

**Auswirkungen der Prüfnorm ENV  
13381-4 auf das Sicherheitsniveau  
des deutschen bauaufsichtlichen  
Verfahrens**

**T 3096**

T 3096

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2005, ISBN 3-8167-6969-1

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69  
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12  
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00  
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.IRBbuch.de](http://www.IRBbuch.de)

## Untersuchungsbericht

**Dokumentnummer:** (3919/2264) – TM vom 08.12.2004

**Auftraggeber:** Deutsches Institut für Bautechnik  
Kolonnenstraße 30  
10829 Berlin

**Auftrag vom:** 13.07.2004

**Auftragszeichen:** ZP 52-5-4.151-1078/04

**Auftragseingang:** 13.07.2004

**Inhalt des Auftrags:** Auswirkungen der Prüfnorm ENV 13381-4 auf das  
Sicherheitsniveau des deutschen bauaufsichtlichen Verfahrens

Dieser Untersuchungsbericht umfasst 47 Seiten inkl. Deckblatt.



Dieser Untersuchungsbericht darf nur vollständig und unverändert weiterverbreitet werden. Auszüge oder Kürzungen bedürfen der schriftlichen Genehmigung der MPA Braunschweig. Dokumente ohne Unterschrift und Stempel haben keine Gültigkeit. Das Deckblatt und die Unterschriftenseite dieses Dokuments sind mit dem Stempel der MPA Braunschweig versehen. Das Probenmaterial ist verbraucht.

Materialprüfanstalt (MPA)  
für das Bauwesen  
Beethovenstraße 52  
D-38106 Braunschweig

Tel +49-(0)531-391-5400  
Fax +49-(0)531-391-5900  
E-Mail [info@mpa.tu-bs.de](mailto:info@mpa.tu-bs.de)  
<http://www.mpa.tu-bs.de>

Norddeutsche Landesbank Hannover  
Kto. 106 020 050 (BLZ 250 500 00)  
Swift-Code: NOLADE 2H  
USt.-ID-Nr. MPA-DE 183500654



## Inhaltsverzeichnis

|   |    |
|---|----|
| Inhaltsverzeichnis .....  | 2  |
| 1 Anlass und Auftrag .....  | 4  |
| 2 Vorgehen zur Untersuchung .....                                     | 4  |
| 3 Sinn und Zweck der DIN V ENV 13381-4 .....                          | 5  |
| 4 Ermittlung der Eingangsdaten .....                                  | 5  |
| 4.1 Prüfbedingungen .....   | 5  |
| 4.2 Belastung .....   | 6  |
| 4.3 Probekörper .....   | 7  |
| 4.3.1 Vorgegebene Profile .....                                       | 8  |
| 4.4 Konstruktive Ausbildung der Stahlprobekörper .....                | 8  |
| 4.5 Zusammensetzung der Probekörper .....                             | 9  |
| 4.6 Aufbringen des Brandschutzmaterials .....                         | 9  |
| 4.7 Brandschutzmaterialien .....                                      | 9  |
| 4.7.1 Dickenmessung .....   | 10 |
| 4.7.2 Rohdichte .....   | 11 |
| 5 Einbau der Probekörper .....  | 12 |
| 6 Prüfverfahren .....   | 12 |
| 6.1 Ofenthermoelemente und Druck .....                                | 12 |
| 6.2 Belastung der Probekörper .....                                   | 13 |
| 6.3 Abbrechen der Prüfung .....                                       | 13 |
| 7 Prüfergebnisse .....  | 13 |
| 7.1 Verwertbarkeit der Prüfergebnisse .....                           | 13 |
| 8 Beurteilung der Prüfergebnisse .....                                | 14 |
| 8.1 Allgemeines .....   | 14 |
| 8.2 Grundsätzliches Verfahren für alle Brandschutzsysteme .....       | 15 |
| 8.2.1 Anpassung der Temperaturdaten .....                             | 15 |
| 8.2.2 Korrektur der Dicke .....                                       | 15 |
| 8.2.3 Reaktive Systeme .....  | 16 |
| 8.3 Beurteilungsverfahren für die thermische Leistungsfähigkeit ..... | 16 |
| 8.4 Kriterien für die Verwertbarkeit .....                            | 17 |
| 9 Erweiterter Anwendungsbereich .....                                 | 17 |
| 10 Praktische Anwendung .....   | 18 |
| 10.1 Verfahren nach Anhang F (Variables $\lambda$ -Verfahren) .....   | 18 |
| 10.1.1 Allgemeines .....  | 18 |
| 10.1.2 Vorbereitung der Temperaturdaten .....                         | 20 |
| 10.1.3 Beginn Auswertungsverfahren nach Anhang F .....                | 27 |
| 10.1.3.1 Schritt 1 .....  | 27 |
| 10.1.3.2 Schritt 2 bis 4 .....  | 28 |
| 10.1.3.3 Schritt 5 und Schritt 6 .....                                | 30 |
| 10.1.3.4 Schritt 7 .....  | 31 |
| 10.1.3.5 Schritt 8 .....  | 31 |
| 10.1.3.6 Schritt 9 .....  | 32 |
| 10.1.3.7 Schritt 10 .....   | 33 |
| 10.1.3.8 Ausgabe der Ergebnisse .....                                 | 33 |
| 10.1.4 Erfahrungen und Bewertungen .....                              | 33 |
| 10.2 Verfahren nach Anhang I (Grafisches Verfahren) .....             | 35 |
| 10.2.1 Allgemeines .....  | 35 |

---

|          |   |    |
|----------|---|----|
| 10.2.2   | Vorbereiten der Temperaturdaten .....   | 35 |
| 10.2.2.1 | Korrektur der Dicken auf die nominelle Dicke .....                                      | 36 |
| 10.2.2.2 | Darstellung der Zeit bis zum Erreichen der Bemessungstemperatur .....                   | 37 |
| 10.2.3   | Erfahrungen und Bewertungen.....  | 38 |
| 10.3     | Vergleich zwischen den Auswertungen der EN 13381-4 und dem deutschen<br>Verfahren ..... | 38 |
| 11       | Zusammenfassung.....  | 43 |
| 11.1     | Vorgehen .....  | 43 |
| 11.2     | Ergebnisse .....  | 44 |
| 12       | Literaturverzeichnis .....  | 47 |

## **1 Anlass und Auftrag**

Im Rahmen der Diskussion über den praktischen Einsatz der Prüfnorm EN 13381-4, „Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen, Teil 4: Brandschutzmaßnahmen für Stahlbauteile“ wurde festgestellt, dass keinerlei Erfahrungen darüber vorliegen, inwieweit die Anwendung dieser Norm das Sicherheitsniveau im deutschen bauaufsichtlichen Verfahren beeinflussen könnte.

Mittlerweile ist für den deutschen Bereich die EN-Norm als Vornorm DIN V ENV 13381-4 : 2003-09 erschienen. Zur Bearbeitung des Forschungsvorhabens wird auf diesen Stand der Vornorm Bezug genommen.

## **2 Vorgehen zur Untersuchung**

Im vorliegenden Forschungsvorhaben werden zunächst die theoretischen Grundlagen des Prüfverfahrens und der Auswertungsverfahren zusammengestellt. Dabei wird der Schwerpunkt auf das numerische Verfahren nach Anhang F und auf das grafische Verfahren nach Anhang I gelegt. Das Verfahren des Anhang F wurde in die Untersuchung mit einbezogen, da es von der Norm den größten Anwendungsbereich zugewiesen bekommt. Durch Auswertung der gewonnenen Temperaturdaten nach diesem Anhang sind Erweiterungen in allen maßgebenden Bereichen der Brandschutzsysteme zulässig. Insbesondere die Dicke des Brandschutzmaterials kann extrapoliert werden.

Das grafische Verfahren wurde gewählt, da es dem bisher in Deutschland angewendeten Verfahren sehr ähnlich ist.

Anschließend an die theoretischen Grundlagen werden dann die beiden Verfahren exemplarisch angewendet. Dabei wird eine Plattenbekleidung und eine Spritzputzbekleidung ausgewertet. Für Dämmschichtbildner lagen zum einen keine Prüfdaten vor, die direkt im Auswertungsverfahren verwendet werden können (hauptsächlich fehlt die Anzahl der Probekörper in Verbindung mit den unterschiedlichen Schichtdicken). Zum anderen traten aufgrund der sehr geringen Schichtdicken sehr weit streuende Korrekturwerte  $k_d(\theta)$  auf.

Die sich daraus ergebenden Schwierigkeiten bei Anwendung der Norm werden angeführt und aufgezeigt.

Die Ergebnisse werden im Anschluss mit dem bisher in Deutschland zur Anwendung empfohlenen Werte verglichen. Abschließend erfolgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse mit einem Ausblick.

### **3 Sinn und Zweck der DIN V ENV 13381-4**

Die DIN V ENV 13381-4 beschreibt ein Prüfverfahren, das ermöglicht, unterschiedliche Brandschutzsysteme auf Stahlbauteilen, wie Balken, Stützen und Zuggliedern zu beurteilen.

Ziel der Prüfungen nach der DIN V ENV 13381-4 soll sein, dass Bereiche von Dicken des Brandschutzmaterials einem Bereich von Stahlquerschnitten hinsichtlich verschiedener Feuerwiderstandsdauern zugewiesen werden können. Dabei werden die Ergebnisse auch noch für verschiedene Bemessungstemperaturen (im allgemeinen der Bereich 350°C-750°C) angegeben.

Der Anwendungsbereich der Norm wird dahingehend eingeschränkt, dass sie nur für Schutzsysteme gilt, deren Abstand weniger als 5 mm zum Flansch des Stahlbauteils beträgt. In allen anderen Fällen sind Prüfungen nach Teil 1 bzw. Teil 2 der Normenreihe 13381 durchzuführen. Unter Umständen sind hier auch Prüfungen nach anderen Normen denkbar.

Hauptziel der Prüfungen ist es, über den Vergleich von belasteten und unbelasteten Bauteilen Erkenntnisse über das Haftungsvermögen und den Einfluss von evtl. vorhandenen Fugen des Brandschutzsystems zu erhalten. Die thermischen Eigenschaften des jeweiligen Materials werden ausschließlich über die Ergebnisse an den kurzen unbelasteten Stützenabschnitten gewonnen.

Die Ergebnisse, die mit dieser Norm gewonnen werden, gelten für alle I- und H- Querschnitte, wobei je nach Abhängigkeit des verwendeten Auswertungs- und Analyseverfahrens ggf. auch eine Erweiterung des Anwendungsbereiches möglich ist.

Weiterhin sollen die Ergebnisse, die mit dem Prüfverfahren nach DIN V ENV 13381-4 erzeugt werden, auch als Eingangswerte nach ENV 1993-1-2 („Eurocode 3“) genutzt werden können.

Festgehalten werden kann an dieser Stelle, dass zwischen dem Prüfteil und dem Auswertungsteil unterschieden werden muss. Je nach Abhängigkeit des Auswertungsverfahrens werden entsprechende Datenmengen erzeugt, die dann im zweiten Schritt mit einem geeigneten Verfahren ausgewertet werden sollen. Dabei geht die Norm davon aus, dass die rechnerischen Auswertungen als erstes angewandt werden sollen (sie liefern auch den nach Norm größtmöglichen Anwendungsbereich) und erst wenn diese Verfahren zu keinem Ergebnis führen, soll die grafische Analyse der Ergebnisse durchgeführt werden.

## **4 Ermittlung der Eingangsdaten**

### **4.1 Prüfbedingungen**

Ziel der Brandprüfungen ist es, eine Datenmenge für verschiedene Profilmomente zu erzeugen, die später durch Auswertungsverfahren weiterverarbeitet werden können. Da die Norm darauf abzielt auch eine Variation hinsichtlich der Bemessungstemperatur der Stahlbauteile zuzulassen, ist es

erforderlich, die Prüfungen über einen möglichst langen Zeitraum durchzuführen, damit auch Daten für die hohen Temperaturbereiche vorliegen. Als anzustrebende Temperatur geht die Norm von 750°C aus. Man kann davon ausgehen, dass beim Erreichen dieser Temperatur am belasteten Balken die Stützenabschnitte, in Abhängigkeit des Profilkfaktors, noch unterhalb dieser Temperatur liegen, so dass die Prüfung in jedem Fall weiter durchgeführt werden muss. Insbesondere beim rechnerischen Verfahren sind diese Daten erforderlich, da sonst für die hohen Temperaturbereiche zu wenig Daten zur Ermittlung der mittleren Wärmeleitfähigkeit des Materials vorliegen.

## 4.2 Belastung

Die Belastung des Balkens ist so zu wählen, dass der Probekörper mit einer Gesamtlast beansprucht werden soll, die 60 % des Bemessungswertes der Momententragfähigkeit entspricht. Dabei müssen die Lasten aus oberer Abdeckung und aus dem Gewischt des Brandschutzmaterials usw. mit berücksichtigt werden. Dabei kann man davon ausgehen, dass auch die Lasten aus den unbelasteten Trägerabschnitten und den Einrichtungen zur Aufbringung der Prüflast mit berücksichtigt werden sollten.

Für die Stütze ist von einer Belastung von 60 % des Bemessungswertes für die Knicklasttragfähigkeit nach ENV 1993-1-1 auszugehen.

Für die Trägerprofile ergeben sich daher die folgenden Werte:

|         |                                  |                                       |
|---------|----------------------------------|---------------------------------------|
| IPE 400 | $M_{pl,y,d} = 289,0 \text{ kNm}$ | 60 % $M_{pl,y,d} = 173,4 \text{ kNm}$ |
| IPE 240 | $M_{pl,y,d} = 80,6 \text{ kNm}$  | 60 % $M_{pl,y,d} = 48,4 \text{ kNm}$  |
| IPE 140 | $M_{pl,y,d} = 19,3 \text{ kNm}$  | 60 % $M_{pl,y,d} = 11,6 \text{ kNm}$  |

Die aus den o.g. Momenten resultierenden Spannungen betragen ca.  $\sigma = 149 \text{ N/mm}^2$ , was annähernd einer Spannungsausnutzung entspricht, wie sie bisher in Deutschland anzusetzen ist. Die Last ist derart aufzubringen, dass ein Biegemoment entsteht, das über mindestens 25% um die Feldmitte herum konstant ist. Es ist davon auszugehen, dass die Länge des Abschnitts mit dem konstanten Biegemoment bezogen auf die gesamte Stützweite gemeint ist. Bei einer Stützweite von 4,5 m entspricht dieses einer Länge mit „konstantem“ Biegemoment von ca. 1,13 m.

Bezogen auf die Stützenprüfung einer HEA 300 Stütze mit einer Höhe  $h = 3,0 \text{ m}$  ergibt sich unter Berücksichtigung des Biegeknickens eine Beanspruchbarkeit  $N_{R,d} = 2160 \text{ kN}$ .

|         |                                |                                    |
|---------|--------------------------------|------------------------------------|
| HEA 300 | $N_{R,d} = 2160,0 \text{ kNm}$ | 60 % $N_{R,d} = 1296,0 \text{ kN}$ |
|---------|--------------------------------|------------------------------------|

Aus der o.g. Normalkraft ergibt sich eine Spannung im Querschnitt von  $\sigma = 115 \text{ N/mm}^2$ .

### 4.3 Probekörper

Grundsätzlich sind bei Anwendung der Norm die folgenden Begriffe zu unterscheiden:

- Belasteter Balken: Balken mit einer definierten Länge  $L_{\text{spec}}$  und einer Stützweite  $L_{\text{sup}}$
- Unbelasteter Balken: Referenzbalken mit einer Länge  $L = 1000 \pm 50$  mm
- Belastete Stütze: Stütze mit einer beflamnten Länge  $L \geq 3000$  mm
- Unbelastete hohe Stütze: Stütze mit einer Länge  $L \geq 2000$  mm
- Stützen geringer Höhe: Mindesthöhe  $L = 1000$  mm  $\pm$  50

Die Stützen geringer Höhe dienen zur Abdeckung des gewünschten Profilbereiches für das jeweilige Brandschutzsystem. Die belasteten Balken bzw. die belastete Stütze dienen zur Beurteilung des Haftvermögens. Für die belasteten Balken sind grundsätzlich zwei Versuche erforderlich. Dabei sollen die minimale und die maximale Dicke des Brandschutzsystems geprüft werden. Ein Hinweis darauf, wie eine Prüfung an nur einem belasteten Balken mit einem Brandschutzsystem durchgeführt werden kann (insbesondere im Hinblick auf die Lagerung des Probekörpers und der Ofenabdeckung), ist in der Norm nicht enthalten. Bei der belasteten Stütze ist nur eine Prüfung mit der maximalen Dicke des Brandschutzsystems erforderlich.

Die Anzahl der Stützenabschnitte ergibt sich aus dem jeweils angestrebten Auswertungsverfahren und den gewünschten Dicken des Brandschutzsystems. Die Mindestanzahl beträgt 10 Stützenabschnitte. Die Zahl kann aber auch auf 26 ansteigen. Dabei ist davon auszugehen, dass mehrere Prüfungen erforderlich werden.

Wenn die Beurteilung der Ergebnisse des Brandschutzsystems auf drei- und vierseitige Anwendungen durchgeführt werden soll, so sind Prüfungen wie vorher beschrieben durchzuführen. Bei einer ausschließlich vierseitigen Anwendung, sind zwei belastete Stützen mit der minimalen und maximalen Dicke des Brandschutzsystems durchzuführen. Die Balkenprüfungen werden somit durch die Stützenprüfungen ersetzt.

Bei reaktiven Brandschutzsystemen wird neben den Stützenabschnitten auch mindestens eine hohe Stütze geprüft. Bei einer eingeschränkten Beurteilung nur von vierseitig geschützten Stützen ist die Prüfung der hohen unbelasteten Stütze nicht erforderlich, da über die Prüfung der zwei belasteten Stützen ausreichend Ergebnisse vorliegen.

#### 4.3.1 Vorgegebene Profile

Für den belasteten Balken sind I-Profile mit einer Trägerhöhe  $400 \pm 20$  mm, Profilmass  $150 \text{ m}^{-1} \pm 10 \text{ m}^{-1}$  bei einer profilfolgender Bekleidung,  $110 \text{ m}^{-1} \pm 10 \text{ m}^{-1}$  bei einer kastenförmigen Bekleidung vorgegeben. Die beflammete Länge muss mindestens  $L_{\text{exp}} \geq 4000$  mm betragen. Die maximal zulässige Stützweite beträgt  $L_{\text{sup}} = \text{beflammte Länge} + \text{maximal } 250 \text{ mm}$ , d.h.  $L_{\text{sup}} = 4.500$  mm. Die maximale Länge des Probekörpers ist ebenfalls vorgegeben. Sie soll sich aus der beflammeten Länge zuzüglich einer maximalen Länge von 350 mm an den beiden Enden zusammensetzen. Sie beträgt somit maximal  $L_{\text{spec}} = 4700$  mm.

Als Referenzbalken werden die jeweils gleichen Profile ausgewählt, um einen direkten Vergleich zwischen den belasteten Balken und unbelasteten Balken herstellen zu können. Dieses dient zur Anwendung der später durchzuführenden Anpassungen der Stahltemperaturen der kurzen Stützen.

Für die belasteten Stützen, die hohe Stütze und die unbelasteten Stützenabschnitte geringer Höhe werden ebenfalls konkrete Angaben hinsichtlich des Profils gemacht. Die Stütze geringer Höhe soll in Übereinstimmung mit der belasteten oder unbelasteten hohen Stütze gewählt werden. Diese Aussage ist zunächst verwirrend, da mehrere Stützen geringer Höhe geprüft werden. Das ggf. entsprechende Profil HEA 300 ist aber bereits in der Standard-Liste vorhanden, so dass auch hier Ergebnisse vorliegen.

#### 4.4 Konstruktive Ausbildung der Stahlprobekörper

Bei den belasteten Stahlträgern sind aufgrund der Höhe (IPE 400) Stegaussteifungsbleche erforderlich, die an jeder Lasteinleitungsstelle angeschweißt werden sollen. Die Dicke der Bleche muss mindestens der des Stahlprofils entsprechen. Es ist somit von einer Mindestdicke von 8,6 mm auszugehen. Die Tiefe der Stegaussteifungsbleche soll der Flanschtiefe abzüglich von 10 mm betragen. Am Ende des Balkens sind im Bereich der Auflager Stegaussteifungsblechen bzw. U-Profile angeordnet. Diese müssen analog zu den Vorgaben der Aussteifungsbleche an den Lasteinleitungspunkten ausgeführt werden. Es soll somit eine gewisse Torsionssteifigkeit des Trägers geschaffen werden. Bei bisher durchgeführten Prüfungen an IPE 400 Trägern stellte sich heraus, dass trotz der Aussteifungsbleche zwischen den Flanschen ein Kippen des Trägers auftrat, was dazu führte, dass die Last entfernt werden musste.

Die Bilder 5 und 9, auf die in der Norm Bezug genommen wird, unterscheiden sich hinsichtlich der Ausbildung des Abschlusses des Balkens. In Bild 5 scheint das Ende durch ein angeschweißtes, querliegendes U-Profil gebildet zu werden, während in Bild 9 im Auflagerbereich ein Blech angeordnet wird. Inwieweit diese Bleche das Erwärmungsverhalten des Stahlträgers beeinflussen, wird durch die Norm nicht weiter definiert. Es wird auch nicht darauf eingegangen, dass durch die

Blechquersteifen der Profilmfaktor verändert und ein Auftrag von Brandschutzsystemen (Putz oder Beschichtung) ggf. beeinträchtigt wird und somit ein nicht praxisgerechter Auftrag vorliegt.

Bei den unbelasteten Probekörpern wird nur ausgeführt, dass an den Stützen- bzw. Balkenenden der Wärmeeintrag minimiert werden soll. Die Abdeckung soll mindestens über die doppelte Wärmedämmung verfügen, als das Brandschutzmaterial an den Seiten der Stütze bzw. des Balkens.

#### **4.5 Zusammensetzung der Probekörper**

Als Stahlart darf ein beliebiger Baustahl (S-Stahl nach Euronorm) verwendet werden. Ausgenommen sind lediglich die Stahlart S-185 und Maschinenstahl (E-Stahl).

Hinsichtlich des Brandschutzsystems sind vom Auftraggeber mindestens die zu erwartende nominale Rohdichte, der Feuchtegehalt sowie die Wärmekapazität des Brandschutzmaterials anzugeben. Aus Gründen der Vertraulichkeit müssen diese Angaben jedoch nicht im Prüfbericht erwähnt werden. Sie müssen aber bei der Prüfanstalt vorliegen und sind auch wichtiger Bestandteil der rechnerischen Analyse.

#### **4.6 Aufbringen des Brandschutzmaterials**

Die Stahloberflächen müssen vorbehandelt werden und das Verfahren zum Aufbringen des Brandschutzmaterials an Stützen darf nicht erheblich vom Aufbringen auf Balken unterschiedlich sein. Ist dieses der Fall, so sind getrennte Versuche an belasteten Balken und belasteten Stützen zur Beurteilung erforderlich. In diesem Abschnitt wird bereits darauf hingewiesen, dass die Streuung der Rohdichte innerhalb eines Bereiches liegen muss, um gültig zu sein. Hinsichtlich der Befestigung des Brandschutzmaterials wird unterschieden zwischen einer Befestigung am zu schützenden Bauteil sowie einer Befestigung an der oberen Abdeckung. Da laut der Norm aus prüftechnischen Gründen an der Oberseite nur Abdeckungen aus Leichtbeton anzuordnen sind, muss seitens der Prüfstelle eine Beurteilung erfolgen, die sich auf eine Befestigung in Normalbetonabdeckplatten bezieht. Die Befestigung des Brandschutzmaterials muss vor der Belastung erfolgen. An den Enden der belasteten Balken muss eine Abdichtung erfolgen, die verhindert, dass die Heißgase aus der Bekleidung in den Prüfraum herausströmen können.

#### **4.7 Brandschutzmaterialien**

Für die Beurteilung sind Daten des Brandschutzmaterials zu erfassen. Insbesondere sind dabei die Dicke, Rohdichte und der Feuchtegehalt des Materials zu erfassen. Im Anhang C der Norm werden für die einzelnen Brandschutzmaterialien Wege beschrieben, wie diese Eigenschaften bestimmt werden können.

#### 4.7.1 Dickenmessung

Für Platten und Paneele wird festgelegt, dass die Dicke um nicht mehr als 15 % vom Mittelwert über die gesamte Oberfläche abweichen soll. Für die Beurteilung ist dieser Mittelwert zu benutzen. Erst wenn die Dicke um 15 % abweicht, ist die maximale Dicke des Materials für die weitere Beurteilung zu verwenden. Im Anhang C wird für plattenartige Materialien bestimmt, dass die Dicke mit geeigneten Lehren oder Tastzirkeln gemessen werden muss. Die Messung muss entweder während der Herstellung oder an einem repräsentativen Probekörper mit den Mindestabmessungen 300 mm x 300 mm durchgeführt werden. Es sind neun Messungen durchzuführen, einschließlich von Messungen um den Umfang herum und „der Oberfläche des Materials“. Bei letzterem ist davon auszugehen, dass gemeint ist, dass die Dicke auch über die Oberfläche hinweg gemessen werden soll. Die Lage der Messstellen wird in der Norm nicht näher spezifiziert.

Bei aufgespritzten oder beschichteten Materialien werden die Kriterien anders festgelegt. Hier ist in der Nähe von den Temperaturmessstellen die Dicke zu ermitteln. Dieses ergibt z.B. für den belasteten Balken eine Anzahl von 104 Messstellen. Im deutschen Zulassungsverfahren wurde bisher nur ausgesagt, dass die Messstellen nicht unmittelbar auf den Temperaturmessstellen liegen dürfen.

Bei Brandschutzmaterialien mit einer Dicke größer als 5 mm, ist die Dicke des Materials mit einem Bohrer oder einer Messsonde mit einem Durchmesser von 1 mm zu bestimmen.

Bei Brandschutzmaterialien mit einer Dicke von „erheblich mehr als 5 mm“ ist eine besondere Berechnung anzuwenden. Der Begriff „erheblich mehr“ wird in der Norm damit definiert, dass die mittlere Dicke des Brandschutzmaterials größer als 15 % der Höhe des Probekörpers ist). Bei einem belasteten Balken müsste dieses, bei Verwendung eines IPE 400, einer Beschichtungsdicke von  $d = 60$  mm entsprechen. Wenn dieses der Fall ist, so ist die mittlere Dicke durch die folgende Formel zu berechnen:

$$d_{av} = -A_p + \frac{(A_p^2 + 16 V_p)}{8} \quad \text{Gleichung (1)}$$

Das „+“ Zeichen kann auch in der vorliegenden Norm nicht klar zugeordnet werden. Die Größe  $A_p$  ist die Fläche des Brandschutzmaterials je Längeneinheit, während die Größe  $V_p$  das Volumen je Längeneinheit darstellt. Sofern die Längeneinheit herausgerechnet wird, erhält man aus dem  $A_p$  den Umfang des Brandschutzmaterials und aus dem Volumen je Längeneinheit die Fläche des Brandschutzmaterials. Dabei ist es zunächst nicht einsichtig, warum Flächen und Längen miteinander addiert werden sollen, und dabei eine mittlere Dicke als Ergebnis gewonnen werden kann. Geht man davon aus, dass z.B. der Balken IPE 400 mit einer Dicke eines Brandschutzmaterials beschichtet wird, die das vorher genannte Kriterium zur Anwendung der

Gleichung 1 erfüllt, dann könnte das Brandschutzmaterial mit einer Dicke von  $d = 70$  mm aufgetragen werden. Bei einem dreiseitig geschützten Bauteil ergibt sich daher:

$$A_p = 2 \times (40 \text{ cm} + 7 \text{ cm}) + (18 \text{ cm} + 2 \times 7 \text{ cm}) = 126 \text{ cm}$$

$$V_p = (32 \text{ cm} \times 15,4 \text{ cm} + 32 \text{ cm} \times 8,4 \text{ cm} + 15 \text{ cm} \times 23 \text{ cm}) - 84,5 \text{ cm}^2 = 1022 \text{ cm}^2$$

$$d_{av} = -126 + \frac{(126^2 + 16 \times 1022)}{8} = -126 + 4028 = 3902 \text{ (cm, cm}^2 \text{ ?)}$$

Abgesehen davon, dass bei der o.g. Formel Einheiten (cm und  $\text{cm}^2$ ) vermischt werden, erhält man einen Wert für die mittlere Dicke, die unmöglich einen realen Bezug zu der Prüfung aufweisen kann. Insbesondere ist nicht einsichtig, warum zunächst die mittlere Dicke bestimmt werden soll, um die Anwendung der Gleichung 1 zu überprüfen und dann einen komplett neuen Wert für die mittlere Dicke einzuführen. Unter Umständen fehlt bei dem Term nach dem „+,-“-Zeichen ein Wurzelausdruck. Es scheint sich hier offensichtlich um einen Druckfehler zu handeln, der auch im englischen Original bereits vorhanden ist. Leider wird die Größe  $d_{av}$ , die mutmaßlich die mittlere Dicke des Brandschutzmaterials darstellt, an keiner Stelle der Norm (außer im Anhang C) näher erläutert, so dass auch hier keine Einschätzung über die zu erwartenden Werte gegeben werden kann.

Bei Dicken des Brandschutzmaterials kleiner 5 mm wird festgelegt, dass die Messung mit Hilfe des Induktions- oder Wirbelstromprinzips durchgeführt werden soll. Die Anzahl der Messungen entspricht denen, wie sie schon eingangs genannt wurden.

Die so ermittelten Werte müssen bestimmte Kriterien erfüllen. Dieses bezieht sich hauptsächlich darauf, dass die Dickenmesswerte innerhalb bestimmter Toleranzbereiche liegen müssen. Ist dieses nicht der Fall, so ist der Probekörper nicht der Prüfung zu unterziehen.

#### 4.7.2 Rohdichte

Die Rohdichte des Brandschutzmaterials ist ebenfalls nach Anhang C der Norm zu bestimmen. Zu jeder verwendeten Dicke des Brandschutzmaterials sollte die Rohdichte um nicht mehr als 15 % vom Mittelwert abweichen. Wenn sie um einen größeren Betrag abweicht, so ist die größere Rohdichte zu verwenden.

Weiterhin muss nach der Norm berücksichtigt werden, dass die mittlere Rohdichte des bei dem belasteten und unbelasteten Bauteilen verwendeten Materials bei gleicher Dicke gleich sein soll. Der maximale Unterschied darf 10 % betragen. Da der Vergleich von belasteten und unbelasteten Bauteilen ein zentraler Punkt in der Auswertung dieser Norm ist, kann davon ausgegangen werden, dass bei Nichteinhaltung dieser Kriterien eine Prüfung nicht zu brauchbaren Ergebnissen führen wird.

Nach Anhang C werden für Platten und aufgesprühte Materialien die Wege beschrieben, um die Rohdichte zu ermitteln. Bei den Platten beschränkt sich die Bestimmung der Rohdichte auf Wiegen und Messen der Proben. Bei den aufgesprühten Materialien müssen Referenzwannen mit dem Brandschutzsystem eingesprüht werden. An diesen werden dann die Untersuchungen vorgenommen. Für aufschäumende Anstriche und sehr dünne Beschichtungen werden keine Angaben zur Ermittlung der erforderlichen Daten gemacht. Es wird stattdessen explizit darauf hingewiesen, dass die in diesem Abschnitt angegebenen Verfahren bei den beiden genannten Brandschutzsystemen nicht angewendet werden können. Es wird aber nicht ausgesagt, ob alternative Verfahren zur Verfügung stehen, oder welche Daten herangezogen werden können.

Der Feuchtegehalt wird durch Trocknung bis zur Gewichtskonstanz ermittelt. Dieses Verfahren ist im Anhang C beschrieben, im Text der Norm wird darauf zunächst aber kein Bezug genommen.

## **5 Einbau der Probekörper**

Im Abschnitt 7 der Norm wird auf den Einbau der Probekörper eingegangen. Dabei werden die zu verwendenden Materialien detailliert beschrieben. Die obere Ofenabdeckung muss aus Leichtbeton mit einer Rohdichte  $\rho \leq 650 \text{ kg/m}^3$  bestehen. Weiterhin werden die zu verwendenden Dämmmaterialien und die Befestigungen aufgelistet. Im Rahmen dieses Berichtes wird darauf nicht näher eingegangen und auf den entsprechenden Abschnitt der Norm verwiesen. Unterschiede zum bisherigen Prüfablauf in Deutschland treten insbesondere darin auf, dass es zulässig ist, die unbelasteten Stützenabschnitte entweder auf dem Boden des Prüfofens oder auf einem Podest abzustellen bzw. sie von der oberen Ofenabdeckung abzuhängen.

## **6 Prüfverfahren**

### **6.1 Ofenthermoelemente und Druck**

Es werden Plattenthermometer nach DIN EN 1363-1 vorgeschrieben. Für den belasteten Balken werden 8 Thermoelemente vorgeschrieben, die an beiden Seiten des Balkens angeordnet werden müssen. Bei der Hälfte dieser Plattenthermometer muss die Seite „A“ auf den Boden des Ofens, die andere Hälfte auf die Ofenlängswände gerichtet sein. Bei den unbelasteten Balken müssen je zwei Thermoelemente auf halber Länge angeordnet werden. Dabei muss bei einem die Seite „A“ der Thermoelemente auf den Boden, bei dem anderen auf die nächstgelegene längere Prüfofenseite zeigen. Die Elemente sind in einem Abstand nach DIN EN 1363-1 anzuordnen.

Hinsichtlich des Drucks gelten die Kriterien, wie sie in DIN EN 1363-1 angegeben sind.

## 6.2 Belastung der Probekörper

Die Belastung der Balken ist so lange aufrecht zu erhalten, bis eine Durchbiegung von  $L_{sup}/30$  erreicht wird. Das Kriterium wird also bei einem Balken mit der statischen Stützweite  $L_{sup} = 4500$  mm bei einer Durchbiegung von  $d = 150$  mm erreicht. Nach den Vorgaben der DIN EN 1363-1 gilt das Kriterium  $L_{sup}/30$  jedoch nur als Grenze, ab der die Grenzdurchbiegungsgeschwindigkeit als Versagenskriterium angesehen werden darf. Die Grenzdurchbiegung für biegebelastete Bauteile beträgt nach DIN EN 1363-1 unter Annahme eines IPE 400 und einer Stützweite  $L_{sup} = 4500$  mm,  $D = 127$  mm.

Wenn nach vier Stunden dieses Kriterium nicht erreicht wurde, darf die Last des Balkens erhöht werden, wobei jedoch keine Aussagen zur Anwendbarkeit der daraus gewonnenen Daten angegeben werden (Einbeziehung der Resttragfähigkeit usw.).

Für die belasteten Stützen wird als Grenzwert der axialen Stauchung  $h/100$  und als Grenzwert der Stauchungsgeschwindigkeit  $3h/1000$  angegeben. Diese Werte entsprechen den Versagenskriterien der DIN EN 1363-1, wobei nach DIN V ENV 13381-4 diese Werte nur als Grenzwert zum Entfernen der Prüflast angesehen werden.

## 6.3 Abbrechen der Prüfung

Als Abbruchkriterium wird das Erreichen einer Stahltemperatur von  $750$  °C empfohlen. Diese Temperatur sollte an allen Stahlbauteilen erreicht worden sein und die Prüfdauer sollte größer sein, als die vom Auftraggeber angestrebte Feuerwiderstandsdauer. Die Abbruchkriterien dürfen vom Auftraggeber verändert werden. Sollten keine anderen Angaben vorliegen, so ist die Prüfung dann zu beenden, wenn ein Grund zur Beendigung der Prüfung nach DIN EN 1363-1 vorliegt.

Da zwei von den drei nach DIN EN 1363-1 maßgebenden Abbruchgründen vom Auftraggeber vorgegeben werden, bleibt eigentlich nur der allgemeingültige Abbruchgrund der „Gefährdung der Sicherheit des Personals oder unmittelbar bevorstehende Beschädigung der Ausrüstung“.

An dieser Stelle muss erneut darauf hingewiesen werden, dass durch ein frühzeitiges Beenden der Prüfung ggf. keine Daten für die Auswertung vorliegen.

## 7 Prüfergebnisse

### 7.1 Verwertbarkeit der Prüfergebnisse

Nach Durchführung der Prüfungen sind die Ergebnisse vor einer weiteren Auswertung auf ihre Gültigkeit und Plausibilität zu überprüfen. Dabei müssen an dem belasteten Balken am oberen Flansch und am Steg 60 % der Messstellen gültig und in enger Übereinstimmung miteinander sein.

Am unteren Flansch müssen mindestens 75 % der Messstellen gültig und in enger Übereinstimmung miteinander sein. Bei den unbelasteten Balken müssen jeweils 50 % der Messstellen an den Flanschen und am Steg gültig und in enger Übereinstimmung sein.

Als Gültigkeitskriterium gibt die Norm den Ausfall von Messelementen oder ungewöhnliches Verhalten der Brandschutzmaßnahme oder fehlerhaften Zusammenbau des Probekörpers an. Die Liste ist jedoch nicht abschließend, so dass auch weitere Gründe eine Rolle spielen können. Hinsichtlich der engen Übereinstimmung wird keine nähere Aussage getroffen, so dass offensichtlich im Einzelfall entschieden werden muss, welche Elemente Ergebnisse in enger Übereinstimmung liefern oder welche Ergebnisse verworfen werden müssen.

Nach Überprüfung der Ergebnisse des jeweiligen Bauteils, ob die Ergebnisse gültig sind oder nicht, ist es erforderlich festzustellen, ob die gesamte Anzahl der Ergebnisse eine sinnvolle Beurteilung zulässt. Die Bandbreite der gültigen Ergebnisse schwankt von 90 % bei 10 Stützenabschnitten bis zu 84 % bei 26 Stützenabschnitten. Wenn diese Kriterien nicht erfüllt werden, muss der fehlerhafte Teil des Prüfsatzes verworfen werden. Wie der Begriff „enge Übereinstimmung“ zu verstehen ist, wird nicht näher ausgesagt.

## **8 Beurteilung der Prüfergebnisse**

### **8.1 Allgemeines**

Das grundlegende Verfahren zur Beurteilung des Temperaturverhaltens des jeweiligen Brandschutzmaterials wurde bereits eingangs beschrieben. Es geschieht über die Auswertung des Temperaturverlaufes an den kurzen Stützenabschnitten, nachdem diese Temperaturen über einen Korrekturfaktor angepasst wurden. Der Korrekturfaktor wird aus direktem Vergleich des unbelasteten Balkens mit dem jeweiligen belasteten Balken ermittelt.

Nach der ENV 13381-4 sollen zunächst numerische Analyseverfahren zum Einsatz kommen. Die grafische Analyse darf durchgeführt werden, nachdem die numerischen Analyseverfahren durchgeführt wurden.

Vor der Auswahl des entsprechenden Auswertungsverfahrens muss überprüft werden, ob die Mindestanzahl der Messwerte zur Verfügung steht bzw. es muss im Vorfeld die Anzahl der Probekörper mit den Vorgaben des jeweiligen Auswertungsverfahrens abgeglichen werden.

In dem allgemeinen Teil zu den Beurteilungsverfahren ist der Hinweis enthalten, dass es kein allgemeingültiges Rechenverfahren für alle Arten von Brandschutzmaterialien gibt. Es kann somit nur durch die Anwendung der einzelnen Analyseverfahren festgestellt werden, welches Verfahren geeignete Werte liefert. Dabei sind neben den Eingangsdaten, die bereits durch die

unterschiedlichen Brandschutzsysteme variieren können, auch Unterschiede hinsichtlich des jeweils verwendeten Auswertungsverfahrens denkbar.

Im folgenden werden in sehr kurzer Form die Schritte zur Auswertung der Prüfergebnisse beschrieben und die einzelnen Verfahren kurz vorgestellt.

## **8.2 Grundsätzliches Verfahren für alle Brandschutzsysteme**

Bevor ein Verfahren zur Auswertung der Messergebnisse zur Anwendung kommt, sind in einem ersten Schritt umfangreiche Aufbereitungen der Messdaten erforderlich.

Zunächst muss ein Korrekturfaktor  $k(\theta)$  ermittelt werden, der sich aus dem Vergleich der unbelasteten Balken mit dem belasteten Balken ergibt. Da hierbei unterschiedliche Dicken des Brandschutzsystems zum Einsatz kommen, ist eine weitere Korrektur in Abhängigkeit der verwendeten Dicke durchzuführen, so dass als Ergebnis der Korrekturwert  $k_d(\theta)$  vorliegt.

### **8.2.1 Anpassung der Temperaturdaten**

Als Temperaturwert zur weiteren Verwendung werden die „charakteristischen Stahltemperaturen“ verwendet. Diese sollen sich nach Norm aus dem Mittelwert der maximalen Temperaturen und dem Mittelwert der gesamten Temperaturen zusammensetzen. Das bedeutet, dass dem maximalen Wert numerisch das gleiche Gewicht gegeben wird, wie allen anderen Temperaturwerten zusammen.

Hinsichtlich der zu verwendenden Temperaturen treten jedoch einige Unklarheiten in der Norm auf. Die Temperatur für die Stützenabschnitte, in der Norm mit  $\theta_{sc}$  abgekürzt, bezieht sich in einem Abschnitt auf die „charakteristische“ Stahltemperatur. Einen Satz später wird jedoch ausgeführt, dass zur Beurteilung der thermischen Leistungsfähigkeit die mittlere Stahltemperatur gemeint sei. Da auch im Symbol und Abkürzungsverzeichnis beide Temperaturen für die Bezeichnung  $\theta_{sc}$  angegeben sind, scheint es so zu sein, dass zur Ermittlung des Korrekturfaktors zur Bestimmung des Einflusses der Haftfähigkeit  $k(\theta)$  die charakteristische Stahltemperatur verwendet werden soll, wohingegen bei der Beurteilung der thermischen Leistungsfähigkeit die mittlere Stahltemperatur verwendet werden soll, die bezgl. des Haftvermögens korrigiert werden muss.

### **8.2.2 Korrektur der Dicke**

Da unter Umständen die Dicke des Brandschutzmaterials beim belasteten und unbelasteten Balken nicht immer exakt übereinstimmt, ist es nach den Vorgaben der Norm erforderlich ein Korrekturverfahren auf die Temperaturwerte anzuwenden. Die Korrektur bezieht sich immer auf den unbelasteten Balken, so dass die Temperaturdaten des belasteten Balkens als charakteristische Stahltemperatur bestehen bleiben. Je nach gewähltem Auswertungsverfahren sind unterschiedliche Verfahren beschrieben, mit denen die Temperatur des unbelasteten Balkens korrigiert werden soll.

Mit Hilfe der so korrigierten Temperaturen kann in Abhängigkeit der vorhandenen Dicke des jeweiligen Brandschutzmaterials ein Korrekturfaktor  $k_d(\theta)$  ermittelt werden, mit dem dann die Temperaturen der jeweiligen Stützenabschnitte korrigiert werden.

### 8.2.3 Reaktive Systeme

Bei reaktiven Brandschutzsystemen erfolgt eine Beurteilung nahezu analog zu dem allgemeinen Verfahren. Es werden lediglich die Messergebnisse an der hohen Stütze mit in die Beurteilung mit einbezogen.

Bei den Ausführungen zur Korrektur des unbelasteten Balkens scheint ein Abschnitt vertauscht zu sein, da in diesem Abschnitt nur von der hohen Stütze gesprochen wird, die mit Temperaturwerten eines Stützenabschnitts verglichen wird. Allerdings wird von einer Temperatur  $\theta_{rc}$  ausgegangen, die als Größe nirgendwo definiert ist. Hierbei ist aber wahrscheinlich die „Tall Column“, gemeint, so dass die Bezeichnung richtig  $\theta_{TC}$  heißen muss. Es soll dann aus den Werten ein Korrekturfaktor  $k_d(\theta_{rc})$  ermittelt werden, der mutmaßlich sich erneut auf die hohe Stütze bezieht. Der Index müsste demnach „TC“ statt „rc“ lauten. Allerdings wird dieser in den angegebenen Formeln nicht verwendet. Stattdessen wird im Abschnitt für den belasteten Balken wie auch in dem Abschnitt für die hohe Stütze immer auf den Vergleich unbelasteter Balken zum belasteten Balken Bezug genommen.

Für die Ermittlung der mittleren Stahltemperatur der Stützenabschnitte soll immer der größere Wert des Korrekturfaktors genommen werden, also  $k_d(\theta_{LB})$  bzw.  $k_d(\theta_{TC})$ . Dieses kann jedoch nur dann geschehen, wenn die Gleichungen vorher entsprechend angepasst werden. Da im englischen Original die gleichen Angaben enthalten waren, kann ein Übertragungsfehler ausgeschlossen werden. Diese Thematik sollte vor einer Anwendung der Norm überprüft und ggf. korrigiert werden.

## 8.3 Beurteilungsverfahren für die thermische Leistungsfähigkeit

Grundsätzlich werden in der Norm drei verschiedene Ansätze zur Auswertung der Ergebnisse angesetzt:

- Analyseverfahren mit Differenzialgleichung (Berücksichtigung aller Temperaturen bzw.  $T \geq 350 \text{ °C}$ ).
- Analyseverfahren durch numerische Regression (Berücksichtigung der Temperaturen  $T \geq 350 \text{ °C}$ ).
- Grafisches Analyseverfahren (Berücksichtigung der Temperaturen  $T \geq 350 \text{ °C}$ ).

## 8.4 Kriterien für die Verwertbarkeit

Nach der Norm sind bestimmte Kriterien zu erfüllen, um die Verwertbarkeit der Analyse zu beurteilen. Dieses setzt voraus, dass eine Überprüfung nach den bereits vorgestellten Verfahren durchgeführt wurde. Da diese Festlegungen recht unverständlich in der Norm angegeben wurden, werden sie zunächst im Wortlaut wiedergegeben und anschließend analysiert.

- a) Für jede Stütze geringer Höhe darf die zur Bemessungstemperatur zu erreichende vorhergesehene Zeit um nicht mehr als 30 % von der korrigierten Temperatur zur Erreichung der Bemessungstemperatur abweichen.
- b) Der Mittelwert aus allen prozentualen Differenzwerten, die sich nach a) ergeben, muss kleiner null sein.
- c) Maximal 20 % der Einzelwerte von allen prozentualen Differenzwerten, die sich nach a) ergeben, dürfen größer als null sein.

Die Festlegung unter a) erscheint nicht sehr aussagekräftig, da die Zeit zum Erreichen der Bemessungstemperatur vom Auftraggeber angegeben werden muss. Wenn dieser hierbei Werte angegeben hat, die weit von den erreichten Werten abweichen (wobei es unerheblich ist, ob er sein Material über bzw. unterschätzt hat) ist eine Anwendung des grafischen Verfahrens bereits ausgeschlossen. Hier kann daher nur der abschließende Vergleich zwischen den rechnerisch ermittelten und den tatsächlich gemessenen und korrigierten Temperaturen an den kurzen Stützenabschnitten gemeint sein. Wenn b) erfüllt ist, muss der Auftraggeber sein Material als Gesamtes grundsätzlich unterschätzen, wobei ihm unter c) wieder ein Bereich von 20 % an einzelnen „Überschätzungen“ zugebilligt wird. Wenn diese Kriterien nicht erfüllt waren, darf eine Analyse mit den numerischen Verfahren „wiederholt“ werden. Eine erneute grafische Auswertung scheidet aus. In den einzelnen Analyseverfahren sind Hinweise enthalten, wie die Analyse modifiziert durchgeführt werden soll.

## 9 Erweiterter Anwendungsbereich

Das Ergebnis der Prüfung und der Analyse ist zunächst anwendbar auf den geprüften Dickenbereich des Brandschutzsystems und auf die geprüften Stahlprofile. Die erreichbare Feuerwiderstandsdauer ist auf die maximale Prüfdauer begrenzt.

In Abhängigkeit des verwendeten Auswertungsverfahrens ist es weiterhin zulässig, eine gewisse Erweiterung hinsichtlich Dicke des Brandschutzsystems, der Profilmomente und der Bemessungstemperatur vorzunehmen.

Unabhängig davon dürfen laut Norm „Informationen, die sich auf Grundlage eines Profilkfaktors ergeben haben, auf Stahlbauteile mit geringerem Profilkfaktor übertragen werden“.

Eine Übertragung auf mehrlagige Anwendungen ist möglich, wenn eine entsprechende Dicke des Brandschutzsystems mit einer entsprechenden Lagenanzahl geprüft wurde.

## **10 Praktische Anwendung**

Da der Teil der Norm hinsichtlich der reaktiven Brandschutzsystem missverständlich und teilweise widersprüchlich formuliert wurde, wird zunächst vorrangig auf die nichtreaktiven Systeme (Platten oder Putzbekleidungen) eingegangen. Die Anwendung bei reaktiven Systemen erfordert weitere Prüfungen und eine direkte Zuordnung der minimalen und maximalen Beschichtungsdicken. Diese liegen bei Prüfungen, die in der Vergangenheit durchgeführt wurden, nicht immer vor.

Für die jeweiligen Verfahren werden Schritt-für-Schritt Anleitungen zusammengestellt, die die Abarbeitung der Auswertung und Beurteilung der Prüfergebnisse vereinfachen sollen. Der globale Ablauf, von der Erzeugung der Daten der Prüfung bis zur Auswertung mit einem geeigneten Verfahren ist in der Norm auch auf den Bildern 2 bis 4 dargestellt.

Die praktische Anwendung konzentriert sich auf die Daten, die mit dem im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelten Programms gewonnen wurden, das die Arbeitsabläufe des numerischen Verfahrens nach Anhang F vereinfachen soll. Dabei sind jedoch von Nutzer vorher die einzelnen Kriterien zu überprüfen, ob das Verfahren überhaupt anwendbar ist.

### **10.1 Verfahren nach Anhang F (Variables $\lambda$ -Verfahren)**

#### **10.1.1 Allgemeines**

Grundsätzlich müssen die Temperaturwerte, die zur Beurteilung verwendet werden, dem Abschnitt 13 der DIN ENV 13381-4 entsprechen. Das bedeutet, dass im Vorfeld eine Korrektur des Haftvermögens und der Dicke vorgenommen werden muss.

Das Verfahren nach Anhang F (Analyse mit Differenzialgleichung, variabler  $\lambda$ -Ansatz) gliedert sich in 14 Teilschritte, wobei bereits berücksichtigt wurde, dass unter Umständen eine Wiederholung der Auswertung erforderlich wird, wenn die Daten nicht den Kriterien für die Annahme Verwertbarkeit der Ergebnisse entsprechen.

Im Verfahren nach Anhang F wird im ersten Schritt eine Anpassung der gemessenen Stahltemperaturen der Stützenabschnitte vorgenommen. Dabei soll für die Stützen geringer Höhe „die Abweichung der gemessenen Stahltemperaturen durch ein Verfahren wie durch die kubische Spline-Funktion oder durch Modelle der gleitenden Mittelwerte ausgeglichen“ werden. Der Zweck

dieser Abrundung der Messwerte wird nicht näher erwähnt. Es ist auch unklar, was mit dem Begriff „Abweichung der gemessenen Stahltemperaturen“ gemeint ist, da im Textteil der Norm die eigentliche Beurteilungsgrundlage der Mittelwert der Stahltemperaturen, die korrigiert wurden, sein soll.

Es kann also nur davon ausgegangen werden, dass durch die Interpolation mit der Spline Funktion die Genauigkeit der interpolierten Zwischenwerte in einem gewissen Maße gesteigert werden soll. Insbesondere im Hinblick auf den „kritischen Temperaturanstieg“, der in Intervallen von maximal 0,5 Minuten erfasst werden soll, scheinen durch die Interpolation die Zwischenwerte der Temperaturverläufe erzeugt zu werden. Ob diese Interpolation auch notwendig ist, wenn die Eingangsdaten der Prüfung in einem Zeitintervall von 0,5 Minuten oder kleiner aufgezeichnet wurden, wird in diesem Anhang nicht ausgesagt.

Die folgende Abbildung zeigt exemplarisch die Darstellung von gemessenen Mittelwerten an einem Stützenabschnitt und im Vergleich dazu eine kubische Spline-Funktion mit 300 Zwischenschritten.

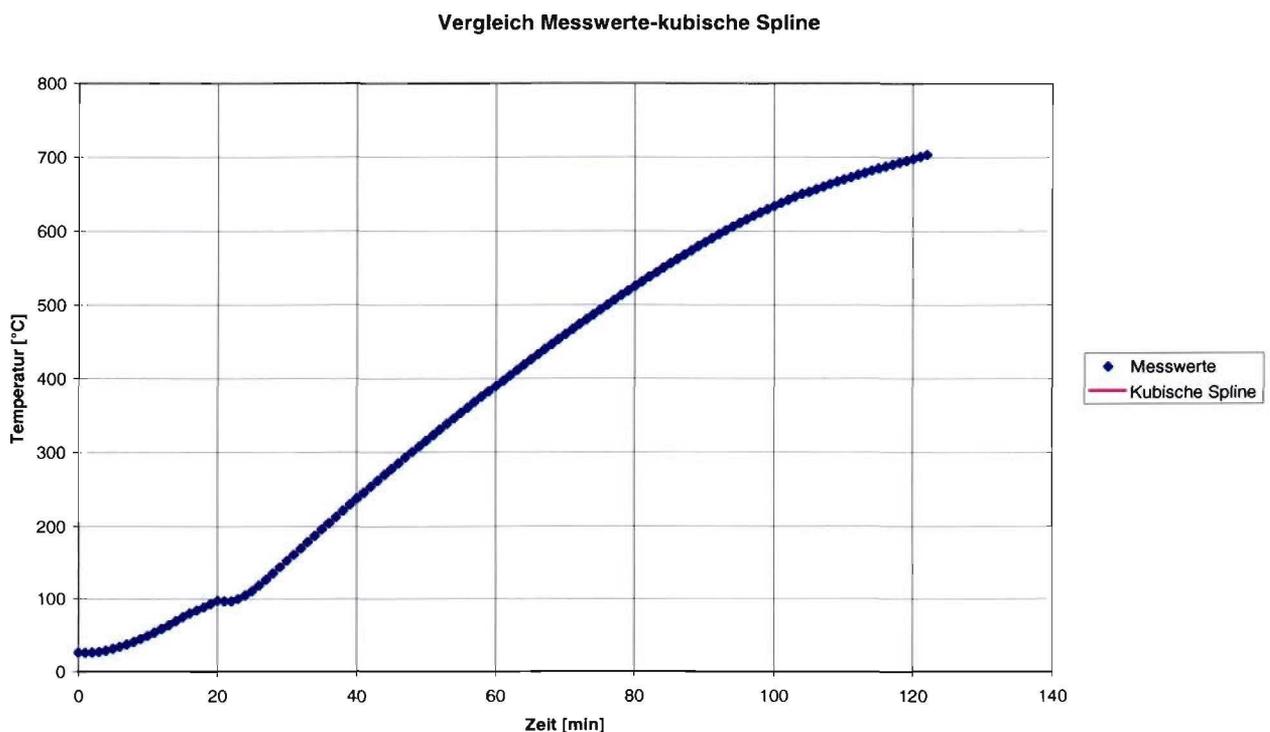


Abb. 1: Darstellung kubische Spline und Messwerte (Mittelwerte eines Stützenabschnitts)

In Abb. 1 kann man erkennen, dass durch die Anwendung der Spline Funktion kaum erkennbare Unterschiede zur Darstellung mit einer linearen Verbindung zwischen den Messpunkten entstehen.

### 10.1.2 Vorbereitung der Temperaturdaten

Zur Anwendung des Verfahrens nach Anhang F müssen die aufgezeichneten Temperaturdaten den Anforderungen des Abschnitt 13 der DIN ENV 13381-4 genügen. Das Verfahren des Abschnitt 13 beschreibt im Wesentlichen die Korrektur der Temperaturdaten aufgrund einer unterschiedlichen Materialdicke zwischen belasteten und unbelasteten Balken sowie eine Korrektur aufgrund des unterschiedlichen Haftvermögens am belasteten und unbelasteten Balken.

Das Verfahren beruht grundsätzlich darauf, die Temperaturwerte der unbelasteten Balken  $\theta_{UB}$  zu korrigieren. Dabei soll das Verfahren nach der Gleichung F.2 angewendet werden, um die effektive Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{p,t}$  des Brandschutzmaterials zu ermitteln. An dieser Stelle wird nichts über eine Abrundung der Messdaten ausgesagt. Da jedoch zur Ermittlung der effektiven Wärmeleitfähigkeit die maximale Zeitdifferenz  $\Delta t \leq 0,5$  Minuten betragen soll, werden die Temperaturdaten ebenfalls mit einer kubischen Spline Funktion geglättet. Da der Mittelwert der Brandraumdaten ebenfalls benötigt wird, wird auch diese Kurve durch eine kubische Spline geglättet. Die Funktion enthält in diesem Fall grundsätzlich 1200 Stützstellen, unabhängig von der Branddauer. Bei einer maximalen Branddauer von 300 Minuten entspricht dieser Abstand maximal 15 Sekunden, so dass ausreichend Temperaturdaten vorhanden sind.

Im Rahmen der Bearbeitung zu diesem Forschungsvorhaben hat sich herausgestellt, dass unter Umständen für jeden Versuch eine eigene Brandraumkurve hinterlegt sein muss. Die daraus resultierende Datenmenge ist enorm, so dass im Rahmen des rechnerischen Verfahrens die Brandraumtemperatur dem rechnerischen Temperaturverlauf der ETK gleichgesetzt wird.

Exemplarisch wird dieses im folgenden für einen unbelasteten Träger mit einer 15 mm dicken Plattenbekleidung gezeigt. Da der belastete Träger wie auch der unbelastete Trägerabschnitt über die gleiche Materialdicke verfügen, unterscheidet sich erwartungsgemäß der Verlauf der korrigierten Temperatur nicht von dem ursprünglichen.

Der gewonnene Verlauf der Wärmeleitfähigkeit über die Zeit wird in der nachfolgenden Grafik dargestellt.

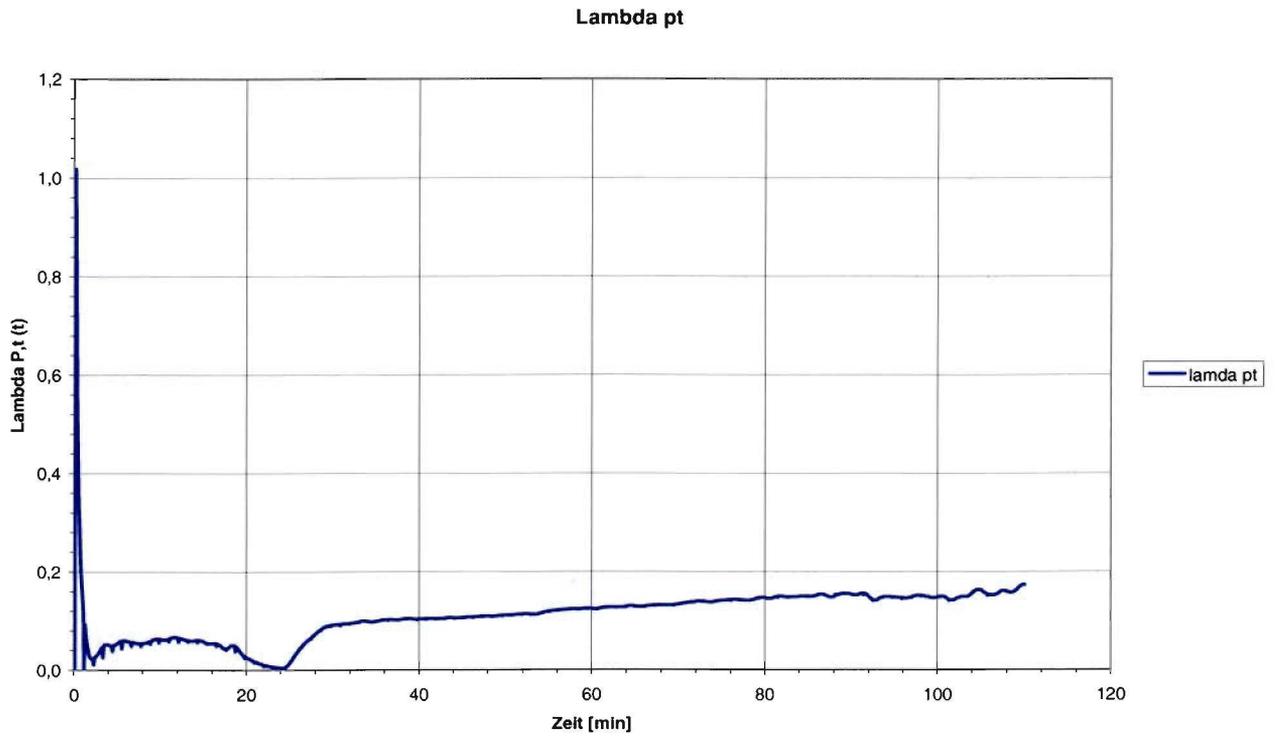


Abb. 2: Verlauf der berechneten Wärmeleitfähigkeit über die Branddauer

Im Rahmen des Verfahrens nach Anhang F soll der gewonnene  $\lambda_{p,i}(t)$ -Verlauf überführt werden in eine Zuordnung zur Temperatur des Brandschutzmaterials  $\theta_p$ . Dieser Zusammenhang ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

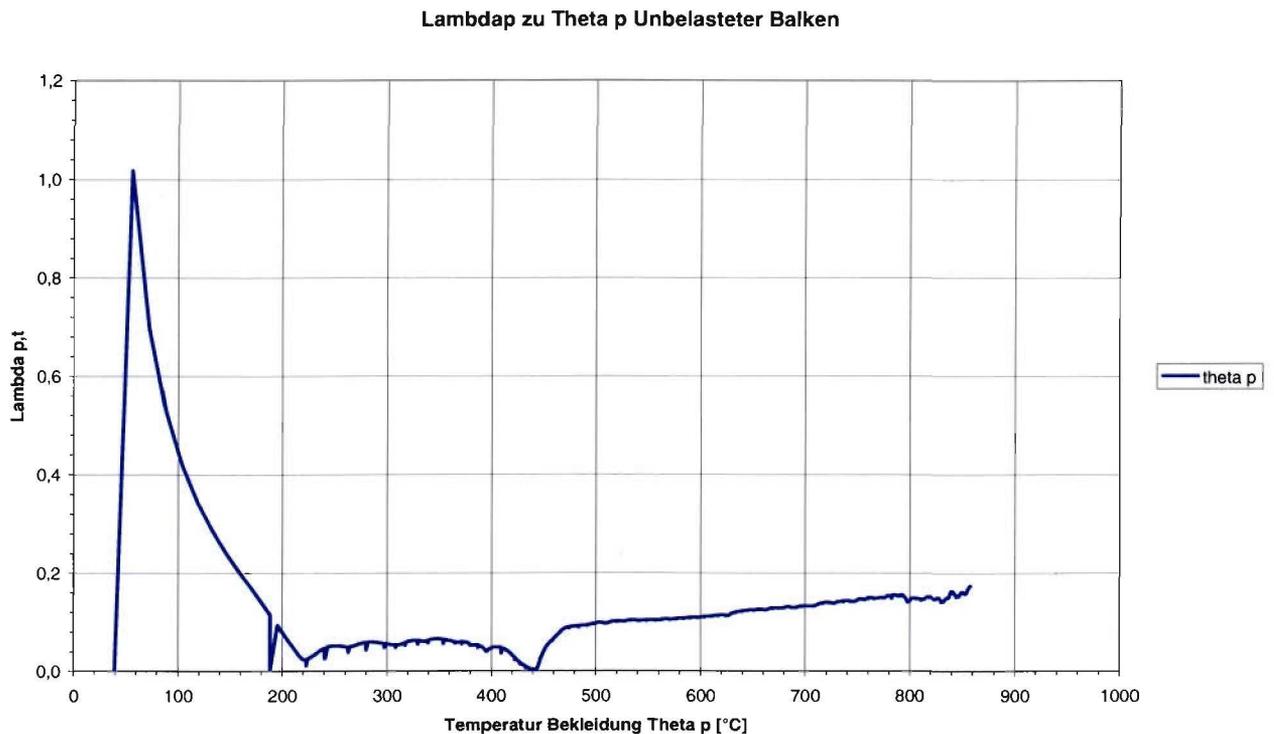


Abb. 3: Verlauf der berechneten Wärmeleitfähigkeit über die Temperatur in der Bekleidung  $\theta_p$

Mit den hieraus gewonnenen Daten kann „rückwärts“ die Temperaturerhöhung im unbelasteten Balken berechnet werden, die aufsummiert die Temperatur im Balken ergibt. Dabei ist jedoch die Dicke des Brandschutzmaterials an dem belasteten Balken einzusetzen.

Im vorliegenden Fall ergibt sich bei einer Plattenbekleidung (d.h. gleiche Bekleidungsdicke bei belastetem und unbelastetem Balken) ein identischer Verlauf der Temperaturen.

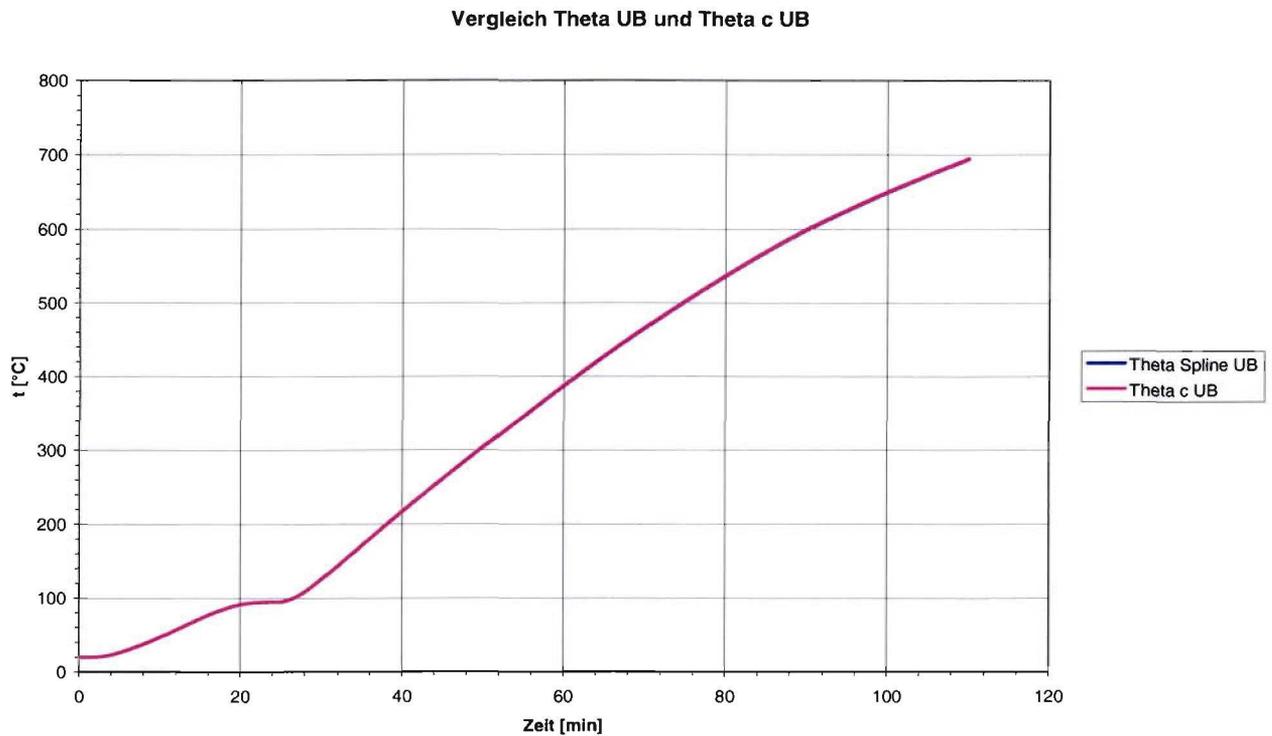


Abb. 4: Vergleich gemessene und nach dem Verfahren 13.2.3. a) korrigierte Temperatur bei  $d_{LB} = d_{UB}$

Wenn die Bekleidungsdicke am unbelasteten Balken größer ist, als am belasteten Balken, so muss die Temperatur am unbelasteten Balken korrigiert werden. Sie muss im Vergleich zu den gemessenen Temperaturdaten vergrößert werden.

In der nachfolgenden Abbildung ist dargestellt, wie sich der Temperaturverlauf ändert, wenn die Dicke des belasteten Balkens mit  $d_{LB} = 15 \text{ mm}$  und des unbelasteten Balkens mit  $d_{UB} = 20 \text{ mm}$  angesetzt wird.

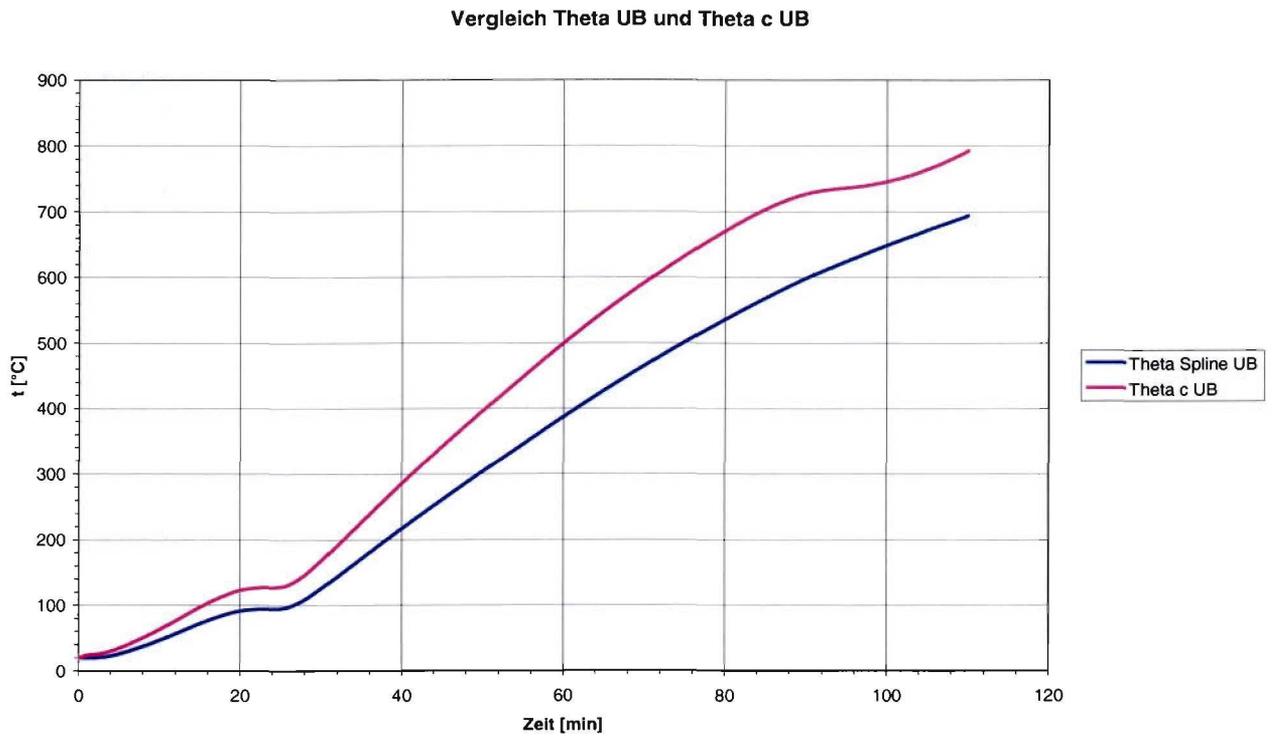


Abb. 5: Vergleich gemessene und nach dem Verfahren 13.2.3. a) korrigierte Temperatur bei  $d_{LB} < d_{UB}$

Die Temperatur des unbelasteten Balkens wird somit erhöht, um den Einfluss der größeren Bekleidungsdicke zu berücksichtigen.

Bei einer geringeren Bekleidungsdicke am unbelasteten Balken, wird die gemessene Temperatur durch Anwendung des Verfahrens nach 13.2.3 a) der DIN ENV 13381-4 verringert. Bei Ansatz der Werte  $d_{UB} = 15 \text{ mm}$  und  $d_{LB} = 20 \text{ mm}$  ergibt sich der folgende Zusammenhang.

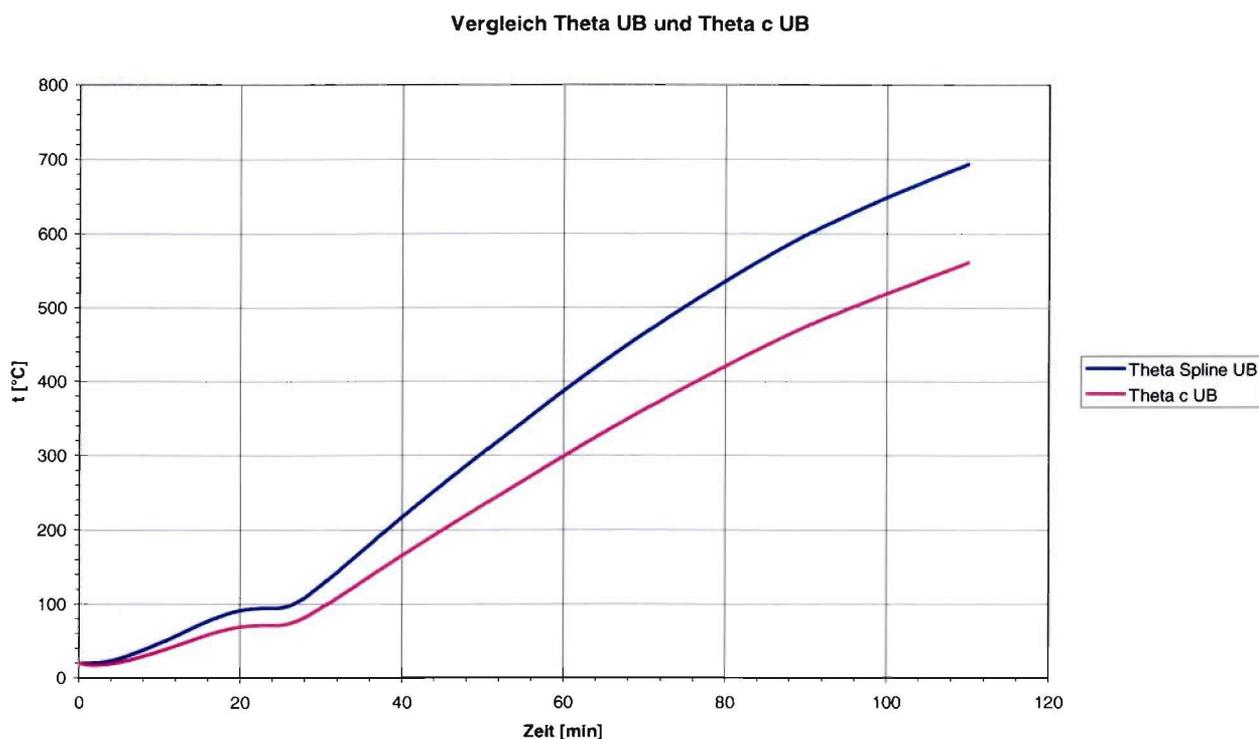


Abb. 6: Vergleich gemessene und nach dem Verfahren 13.2.3. a) korrigierte Temperatur bei  $d_{LB} > d_{UB}$

Aus den korrigierten Temperaturdaten des unbelasteten Balkens im Vergleich zu den Daten mit dem belasteten Balkens können die Korrekturwerte  $k_d(\theta)$  in Abhängigkeit über die korrigierte Temperatur des unbelasteten Balkens  $\theta_{c(UB)}$  aufgetragen werden. In Abhängigkeit der Temperatur sollen dann sämtliche Temperaturen der Stützenabschnitte korrigiert werden. Die korrigierten Stütztemperaturen bilden dann die Grundlage für die weitere Beurteilung.

Die Verläufe für die minimale und maximale Dicke des Brandschutzmaterials  $k(\theta)$  sind in den beiden nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

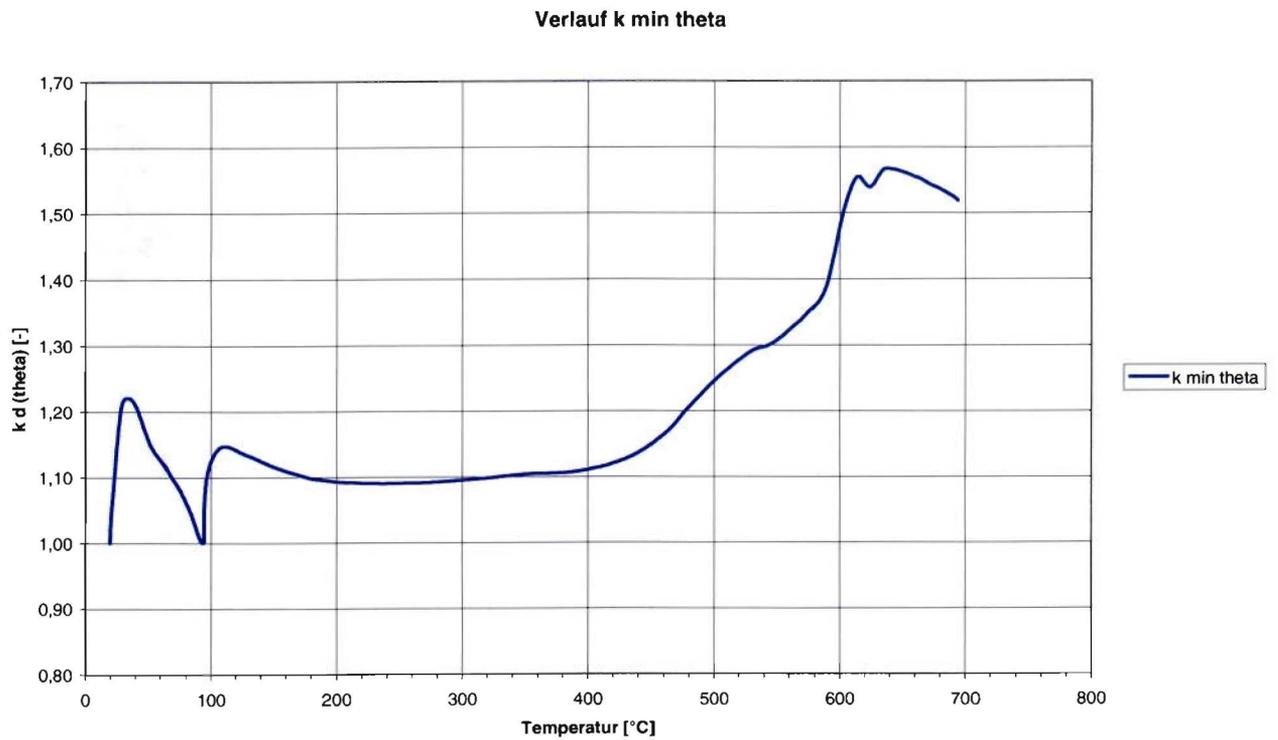


Abb. 7: Verlauf des Korrekturfaktors  $k(\theta)$  bei der minimalen Bekleidungsdicke

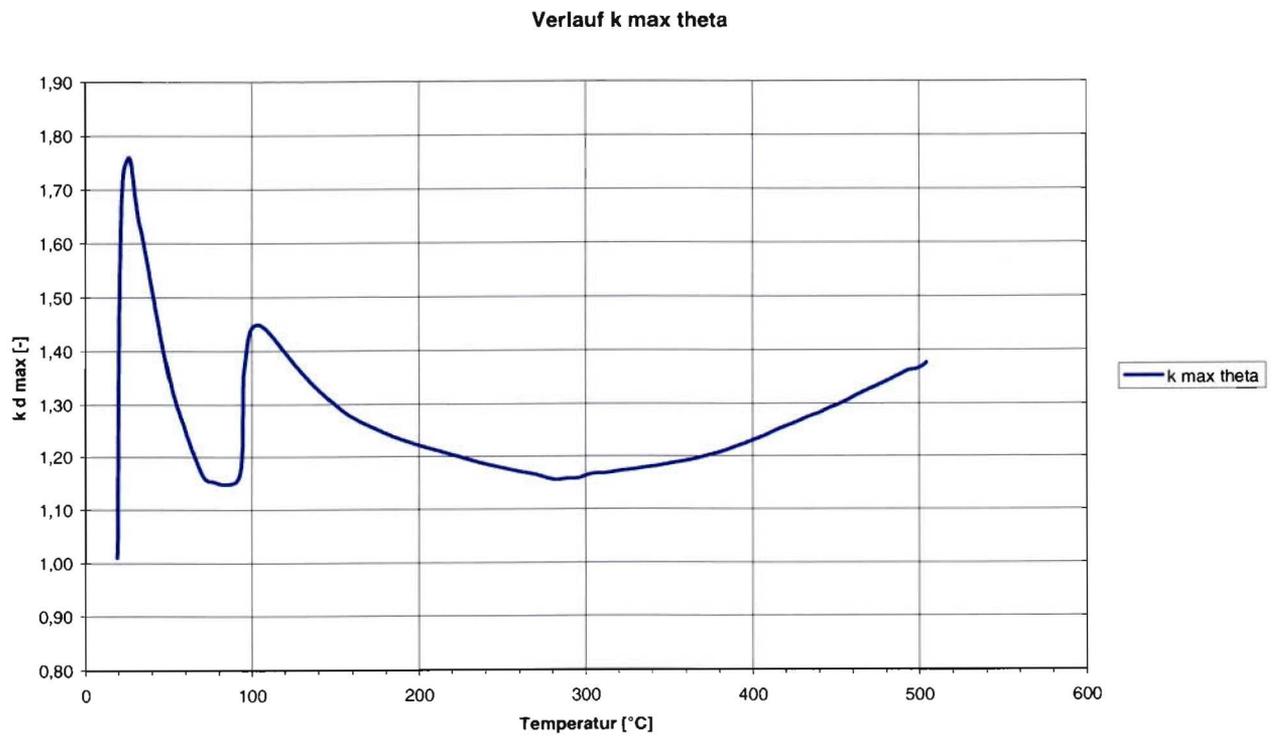


Abb. 8: Verlauf des Korrekturfaktors  $k(\theta)$  bei der maximalen Bekleidungsdicke

### 10.1.3 Beginn Auswertungsverfahren nach Anhang F

Nachdem die gemessenen Temperaturdaten entsprechend der Dicke und des Haftvermögens korrigiert wurden, kann der schrittweise Ablauf der Auswertung nach Anhang F beginnen.

In einem ersten Schritt sollen die Temperaturdaten durch eine kubische Spline oder durch Modelle der gleitenden Mittelwerte ausgeglichen werden. In den vorangegangenen Schritten und Grafiken ist die Glättung durch eine kubische Spline erfolgt. Dieses erfolgt innerhalb einer EXCEL-Tabelle als VBA Makro. Der mathematische Teil der kubischen Spline wurde auf der Internetseite „<http://www.tfh-wildau.de/rhirte/informatik/excel/splines.htm>“ entnommen und für die Randbedingungen im vorliegenden Fall angepasst. Grundsätzlich wird die Spline Interpolation über 1200 Stützstellen geführt. Das bedeutet, dass bei einer Aufzeichnung im Minutentakt bei einer Branddauer von 4 Stunden, statt 240 Messwerten 960 interpolierte Messwerte vorliegen.

Problematisch kann dabei jedoch sein, dass der belastete Versuch und die weiteren Versuche an Stützenabschnitten in mehreren Prüfungen über eine unterschiedliche Dauer durchgeführt werden. Dieses hat zur Folge, dass statt des einheitlichen Minutentaktes unterschiedliche Zeitdifferenzen zwischen den interpolierten Werten vorliegen, so dass nicht mehr exakt verglichen werden kann.

Nach Auswertung der Spline Interpolation soll weiterhin für jeden Stützenabschnitt die Länge des Feuchteplateaus  $D_p$  bestimmt werden. Dieses ist bestimmt als Abschnitt in Minuten zwischen dem Schnittpunkt zweier Geraden mit der  $t = 100^\circ \text{C}$  Linie. Die beiden Geraden werden je durch zwei Punkte bestimmt. Das Verfahren entspricht dem bereits vorgestellten Verfahren für die unbelasteten Balken. Es wird auch analog in die Auswertung übernommen. Für unterschiedliche Dicken des Brandschutzmaterials wird in der Norm unterstellt, dass das Verhalten sich linear zur Dicke verhält.

#### 10.1.3.1 Schritt 1

In der nachfolgenden Grafik ist die Auswertung des Feuchteplateaus für die Stütze 1 mit einer minimalen Bekleidungsstärke dargestellt. Der Temperaturverlauf wurde hinsichtlich der Dicke nicht korrigiert, da es sich um eine Plattenbekleidung handelte. Die Korrektur hinsichtlich der Haftfähigkeit wurde durchgeführt.

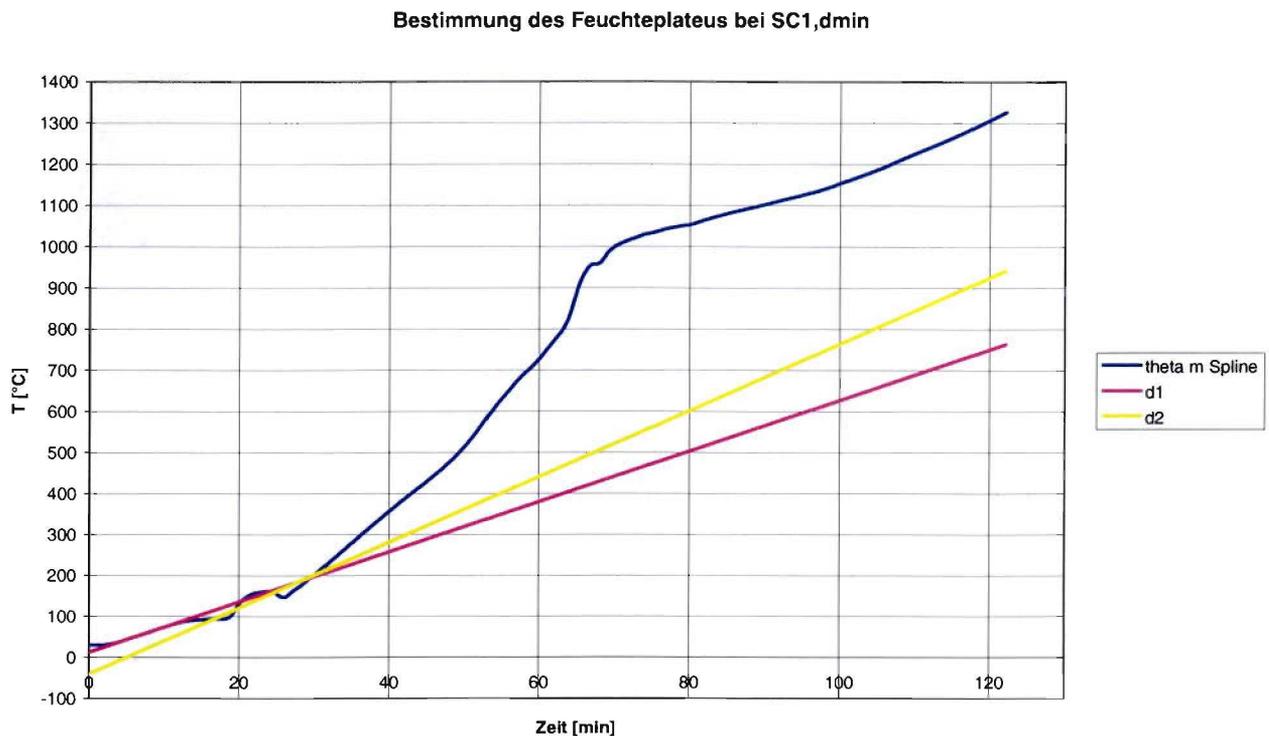


Abb. 9: Darstellung der Geraden  $d_1$  und  $d_2$  zur Bestimmung des Feuchteplateaus  $D_p$

In der Abb. 9 kann man erkennen, dass die Bestimmung des Feuchteplateaus sehr von dem Verlauf der korrigierten Temperatur der Stützenabschnitte abhängig ist. Durch einen „wellenförmigen“ Verlauf wird das Feuchteplateau im vorliegenden Fall verkürzt. Die Verläufe für das exemplarische Beispiel sind im Anhang dargestellt.

#### 10.1.3.2 Schritt 2 bis 4

Im nächsten Schritt wird für jeden Stützenabschnitt die effektive Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_p$  als Funktion der Zeit bestimmt. Durch die näherungsweise Berechnung der Temperatur des Brandschutzmaterials als Mittelwert aus Ofentemperatur und Stahltemperatur soll nach der Norm die Wärmeleitfähigkeit auch über die Temperatur aufgetragen werden können.

Sofern keine Daten hinsichtlich der Wärmekapazität des Brandschutzmaterials vorliegen, soll laut Norm ein Wert für  $c_p = 1000 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$  angesetzt werden. Bei diesem Wert muss ein Druckfehler unterlaufen sein, da die übliche Wärmekapazität von Bekleidungen ca.  $1100 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$  bis  $1700 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$  beträgt. Ein Ansatz des in der Norm genannten Wertes führt zu nicht mehr realen Temperaturverläufen. Es wurde daher mit dem Wert  $1000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$  weitergerechnet. Dieses konnte durch eine Überprüfung der eingesetzten Einheiten bestätigt werden.

Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft das Ergebnis einer solchen Berechnung.

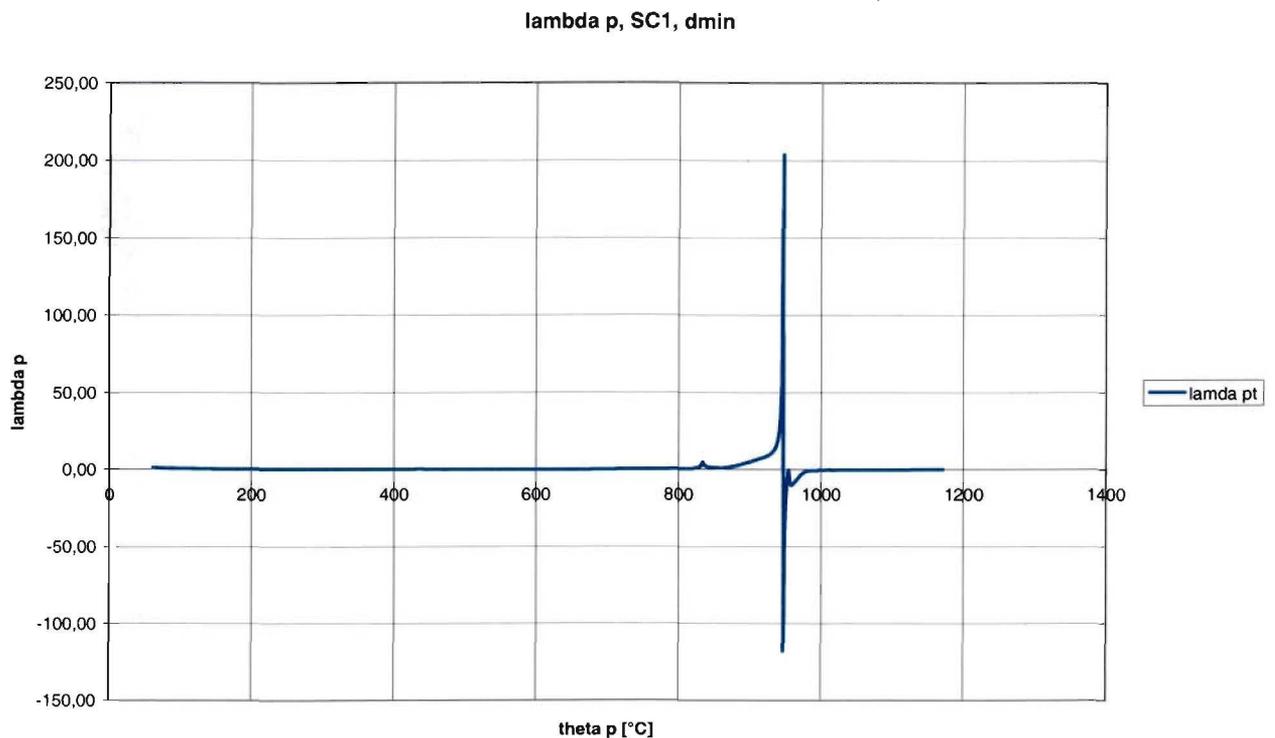


Abb. 10: Verlauf der Wärmeleitfähigkeit über die Temperatur des Brandschutzmaterials (IPE 200,  $d_p=15$  mm)

Man erkennt, dass bei einer Temperatur von ca. 950°C die Wärmeleitfähigkeit des Brandschutzmaterials eine Unstetigkeit aufweist. Im vorliegenden Fall der Abb. 10 handelt es sich um ein IPE 200 Profil mit einer Bekleidungsstärke von 15 mm. Der Faktor  $A_p/V$  beträgt 210 m<sup>-1</sup>. Die Unstetigkeit und der Abfall in den negativen Bereich bedeutet, dass die Stahltemperatur höher ist, als die mittlere Temperatur im Brandraum. Daraus resultierend wird auch die effektive Wärmeleitfähigkeit insgesamt negativ. Die Norm sagt nichts dazu aus, wie in einem solchen Fall zu verfahren ist.

Dieses Phänomen tritt bei allen Brandschutzmaterialien auf, bei denen die minimale Dicke geprüft wurde und die im Rahmen des Brandversuches abfallen. Die gemessenen Stahltemperaturen entsprechen somit ungefähr der Brandraumtemperatur. Konsequenterweise müsste dieser Bereich bei der Analyse außer Acht gelassen werden, da hier keine Daten des Brandschutzsystems vorliegen, sondern nur noch Werte, die einen ggf. zufälligen Unterschied der Ofentemperatur darstellen.

Für einen geringeren Profilkoeffizienten ergibt sich ein anderes Bild.

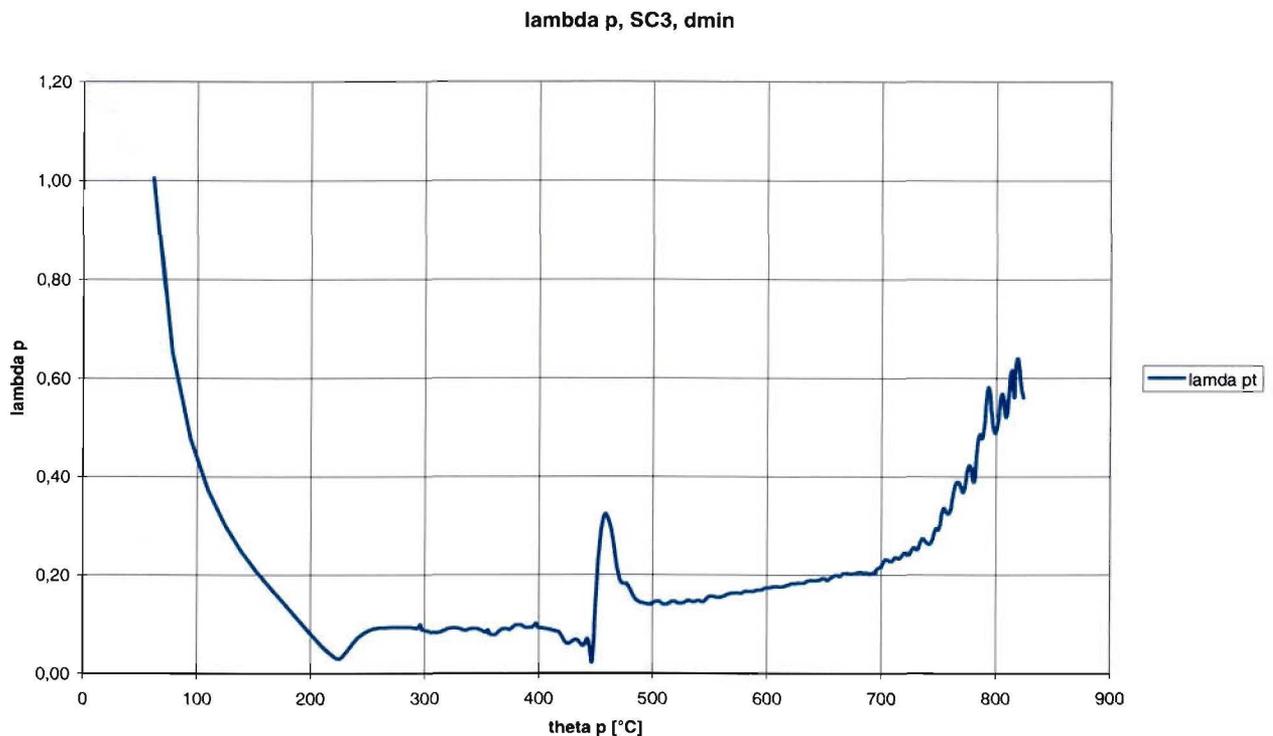


Abb.11: Verlauf der Wärmeleitfähigkeit über die Temperatur des Brandschutzmaterials (HEM 280,  $d_p=15$  mm)

Man kann erkennen, dass bei einem massiveren Stahlprofil die Erwärmung viel langsamer erfolgt, so dass auch bei der grafischen Darstellung der Wärmeleitfähigkeit sich ein viel detaillierter Verlauf ergibt. Bei diesem Profil ist während des Versuches auch kein Abfallen erfolgt.

Durch die Mittelwertbildung kann davon ausgegangen werden, dass in dem Verlauf der Wärmeleitfähigkeit bereits der Einfluss des praxisgerechten Einbaus mit berücksichtigt wird. Die mittlere Temperatur des Brandschutzmaterials  $\theta_p$  enthält somit auch die Einflüsse, die sich aus dem verwendeten Stahlprofil und der Befestigungsart des Brandschutzmaterials ergeben.

### 10.1.3.3 Schritt 5 und Schritt 6

Im Schritt 5 werden für Temperaturintervalle von jeweils 50 °C die Mittelwerte für den jeweiligen Temperaturbereich des Stützenabschnitts gebildet. Der zu betrachtende Temperaturzeitraum beträgt 0 °C bis 1000 °C.

Im darauffolgenden Schritt wird offensichtlich das gleiche nochmals gefordert, jedoch für einen eingeschränkteren Temperaturbereich. Der Temperaturzeitraum beträgt nun 250°C bis 1000°C. Aus den jeweiligen Indizes kann jedoch geschlossen werden, dass nun der Mittelwert aus allen Stahlstützen für einen entsprechenden Bereich gebildet werden soll. In der Symbolerläuterung wird jedoch als Bezugstemperatur die Stütztemperatur genommen und nicht die Temperatur des

Brandschutzmaterials. Dieser Sachverhalt ist sehr unklar in der Norm definiert, da in der Erläuterung des entsprechenden Schritts die Temperatur des Brandschutzmaterials zugrundegelegt wird. Es wird jedoch davon ausgegangen, dass der Mittelwert des Brandschutzmaterials gemeint ist, da dieses indirekt auch von der Temperatur der Stützenabschnitte abhängig ist.

Bei der Auswertung wird deutlich, dass es erforderlich ist, während der Prüfung alle Stützenabschnitte auf eine Temperatur von über 750°C zu bringen. Geschieht dieses während der Prüfung nicht, so fehlen die Temperaturdaten bei der Auswertung. Im Rahmen der Excelberechnung werden diese Werte nicht berücksichtigt, da bei Prüfungen nach dem deutschen Verfahren nicht bis in diese hohen Temperaturbereiche in allen Stützenabschnitten vorgedrungen wird.

Bei der Bildung der  $\lambda_p$  Werte kann eine Schwierigkeit auftreten. Durch die Korrektur der Temperaturen an den Stützenabschnitten kann es unter Umständen passieren, dass die korrigierten Temperaturen an den Stützenabschnitten höher sind, als die Brandraumtemperatur. Das hat zur Folge, dass die Gleichung F.2 der Norm ein negatives Ergebnis liefert. Dieses tritt nach den im Rahmen dieses Forschungsvorhabens gemachten Erfahrungen jedoch nur im sehr hohen Temperaturbereich (~950°C) auf, da hier die Bekleidung an den belasteten Stahlträgern abgefallen ist. Da dieser Bereich im allgemeinen nicht in die Beurteilung mit einfließt, kann dieses als akzeptabel angesehen werden. Für die automatisierte Berechnung ist es allerdings sehr störend, da der kritische Temperaturanstieg bei Verwendung eines negativen  $\lambda_p$ -Wertes auch insgesamt negativ wird. Eine Anweisung, wie dann der Temperaturanstieg bestimmt werden soll, ist in der Norm nicht enthalten.

#### 10.1.3.4 Schritt 7

Die Kurve für das Feuchteplateau wird entsprechend den Vorgaben der Norm berechnet. Bei der entsprechenden Anzahl an Messwerten erhält man eine entsprechende Kurve.

#### 10.1.3.5 Schritt 8

Im folgenden Schritt wird für jede Stahlstütze „rückwärts“ die Temperatur berechnet. Es erscheint sinnvoll, dieses von den gemessenen Temperaturdaten unabhängig zu gestalten. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wird auf die Normbrandkurve zurückgegriffen, so dass für alle Zeitpunkte Temperaturbereiche vorliegen. Dieses erscheint akzeptabel, da sich bei den Prüfungen von Stahlbauteilen die tatsächlich vorhandenen Temperaturen im Brandraum sehr nahe an der Soll-Temperatur bewegen.

Bei der Berechnung der Temperaturen soll die charakteristische Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_{char}$  verwendet werden. Da im ersten Schritt noch keine Korrektur erforderlich ist, entspricht der Wert dem vorher berechneten  $\lambda_{ave}$ .

Bei Erreichen einer Temperatur von 100°C wird automatisch das Feuchteplateau eingefügt. Die Länge wird mit der unter Schritt 7 aufgestellten Gleichung ermittelt.

Die Brandraumtemperatur  $\theta_t$  wird als Normbrandkurve angesetzt.

In der folgenden Abbildung wird exemplarisch aufgezeigt, wie sich die drei in der Beurteilung verwendeten Temperaturen zueinander verhalten.

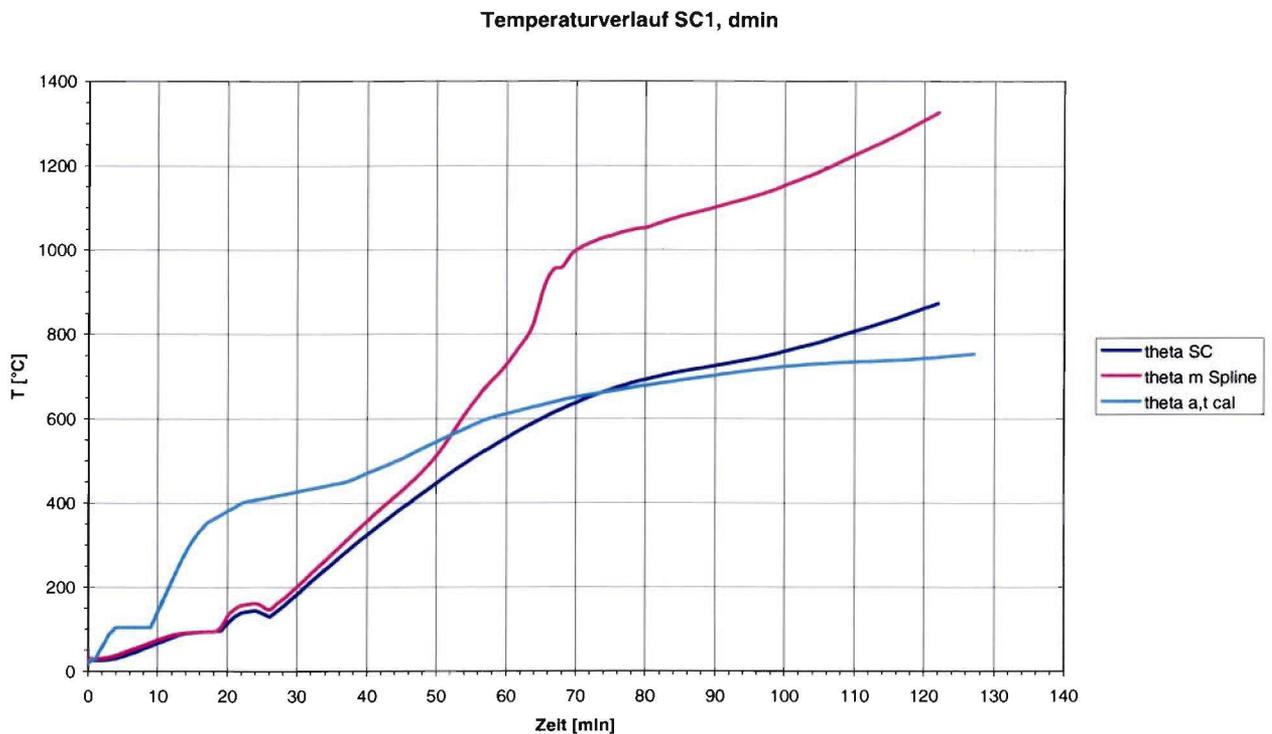


Abb. 12: Temperaturverläufe gemessen, korrigiert und berechnet

Die Linie „theta SC“ stellt die gemessene Temperatur an dem IPE 200 Stützenabschnitt dar. Durch die Korrektur der Dicke und des Haftvermögens erhält man nach Anwendung der kubischen Spline Interpolation die Kurve „theta m Spline“.

Nach Durchlaufen der Schritte des Auswertungsschemas erhält man den berechneten Temperaturverlauf „theta a,t cal“ des Stahlprofils. Gut zu erkennen ist, dass im Bereich bis ca. 500°C die Temperaturen noch höher liegen, als die mit dem Korrekturfaktor  $k_d(\theta)$  modifizierte Werte. Erst ab ca. 550°C beginnen die berechneten Werte weit unterhalb des korrigierten Temperaturprofils zu liegen.

#### 10.1.3.6 Schritt 9

Im Schritt 9 werden nur die zu den jeweiligen Bemessungstemperaturen gehörenden Zeiten aus den berechneten Daten herausgefiltert.

#### 10.1.3.7 Schritt 10

In diesem Schritt sollen die berechneten Zeiten mit den gemessenen Zeiten an der entsprechenden Stütze verglichen werden. Hierbei wird nicht deutlich, dass eigentlich die korrigierten Temperaturwerte gemeint sind, wie sie in Abschnitt 13.6.1 gefordert werden.

Wenn die Kriterien nicht eingehalten werden, soll ein Korrekturverfahren nach Schritt 11 und 12 vorgenommen werden.

Aus den bei diesem Forschungsvorhaben gewonnenen Erfahrungen kann man sagen, dass im Bereich bis 450°C und in einem Bereich ab ca. 600°C die Kriterien nicht eingehalten werden. Damit werden auch die Gesamtkriterien nicht erfüllt.

In diesem Fall soll ein Korrekturverfahren angewendet werden, bei dem die Standardabweichung  $\lambda_{sp}$  für den jeweiligen Temperaturbereich über einen Faktor K angepasst werden soll, so dass die Ergebnisse die Kriterien der Norm erfüllen. Das Verfahren stammt aus den Vorgaben der Statistik, wobei davon auszugehen ist, dass der Wert K größer wird, je weniger Werte vorher zur Verfügung standen. Im allgemeinen ist davon auszugehen, dass der Wert K bei 10 ermittelten  $\lambda$ -Werten ungefähr bei 2,07 liegen wird. Der Wert wird von dem Programm iterativ bestimmt, wobei zu jedem K-Wert die Zahl der erfüllten Kriterien angezeigt wird. Im vorliegenden Fall ergab sich für  $K = 0,3$  und für  $C = 0,00015$  mit dem die weitere thermische Analyse durchgeführt wird.

#### 10.1.3.8 Ausgabe der Ergebnisse

Mit den aus diesen Daten gewonnenen Ergebnissen wird dann die abschließende Beurteilung und die Erzeugung der nach der Norm vorgeschriebenen Tabellen vorgenommen.

Dazu werden für die entsprechenden  $A_m/V$  Werte die Temperaturverläufe mit den jeweiligen Materialdicken erzeugt. In einem abschließenden Schritt werden zu den jeweiligen Zeitdauern des Feuerwiderstandes die erforderlichen Dicken des Brandschutzsystems ermittelt und tabellarisch ausgegeben.

### 10.1.4 Erfahrungen und Bewertungen

Nach Anwendung des Auswertungsverfahrens nach Anhang F DIN ENV 13381-4 kann festgestellt werden, dass in einer Vielzahl der Fälle ähnliche, z.T. auch ungünstigere Ergebnisse erhalten werden, wie nach den bisherigen nationalen Auswertungen. Dabei muss berücksichtigt werden, dass der Anhang F, wie auch die Norm an sich, sehr schwer verständlich geschrieben ist und im Rahmen der Forschungsarbeit Annahmen getroffen wurden.

Dies bezieht sich z.B. auf die Vorgehensweise zur Bestimmung der Brandraumtemperatur. Da sich herausgestellt hat, dass Brandprüfungen mit unterschiedlichen Dauern durchgeführt werden, hat es sich als zweckmäßig erwiesen, die Brandraumtemperatur als die ETK der Norm abzubilden, so dass

für jeden Zeitbereich bis zu 5 Stunden ein Ergebnis vorliegt. Kürzere Branddauern treten insbesondere bei den belasteten Prüfungen auf, weil hier durch die Auflast unter Umständen die Prüfung früher beendet werden muss. Diese Temperaturwerte fehlen dann bei den Stützenabschnitten, die erfahrungsgemäß über einen längeren Zeitraum einer Brandbeanspruchung ausgesetzt werden können. Teilweise sind die längeren Branddauern sogar zwingend erforderlich, da sonst Werte zur thermischen Beurteilung fehlen. Die andere Möglichkeit wäre für jede Gruppe von Stützenabschnitten die jeweils dazugehörige Brandraumkurve mit auszuwerten. Dieses bedeutet jedoch eine noch größere Datenmenge, die verarbeitet werden muss. Ein weiterer Punkt ist die Angabe der spezifischen Wärmekapazität der Bekleidungs- und Beschichtungstoffe. Im allgemeinen lag diese in der Vergangenheit nicht vor, so dass sie nach Norm mit einer Größenordnung  $c_p = 1000 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$  angesetzt werden soll. Bei Verwendung dieses Wertes liefert die Berechnung jedoch keine nachvollziehbaren Werte. Da in den Formeln alle Werte ohne Einheiten angegeben wurden, wurde der Wert auf  $1000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$  verringert, so dass nachvollziehbare Ergebnisse erhalten wurden.

Weiterhin wurde die Anpassung an die Kriterien von Abschnitt 13.6.1 der Norm beendet, wenn ein lokales Maximum hinsichtlich der Anzahl der Übereinstimmungen erreicht wurde.

Der erweiterte Anwendungsbereichs des Verfahrens muss auch in die Bewertung mit einbezogen werden. Bei Anwendung dieses Verfahrens ist es zulässig, den Profilkfaktor um 20 % zu verringern bzw. um 50 % zu vergrößern. Die Verringerung erscheint nicht sofort logisch, da die Ergebnisse der Norm an einem Profilkfaktor laut Abschnitt 15 für alle kleineren Profilkfaktoren gelten. Durch die Erhöhung des zulässigen Profilkfaktors um 50 % werden Profile bis zu  $A_m/V = 300 \text{ m}^{-1}$  mit in die Beurteilung aufgenommen, wenn als kleinster Profilkfaktor der IPE 200 ( $A_m/V=210\text{m}^{-1}$ ) geprüft wurde.

Die Vergrößerung der Dicke um  $\pm 20\%$  erscheint bei Putzen und Plattenbekleidungen noch nachvollziehbar, bei Dämmschichtbildnern kann diese Erhöhung jedoch, bezogen auf die Haftfähigkeit, kontraproduktiv sein. Insbesondere muss berücksichtigt werden, dass bei Dämmschichtbildnern die Gewinnung der Daten für die Beurteilung sehr schwierig ist, da hinsichtlich der Rohdichte und der spezifischen Wärme in den seltensten Fällen Daten vorliegen und die Norm explizit erwähnt, dass die dort zusammengestellten Verfahren für die Behandlung von Dämmschichtbildnern nicht geeignet sind.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass das Verfahren der Norm in allen Belangen extrem aufwendig gestaltet ist. Durch die Mindestzahl von 10 Prüfkörpern zur Abdeckung von Dicken und Profilkfaktoren, durch die ungelöste Problematik des Knickens der hohen belasteten Träger und die immense Anzahl an Temperaturmessstellen und den sehr aufwendigen Ablauf der Auswertung kann davon ausgegangen werden, dass mit dem Prüfverfahren ähnliche, teilweise auch „schlechtere“ Werte als bisher erhalten werden. Der Aufwand, insbesondere der finanzielle, den die Auftraggeber

dafür aufbringen müssen, ist enorm. Weiterhin muss festgestellt werden, dass das Verfahren sehr fehleranfällig ist. Durch die enorme Datenmenge kann es passieren, dass Temperaturdaten falsch zugeordnet werden und somit andere Ergebnisse erhalten werden. Eine ungewollte Verschlechterung oder auch Verbesserung der Ergebnisse kann somit nicht ausgeschlossen werden. Hier hilft nur die optische Kontrolle auf Plausibilität der erzeugten Temperaturdiagramme und der Vergleich zwischen den gemessenen, den korrigierten und den rechnerisch bestimmten Temperaturdaten.

## 10.2 Verfahren nach Anhang I (Grafisches Verfahren)

### 10.2.1 Allgemeines

Beim grafischen Verfahren werden ebenfalls nur die Daten an den kurzen Stützenabschnitten verwendet. Die Daten müssen vor Beginn der Analyse ebenfalls hinsichtlich der Dicke und des Haftvermögens korrigiert werden.

Zunächst werden die Daten ggf. hinsichtlich der Dicke korrigiert. Dieses soll die spätere Auswertung vereinfachen. Dabei wird ein Punkt  $d_{av}$  zwischen der minimalen und maximalen Dicke angeordnet, der in der Beispielgrafik nicht im Mittelpunkt zwischen  $d_{min}$ (nominell) und  $d_{max}$ (nominell) sich befindet. Es scheint aber so zu sein, dass es sich offensichtlich um den Mittelwert handelt.

Im Anschluss daran wird die Zeit zum Erreichen der jeweiligen Bemessungstemperatur über den Profilkfaktor aufgetragen. Dabei müssen bestimmte Kriterien eingehalten werden (z.B. dürfen keine Geraden gekreuzt werden).

Zum Abschluss erhält man für jede Bemessungstemperatur verschiedene Schnittpunkte mit den unterschiedlichen Zeitdauern, aus denen man dann die Bereiche ablesen kann, in denen die jeweilige Dicke des Brandschutzmaterials ausreichend ist, um die Temperatur unterhalb der Bemessungstemperatur zu halten.

### 10.2.2 Vorbereiten der Temperaturdaten

Um gegebenenfalls Dickenunterschiede zwischen dem belasteten und unbelasteten Balkenabschnitt zu kompensieren, sind ggf. Korrekturen der Temperatur erforderlich. Die Korrektur erfolgt im Wesentlichen analog zu dem Verfahren nach Anhang F. Lediglich die Umrechnung der korrigierten Temperaturen der unbelasteten Balken wird durch die folgende Gleichung ermittelt:

$$\theta_{c(UB)} = 140 + (\theta_{UB} - 140) \cdot \left[ \frac{d_{UB}}{d_{LB}} \right]^{0,77} \quad \text{Gleichung (2)}$$

Mit dem bezüglich der Dicke korrigierten Temperaturwert können die weiteren Korrekturen hinsichtlich Haftfähigkeit vorgenommen werden, so dass für jede Temperatur des unbelasteten Balkens  $\theta_{c(UB)}$  ein Korrekturfaktor  $k_d(\theta)$  vorliegt.

Wenn alle Daten mit dem Korrekturfaktor  $k_d(\theta)$  versehen wurden, kann die Auswertung mit dem Schritt 1 beginnen.

Im Beispielfall wurde eine Spritzputzbekleidung gewählt.

### 10.2.2.1 Korrektur der Dicken auf die nominelle Dicke

Durch Auswertung der gemessenen Temperaturdaten ergibt sich für die Spritzputzbekleidung die folgende Darstellung.

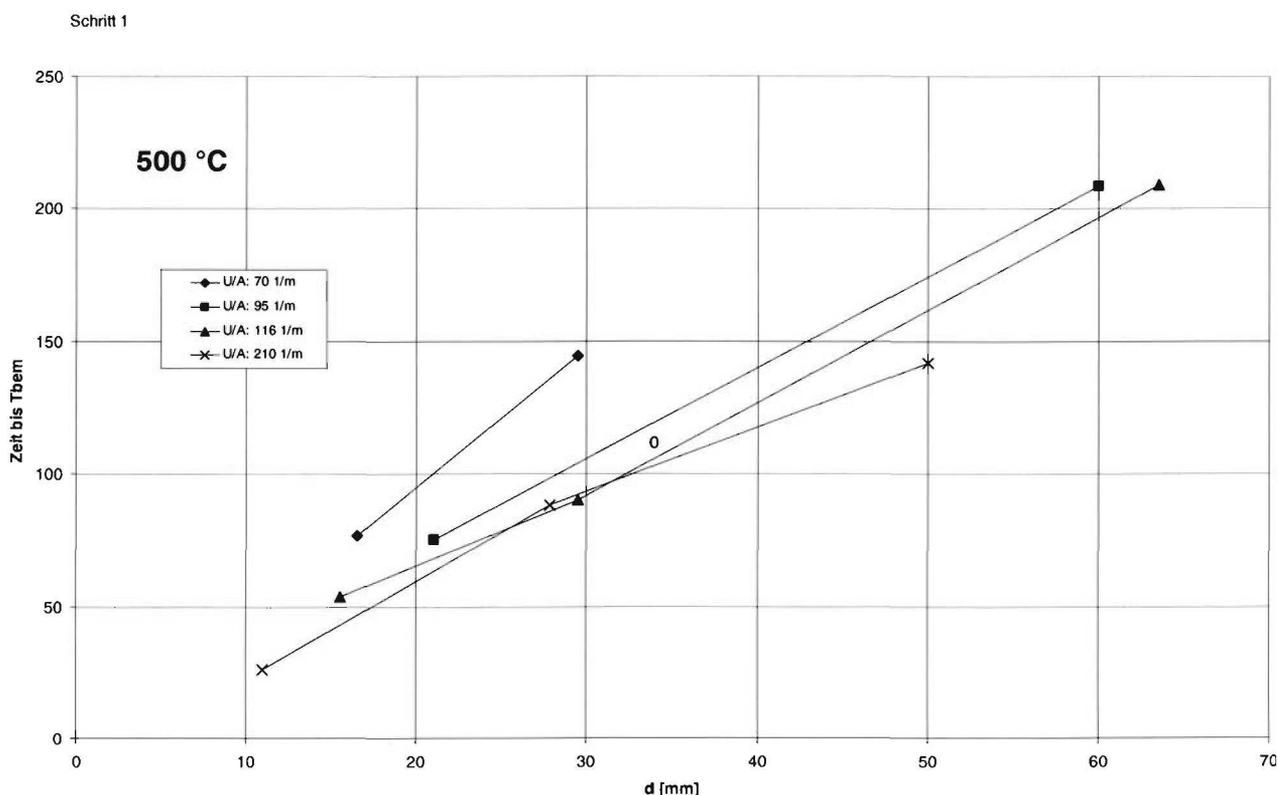


Abb. 13: Darstellung der Zeit bis zum Erreichen der Bemessungstemperatur über die Dicke des Brandschutzmaterials

Die entstandenen Geraden können bis zu den jeweiligen nominellen Dicken extrapoliert werden, um Daten für die entsprechenden Punkte zu erhalten. Da der Wert  $d_{av}$  nicht klar in der Norm definiert war und aus der Grafik in der Norm nicht klar zu entnehmen war, wurde er zunächst nicht ermittelt.

### 10.2.2.2 Darstellung der Zeit bis zum Erreichen der Bemessungstemperatur

Die Daten, die im vorhergehenden Abschnitt erzeugt wurden, werden nun über die  $A_p/V$ -Faktor aufgetragen.

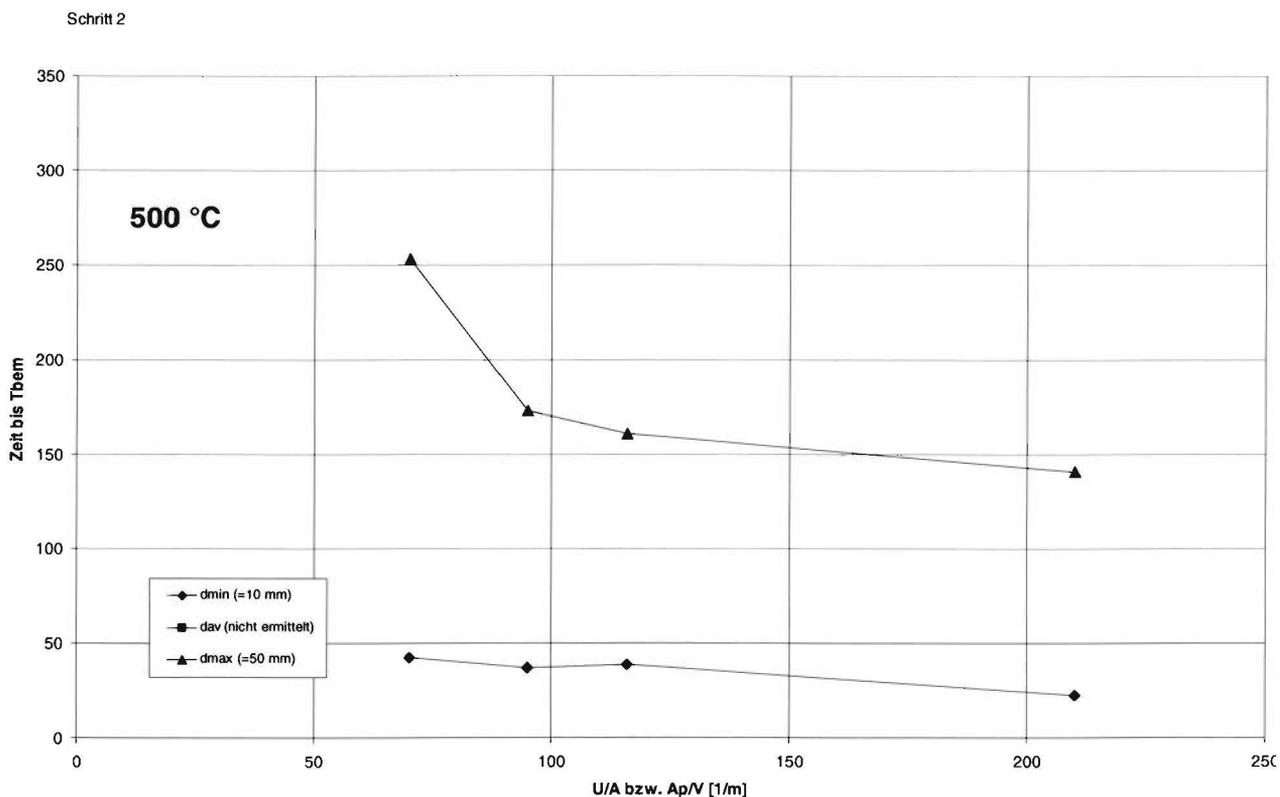


Abb. 14: Darstellung der Zeit bis zum Erreichen der Bemessungstemperatur bezogen auf  $A_p/V$  (Vorschrift)

Im folgenden werden noch die Temperaturen der zwischen  $d_{min}$  und  $d_{max}$  liegenden Bekleidungsdicken zusammengetragen. Bei der Anordnung von mehreren Dicken treten unter Umständen Kreuzungspunkte auf, die den Anwendungsbereich weiter einschränken.

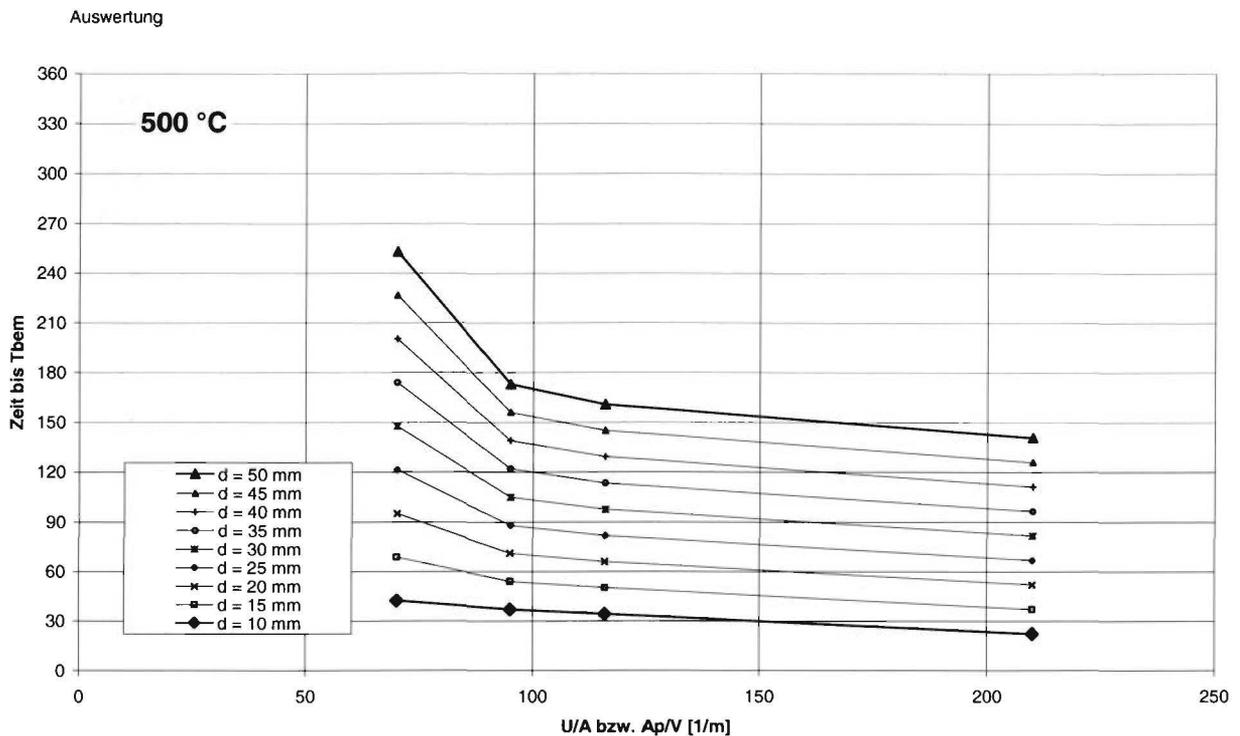


Abb. 15: Interpolation der Zwischengrößen

Aus der Abb. 15 können die entsprechenden Dicken eines Brandschutzmaterials für die entsprechende Zeitdauer entnommen werden.

### 10.2.3 Erfahrungen und Bewertungen

Auch der Anhang I der DIN ENV 13381-4 ist streckenweise sehr unverständlich formuliert. In den Grafiken, die als Beispiel herangezogen werden sollen, können die Schritte nicht nachvollzogen werden. Daher wurden in diesem Forschungsvorhaben Annahmen getroffen, die im Textteil beschrieben wurden.

Insbesondere die Annahmekriterien schränken bei einer Vielzahl vom Messpunkten den Anwendungsbereich ein.

Insgesamt ist auch dieses Verfahren sehr aufwendig, da eine Vielzahl von Messergebnissen erst korrigiert werden muss, bevor sie für die thermische Analyse zur Verfügung stehen.

### 10.3 Vergleich zwischen den Auswertungen der EN 13381-4 und dem deutschen Verfahren

Das numerische Verfahren ist das zeitlich am aufwendigsten gestaltete Verfahren. Im Fall des Spritzputzes wurden die Auswertungen für die beiden Verfahren mit den Werten des in Deutschland üblichen Verfahrens gegenübergestellt.

Erforderliche Bekleidungsdicke R 30

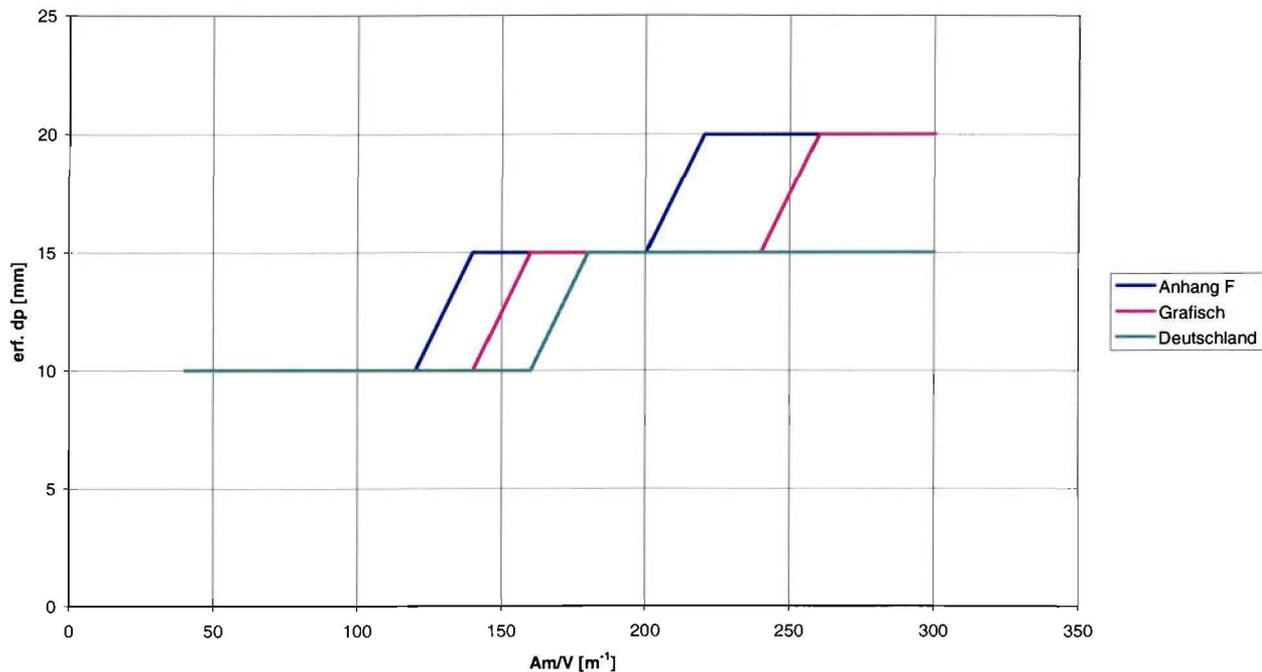


Abb. 16: Vergleich der erforderlichen Bekleidungsstärken für die Feuerwiderstandsklasse F 30 / R 30, Spritzputz

Erforderliche Bekleidungsdicke R 60

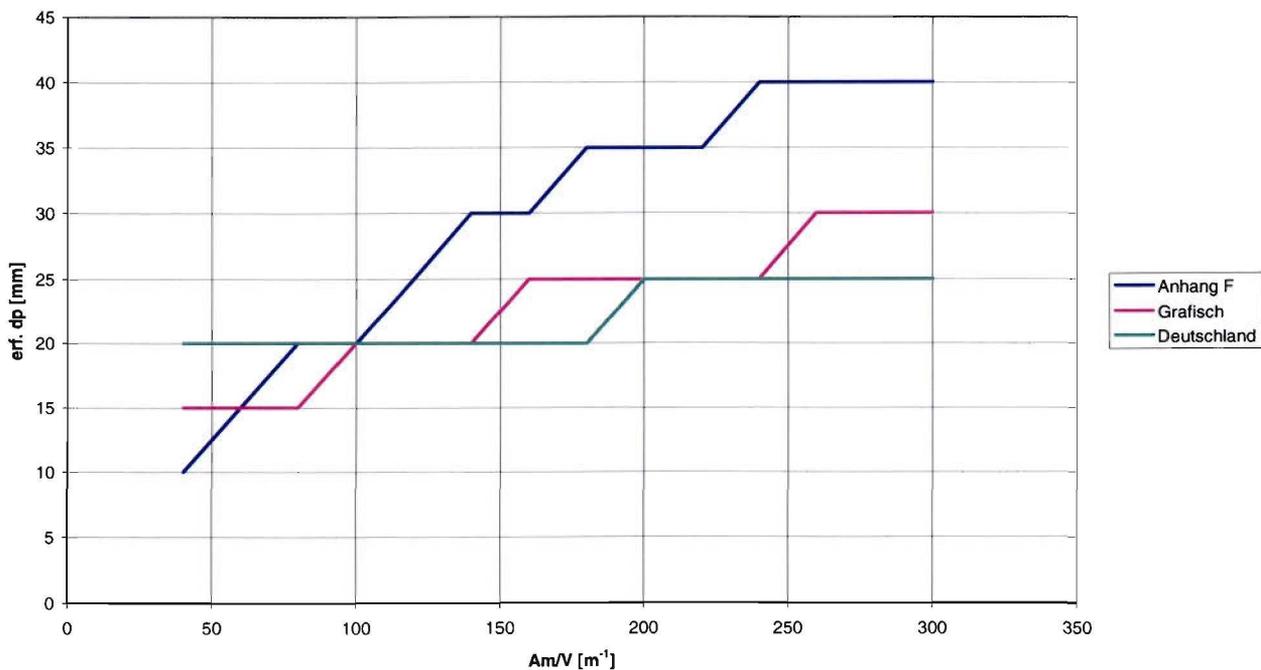


Abb. 17: Vergleich der erforderlichen Bekleidungsstärken für die Feuerwiderstandsklasse F 60 / R 60, Spritzputz

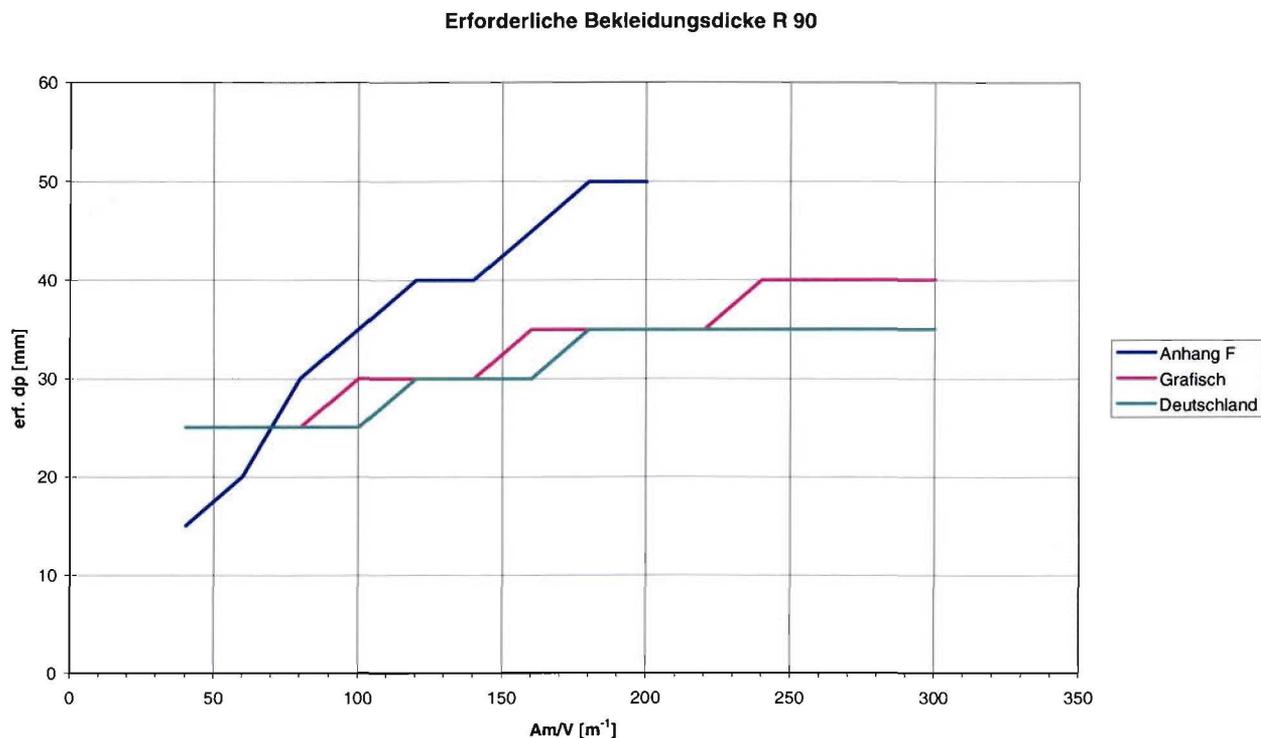


Abb. 18: Vergleich der erforderlichen Bekleidungsicken für die Feuerwiderstandsklasse F 90 / R 90, Spritzputz

Man erkennt aus den Grafiken, dass die Ergebnisse aus dem numerischen Verfahren ab einem  $A_m/V$  Faktor  $> 100$  immer „ungünstigere“ Ergebnisse liefern als bei dem grafischen Verfahren nach dem Anhang I der Norm bzw. nach der Auswertung nach dem deutschen Verfahren. Insbesondere ist bei dem numerischen Verfahren der Bereich für gültige  $A_m/V$ -Werte eingeschränkt.

Die nachfolgenden Grafiken zeigen den Vergleich für die Plattenbekleidung.

Erforderliche Bekleidungsdicke R 30

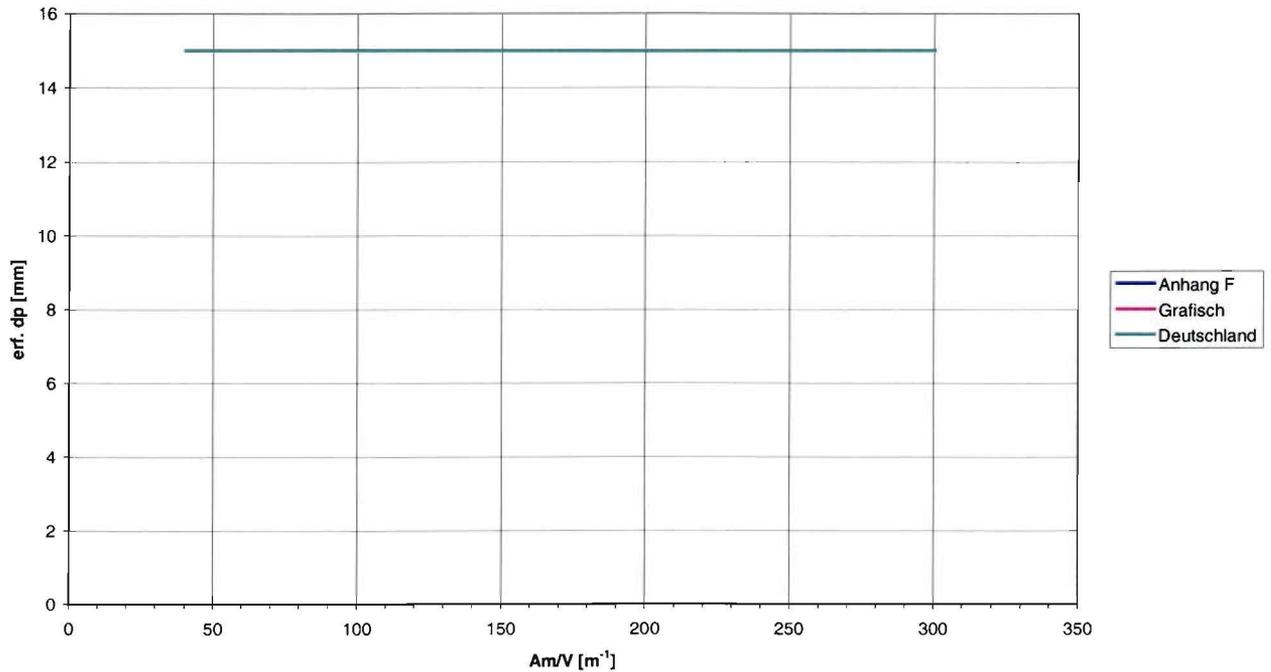


Abb. 19: Vergleich der erforderlichen Bekleidungsicken für die Feuerwiderstandsklasse F 30 / R 30, Plattenbekleidung

Erforderliche Bekleidungsdicke R 60

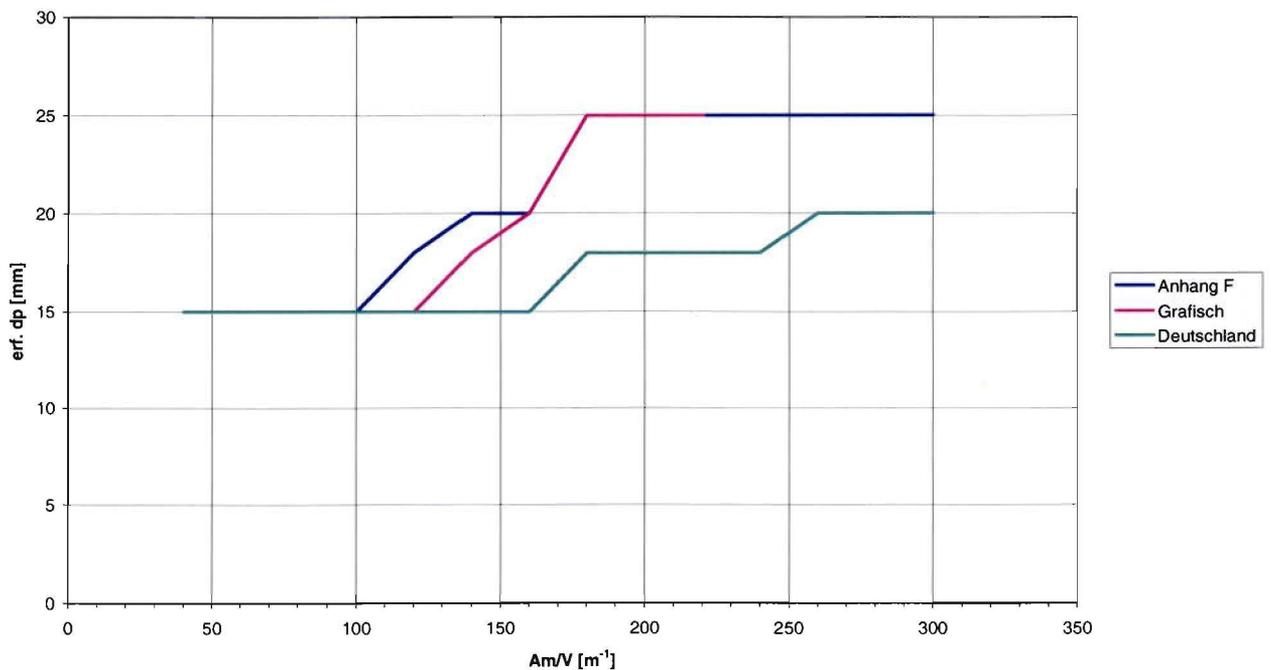


Abb. 20: Vergleich der erforderlichen Bekleidungsicken für die Feuerwiderstandsklasse F 60 / R 60, Plattenbekleidung

Erforderliche Bekleidungsdicke R 90

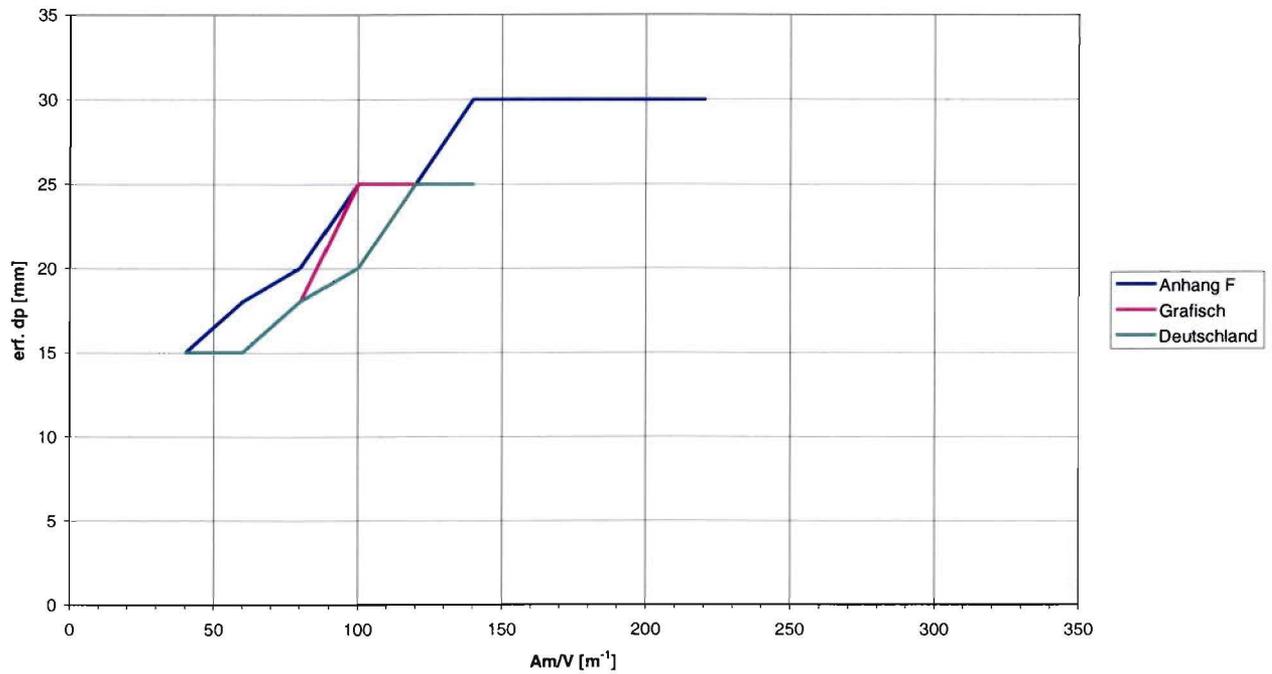


Abb. 21: Vergleich der erforderlichen Bekleidungsicken für die Feuerwiderstandsklasse F 90 / R 90, Plattenbekleidung

Erforderliche Bekleidungsdicke R 120

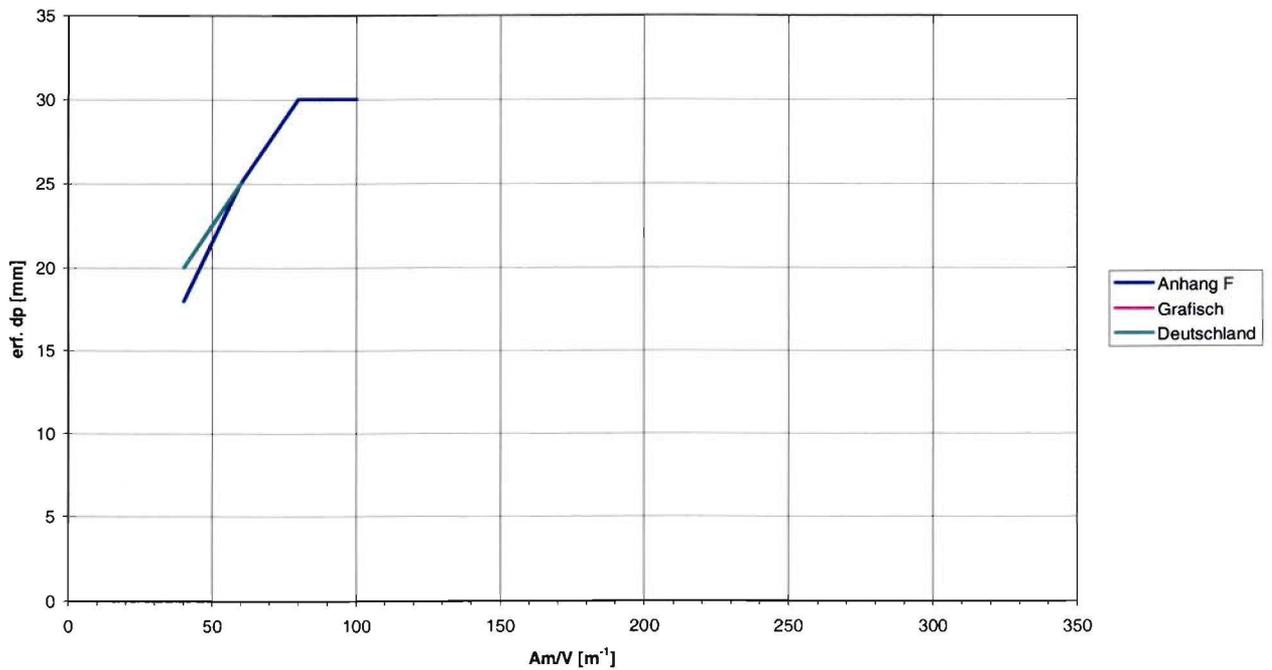


Abb. 22: Vergleich der erforderlichen Bekleidungsicken für die Feuerwiderstandsklasse F 120 / R 120, Plattenbekleidung

Auch für die Plattenbekleidung kann festgestellt werden, dass die Werte des numerischen Verfahrens knapp unterhalb der Bereiche liegen, die nach dem bisherigen Verfahren in Deutschland ermittelt wurden. Lediglich durch Anwendung der Extrapolationsregeln auf nicht geprüfte Dicken kann ein nahezu gleichwertiger Anwendungsbereich erhalten werden.

Dabei muss aber berücksichtigt werden, dass das numerische Verfahren nach Anhang F auf einer Anpassung der berechneten Werte an die gemessenen Werte beruht. Anhand der Korrekturfaktoren, kann allerdings die Qualität der Analyse nicht zwingend vorhergesagt werden. Im vorliegenden Fall wurde z.B. angestrebt, möglichst viele Anwendungskriterien in Übereinstimmung zu bringen. Die Norm fordert demgegenüber die Übereinstimmung aller Kriterien. Unter Umständen kann dieses dazu beitragen, dass die Analyse zu keinem Ergebnis führt.

Insgesamt kann also festgestellt werden, dass die Analyse mit Hilfe der DIN ENV 13381-4 zu Ergebnissen führt, die bei korrekter Anwendung mit dem in diesem Forschungsvorhaben dargestellten Verfahren, die auf der sicheren Seite liegen.

## **11 Zusammenfassung**

### **11.1 Vorgehen**

In dem vorliegenden Untersuchungsbericht wurde über die Anwendung der DIN V ENV 13381-4 berichtet. Dabei wurde zunächst das grundsätzliche Vorgehen bei der Durchführung der Versuche zur Erlangung der Prüfergebnisse beschrieben und die Abweichungen zum bisherigen deutschen Verfahren nach DIN 4102-2 : 1977-09 aufgezeigt.

Hauptaugenmerk in diesem Bericht wird auf die Auswertung der Ergebnisse nach dem Verfahren nach Anhang F (Analyse mit Differenzialgleichung, variabler  $\lambda$ -Ansatz) sowie dem grafischen Verfahren gelegt. Das erste numerische Verfahren erlaubt nach der Norm den größten erweiterten Anwendungsbereich, das graphische Verfahren führt zum kleinsten Anwendungsbereich, ist aber in der Lage weniger aufwendig zu Ergebnissen zu kommen.

Nach Beschreibung der beiden Verfahren in der Theorie, wurde anhand von praktischen Beispielen, bestehende Versuchsdaten mit den beiden Verfahren ausgewertet. Dabei stellte sich heraus, dass durch die in Deutschland praktizierte Prüfpraxis von einem belasteten Trägerpaar keine Daten für die beiden elementaren Dicken  $d_{\min}$  und  $d_{\max}$  vorhanden sind, so dass das Verfahren nicht anwendbar war. Daher wurden einige ausgewählte Versuchsdaten, bei denen belastete Träger mit zwei unterschiedlichen Dicken geprüft wurden, zur Auswertung herangezogen. Die Ergebnisse wurden mit den Daten des bisherigen Anwendungsbereiches in Deutschland verglichen.

## 11.2 Ergebnisse

Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass die Einbeziehung der Temperaturdaten an den belasteten Träger über einen Korrekturfaktor ein offensichtlich geeignetes Mittel ist, um den Einfluss der Verformung und des Fugenbildes auf die vierseitig beflamnten, unbelasteten Stützenabschnitte zu übertragen. Dieser Einfluss wurde im bisherigen Auswertungsverfahren in Deutschland nicht berücksichtigt. Durch die Anpassung der Temperaturdaten mittels der Korrekturverfahren entsteht aber ein nicht unerheblicher Aufwand in der Aufbereitung der Daten, insbesondere wenn man berücksichtigen muss, dass die Erwärmung an dem belasteten Balken immer höher als an dem unbelasteten Balken sein muss. Wenn dieses nicht der Fall ist, erhält man einen temperaturabhängigen Korrekturfaktor von  $k_d(\theta) = 1,0$ , so dass keine Korrektur der unbelasteten Stützenabschnitte erfolgt.

Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die Temperaturprofile der Stützenabschnitte exakt zu den gewünschten Dicken des Brandschutzmaterials zugeordnet werden. Insbesondere bei den Spritzputzen führt dieses zu Problemen, da hier nie ein exakter Auftrag erfolgen kann. Durch die Einbeziehung der maximalen Temperatur in die charakteristische Stahltemperatur mit dem gleichen Wichtungsanteil wie der gesamte Mittelwert, führt dieses dazu, dass die Feuchteplateaus bei den minimalen Spritzputzbekleidungen unter Umständen komplett wegfallen. Dieses führt bei Einführung des globalen Faktors  $K$  zur Anpassung der berechneten Ergebnisse an die gemessenen, zu einer in den meisten Fällen größeren erforderlichen Bekleidungsstärke, als dieses nach dem bisherigen deutschen Verfahren der Fall war. Dabei muss aber berücksichtigt werden, dass das Verfahren nach DIN V ENV 13381-4 nicht in allen Bereich klar nachvollziehbar ist. Durch das vorgestellte Programm ist man zwar in der Lage, die berechneten maßgebenden Parameter zu ermitteln, eine Änderung dieser Parameter führt aber meistens zu einer Veränderung der Ergebnisse, die unter Umständen besser oder schlechter sein kann, als die tatsächlich gemessenen Werte. Dieses hängt insbesondere von dem Faktor  $K$  ab, mit dem bei dem numerischen Verfahren die Wärmeleitfähigkeit der Bekleidung angepasst werden soll. Aufgrund der Streuung kann hier durch die Erhöhung der Anzahl der Probekörper eine Einschränkung der effektiven Wärmeleitfähigkeit erreicht werden, wodurch das gesamte Ergebnis weniger streuende Resultate liefert.

Hier sind ggf. zur Bestätigung der Ergebnisse Kontrollrechnungen von weiteren Stellen notwendig (Stichwort: „Zweiaugenprinzip“), die ebenfalls über das Fachwissen dieser Berechnung verfügen, um eine entgeltliche Aussage hinsichtlich des Anwendungsbereichs treffen zu können.

Bei dem grafischen Verfahren ist die Überprüfung der Ergebnisse einfacher durchzuführen, da sämtliche Zwischenschritte aufgezeichnet werden müssen, um eine endgültige Analyse liefern zu können.

können. Hierbei kann relativ schnell erkannt werden, ob sich ein Fehler in der thermischen Analyse eingeschlichen hat.

Ein Punkt, der ebenfalls Beachtung finden sollte, ist der erweiterte Anwendungsbereich. Bei dem Verfahren nach Anhang F ist es zulässig, die Dicke des Brandschutzmaterials um 20 % zu erhöhen. Dieses bedeutet, dass Prüfungen an 25 mm dicken Plattenbekleidungen ohne weitere Prüfung auf 30 mm dicke Plattenbekleidungen übertragen werden dürfen. Bei Dämmschichtbildner würde dieses bedeuten, dass die Trockenschichtdicke von 600 µm auf 720 µm vergrößert werden dürfte. Dieses kann unter Umständen zu Problemen an belasteten Trägern führen, da keine gesicherten Ergebnisse für diese Dicke aus einer Prüfung vorliegen. Weiterhin muss dabei berücksichtigt werden, dass innerhalb der Norm keine Vorgaben gemacht werden, wie z.B. die Rohdichte des Beschichtungsmaterials bestimmt werden soll. Es wird im entsprechenden Anhang C sogar explizit ausgesagt, dass das dort vorgestellte Verfahren nicht zur Anwendung bei Dämmschichtbildner herangezogen werden kann.

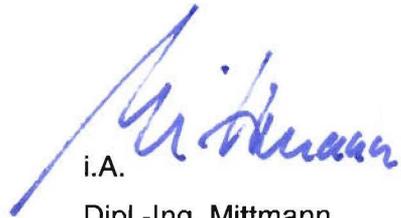
Zur Problematik der Zugstäbe wird in der Norm, außer in der Einleitung, nichts weiter ausgesagt. Man könnte daraus schließen, dass die Zugstabproblematik über die Bemessungstemperatur in die Auswertung mit eingeht. Insbesondere bei den reaktiven Brandschutzsystemen erscheint dieses jedoch zweifelhaft.

Schwierigkeiten bei der Auswertung traten insbesondere auch bei den vorhandenen Temperaturdaten auf. Teilweise konnten keine Auswertungen durchgeführt werden, da die vorhandenen Prüfdaten und Prüfkörper auf ein Minimum reduziert wurden. Jede Verringerung der Daten führt aber bei den in der ENV 13381-4 dargestellten Auswertungsverfahren unweigerlich dazu, dass keine Punkte und Daten für eine qualifizierte Auswertung vorliegen. Diese konnte daher teilweise überhaupt nicht durchgeführt werden, da zu viele Daten geschätzt oder angenommen werden müssten.

Zusammenfassend kann man sagen, dass durch Anwendung der Norm in einem Bereich  $A_m/V > 100 \text{ m}^{-1}$  gleichwertige bzw. auf der sicheren Seite liegende Ergebnisse erhalten werden. Der Aufwand bis zum Erhalt dieser Ergebnisse ist jedoch angefangen bei dem Prüfumfang bis letztlich zur Auswertung enorm. Die Anwendung dieser Norm wird wahrscheinlich durch den Markt nicht wesentlich gefördert werden, es sei denn, dass durch Übertragungsfehlern von Temperaturen oder Korrekturwerte sehr günstige Ergebnisse erhalten werden. Die Unverständlichkeit der Norm (z.T. auch durch Übersetzungsfehler) führt dazu, dass Annahmen getroffen werden müssen. Hieraus folgt, dass die Prüfanstalten in Europa zu verschiedenen Verfahren und Ergebnissen kommen können. Dieses kann nicht im Interesse der Prüfanstalten, Zulassungsstellen wie auch der Hersteller sein.

i.A.   
ORR Dr.-Ing. Rohling  
Abteilungsleiterin



  
i.A.  
Dipl.-Ing. Mittmann  
Sachbearbeiter

## 12 Literaturverzeichnis

DIN V ENV 13381-4 : 2003-09 : Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen

Stahlbau Brandschutzhandbuch: Hass, Meyer-Ottens, Richter: Berlin; Ernst & Sohn Verlag 1993

Wärmedämmstoffe in Deutschland nach europäischen Normen: Cziesielski, Erich in: „Bauphysik“ Heft 26, Oktober 2004, S. 244 ff.; Ernst & Sohn Verlag.