

**Bewertung überarbeiteter
Rechengrundlagen zur
Wärmeleitfähigkeit im Zuge der
Novellierung von EN 1992-1-2**

T 3358

T 3358

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

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.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2018

ISBN 978-3-7388-0202-3

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

www.baufachinformation.de



Forschungsvorhaben Nr. P 52-5- 7.320

Bewertung überarbeiteter Rechengrundlagen zur Wärmeleitfähigkeit im Zuge der Novellierung von EN 1992-1-2

Datum: 12.06.2018

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstraße 30 L
10829 Berlin

Bericht: Abschlussbericht

Bearbeiter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß
Jens Spille, M. Sc.

Inhaltsverzeichnis

1	Anlass und Zielsetzung	4
2	Verwendete Unterlagen	6
2.1	Fachbücher und Publikationen	6
2.2	Normen und Zulassungen	7
3	Zusammenstellung von Versuchsergebnisse	8
3.1	Vorbemerkung	8
3.2	Deckenbauteile 20 cm	10
3.3	Deckenbauteile 15 cm	11
3.4	Deckenbauteile 10 cm	12
3.5	Deckenbauteile 12 cm	13
3.6	Deckenbauteile 30 cm	14
3.7	Wandbauteil 1	14
3.8	Wandbauteil 2	15
3.9	Stütze 1	16
3.10	Stütze 2	18
4	Rechengrundlagen	19
4.1	Vorbemerkung	19
4.2	Thermische Analyse	19
4.3	Thermische Einwirkungen	20
4.3.1	Allgemeines	20
4.3.2	Konvektion	20
4.3.3	Strahlung	21
4.4	Temperaturabhängige thermische Materialeigenschaften	21
4.4.1	Allgemeines	21
4.4.2	Thermische Leitfähigkeit	22
4.4.3	Rohdichte	24

4.4.4	Spezifische Wärmekapazität	25
5	Vergleichsrechnungen	27
5.1	Vorbemerkung	27
5.2	Experimentelle Temperaturzeitkurven	27
5.3	Berechnung der Temperaturzeitkurven	27
5.3.1	Thermische Einwirkung	27
5.3.2	Thermische Materialeigenschaften	28
5.3.3	Übersicht der berechneten Temperaturzeitkurven	29
5.4	Bewertung der getroffenen Annahmen und Randbedingungen	30
5.4.1	Vorbemerkungen	30
5.4.2	Allgemeine Modellunsicherheit	30
5.4.3	Einfluss der Dichte	30
5.4.4	Einfluss der Feuchte	31
5.4.5	Zusammenfassung	31
5.5	Bewertungskriterien	31
5.5.1	Vorbemerkungen	31
5.5.2	PEACOCK-Kriterium (accuracy-criteria)	32
5.5.3	Safety-Kriterium	33
5.6	Vergleich der Temperaturen	35
5.6.1	Vorbemerkung	35
5.6.2	Temperatur auf Höhe der Bewehrungslage	35
5.6.3	Temperaturen auf der unbeflammten Seite	39
5.7	Fazit	42
6	Zusammenfassung	43

Anlage

1 Anlass und Zielsetzung

Mit Schreiben vom 19.09.2016 beauftragte das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig mit der Durchführung eines Forschungsvorhabens mit dem Arbeitstitel „Bewertung überarbeiteter Rechengrundlagen zur Wärmeleitfähigkeit im Zuge der Novellierung von EN 1992-1-2“.

In Eurocode 2 Teil 1-2 ist aktuell ein unterer und ein oberer Grenzwert für die thermische Leitfähigkeit von Beton definiert. Sowohl der obere als auch der untere Grenzwert sind abhängig von der Temperatur. Eine Festlegung des anzuwendenden Grenzwertes für die thermische Leitfähigkeit erfolgt im Eurocode nicht, sondern ist den jeweiligen Nationalen Anhängen vorbehalten. Im Nationalen Anhang des Eurocodes Teil 1-2 [NA2-1-2] wurde für Deutschland geregelt, dass die obere Grenzfunktion anzuwenden ist.

Aufgrund der in den letzten Jahren geänderten Betonzusammensetzungen (Zemente, Gesteinskörnungen) und des Einsatzes von Platten-Thermoelementen zur Bestimmung der Beanspruchungstemperaturen bei Prüfungen wurde in der CEN/TC 250/SC 2/WG 1/TG 5 Änderungen an der temperaturabhängigen Funktion der thermischen Leitfähigkeit für Beton vorgeschlagen, mit der die Querschnittstemperaturen im Beton besser nachvollzogen werden können. Die temperaturabhängige Funktion der thermischen Leitfähigkeit hat als ein wesentlicher Eingangswert in die Temperaturfeldberechnung einen hohen Einfluss auf die Qualität der Berechnung der Betontemperaturen und hiermit verbunden einen wesentlichen Einfluss auf die Bewertung der Tragfähigkeit von Stahlbetonbauteilen im Brandfall. Dahingehend besteht die Gefahr, dass eine Änderung der thermischen Leitfähigkeit unsichere Ergebnisse und/oder unwirtschaftliche Ergebnisse liefert.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben sollen der Änderungsvorschlag im Vergleich zur bestehenden unteren und oberen Grenzfunktion bewertet und ein Vorschlag für eine künftige Festlegung der Grenzfunktion unter Berücksichtigung des aktuell in Deutschland vorhandenen Sicherheitsniveaus erarbeitet werden.

Hierfür sollen mit Hilfe von Vergleichsrechnungen die Auswirkungen hinsichtlich der berechneten Temperaturen innerhalb unterschiedlicher Betonquerschnitte festgelegt werden. Als Beurteilungskriterium dient der zeitliche Verlauf der Temperaturen, die unter Ansatz der unterschiedlichen Grenzfunktionen berechnet wurden, mit Temperaturen, die in nationalen und internationalen Normbrandversuchen gemessen wurden. Für die Berechnungen werden Brandversuche

herangezogen, in denen die zu untersuchenden Bauteile einer ein- bzw. vierseitigen Brandbeanspruchung ausgesetzt waren.

Aus dem Vergleich zwischen Messergebnissen und berechneten Temperaturen soll anhand einer Bewertung des temperaturabhängigen Verlaufes für die thermische Leitfähigkeit, jener Rechenfunktion festgelegt werden, welcher in Verbindung mit der Rohdichte und der spezifischen Wärmeleitfähigkeit eine gute Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Temperaturen sicherstellt und zugleich keine negativen Auswirkungen auf das bestehende Sicherheitsniveau hat.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen direkt in die TG 5 von CEN/TC 250/SC 2/WG 1 eingebracht werden.

Der vorliegende Bericht gliedert sich in sechs Kapitel, die entsprechend der Aufgliederung in einzelne Forschungsabschnitte gewählt wurden. In Kapitel 1 werden Anlass und Zielsetzung beschrieben, in Kapitel 2 werden die verwendeten Unterlagen aufgelistet.

Kapitel 3 des Berichts enthält die Zusammenstellung der zur Bewertung herangezogenen Brandversuche.

Das Kapitel 4 enthält die Rechengrundlagen zur Bestimmung der Temperaturverläufe innerhalb der Betonquerschnitte, Kapitel 5 einen systematischen Vergleich der Ergebnisse, bezogen auf die angesetzten Grenzfunktionen für die thermische Leitfähigkeit.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse des Forschungsvorhabens zusammengefasst werden.

2 Verwendete Unterlagen

2.1 Fachbücher und Publikationen

- [1] Hosser, D. ; Richter, E.; Wöckener, A.: Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit von Beton aus dem Schlusssentwurf prEN 1992-1-2 Fassung 10/02 durch Vergleich von berechneten und gemessenen Temperaturen, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben Aktenzeichen P32-5-7.225-1047/3, Oktober 2004.
- [2] Hosser, D.; Richter, E.: Überführung von EN 1992-1-2 in EN-Norm und Bestimmung der national festzulegenden Parameter (NDP) im Nationalen Anhang zu EN 1992-1-2, Schlussbericht zum Forschungsvorhaben, Aktenzeichen ZP 52-5-7.240-1132/04, Dezember 2006.
- [3] Achenbach, M.; Lahmer, T.; Morgenthal, G.: Identification of the thermal properties of concrete for the temperature calculation of concrete slabs and columns subjected to a standard fire – Methodology and proposal for simplified formulations, in: Fire Safety Journal 87 (2017), 80-86.
- [4] InfoGraph GmbH: Prüfung und Validierung von Rechenprogrammen für Brandschutznachweise mittels allgemeiner Rechenverfahren – InfoCAD Programmmodul: Tragwerksanalyse für den Brandfall, Stand: 05.11.2015
- [5] Hosser, D. et al.: Erarbeitung eines Sicherheitskonzeptes für die brandschutztechnische Bemessung unter Anwendung von Ingenieurmethoden gemäß Eurocode 1 Teil 1-2 (Sicherheitskonzept zur Brandschutzbemessung). Abschlussbericht zum DIBt-Forschungsvorhaben Az. ZP 52-5-4.168-1239/07. November 2008
- [6] Riese, O.; Siemon, M.: Untersuchung der Prognosefähigkeit von deterministischen Brandsimulationsmodellen Anwendung: PRISME DOOR in Bauphysik 36 (2014), Heft 4

2.2 Normen und Zulassungen

- [EC1-1-2] DIN EN 1991-1-2: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke; Deutsche Fassung EN 1991-1-2:2002 + AC:2009, Beuth Verlag GmbH, Dezember 2010.
- [NA1-1-2] DIN EN 1991-1-2/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke, Beuth Verlag GmbH, September 2015.
- [EC2-1-2] DIN EN 1992-1-2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1992-1-2:2004 + AC:2008, Beuth Verlag GmbH, Dezember 2010
- [NA2-1-2] DIN EN 1992-1-2/NA - Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung im Brandfall, Beuth Verlag, Dezember 2010.

3 Zusammenstellung von Versuchsergebnisse

3.1 Vorbemerkung

In diesem Abschnitt werden Versuchsergebnisse für verschiedene Stahlbetonbauteile zusammengestellt, die für die Vergleichsberechnungen herangezogen wurden. Die zugrunde gelegten Brandversuche wurden an drei europäischen Prüfanstalten durchgeführt:

- das Centre d'études et de recherches de l'industrie du béton (CERIB) aus Frankreich,
- das Research Institutes of Sweden (SP) aus Schweden und
- das Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der Technischen Universität Braunschweig.

Die Auswertung von Versuchen verschiedener Prüfanstalten ermöglicht es, den Einfluss unterschiedlicher Ausbildungen der Prüfkammern in die Bewertung einfließen zu lassen. Am iBMB werden seit über 50 Jahren Brandversuche an Stahlbetonbauteilen durchgeführt. Um jedoch den Einfluss aufgrund geänderter Betonrezepturen (Zemente) und Messtechnik (Plattenthermometer) Rechnung zu tragen, wurden ältere Versuche nicht in den Vergleich miteinbezogen und ausschließlich Versuchsergebnisse ausgewählt, die in den Jahren 2015 – 2017 an den beteiligten Institutionen durchgeführt wurden. Weiterhin wurden nur Versuche berücksichtigt, in denen die Temperaturen im Bauteilquerschnitt an mehreren Stellen gemessen wurden, so dass für jede Bauteiltiefe bzw. Position im Querschnitt mindestens zwei Messwerte zur Verfügung standen.

Für die Vergleichsrechnungen standen unter Berücksichtigung der vorgenannten Kriterien insgesamt acht Versuchsreihen zur Verfügung, aus denen die Ergebnisse von insgesamt 17 Decken-, zwei Stützen- und zwei Wandversuchen für die Vergleichsrechnungen herangezogen werden konnten. In der Auswertung wurden die Deckenbauteile auf 11 reduziert, so dass folgende Bauteile ausgewählt wurden:

- elf Deckenbauteile mit Deckenhöhen von 10, 12, 15, 20 und 30 cm,
- zwei Wandbauteile mit Wandstärken von 12 und 14 cm und
- zwei Stützen mit quadratischen Querschnitten mit einer Breite von 36 und 40 cm.

Die Anzahl der Deckenbauteile wurde dahingehend reduziert, dass nur solche Brandversuche ausgewertet wurden, bei denen die Brandraumtemperaturen in guter bis sehr guter Übereinstimmung mit der Einheits-Temperaturzeitkurve stehen (siehe Abschnitt 5.2 und 5.3)

Alle Bauteile wurde hinsichtlich der thermischen Einwirkungen der Einheits-Temperaturzeitkurve nach DIN EN 1991-1-2 bzw. DIN EN 13501-2 ausgesetzt. Die Messung der Temperaturen

in den Prüfkammern erfolgte mittels Platten-Thermoelementen. Die auszuwertenden Temperaturen liegen als Temperaturzeitkurven vor, die mit Thermoelementen innerhalb der Betonquer-schnitte in unterschiedlichen Abständen aufgezeichnet wurden.

Ggf. vorhandene Messungenauigkeiten bei den gemessenen Temperaturen können zurückzu-führen sein auf:

- den zulässigen Toleranzbereiches der Einheits-Temperaturzeitkurve,
- der Messungenauigkeit der Platten-Thermoelemente zur Steuerung der ETK und
- der Messungenauigkeit der Thermoelemente innerhalb der Bauteile.

3.2 Deckenbauteile 20 cm

Die ausgewerteten Temperaturzeitkurven entstammen einer Versuchsreihe durchgeführt am CERIB am 14. Juni 2016. Die Temperaturen wurden an einer einachsigen, gelenkig gelagerten Stahlbetonplatte gemessen. Die für die Ermittlung der Temperaturen im Bauteilquerschnitt wichtigsten Materialeigenschaften und Versuchsrandbedingungen werden im Folgenden zusammengefasst:

Geometrie:

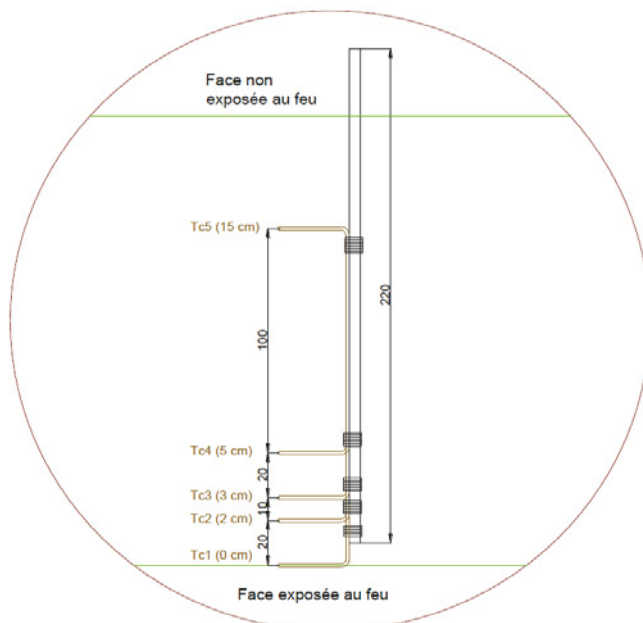
- Querschnitt b/d [cm]: 150 / 20
- Plattenlänge [m]: 4,60 m

Baustoff Beton:

- | | T1_D3 | T1_D4 |
|--------------------------------|------------------------|------------|
| • Zuschlag: | Silikatisch-kalkhaltig | kalkhaltig |
| • Dichte [kg/m ³]: | 2300 | 2300 |
| • Betonfeuchtigkeit [%]: | 4,30 | 4,00 |
| • Abplatzungen: | nein | ja |

Thermische Randbedingungen:

- Beflammung der Plattenunterseite mit ETK
- Anfangstemperatur: 20 °C



Détail d'une grappe de thermocouples

Abbildung 1: Lage der Messstellen im Deckenquerschnitt T1

3.3 Deckenbauteile 15 cm

Die ausgewerteten Temperaturzeitkurven entstammen einer Versuchsreihe durchgeführt am CERIB am 14. Juni 2016. Die Temperaturen wurden an einer einachsigen, gelenkig gelagerten Stahlbetonplatte gemessen. Die für die Ermittlung der Temperaturen im Bauteilquerschnitt wichtigsten Materialeigenschaften und Versuchsrandbedingungen werden im Folgenden zusammengefasst:

Geometrie:

- Querschnitt b/d [cm]: 150 / 15
- Plattenlänge [m]: 4,60 m

Baustoff Beton:

- | | T2_D4 | T3_D9 |
|--------------------------------|------------|-------------|
| • Zuschlag: | kalkhaltig | Quarzhaltig |
| • Dichte [kg/m ³]: | unbekannt | unbekannt |
| • Betonfeuchtigkeit [%]: | 3,61 | 4,26 |
| • Abplatzungen: | nein | nein |

Thermische Randbedingungen:

- Beflammung der Plattenunterseite mit ETK
- Anfangstemperatur: 20 °C

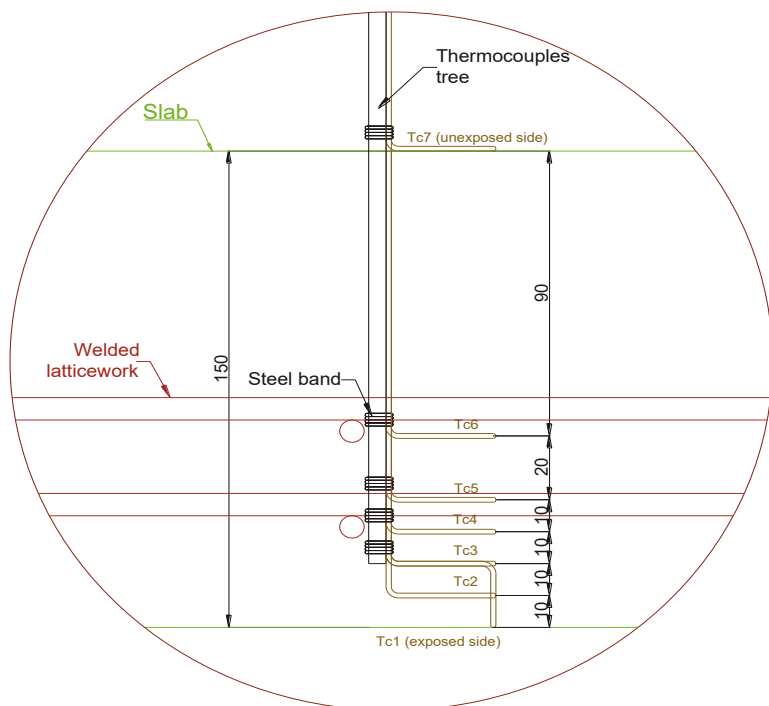


Abbildung 2: Lage der Messstellen im Deckenquerschnitt T2 und T3

3.4 Deckenbauteile 10 cm

Die ausgewerteten Temperaturzeitkurven entstammen einer Versuchsreihe durchgeführt am CERIB am 14. Juni 2016. Die Temperaturen wurden an einer einachsigen, gelenkig gelagerten Stahlbetonplatte gemessen. Die für die Ermittlung der Temperaturen im Bauteilquerschnitt wichtigsten Materialeigenschaften und Versuchsrandbedingungen werden im Folgenden zusammengefasst:

Geometrie:

- Querschnitt b/d [cm]: 150 / 10
- Plattenlänge [m]: 4,60 m

Baustoff Beton:

- | | T3_D8 | T3_D10 | T3_D11 |
|--------------------------------|------------|-------------|------------|
| • Zuschlag: | Kalkhaltig | Quarzhaltig | Kalkhaltig |
| • Dichte [kg/m ³]: | unbekannt | unbekannt | Unbekannt |

- Betonfeuchtigkeit [%]: 4,16 4,04
- Abplatzungen: nein nein

Thermische Randbedingungen:

- Beflammung der Plattenunterseite mit ETK
- Anfangstemperatur: 20 °C

3.5 Deckenbauteile 12 cm

Die ausgewerteten Temperaturzeitkurven entstammen einer Versuchsreihe durchgeführt am CERIB am 14. Juni 2016. Die Temperaturen wurden an einer einachsig gespannten, gelenkig gelagerten Stahlbetonplatte gemessen. Die für die Ermittlung der Temperaturen im Bauteilquerschnitt wichtigsten Materialeigenschaften und Versuchsrandbedingungen werden im Folgenden zusammengefasst:

Geometrie:

- Querschnitt b/d [cm]: 150 / 12
- Plattenlänge [m]: 4,60 m

Baustoff Beton:

- Zuschlag: T2_D5 kalkhaltig
- Dichte [kg/m³]: unbekannt
- Betonfeuchtigkeit [%]: 4,32
- Abplatzungen: nein

Thermische Randbedingungen:

- Beflammung der Plattenunterseite mit ETK
- Anfangstemperatur: 20 °C

3.6 Deckenbauteile 30 cm

Die ausgewerteten Temperaturzeitkurven entstammen einer Versuchsreihe durchgeführt am SP. Die für die Ermittlung der Temperaturen im Bauteilquerschnitt wichtigsten Materialeigenschaften und Versuchsrandbedingungen werden im Folgenden zusammengefasst:

Geometrie:

- Querschnitt b/d [cm]: 120 / 30
- Plattenlänge [m]: 1,70 m

Baustoff Beton:

	T5_E	T5_M	T5_N
--	------	------	------

Thermische Randbedingungen:

- Beflammung der Plattenunterseite mit ETK
- Anfangstemperatur: 20 °C

Lage der Messstellen im Deckenquerschnitt (gemessenen von der beflamten Seite):

- TC1: 10 mm
- TC2: 20 mm
- TC3: 40 mm
- TC4: 80 mm
- TC5: 120 mm

3.7 Wandbauteil 1

Die ausgewerteten Temperaturzeitkurven entstammen einem Brandversuch durchgeführt vom CERIB am 23. September 2015. Informationen zur Lagerung des Wandbauteiles liegen nicht vor. Die wichtigsten Materialeigenschaften sind nachfolgend zusammengefasst.

Geometrie:

- Wanddicke [cm]: 14
- Höhe [m]: 6,50 m

- Breite [m]: 3,40 m

Baustoff Beton:

T4_W1

- Zuschlag: unbekannt
- Dichte [kg/m³]: unbekannt
- Betonfeuchtigkeit [%]: 3,50

Thermische Randbedingungen:

- Einseitige Beflammung mit ETK
- Anfangstemperatur: 20 °C

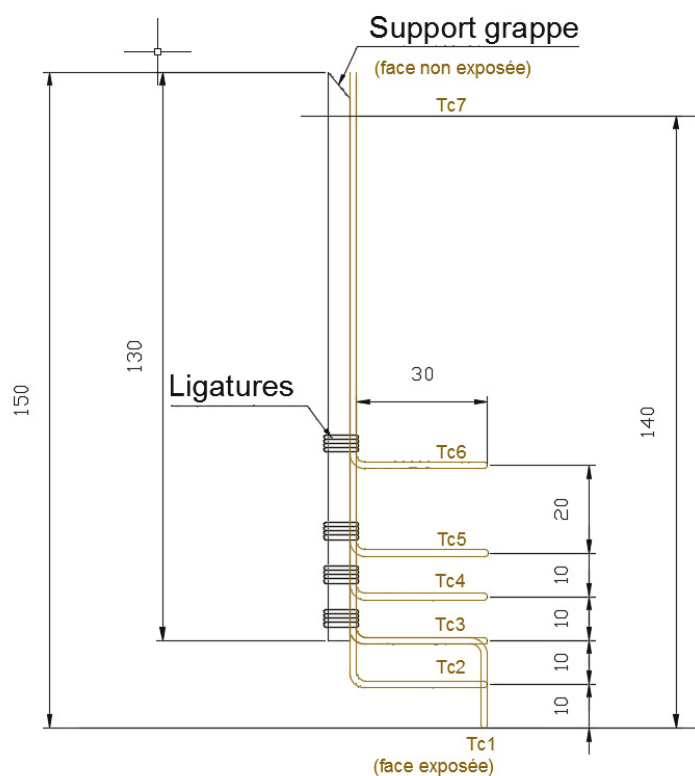


Abbildung 3: Lage der Messstellen im Wandquerschnitt 1

3.8 Wandbauteil 2

Die ausgewerteten Temperaturzeitkurven entstammen einem Brandversuch durchgeführt am iBMB am 27. März 2017. Die wichtigsten Materialeigenschaften sind nachfolgend zusammengefasst.

Geometrie:

- Wanddicke [cm]: 12
- Höhe [m]: 3,00
- Breite [m]: 3,00

Baustoff Beton:

T8_W1

- Zuschlag: unbekannt
- Dichte [kg/m³]: unbekannt
- Betonfeuchtigkeit [%]: unbekannt

Thermische Randbedingungen:

- Einseitige Beflammung mit ETK
- Anfangstemperatur: 19 °C

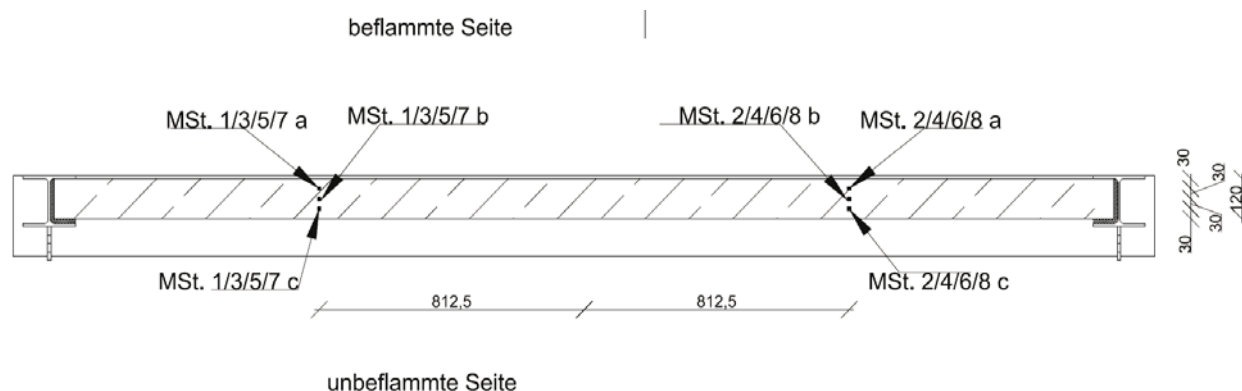


Abbildung 4: Lage der Messstellen im Wandquerschnitt 2

3.9 Stütze 1

Die ausgewerteten Temperaturzeitkurven entstammen einem Brandversuch durchgeführt am iBMB am 27. Januar 2015. Die wichtigsten Materialeigenschaften sind nachfolgend zusammengefasst.

Geometrie:

- Breite [cm]: 40
- Höhe [m]: 3,66

Baustoff Beton:

- Zuschlag: T6_S1
- Dichte [kg/m³]: 2448
- Betonfeuchtigkeit [%]: 3

Thermische Randbedingungen:

- Vierseitige Beflammung mit ETK
- Anfangstemperatur: 23 °C

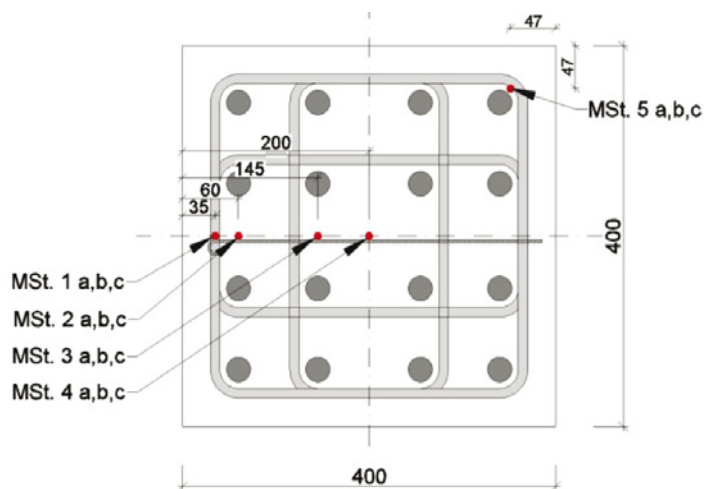


Abbildung 5: Lage der Messstellen in Stütze 1

3.10 Stütze 2

Die ausgewerteten Temperaturzeitkurven entstammen einem Brandversuch durchgeführt am iBMB am 30. Januar 2015. Die wichtigsten Materialeigenschaften sind nachfolgend zusammengefasst.

Geometrie:

- Breite [cm]: 36
- Höhe [m]: 3,66

Baustoff Beton:

- Zuschlag: T7_S1
- Dichte [kg/m³]: 2448
- Betonfeuchtigkeit [%]: 3

Thermische Randbedingungen:

- Vierseitige Beflammung mit ETK
- Anfangstemperatur: 23 °C

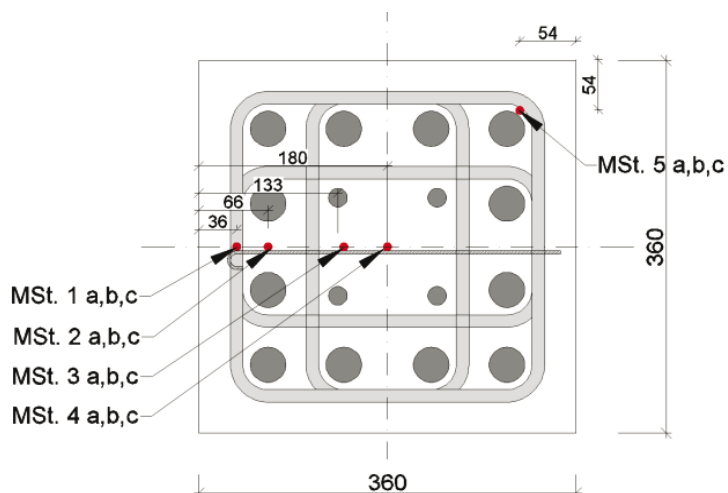


Abbildung 6: Lage der Messstellen in Stütze 2

4 Rechengrundlagen

4.1 Vorbemerkung

Neben der Bemessung von Bauteilen anhand von tabellierten Werten bietet DIN EN 1992-1-2 die Möglichkeit der Anwendung von vereinfachten und allgemeinen rechnerischen Nachweisverfahren. Die allgemeinen Rechenverfahren unterteilen sich hierbei in die thermische Analyse zur Bestimmung der Temperaturen innerhalb eines Bauteiles und darauf aufbauend die mechanische Analyse zur Bestimmung des Trag- und Verformungsverhaltens.

In diesem Abschnitt werden die Rechengrundlagen für die thermische Analyse von Stahlbetonbauteilen dargelegt.

4.2 Thermische Analyse

Entsprechend Abschnitt 4.1 DIN EN 1992-1-2 stellt die Anwendung allgemeiner Rechenverfahren ein zulässiges Bemessungsverfahren dar, jedoch ist der Einsatz solcher Verfahren an die Regelung im Nationalen Anhang gekoppelt. Der Nationale Anhang regelt, dass allgemeine Rechenverfahren eingesetzt werden dürfen, sofern diese validiert sind.

Bei der Ermittlung der Bauteiltemperaturen muss die thermische Analyse zum einen die thermischen Einwirkungen nach DIN EN 1991-2 und zum anderen die temperaturabhängigen Materialeigenschaften berücksichtigen. DIN EN 1992-1-2 regelt überdies, dass der Einfluss des Bewehrungsstahls bei Stahlbetonbauteilen unberücksichtigt werden kann. Auch einer Berücksichtigung des Feuchttransportes innerhalb des Betonquerschnittes bedarf es nicht. Ferner wird geregelt, dass Betonabplatzungen durch konstruktive Maßnahmen wirksam zu behindern sind und somit im Rahmen der thermischen Analyse nicht berücksichtigt werden.

Aufgrund dieser Festlegungen kann die Wärmeleitung innerhalb von Stahlbetonbauteilen auf Grundlage der partiellen Differentialgleichung nach Fourier für ein homogenes Material bestimmt werden:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c_p \rho} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (4.1)$$

Zur Lösung dieser Differenzgleichung ist die Kenntnis des temperaturabhängige Verlaufs erforderlichlich von:

- der thermischen Leitfähigkeit λ [W/(mK)],
- der Dichte ρ [kg/m³] und
- der spezifische Wärmekapazität c_p [J/(kgK)].

Ferner bedarf es als Randbedingung der Anfangstemperaturverteilung und der Temperaturen an den beflamten Seiten des zu untersuchenden Stahlbetonquerschnittes.

4.3 Thermische Einwirkungen

4.3.1 Allgemeines

Die thermischen Einwirkungen stellen eine Randbedingung zur Lösung der partiellen Differentialgleichung nach Fourier dar. Entsprechend DIN EN 1992-1-2 sind die thermischen Einwirkungen entsprechend DIN EN 1991-1-2 anzusetzen. Die thermischen Einwirkungen sind als Netto-Wärmestrom in die beflamte Oberfläche des Bauteils anzugeben. Hierzu sind sowohl der Wärmestrom aus Konvektion als auch der Wärmestrom aus Strahlung zu berücksichtigen.

$$\dot{h}_{net} = \dot{h}_{net,c} + \dot{h}_{net,r} \quad (4.2)$$

Für die Bestimmung dieser Wärmeströme können nominelle Temperaturzeitkurven (bspw. ETK) und aus Naturbrandmodellen ermittelte Temperaturzeitkurven herangezogen werden.

4.3.2 Konvektion

Konvektion beschreibt den Wärmetransport zwischen zwei Punkten über bewegte Materie, wie bspw. einem Heißgasstrom. Der konvektive Anteil am Netto-Wärmestrom bestimmt sich zu:

$$\dot{h}_{net,c} = \alpha_c \cdot (\Theta_g - \Theta_m) \quad (4.3)$$

α_c : Wärmeübergangskoeffizient [W/m²K],

Θ_g : Gastemperatur in der Umgebung des Bauteils [°C] und

Θ_m : Oberflächentemperatur des Bauteils [°C].

Der Wärmeübergang bei Konvektionsströmungen ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit, den geometrischen Verhältnissen sowie der Oberflächenbeschaffenheit. Gemäß DIN 1992-1-2 dürfen diese Effekte vereinfachend über den Wärmeübergangskoeffizienten berücksichtigt werden.

Der Wärmeübergangskoeffizient ist in Abhängigkeit der angesetzten Temperaturzeitkurve festgelegt (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Wärmeübergangskoeffizienten in Abhängigkeit der thermischen Einwirkung

Temperaturzeitkurve	α_c [W/m ² K]
ETK	25
Außenbrandkurve	25
Hydrokarbonkurve	50
Naturbrandmodelle	35
brandabgewandte Seite:	
- nur Konvektion	4
- kombiniert Strahlung und Konvektion	9

4.3.3 Strahlung

Die Flamme eines Brandes emittiert eine elektromagnetische Strahlung. Trifft diese Strahlung auf ein Bauteil, wird sie emittiert und führt zu einer Erwärmung des Bauteiles. Nach DIN EN 1991-1-2 ist der radiative Anteil am Netto-Wärmestrom unter Berücksichtigung des Stephan-Boltzmann-Gesetzes zu bestimmen mit:

$$\dot{h}_{net,r} = \Psi \cdot \epsilon_m \cdot \epsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\Theta_r + 273)^4 - (\Theta_m + 273)^4] \quad (4.4)$$

- Ψ : Konfigurationsfaktor
- ϵ_m : Emissivität der Bauteiloberfläche
- ϵ_f : Emissivität des Feuers
- σ : Stephan-Boltzmann-Konstant ($5,67 \cdot 10^{-8}$ W/m²K⁴)
- Θ_r : wirksame Strahlungstemperatur des Brandes
- Θ_m : Oberflächentemperatur des Bauteils

Der Konfigurationsfaktor berücksichtigt hierbei die Ausrichtung des Bauteils zur Flamme und ist standardmäßig mit 1,0 anzusetzen.

4.4 Temperaturabhängige thermische Materialeigenschaften

4.4.1 Allgemeines

Wie oben beschrieben ist die zeitliche und örtliche Temperaturverteilung im Bauteilquerschnitt als Lösung der Differenzialgleichung nach Fourier abhängig von den temperaturabhängigen thermischen Materialeigenschaften.

Im folgenden Abschnitt werden die einzelnen Materialeigenschaften nähergehend erläutert.

4.4.2 Thermische Leitfähigkeit

4.4.2.1 Allgemeines

Die thermische Leitfähigkeit gibt an welche Wärmemenge bei einem definierten Temperaturunterschied innerhalb einer Zeitdifferenz durch ein Baustoff mit einer definierten Dicke hindurchgeleitet wird.

4.4.2.2 DIN EN 1992-1-2

In der DIN EN 1992-1-2 wird für die thermische Leitfähigkeit von Beton ein oberer und ein unterer Grenzwert in Abhängigkeit von der Temperatur definiert. Die Wärmeleitfähigkeit des Betons ist hierbei unabhängig von der Zuschlagsart und der Betonfeuchte.

Der obere Grenzwert ist anzusetzen mit:

$$\lambda_c = 2 - 0,2451(\theta_c / 100) + 0,0107(\theta_c / 100)^2 \quad [W / m K] \quad (4.5)$$

Der untere Grenzwert ist anzusetzen mit:

$$\lambda_c = 1,36 - 0,136(\theta_c / 100) + 0,0057(\theta_c / 100)^2 \quad [W / m K] \quad (4.6)$$

Dabei ist θ_c die Betontemperatur. Die Verläufe der oberen und unteren Grenzfunktion sind in Abbildung 7 dargestellt. Die obere Grenzfunktion wird nachfolgend als „upper curve“ und die untere Grenzfunktion als „lower curve“ bezeichnet.

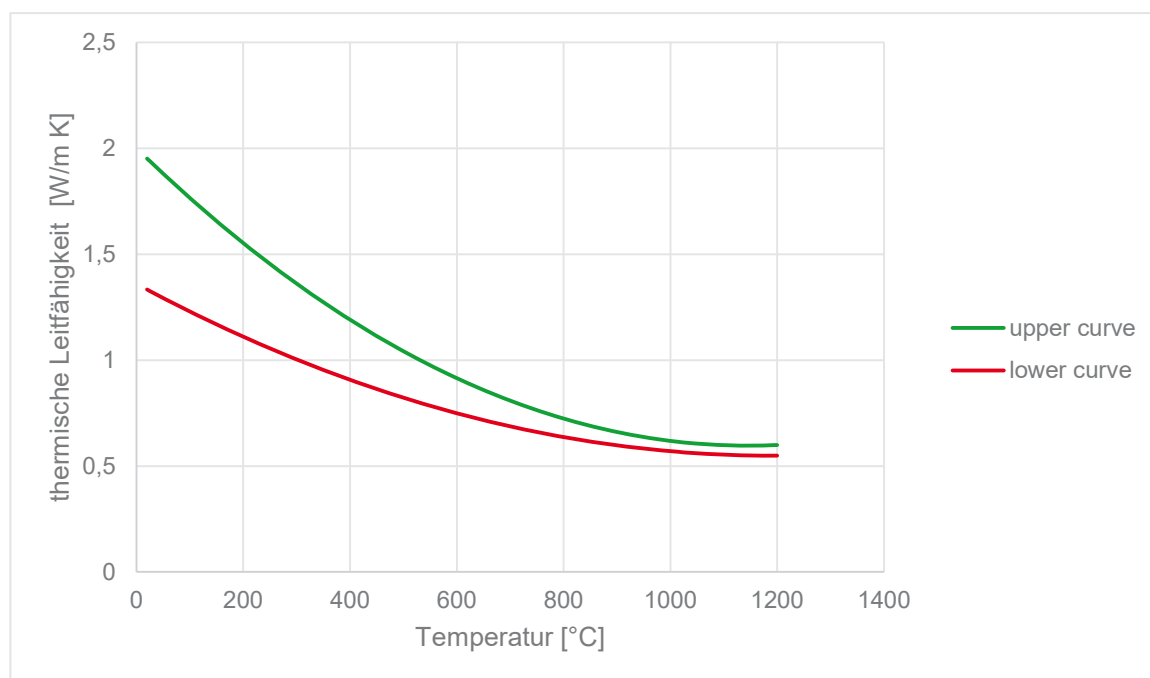


Abbildung 7: Grenzfunktionen der thermischen Leitfähigkeit

Der Nationale Anhang regelt, dass in Deutschland für die thermische Leitfähigkeit die obere Grenzfunktion anzusetzen ist. Die so bestimmte thermische Leitfähigkeit ist nur bei Normal- und hochfesten Beton anzusetzen. Die Anwendung auf Leichtbetone und Ultrahochfeste Betone bleibt ausgeschlossen.

4.4.2.3 Änderungsvorschlag CEN/TC 250/SC 2/WG 1/TG 5

Es ist bekannt, dass die Bauteiltemperaturen im hohen Maße von den einwirkenden Temperaturen im Brandraum abhängen, dies zeigt z. B. die Sensitivitätsanalyse in [3]. Bei Brandprüfungen werden seit einigen Jahren für die Messung der Brandraumtemperaturen gemäß DIN EN 1363-1 Platten-Thermoelemente eingesetzt. Diese unterscheiden sich von den vormals eingesetzten Mantelthermoelementen vor allem dadurch, dass das Thermoelement durch eine Wärmedämmung vom Brandraum abgeschirmt wird und der Strahlungseinfluss besser berücksichtigt wird.

Weiterhin wurde festgestellt, dass bei Ansatz der oberen Grenzwertfunktion der thermischen Leitfähigkeit auf der unbeflammten Seite Temperaturen berechnet werden, für die das Isolationskriterium I gemäß DIN EN 13501-2 nicht eingehalten wird, obwohl das Bauteil diese Anforderung im Brandversuch und nach dem Tabellenverfahren in DIN EN 1992-1-2 über die einzuhaltende Mindestdicke erfüllt.

Aus vorgenannten Gründen wurde in CEN / TC 250 / SC 2 / WG 1 / TG 5 eine modifizierte Rechenfunktion der thermischen Leitfähigkeit vorgeschlagen, welche zunächst deckungsgleich

mit der oberen Grenzfunktion verläuft. Ab einer Temperatur von 140 °C erfolgt eine lineare Abnahme und ab einer Temperatur von 160°C verläuft die thermische Leitfähigkeit deckungsgleich mit der unteren Grenzfunktion. In Abbildung 8 ist der vorgeschlagene Verlauf dargestellt. Der Änderungsvorschlag wird im Folgenden als „mixed curve“ bezeichnet.

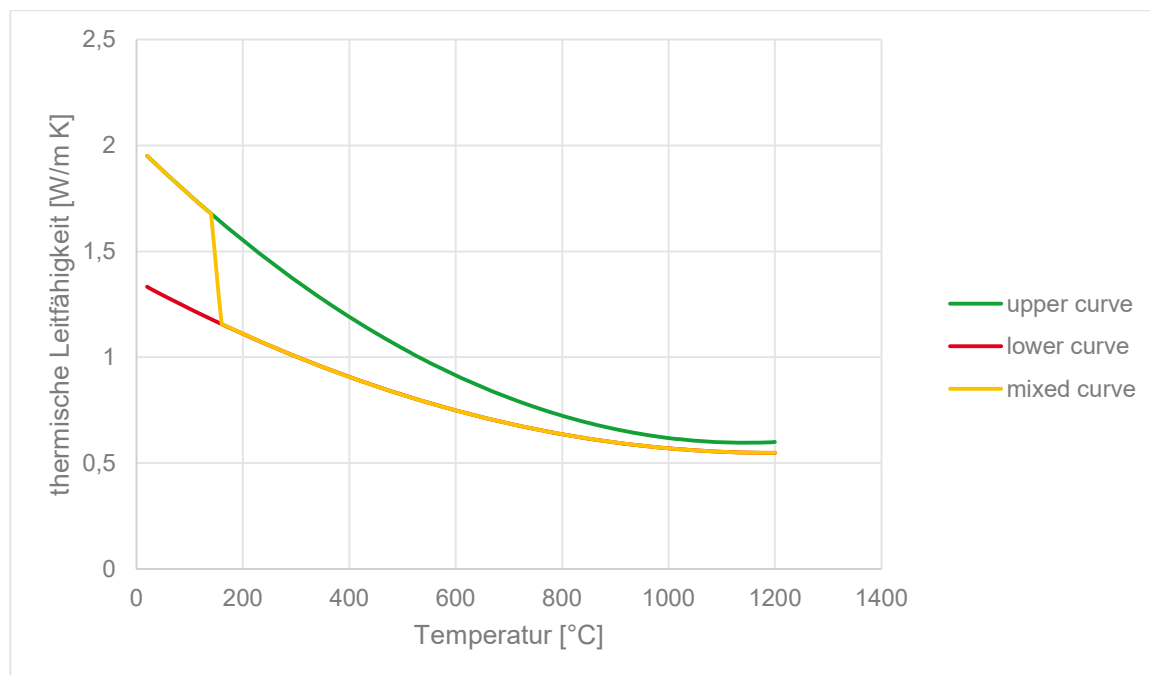


Abbildung 8: Vorgeschlagene Funktion für die thermische Leitfähigkeit

4.4.3 Rohdichte

Aufgrund der Verdampfung des physikalisch gebundenen Wassers im Beton bei einer Brandbeanspruchung und thermischer Umsetzungsreaktionen nimmt die Dichte von Beton temperaturabhängig ab.

In Abbildung 9 ist der temperaturabhängige Verlauf der Dichte in DIN EN 1992-1-2 für eine Rohdichte von 2300 kg/m³ bei 20 °C beispielhaft dargestellt.

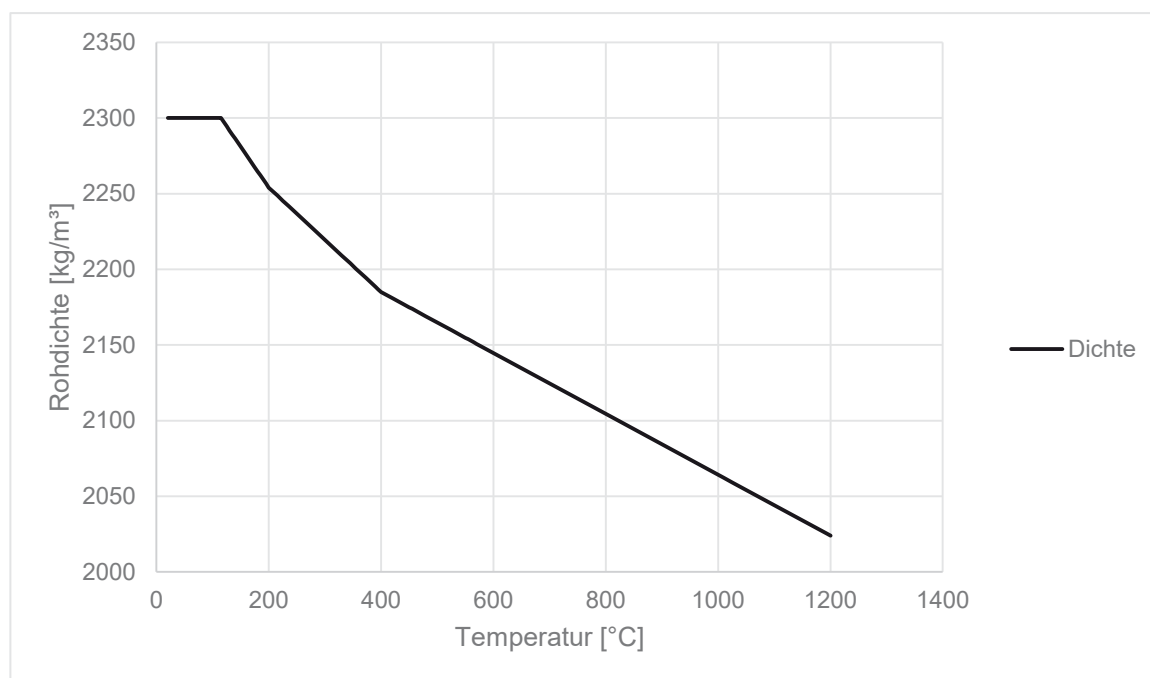


Abbildung 9: Temperaturabhängiger Funktion der Rohdichte von Beton

4.4.4 Spezifische Wärmekapazität

Die spezifische Wärmekapazität ist die Materialeigenschaft, die angibt, welcher Wärmemenge es bedarf die Temperatur einer definierten Masse um eine definierte Temperaturdifferenz zu erhöhen. Dieser Wert ist physikalisch in hohem Maße abhängig von der Art der Gesteinskörnung des Betons.

Der Verlauf der spezifischen Wärmekapazität ist temperaturabhängig und steigt mit steigender Temperatur an. In der in DIN EN 1992-1-2 definierten Rechenfunktion der spezifischen Wärmekapazität wird die latente Wärme beim Phasenübergang des physikalisch gebundenen Wassers von flüssig zu gasförmig vereinfachend berücksichtigt. Hierzu wird für die spezifische Wärmekapazität im Temperaturbereich zwischen 100°C und 115°C ein konstanter Spitzenwert in Abhängigkeit von der Betonfeuchte definiert.

Dieser Spitzenwert ist festgelegt zu:

- $c_p = 900 \text{ J/(kgK)}$ bei einer Betonfeuchte von 0% des Betongewichtes,
- $c_p = 1470 \text{ J/(kgK)}$ für eine Betonfeuchte von 1,5 % des Betongewichtes und
- $c_p = 2020 \text{ J/(kgK)}$ für eine Betonfeuchte von 3,0 %.

Zwischenwerte können linear interpoliert werden. Ein Funktionsverlauf für eine höhere Betonfeuchte wird nicht angegeben.

Abbildung 10 zeigt den temperaturabhängigen Verlauf der spezifischen Wärmekapazität für eine Betonfeuchte von 3% des Betongewichtes.

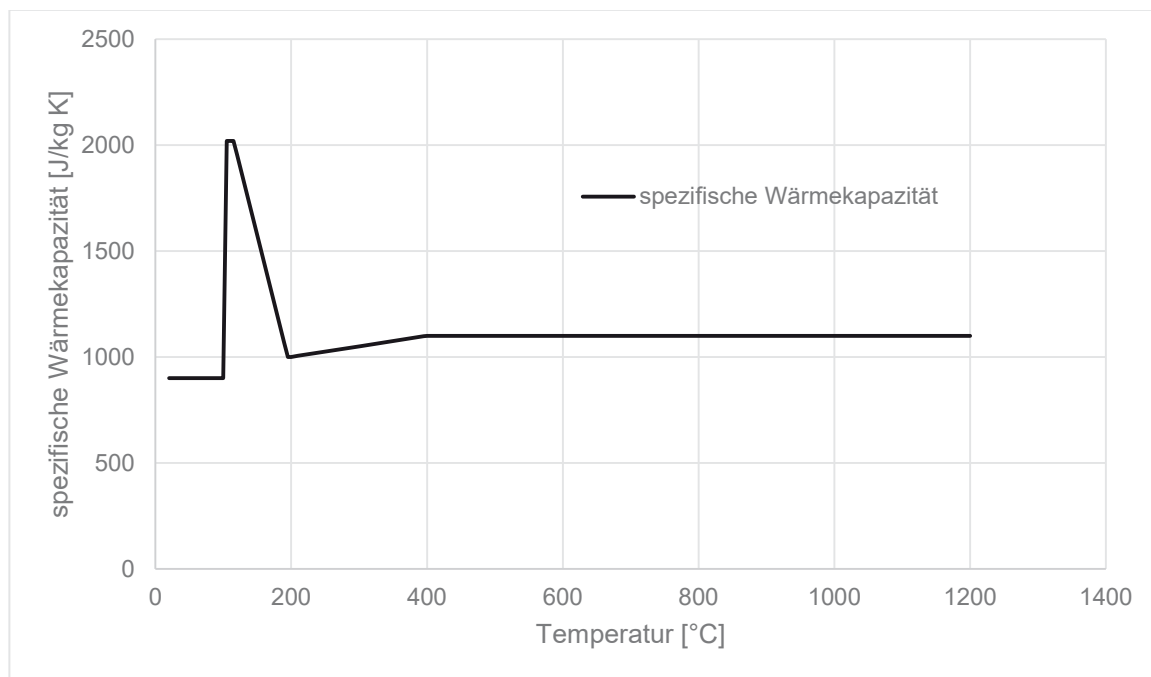


Abbildung 10: Temperaturabhängiger Verlauf der spezifischen Wärmekapazität

5 Vergleichsrechnungen

5.1 Vorbemerkung

In diesem Abschnitt werden die gemessenen Bauteiltemperaturen aus den in Abschnitt 3 beschriebenen Brandversuchen mit berechneten Temperaturen verglichen und bewertet. Dabei werden die in Abschnitt 4 beschriebenen Rechenfunktionen der thermischen Materialeigenschaften zugrunde gelegt und für die thermische Leitfähigkeit die drei Ansätze „obere und untere Grenzfunktion“ sowie „mixed-curve“ untersucht. Die berechneten Temperaturen werden mit Hilfe des Programms InfoCAD ermittelt. Das Programm ist nach DIN EN 1991-1-2/NA Anhang CC validiert.

5.2 Experimentelle Temperaturzeitkurven

Aus den Messergebnissen der einzelnen Versuche wurden die experimentellen Temperaturzeitkurven ermittelt. Es wurden nur solche Prüfkörper berücksichtigt, in denen mindestens an drei unterschiedlichen Stellen Messleiter in den Prüfkörper eingebaut waren, die die Temperaturen in unterschiedlichen Bauteildicken aufgezeichnet haben (Lage der Messfühler siehe Abschnitt 3). Bei der Auswahl wurde darüber hinaus die Abweichungen zwischen Brandraumtemperatur und ETK berücksichtigt (siehe unten).

Aus den parallelen Messleitern wurde durch Mittelwertbildung für jeden Prüfkörper eine Temperaturzeitkurve pro Messfühlerposition bestimmt. Diese Temperaturzeitkurve wird als experimentelle Temperaturzeitkurve für den Vergleich mit den numerisch bestimmten Temperaturzeitkurven herangezogen.

5.3 Berechnung der Temperaturzeitkurven

5.3.1 Thermische Einwirkung

Für alle Berechnungen wurde als thermische Einwirkung die Einheits-Temperaturzeitkurve nach DIN EN 1991-1-2 angesetzt.

Die ETK wird definiert mit:

$$\Theta_g = 20 + 345 \cdot \log_{10}(8t + 1) \quad (5.1)$$

Θ_g : Gastemperatur [°C]

t : Zeit [min]

Dies entspricht der Zieltemperatur innerhalb der Brandräume während der Versuche. Bei den am CERIB durchgeführten Versuche (T1_xx, T2_xx, T3_xx und T4_xx) erfolgte die Auswahl der Probekörper für die Vergleichsberechnungen in Abhängigkeit von der Brandraumtemperatur und deren Abweichung zur Einheits-Temperaturzeitkurve. Bei den am iBMB durchgeführten Versuchen (T6_xx, T7_xx und T8_xx) war eine solche Auswahl nicht möglich, da die Höhenlage der Temperaturfühler im Brandraum nicht mit der Höhenlage der Temperaturfühler im Brandraum übereinstimmte. Die gemittelten Abweichungen zwischen den Brandraumtemperaturen und ETK bewegen sich zwischen -3,18% und 2,31%. Für die am CERIB durchgeführten Versuche können sehr gute Übereinstimmungen festgestellt werden (Abweichungen < 1%). Aufgrund dieser relativ geringen Abweichungen zwischen der Brandraumtemperatur und der ETK werden die numerischen Berechnungen mit der ETK und nicht mit den tatsächlichen Brandraumtemperaturen durchgeführt. Dem Anhang können die Vergleichskurven (ETK – Brandraumtemperaturen) entnommen werden.

Entsprechend der DIN EN 1991-1-2 wurde für die Wärmeübergangskoeffizienten folgende Werte angesetzt:

- auf der beflamnten Seite: $\alpha_c = 25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$
- auf der unbeflammten Seite: $\alpha_c = 4 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$

Für die Emissivität der Bauteiloberfläche zur Bestimmung des Wärmestroms aus der Strahlung wurde entsprechend DIN EN 1992-1-2 angesetzt:

- $\epsilon_m = 0,7 [-]$.

5.3.2 Thermische Materialeigenschaften

Ausgenommen der thermischen Leitfähigkeit erfolgt die Berechnung der Temperaturen unter Ansatz der thermischen Materialkennwerte nach DIN EN 1992-1-2. Zur Bewertung des Ansatzes der „mixed curve“ für die thermische Leitfähigkeit werden die Bauteiltemperaturen für jeden Brandversuch unter Ansatz der „upper curve“, der „lower curve“ und der „mixed curve“ berechnet.

Bei Brandversuchen, bei denen keine Informationen über die Betondichte vorliegen, wird die Dichte bei einer Temperatur von 20°C mit 2.300 kg/m³ zur Bestimmung der berechneten Ergebnisse angesetzt. Bei Brandversuchen, bei denen die Betonfeuchte oberhalb von 3 %, erfolgt entsprechend DIN EN 1992-1-2 der Ansatz einer Betonfeuchte von 3 %.

5.3.3 Übersicht der berechneten Temperaturzeitkurven

Für den Vergleich der 3 Rechenfunktionen der thermischen Leitfähigkeit ist es notwendig für jeden Brandversuch drei Berechnungen durchzuführen. In Tabelle 2 sind die Temperaturzeitkurven gelistet. Die erste Angabe der Prüfkörperbezeichnung liefert Information über die Prüfinstitution:

- CERIB: T1_xx, T2_xx, T3_xx und T4_xx,
- SP: T5_xx,
- iBMB: T6_xx, T7_xx und T8_xx

Die einzelnen Prüfkörper sowie die Lage der Messpunkte innerhalb des Prüfkörpers können Abschnitt 3 entnommen werden.

Tabelle 2: Übersicht Temperaturzeitkurven

	Prüfkörper	Anzahl Messpunkte	Anzahl Temperaturzeitkurven
T1	T1_D3	6	18
	T1_D4	6	18
T2	T2_D4	7	21
	T2_D5	7	21
T3	T3_D8	7	21
	T3_D9	7	21
	T3_D10	7	21
	T3_D11	7	21
T4	T4_W1	7	21
T5	T5_E	5	15
	T5_M	5	15
	T5_N	5	15
T6	T6_S1	5	15
T7	T7_S1	5	15
T8	T8_W1	3	9
Gesamt			267

5.4 Bewertung der getroffenen Annahmen und Randbedingungen

5.4.1 Vorbemerkungen

Wie die Übersicht in Kapitel 3 zeigt, sind nicht für alle herangezogenen Bauteile die Baustoffeigenschaften in vollem Umfang bekannt. Dahingehend wurden Annahmen für die die Betondichte, die Gesteinskörnung sowie die Betondichte getroffen.

Ausgangspunkt des Forschungsvorhabens war der Vergleich von drei unterschiedlichen Kurven für den Verlauf der Wärmeleitfähigkeit, der durch die Annahmen verursachte Fehler tritt bei allen durchgeführten Berechnungen in gleicher Weise auf, sodass der Vergleich der Ergebnisse für die Wärmeleitfähigkeiten ermöglicht wird. Im Folgenden werden die Auswirkungen der Randbedingungen und getroffenen Annahmen auf die berechneten Bauteiltemperaturen beschrieben. Hierzu wird die Temperaturleitfähigkeit, als funktionale Koppelung der thermischen Materialkennwerte, herangezogen:

$$a = \frac{\lambda}{c_p \rho} \quad (5.2)$$

5.4.2 Allgemeine Modellunsicherheit

Bei der Anwendung allgemeiner Rechenverfahren nach DIN EN 1992-1-2 wird im Rahmen der thermischen Analyse die Annahme getroffen, dass es sich bei Beton um einen homogenen Baustoff handelt, für den das Fourier'sche Gesetz zur Wärmeleitung (Gleichung (4.1)) angewendet werden kann (vgl. Abschnitt 4.2 Thermische Analyse). In der Realität ist Beton ein stark heterogener Baustoff. Das allgemeine Rechenverfahren nach DIN EN 1992-1-2 trifft somit eine grundlegende Vereinfachung. Eine Änderung dieses Ansatzes ist jedoch insbesondere aus Gründen der Anwendbarkeit nicht zielführend. Unabhängig vom Verlauf der Wärmeleitfähigkeit und den getroffenen Annahmen besteht somit eine Modellunsicherheit, die sich auf die Ergebnisse der Temperaturberechnung auswirkt.

5.4.3 Einfluss der Dichte

Die Dichte von Normalbeton bewegt sich zwischen 2.000 und 2.600 kg/m³. Nicht für alle untersuchten Bauteile ist die Dichte gegeben (siehe Abschnitt 3). Der für die Berechnungen gewählte Wert für die Dichte von 2.300 kg/m³ stellt somit den Mittelwert dar. Anhand der Definition der Temperaturleitfähigkeit (Gleichung (5.2)) zeigt sich, dass sich bei einer geringeren Rohdichte eine höhere Temperaturleitfähigkeit ergibt und sich im Bauteil höhere Temperaturen ergeben würden.

5.4.4 Einfluss der Feuchte

Der Feuchtegehalt von Beton hat einen Einfluss auf die Erwärmung des Bauteiles. Ein hoher Feuchtegehalt führt aufgrund der Verdampfung des Wassers zu einer langsameren Erwärmung des Bauteilquerschnitts. Die Bauteiltemperatur kann erst dann weiter steigen, wenn das flüssige Wasser verdampft ist. Andererseits stellt sich aufgrund des Temperaturgradienten ein Transportprozess des Wassers von der beflamnten zur unbeflamnten Seite ein, womit auch ein Wärmeleitungsprozess verbunden ist. Das Rechenverfahren der DIN EN 1992-1-2 berücksichtigt keinen Feuchtetransport innerhalb des Bauteils.

Das Rechenverfahren der DIN EN 1992-1-2 berücksichtigt die Betonfeuchte durch eine Anpassung der spezifischen Wärmekapazität im Temperaturbereich zwischen 100 °C und 200 °C vereinfacht. Je höher die Betonfeuchte, desto größer ist der anzusetzende Peak für die spezifische Wärmekapazität. In den durchgeführten Berechnungen wurde für die Betonfeuchte der Maximalwert nach DIN EN 1992-1-2 von 3% angesetzt. Eine geringere Betonfeuchte führt zu einer geringeren spezifischen Wärmekapazität. Zieht man die Definition der Temperaturleitfähigkeit heran, so zeigt sich, dass hiermit eine höhere Temperaturleitfähigkeit verbunden wäre.

5.4.5 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich somit festhalten, dass die getroffenen Annahmen und Randbedingungen Einfluss auf die berechneten Temperaturen innerhalb der Bauteile haben. Allerdings lässt sich ein Großteil der damit verbundenen Faktoren auf die Modellunsicherheit des Rechenverfahrens zurückführen (keine Unterscheidung der Gesteinskörnung, kein Feuchtetransport etc.).

Sensitivitätsanalysen von Hosser et al. [5] und Achenbach et. alt. [3] haben gezeigt, dass die Temperaturverteilung in beflamnten Betonquerschnitten im Wesentlichen vom Verlauf der Wärmeleitfähigkeit und den einwirkenden Brandraumtemperaturen abhängig ist. Die Dichte und spezifische Wärmekapazität sind nur von untergeordnetem Einfluss, weshalb für diese Werte in [3] auch ein konstanter Wert vorgeschlagen wird.

5.5 Bewertungskriterien

5.5.1 Vorbemerkungen

Aufgrund der großen Anzahl der auszuwertenden Temperaturzeitkurven und um eine quantitative Bewertung zu ermöglichen, erfolgt der Vergleich zwischen den berechneten und den experimentellen Daten anhand mehrerer Bewertungskriterien. Die Auswahl von zwei Bewertungskriterien erfolgt, um zum einen zu berücksichtigen, wie groß die Abweichung zwischen gemessenen und berechneten Temperaturen ist (Genauigkeit) und zum anderen, ob die berechneten

Temperaturen auf der sicheren oder unsicheren Seite liegen. Ein allgemein gültiges Bewertungsverfahren, das beide Punkte berücksichtigt (Genauigkeit und Sicherheit) und ein „hartes“ Kriterium liefert, liegt derzeit nicht vor und wäre Ansatzpunkt für weitergehende Forschungsvorhaben. Im Folgenden werden die gewählten Kriterien kurz erläutert.

5.5.2 PEACOCK-Kriterium (accuracy-criteria)

Zur Bewertung der Genauigkeit wurde das PEACOCK-Kriterium gewählt. Dieses am NIST entwickelte Kriterium basiert auf dem mittels Vektoranalyse berechneten (auf die gemessene Temperatur normierten) Flächeninhalt zwischen den berechneten und den gemessenen Temperaturen. Dieses Kriterium hat sich bei der Beurteilung der Prognosefähigkeit von Brandsimulationen bewährt [6].

Beim Verfahren nach PEACOCK (L2 – Norm Index) handelt es sich um ein globales Verfahren, d. h. der Vergleich zwischen berechneten und gemessenen Daten erfolgt nicht anhand einzelner Werte (bspw. Minima oder Maxima), sondern der gesamte Kurvenverlauf wird in die Bewertung einbezogen. Mit Hilfe des PEACOCK-Kriteriums werden die kumulierten Abweichungen zwischen den berechneten und den gemessenen Daten für jeden zu definierenden Zeitschritt i bewertet. Das PEACOCK-Kriterium ermittelt sich anhand:

$$C_{PEACOCK} = \frac{\| Y_E - Y_N \|}{\| Y_E \|} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{E,i} - Y_{N,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{E,i})^2}} \quad (5.3)$$

Y_E : Wert der gemessenen Datenreihe

Y_N : Wert der berechneten Datenreihe

Aufgrund der quadrierten Werte wird ausgeschlossen, dass sich positive und negative Abweichungen gegenseitig aufheben. Das PEACOCK-Kriterium kann Werte im Bereich von $[0, +\infty]$ annehmen. Im Allgemeinen ist jedoch festzustellen, dass bei Werten $> 1,0$ eine schlechte Übereinstimmung zwischen berechneten und gemessenen Temperaturzeitkurven vorliegt.

Für die Bewertung der berechneten und gemessenen Temperaturzeitkurven wurde ein Zeitschritt von $i = 60$ Sekunden zur Ermittlung des PEACOCK-Kriteriums gewählt. Die Berechnung erfolgte hierbei ohne Glättung der Daten.

5.5.3 Safety-Kriterium

Die Bewertung mittels PEACOCK-Kriterium liefert keine Information darüber, ob die berechneten Temperaturzeitkurven auf der sicheren oder auf der unsicheren Seite liegen, sondern lediglich wie groß die normierte Fläche zwischen den beiden Zeitkurven ist. Liegen die berechneten Temperaturen konstant unterhalb der gemessenen Temperaturen (Ergebnisse auf der unsicheren Seite), so ergibt sich derselbe PEACOCK-Wert wie für den Fall, dass die berechneten Temperaturen konstant oberhalb der gemessenen Temperaturen liegen (Ergebnissen auf der sicheren Seite).

Um die berechneten Temperaturzeitkurven dahingehend zu bewerten, ob diese tendenziell ober- oder unterhalb der gemessenen Temperaturzeitkurven liegen, wurde als zweites Kriterium das „Safety-Kriterium“ gewählt. Dieses Kriterium berechnet für einen definierten Zeitschritt i die Differenz zwischen der berechneten und gemessenen Temperaturzeitkurven und wird auf diese Differenz normiert. Es ermittelt sich nach:

$$C_{Safety} = \frac{\sum_i^n (Y_N - Y_E)}{\sum_i^n \sqrt{(Y_N - Y_E)^2}} \quad (5.4)$$

Y_E : Wert der gemessenen Datenreihe

Y_N : Wert der berechneten Datenreihe

Das „Safety-Kriterium“ kann Werte im Bereich $[-1; 1]$ annehmen, wobei bei einem Wert von -1 alle Werte der berechneten Temperaturzeitkurve auf der unsicheren Seite liegen und bei einem Wert $+1$ alle Werte auf der sicheren Seite liegen. Es kann jedoch mit dem Safety-Kriterium keinen Aussage getroffen werden wie weit die Werte auf der sicheren bzw. unsicheren Seite liegen, das Safety-Kriterium gibt lediglich eine Aussage über die Anzahl der Werte auf der sicheren bzw. unsicheren Seite, bei einem Wert „0“ liegen gleich viele Werte auf der sicheren und unsicheren Seite.

Für die Berechnung des „Safety-Kriterium“ wurde in Übereinstimmung mit der Berechnung des PEACOCK-Kriteriums eine Zeitschrittweite von 60 Sekunden ohne Glättung der Daten gewählt.

In Abbildung 11 sind die Werte des PEACOCK-Kriteriums und das „Safety-Kriterium“ für die Temperaturzeitkurven aus dem Deckenbrandversuch T2_D4 dargestellt. Jede gemessene Temperaturzeitkurve erzeugt durch Ansatz der drei Funktionen für die thermische Leitfähigkeit

drei Datenpunkte. Für diesen Versuch ergeben sich 21 Datenpunkte mit einer verhältnismäßig geringen Streuung.

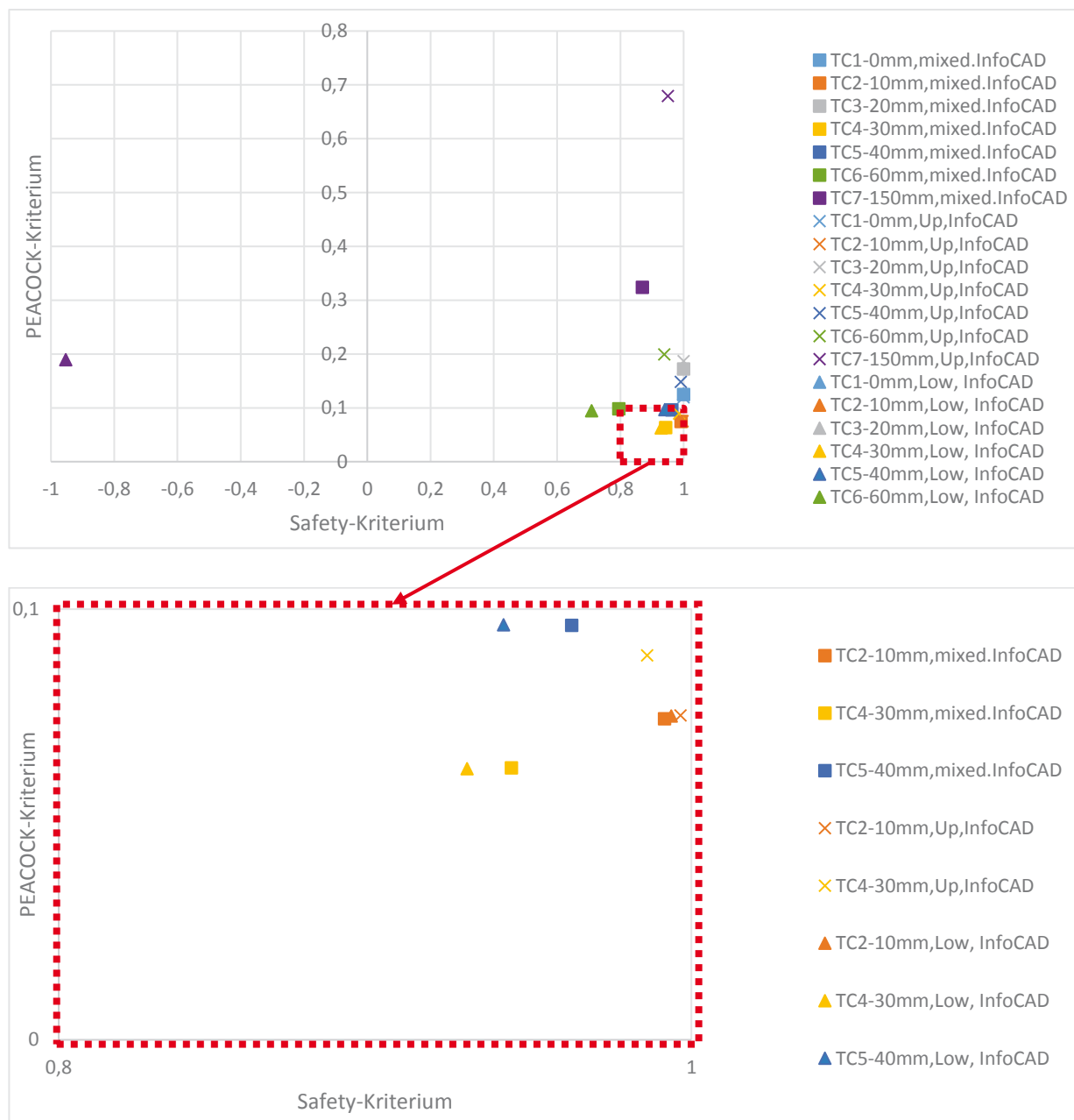


Abbildung 11: PEACOCK-/ Safety-Kriterium für den Versuch T2_D4

5.6 Vergleich der Temperaturen

5.6.1 Vorbemerkung

Entscheidend für die Anwendung eines mathematischen Modells und der hierin zugrunde gelegten Modellparameter zur Bestimmung der Temperaturen innerhalb eines beflamnten Bauteiles, ist die Prognosefähigkeit an Querschnittspunkten, die zur Bewertung der Leistungskriterien herangezogen werden.

Bei Stahlbetonbauteilen sind dies:

- die Temperaturen in Höhe der Bewehrungslage zur Bewertung der Tragfähigkeit,
- die Temperaturen an der unbeflammten Seite zur Bewertung des Isolationskriteriums.

Bezogen auf die Ausgangsfrage erfolgt ein Vergleich und eine Bewertung dahingehend nur für jene Temperaturzeitkurven, die in einer Entfernung zwischen 2 cm und 4 cm von der beflamnten Seite entfernt sowie auf der unbeflammten Seite des Bauteils aufgezeichnet wurden.

Werden im Bereich der Bewehrungslage mehrere Temperaturzeitkurven gemessen, so wird dies über eine Mittelwertbildung berücksichtigt.

5.6.2 Temperatur auf Höhe der Bewehrungslage

In Tabelle 3 und Abbildung 12 bis Abbildung 15 sind die Werte der Bewertungskriterien für den Vergleich der Temperaturzeitkurven in Abhängigkeit vom zugrunde gelegten temperaturabhängigen Verlauf der thermischen Leitfähigkeit auf Höhe der Bewehrungslage dargestellt.

Für die Bewertung wurden die Mittelwerte der Bewertungskriterien für die Temperaturzeitkurven jener Messstellen herangezogen, die einen Abstand zwischen 2 cm und 4 cm aufweisen. Für die Deckenelemente T1_D3 und T1_D4 sind dies beispielsweise die Messstellen TC2 und TC3 (vgl. Abbildung 1: Lage der Messstellen im Deckenquerschnitt). Neben den einzelnen Werten für die Bewertungskriterien werden auch der Mittelwert und als Maß für die Streuung die Standardabweichung dargestellt.

Es zeigt sich, dass die Temperaturzeitkurven, die unter Ansatz der „mixed curve“ ermittelt wurden, eine ähnliche Übereinstimmung mit den gemessenen Temperaturzeitkurven aufweisen wie jene Temperaturzeitkurven, die unter Ansatz der „lower curve“ ermittelt wurden. Im Vergleich mit den Temperaturzeitkurven, welche unter Ansatz der „upper curve“ ermittelt wurden, weisen die Temperaturzeitkurven unter Ansatz der „mixed curve“ im Allgemeinen einen niedrigeren

PEACOCK-Wert auf. Darüber hinaus zeigt sich anhand der Standardabweichung, dass die PEACOCK-Werte unter Ansatz der „mixed curve“ weniger streuen.

Betrachtet man jedoch zusätzlich das „Safety-Kriterium“ so zeigt sich, dass für alle drei Ansätze der Großteil der Werte auf der sicheren Seite liegt (> 80 %), bei der „upper curve“ sogar 100%.

Tabelle 3: PEACOCK-/Safety-Kriterium in Höhe der Bewehrungslage

Brandver- such	$C_{PEACOCK}$ upper curve	$C_{PEACOCK}$ mixed curve	$C_{PEACOCK}$ lower curve	C_{Safety} upper curve	C_{Safety} mixed curve	C_{Safety} lower curve
T1_D3	0.08	0.03	0.02	1	-1	0.65
T1_D4	0.15	0.07	0.08	0.99	0.88	0.85
T2_D4	0.14	0.11	0.11	0.99	0.97	0.96
T2_D5	0.2	0.16	0.16	1	1	1
T3_D8	0.09	0.05	0.05	0.99	0.95	0.92
T3_D9	0.04	0.02	0.02	0.94	0.25	0.25
T3_D10	0.05	0.02	0.02	0.99	0.65	0.58
T3_D11	0.15	0.11	0.11	1	0.97	0.96
T4_W1	0.05	0.04	0.04	0.93	0.05	0.24
T5_E	0.31	0.2	0.22	0.97	0.58	0.59
T5_M	0.41	0.28	0.31	0.99	0.86	0.79
T5_N	0.36	0.24	0.27	0.99	0.63	0.62
T6_S1	0.37	0.25	0.27	1	1	-1
T7_S1	0.16	0.06	0.08	1	0.35006423	-1
T8_W1	0.02	0.07	0.06	0.29	-1	-1
Mittelwert	0.17	0.11	0.12	0.94	0.48	0.36
Standardab- weichung	0.13	0.09	0.10	0.17	0.65	0.72
auf sicherer Seite [%]	-	-	-	100	87	80

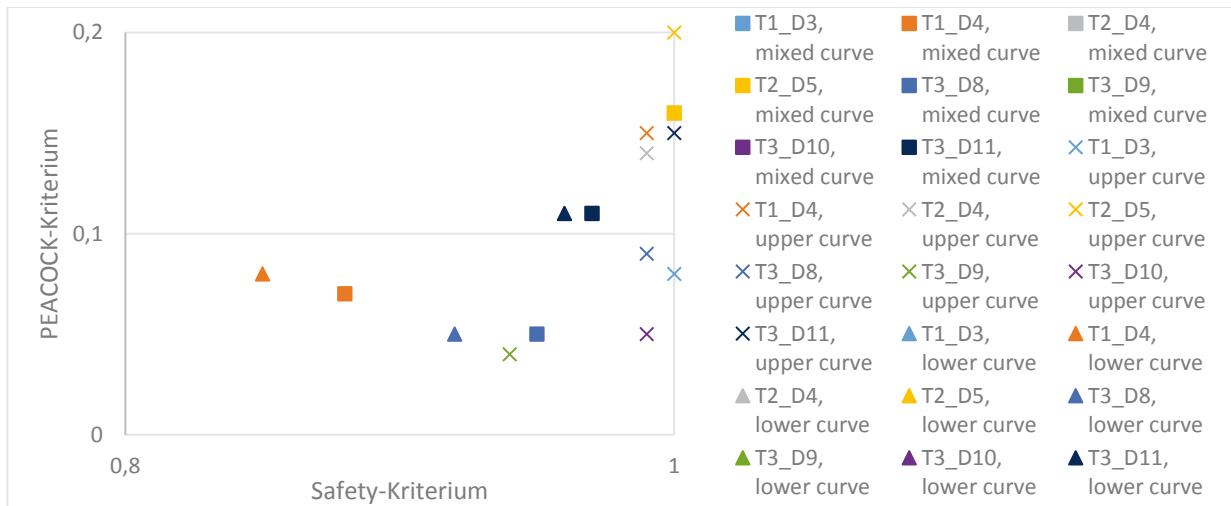
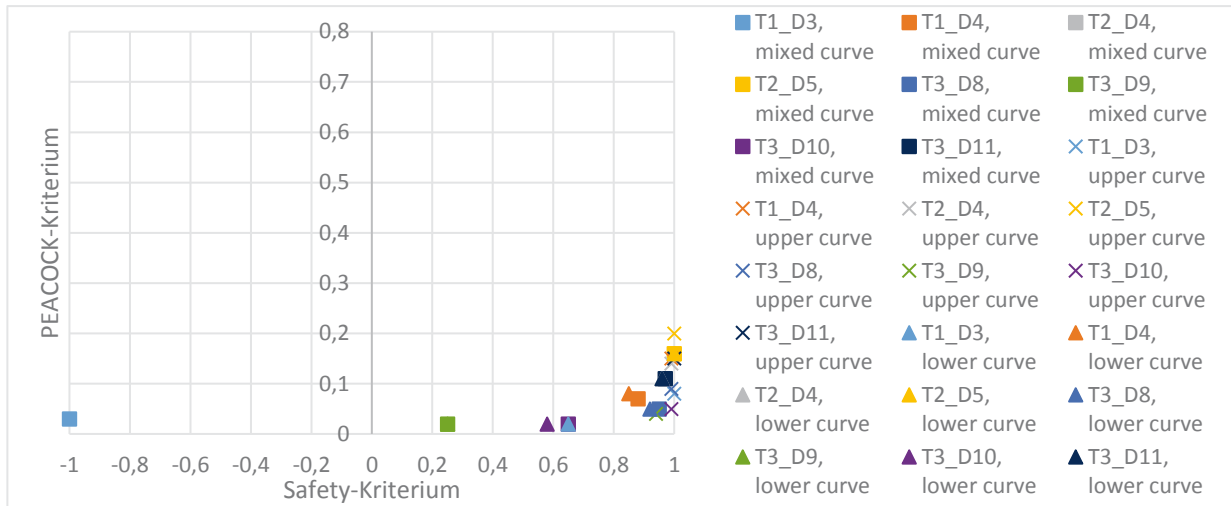


Abbildung 12: PEACOCK-Safety-Kriterium Bewehrungslage Deckenversuche CERIB (■: mixed curve, x: upper curve ▲: lower curve)

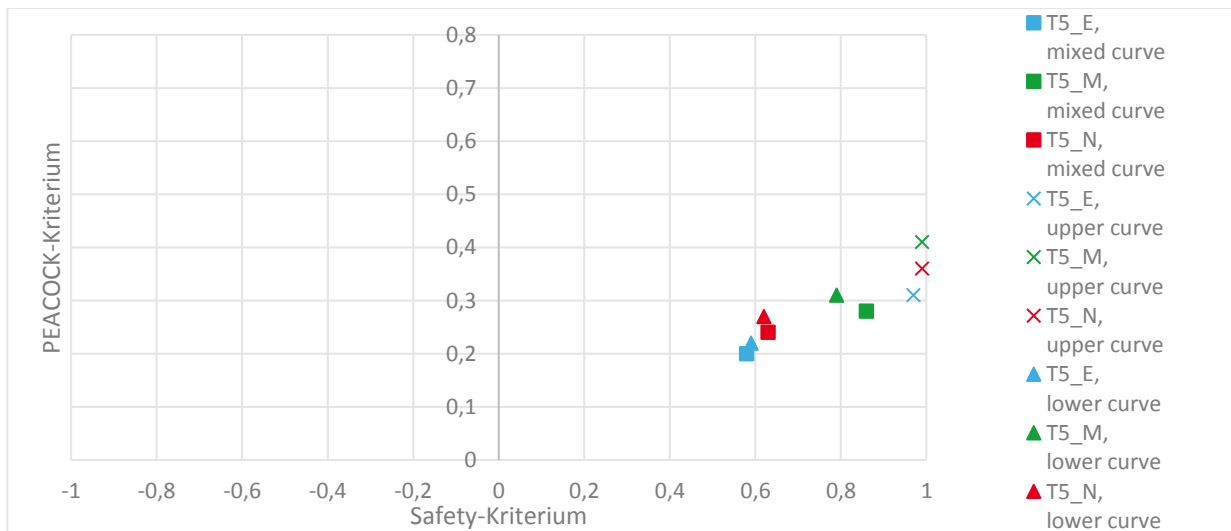


Abbildung 13: PEACOCK-Safety-Kriterium Bewehrungslage Deckenversuche SP (■: mixed curve, x: upper curve ▲: lower curve)

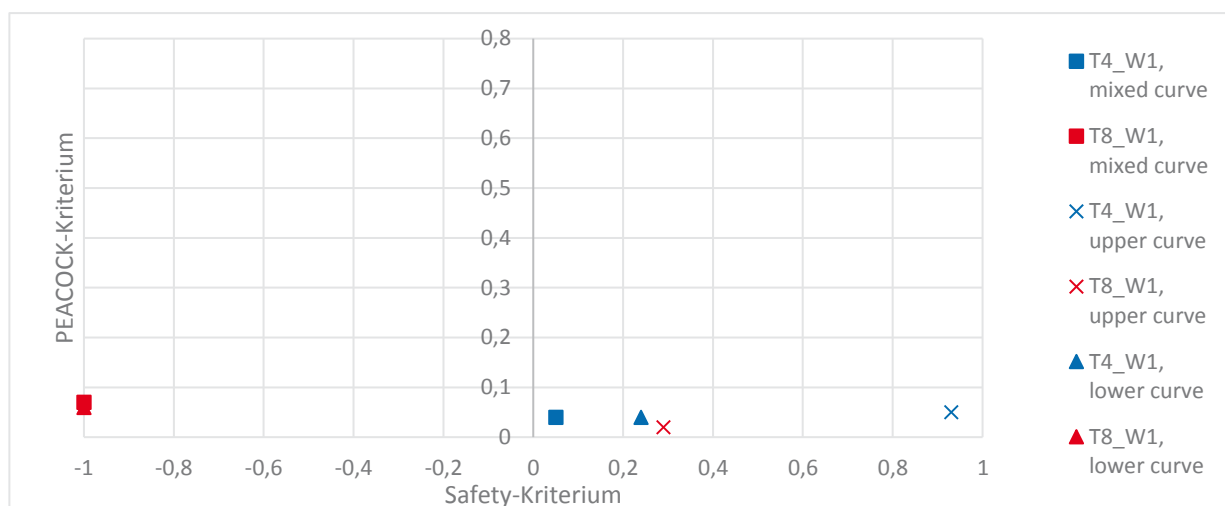


Abbildung 14: PEACOCK-Safety-Kriterium Bewehrungslage Wandversuche (■: mixed curve, x: upper curve ▲: lower curve)

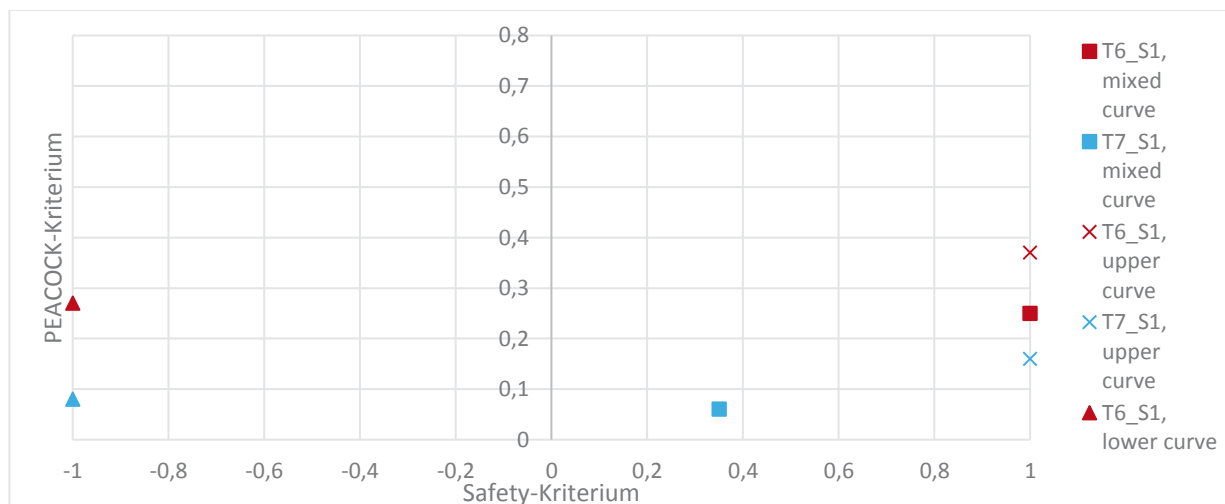


Abbildung 15: PEACOCK-Safety-Kriterium Bewehrungslage Stützenversuche (■: mixed curve, x: upper curve ▲: lower curve)

5.6.3 Temperaturen auf der unbeflammten Seite

In Tabelle 4 und Abbildung 16 sowie Abbildung 17 sind die Werte für die Bewertungskriterien für den Vergleich der Temperaturzeitkurven an der unbeflammten Seite (Isolationskriterium) dargestellt.

Für die Brandversuche der Versuchskampagne T5 konnten keine Werte für die Bewertungskriterien ermittelt werden, da bei diesen Versuchen die Temperaturen auf der unbeflammten Seiten nicht gemessen worden sind. Aufgrund der vierseitigen Beflammung bei den Brandversuchen T6_S1 und T7_S1 konnte auch hier eine Auswertung auf der unbeflammten Seite nicht erfolgen.

Im Vergleich zu den Werten für die Temperaturzeitkurven in Höhe der Bewehrungslage zeigt sich, dass unabhängig vom Verlauf der thermischen Leitfähigkeit sich grundsätzlich höhere Werte für das PEACOCK- und Safety-Kriterium ergeben.

Beim Ansatz der „mixed curve“ und der „lower curve“ ergeben sich im Vergleich zu „upper curve“ kleinere PEACOCK-Werte (bessere Übereinstimmung der Kurvenverläufe mit den Messwerten), jedoch kleinere Werte für das „Safety-Kriterium“.

Im Vergleich zu den Temperaturen auf Höhe der Bewehrungslage zeigt sich, dass weder die "upper curve" noch die "mixed curve" zu Ergebnissen führen, die zu 100 % auf der sicheren Seite liegen. Die im Vergleich zu den Temperaturen in Höhe der Bewehrungslage größeren Abweichungen könnten darauf hindeuten, dass die in der DIN EN 1992-1-2 festgelegten Modellvereinfachungen hinsichtlich des Einflusses der Bewehrung und des Feuchtetransportes bei Fragestellungen hinsichtlich der Wärmedämmung einen bislang unterschätzten Einfluss haben (vgl. Abschnitt 4.2 und 5.4.4). Gegebenenfalls können hier weiterführende Untersuchungen mit einer größeren Anzahl an Versuchen hilfreich sein.

Tabelle 4: PEACOCK-/Safety-Kriterium auf unbeflammter Seite

Brandver- such	$C_{PEACOCK}$	$C_{PEACOCK}$	$C_{PEACOCK}$	C_{Safety}	C_{Safety}	C_{Safety}
	upper curve	mixed curve	lower curve	upper curve	mixed curve	lower curve
T1_D3	0,02	0,11	0,09	1	-1	-1
T1_D4	0,06	0,07	0,15	-0,1	-0,25	-0,65
T2_D4	0,68	0,32	0,19	0,95	0,87	-0,95
T2_D5	0,74	0,42	0,4	1	1	0,89
T3_D8	0,25	0,07	0,08	0,91	0,57	0,14
T3_D9	0,35	0,07	0,1	0,95	0,62	-0,73
T3_D10	0,51	0,29	0,29	0,95	0,88	0,77
T3_D11	0,96	0,67	0,65	0,99	0,97	0,9
T4_W1	0,23	0,06	0,16	0,9	-0,91	-1
T5_E*	-	-	-	-	-	-
T5_M*	-	-	-	-	-	-
T5_N*	-	-	-	-	-	-
T6_S1*	-	-	-	-	-	-
T7_S1*	-	-	-	-	-	-
T8_W1	0,1	0,17	0,33	-0,94	-0,97	-0,99
Mittelwert	0,39	0,23	0,24	0,66	0,18	-0,26
Standardab- weichung	0,30	0,19	0,17	0,62	0,82	0,80
auf sicherer Seite [%]	-	-	-	80	60	40
* für diese Brandversuche ist die Bewertung des Isolationskriteriums aufgrund einer vierseitigen Beflammung oder fehlender Messpunkte auf der unbeflammten Seite nicht möglich.						

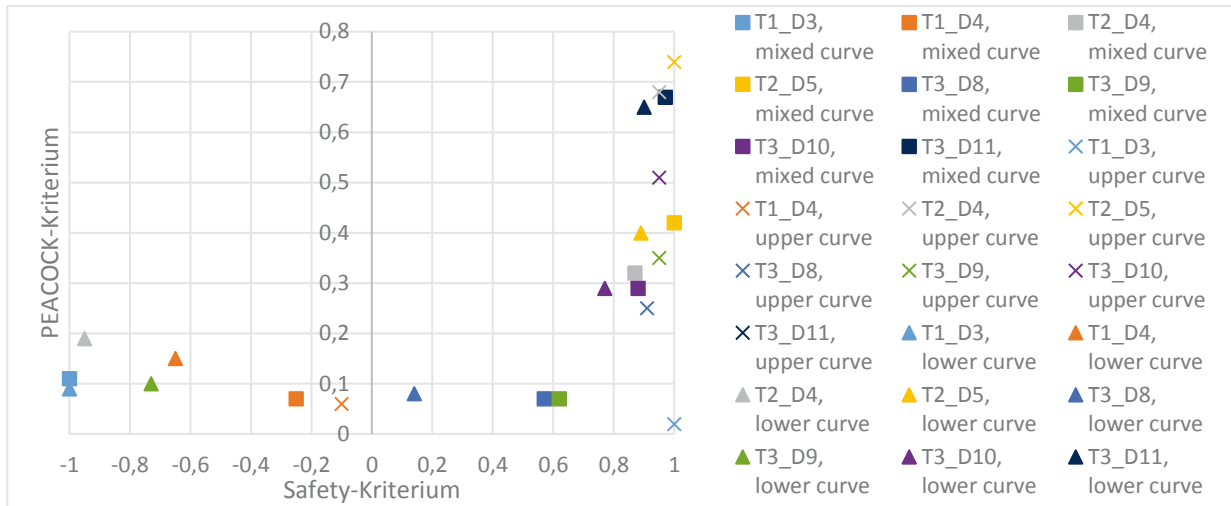


Abbildung 16: PEACOCK-Safety-Kriterium unbeflammte Seite Deckenversuche CERIB (■: mixed curve, x: upper curve ▲: lower curve)

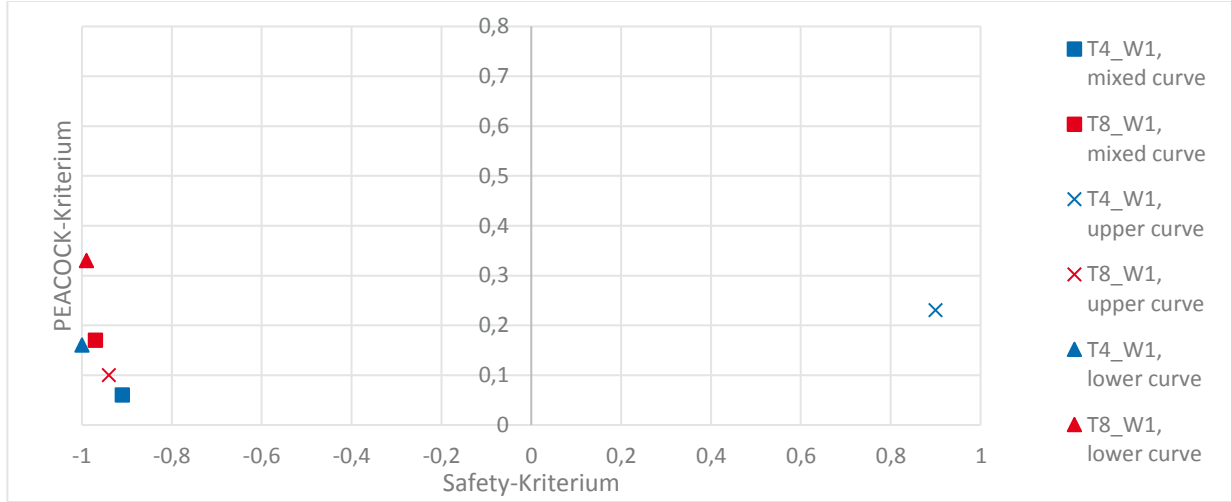


Abbildung 17: PEACOCK-Safety-Kriterium unbeflammte Seite Wandversuche (■: mixed curve, x: upper curve ▲: lower curve)

5.7 Fazit

Im vorstehenden Abschnitt wurden die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen mit den 3 Ansatzfunktionen für den Verlauf der thermischen Leitfähigkeit dargestellt. Die Berechnungen beziehen sich hierbei alleinig auf den Vergleich der drei unterschiedlichen Ansatzfunktionen für die Wärmeleitfähigkeit untereinander.

Anhand der Ergebnisse der einzelnen Bewertungskriterien zeigt sich, dass unter Ansatz der „mixed curve“ für die thermische Leitfähigkeit bei der Berechnung der Bauteiltemperaturen Temperaturzeitkurven ermittelt werden, die im Vergleich zur „upper curve“ (derzeit in DIN EN 1992-1-2/NA festgelegt) besser mit den gemessenen Temperaturzeitkurven übereinstimmen. Im Vergleich zu der in DIN 1992-1-2 beschriebenen unteren Grenzfunktion führt der Ansatz der „mixed curve“ zu Temperaturzeitkurven, die ebenfalls besser mit den gemessenen Temperaturen übereinstimmen.

Insgesamt liegen ein Großteil der Werte bei allen 3 Ansätzen auf der sicheren Seite, die „upper curve“ liefert naturgemäß die meisten Werte auf der sicheren Seite.

Aufgrund der besten Übereinstimmung der Kurvenverläufe zwischen Rechenfunktion und Messwerten sowie der weit überwiegend auf der sicheren Seite liegenden Werte wird auf Grundlage der nachgerechneten Versuche empfohlen bei der Überarbeitung von DIN EN 1992-1-2 als Rechenfunktion für die thermische Leitfähigkeit die „mixed curve“ festzulegen. Mit dem Ansatz der „mixed curve“ kann das bisherige Sicherheitsniveau in Deutschland beibehalten werden.

6 Zusammenfassung

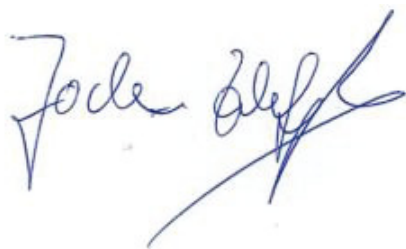
Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden die Ansatzfunktionen für die thermische Leitfähigkeit von Beton als wichtige Modellparameter für die thermische Analyse hinsichtlich der Einführung einer neuen Ansatzfunktion der „mixed curve“, die zwischen der bestehenden oberen und unteren Grenzfunktionen verläuft, untersucht.

Die weiteren Funktionen zur Beschreibung des temperaturabhängigen Materialverhaltens von Beton (Dichte und spezifische Wärmekapazität) blieben im Rahmen dieses Forschungsvorhabens unberücksichtigt, was die Bewertung der unterschiedlichen Ansatzfunktionen anhand von Vergleichsrechnungen ermöglicht hat.

In den durchgeführten Berechnungen wurden die Temperaturen in Stützen-, Decken- und Wandbauteilen berechnet und mit den in den jeweiligen Brandversuchen gemessenen Temperaturzeitkurven verglichen.

Bei Anwendung der neuen Ansatzfunktion ergeben sich Temperaturzeitkurven, die besser mit den gemessenen Temperaturzeitkurven übereinstimmen und somit eine wirtschaftlichere Bemessung erlauben. Für die Verwendung bei Stützen und Wandbauteilen bedarf es jedoch weiterer Untersuchungen.

Unter Zugrundlegung der hier untersuchten Brandversuche kann festgestellt werden, bei Ansatz der „mixed curve“ für die thermische Leitfähigkeit die besten Übereinstimmungen der Temperaturzeitverläufe zwischen Rechenfunktion und Messwerten sowie weit überwiegend auf der sicheren Seite liegenden Werte erzielt werden. Es wird empfohlen bei der Überarbeitung von DIN EN 1992-1-2 als Rechenfunktion für die thermische Leitfähigkeit die „mixed curve“ festzulegen. Mit dem Ansatz der „mixed curve“ kann das bisherige Sicherheitsniveau in Deutschland beibehalten werden. Sofern weitere dokumentierte Versuche zur Verfügung stehen (Stützen, Verbundbauteile) sollten diese im Rahmen der Arbeiten in CEN TC 250 / SC 2 / WG 1 / TG 5 in den Vergleich miteinbezogen werden.



Univ.-Prof. Dr.-Ing. J. Zehfuß



Jens Spille, M.Sc.

ANHANG

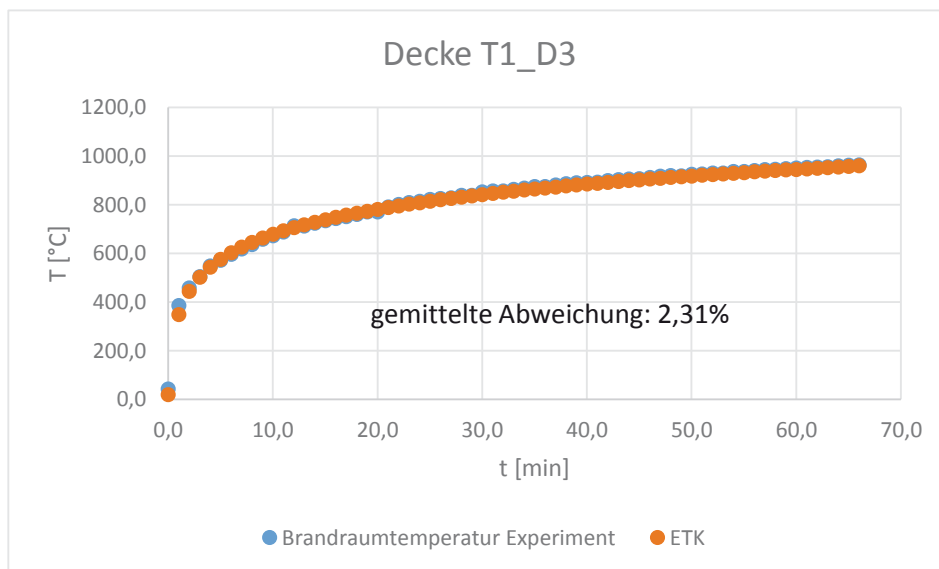


Abbildung A. 1 Vergleich Brandraumtemperatur - ETK T1_D3

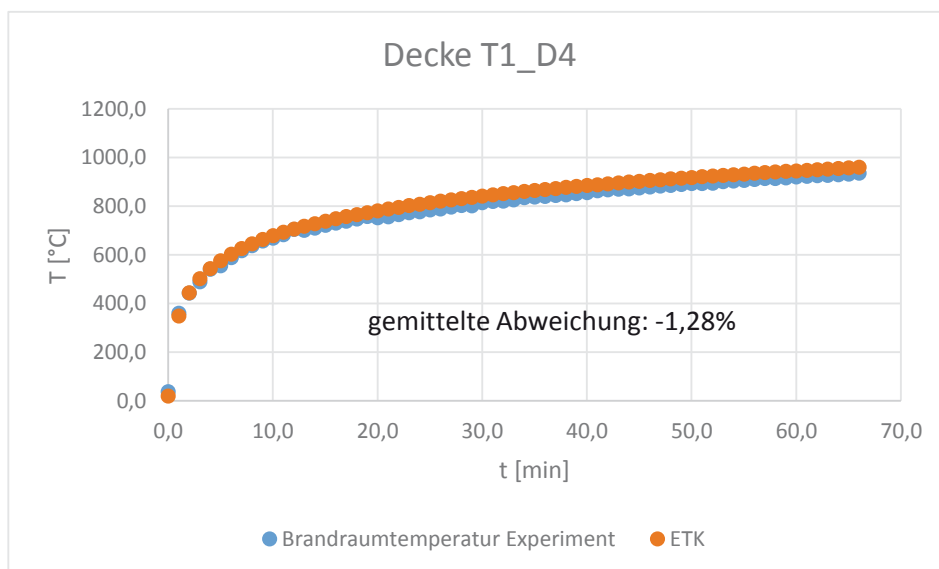


Abbildung A. 2 Vergleich Brandraumtemperatur - ETK T1_D4

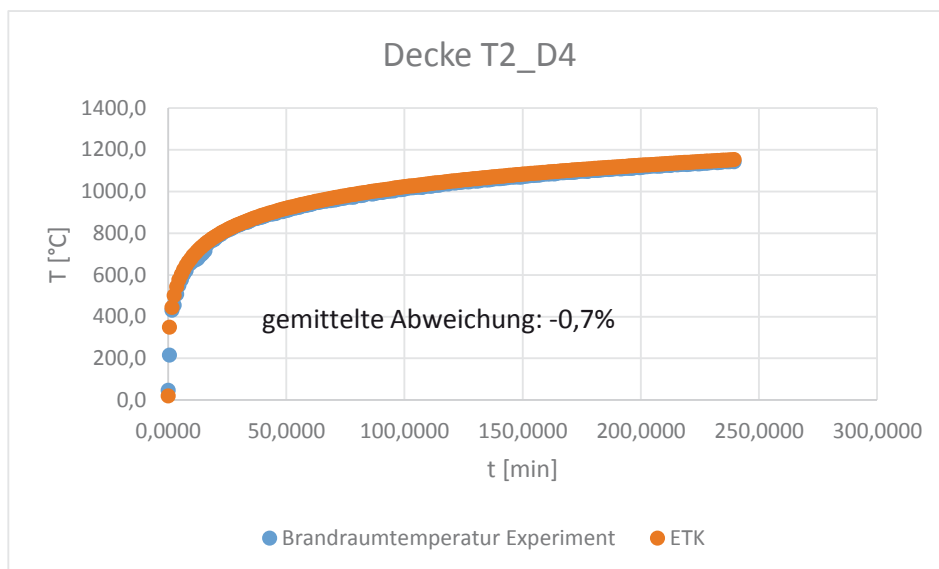


Abbildung A. 3 Vergleich Brandraumtemperatur - ETK T2_D4

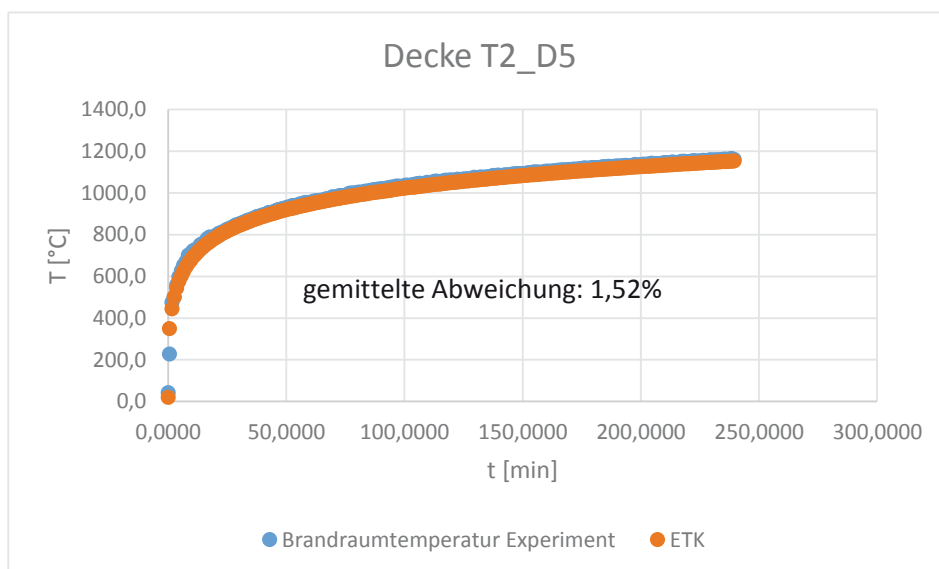


Abbildung A. 4 Vergleich Brandraumtemperatur - ETK T2_D5

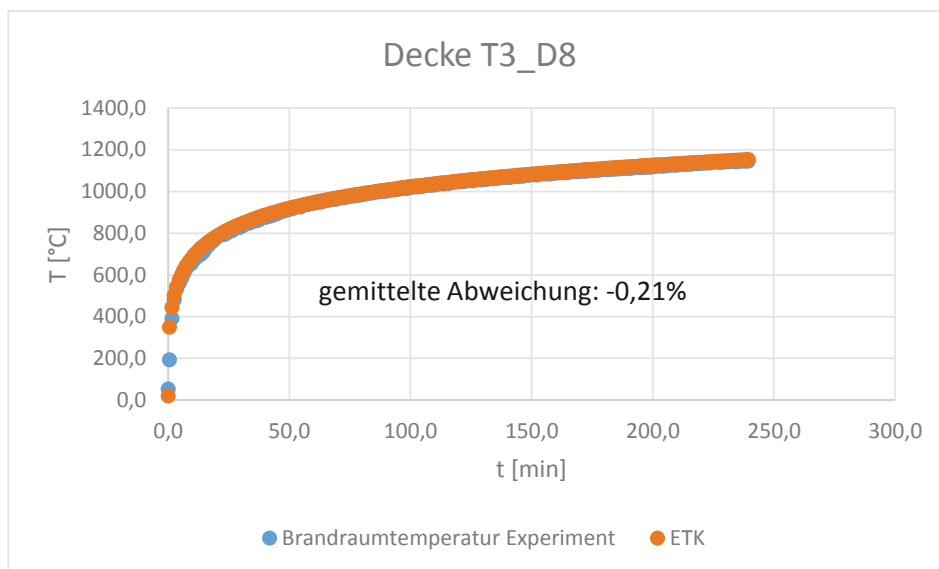


Abbildung A. 5 Vergleich Brandraumtemperatur - ETK T3_D8

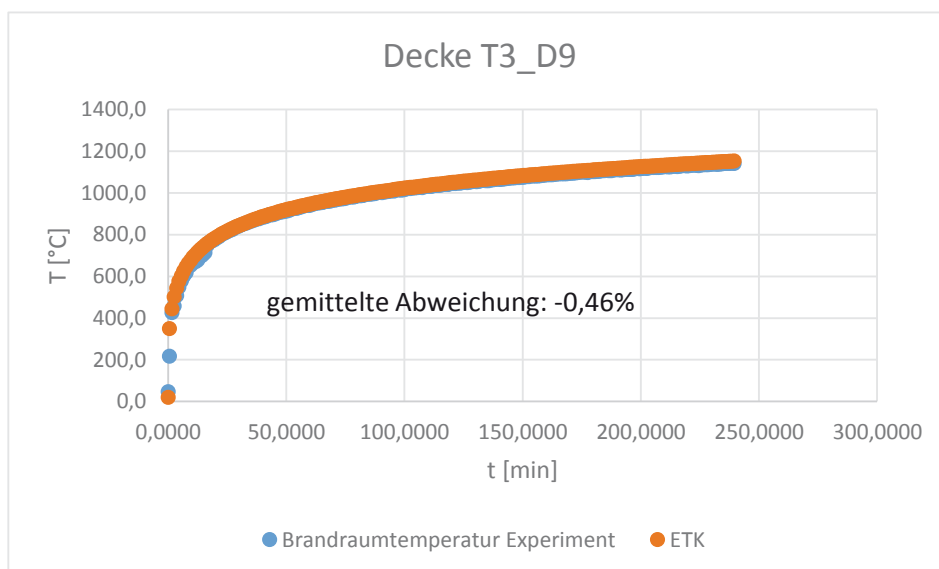


Abbildung A. 6 Vergleich Brandraumtemperatur - ETK T3_D9

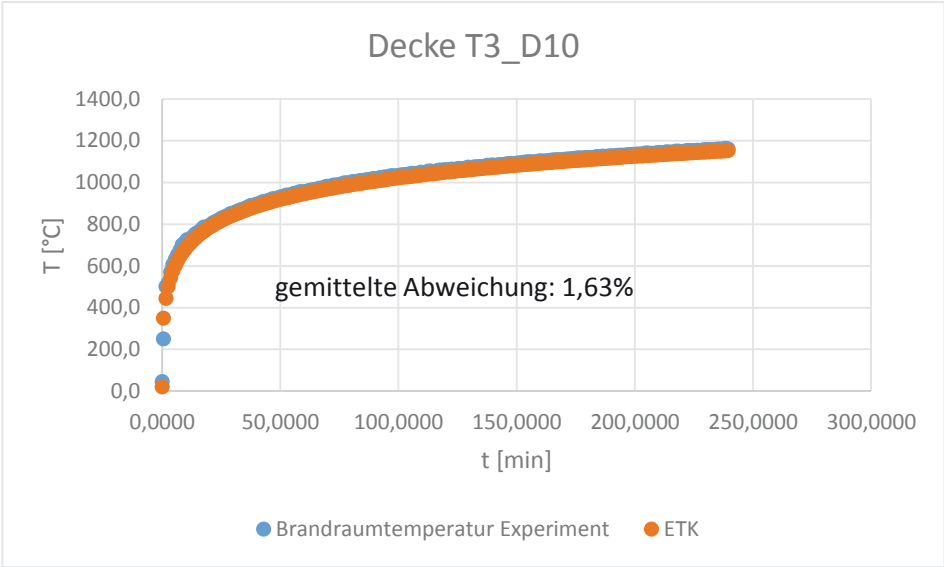


Abbildung A. 7 Vergleich Brandraumtemperatur - ETK T3_D10

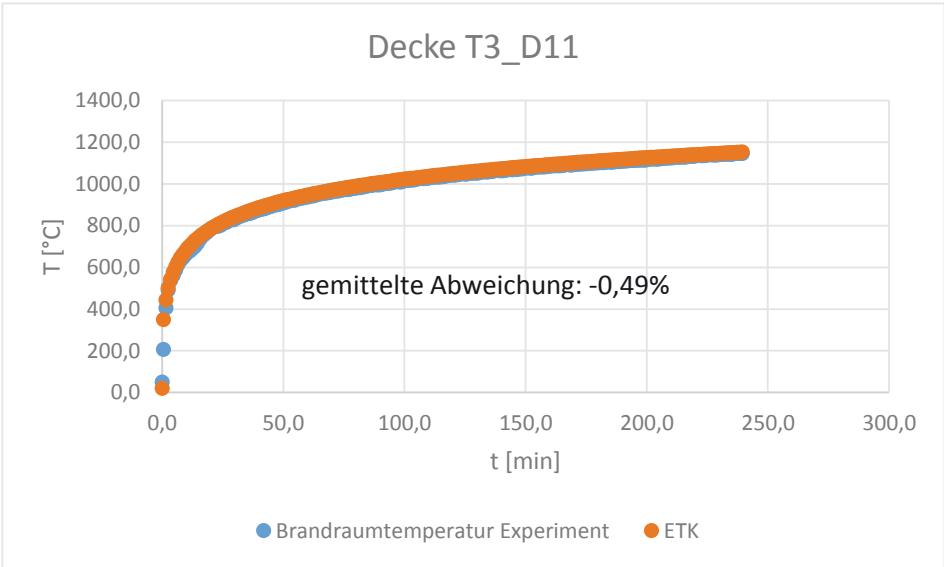


Abbildung A. 8 Vergleich Brandraumtemperatur - ETK T3_D11

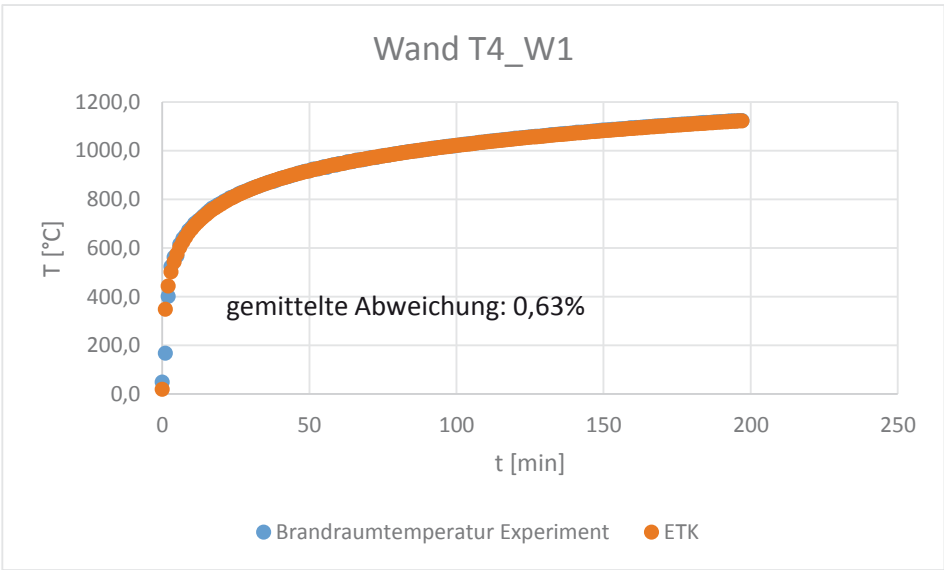


Abbildung A. 9 Vergleich Brandraumtemperatur - ETK T4_W1

Temperatures in furnace test, EN 1363-01

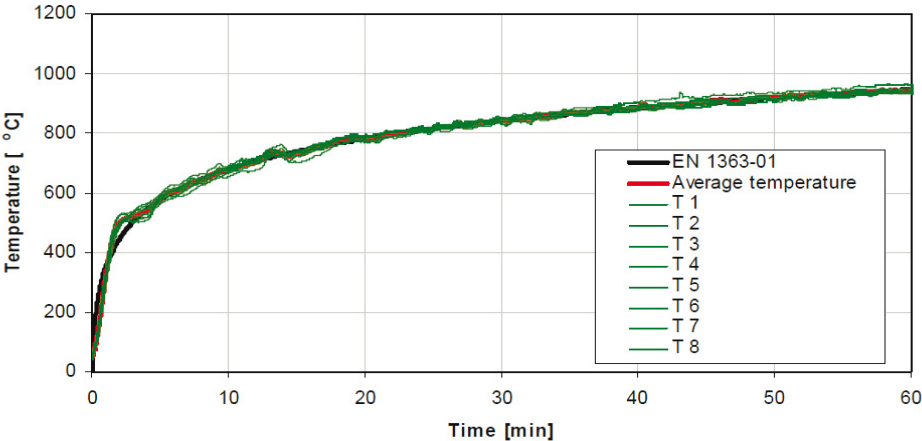


Abbildung A. 10 Vergleich Brandraumtemperatur - ETK T5

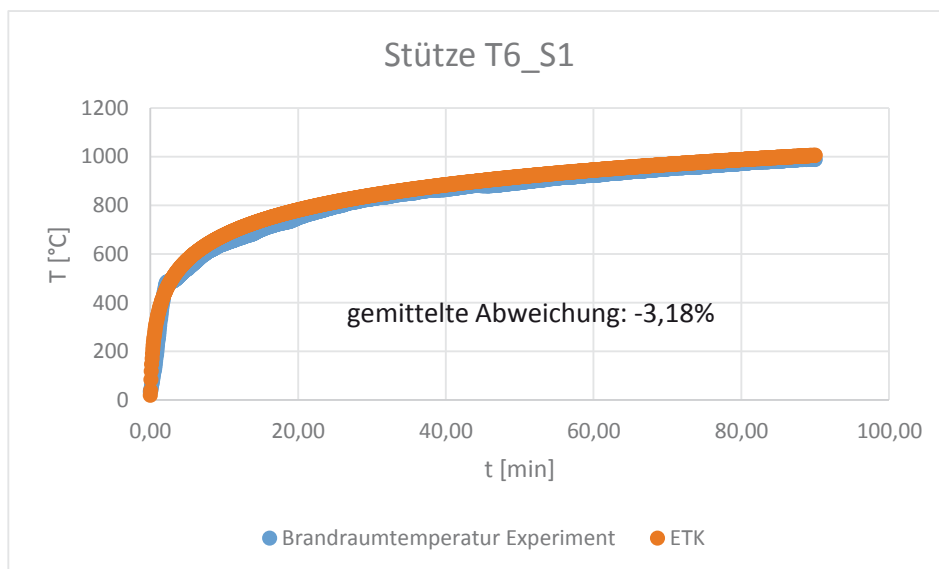


Abbildung A. 11 Vergleich Brandraumtemperatur - ETK T6_S1

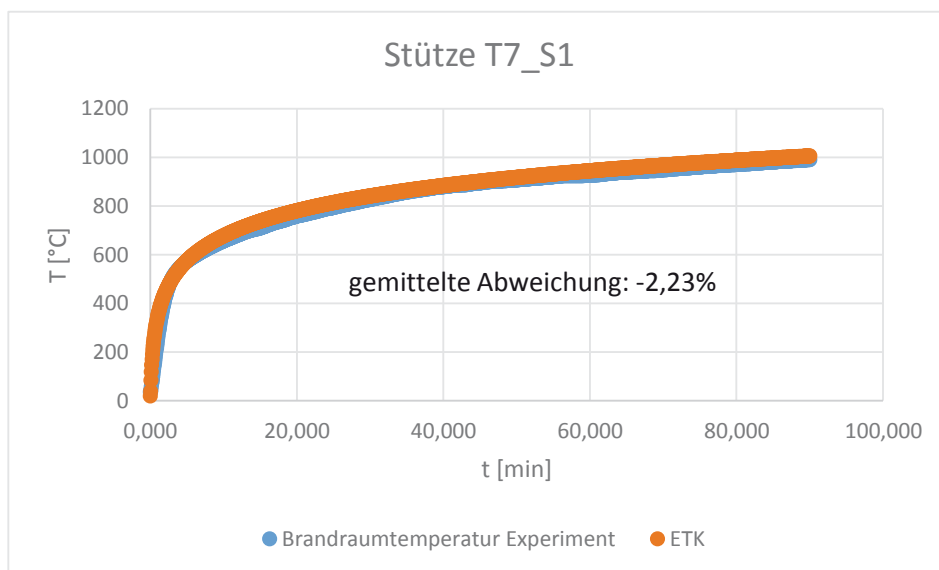


Abbildung A. 12 Vergleich Brandraumtemperatur - ETK T7_S1

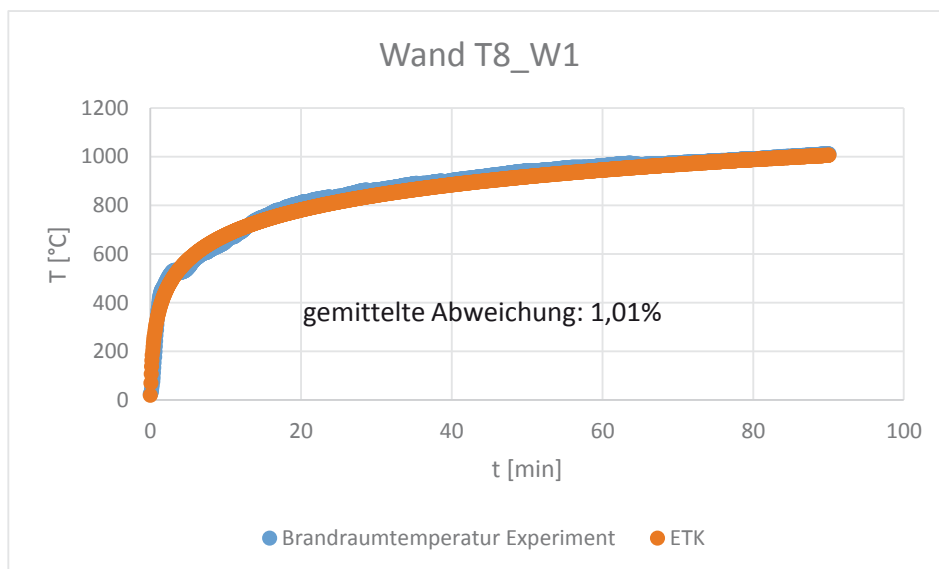


Abbildung A. 13 Vergleich Brandraumtemperatur - ETK T8_W1