.
/18/	Marutzky, R. Seeger, K.:	Energie aus Holz und anderer Biomasse, 1. Auflage, DRW-Verlag Weinbrenner GmbH & Co, Leinfelden – Echterdingern, 1999.
/19/	Bobacz, D. Luggin, W.F. Bergmeister K.	Neue Erkenntnisse zum Brandschutz von Holz, Bericht, Forschungsprojekt „Brandverhalten von Holz/Holzwerkstoffen und Holzkonstruktionen“, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, Universität für Bodenkultur, Wien, 1998 – 2003.
/20/	Schaffer, E.L.	Charring rate of selected woods transverse to grain, US Forest Service, Research Paper FPL 69, Forest Products Laboratory, Madison Wisconsin, 1967.
/21/	Schneider, U.	Wiener Baustofflehre Blätter – Brandschutz, 5. Auflage, Institut für Baustofflehre, Bauphysik und Brandschutz, Technische Universität Wien, Wien, 2004.
/22/	Lohmann, U.	Holz Handbuch, 3. Auflage, DRW Verlag, Rosenheim 1986.
/23/	Lache, M.	Das Abbrandverhalten von Holz. Der Einfluss von Holzart, Holzfeuchte und Rohdichte auf die Geschwindigkeit des Abbrands, Holz-Zentralblatt, Seiten 473-480, Jahrgang: 117, Nr.29, 1991.
/24/	Götz, K-H. Hoor, D. Mohler, K. Natterer, J.	Holzbau Atlas, Institut für Internationale Architektur-Dokumentation GmbH, München, 1980.
/25/	Zürcher, C. Frank, T.	Bauphysik – Bau und Energie, 2. Auflage, vdf Hochschulverlag an der ETH Zürich, Zürich, 2004.
/26/	Golser, M. Nemestothy, K.P. Schnabel, R.	Methoden zur Übernahme von Energieholz, Forschungsbericht, Holzforschung Austria, Wien, 2004.
/27/	Krapfenbauer, R. Sträussler, E.	Bautabellen – Studienausgabe, Jugend & Volk Schulbuchverlag, Wien, 1993.
/28/	Kordina, K. Meyer-Ottens, C.	Holz Brandschutz Handbuch, 2. Auflage, Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V., Ernst & Sohn Verlag, München, 1995.
/29/	N.N.	Brandversuche mit Bongossi, Schriftliche Hausarbeit im Rahmen der 1. Staatsprüfung für das Lehramt an beruflichen Schulen, Institut für Arbeitstechnik und Didaktik im Bau- und Gestaltungswesen Prof. W. Ehrmann, Universität Hannover, 1983.
/30/	Holm, C.	A Survey of the Goals and Results of Fire Endurance Investigations Especially from the Viewpoint of Glue Laminated Structures Beitrag in: VTT Symposium 9 “Fire Resistance of Wood Structures”, Finnland (Tbilis), 1980.
/31/	Topf, P. Wegener, G. Lache, M.	Abbrandgeschwindigkeit von Vollholz, Brettschichtholz und Holzwerkstoffen, AiF-Abschlussbericht zu den Forschungsvorhaben 7796 und 8744, Institut für Holzforschung, München, 1992.
/32/	Bossel, U. Gunold, B.	Wärme aus Holz, 2. Auflage, Verlag C. F. Müller GmbH, Karlsruhe, 1985.

---

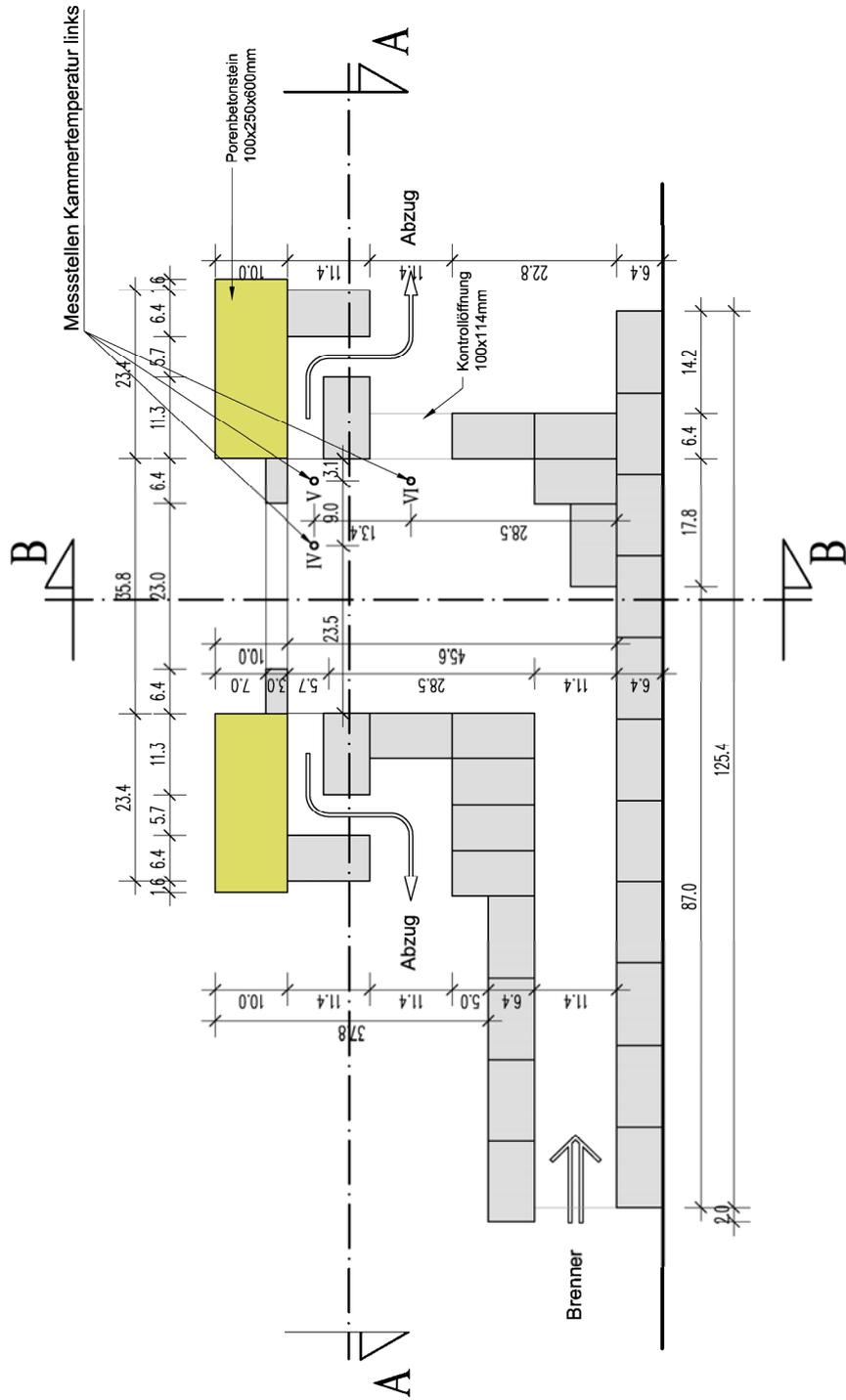
/33/	N.N.	<a href="http://de.wikipedia.org/wiki/Holz">http://de.wikipedia.org/wiki/Holz</a> , Version vom 7.10.2008.
/34/	Winter, W.	Brandschutz von Holz – Vortragsunterlagen, Institut für Tragwerkslehre und Ingenieurholzbau, Technische Universität Wien, Wien, 2008.
/35/	N.N.	ÖNORM EN 13183-1: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren, Österreichisches Normungsinstitut, 2004.
/36/	N.N.	ÖNORM EN 13183-2: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz - Teil 2: Schätzung durch elektrisches Widerstands-Messverfahren, Österreichisches Normungsinstitut, 2002.
/37/	Wesche, K.	Baustoffe für tragende Bauteile, Band 4, 2. Auflage, Bauverlag Wiesbaden, 1988.
/38/	Drysdale, D.	An Introduction to Fire Dynamics, 2. Auflage, John Wiley & Sons, Universität von Edinburgh, 1998.





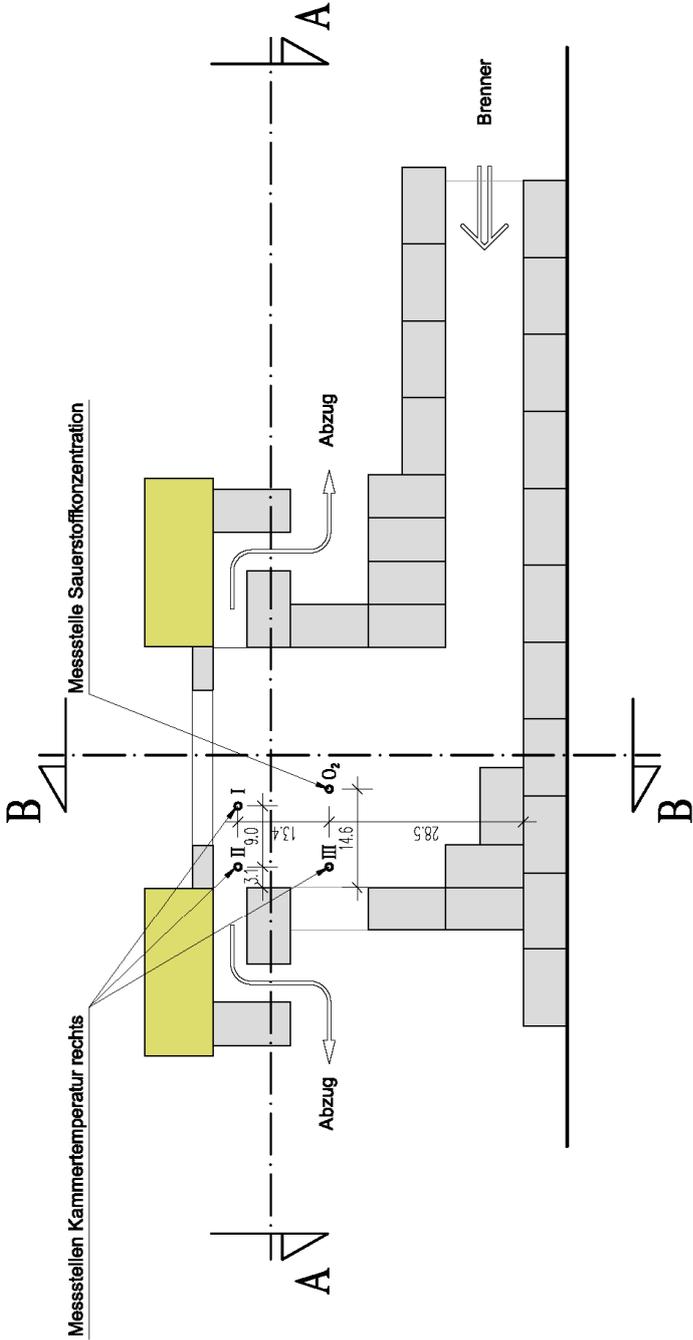
Schnitt B-B

Prüföfen Schnitt B-B



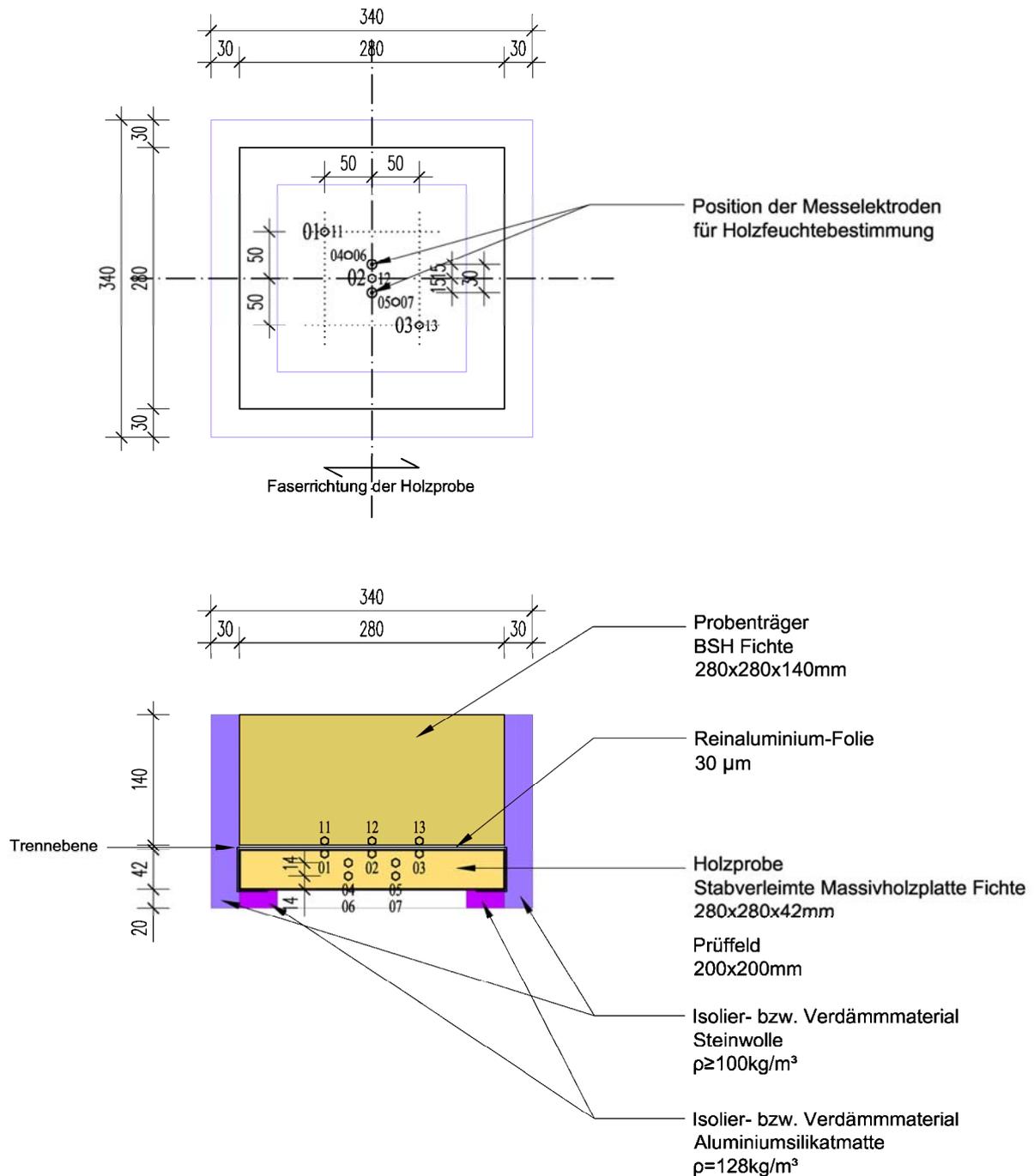
Schnitt C1-C1

Prüföfen Schnitt C1-C1



Schnitt C2-C2

Prüfen Schnitt C2-C2

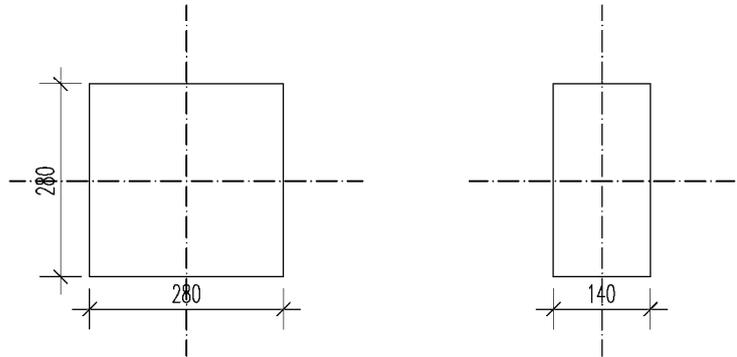


### Temperaturmessstellen an der Probe | Position der Thermoelemente Typ K

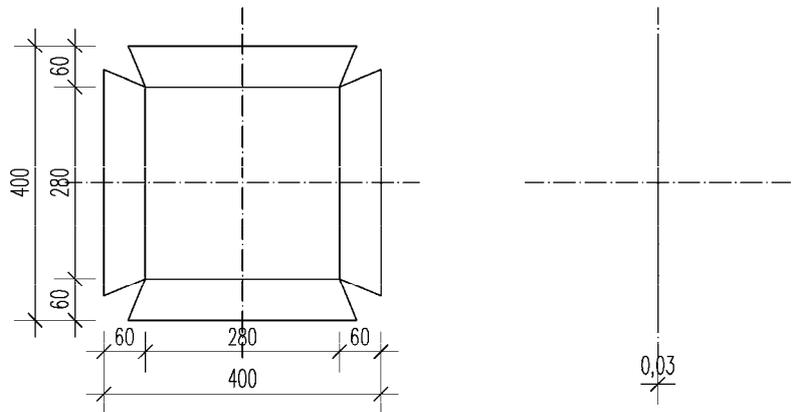
- 01 ... 07 Temperaturmessung an der unbeflammten Seite des Probenholzes  
d.h. direkt unter der Trennebene
- 11 ... 13 Temperaturmessung an der Unterseite des Probenträgers  
d.h. direkt über der Trennebene

Aufbau des Probekörpers

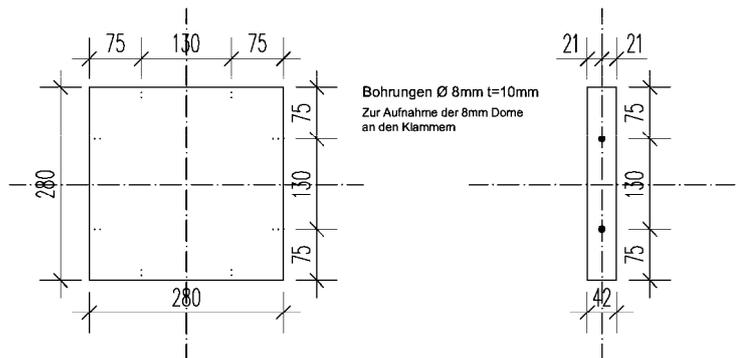
Probenträger  
 BSH Fichte  
 280x280x140mm



Reinaluminium-Folie  
 400x400x0,03mm

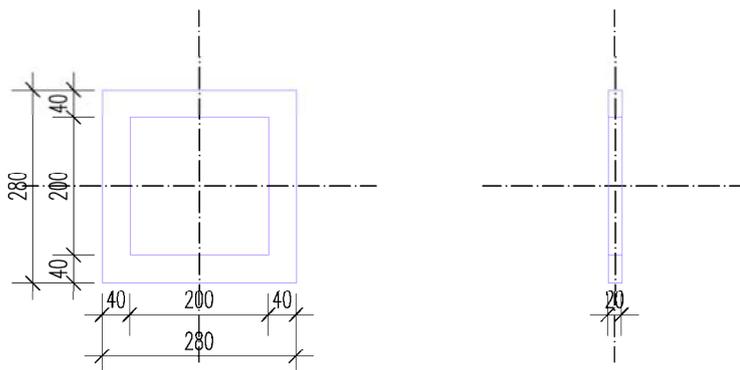


Holzprobe  
 Stabverleimte Massivholzplatte Fichte  
 280x280x42mm  
 Prüffeld  
 200x200mm

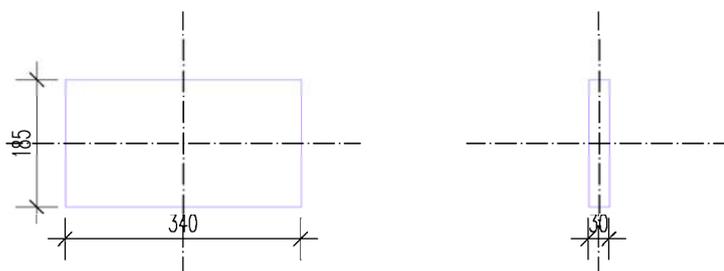


Bestandteile des Probekörpers - Teil 1

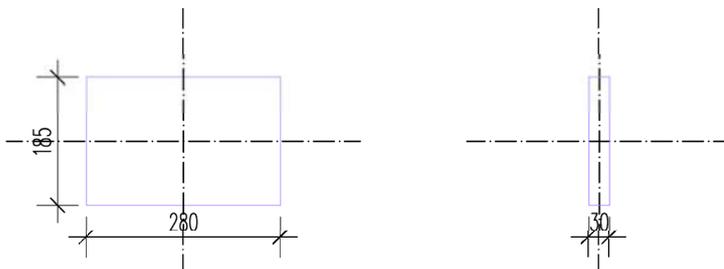
Isolier- bzw. Verdämmmaterial  
Aluminiumsilikatmatte  
 $\rho=128\text{kg/m}^3$



Isolier- bzw. Verdämmmaterial  
Steinwolle Brandschutzplatte  
 $\rho\geq 100\text{kg/m}^3$



Isolier- bzw. Verdämmmaterial  
Steinwolle Brandschutzplatte  
 $\rho\geq 100\text{kg/m}^3$



Befestigungsmaterial

Klammer Spezialanfertigung



Bestandteile des Probekörpers - Teil 2

## Anhang 2

### Brandversuch Nr. 0 (Vorversuch)

#### BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 0

Datum: 18.06.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. J. Wolfsgruber

<b>Probekörper:</b>
<b>1.A.00</b> (P1)

Versuchsbeginn:	18:32 h	Temperatur im Labor:	26,0 °C
Versuchsende:	19:02 h	Temperatur im Labor:	26,0 °C

#### Masse

Probekörper	Masse vor dem Versuch	12057,0 g
	Masse nach dem Versuch	(wegen Zuschnitt nicht gemessen) g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	4265,0 g
	Masse nach dem Versuch	4271,0 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1507,0 g
	Masse nach dem Versuch	(Zuschnitt auf 15x15cm) 325,5 g
	Masse darrtrocken	(Zuschnitt auf 15x15cm) 310,6 g

#### Holzfeuchte

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		9,82 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
10,4	10,3	10,1	10,6	23,1	24,5	22,6
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		4,80 %				

**Massekontrolle Probekörper**

Masse vor dem Versuch				12057,0 g		
Masseverlust nach t Minuten in [g]						
0	5	10	15	20	25	30
0	230	1010	1340	1860	2780	2870

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch				20,9 %		
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
20,9	12,3	6,9	6,2	6,1	6,0	5,9

**Abbrandtiefe**

Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	27,2 mm
--	---------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	27	26	26	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	27	26	27	
	28	29	29	

**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs**

**ad Masse**  
Der Zuschnitt des Probenholzes nach dem Brandversuch dauert etwa 3 Minuten. In diesem Zeitraum schreiten der Abbau von Holzsubstanz und die Verdunstung der Verbliebenen Restfeuchte weiter voran. Die Werte werden verfälscht!

**ad Massekontrolle:**  
Die ermittelten Werte der Massekontrolle sind nicht plausibel. Bei Berechnung des Masseverlustes für 30 Minuten Brandeinwirkung auf das Prüffeld (20 x 20 cm) unter Annahme der genormten Abbrandbrandrate von 0,65 mm/min ergibt sich lediglich ein Verlust rund 300g.

1.A.00 (P1) Vorversuch



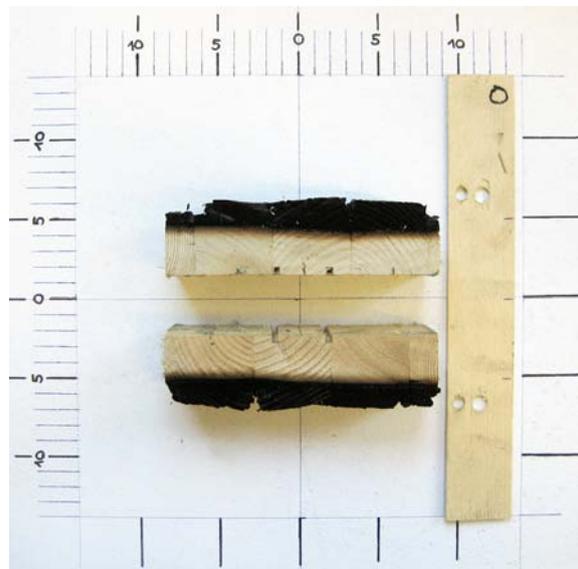
Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 0 (Vorversuch)



(a)



(b)



(c)

Probenholz 1.A.00 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 1

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 1**

Datum: 26.06.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. H. Bruckner

<b>Probekörper:</b>
<b>1.B.01</b> (P1)

Versuchsbeginn:	13:07 h	Temperatur:	26,0 °C
Versuchsende:	13:37 h	Temperatur:	27,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	11405,0 g
	Masse nach dem Versuch	11030,0 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	4534,8 g
	Masse nach dem Versuch	4531,8 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1591,8 g
	Masse nach dem Versuch	1350,2 g
	Masse darrtrocken	1196,4 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		17,98 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
15,1	14,9	14,9	15,1	15,8	18,9	22,3
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		12,85 %				

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,7 %	
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]			
0	10	20	30
20,7	10,1	8,0	7,5

**Abbrandtiefe**

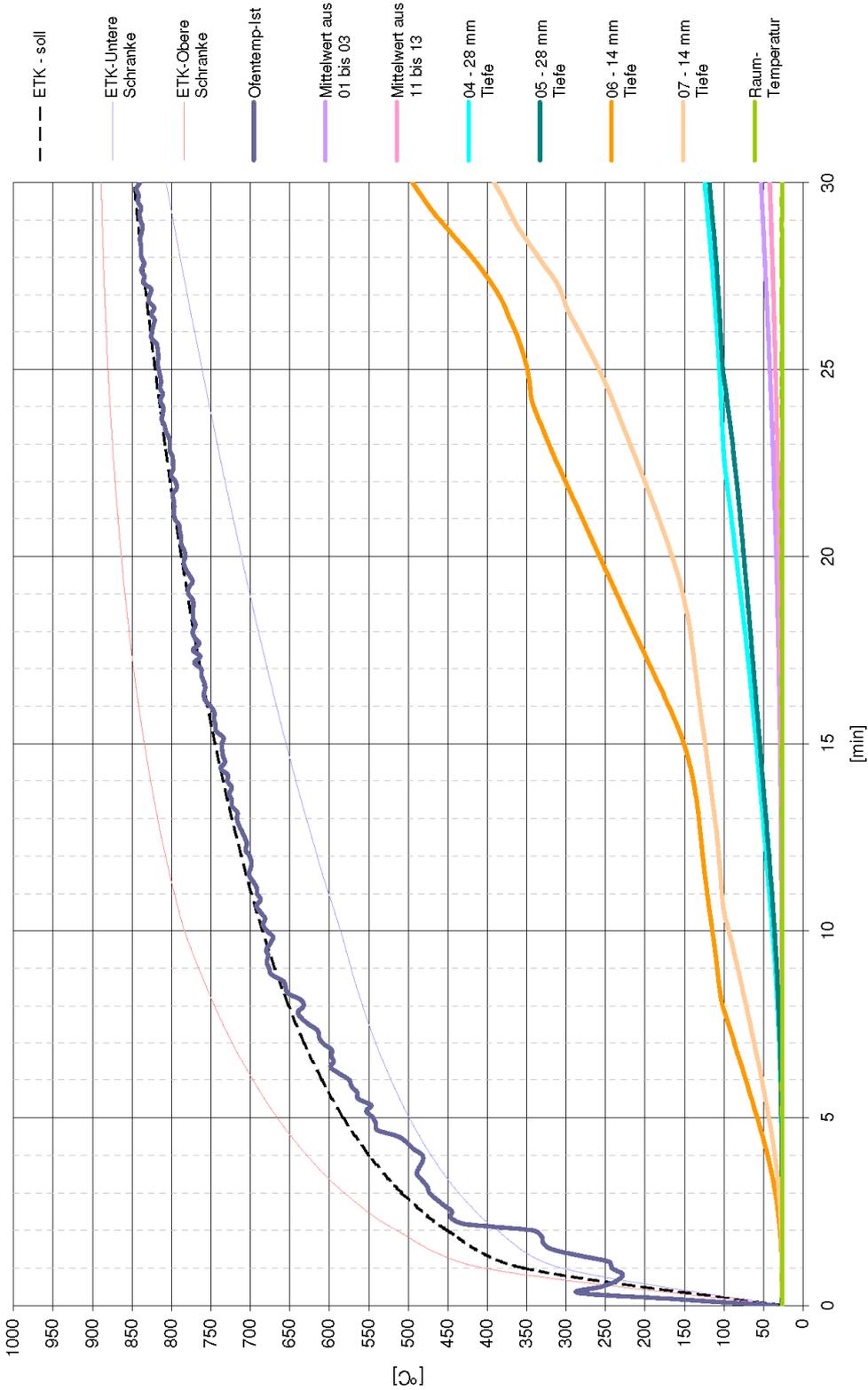
Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	27,3 mm
--	---------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	26	27	26	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	27	28	28	
	28	28	28	

**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs****ad Holzfeuchte**

Die im Probenholz verbliebene Holzfeuchte kondensiert am kalten Fliesenboden.

1.B.01 (P1)



Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 1



(a)



(b)



(c)

Probenholz 1.B.01 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 2

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 2**

Datum: 26.06.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. H. Bruckner

<b>Probekörper:</b>
<b>0.B.01</b> (P1)

Versuchsbeginn:	15:48 h	Temperatur:	27,0 °C
Versuchsende:	16:18 h	Temperatur:	28,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	10974,0 g
	Masse nach dem Versuch	10772,9 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	4387,9 g
	Masse nach dem Versuch	4392,1 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1617,0 g
	Masse nach dem Versuch	1401,6 g
	Masse darrtrocken	1196,4 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		17,98 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
14,0	14,0	14,0	14,3	14,7	15,1	15,5
			14,5	14,9	15,3	
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		12,01 %				

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,7 %	
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]			
0	10	20	30
20,7	7,8	6,5	8,4

**Abbrandtiefe**

Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	28,6 mm
--	---------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	28	29	28	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	28	31	28	
	28	29	28	

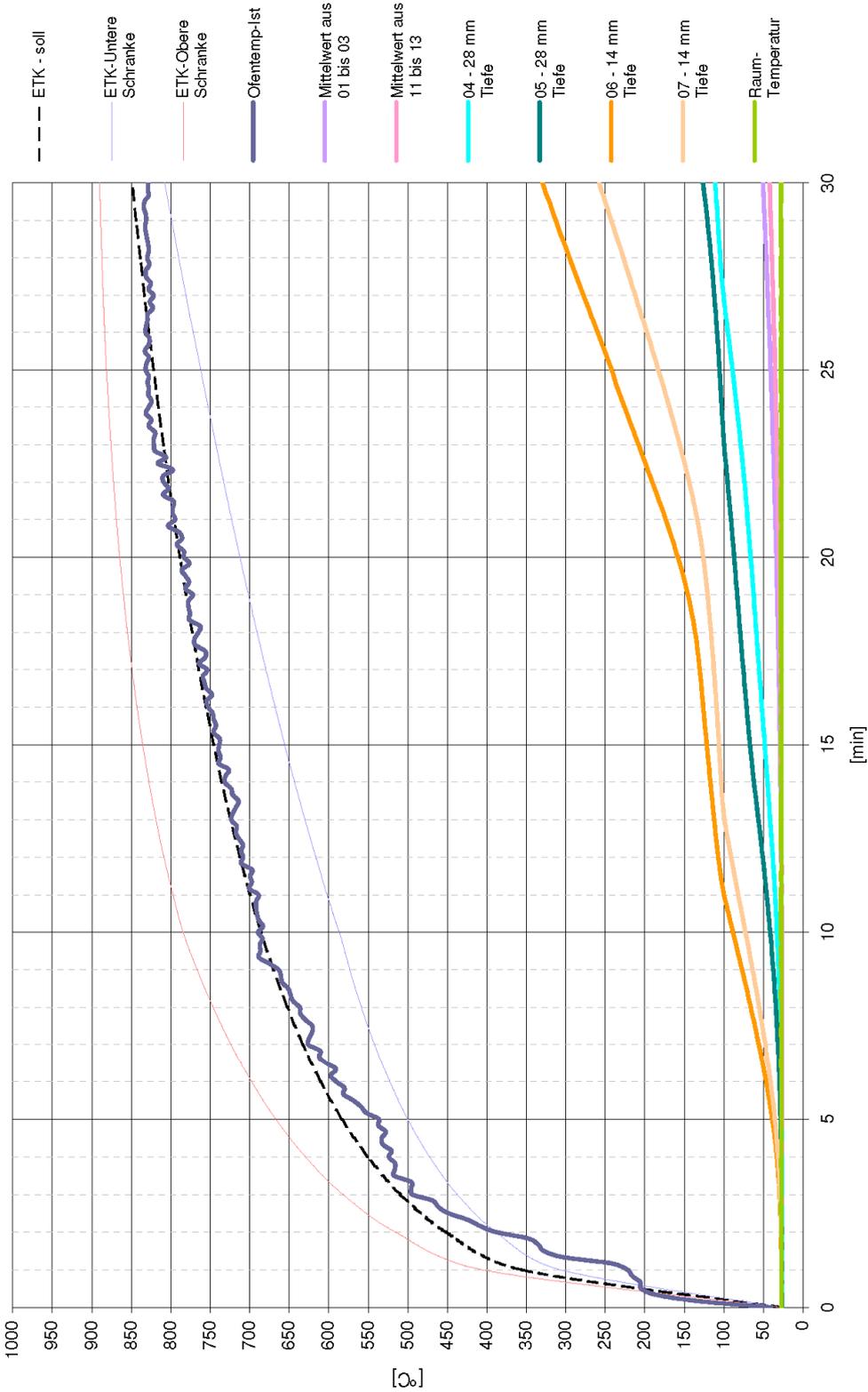
**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs****ad Holzfeuchte**

Die im Probenholz verbliebene Holzfeuchte kondensiert am kalten Fliesenboden.  
An den Messelektroden zur Holzfeuchtemessung haftet Kondenswasser.

**ad Temperaturverlauf**

Ofenthermoelement II gibt unverhältnismäßig hohe Wert aus, ist jedoch augenscheinlich intakt.

0.B.01 (P1)



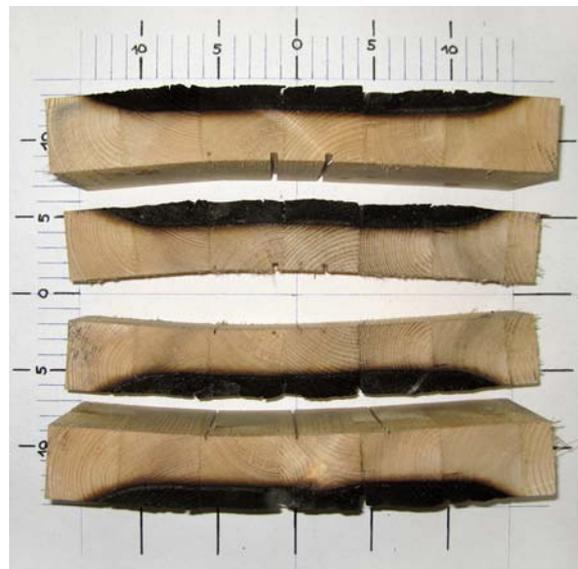
Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 2



(a)



(b)



(c)

Probenholz 0.B.01 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 3

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 3**

Datum: 27.06.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. S. Prokupek

<b>Probekörper:</b>
<b>1.A.01</b> (P1)

Versuchsbeginn:	10:30 h	Temperatur:	26,0 °C
Versuchsende:	11:00 h	Temperatur:	26,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	10991,0 g
	Masse nach dem Versuch	10860,9 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	4574,5 g
	Masse nach dem Versuch	4579,2 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1471,9 g
	Masse nach dem Versuch	1254,2 g
	Masse darrtrocken	1152,4 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		9,82 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
10,7	10,8	10,8	11,0	11,4	12,5	12,7
			11,2	12,3	12,7	
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		8,83 %				

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,7 %	
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]			
0	10	20	30
20,7	8,6	6,5	6,7

**Abbrandtiefe**

Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	27,2 mm
--	---------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	29	23	30	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	26	27	30	
	26	28	26	

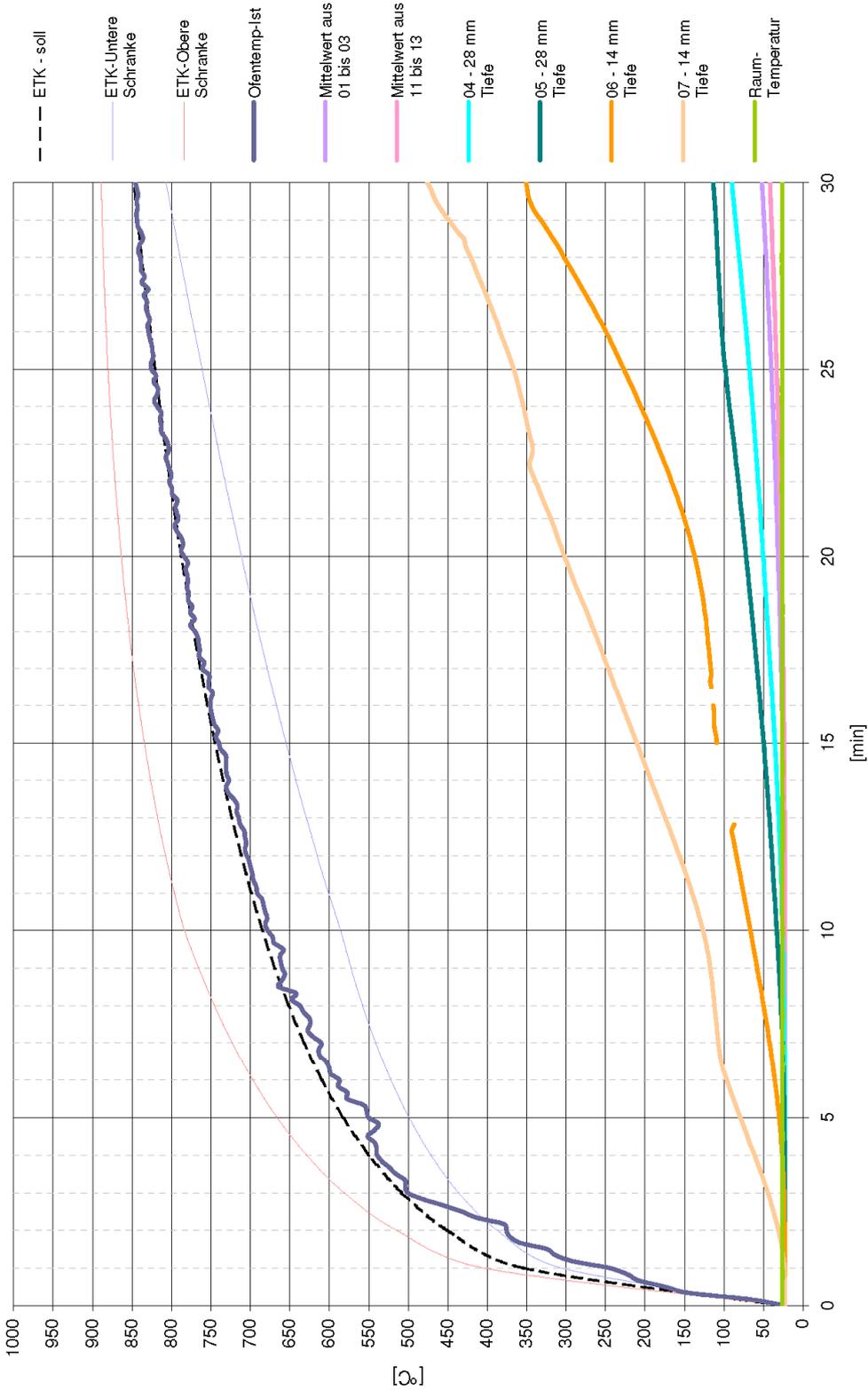
**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs****ad Holzfeuchte**

Die im Probenholz verbliebene Holzfeuchte kondensiert am kalten Fliesenboden.

**ad Temperaturverlauf**

Zeitweilig fällt Thermoelement 06 zwischen der 13. und 17. Minute aus

1.A.01 (P1)



Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 3



(a)



(b)



(c)

Probenholz 1.A.01 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 4

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 4**

Datum: 27.06.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. S. Prokupek

<b>Probekörper:</b>	
<b>0.A.01</b>	
(P1)	

Versuchsbeginn:	14:45 h	Temperatur:	27,0 °C
Versuchsende:	15:15 h	Temperatur:	26,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	10597,0 g
	Masse nach dem Versuch	10402,4 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	4201,3 g
	Masse nach dem Versuch	4205,6 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1481,2 g
	Masse nach dem Versuch	1267,0 g
	Masse darrtrocken	1171,6 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		9,82 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
10,9	10,9	10,9	12,3	12,1	12,1	12,4
			12,1	12,1	12,3	
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		8,15 %				

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,6 %	
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]			
0	10	20	30
20,6	10,2	5,5	5,5

**Abbrandtiefe**

Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	28,4 mm
--	---------

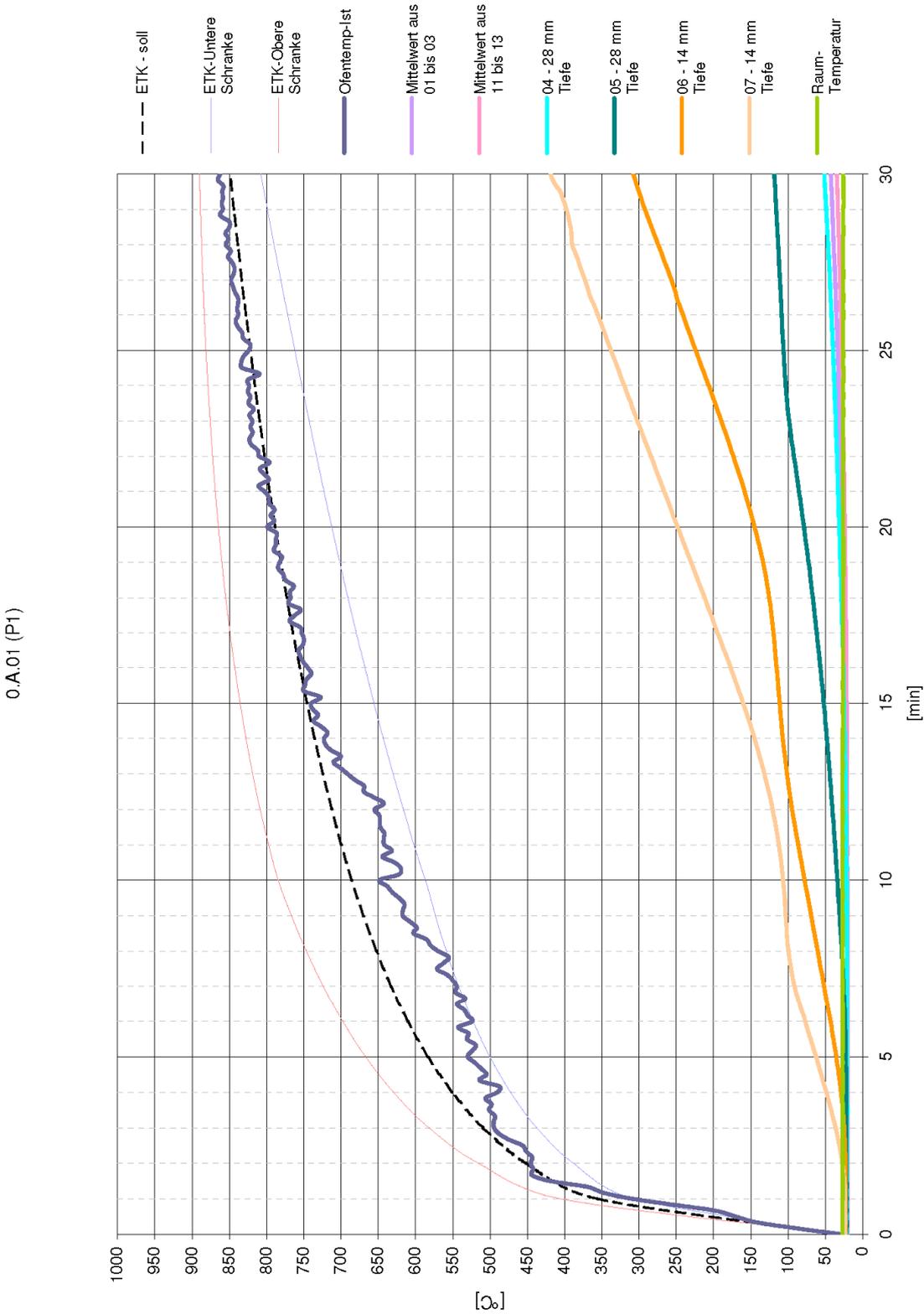
Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	27	26	27	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	29	29	29	
	29	31	29	

**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs****ad Holzfeuchte**

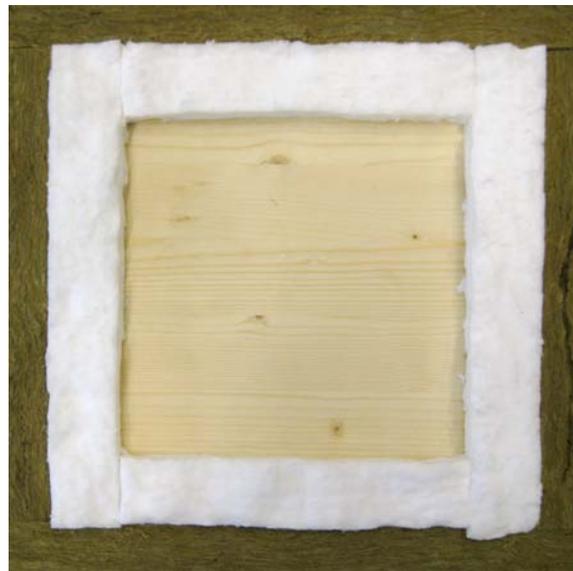
Die im Probenholz verbliebene Holzfeuchte kondensiert am kalten Fliesenboden.

**ad Temperaturverlauf**

Ausfall von Ofenthermoelement I. Die Steuerung des Ofens erfolgt anhand der verbliebenen fünf Thermoelemente II bis VI.



Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 4



(a)



(b)



(c)

Probenholz 0.A.01 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 5

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 5**

Datum: 30.06.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. J. Wolfgruber

<b>Probekörper:</b>
<b>1.A.02</b> (P2)

Versuchsbeginn:	11:36 h	Temperatur:	22,0 °C
Versuchsende:	12:06 h	Temperatur:	24,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	11025,5 g
	Masse nach dem Versuch	10818,4 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	4576,8 g
	Masse nach dem Versuch	4578,8 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1501,8 g
	Masse nach dem Versuch	1278,5 g
	Masse daartrocken	1174,9 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		9,82 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
11,2	11,1	10,8	11	11,9	22,1	23,3
		11,2		18,8		23,9
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		8,82 %				

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,7 %	
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]			
0	10	20	30
20,7	9,7	7,5	7,9

**Abbrandtiefe**

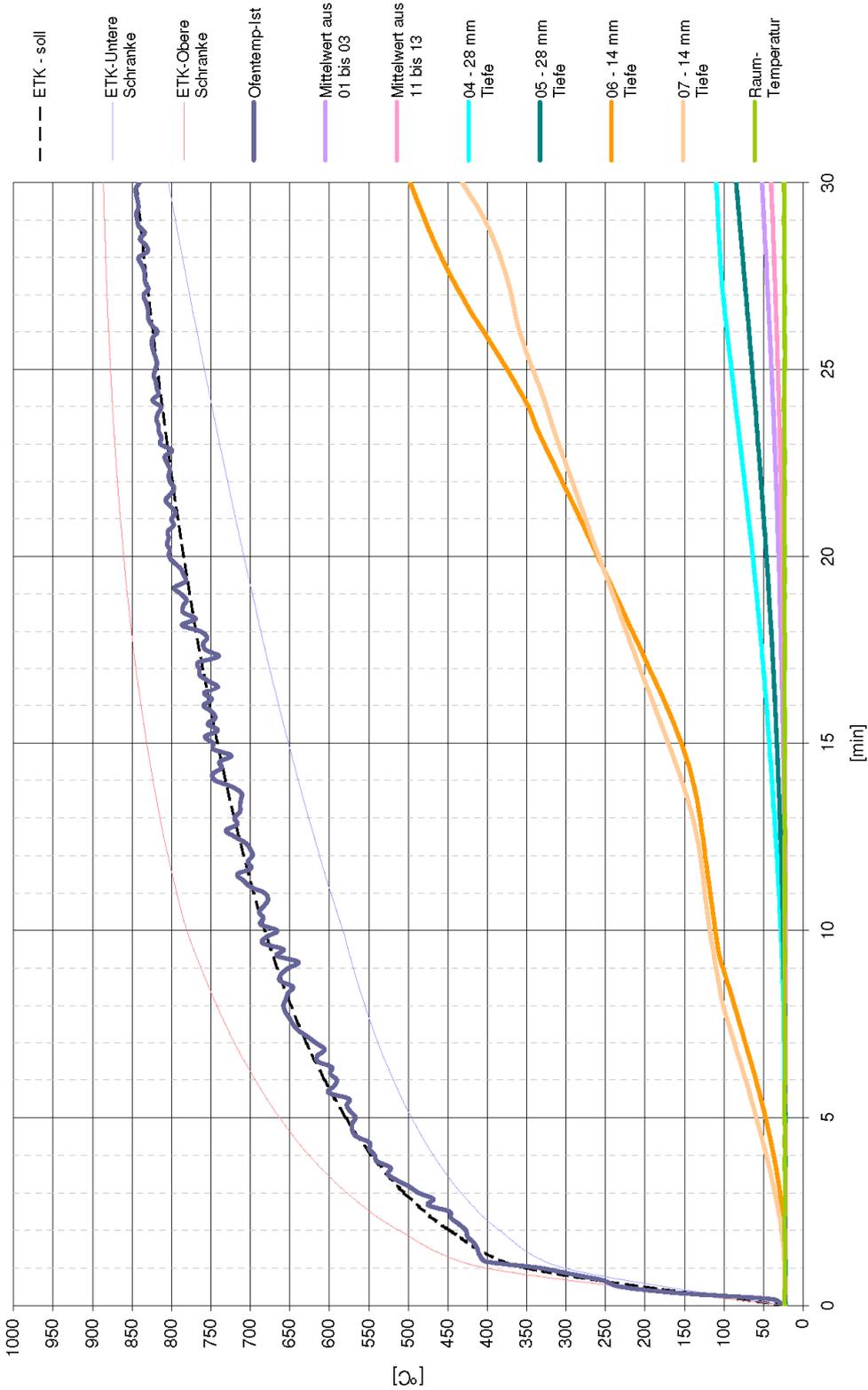
Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	26,8 mm
--	---------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	27	27	28	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	27	27	27	
	26	26	26	

**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs****ad Holzfeuchte**

Die im Probenholz verbliebene Holzfeuchte kondensiert am kalten Fliesenboden.

1.A.02 (P2)



Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 5



(a)



(b)



(c)

Probenholz 1.A.02 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 6

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 6**

Datum: 30.06.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. J. Wolfgruber

<b>Probekörper:</b>
<b>1.T.01</b> (P2)

Versuchsbeginn:	15:26 h	Temperatur:	27,0 °C
Versuchsende:	15:56 h	Temperatur:	28,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	10127,0 g
	Masse nach dem Versuch	9906,9 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	3844,3 g
	Masse nach dem Versuch	3857,8 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1337,8 g
	Masse nach dem Versuch	1097,9 g
	Masse darrtrocken	1087,5 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		0,00 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
6,1	6,2	7,9	8,7	8,8	8,1	7,0
			8,8	8,6	7,6	
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		0,96 %				

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,6 %	
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]			
0	10	20	30
20,6	8,3	6,5	5,9

**Abbrandtiefe**

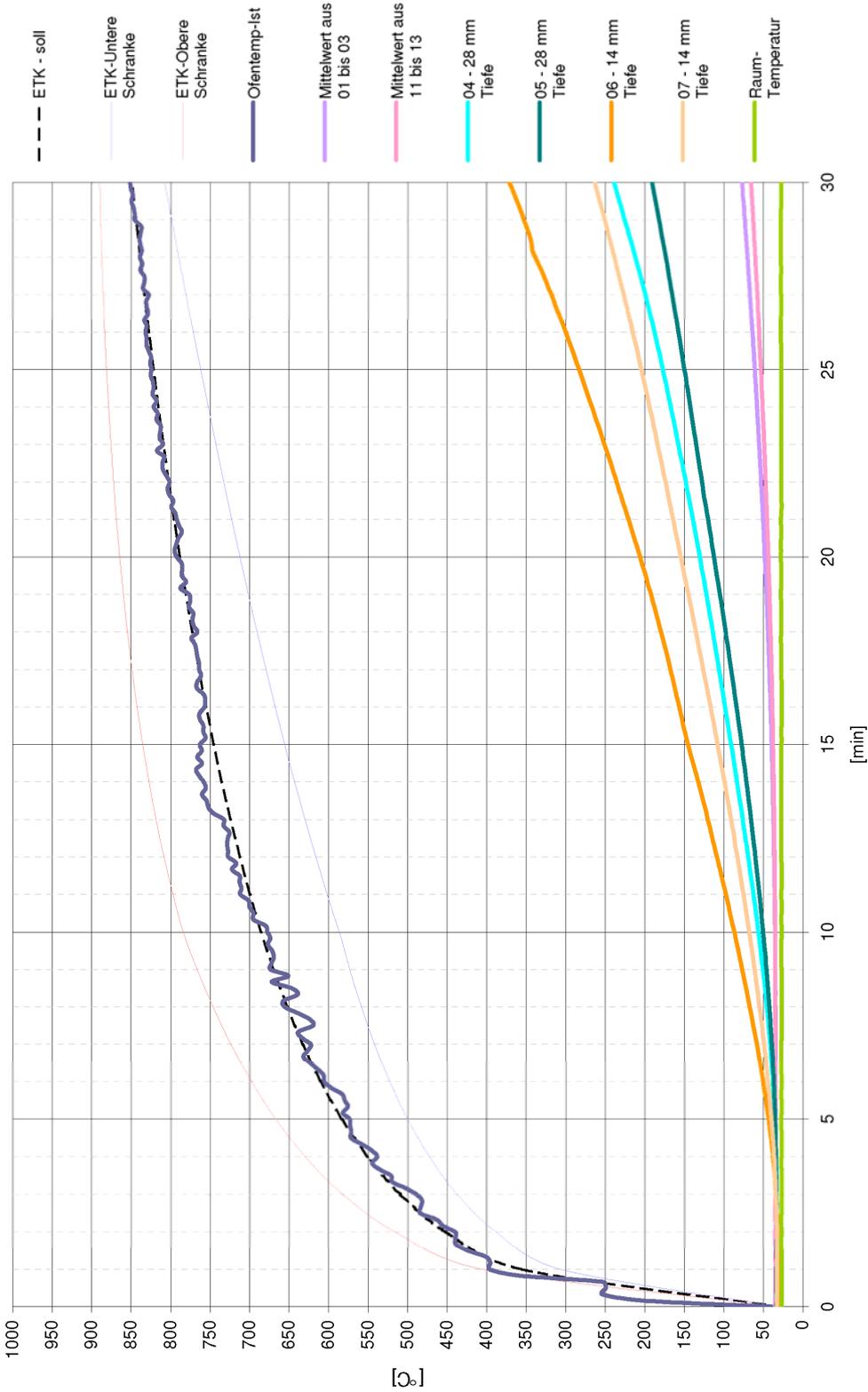
Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	23,4 mm
--	---------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	24	23	24	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	24	22	24	
	23	23	24	

**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs****ad Temperaturverlauf**

Wechsel von Ofenthermoelement IV in der 14. Minute.

1.T.01 (P2)



Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 6



(a)



(b)



(c)

Probenholz 1.T.01 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 7

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 7**

Datum: 30.06.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. J. Wolfgruber

<b>Probekörper:</b>
<b>0.A.02</b> (P2)

Versuchsbeginn:	17:44 h	Temperatur:	27,0 °C
Versuchsende:	18:14 h	Temperatur:	27,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	10683,5 g
	Masse nach dem Versuch	10460,9 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	4283,1 g
	Masse nach dem Versuch	4289,5 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1458,1 g
	Masse nach dem Versuch	1255,8 g
	Masse darrtrocken	1157,1 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		9,82 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
10,8	10,8	11,5	17,1	16,9	17,9	18,4
			17,1	18,5	19,0	
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		8,53 %				

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,6 %	
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]			
0	10	20	30
20,6	4,6	2,5	4,3

**Abbrandtiefe**

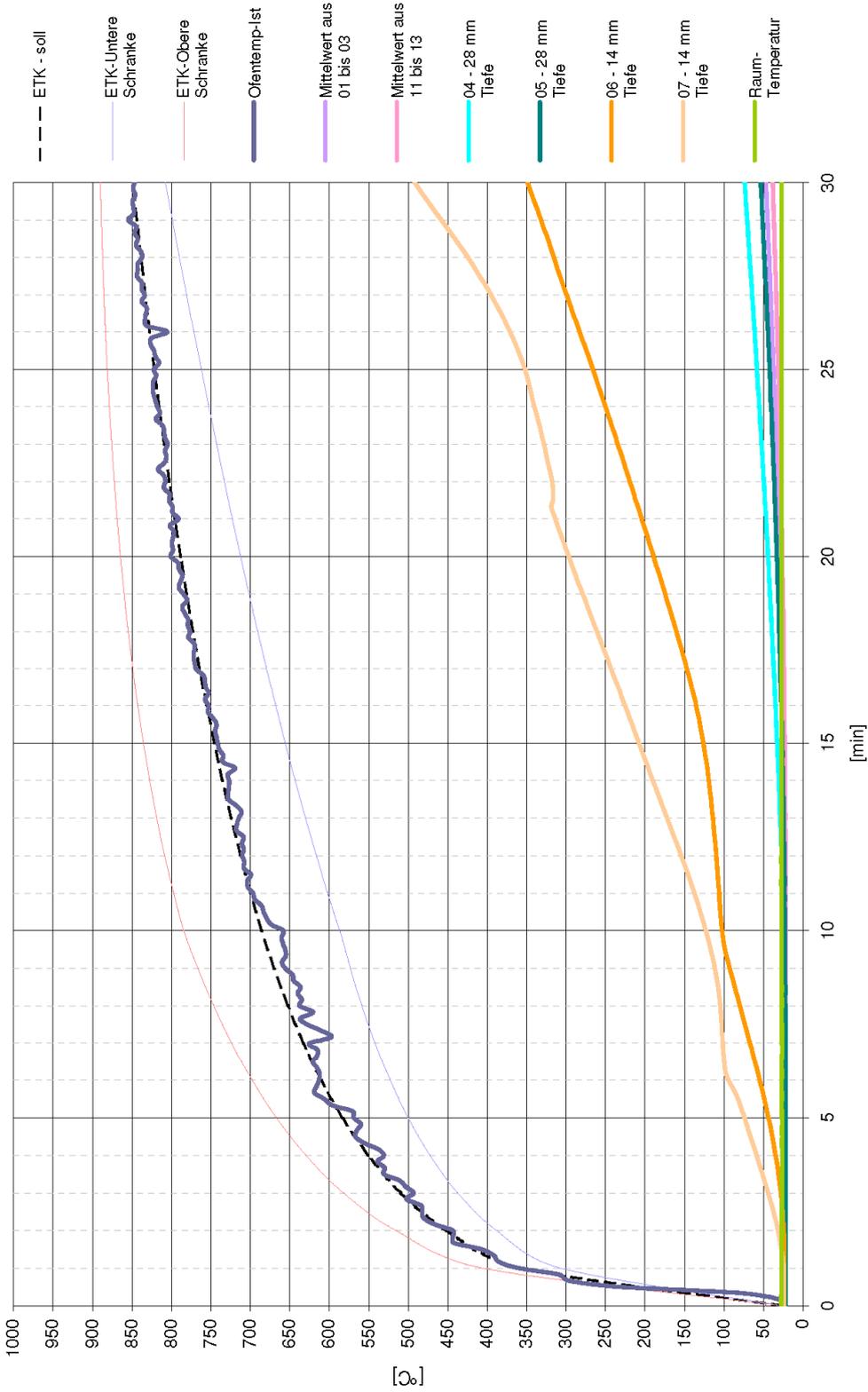
Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	28,6 mm
--	---------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	29	29	29	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	28	29	29	
	28	28	28	

**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs**

--

0.A.02 (P2)



Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 7



(a)



(b)



(c)

Probenholz 0.A.02 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 8

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 8**

Datum: 01.07.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. J. Wolfgruber

<b>Probekörper:</b>
<b>0.A.03</b> (P3)

Versuchsbeginn:	10:00 h	Temperatur:	25,0 °C
Versuchsende:	10:30 h	Temperatur:	26,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	10724,5 g
	Masse nach dem Versuch	10583,5 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	4203,6 g
	Masse nach dem Versuch	4209,0 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1549,1 g
	Masse nach dem Versuch	1312,2 g
	Masse darrtrocken	1211,6 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		9,82 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
11,2	11,1	11	11	12,2	13,5	17,9
		11,4		12,8		13,3
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		8,30 %				

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,6 %	
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]			
0	10	20	30
20,6	8,3	6,2	6,0

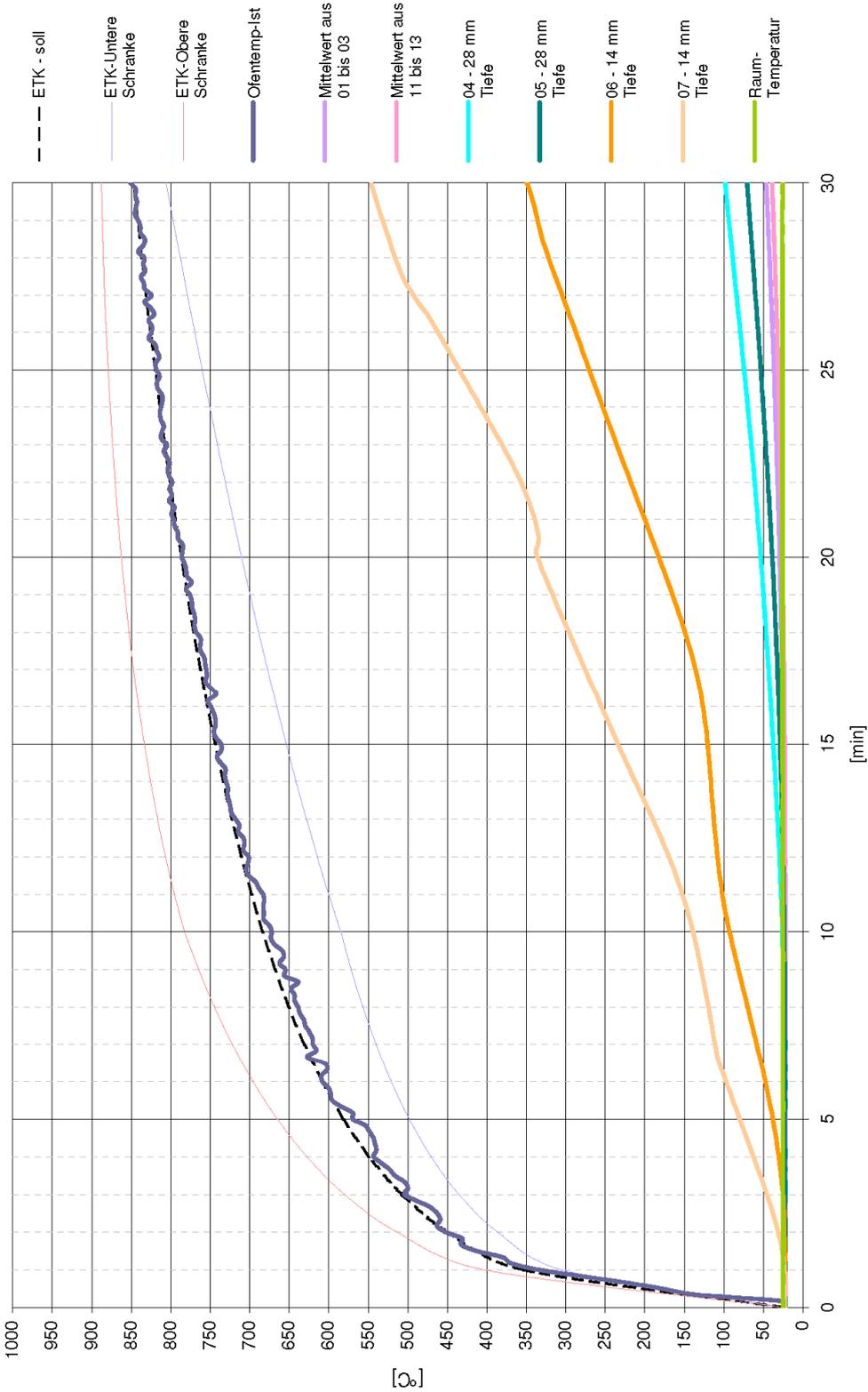
**Abbrandtiefe**

Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	28,0 mm
--	---------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	30	28	30	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	27	28	28	
	26	27	28	

**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs**

0.A.03 (P3)



Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 8



(a)



(b)



(c)

Probenholz 0.A.03 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 9

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 9**

Datum: 01.07.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. J. Wolfgruber

<b>Probekörper:</b>
<b>0.T.01</b> (P3)

Versuchsbeginn:	11:57 h	Temperatur:	27,0 °C
Versuchsende:	12:27 h	Temperatur:	28,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	10198,5 g
	Masse nach dem Versuch	9985,4 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	3855,6 g
	Masse nach dem Versuch	3866,2 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1402,0 g
	Masse nach dem Versuch	1159,2 g
	Masse darrtrocken	1144,9 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		0,00 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
5,92	6,3	6,4	10,6	11,4	11,4	11,8
			11,1	11,5	13,3	
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		1,25 %				

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,5 %	
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]			
0	10	20	30
20,5	5,4	5,4	5,3

**Abbrandtiefe**

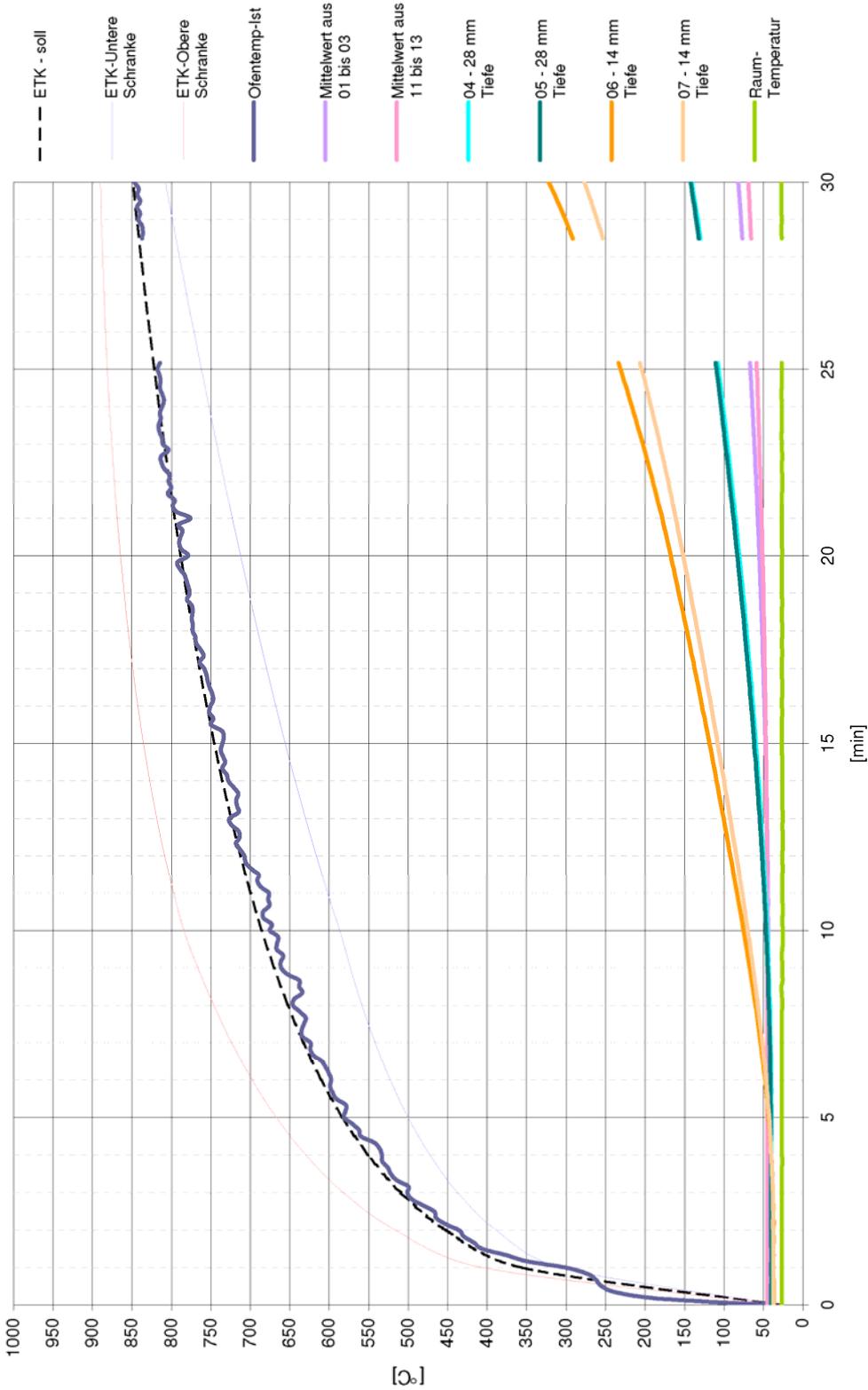
Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	24,1 mm
--	---------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	24	23	24	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	24	24	24	
	25	24	25	

**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs****ad Temperaturverlauf**

Ausfall des EDV-Systems zur Temperaturlaufzeichnung in der 25. Minute, Neustart der Messanlage, Werte werden zu Beginn der 28. Minute wieder einwandfrei aufgezeichnet.

0.T.01 (P3)



Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 9



(a)



(b)



(c)

Probenholz 0.T.01 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 10

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 10**

Datum: 02.07.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. J. Wolfgruber

<b>Probekörper:</b>
<b>1.A.03</b> (P3)

Versuchsbeginn:	09:50 h	Temperatur:	25,0 °C
Versuchsende:	10:20 h	Temperatur:	26,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	10712,5 g
	Masse nach dem Versuch	10500,9 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	4284,9 g
	Masse nach dem Versuch	4285,9 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1504,8 g
	Masse nach dem Versuch	1285,4 g
	Masse darrtrocken	1183,4 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		9,82 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
11,0	10,9	10,9	12,6	14,4	15,4	15,0
			15,4	17,2	15,0	
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		8,62 %				

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,6 %	
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]			
0	10	20	30
20,6	9,6	8,0	7,5

**Abbrandtiefe**

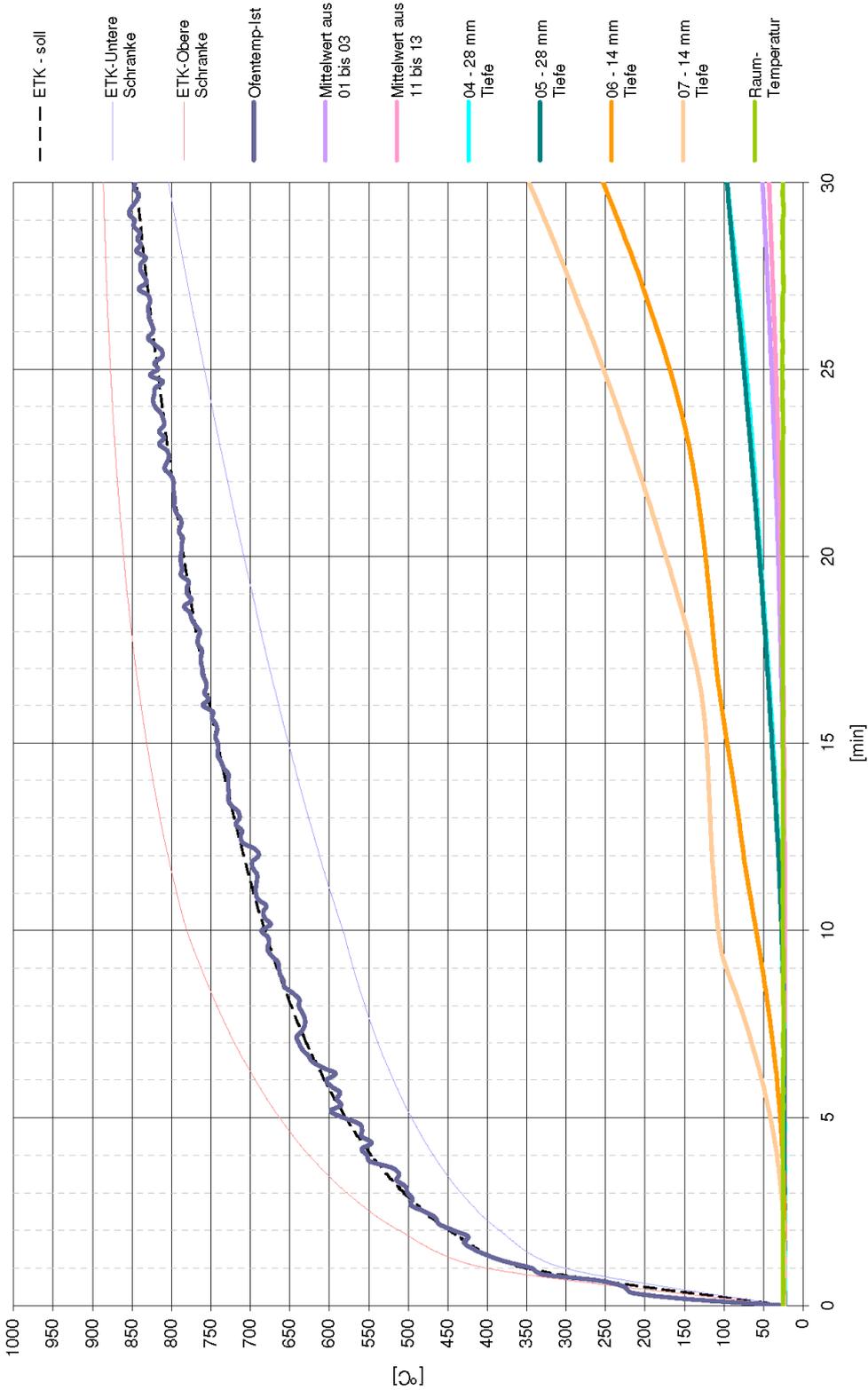
Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	27,4 mm
--	---------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	29	29	28	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	28	28	28	
	26	25	26	

**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs**

--

1.A.03 (P3)



Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 10



(a)



(b)



(c)

Probenholz 1.A.03 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 11

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 11**

Datum: 03.07.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. J. Wolfgruber

<b>Probekörper:</b>
<b>1.B.03</b> (P3)

Versuchsbeginn:	10:37 h	Temperatur:	27,0 °C
Versuchsende:	11:07 h	Temperatur:	29,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	11138,5 g
	Masse nach dem Versuch	10944,9 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	4596,2 g
	Masse nach dem Versuch	4591,6 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1587,4 g
	Masse nach dem Versuch	1377,6 g
	Masse darrtrocken	1201,4 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		17,98 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
17,2	17,2	17,3	17,7	18,1	22,4	25,1
		17,7		20,4		24,7
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		14,66 %				

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,7 %	
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]			
0	10	20	30
20,7	9,3	7,4	6,8

**Abbrandtiefe**

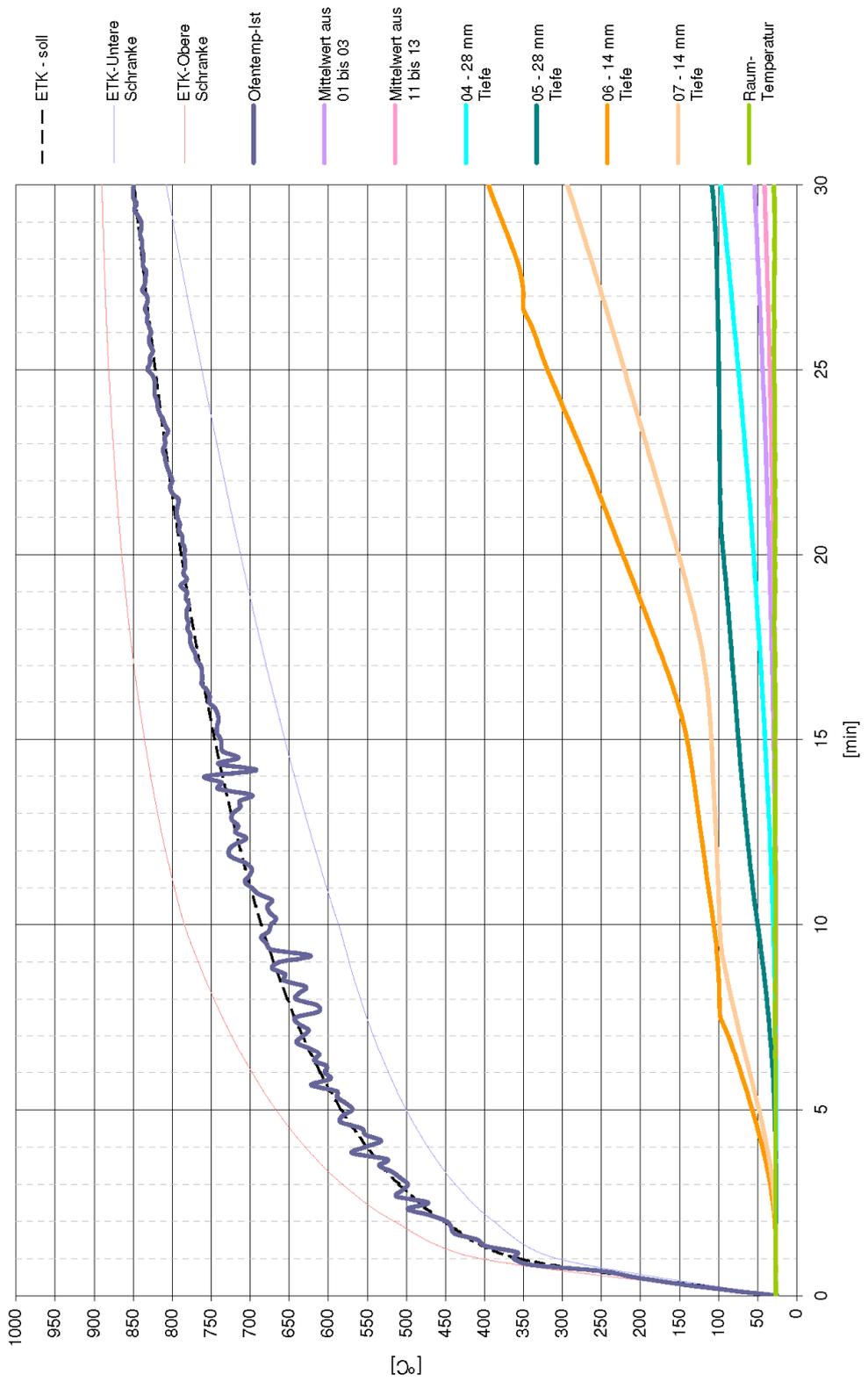
Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	28,8 mm
--	---------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	28	29	28	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	29	28	28	
	30	29	30	

**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs**

--

1.B.03 (P3)



Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 11



(a)



(b)



(c)

Probenholz 1.B.03 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 12

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 12**

Datum: 03.07.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. J. Wolfgruber

<b>Probekörper:</b>
<b>0.B.03</b> (P3)

Versuchsbeginn:	13:30 h	Temperatur:	29,0 °C
Versuchsende:	14:00 h	Temperatur:	29,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	11184,5 g
	Masse nach dem Versuch	11045,4 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	4664,7 g
	Masse nach dem Versuch	4667,2 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1584,8 g
	Masse nach dem Versuch	1369,7 g
	Masse darrtrocken	1200,7 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		17,98 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
16,7	16,7	16,6	17,1	17,8	20,6	22,0
			17,6	17,6	21,6	
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		14,07%				

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,6 %	
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]			
0	10	20	30
20,6	6,4	5,4	5,8

**Abbrandtiefe**

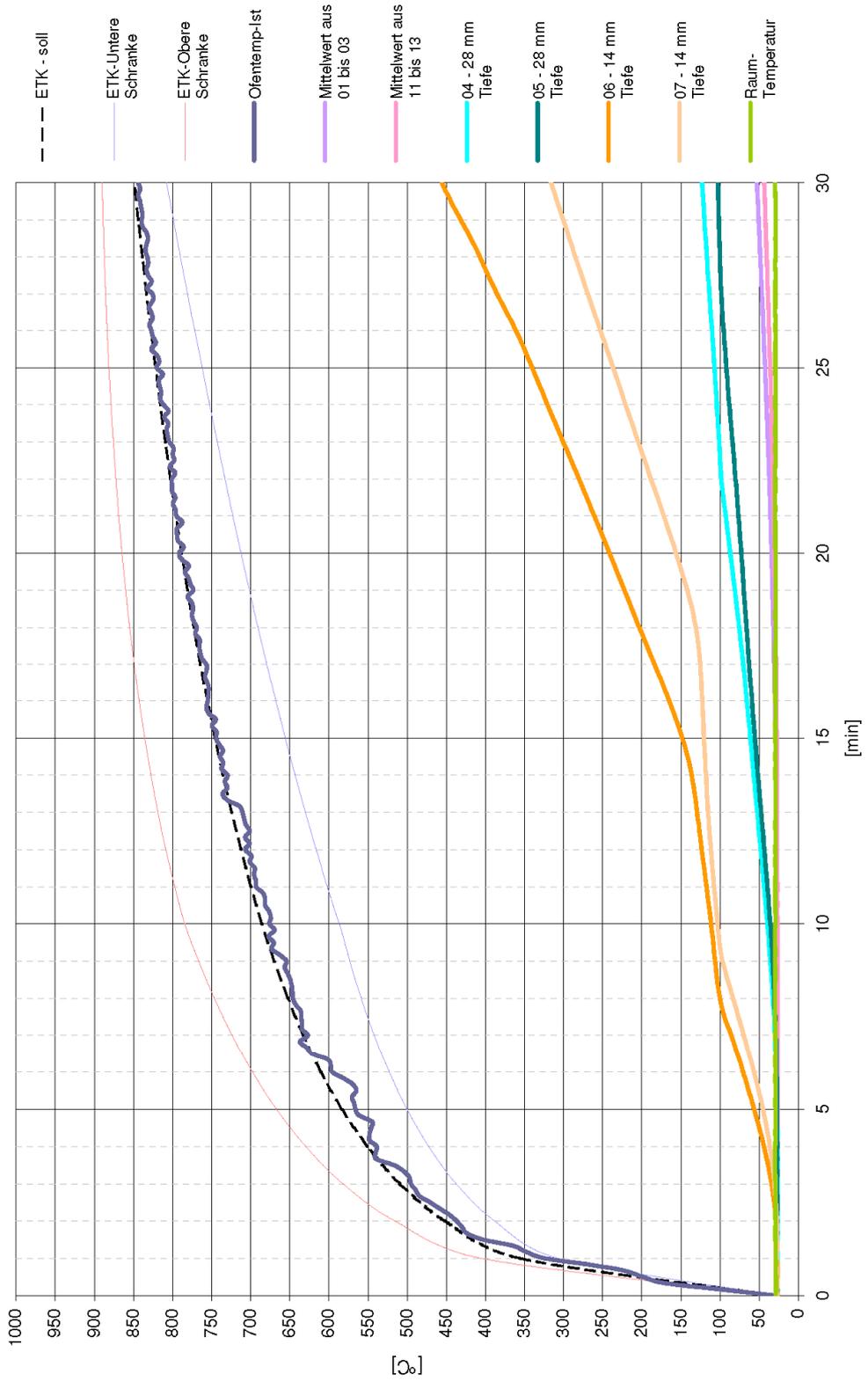
Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	28,8 mm
--	---------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	29	27	27	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	30	29	29	
	29	29	30	

**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs****ad Temperaturverlauf**

Tausch von Ofenthermoelement V in der 3. Minute.

0.B.03 (P3)



Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 12



(a)



(b)



(c)

Probenholz 0.B.03 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 13

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 13**

Datum: 03.07.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. J. Wolfgruber

<b>Probekörper:</b>
<b>0.B.02</b> (P2)

Versuchsbeginn:	15:53 h	Temperatur:	28,0 °C
Versuchsende:	16:23 h	Temperatur:	30,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	11162,5 g
	Masse nach dem Versuch	10975,9 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	4595,0 g
	Masse nach dem Versuch	4594,5 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1615,1 g
	Masse nach dem Versuch	1395,8 g
	Masse darrtrocken	1227,7 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		17,98 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
15,9	15,9	16,1	16,4	17,0	17,5	17,7
			16,6	17,1	17,7	
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		13,69 %				

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,6 %	
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]			
0	10	20	30
20,6	5,6	5,2	5,2

**Abbrandtiefe**

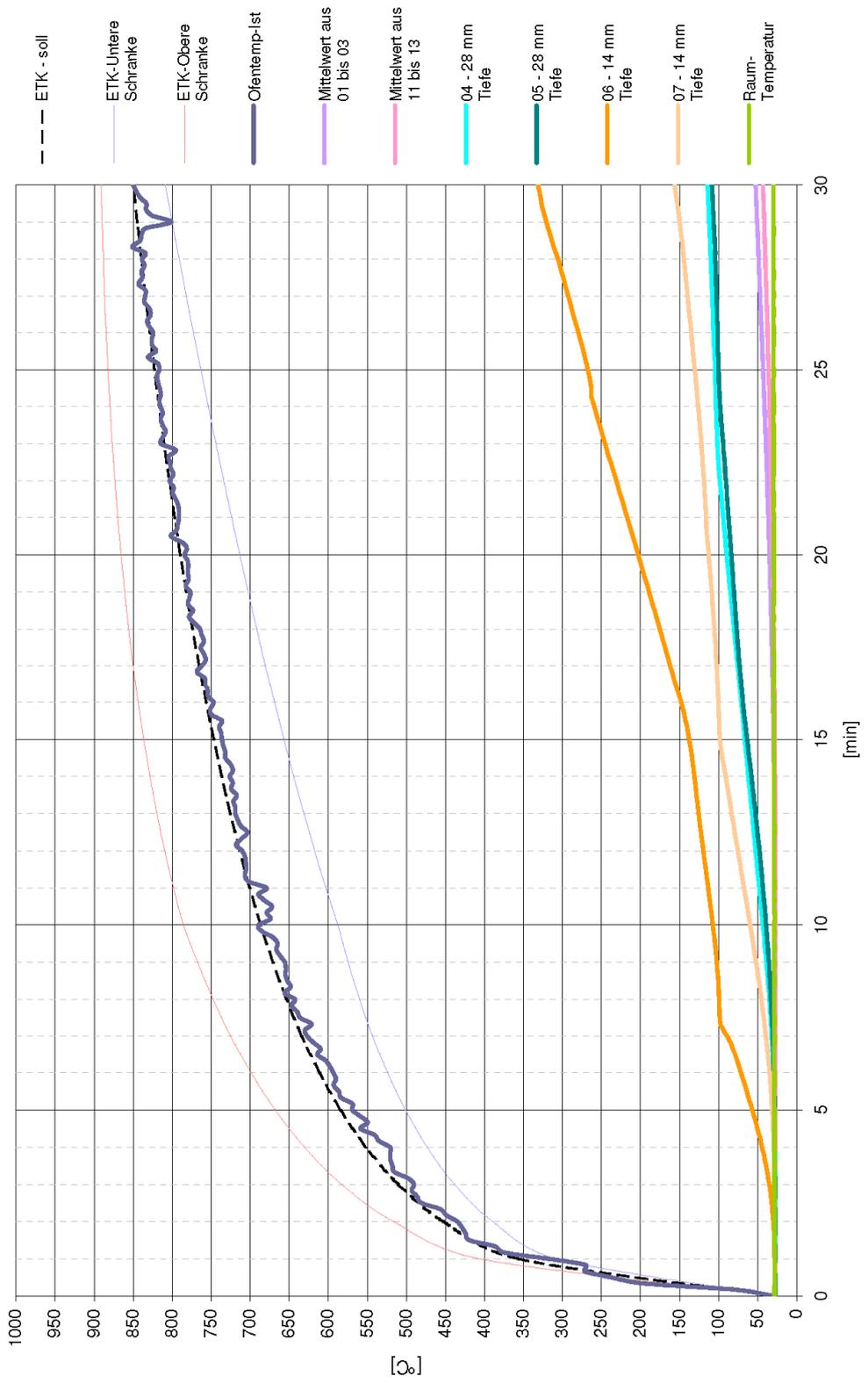
Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	29,7 mm
--	---------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	29	30	29	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	29	30	30	
	30	30	30	

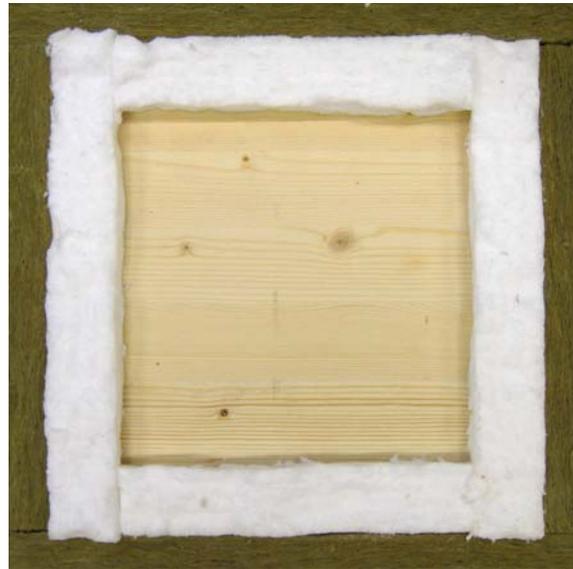
**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs**

--

0.B.02 (P2)



Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 13



(a)



(b)



(c)

Probenholz 0.B.02 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 14

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 14**

Datum: 03.07.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. J. Wolfgruber

<b>Probekörper:</b>
<b>1.B.02</b> (P2)

Versuchsbeginn:	18:23 h	Temperatur:	28,0 °C
Versuchsende:	18:53 h	Temperatur:	30,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	10936,5 g
	Masse nach dem Versuch	10755,4 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	4444,9 g
	Masse nach dem Versuch	4443,2 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1554,0 g
	Masse nach dem Versuch	1183,1 g
	Masse darrtrocken	1183,1 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		17,98 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
16,9	17,1	17,3	17,3	17,6	18,3	21,3
		18,0		19,4		28,7
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		13,88 %				

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,5 %	
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]			
0	10	20	30
20,5	5,6	3,4	4,1

**Abbrandtiefe**

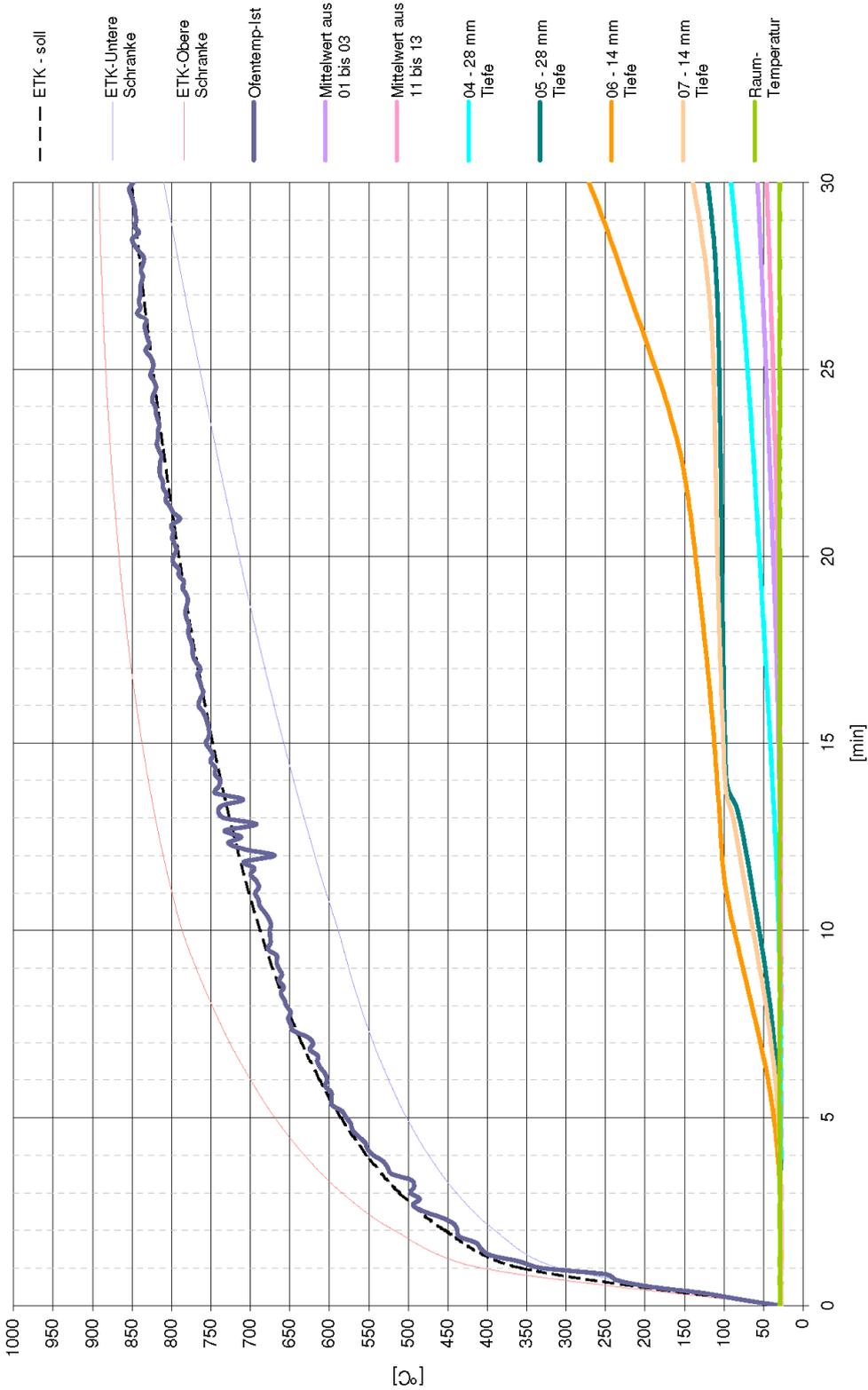
Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	29,6 mm
--	---------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	29	29	29	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	30	29	30	
	30	30	30	

**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs**

--

1.B.02 (P2)



Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 14



(a)



(b)



(c)

Probenholz 1.B.02 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 15

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 15**

Datum: 08.07.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. J. Wolfgruber

**Probekörper:**

**1.A.04**  
(P2)

Versuchsbeginn:	12:42 h	Temperatur:	24,0 °C
Versuchsende:	13:42 h	Temperatur:	22,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	10770,0 g
	Masse nach dem Versuch	10163,9 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	4244,5 g
	Masse nach dem Versuch	4246,6 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1571,1 g
	Masse nach dem Versuch	940,3 g
	Masse darrtrocken	911,9 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		9,82 %											
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]													
0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
10,9	10,9	10,8	11	11,5	11,8	14	14,1	14,3	13,6	10,4	22,3 109 °C	17,9 150 °C	
			11,3	11,7	13,7								
in Minute 52,5 sind 100 °C erreicht -> 19,6%, ab 100 °C ist keine Temperaturkompensation mit dem Messgerät möglich Werte in Minute 55 und 60 sind daher mit einer Temperaturkompensation von 100 °C angegeben													
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		3,12 %											

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,6%				
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]						
0	10	20	30	40	50	60
20,6	10,0	8,1	7,0	7,6	7,0	7,4

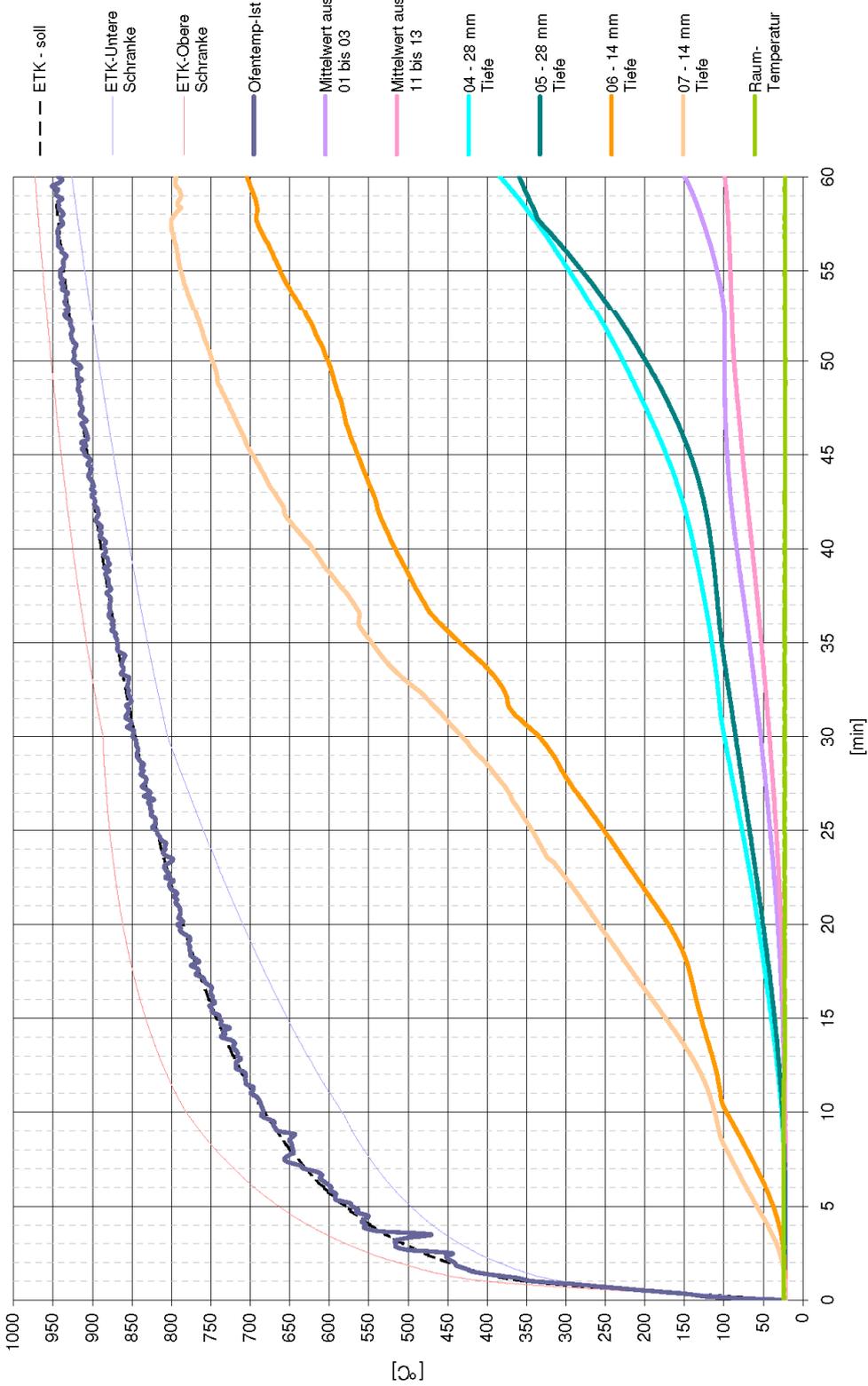
**Abbrandtiefe**

Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	9,9 mm
--	--------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	10	10	10	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	10	12	11	
	9	8	9	

**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs**

1.A.04 (P2)



Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 15



(a)



(b)



(c)

Probenholz 1.A.04 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 16

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 16**

Datum: 08.07.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. H. Bruckner

<b>Probekörper:</b>
<b>0.A.04</b> (P1)

Versuchsbeginn:	15:20 h	Temperatur:	22,0 °C
Versuchsende:	16:20 h	Temperatur:	23,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	10663,5 g
	Masse nach dem Versuch	10047,9 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	4205,4 g
	Masse nach dem Versuch	4221,1 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1554,3 g
	Masse nach dem Versuch	819,6 g
	Masse darrtrocken	793,2 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		9,82 %											
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]													
0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
10,9	10,8	11,2	15,7	14,0	13,5	19,6	18,8	17,1	15,0	14,7	14,5 116°C	14,0 153°C	
			14,4	13,4	19,5								
in Minute 50,5 sind 100°C erreicht -> 14,8%, ab 100°C ist keine Temperaturkompensation mit dem Messgerät möglich Werte in Minute 55 und 60 sind daher mit einer Temperaturkompensation von 100°C angegeben													
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		3,12 %											

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,6%				
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]						
0	10	20	30	40	50	60
20,6	9,6	7,6	7,7	7,1	7,5	7,1

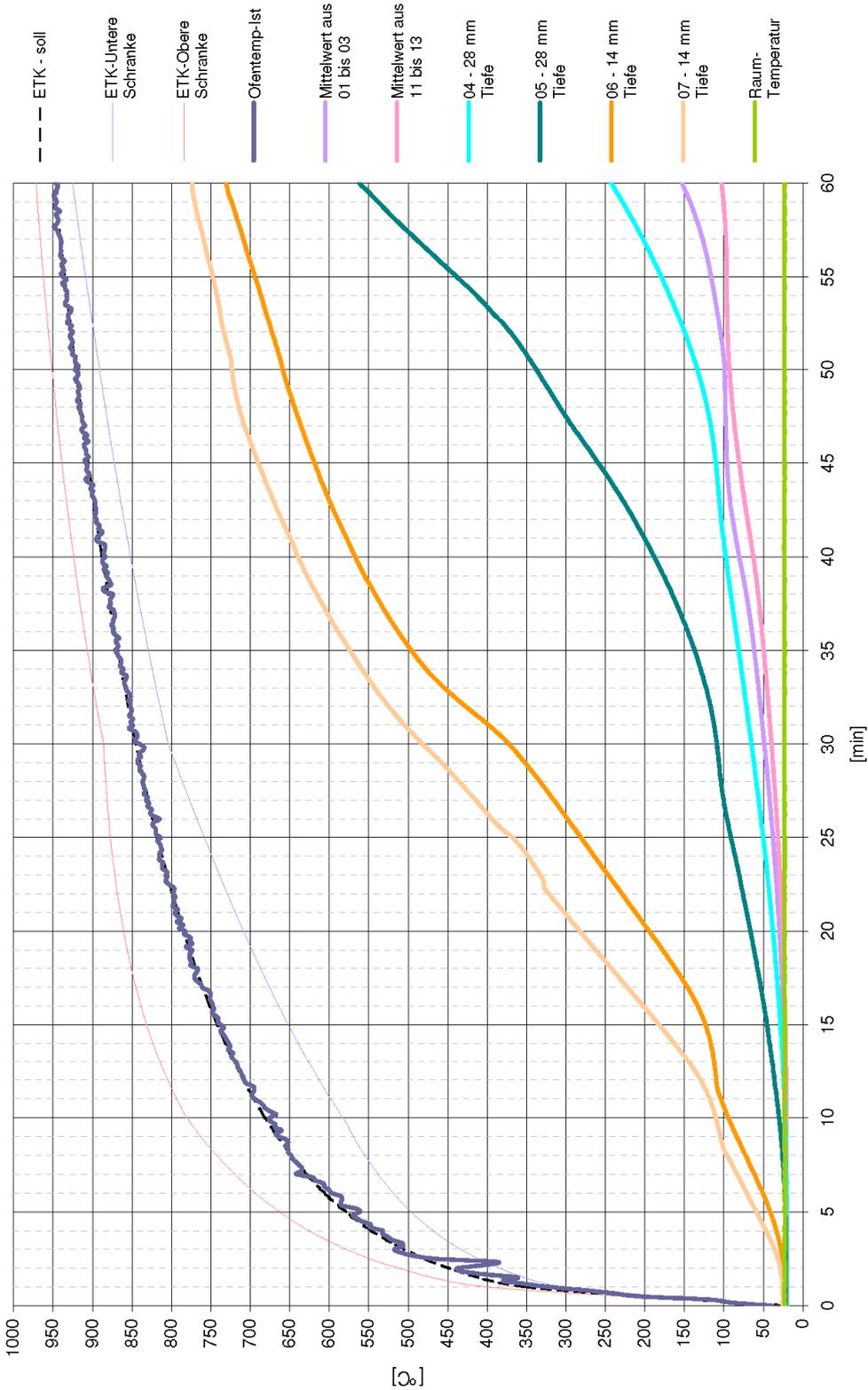
**Abbrandtiefe**

Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	8,8 mm
--	--------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	10	9	9	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	9	8	9	
	8	8	9	

**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs**

0.A.04 (P1)



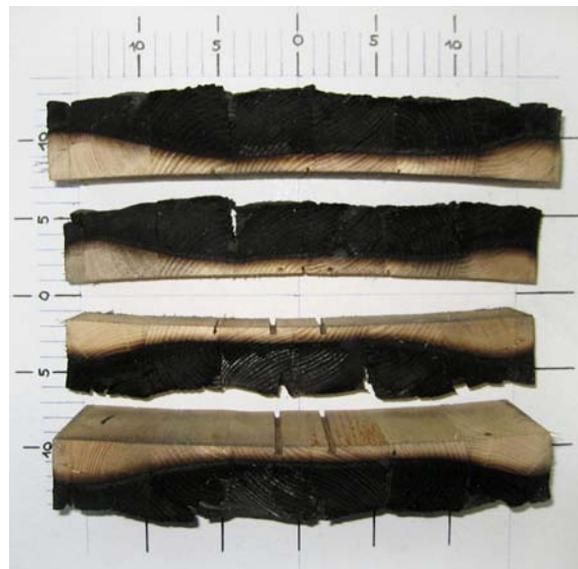
Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 16



(a)



(b)



(c)

Probenholz 0.A.04 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 17

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 17**

Datum: 10.07.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. J. Wolfgruber

<b>Probekörper:</b>
<b>0.B.04</b> (P2)

Versuchsbeginn:	11:13 h	Temperatur:	23,0 °C
Versuchsende:	12:13 h	Temperatur:	24,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	10679,5 g
	Masse nach dem Versuch	10042,9 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	4183,7 g
	Masse nach dem Versuch	4197,0 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1575,7 g
	Masse nach dem Versuch	897,5 g
	Masse darrtrocken	850,4 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		17,98 %											
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]													
0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
14,8	14,7	14,8	14,9	15,3	16,2	16,5	18,3	17,5	16,2	12,4	12,4	12,8	
												108 °C	127 °C
15,2   15,3   16,3													
in Minute 51,17 sind 100°C erreicht -> 12,0%, ab 100°C ist keine Temperaturkompensation mit dem Messgerät möglich Werte in Minute 55 und 60 sind daher mit einer Temperaturkompensation von 100°C angegeben													
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		5,53 %											

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,7 %				
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]						
0	10	20	30	40	50	60
20,7	10,2	7,9	7,3	7,5	7,1	7,1

**Abbrandtiefe**

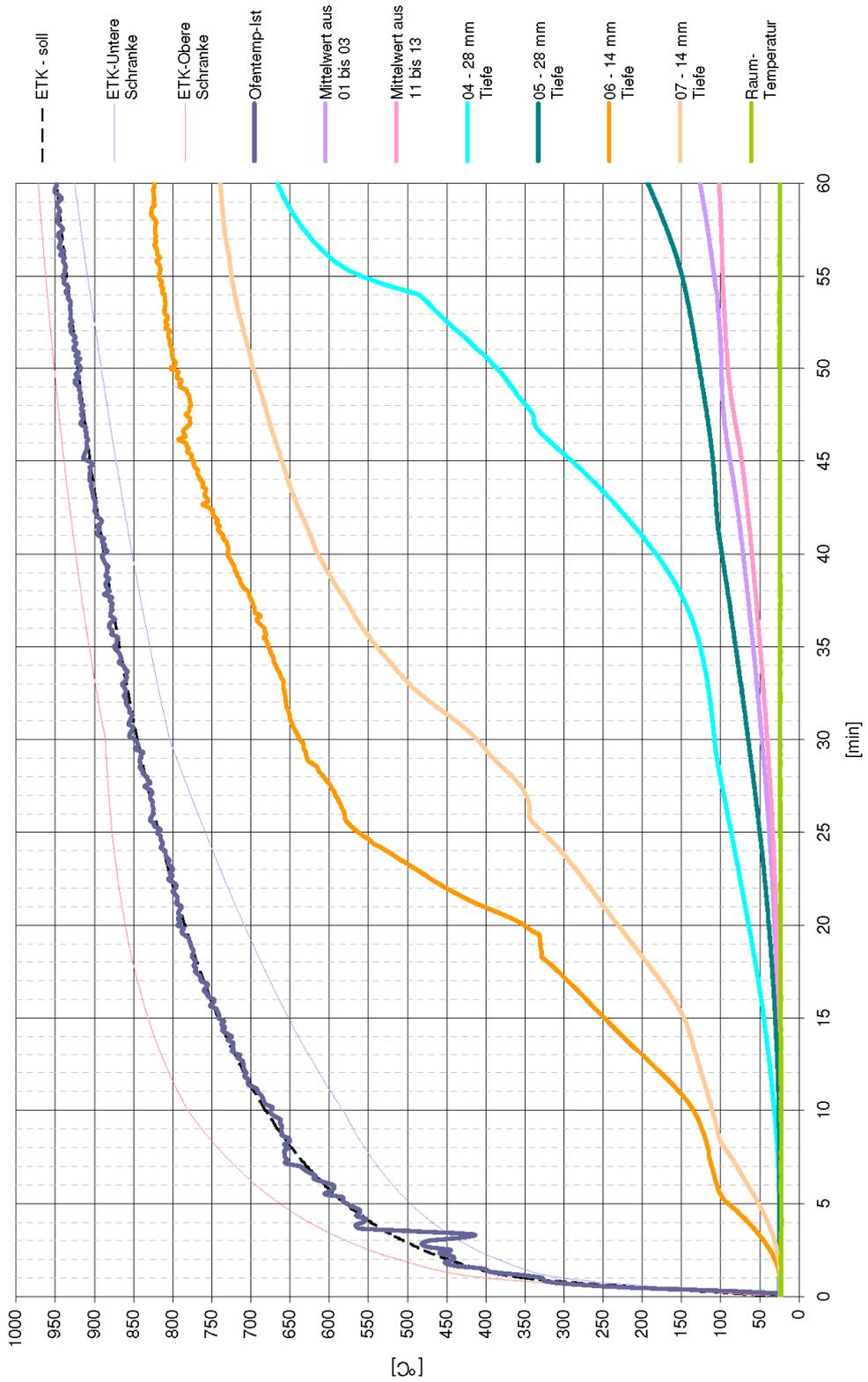
Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	11,3 mm
--	---------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	14	9	9	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	12	10	12	
	13	11	12	

**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs**

--

0.B.04 (P2)



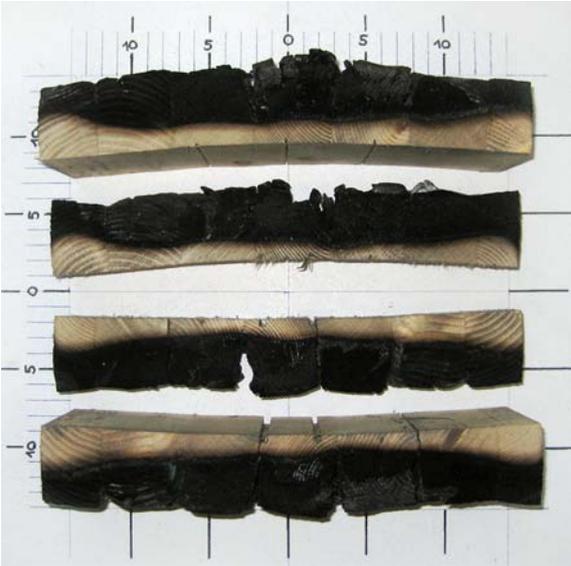
Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 17



(a)



(b)



(c)

Probenholz 0.B.04 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 18

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 18**

Datum: 10.07.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. J. Wolfgruber

<b>Probekörper:</b>
<b>1.B.04</b> (P3)

Versuchsbeginn:	15:01 h	Temperatur:	24,0 °C
Versuchsende:	16:01 h	Temperatur:	25,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	10657,5 g
	Masse nach dem Versuch	10089,9 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	4213,7 g
	Masse nach dem Versuch	4214,5 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1483,6 g
	Masse nach dem Versuch	890,5 g
	Masse darrtrocken	847,1 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		17,98 %											
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]													
0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
14,9	14,9	14,9	15,2	15,6	17,1	21,0	22,8	38,8	49,8	48,6	27,3	17,6	118°C
15,4    15,9    20,3													
in Minute 57 sind 100°C erreicht -> 21,7%, ab 100°C ist keine Temperaturkompensation mit dem Messgerät möglich Wert in Minute 60 ist daher mit einer Temperaturkompensation von 100°C angegeben													
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		5,53 %											

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,5 %				
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]						
0	10	20	30	40	50	60
20,5	10,2	7,9	7,3	7,2	7,2	7,3

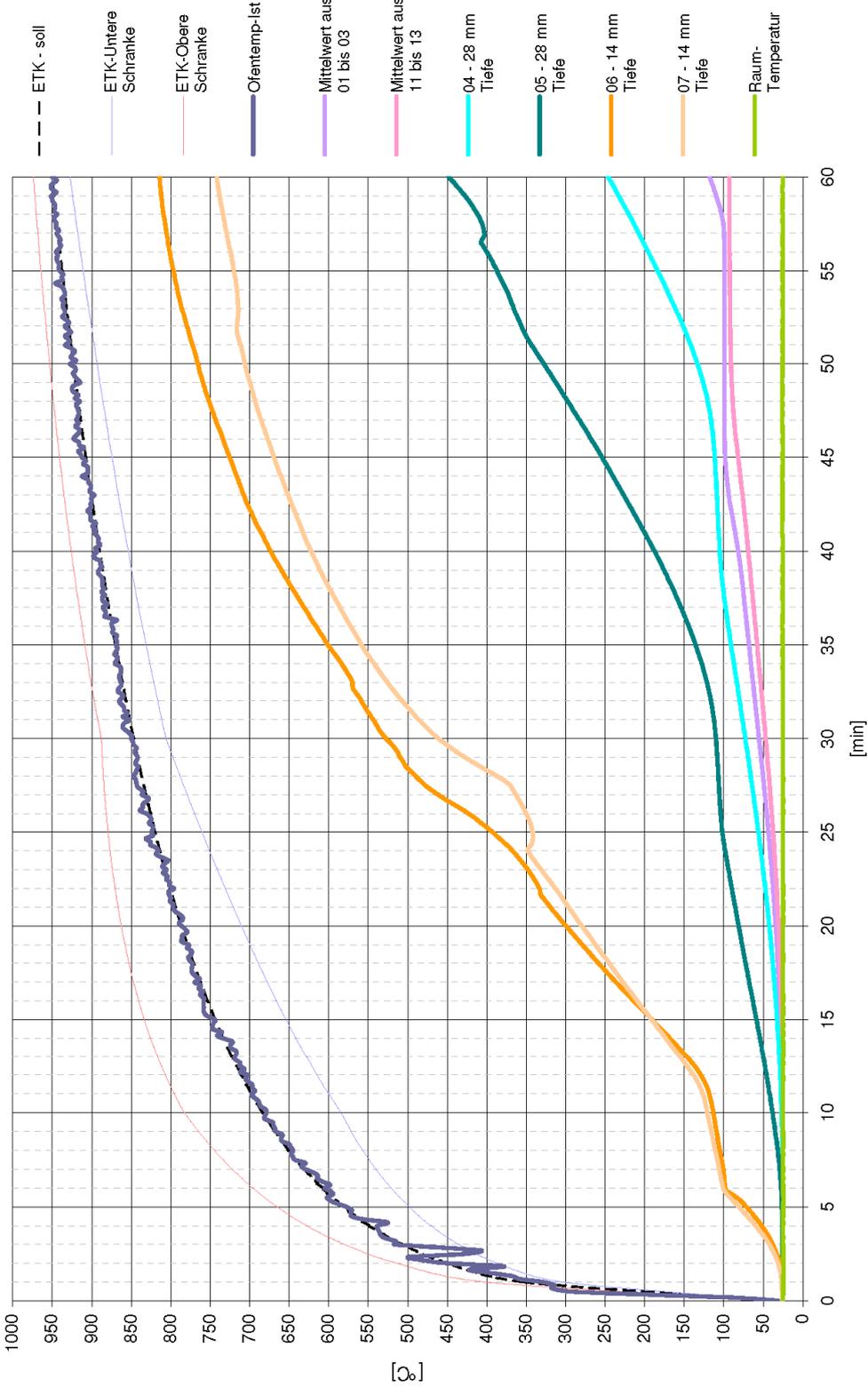
**Abbrandtiefe**

Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	9,7 mm
--	--------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	8	8	8	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	10	9	9	
	12	12	11	

**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs**

1.B.04 (P3)



Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 18



(a)



(b)



(c)

Probenholz 1.B.04 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 19

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 19**

Datum: 14.07.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. J. Wolfgruber

<b>Probekörper:</b>
<b>0.T.02</b> (P2)

Versuchsbeginn:	10:22 h	Temperatur:	21,0 °C
Versuchsende:	10:52 h	Temperatur:	21,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	10085,5 g
	Masse nach dem Versuch	9822,4 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	3829,8 g
	Masse nach dem Versuch	3836,8 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1342,0 g
	Masse nach dem Versuch	1040,8 g
	Masse darrtrocken	1033,1 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		0,00 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
5,2	5,0	5,2	5,2	6,8	10,1	9,9
		5,4		8,6		10,4
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		0,75 %				

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,8%	
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]			
0	10	20	30
20,8	9,8	8,3	8,5

**Abbrandtiefe**

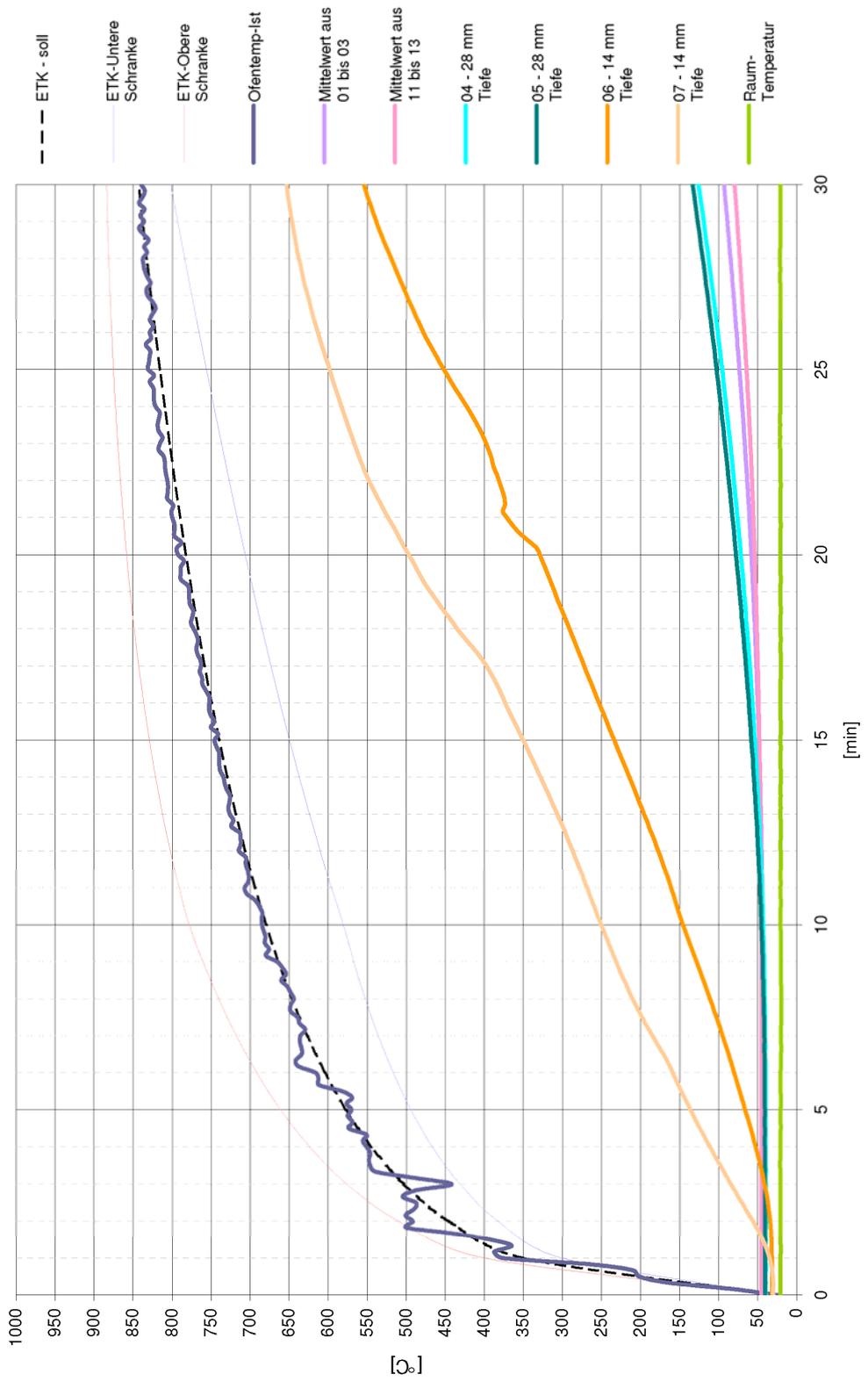
Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	21,3 mm
--	---------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	21	20	21	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	21	23	21	
	22	21	22	

**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs**

--	--

0.T.02 (P2)



Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 19



(a)



(b)



(c)

Probenholz 0.T.02 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 20

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 20**

Datum: 14.07.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. J. Wolfgruber

<b>Probekörper:</b>
<b>1.T.02</b> (P3)

Versuchsbeginn:	12:31 h	Temperatur:	21,0 °C
Versuchsende:	13:01 h	Temperatur:	22,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	9962,0 g
	Masse nach dem Versuch	9707,4 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	3706,3 g
	Masse nach dem Versuch	3714,5 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1321,9 g
	Masse nach dem Versuch	1061,2 g
	Masse darrtrocken	1053,7 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		0,00 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
4,9	5,1	5,4	6,9	7,2	6,6	6,4
			7,5	6,9	6,4	
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		0,71 %				

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,8%	
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]			
0	10	20	30
20,8	11,2	8,2	8,1

**Abbrandtiefe**

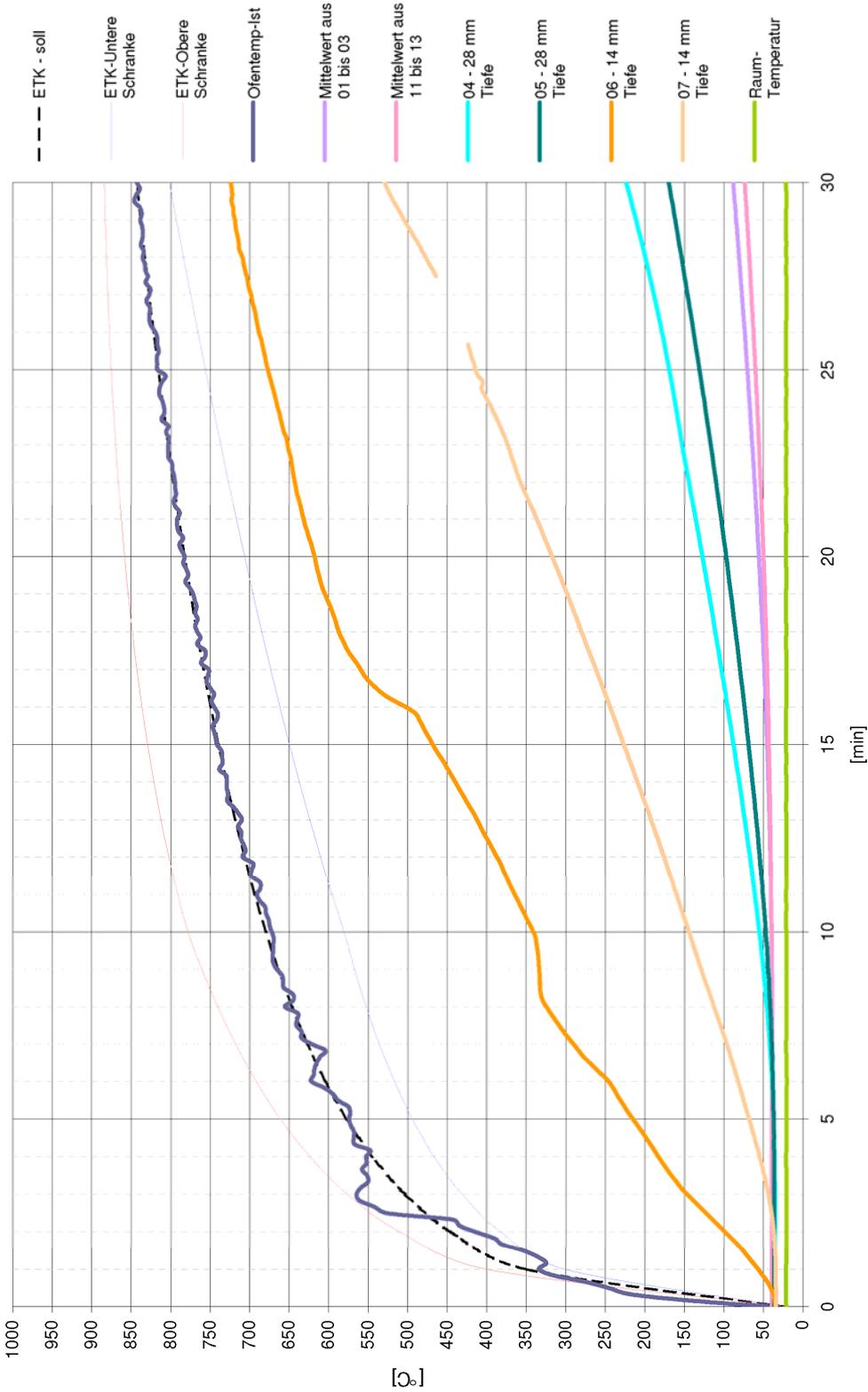
Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	22,4 mm
--	---------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	22	23	23	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	22	23	22	
	23	22	22	

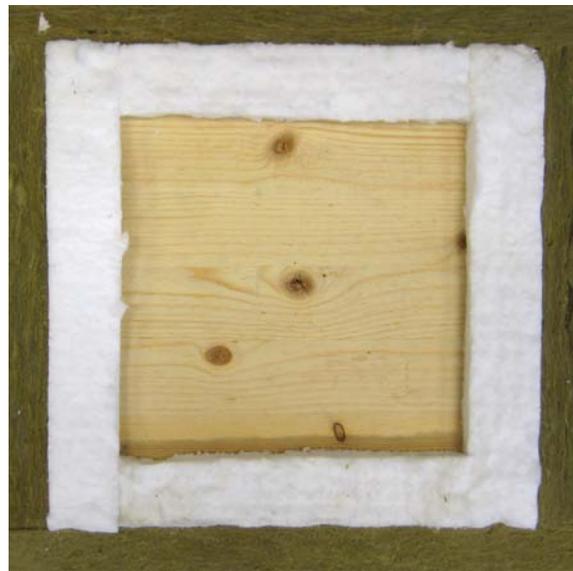
**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs**

--

1.T.02 (P3)



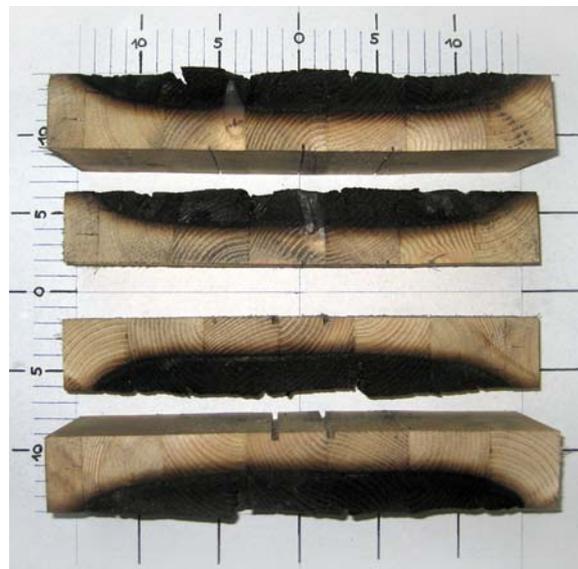
Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 20



(a)



(b)



(c)

Probenholz 1.T.02 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 21

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 21**

Datum: 14.07.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. J. Wolfgruber

<b>Probekörper:</b>
<b>0.T.03</b> (P1)

Versuchsbeginn:	15:06 h	Temperatur:	21,0 °C
Versuchsende:	15:36 h	Temperatur:	22,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	10198,5 g
	Masse nach dem Versuch	9927,4 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	3825,4 g
	Masse nach dem Versuch	3825,4 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1387,5 g
	Masse nach dem Versuch	1095,7 g
	Masse darrtrocken	1089,3 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		0,00 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
5,1	5,3	5,5	5,2	5,3	6,2	6,4
			5,2	5,6	6,5	
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		0,59 %				

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,8%	
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]			
0	10	20	30
20,8	10,4	8,3	8,2

**Abbrandtiefe**

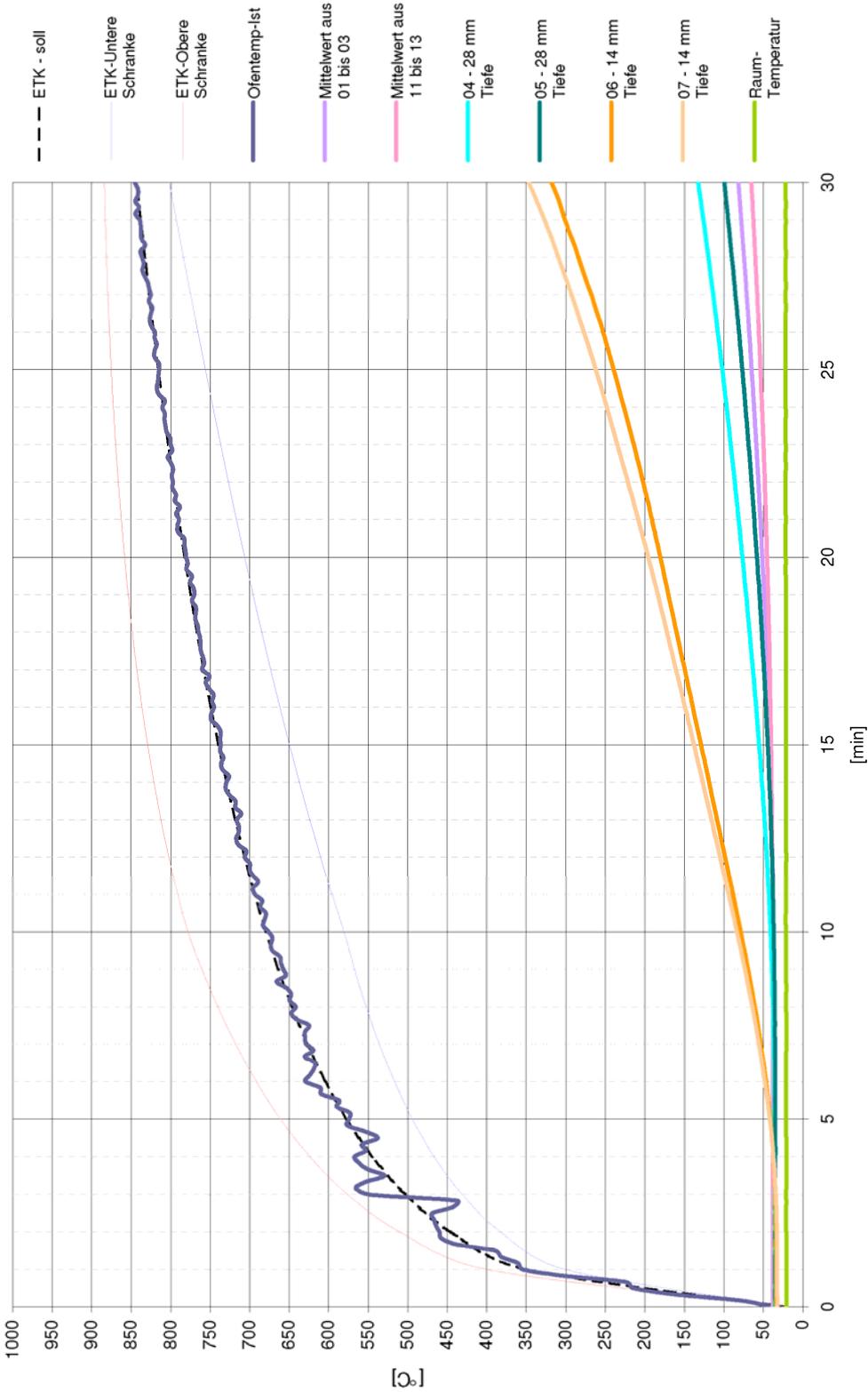
Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	23,2 mm
--	---------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	23	22	24	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	23	24	24	
	23	23	23	

**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs**

--

0.T.03 (P1)



Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 21



(a)



(b)



(c)

Probenholz 0.T.03 vor und nach dem Brandversuch

## Brandversuch Nr. 22

**BRANDVERSUCHSPROTOKOLL Nr.: 22**

Datum: 14.07.2008

Ort: Versuchslabor am Institut für Hochbau & Technologie  
Zentrum für Baustoffforschung der Technischen Universität Wien  
1030 Wien, Adolf-Blamauergasse 1-3

Anwesende Personen: Hr. M. Halper, Hr. J. Wolfgruber

<b>Probekörper:</b>
<b>1.T.03</b> (P1)

Versuchsbeginn:	17:37 h	Temperatur:	22,0 °C
Versuchsende:	18:07 h	Temperatur:	22,0 °C

**Masse**

Probekörper	Masse vor dem Versuch	10148,0 g
	Masse nach dem Versuch	9871,4 g
Probenträger	Masse vor dem Versuch	3830,5 g
	Masse nach dem Versuch	3838,5 g
Probenholz	Masse vor dem Versuch	1349,5 g
	Masse nach dem Versuch	1086,7 g
	Masse darrtrocken	1080,2 g

**Holzfeuchte**

Holzfeuchte aus Labormessung vor dem Versuch		0,00 %				
Holzfeuchte aus Widerstandsmessung nach t Minuten in [%]						
0	5	10	15	20	25	30
5,3	5,3	5,3	5,5	7,1	7,3	7,0
			6,6	7,3	7,3	
Holzfeuchte aus Labormessung nach dem Versuch		0,60 %				

**Temperaturverlauf**

Die Temperatur in der Brandkammer, die Temperatur am Probekörper sowie die Raumtemperatur im Brandlabor werden mittels NiCr-Ni Thermoelementen gemessen und per EDV-System erfasst und dargestellt!

**Sauerstoffkonzentration im Brandraum**

Sauerstoffkonzentration vor dem Versuch		20,8%	
Sauerstoffkonzentration nach t Minuten in [%]			
0	10	20	30
20,8	10,4	8,7	8,1

**Abbrandtiefe**

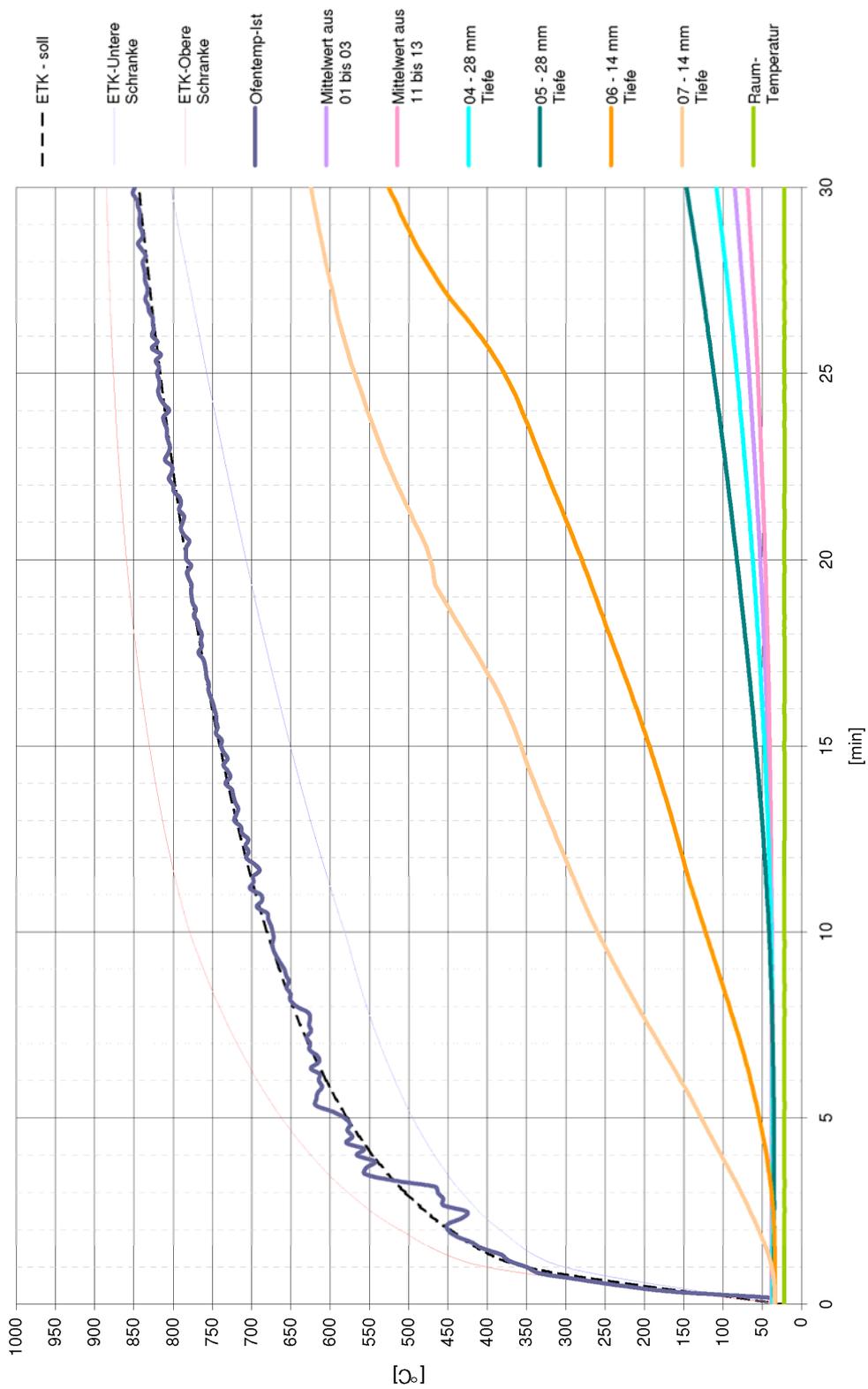
Gesunde mittlere verbliebene Holzdicke	21,6 mm
--	---------

Gesunde verbliebene Holzdicke gemessen in [mm] am Kernquerschnitt im Raster von 5,0 x 5,0 cm	22	23	22	== Elektrodenposition für die Feuchtemessung
	21	21	22	
	21	21	21	

**Besondere Vorkommnisse während des Versuchsverlaufs**

--

1.T.03 (P1)



Temperaturverlauf von Brandversuch Nr. 22



(a)

Aufnahme der unbeflammten Probenholzseite



(b)



(c)

Probenholz 1.T.03 vor und nach dem Brandversuch

## Messwerte aus der Analyse der Brandkammeratmosphäre während des Brandversuchs

<b>1.A.00 (P1)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
18.06.2008 18:32	20,8	-	-	-	-	-	-	0,0
18.06.2008 18:37	12,3	8,41	62	43	2,41	104	10,1	4,1
18.06.2008 18:42	6,9	Werte nicht gespeichert						
18.06.2008 18:47	6,6	13,92	193	222	1,46	324	79,7	53,3
18.06.2008 18:52	6,2	14,31	43	51	1,42	72	71,3	49
18.06.2008 18:57	6,1	14,4	23	27	1,41	38	67,2	46,5
18.06.2008 19:02	5,9	14,5	9	11	1,4	15	72,6	50,6
<b>1.B.01 (P1)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
26.06.2008 12:41	20,7	-	-	1	-	-	-	0
26.06.2008 13:18	10,1	10,54	106	92	1,93	177	73,1	37
26.06.2008 13:28	8	12,57	22	23	1,62	37	69,9	42,2
26.06.2008 13:37	7,5	13,05	4	4	1,56	6	71,9	45,1
<b>0.B.01 (P1)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
26.06.2008 15:46	20,7	-	-	1	-	-	-	0
26.06.2008 15:58	7,8	12,76	409	432	1,59	687	43,4	26,6
26.06.2008 16:08	6,5	14,02	63	73	1,45	106	62,5	42,1
26.06.2008 16:18	8,4	12,18	5	5	1,67	8	69,2	40,5
<b>1.A.01 (P1)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
27.06.2008 10:27	20,7	-	-	0	-	-	-	0
27.06.2008 10:40	8,6	11,99	438	434	1,69	735	79,9	46
27.06.2008 10:50	6,5	14,02	34	40	1,45	58	68,4	46,1
27.06.2008 11:00	6,7	13,82	4	5	1,47	7	69,4	46,1
<b>0.A.01 (P1)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
27.06.2008 14:36	20,6	-	-	0	-	-	-	0
27.06.2008 14:48	10,2	10,44	903	780	1,94	1517	43,2	21,7

27.06.2008 14:58	5,5	14,98	152	189	1,35	256	63,9	46
27.06.2008 15:15	5,5	14,98	14	17	1,35	23	66,8	48,1
<b>1.A.02 (P2)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
30.06.2008 11:34	20,7	-	-	0	-	-	-	0
30.06.2008 11:46	9,7	10,92	123	111	1,86	206	79,6	41,8
30.06.2008 11:56	7,5	13,05	11	12	1,56	19	74	46,4
30.06.2008 12:06	7,9	12,66	2	2	1,6	3	72,8	44,3
<b>1.T.01 (P2)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
30.06.2008 15:25	20,6	-	-	0	-	-	-	0
30.06.2008 15:37	8,3	12,28	397	403	1,65	666	72,4	42,7
30.06.2008 15:47	6,5	14,02	47	54	1,45	78	67	45,1
30.06.2008 15:56	5,9	14,6	7	8	1,39	11	72,4	50,8
<b>0.A.02 (P2)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
30.06.2008 17:42	20,6	-	-	1	-	-	-	0
30.06.2008 17:54	4,6	15,85	688	902	1,28	1155	57,8	44
30.06.2008 18:04	2,5	17,88	242	358	1,14	406	63,1	54,2
30.06.2008 18:14	4,1	16,34	39	53	1,24	66	65,1	51,1
<b>0.A.03 (P3)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
01.07.2008 09:58	20,6	-	-	0	-	-	-	0
01.07.2008 10:10	8,3	12,28	405	411	1,65	680	71,4	42,1
01.07.2008 10:20	6,2	14,31	37	44	1,42	62	72,7	50
01.07.2008 10:30	6	14,5	5	6	1,4	8	73,2	51
<b>0.T.01 (P3)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
01.07.2008 11:56	20,5	-	-	0	-	-	-	0
01.07.2008 12:08	5,4	15,08	939	1172	1,35	1578	63,3	45,9
01.07.2008 12:18	5,4	15,08	114	142	1,35	191	60,8	44,1

01.07.2008 12:27	5,3	15,18	11	14	1,34	19	74,7	54,5
<b>1.A.03 (P3)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
02.07.2008 09:49	20,6	-	-	0	-	-	-	0
02.07.2008 10:00	9,6	11,02	99	90	1,84	166	63,8	33,8
02.07.2008 10:10	8	12,57	11	11	1,62	18	69	41,7
02.07.2008 10:20	7,5	13,05	3	3	1,56	5	70,5	44,2
<b>1.B.03 (P3)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
03.07.2008 10:37	20,7	-	-	0	-	-	-	0
03.07.2008 10:48	9,3	11,31	103	96	1,79	172	67,9	36,9
03.07.2008 10:58	7,4	13,15	5	5	1,54	8	66,6	42,1
03.07.2008 11:08	6,8	13,73	3	3	1,48	4	62,9	41,5
<b>0.B.03 (P3)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
03.07.2008 13:18	20,6	-	-	0	-	-	-	0
03.07.2008 13:31	6,4	14,82	240	251	1,42	365	62,2	40,1
03.07.2008 13:41	5,4	15,08	36	45	1,35	61	55,6	40,3
03.07.2008 13:51	5,8	14,69	7	9	1,38	12	59,2	41,8
<b>0.B.02 (P2)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
03.07.2008 15:53	20,6	-	-	0	-	-	-	0
03.07.2008 16:03	5,6	14,89	1192	1469	1,36	2003	49,1	35,1
03.07.2008 16:14	5,2	15,27	64	81	1,33	108	45,4	33,3
03.07.2008 16:23	5,2	15,27	16	20	1,33	27	56,1	41,2
<b>1.B.02 (P2)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
03.07.2008 18:23	20,5	-	-	0	-	-	-	0
03.07.2008 18:33	5,6	14,89	485	597	1,36	814	38,4	27,5
03.07.2008 18:43	3,4	16,34	42	92	1,28	241	48,2	42
03.07.2008 18:53	4,1	16,12	31	42	1,24	52	53,5	42,4

<b>1.A.04 (P2)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
08.07.2008 12:32	20,6	-	-	0	-	-	-	0
08.07.2008 12:52	10	10,63	48	42	1,91	80	70,6	36,1
08.07.2008 13:02	8,1	12,47	11	11	1,63	18	70,6	42,3
08.07.2008 13:12	7	13,53	10	11	1,5	16	76	49,4
08.07.2008 13:22	7,6	12,95	1	1	1,57	2	78,7	49
08.07.2008 13:32	7	13,53	3	3	1,5	4	79,8	51,9
<b>0.A.04 (P1)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
08.07.2008 15:11	20,6	-	-	0	-	-	-	0,1
08.07.2008 15:30	9,6	11,02	70	64	1,84	118	52,3	27,7
08.07.2008 15:40	7,6	12,95	18	19	1,57	30	69,6	43,3
08.07.2008 15:50	7,7	12,86	2	2	1,58	3	74,1	45,8
08.07.2008 16:00	7,1	13,44	4	5	1,51	8	77	49,7
08.07.2008 16:10	7,5	13,05	5	5	1,56	8	78,9	49,5
<b>0.B.04 (P2)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
10.07.2008 11:04	20,7	-	-	0	-	-	-	0
10.07.2008 11:23	10,2	10,44	43	37	1,94	72	53,6	26,9
10.07.2008 11:33	7,9	12,66	8	8	1,6	13	70,2	42,7
10.07.2008 11:43	7,3	13,24	4	4	1,53	6	75,3	47,9
10.07.2008 11:53	7,5	13,28	4	4	1,52	6	78,5	49,2
10.07.2008 12:04	7,1	13,44	3	3	1,51	5	80,2	51,8
<b>1.B.04 (P3)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
10.07.2008 15:01	20,5	-	-	0	-	-	-	0
10.07.2008 15:11	10,2	10,44	86	74	1,94	144	41,5	20,8
10.07.2008 15:21	7,9	12,66	14	15	1,6	24	67,4	41
10.07.2008 15:32	7,3	13,24	1	1	1,53	2	72	45,8
10.07.2008 15:42	7,2	13,34	5	6	1,52	9	72,2	46,3
10.07.2008 15:51	7,2	13,34	6	7	1,52	11	76,1	48,8

<b>0.T.02 (P2)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
14.07.2008 10:14	20,8	-	-	0	-	-	-	0
14.07.2008 10:33	9,8	10,83	35	31	1,88	58	60,7	31,6
14.07.2008 10:42	8,3	12,28	6	6	1,65	10	71,7	42,3
14.07.2008 10:52	8,5	12,08	5	5	1,68	8	75,9	44,1
<b>1.T.02 (P3)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
14.07.2008 12:30	20,8	-	-	0	-	-	-	0,2
14.07.2008 12:41	11,2	9,47	43	34	2,14	73	52,5	23,9
14.07.2008 12:51	8,2	12,37	8	8	1,64	13	71,5	42,5
14.07.2008 13:01	8,1	12,47	3	3	1,63	5	75,1	45
<b>0.T.03 (P1)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
14.07.2008 15:05	20,8	-	-	0	-	-	-	0
14.07.2008 15:16	10,4	10,25	38	32	1,98	63	55,2	27,2
14.07.2008 15:26	8,3	12,28	5	5	1,65	8	70	41,3
14.07.2008 15:36	8,2	12,37	2	2	1,64	3	75,5	44,9
<b>1.T.03 (P1)</b>								
Datum / Uhrzeit	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO	CO	λ	CO <sub>unv</sub>	NO <sub>x</sub>	NO
	[%]	[%]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]	[-]	[ppm]	[mg/m <sup>3</sup> ]	[ppm]
14.07.2008 17:35	20,8	-	-	0	-	-	-	0
14.07.2008 17:47	10,4	10,25	51	43	1,98	85	51,6	25,4
14.07.2008 17:57	8,7	11,89	6	6	1,71	10	74,9	42,8
14.07.2008 18:07	8,1	12,47	3	3	1,63	5	70,4	42,2

## Anhang 3

Auswertung der Probekörperserie T für den Haltepunkt bei 310 bis 400 °C

	Probekörper- Bezeichnung	Thermoelement- Nr.	Temperatur	Art der Temperaturschwankung und Grad der Ausprägung	
			[°C]		
Klima T	0.T.01	06 07	< <		
	0.T.02	06 07	375 400	P K	+ o
	0.T.03	06 07	< <		
	1.T.01	06 07	340 <	P	+
	1.T.02	06 07	330	P	o -
	1.T.03	06 07			- -
<p>&lt; ... erforderliches Temperaturniveau nicht erreicht</p> <p>P ... ausgeprägte Stagnation im Temperaturverlauf (Plateau)</p> <p>K ... verringerter Temperaturanstieg (Knick)</p> <p>++ ... sehr ausgeprägt</p> <p>+ ... ausgeprägt</p> <p>o ... vorhanden</p> <p>- ... nicht vorhanden</p>					

## Auswertung der Probekörperserie A für den Haltepunkt bei 310 bis 400 °C

	Probekörper- Bezeichnung	Thermoelement- Nr.	Temperatur	Art der Temperaturschwankung und Grad der Ausprägung	
			[°C]		
Klima A	0.A.01	06 07	< 390	P	++
	0.A.02	06 07	320	P	- ++
	0.A.03	06 07	340 340	P K	++ ○
	0.A.04	04 05 06 07	325	P	- - - ++
	1.A.01	06 07	350 350	K P	+ ++
	1.A.02	06 07	360	K	- +
	1.A.03	06 07	< <		
	1.A.04	04 05 06 07	340 375	P K	- ++ + -
	<p>&lt; ... erforderliches Temperaturniveau wurde nicht erreicht</p> <p>P ... ausgeprägte Stagnation im Temperaturverlauf (Plateau)</p> <p>K ... verringerter Temperaturanstieg (Knick)</p> <p>++ ... sehr ausgeprägt</p> <p>+ ... ausgeprägt</p> <p>○ ... vorhanden</p> <p>- ... nicht vorhanden</p>				

## Auswertung der Probekörperserie B für den Haltepunkt bei 310 bis 400 °C

	Probekörper- Bezeichnung	Thermoelement- Nr.	Temperatur	Art der Temperaturschwankung und Grad der Ausprägung		
			[°C]			
Klima B	0.B.01	06 07	< <			
	0.B.02	06 07	330 <	K	○	
	0.B.03	06 07	<		-	
	0.B.04	04 05 06 07	<			
			330	P	++	
			330	P	++	
			340	P	++	
	1.B.01	06 07	350	P	++	
			310	K	○	
1.B.02	06 07	< <				
1.B.03	06 07	350	P	++		
		<				
1.B.04	04 05 06 07	<				
		400	P	++		
		330	K	+		
		350	P	++		

< ... erforderliches Temperaturniveau wurde nicht erreicht  
P ... ausgeprägte Stagnation im Temperaturverlauf (Plateau)  
K ... verringerter Temperaturanstieg (Knick)  
++ ... sehr ausgeprägt  
+ ... ausgeprägt  
○ ... vorhanden  
- ... nicht vorhanden