

Brandschutz für biogene Fassaden

Experimentelle Untersuchungen als Grundlage brandschutztechnischer Prinzipien

Thomas Maximilian Engel

Vollständiger Abdruck der von der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München zur Erlangung eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation.

Vorsitz:

Prof. Dr.-Ing. Klaus Peter Sedlbauer

Prüfer*innen der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
2. Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß
3. Prof. Dr. Andrea Frangi

Die Dissertation wurde am 13.07.2023 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die TUM School of Engineering and Design am 23.11.2023 angenommen.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion der Technischen Universität München.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter, für die großen Freiräume, die uneingeschränkten Weiterentwicklungsmöglichkeiten, das entgegengebrachte Vertrauen und für die Betreuung dieser Dissertation. Darüber hinaus möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Zehfuß von der Technischen Universität Braunschweig und Herrn Prof. Dr. Andrea Frangi von der Eidgenössische Technische Hochschule Zürich für die Übernahme des Zweit- und Drittgutachtens herzlich danken.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Sedlbauer danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission sowie für die Abwicklung des Promotionsverfahrens.

Mein herzlicher Dank gebührt weiterhin meinen Kolleg*innen, Freunden und Wegbegleitern, durch die ich meine Promotionszeit in schöner Erinnerung behalten werde. Besonders hervorheben möchte ich Herrn Dr.-Ing. Markus Lechner, Herrn Dr.-Ing. Michael Merk und Herrn Dr.-Ing. Norman Werther für den wertvollen fachlichen Austausch, die Unterstützung, ihr offenes Ohr und ihre Hilfsbereitschaft.

Mein besonderer Dank gilt ebenfalls den Studierenden für ihre herausragenden Masterarbeiten (Ahrens 2021; Berger 2021; Graw 2023; Grimm 2020; Noder 2019; Schoofs 2023).

Weiterer Dank gebührt dem Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) und dem Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) in Form des Innovationsprogramms Zukunft Bau, dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) in Form des Projektträgers Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) und der deutschen Holzwirtschaft für die Förderung der experimentellen Untersuchungen.

Ebenso gilt mein herzlicher Dank der Freiwilligen Feuerwehr München, Abteilung Forstenried, für ihre tatkräftige Unterstützung bei einigen der hier aufgeführten Brandversuche.

München, Dezember 2023

Thomas Engel

Kurzfassung

Brände im Fassadenbereich sind die häufigste Ursache für sich rasch ausbreitende Gebäudebrände und verantwortlich für bedeutende Schäden und Verluste. Die Verwendung brennbarer Baustoffe im Fassadenbereich ist folglich kritisch zu hinterfragen. Ziel dieser Arbeit war es, das Brandverhalten von Holz- und begrünten Fassaden zu untersuchen und aus den Ergebnissen Vorschläge für brandschutztechnisch sichere Konstruktionen abzuleiten. Ein weiterer Fokus dieser Untersuchung war der mögliche Einfluss des mehrgeschossigen Holzbaus auf den Fassadenbrand aufgrund seiner zusätzlichen strukturellen Brandlast. Die durchgeführten Fassaden- und Raumbrandversuche zeigten: Brandschutztechnisch sichere Holzfassaden lassen sich durch konstruktive Maßnahmen auch an mehrgeschossigen Gebäuden erreichen. Nötig sind dabei besondere konstruktive Brandschutzmaßnahmen in Form von Brandsperren in jedem Geschoss, um die Brandausbreitung über die Holzfassade von Geschoss zu Geschoss zu begrenzen. Zudem beeinflusst die zusätzliche strukturelle Brandlast mehrgeschossiger Holzgebäude den Fassadenbrand. Sie kann zu einem Anstieg der Temperaturen, zu größeren Flammenlängen, einer höheren Wärmestromdichte und zu sich zeitlich schneller entwickelnden Bränden führen. Allerdings reichen die vorliegenden Erkenntnisse noch nicht aus, um diese Frage abschließend zu bewerten. Für die brandschutztechnische Bewertung von begrünten Fassaden ergaben mittelmaßstäbliche Brandversuche, dass der Haupteinflussfaktor auf das Brandverhalten von Pflanzen der Feuchtigkeitsgehalt ist. Die Pflanzenart selbst spielt nur eine untergeordnete Rolle in Bezug auf das Brandverhalten. Auch der direkte Vergleich zwischen jungen und alten Pflanzen sowie der Vergleich des jahreszeitlichen Einflusses zwischen Sommer und Winter zeigte keinen signifikanten Unterschied für vitale, gepflegte Pflanzen. Entscheidend für brandsichere begrünte Fassaden sind eine regelmäßige Pflege und Wartung. Bei einer Kombination aus Holz- und Grünfassade führte das Verbrennen der Begrünung in mittelmaßstäblichen Brandversuchen nicht zur Entzündung der dahinter liegenden Holzfassade.

Abstract

Fire Engineering for Sustainable Façades

Experimental Investigations for Fire-Safe Façade Design

Fires in the façade area are the most frequent cause of rapidly spreading fires in buildings and have been responsible for significant damage and losses. The use of combustible building materials in the façade area should therefore be critically reviewed. The aim of this work was to investigate the fire behaviour of wooden and green façades and to derive suggestions for fire-safe structural designs based on the results. This investigation also focused on the possible influence of multi-storey timber buildings on façade fires due to its additional structural fire loads. The façade and compartment fire tests carried out showed: Fire-safe wooden façades can also be achieved on multi-storey buildings by means of design measures. This requires structural fire protection measures in the form of fire stops on each storey to limit the spread of fire from storey to storey through the wooden façade. Furthermore, the additional structural fire load in multi-storey timber buildings influenced the façade fires. It can lead to an increase in temperature, longer flame heights, a higher heat flux and fires that develop more quickly in time. Overall, the available results are not yet sufficient to conclusively evaluate this issue. For the fire protection evaluation of green façades, medium-scale fire tests showed that the main factor influencing the fire behaviour of plants is the moisture content. The plant species itself only plays a minor role with regard to fire behaviour. Moreover, the direct comparison between young and old plants as well as the comparison of a seasonal influence between summer and winter revealed no significant difference for vital, well-maintained plants. Regular care and maintenance are essential for fire-safe green facades. In a combination of wood and green façade, burning of the greenery did not cause ignition of the wood facade behind it in medium-scale fire tests

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Kurzfassung	III
Abstract	V
Liste der Veröffentlichungen	IX
Symbole und Abkürzungen	XI
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	3
1.3 Zielsetzung	6
1.4 Aufbau und Methodik	8
2 Grundlagen	9
2.1 Schutzziele Fassadenbrand.....	9
2.2 Internationale Prüfverfahren zur Beurteilung des Brandverhaltens von Fassaden	14
2.3 Mehrgeschossiger Holzbau.....	19
2.4 Holzfassaden.....	20
2.5 Begrünte Fassaden.....	23
3 Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse	27
3.1 Grundlagen zur Bewertung der Brandausbreitung entlang biogener Fassaden....	27
3.2 Holzfassaden aus brandschutztechnischer Sicht	32
3.2.1 Ergebnisse aus Paper II	32
3.2.2 Begrenzung der Tiefe des Lüftungsspalts.....	33
3.2.3 Anwendbarkeit von Holzschindelfassaden.....	35
3.2.4 Bewertung von belüfteten Holzfassaden.....	35
3.3 Brandeinwirkung auf die Fassade durch brennbare Oberflächen im Raum	39
3.3.1 Ergebnisse aus Paper III	39
3.3.2 Weitere Erkenntnisse aus aktuellen internationalen Studien.....	40

3.4	Begrünte Fassaden aus brandschutztechnischer Sicht	42
3.5	Begrünte Fassaden in Kombination mit Holzfassaden	45
3.5.1	Ziel der Untersuchung	45
3.5.2	Prüfstand und Brandlast	45
3.5.3	Messtechnik.....	46
3.5.4	Prüfkörper.....	47
3.5.5	Versuchsdurchführung.....	49
3.5.6	Ergebnisse	50
3.5.7	Diskussion	53
3.5.8	Fazit	57
4	Zusammenfassung und Ausblick	59
PAPER I	63
PAPER II	77
PAPER III	111
PAPER IV	151
PAPER V	167
Literaturverzeichnis	225
Abbildungsverzeichnis	239
Bildnachweis	247
Tabellenverzeichnis	249

Liste der Veröffentlichungen

PAPER I

Analyse der zulässigen Brandausbreitung über die Fassade

Engel, T. und Werther, N.

Veröffentlicht in Bautechnik 97, Heft 8, Seiten 558–565
doi: 10.1002/bate.202000007

Eingereicht 22. Januar 2020; angenommen und veröffentlicht am 4. Juni 2020

Die Publikation wurde zu 85 % eigenständig und federführend von Thomas Engel erarbeitet. Dr. Norman Werther beteiligte sich im Umfang von 15 % durch Korrektur und Überarbeitung der einzelnen Kapitel.

PAPER II

Structural Means for Fire-Safe Wooden Façade Design

Engel, T. und Werther, N.

Veröffentlicht in Fire Technology 59, Seiten 117–151
doi: 10.1007/s10694-021-01174-2

Eingereicht 31. März 2021; angenommen am 25. August 2021; veröffentlicht am 22. Oktober 2021; Ausgabe January 2023

Die Publikation wurde zu 85 % eigenständig und federführend von Thomas Engel erarbeitet. Dr. Norman Werther beteiligte sich im Umfang von 15 % durch Beschaffung weiterer Literatur, Korrektur und Überarbeitung der einzelnen Kapitel.

PAPER III

Impact of Mass Timber Compartment Fires on Façade Fire Exposure

Engel, T. und Werther, N.

Veröffentlicht in Fire Technology 59, Seiten 517–558
doi: 10.1007/s10694-022-01346-8

Eingereicht am 4. August 2022; angenommen am 8. November 2022; veröffentlicht am 13. Dezember 2022; Ausgabe March 2023

Die Publikation wurde zu 90 % eigenständig und federführend von Thomas Engel erarbeitet. Dr. Norman Werther beteiligte sich im Umfang von 10 % durch Korrektur und Überarbeitung der einzelnen Kapitel.

PAPER IV

Begrünte Fassaden aus brandschutztechnischer Sicht

Engel, T. und Noder, J.

Veröffentlicht in Bautechnik 97, Heft 8, Seiten 549–557
doi: 10.1002/bate.202000041

Eingereicht am 23. April 2020; angenommen und veröffentlicht am 26. Juni 2020

Die Publikation wurde zu 80 % eigenständig und federführend von Thomas Engel erarbeitet. Julia Noder-Schaab beteiligte sich im Umfang von 20 % durch Bereitstellung der Grundlagen und Zuarbeit für die einzelnen Kapitel.

PAPER V

Fire Safety for Green Façades

Part 1: Basics, state-of-the-art research and experimental investigation of plant flammability

Engel, T. und Werther, N.

Fire Technology

Eingereicht am 9. März 2023; angenommen am 7. Februar 2024

Die Publikation wurde zu 95 % eigenständig und federführend von Thomas Engel erarbeitet. Dr. Norman Werther beteiligte sich im Umfang von 5 % durch Korrektur und Überarbeitung der einzelnen Kapitel.

Symbole und Abkürzungen

Abkürzungen

CLT	Cross-laminated timber
D-A-CH	Deutschland, Österreich und Schweiz
DIBt	Deutsches Institut für Bautechnik
EPS	Expandiertes Polystyrol
FIGRA	Fire growth rate
GLT	Glued-laminated timber
GF	Gypsum fiberboard
GPF	Gypsum plasterboard type F
LTF	Light timber frame
MC	Moisture content
OSB	Oriented strand board
PT	Plate thermocouple
PVC	Poly-Vinyl-Chlorid
SBI	Single Burning Item
SMOGRA	Smoke growth rate
SVA	Sachverständigenausschuss
TC	Thermocouple
THR	Total heat release
TSP	Total smoke production

UV	Ultraviolettstrahlung
WDVS	Wärmedämmverbundsystem

Symbole

C	Wärmekapazität [J/m ² K]
ε	Emissionsgrad [-]
h	Konvektiver Wärmeübergangskoeffizient [W/m ² K]
K	Effektiver Wärmeübergangskoeffizient für Wärmeleitung [W/m ² K]
m	Masse [g]
ρ_0	Dichte von Luft 1,293 [kg/m ³]
p	Druck [Pa]
\dot{q}''	Wärmestromdichte [W/m ²]
S	Empfindlichkeit des Total Heat Flux Meters [V/(W/m ²)]
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante $5,67 \times 10^{-8}$ [W/(m ² K ⁴)]
T	Temperatur [K]
T ₀	Temperatur in K bei 0°C 273,15 [K]
T _∞	Umgebungstemperatur [K]
t _{ch}	Zeit bis zum Beginn des Abbrandes eines geschützten Bauteils [min]
t _f	Versagenszeit der Brandschutzbekleidung [min]
U	Ausgangsspannung [V]
V	Strömungsgeschwindigkeit [m/s]

Indizes

inc	einfallend (incident)
dry	trocken
wet	feucht
PT	Plattenthermoelement

1 Einleitung

1.1 Motivation

Die gesellschaftliche Herausforderung unserer Zeit ist die Bekämpfung des Klimawandels und damit einhergehend der Vollzug der Energiewende. Andere globale Herausforderungen wie Armut, Migration, demografischer Wandel, Korruption und Misswirtschaft (United Nations General Assembly 2012) treten oft in Wechselwirkung mit dem Klimawandel auf und verschärfen das Problem (Leichenko et al. 2014).

Nur durch ein Streben nach nachhaltiger Entwicklung kann dem Klimawandel entgegengewirkt werden. Nachhaltige Entwicklung erfordert ausgewogene wirtschaftliche, ökologische und soziale Ziele, die im Gleichgewicht zueinander stehen. (Vollenbroek 2002).

Überlegungen zu einer nachhaltigen Entwicklung führen schnell auf den Bausektor. Das Bauen und der Betrieb von Infrastruktur sind in Industrie- und Entwicklungsländern ein weltweit maßgebender und stetig aufstrebender Sektor. Seit der Unterzeichnung des Pariser Abkommens im Jahr 2015 haben die CO₂-Emissionen aus dem Bau- und Gebäudebetriebssektor in den Jahren vor der COVID-19-Pandemie einen Höchststand erreicht. Im Jahr 2020 fielen die Emissionen pandemiebedingt zwar wieder auf das Niveau von 2007. Im Jahr 2021 stiegen sie in den meisten großen Volkswirtschaften jedoch wieder auf das Vorpandemieniveau. Gleichzeitig nahm die energieintensive Nutzung von Gebäuden zu, da Arbeitsplätze wieder geöffnet wurden, aber die hybride Arbeitsweise beibehalten wurde. Daher stieg der Energiebedarf von Gebäuden bis 2021 um etwa 4 % auf 135 EJ; dies ist der größte Anstieg in den letzten 10 Jahren. Die CO₂-Emissionen aus dem Gebäudebetrieb haben mit rund 10 Gt CO₂ ein Allzeithoch erreicht, was einem Anstieg von rund 5 % gegenüber 2020 und 2 % gegenüber dem bisherigen Höchststand im Jahr 2019 entspricht. Bezieht man die geschätzten CO₂-Emissionen aus der Herstellung von Baumaterialien von etwa 3,6 Gt CO₂ (z. B. Beton, Stahl, Aluminium, Glas und Ziegel) mit ein, machten Gebäude rund 37 % der globalen CO₂-Emissionen im Jahr 2021 aus. Die prozentuale Zunahme des Baubetriebs (auf Basis der Bauinvestitionen und der bebauten Fläche) seit 2015 zeigt Abbildung 1.1. (United Nations Environment Programme 2021, 2022)

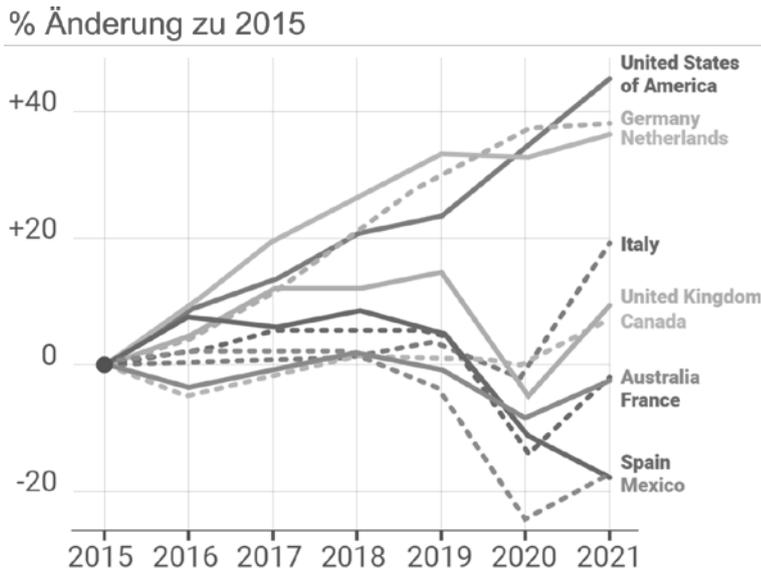


Abbildung 1.1 Prozentuale Änderung des Baubetriebes (auf Basis der Bauinvestitionen und der bebauten Fläche) gegenüber 2015 basierend auf (United Nations Environment Programme 2022)

Das industrielle Baugewerbe beschäftigte im Jahr 2020 rund 24,9 Millionen Menschen in der Europäischen Union und erwirtschaftet eine Wertschöpfung von 1.158 Mrd. EUR, was 9,6 % des EU-Gesamtwerts entspricht. In Bezug auf Beschäftigung und Wertschöpfung ist das Baugewerbe somit der zweitwichtigste Wirtschaftszweig nach dem Einzelhandel (Beschäftigung 29,8 Millionen, Wertschöpfung 11,5 %). (European Commission 2021)

Neben dem Bausektor spielt auch der Umgang mit der Urbanisierung eine wichtige Rolle für eine nachhaltige Entwicklung. Obwohl Städte nur 2 % der globalen Landfläche einnehmen, lebt mehr als die Hälfte der Weltbevölkerung in Städten. Drei Viertel der europäischen Bevölkerung leben in Ballungsräumen und dieser Anteil wird voraussichtlich noch stark zunehmen (United Nations Department of Economic and Social Affairs 2019). Der daraus resultierende Bedarf an einer nachhaltigen Stadtentwicklung erfordert ein ausreichendes Angebot an Grün- und Erholungsflächen. Der zunehmende Mangel an bezahlbarem Wohnraum (Kálmán 2022) und die damit einhergehende Nachverdichtung stehen jedoch der Schaffung neuer öffentlicher Grünflächen oft entgegen und fordern die Stadtplanung entsprechend heraus.

Der Wärmeinsel-Effekt (Urban heat island) erschwert eine nachhaltige Urbanisierung weiter: Die Speicherung von Sonnenwärme in der Bausubstanz und Bodenoberfläche, die Behinderung und Wiederabsorption der nächtlichen langwelligen Strahlung durch Gebäude, die den Himmel verdecken, sowie die Wärmeabstrahlung durch menschliche Aktivitäten wie Verkehr, Heizung und Klimaanlage sorgen dafür, dass städtische Insel mit einem deutlich wärmeren Klima aufwarten als die umliegenden ländlichen Gebiete. Der Effekt ist in klaren, windstillen Nächten am stärksten ausgeprägt. (Parker 2010)

Eine Möglichkeit für eine nachhaltige Entwicklung des Baugewerbes ist der Holzbau. Holz ist aktuell der wichtigste nachwachsende Rohstoff und kann für die notwendige Dekarbonisierung im Gebäudebereich eine entscheidende Rolle spielen. Die in einem Kubikmeter verbautem Holz gespeicherte Menge an Kohlenstoff entspricht einer Senke von ca. einer Tonne CO₂ (Hennenberg et al. 2019).

Letztlich versiegelt und verdichtet aber auch der Holzbau den urbanen Raum. Es ist daher notwendig, die vorhandenen und entstehenden Gebäudeflächen für eine nachhaltige Nutzung heranzuziehen. Hierbei ist die Begrünung der zahlreichen horizontalen und vertikalen Flächen eine Strategie. Sie verbessert beispielsweise die Luftqualität, verringert den Wärmeinseleffekt, verbessert die thermische Leistung des Gebäudes, reduziert Lärm durch Absorption und stellt zusätzlichen Sauerstoff bereit. (Alexandri et al. 2008; Perini et al. 2011)

1.2 Problemstellung

Der Baustoff Holz erfreut sich aufgrund der ökologischen Vorteile zunehmender Beliebtheit. Biogene Baustoffe wie Holz sind aber brennbare Baustoffe. Daher stellt sich einhergehend mit dem Anstieg des mehrgeschossigen Holzbaus die Frage nach dessen Einfluss auf die Brand-sicherheit entsprechender Konstruktionen. Mehreren Studien zufolge können freiliegende Holzoberflächen oder teilweise geschützte Holzbauteile dazu führen, dass sich ein Brand schneller entwickelt, länger andauert und einen stärkeren Einfluss auf die Brandbelastung an der Fassade hat als bei nichtbrennbaren Bauteilen üblich (Friquin et al. 2019; Reitan et al. 2019). Dies führt zu der Hypothese, dass mehr exponiertes Holz in Form struktureller Brandlast im Gebäude zu kritischeren Einwirkungen auf die Fassade führen kann (Engel et al. 2022; Sjöström et al. 2023). Diese Hypothese gilt es weiter zu untersuchen.

Unabhängig vom Baustoff Holz erfolgt die signifikante Brandausbreitung am häufigsten über die Fassade; dies zeigt, wie wichtig dieser Aspekt ist (Brandon et al. 2018; Eisl 2017). Auch die Statistiken der deutschen Feuerwehren belegen dies (Göldner 2021; Maiworm et al. 2021). Wie katastrophal die Brandausbreitung über die Fassade von Geschoss zu Geschoss sein kann, zeigen Beispiele aus der jüngsten Vergangenheit wie der Brand des Grenfell Towers 2017 in London und der Brand des Torre dei Moro in Mailand 2021, vgl. Abbildung 1.2.



Abbildung 1.2 Brand Grenfell Tower 2017 links (Quelle: Natalie Oxford) und Torre dei Moro in Mailand nach Brand 2021 rechts (Quelle: Cesare Ferrari)

Die auf Vorschriften und Tests basierende Methodik für die Bewertung des Brandverhaltens von Fassaden variiert von Land zu Land erheblich (White et al. 2015). (Bonner et al. 2018) und (Yuen et al. 2021) stellen auf Basis von Veröffentlichungen und Medienberichten fest, dass sich die Gesamtzahl von Fassadenbränden an großen mehrgeschossigen Gebäuden weltweit in den letzten 30 Jahren versiebenfacht hat bzw. um 600 % gestiegen ist. Abbildung

1.3 illustriert eine statistische Erhebung von Fassadenbränden auf Basis von Pressemitteilungen aus den Jahren 1990 bis 2019.

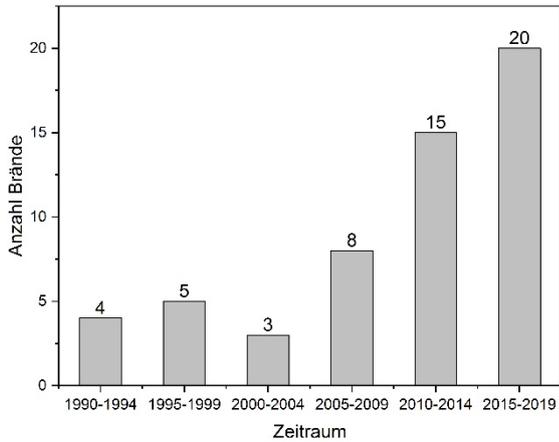


Abbildung 1.3 Anzahl von Fassadenbränden weltweit, die mediale Aufmerksamkeit erfuhren; basierend auf den Daten von (Bonner et al. 2020)

Auch (Spearpoint et al. 2019b) werteten Fassadenbrände weltweit auf Basis von Presse- und Untersuchungsberichten aus. Aus dieser Auswertung ergibt sich die in Abbildung 1.4 dargestellte Verteilung der Fassadenbrände auf die einzelnen Länder. Der Beobachtungszeitraum liegt zwischen den Jahren 1990 und 2018. Deutlich wird dabei, dass Fassadenbrände ein globales Thema sind und auf allen Kontinenten auftreten. Dies bestätigt auch Tabelle 1.1, die nennenswerte Fassadenbrände der letzten drei Jahrzehnte nebst der zugehörigen Quellen und den Personenschäden auflistet.

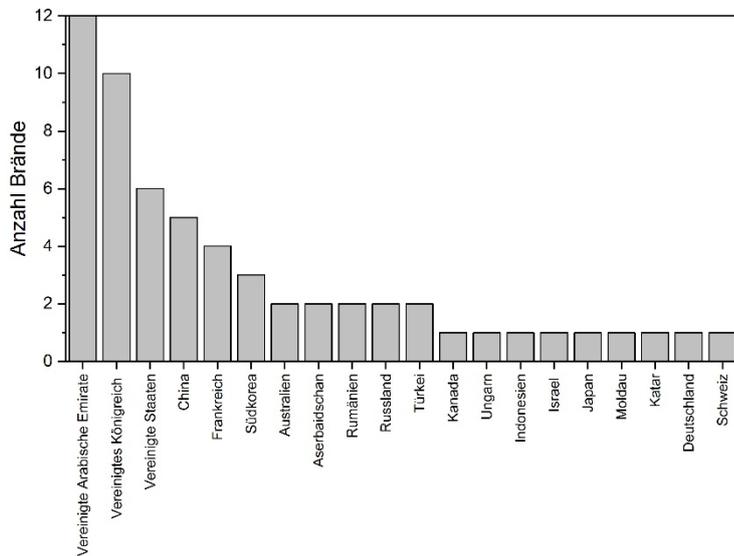


Abbildung 1.4 Verteilung der Fassadenbrände auf die Länder basierend auf (Spearpoint et al. 2019b)

Tabelle 1.1 Liste bekannter Fassadenbrände der letzten drei Jahrzehnte mit Quelle und Personenschäden

Gebäude bzw. Name	Ort, Land	Jahr	Verletzte, Tode	Quelle
393 Kennedy Street	Winnipeg, CA	1990	Keine Verletzten	(Oleszkiewicz 1990b)
Knowsley Heights	Liverpool, UK	1991	Keine Schwerverletzten	(Morgan et al. 1992)
Sun Valley	Hereford, UK	1993	2 Todesopfer	(International Fire Consultants)
Wohnhaus	München, DE	1996	Unklare Anzahl an Verletzten	(Wade et al. 2000)
Garnock Court	Irvine, UK	1999	1 Todesopfer, 5 Verletzte	(The Irvine Fire 1999)
Tip Top Bakery	Fairfield, AU	2002	Keine Verletzten	(NSW Fire Brigades 2002)
Parque Central	Caracas, VE	2004	>25 Verletzte	(BBC 2004)
Windsor Tower	Madrid, ES	2005	7 Verletzte	(Fletcher et al. 2006)
Treskowstraße Pankow	Berlin, DE	2005	2 Todesopfer, 3 Verletzte	(Broemme 2005)
The Water Club	Atlantic City, US	2007	Keine Verletzten (im Bau)	(Foley 2010)
MGM Monte Carlo Hotel	Las Vegas, US	2008	13 Verletzte	(Beitel et al. 2008; Duval 2008)
Lakanal House	London, GB	2009	6 Todesopfer	(Barling)
Miskolc	Miskolc, HU	2009	3 Todesopfer	(Hajpál 2012)
Television Cultural Centre	Peking, CN	2009	1 Todesopfer, 7 Verletzte	(China Daily 2009; Peng et al. 2013)
Dreieichstraße	Frankfurt a. M., DE	2010	21 Verletzte	(Feuerwehr Frankfurt am Main 2022)
Wooshin Golden Suites	Marine City, KR	2010	5 Verletzte	(Kim et al. 2011)
Shanghai Apartment	Shanghai, CN	2010	58 Todesopfer, 71 Verletzte	(Peng et al. 2013)
Wanxin Complex	Shenyang, CN	2011	Keine Angaben über Verletzte	(Peng et al. 2013)
Tecom Building	Dubai, AE	2012	2 Verletzte	(White et al. 2015)
Tamweel Tower	Dubai, AE	2012	Keine Schwerverletzten	(White et al. 2015)
Mermoz Tower	Roubaix, FR	2012	1 Todesopfer, 6 Verletzte	(White et al. 2015; Youde 2017)
Lacrosse Building	Melbourne, AU	2014	Keine Schwerverletzten	(Badrock 2016; Genco 2015)
The Torch	Dubai, AE	2015	Unklare Anzahl an Verletzten	(Almarzooqi et al. 2022)
Azadlig Avenue	Baku, AZ	2015	15 Todesopfer, 63 Verletzte	(The Institution of Fire Engineers 2023)
The Address	Dubai, AE	2016	15 Verletzte	(Moukhallati 2016)
Grenfall Tower	London, GB	2017	72 Todesopfer, >70 Verletzte	(Moore-Bick 2019c, 2019d, 2019a, 2019b)
The Torch	Dubai, AE	2017	Unklare Anzahl an Verletzten	(BBC 2017)
Yuansheng International	Zhengzhou, CN	2018	Unklare Anzahl an Verletzten	(Reuters 2018b)
Taksim Ilk Yardim	Istanbul, TR	2018	Keine Verletzten	(Reuters 2018a)
Neo 200 Building	Melbourne, AU	2019	1 Verletzter	(AMBA 2021; Koob 2019)
Bródnie	Warschau, PL	2019	Keine Verletzten	(TVN 2019)
Student Block	Bolton, GB	2019	2 Verletzte	(BBC 2019)
Abbc Tower	Sharjah, AE	2020	12 Verletzte	(BBC 2020)
Business Center	Ankara, TR	2020	Unklare Anzahl an Verletzten	(Sabah 2020)
Hortaleza	Madrid, ES	2020	Keine Verletzten	(Kidd 2020)
Ulsan	Ulsan, KR	2020	88 Verletzte	(Yeung et al. 2020)
Torre dei Moro	Mailand, IT	2021	>20 Verletzte	(Peacock 2021b)
Marina Diamond 2	Dubai, AE	2021	Keine Verletzten	(Peacock 2021a)
Relay Building	London, GB	2022	Keine Schwerverletzten	(Peacock 2022c)
Meridian Point	London, GB	2022	Keine Verletzten	(Peacock 2022b)
Telecom Tower	Changsha, CN	2022	Keine Schwerverletzten	(Peacock 2022a; Stambaugh 2022)
8 Boulevard Walk	Dubai, AE	2022	Keine Verletzten	(Reynolds et al. 2022)

Fassadenbrandschutz ist folglich ein Schlüsselthema für die Brandsicherheit von Gebäuden weltweit. Umso wichtiger ist es, zu untersuchen, welchen Einfluss der Holzbau in Form von brennbarer struktureller Brandlast aus der Konstruktion der mehrgeschossigen Gebäude auf die Fassade hat. Davon unabhängig ist auch der Einfluss zu untersuchen, den der Einsatz brennbarer Holz- bzw. begrünter Fassaden auf die Brandweiterleitung entlang der Fassade hat. Nachdem sich ein mehrgeschossiges Holzgebäude auch mit einer Holz- bzw. begrünten Fassade ausführen lässt, ist zudem die Wechselwirkung beider Faktoren von Relevanz.

1.3 Zielsetzung

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, das Brandverhalten von Holzfassaden und begrünten Fassaden zu untersuchen und aus den Ergebnissen Vorschläge für brandschutztechnisch sichere Konstruktionen abzuleiten.

Ein weiteres Ziel ist es, den Einfluss des mehrgeschossigen Holzbaus mit teilweise ungeschützter oder nur initial geschützter struktureller Brandlast auf den Fassadenbrand zu untersuchen und Empfehlungen für einen brandschutztechnisch sicheren Umgang mit dieser Thematik abzuleiten.

Naheliegend ist eine Kombination der drei Themen in Form eines mehrgeschossigen Holzgebäudes mit Holzfassade und vorgelagerter Fassadenbegrünung, weshalb die Identifikation von Wechselwirkungen ein zusätzliches Ziel dieser Arbeit ist.



Holzfassade



Begrünte Fassade



Holzbau - Einwirkung
auf die Fassade

- Kombination -



Holzbau + Holz- + begrünte Fassade

Abbildung 1.5 Darstellung der drei Forschungsgebiete und der sich daraus ergebenden Kombination

Die übergeordneten Forschungsfragen sind:

HOLZFASSADEN

- Wie lässt sich die vertikale und horizontale Brandausbreitung an der Fassade auch über längere Zeiträume begrenzen, behindern oder unterbinden?
- Welche zeitliche Verzögerung der vertikalen und horizontalen Brandausbreitung tritt durch Brandsperren auf?
- Stellt sich nach dem Löschen des Primärbrandes ein Selbstverlöschen der Holzfassade ein?
- Welche Maßnahmen sind für die Löschbarkeit von typischen Holzfassaden durch die Feuerwehr notwendig?

BEGRÜNTE FASSADEN

- Welche Wärmefreisetzung erfolgt durch den Brand der begrünten Fassade und wie verhält sich diese im Vergleich zu anderen typischen brennbaren Baustoffen?
- Stellt sich nach dem Löschen des Primärbrandes ein Selbstverlöschen der begrünten Fassade ein?
- Inwieweit kommt es zu einer vertikalen oder horizontalen Brandausbreitung?
- Welchen Einfluss haben die Pflanzenart, das Vorhandensein ätherischer Öle oder das Alter der Pflanzen auf das Brandverhalten?
- Welche Rolle spielt der Feuchtigkeitsgehalt der Pflanze für das Brandverhalten?

MEHRGESCHOSSIGER HOLZBAU

- Welchen Einfluss haben freiliegende oder nur anfangs geschützte Holzoberflächen auf die Branddynamik im Raum und dadurch bedingt das zeitliche Auftreten einer Einwirkung auf die Fassade?
- Wie beeinflusst die zusätzliche strukturelle Brandlast aus der Konstruktion die Brandeinwirkung auf die Fassade und auf die Geschosse oberhalb des Raumbrandes?

KOMBINATION DER DREI THEMEN

- Welche Wechselwirkungen treten bei Gebäuden auf, bei denen mindestens zwei der drei Punkte – Holzfassade, begrünte Fassade und mehrgeschossiger Holzbau – in Kombination vorliegen?
- Welche konstruktiven Prinzipien sind bei einer Kombination aus brandschutztechnischer Sicht notwendig?

1.4 Aufbau und Methodik

KAPITEL 1 beschreibt den steigenden Bedarf an nachhaltigem und ökologischem Bauen im Zusammenhang mit einer städtischen Entwicklung. Parallel werden die brandschutztechnischen Problemstellungen bei mehrgeschossigen Gebäuden beleuchtet und die Forschungsfrage auf Basis dieser zwei Themen konkretisiert.

KAPITEL 2 geht auf die grundlegenden Schutzziele bei Fassadenbränden ein und vergleicht die unterschiedlichen international angewendeten Fassadenbrandprüfverfahren. Zudem liefert es die wichtigsten Grundlagen für die drei Schwerpunkte mehrgeschossiger Holzbau, Holzfassaden und begrünte Fassaden.

KAPITEL 3 fasst die Ergebnisse der PAPER I bis PAPER V zusammen und präsentiert darüber hinausgehende Erkenntnisse. Erörtert werden auch die Ergebnisse einer weiteren Brandversuchsreihe, die das Zusammenspiel von Holz- und begrünten Fassaden im Brandfall untersucht. Zunächst werden die notwendigen Konzepte für eine zielgerichtete Bewertung der Brandausbreitung über biogene Fassaden vorgestellt. Diese Festlegungen sind die Basis für die weitere Bewertung der Fassadenbrandversuche mit nachhaltigen, organischen und brennbaren Baustoffen bzw. Materialien. Dabei werden auch die Ergebnisse aus PAPER I aufbereitet. PAPER I stellt die aktuellen Ausführungen zur Konkretisierungen des Schutzziels „Begrenzung der Brandausbreitung über die Fassade“ für den Anwendungsfall in Deutschland dar.

PAPER II stellt die Ergebnisse von fünf großmaßstäblichen Fassadenbrandversuchen an Holzfassaden vor. Untersucht wurden dabei die unterschiedlichen Typen von Holzfassaden in Verbindung mit jeweils darauf ausgerichteten Konstruktionsprinzipien zur Begrenzung der Brandausbreitung. Weitere Erkenntnisse zu den Themen Größe des Lüftungsspalts, Holzschindel-fassade und belüftete Fassade ergänzen die Ergebnisse aus PAPER II.

PAPER III beschreibt den Einfluss struktureller Brandlasten auf die Brandeinwirkung an der Fassade auf Basis von fünf Raumbrandversuchen im Realmaßstab. Die fünf Realbrandversuche erfolgten mit jeweils unterschiedlichen Mengen an freiliegenden bzw. anfänglich geschützten Holzoberflächen. Weitere aktuelle Erkenntnisse aus Realbrandversuchen internationaler Forschungsgruppen ergänzen diese Ergebnisse.

PAPER IV und PAPER V präsentieren die aktuellen Grundlagen und den Stand der Technik zum Brandverhalten von begrünten Fassaden auf Basis internationaler Literatur. Des Weiteren liefert PAPER IV erste Erkenntnisse zur Brandausbreitung entlang begrünter Fassaden auf Basis mittelmaßstäblicher Fassadenbrandversuche. Ebenfalls auf Basis mittelmaßstäblicher Fassadenbrandversuche ergänzt PAPER V diese Erkenntnisse um Ergebnisse zu entscheidenden Einflussgrößen, die das Brandverhalten von Pflanzen für begrünte Fassaden definieren.

KAPITEL 4 liefert eine abschließende Analyse des Zusammenwirkens von mehrgeschossigen Holzbauten mit Holz- und/oder begrünten Fassaden und identifiziert den künftigen Forschungs- und Entwicklungsbedarf.

2 Grundlagen

2.1 Schutzziele Fassadenbrand

Weltweit treten regelmäßig Fassadenbrände in Verbindung mit einer großflächigen Brandausbreitung auf, vgl. Abschnitt 1.2. Die Ursachen für diese Fassadenbrände sind vielfältig. Abbildung 2.1 verdeutlicht die Auswertungen von (Spearpoint et al. 2019b; Spearpoint et al. 2019a) zur Brandursache von weltweit aufgetretenen Fassadenbränden in hohen mehrgeschossigen Gebäuden in Verbindung mit dem jeweiligen Primärbrandgeschoss.

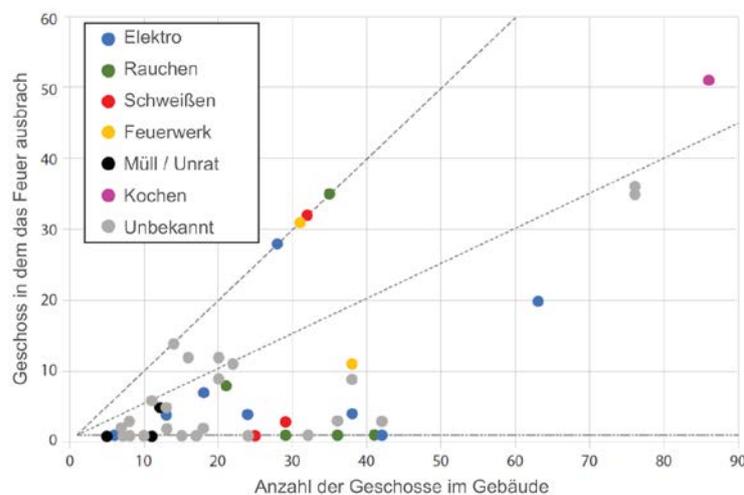


Abbildung 2.1 Brandursache und Geschoss, in dem das Feuer vermutlich ausgebrochen ist, im Verhältnis zur Anzahl der Geschosse des Gebäudes. Die maximal mögliche Geschossanzahl, die halbe Geschossanzahl und das erste Geschoss des Gebäudes sind durch die gestrichelten Linien gekennzeichnet. Basierend auf (Spearpoint et al. 2019b; Spearpoint et al. 2019a)

Abbildung 2.1 zufolge haben Fassadenbrände unterschiedliche Ursachen. Die Betrachtung der Brandausbreitung entlang einer Fassade und die Schaffung von vorbeugenden Maßnahmen sind folglich vor allem bei mehrgeschossigen Gebäuden eine wichtige Grundlage für einen brandschutztechnisch sicheren Betrieb.

Die Betrachtung der Brandausbreitung an Fassaden beruht auf den in Abbildung 2.2 dargestellten drei Einwirkungsszenarien:

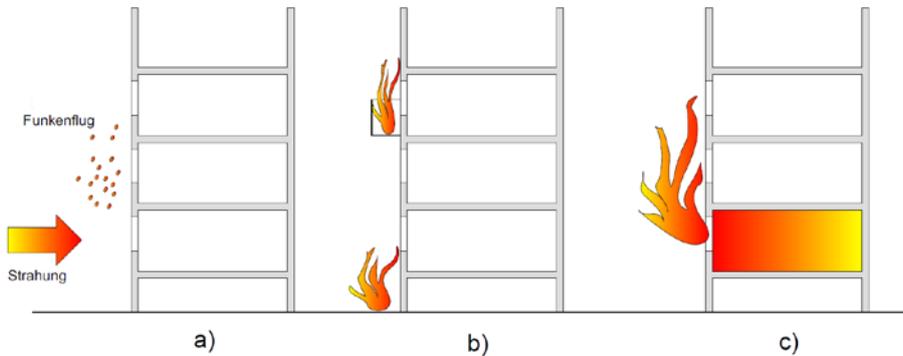


Abbildung 2.2 Brandszenarien a) Einwirkung von außen (z. B. Feuerwerk, Brand eines benachbarten Gebäudes) b) Brand am Gebäude c) Brand im Gebäude

Hierbei sind die Szenarien b) „Brand am Gebäude“ und c) „Brand im Gebäude“ die häufigsten und kritischsten Brandfälle für eine Brandeinwirkung an der Fassade (Eisl 2017; Göldner 2021; Hofmann et al. 2018; Kaudelka et al. 2015; Kaudelka et al. 2017; Kotthoff 2000; Mannl 2022).

Beim Szenario „Brand im Gebäude“ ist, belegt durch Untersuchungen von Realbrandereignissen und Brandversuchen, mit einer durchschnittlichen Flammenlänge zwischen 3,0 m und 4,5 m, die aus der Öffnung schlägt, zu rechnen. Flammenspitzen können bis zu 6 m betragen (Kotthoff 2000). Abbildung 2.3 illustriert die in PAPER III ermittelte Flammenlänge über der Öffnung für ein typisches Gebäude aus nichtbrennbaren Baustoffen (z. B. Stahlbeton, Mauerwerk) in einem Raum mit den Abmessungen 4,5 m x 4,5 m x 2,4 m in Verbindung mit einer Öffnung 2,4 m x 2,2 m (Öffnungsfaktor 0,094 m^{1/2}) und einer hohen Brandlastdichte von 1 085 MJ/m² (ca. 74 kg/m² Holz, 1,5 Tonnen Holz als mobile Brandlast). Die Annahmen aus der Auswertung von Realbrandereignissen lassen sich damit bestätigen.

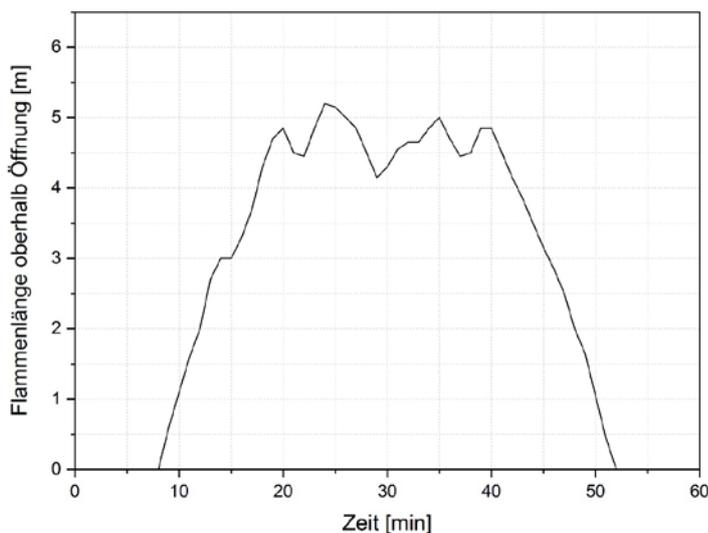


Abbildung 2.3 Flammenlängen bei Versuch V0 (nichtbrennbar) der TIMpuls-Versuchsreihe

Bei den Lehrter Brandversuchen (Bechtold 1977; Bechtold et al. 1978) ergaben sich für Räume mit den Abmessungen ca. 3,60 m x 5,30 m x 2,5 m bei einer Brandlast von 30 kg/m² (ca. 440 MJ/m²) und Fensteröffnungen von ca. 1,80 m x 1,50 m Flammenlängen von etwa 1,50 bis 1,80 m über dem Fenstersturz. Die Flammenspitzen über dem Fenstersturz fielen bei beiden Versuchen jedoch sehr unterschiedlich aus. Grundsätzlich ist dabei zu beachten, dass eine Veränderung der Öffnungsgeometrie zu stark abweichenden Ergebnissen führt. So führt beispielsweise eine reduzierte Öffnungsbreite zu größeren Flammenlängen oberhalb des Sturzes (Bechtold 1977).

Ergänzend dazu zeigen heutige Erkenntnisse und Erfahrungswerte, dass das Szenario „Brand am Gebäude“ für eine brandschutztechnisch sichere Planung maßgebend sein kann (Hofmann et al. 2018). Eine Auswertung einer Sammlung von Brandereignissen an Wärmedämmverbundsystemen (WDVS) aus expandiertem Polystyrol (EPS) (Feuerwehr Frankfurt am Main 2022) ergab, dass Brandlasten vor dem Gebäude, insbesondere Abfallbehälter, den häufigsten Ort der Brandentstehung darstellten (Hofmann et al. 2018; Kaudelka et al. 2015; Kaudelka et al. 2017). Bei dem Brand eines vollen 1 100 l Müllcontainers direkt an einer Außenwand ist beispielsweise mit einer Flammenlänge von ca. 6 m (ab Boden) zu rechnen (Kaudelka et al. 2017). Beim Brand eines einzelnen üblichen Personenkraftwagens mit Stahlblechdach ist mit einer Flammenlänge von ca. 4 m (ab Boden) zu rechnen (Li et al. 2017; Park et al. 2019). Sofern der Personenkraftwagen nahe der Außenwand abgestellt ist, ist zusätzlich der Wandeffekt zu berücksichtigen, der die Flammenlänge erhöht (Poreh et al. 2000; Zehfuß et al. 2016).

In allen Fällen kann Wind die Annahmen zur Flammenlänge stark beeinflussen und verändern (Abu-Zidan et al. 2022; Bechtold et al. 1978; Hu et al. 2017). Bei den Lehrter Brandversuchen ergaben sich beispielsweise bei nahezu rechtwinklig zur Gebäudeseite auftretenden Windverhältnissen Flammenlängen von bis zu 7 m; sie wuchsen damit im Vergleich zu windstillen Verhältnissen auf mehr als das Doppelte ihres Wertes an (Bechtold et al. 1978). Auch eine Quertlüftung des Brandraumes kann die Flammenlängen stark beeinflussen (Bechtold et al. 1978), wie Abbildung 2.4 darstellt.

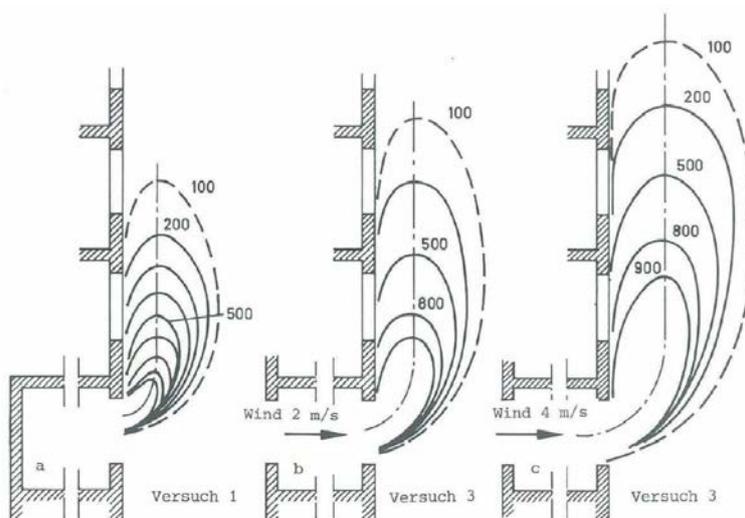


Abbildung 2.4 Isothermenbilder des Temperaturfeldes ohne und mit Windeinfluss (der Umriss der Flammen entspricht etwa den 500°C – Isothermen) (Bechtold et al. 1978)

Ein gleichzeitiges Auftreten von Flammen aus nahegelegenen Fenstern, wie zum Beispiel der Brand aus zwei Fenstern des gleichen Wohnzimmers im geringen Abstand, führt ebenfalls zu größeren Flammenlängen an der Fassade (Bechtold et al. 1978).

Auf Basis dieser Erkenntnisse und unter Berücksichtigung weiterer beispielhafter Ergebnisse aus Realbrandversuchen (Haksever et al. 1988; Heidari 2021; Rackauskaite et al. 2022) wird deutlich, dass sich die Flammenlänge eines Brandes im oder am Gebäude nicht allgemeingültig beschreiben lässt. Die maßgebenden Faktoren für die sich einstellende Flammenlänge an der Fassade bei Bränden im Gebäude sind die Brandraumgeometrie, die Öffnungsgrößen und deren Anordnung (Öffnungsfaktor) sowie die Brandlast (Law 1978; Law et al. 1989). Bei Bränden am Gebäude ergibt sich die Flammenlänge aus den maßgebenden Faktoren Fassadengeometrie, Brandlast und dem Abstand der Brandlast zur Fassade (Poreh et al. 2000; Zehfuß et al. 2016). Effekte wie Wind können die Flammenlängen stark beeinflussen.

Die meisten Industriestaaten stellen brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Baustoffe, um grundlegende Schutzziele zu erreichen, die das gesellschaftlich akzeptierte Sicherheitsniveau darstellen (Steinbauer 2019). So ist es üblich, eine Brandausbreitung im Gebäude entweder durch raumabschließende Bauteile wie Wände und Decken oder durch anlagentechnische Maßnahmen wie Löschanlagen zu begrenzen (Schwaighofer 2020; Steinbauer 2019). Der Brand außen am Gebäude über die Fassade ist indes bei typischen mehrgeschossigen Gebäuden wesentlich schwerer zu begrenzen. Gebäude verfügen üblicherweise über Öffnungen wie Fenster, die im täglichen Betrieb geöffnet werden können und folglich keine raumabschließenden Bauteile darstellen (Steinbauer 2019). Außerdem lässt sich die rein aus dem Primärbrand einstellende Flammenlänge an einer Fassade in den meisten Fällen nicht über Anforderungen an Bauteile und Baustoffe wirkungsvoll beeinflussen. Die Größe von Nutzungseinheiten ist zwar begrenzt; die tatsächliche vorhandene Brandlast in der Einheit ergibt sich aber u. a. aus der Nutzung und dem Nutzerverhalten und nicht rein aus der Größe der Einheit (Bechtold et al. 1978; Berger 2018; Dundar et al. 2023; Fettig et al. 2013; Hofmann-Böllinghaus et al. 2017). So kann beispielsweise, wie in PAPER III beschrieben, ein Brand in einem Ein-Zimmer-Apartment mit hoher Brandlast zu einer starken Brandeinwirkung auf die Fassade führen. Die meisten Industriestaaten unterscheiden zwischen einem Hochhaus und einem mehrgeschossigen Gebäude (Schwaighofer 2020; Steinbauer 2019). In Deutschland wird in den jeweiligen landesspezifischen Bauordnungen ein Gebäude als Hochhaus definiert, wenn die Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist, im Mittel mehr als 22 m über der Geländeoberfläche liegt (MBO, vom November 2002). Bei Hochhäusern wirken in der Regel auskragende feuerbeständige Platten oder geschlossene Brüstungen in Verbindung mit der generellen Forderung nach nichtbrennbaren Baustoffen bzw. die Anordnung einer automatischen Löschanlage der Brandausbreitung entlang der Fassade entgegen (MHHR, vom April 2008; Schwaighofer 2020). Auskragende feuerbeständige Platten, die jeweils in der Deckenebene eines jeden Geschosses im Außenbereich angeordnet werden und i. d. R. ca. 1 m weit auskragen, sind ein adäquates Mittel, um das Geschoss darüber vor der Primärflamme, die durch die Auskragung abgeleitet wird, zu schützen und eine Brandausbreitung oberhalb des Brandgeschosses zu unterbinden (Bechtold 1977; Harrison et al. 2010; Mao et al. 2022; Morgado et al. 2015; MHHR, vom April 2008; Oleszkiewicz 1990a, 1991; Yung et al. 1988). Bei Gebäuden unterhalb der Hochhausgrenze ist dies jedoch nicht üblich. Siehe hierzu auch Abschnitt 3.1.

Die Flammenlänge des Primärbrandes an der Fassade ist unter Berücksichtigung der genannten Punkte für mehrgeschossige Gebäude, wie in PAPER I beschrieben, zu akzeptieren; sie lässt sich nicht über rechtliche Vorgaben wirkungsvoll begrenzen.

Maßgebend ist in diesen Fällen, dass die Brandausbreitung oberhalb der Primärflamme begrenzt bleibt und sich der Brand nicht unkontrolliert von Geschoss zu Geschoss ausbreitet. Maßnahmen gegen eine unkontrollierte Brandausbreitung sind robuste Außenwände, die Forderung nach mindestens schwerentflammaren Außenwandbekleidungen und konstruktive Maßnahmen bei Fassaden mit geschossübergreifenden Hohl- oder Lufträumen wie hinterlüftete oder Doppelfassaden. (MBO, vom November 2002; Steinbauer 2019)

Wie PAPER I ausführt, ist daraus zu schließen, dass zwar ein geschossweiser Brandüberschlag bauordnungsrechtlich toleriert wird, eine rasche unkontrollierte Brandausbreitung an der Fassade beispielsweise durch normalentflammbare Baustoffe oder durch einen Hinterlüftungsspalt für mehrgeschossige Gebäude jedoch unzulässig ist. Konkret bedeutet das: Das Schutzziel soll eine rasche unkontrollierte Brandausbreitung durch Baustoff oder Konstruktion in mehrere Geschosse oberhalb und unterhalb der Primärflamme der Brandausbruchstelle verhindern. Diese Festlegung lässt sich als internationaler Standard definieren (Steinbauer 2019).

Um die Begrifflichkeiten „unkontrolliert“ und „rasch“ weiter zu quantifizieren, ist es notwendig, die letzte Einwirkungsgröße – die Feuerwehr – zu untersuchen. Obwohl, wie beschrieben, eine Brandausbreitung von Geschoss zu Geschoss grundsätzlich toleriert wird, muss der Brand selber aber für die Einsatzkräfte der Feuerwehr beherrschbar bleiben, um die Rettung von Personen und wirksame Löscharbeiten zu ermöglichen (European Commission 1994). Ob ein Brand beherrschbar ist oder nicht, hängt von der Personalstärke und -verfügbarkeit, der Eintreffzeit, dem Schadenausmaß, den vorhanden technischen Gerätschaften der Feuerwehr und der anlagentechnischen Gebäudeausstattung ab. Diese Gegebenheiten sind also stark von den nationalen bzw. lokalen Randbedingungen abhängig (Porer 2019).

Maßgebendes Szenario zur Bedarfsplanung von Feuerwehren in deutschen Städten ist der sog. „kritische Wohnungsbrand“ – ein Wohnungsbrand im Obergeschoss eines mehrgeschossigen Gebäudes mit Flammeneinwirkung auf die Fassade im nächsten Geschoss und mehrerer zu rettender Personen aufgrund von verrauchten Rettungswegen (Stein 2015). Diese Bedarfsplanung deckt keinen Brand ab, der sich bei Eintreffen der Feuerwehr bereits in mehreren Geschossen ausgebreitet und dort die Dimensionen eines Entstehungsbrands überschritten hat. Auch die technischen Spezifikationen anlagentechnischer Brandschutzmaßnahmen begrenzen eine mögliche Brandausbreitung. So verfügen trockene oder nasse Steigleitungen, wie sie PAPER I und PAPER III beschreiben, nur über eine begrenzte parallele Abgabekapazität in den Geschossen (DIN 14462:2012-09; NFPA 14 2016; Wohlschläger 2019).

Fazit: Die Größe der Flamme des Primärbrandes muss akzeptiert werden. Das Schutzziel zur Begrenzung der Brandausbreitung entlang der Fassade hängt folglich direkt von drei Faktoren ab: I) Brennbarkeit der Fassade, II) Konstruktive Maßnahmen zur Unterbindung der Brandausbreitung und III) Leistungsfähigkeit der Feuerwehr. Zudem stehen diese drei Faktoren in einer direkten Wechselwirkung.

2.2 Internationale Prüfverfahren zur Beurteilung des Brandverhaltens von Fassaden

International existieren eine Reihe von Prüfverfahren, die das Brandverhalten von Fassaden beurteilen. Allerdings unterscheiden sich diese teilweise stark. Aufgrund des wachsenden Bewusstseins für die Bedeutung der Brandausbreitung an Fassaden, das reale Brandfälle regelmäßig bestätigen und bestärken (vgl. Abschnitt 1.2), haben einige Länder in den letzten zehn Jahren neue Prüfverfahren entwickelt bzw. vorhandene überarbeitet. Die Initiative, diese Verfahren zu harmonisieren, besteht seit vielen Jahren. Unabhängig davon nahm die Zahl der unterschiedlichen Prüfverfahren in der jüngsten Vergangenheit zu. (Smolka et al. 2016)

Eine Studie der Europäischen Union kommt beim Vergleich der Prüfverfahren der Mitgliedsstaaten zum Schluss, dass große Unterschiede bestehen. Ein direkter Vergleich ist im Allgemeinen nicht möglich, da Informationen zu den wichtigsten Leistungsmerkmalen wie der Wärmeeinwirkung auf den Prüfkörper fehlen. (Anderson et al. 2021; Hofmann-Böllinghaus et al. 2018)

Tabelle 2.1 listet die internationalen Prüfverfahren zur Beurteilung des Brandverhaltens von Fassaden auf. Aufgeführt sind die jeweiligen Länder, die die Prüfverfahren anwenden, die Methode – Brand im oder am Gebäude –, die Angaben zur Geometrie, die Angaben zur Brandlast, die Größe der ggf. vorhandenen Brandkammer und die Größe der zugehörigen Öffnung. Neben den in Tabelle 2.1 aufgeführten Quellen beruhen die Angaben auf (Agarwal et al. 2021; Dréan et al. 2016; Dréan et al. 2018; Li et al. 2022; Lum 2015; Móder et al. 2016; Nishio et al. 2016; Smolka et al. 2016; Szikra et al. 2018; White et al. 2015)

Unabhängig von den Unterschieden beim Prüfverfahren selber zeigen sich auch bei der Bewertung bzw. Klassifizierung der Ergebnisse große Unterschiede. So gibt es Prüfverfahren, bei denen an expliziten Stellen auf dem Fassadenprüfkörper vordefinierte Temperaturen nicht überschritten werden dürfen (AS 5113:2016; BS 8414-1:2020; BS 8414-2:2020; GOST 31251-2008). Bei anderen Prüfverfahren dürfen die Flammen eine vordefinierte Höhe oder einen vordefinierten Bereich nicht erreichen oder überschreiten (ANSI FM 4880-2017). Hinzu kommen Prüfverfahren bei denen eine Kombination aus Bewertungskriterien für Maximaltemperaturen und Flammenausbreitung vorliegen muss (SP FIRE 105; PN-B-02867:2013; NFPA 285; MSZ 14800-6:2020; Prüfbestimmung für Aussenwandbekleidungs-systeme). Wieder andere Prüfverfahren definieren über einen Verweis auf das nationale Schutzziel bezogen auf reale Geschossgrenzen ein Kriterium (ÖNORM B 3800-5:2013).

Hinzu kommen die in PAPER I beschriebenen nationalen Prüfverfahren, bei denen keine veröffentlichten vordefinierten Bewertungskriterien existieren (DIN 4102-20:2017-10; DIN 4102-24:2022-12). Auch bei Prüfverfahren, die internationale Zielgruppen ansprechen, wird auf die Benennung von Kriterien verzichtet (ISO 13785-1:2002; ISO 13785-2:2002). Die größte Übereinstimmung lässt sich bei dem Kriterium – Herabfallen von brennenden Teilen – identifizieren. Dieses Kriterium ist in den meisten Ländern über die nationalen Festlegungen auszuschließen und führt folglich zu einem negativen Bescheid.

Wie in Abschnitt 2.1 und PAPER I beschrieben, haben einige Länder im Vergleich zu Deutschland konkrete Schutzzielkriterien oder auch funktionale Anforderungen für die Brandweiterleitung an Fassaden, aus denen sich Leistungskriterien ableiten lassen. In anderen Ländern sind diese Kriterien aus den beschriebenen Bewertungskriterien der Prüfverfahren ableitbar. In Deutschland existieren, wie PAPER I ausführt, keinerlei konkrete veröffentlichte Festlegungen. Derzeit legen die Zulassungsgrundsätze des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) fest, welche Systeme im Großversuch zu untersuchen sind. Das DIBt bewertet diese durchgeführten Großversuche unter Einbeziehung des zuständigen Sachverständigenausschusses (SVA). PAPER I führt zwar Kriterien für das Prüfverfahren (DIN 4102-20:2017-10) auf, die im Rahmen eines Norm-Entwurfs definiert, aber letztlich nicht in die finale Norm überführt wurden.

Harte, klar definierte Kriterien für die Brandweiterleitung an Fassaden bezogen auf das Schutzziel und/oder das Prüfverfahren haben für eine geplante Entwicklung von neuartigen Konstruktionen den Vorteil, dass die zu erbringenden Leistungsmerkmale bekannt sind. Gleichzeitig können sie nachteilig sein, wenn sie den Spielraum für neuartige Baustoffe und Konstruktionen einschränken, die ein anderes Verhalten als bekannte und der ursprünglichen Kalibrierung zu Grunde liegende Konstruktionen aufweisen. So ist es beispielsweise schwierig, konstruktive Maßnahmen, die eine Brandausbreitung unterbinden sollen, zu untersuchen, wenn die Bewertungskriterien rein auf eine Temperaturerhöhung oder eine Brandausbreitung in vordefinierten Bereichen abzielen. In diesen Fällen sind offene bzw. unkonkrete Formulierungen von Vorteil, die im Einzelverfahren bewertet werden. Wie in PAPER I ausgeführt, ist dies auch der Grund für die Einbeziehung eines Sachverständigenausschusses in Deutschland, der über den Zulassungsgegenstand und die Zertifizierung neuer Systeme im Einzelfall entscheidet. Konkret bedeutet dies, dass neue Systeme im Prüfverfahren möglicherweise den Anforderungen (Schutzziele) gerecht werden, allerdings mit der Konsequenz, dass sie Reaktionen auf die Brandbeanspruchung hervorrufen könnten, die so noch nie in einem anderen Versuch erfasst wurden und zu denen es bisher keine Regelungen gab.

Beim Vergleich internationaler Prüfverfahren ist die Entstehungsgeschichte bei der Entwicklung des jeweiligen Verfahrens zu berücksichtigen. Die in Tabelle 2.1 aufgeführten Prüfverfahren mit einer hohen Brandlast (≥ 200 kg Holzkrippe) decken i. d. R. das praxisnahe Szenario eines Raum- oder Sockelbrandes ab. Prüfverfahren mit 20 kg bis 50 kg Brandlast decken i. d. R. nur ein skaliertes Einwirkungsszenario ab und sind oft nicht direkt in die Realität überführbar. Beispielsweise lässt sich am Prüfverfahren (DIN 4102-20:2017-10) die Entstehungsgeschichte rekonstruieren. Dies stellt auch PAPER I dar. Wesentliche Hintergründe für die im Ursprungsentwurf der DIN 4102-20 gegebenen Randbedingungen und Grundsätze liefert der Forschungsbericht von (Kotthoff 2000). Die Wahl der Brandlast in Form einer Holzkrippe, damals 25 kg, ist wie folgt beschrieben: *„Die thermische Beanspruchung einer brennenden 25 kg Holzkrippe ist mit der beim Brand eines voll möblierten Zimmers selbstverständlich nicht zu vergleichen. Im Bereich des Flammenaustritts und unmittelbar oberhalb des Sturzes wird jedoch eine thermische Belastung der Fassade erzielt, die der eines Raumbrandes ähnlich ist, ohne dass eine Masse von 500 kg Holz eingesetzt werden muss. Unter diesem Gesichtspunkt erscheint die verwendete Brandlast zur Prüfung des Brandverhaltens von Fassadenbekleidungen zunächst durchaus geeignet. Der praktische Nachweis im Originalbrandversuch mit brennbaren Fassadenbekleidungen ist jedoch noch zu erbringen.“* (Kotthoff 2000, S. 60) Die in PAPER I dargestellten Konturgrafiken der Isothermen zeigen zwar ein ähnliches, jedoch kein

übereinstimmendes Einwirkungsszenario zwischen 500 kg und 25 kg im Sturzbereich. Dies kann ein Grund sein für die spätere Anpassung der (DIN 4102-20:2017-10) von 25 kg auf 35 kg.

Maßgebend für die weitere Betrachtung ist vor allem der Fassadentyp, für den der Prüfaufbau kalibriert wurde. Zum damaligen Zeitpunkt sollte ein Prüfverfahren für Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum (EPS) entwickelt werden, da diese Konstruktionen, wie auch in PAPER I geschildert, nicht mit den üblichen Verfahren im Kleinmaßstab beurteilt werden konnten (Kotthoff 2000). Der Sturzbereich über dem Fenster ist für EPS-WDVS ein maßgebender Bereich (Zhou et al. 2018) und stand folglich im Fokus. Wird dieses Prüfverfahren für andere Fassadenkonstruktionen herangezogen, ist die Anwendbarkeit im Einzelfall zu prüfen.

Eine weitere Schwierigkeit entsteht, wenn entsprechend skalierte Prüfverfahren wie die (ÖNORM B 3800-5:2013) in den Kontext eines konkreten Schutzziel gesetzt werden und versucht wird, die Ergebnisse eins zu eins in die Realität zu überführen. Wie in PAPER V ausgearbeitet, kann dies insbesondere bei neuartigen Fassadenkonstruktionen zu unrealistischen Ergebnissen führen.

Tabelle 2.1

Übersicht der internationalen Prüfverfahren zur Beurteilung des Brandverhaltens von Fassaden

Bezeichnung / Quelle	Land ¹	Methode ²	Höhe [m]	Breite [m]	Brandkammer / -raum (BxLxH) [m]	Öffnung (BxH) [m]	Innenecke	Brandlast ³	Beanspruchung ^d [min]
(ANSI FM 4880-2017) 16 ft High Parallel Panel test	US	Sockelbrand	5,3	1,1	Brand zw. zwei Fassaden mit 0,5 m Abstand	-	nein	360 kW Gasbrenner	15
(ANSI FM 4880-2017) 25 ft High Corner Test	US	Sockelbrand	6,1	11,5 / 15,1	-	-	ja	340 kg Holzkippe	15
(ANSI FM 4880-2017) 50 ft High Corner Test	US	Sockelbrand	15,2	6,0 / 6,0	-	-	ja	340 kg Holzkippe	15
(Assessment of Fire Performance of Facades - Large) ^y	EU	Brandkammer (Fenster)	7,4	3,2 / 1,5	2,4 x 1,3 x 2,1	2,0 x 1,9	ja	350 kg Holzkippe	Abbrand (max. 60 min)
(Assessment of Fire Performance of Facades - Medium) ^y	EU	Brandkammer (Fenster)	5,0	3,2 / 1,5	1,0 x 0,8 x 1,0	1,0 x 1,0	ja	30 kg Holzkippe	Abbrand (max. 60 min)
(BS 8414-1:2020)	GB, IE, AU BE, CN, JP, AE	Brandkammer (Fenster)	8,0	2,6 / 1,5	2,0 x 1,0 x 2,0	2,0 x 2,0	ja	4 500 MJ Holzkippe (300 - 478 kg)	30
(BS 8414-2:2020)	GB, IE, AU, BE	Brandkammer (Fenster)	8,0	2,8 / 1,5	2,0 x 1,0 x 2,0	2,0 x 2,0	ja	4 500 MJ Holzkippe (300 - 478 kg)	30
(CAN/ULC-S134-13)	CA	Brandkammer (Fenster)	9,8	6	≥ 60 m ³ (max. Verhältnis bxlxh je 1:2,5)	2,5 x 1,4	nein	Wärmestrom 45 bzw. 27 kW/m ² in 0,5 bzw. 1,5 m Höhe Gasbrenner	25
(DIN 4102-20:2017-10)	DE, CH	Brandkammer (Fenster)	5,5	2,5 / 1,5	1,0 x 0,8 x 1,0	1,0 x 1,0	ja	35 kg Holzkippe	20
(DIN 4102-24:2022-12)	DE	Sockelbrand	9,8	4,0 / 2,0	-	-	ja	200 kg Holzkippe	25
(GB/T 29416-2012)	CN	Brandkammer (Fenster)	9,0	2,6 / 1,5	2,0 x 1,1 x 2,3	2,6 / 1,5	ja	4 500 MJ Holzkippe	36
(GOST 31251-2008)	AZ, AM, KG, KZ, MD, RU, T.J., UZ	Brandkammer (Fenster)	5,1	3	definierte Flamme nach 7.4.3 sicherstellen	1,6 x 0,8	nein	700 MJ/m ² Holzkippe	35

Bezeichnung / Quelle	Land ^a	Methode ^b	Höhe [m]	Breite [m]	Brandkammer / -raum (BxLxH) [m]	Öffnung (BxH) [m]	Innenecke	Brandlast ^c	Beanspruchung ^d [min]
(ISO 13785-1:2002) ident. mit (DSTU B V.1.1-22-2009)	CZ, SK, UA	Sockelbrand	2,8	1,2 / 0,6	-	-	ja	100 kW Gasbrenner	30
(ISO 13785-2:2002) identisch mit (AS 5113:2016), (DSTU B V.1.1-21-2009)	AU, NZ, CZ, SK, KR, UA	Brandraum (Fenster)	5,7	3,0 / 1,2	4,0 x 4,0 x 2,0	2,0 x 1,2	ja	400 kg Holzkrippe	23 - 27
(JIS A 1310:2019)	JP	Brandkammer (Fenster)	4,1	1,8	1,4 x 1,4 x 1,4	0,9 x 0,9	nein	Gasbrenner über Wärme-freisetzung	20
(LEPIR 2)	FR, BE	Brandraum (Fenster)	6,6	5	4,3 x 3,0 x 2,5 (4,9 x 2,7 x 2,4) ^e	1,0 x 1,5	nein	2 x 300 kg Holzkrippe	30
(MSZ 14800-6:2020)	HU	Brandraum (Fenster)	7,7	4,2	4,2 x 4,4 x 2,5	1,2 x 1,2	optional	650 kg Holzkrippe	45
(NFPA 285)	US	Brandraum (Fenster)	5,3	4,1	3,1 x 3,1 x 2,1	2,0 x 0,8	nein	ca. 2 770 MJ Gasbrenner ^f	30
(ÖNORM B 3800-5:2013)	AT, CH	Brandkammer (Fenster)	6,0	3,0 / 1,5	1,0 x 0,8 x 1,0	1,0 x 1,0	ja	25 kg Holzkrippe	mind. 30
(PN-B-02867:2013)	PL	Sockelbrand	2,3	1,8	-	-	nein	20 kg Holzkrippe	15
(Prüfbestimmung für Aussenwandbekleidungssysteme)	CH, LI	Brandkammer (Fenster)	8,3	3	1,5 x 0,8 x 1,0	1,5 x 1,0	nein	50 kg	20
(SP FIRE 105)	SE, NO, DK	Brandkammer (Fenster)	6,7	4	3,2 x 1,6 x 1,3	3,0 x 0,7	nein	60 L Heptan (75 MJ/m ²)	15

^a Zugehörige Länder u. a. aus den Quellen: (Anderson et al. 2021; Hofmann-Böllinghaus et al. 2018; Merkewitsch 2019; Smolka et al. 2016)

^b Brandkammer < 2 m x 2 m x 2 m (B x L x H) / Brandraum ≥ 2 m x 2 m x 2 m (B x L x H) (jeweils Mindestwerte)

^c Teilweise auch Gasbrenner als Alternative zur Holzkrippe möglich

^d Reine Beanspruchungszeit über Brandlast mit anschließendem Ablöschen. Teilweise mit Ablöschen der Fassade teilweise ohne. Beobachtungszeit läuft i. d. R. weiter.

^e Abweichende Werte aus weiterer Quelle (Dréan et al. 2016)

^f Nicht gleichmäßig verteilt über Prüfzeit

^g Entwurf (*kursiv*)

2.3 Mehrgeschossiger Holzbau

Seit der Antike hat sich das mehrgeschossige Bauen mit Holz in Regionen etabliert, in denen Holz als Baumaterial vorherrscht. Nachdem zwischenzeitlich Baustoffe wie Beton und Stahl beim mehrgeschossigen Bauen die Oberhand gewonnen hatten, erfährt der Holzbau aktuell aufgrund technischer Innovationen und vor allem aufgrund ökologischer Gesichtspunkte eine Renaissance, siehe Abschnitt 1.1. (Krötsch et al. 2021)

Beim mehrgeschossigen Bauen mit Holz kommen unterschiedliche Bauweisen für Wände und Decken zum Einsatz. Zu unterscheiden sind insbesondere Holztafelbau und Massivholzbau. Abbildung 2.5 stellt diese Bauweisen dar. Beim Massivholzbau kommen in der Regel Brettstapel- (mechanisch mittels Dübel/Nägeln usw. verbunden) bzw. Brettschichtholz- (verleimt), Brettsperrholz- und Furnierschichtholzbauteile zum Einsatz.

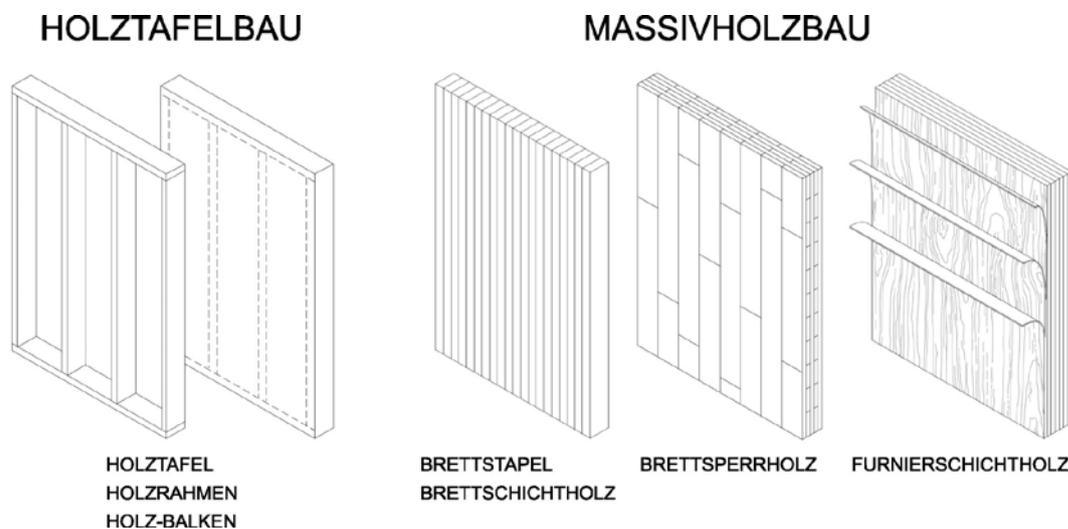


Abbildung 2.5 Konstruktiver Aufbau der Holztafelbau- und Massivholzbauweise, Zeichnungen basierend auf (Kaufmann et al. 2021)

Eine weitere typische Bauweise sind Holz-Beton-Verbunddecken. Diese Bauweise weist Vorteile bezogen auf den Schallschutz auf, da sie das Eigengewicht erhöht und dadurch das Schwingungsverhalten verbessert. Auch ist die nichtbrennbare Schicht ein brandschutztechnischer Vorzug. Üblich sind zudem Mischkonstruktionen aus mineralischer Bauweise in Kombination mit Holzbau – beispielsweise in Form von Außenwänden aus Holztafelbau für Stahlbetongebäude oder Aufstockungen aus Holz auf bestehende Gebäude in mineralischer Bauweise. Möglich sind auch Holz-Stahl-Kombinationen. (Winter et al. 2021)

Ein Vorteil des Holzbaus ist sein verhältnismäßig geringes Gewicht und die Be- und Verarbeitbarkeit des Materials. Ein weiterer Nutzen des Bauens mit Holz ist die übliche Vorfertigung, welche die Bauzeiten auf der Baustelle verkürzt sowie die witterungsunabhängige, technologiegestützte Fertigung in Produktionshallen erlaubt. (Heinzmann et al. 2022; Huß 2021; Kaufmann et al. 2021; Winter et al. 2021)

Aktuell kommen im Holzbau üblicherweise Nadelhölzer zum Einsatz. Zukünftig werden aufgrund des klimabedingten Waldumbaus vermehrt Laubhölzer wie Buche, Esche oder Eiche im Vordergrund stehen (Frangi 2014). Vor allem Hybridkonstruktionen, die Nadel- und Harthölzer

kombinieren, können die Möglichkeiten des Holzbaus sinnvoll erweitern (Lechner 2021; Maier 2022).

Die Lastableitung der horizontalen Beanspruchungen erfolgt beim mehrgeschossigen Holzbau üblicherweise über Stahlbetonkerne, Stahlbeton- oder Massivholzkerne in Kombination mit Aussteifungselementen in den Außenwänden, Massivholzkerne in Verbindung mit weiteren aussteifenden Massivholzwänden oder Fachwerkstrukturen in den Außenwänden (Winter et al. 2021).

Holz als brennbarer Baustoff wird in der Praxis oft durch zusätzlich aufgebrachte Bekleidungen vor der direkten Brandeinwirkung geschützt. Die Zeitspanne für die Schutzwirkung der Bekleidung richtet sich nach der Bekleidungsdicke und der Materialität. Insbesondere Gipskartonfeuerschutz- und Gipsfaserplatten sind hier zu nennen. (Engel et al. 2022; DIN EN 1995-1-2:2010-12; Scheer 2009)

Aus gestalterischen Gesichtspunkten und um die aus ökologischer Sicht nachteiligen Gipsplatten zu vermeiden, werden in der Praxis insbesondere Massivholzbauteile vermehrt als ungeschützte Holzkonstruktionen ausgeführt. Die daraus resultierenden sichtbaren Holzoberflächen beeinflussen die jeweilige Brandraumdynamik (Engel et al. 2022).

Abbildung 2.6 zeigt zwei Beispiele für mehrgeschossige Holzgebäude in Massivholz- bzw. Holztafelbauweise.



Abbildung 2.6 Beispiele für mehrgeschossigen Holzbau, links RIO – Riem Ost München (Massivholzbauweise) (Quelle: Lukas Reumschüssel), rechts WA 14 Ost Prinz-Eugen-Park München (Kombination Holztafelbau- & Massivholzbauweise)

2.4 Holzfassaden

Grundsätzlich bezieht sich der Begriff Fassade auf die Gebäudehülle. Dazu gehört nicht die Außenwand, die den Innenraum eines Gebäudes von der Umgebung trennt. Abbildung 2.7 zeigt die Fassade bestehend aus Außenwandbekleidung, Lüftungsspalt bzw. Luftschicht, Unterkonstruktion und Dämmung. Die eigentliche Außenwand ist grau dargestellt.

Holzfassaden lassen sich, wie in PAPER II dargestellt, in verschiedenen konstruktiven Ausführungen realisieren. Abbildung 2.7 illustriert diese Prinzipien.

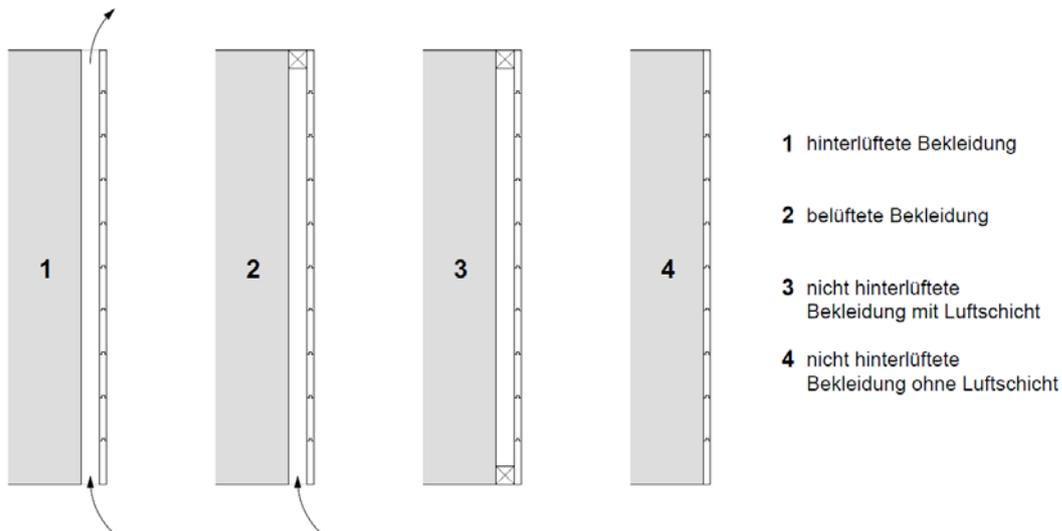


Abbildung 2.7 Übersicht der verschiedenen konstruktiven Ausführungen von Holzfassaden

Bei Holzfassaden sind hinterlüftete (oben und unten offen), belüftete und nicht hinterlüftete Fassadenbekleidungen zu unterscheiden.

Aufgrund der Anforderungen an den Witterungs- und Feuchteschutz wurden Holzfassaden in der Vergangenheit meist als hinterlüftete Fassaden ausgeführt (Mayer et al. 1984). Diese konstruktive Ausführung hilft von außen eingedrungene Feuchtigkeit und entstandenes Tauwasser abzuführen und kommt folglich der Dauerhaftigkeit zugute (DIN 18516-1:2010-06). Neuere Untersuchungen zufolge erfüllen auch belüftete Holzfassaden die Anforderungen an den Witterungs- und Feuchteschutz und folglich die Dauerhaftigkeit (Kehl et al. 2010). Daher gelten heute gemäß den technischen Regeln (Holzbau Deutschland - Institut 2020; DIN 68800-2:2022-02) hinterlüftete, belüftete und teilweise auch nicht hinterlüftete Bekleidungen mit Luftschicht (kleinformatige Bekleidungen) als ausreichend für einen dauerhaft wirksamen Witterschutz. Nicht hinterlüftete Fassadenbekleidungen aus Holz sind jedoch deutlich weniger verbreitet.

Der Lüftungsspalt hinter der Bekleidung ist üblicherweise zwischen 30 mm bis 60 mm groß (Holzbau Deutschland - Institut 2020; MHolzBauRL, vom Oktober 2020). Diese Größe ist auf die Standardquerschnittsmaße von Holzlatten zurückzuführen. Holzlatten sind nach (DIN 4074-1:2012-06) Schnitthölzer mit einer Dicke kleiner 40 mm und einer Breite kleiner 80 mm. Die typischen Standardquerschnittsmaße für Holzlatten sind 24 mm x 48 mm (24/48) mm bzw. 30 mm x 50 mm (30/50) (DIN 4070-1:1958-01). Dadurch ergeben sich üblicherweise bei einfacher Lattung ein 30 mm und bei einer Kreuzlattung ein 48 mm bzw. 60 mm großer Lüftungsspalt hinter der Bekleidung.

Holzfassaden unterscheiden sich weiter in ihren Schalungsarten. Tabelle 2.2 zeigt die in der Praxis üblichen Schalungsarten. Die Schalungsarten in Tabelle 2.2 reichen von geschlossenen Fassaden, wie Holzwerkstoffplatten, formschlüssigen Schalungen, kraftschlüssigen Schalungen, bis zu offen Fassaden wie offene Schalungen. Leistenschalungen, Deckelschalungen, Stülpchalungen und Deckleistenschalungen werden, trotz ihres geschlossenen Aussehens, direkt nach der Fertigstellung als offene Schalungen eingestuft. Die Einstufung resultiert aus

den natürlichen Schwindvorgängen, der Alterung, der Abnutzung und den Witterungseinflüssen, die im Laufe der Gebäudenutzungsdauer zu Fugen in der Holzschalung führen.

Holzschalungen können unbehandelt, lasiert, druckimprägniert oder deckend behandelt (Farbschicht) ausgeführt werden.

Tabelle 2.2 Darstellung der Schalungsarten für Holzfassaden

Bekleidungstyp	Schemaskizze	Ausrichtung	
Flächiger Holzwerkstoff Platte		horizontal oder vertikal	geschlossenen Fassaden
Formschlüssige Schalung Profil mit Nut-Feder		horizontal	
		vertikal	
Kraftschlüssige Schalung Profil mit Winkelfalz		horizontal	
		vertikal	
Offene Schalungen Leistenschalung Deckelschalung Stülpchalung Deckleistenschalung		horizontal	offene Fassaden
		vertikal	
		vertikal	
		vertikal	

Abbildung 2.9 zeigt jeweils ein Beispiel für eine horizontale Stülpchalung und eine vertikale Deckleistenschalung.



Abbildung 2.8 Beispiele für Holzfassaden, links horizontale Lärchen-Stülpchalung (WA13 Prinz-Eugen-Park München), rechts vertikale Deckleistenschalung (WA15 Ost Prinz-Eugen-Park München)

2.5 Begrünte Fassaden

Begrünte Fassaden werden auch aufgrund der in Abschnitt 1.1 beschriebenen Problematik zunehmend populärer (Ogut et al. 2022). Der Begriff begrünte Fassaden ist, wie in PAPER IV und PAPER V ausgeführt, ein Überbegriff für sehr unterschiedliche konstruktive Ausführungen von Fassadenbegrünungen. Abbildung 2.9 zeigt die verschiedenen Arten von Fassadenbegrünungen. Prinzipiell zu unterscheiden sind eine direkte Begrünung an der Außenwand durch Kletterpflanzen, eine indirekte Begrünung durch von der Außenwand abgesetzte Kletterhilfen und begrünte Wandsysteme mit Bepflanzung in Gefäßen oder an flächigen vertikalen Vegetationsflächen (Living Wall). Auch Mischformen sind möglich. (Köhler et al. 2012; Mahabadi et al. 2018; Pfoser 2018)

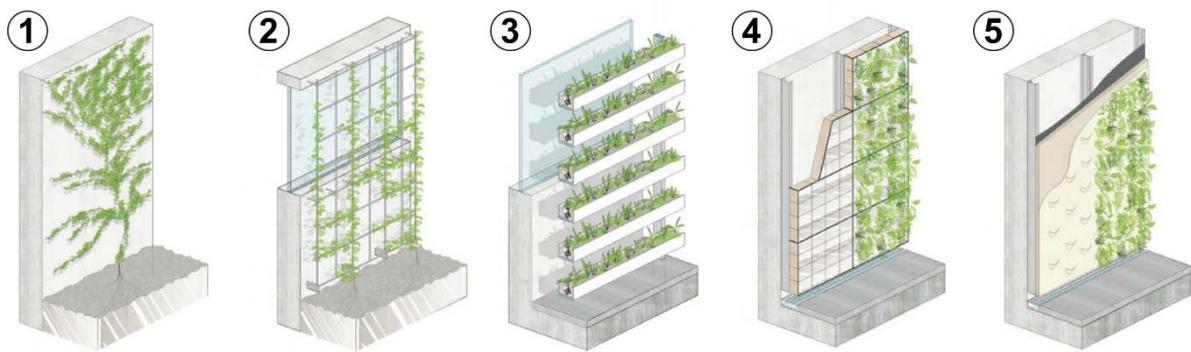


Abbildung 2.9 Ausbildungsformen von Fassadenbegrünungen. 1) Direktbewuchs mit Selbstklimmern, bodengebunden, 2) leitbarer Bewuchs an Kletterhilfen, bodengebunden, 3) Pflanzgefäße, horizontale Vegetationsflächen, wandgebunden, 4) modulares System (Living Wall), vertikale Vegetationsflächen, wandgebunden, 5) flächiges System (Living Wall), vertikale Vegetationsflächen, wandgebunden; basierend auf (Pfoser 2018)

Für bodengebundene Begrünungen an Kletterhilfen haben sich je nach Dickenwuchs (Wüchsigkeit) Wandabstände von 50 bis 200 mm zur Kletterhilfe etabliert (Mahabadi et al. 2018; Pfoser 2018). Ein ausreichender Abstand ist neben der Wüchsigkeit der Pflanze auch aufgrund der sonst möglichen Überhitzung der Gerüstkletterpflanze durch die Außenwand notwendig (Pfoser 2018). Auch das Rastermaß der Kletterhilfe muss der Kletterstrategie und Haltetechnik der Pflanze angepasst sein (Althaus et al. 1991). Gängig sind Rankgitter mit Maschenweiten bzw. Rastermaßen von 150 mm x 150 mm bis 450 mm x 450 mm. Bei senkrechten Kletterhilfen in Form von Stäben oder Seilen sind horizontale Abstände zueinander von 200 bis 800 mm üblich (Mahabadi et al. 2018; Pfoser 2018). Diese Maschenweiten sind in der Praxis u. a. auch notwendig, um einen jahreszeitlich bedingten Laubabfall zu ermöglichen, bei dem Laub nicht großflächig in der Kletterhilfe hängen bleibt.

Wandgebundene Begrünungssysteme (ohne Bodenanschluss) zeichnen sich durch integrierte Bewässerungssysteme, beliebige Begrünungsgrößen und einfache Austauschbarkeit der Pflanzen aus. Sie ermöglichen eine umfassende vorkultivierte Begrünung der Fassade ab Fertigstellung des Gebäudes durch Modul- oder Regalsysteme (Köhler et al. 2012; Porer 2019). Eine wandgebundene Begrünung in Form einer Living Wall ist ein komplettes, vorgehängtes, hinterlüftetes Fassadensystem. Es besteht aus hinterlüftetem Hohlraum, Unterkonstruktion, Tragstruktur, Trägerplatten, Dämmung, Substrat, Vlies, Bewässerungssystem und der Pflanze selbst. Die Systeme unterscheiden sich von Hersteller zu Hersteller erheblich. Abbildung 2.10

zeigt beispielhaft den Aufbau eines wandgebundenen Fassadenbegrünungssystems (Living Wall).

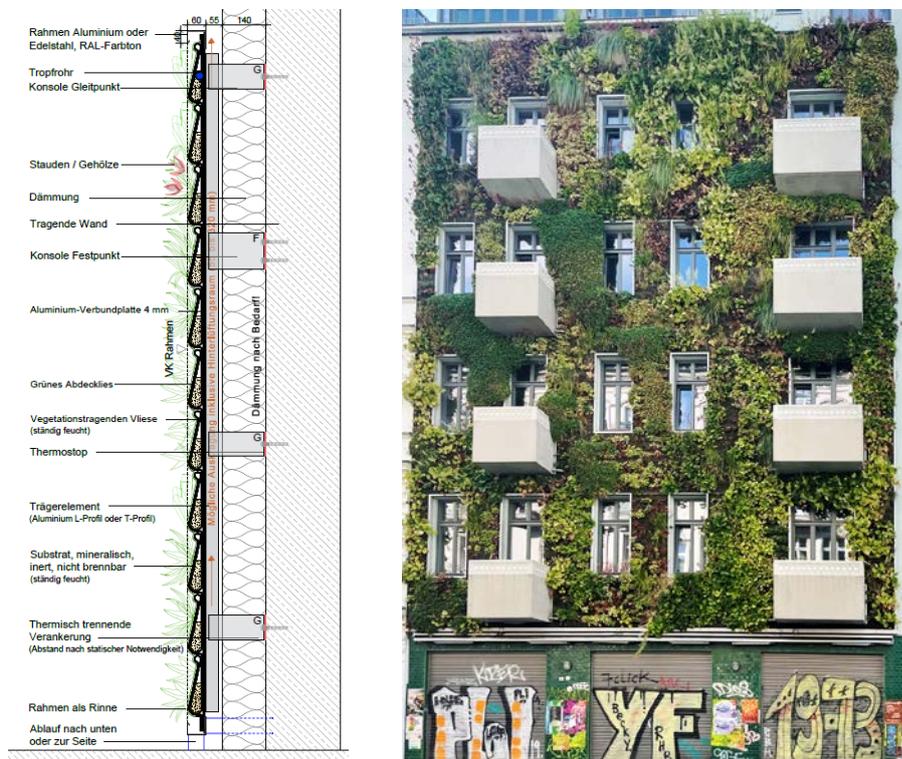


Abbildung 2.10 Beispielhafter Aufbau eines wandgebundenen Fassadenbegrünungssystems (Living Wall) (Quelle: Fa. Vertiko) für ein realisiertes Projekt (Wohnhaus Glogauer Straße Berlin)

Die Verwendung von Kletterpflanzen zur Fassadenbegrünung weist viele regionale Besonderheiten auf (Köhler et al. 2012; Mahabadi et al. 2018; Pfoser 2018). Das Artenpotenzial für Kletterpflanzen in der D-A-CH-Region umfasst ca. 150 Arten und Sorten (Köhler et al. 2012). Eine Auswertung von Pflanzenlisten für tropische und subtropische Regionen ergab ein Potenzial von mehr als 1 000 Pflanzenarten und -sorten, von denen derzeit nur ein kleiner Teil in Baumschulen verfügbar ist (Köhler 1993).

Das Spektrum der möglichen Pflanzenarten für wandgebundene Begrünungssysteme ist wesentlich umfangreicher. Für die D-A-CH-Region werden in (Mahabadi et al. 2018) ca. 100 Arten und Sorten aufgeführt. Zu unterscheiden sind Stauden, Gräser und Klettergehölze (Köhler et al. 2012; Mahabadi et al. 2018; Pfoser 2018).

Die wichtigsten Merkmale für die Kategorisierung der Pflanzen sind, wie in PAPER V beschrieben, sommergrün, wintergrün, immergrün und das Vorhandensein einer negativen phototropen (lichtfliehenden) Eigenschaft (Köhler et al. 2012; Mahabadi et al. 2018; Pfoser 2018).

Immergrüne und wintergrüne Pflanzen tragen im Gegensatz zu sommergrünen Pflanzen in der Regel das ganze Jahr über Blätter. Der Unterschied zwischen immergrünen und wintergrünen Pflanzen besteht darin, dass wintergrüne Arten ihre Blätter behalten, aber im Gegensatz zu immergrünen Pflanzen ihre Blätter im Frühjahr abwerfen, kurz bevor die neuen Blätter austreiben. Eine negative phototrope (lichtfliehende) Eigenschaft ist der Drang der Triebe, vom Licht weg zu wachsen. Diese Eigenschaft führt bei fehlender Pflege und Wartung zu einem

hohen Anteil an totem und vertrocknetem Pflanzenmaterial und -masse innerhalb der Begrünung und kann auch zu Gebäudeschäden durch einwachsende Triebe führen. Ein Beispiel für eine Pflanze mit einer negativen phototropen (lichtfliehenden) Eigenschaft ist Efeu (*Hedera helix*) (Köhler et al. 2012; Mahabadi et al. 2018; Pfoser 2018).

Abbildung 2.11 zeigt ein Beispiel für ein realisiertes wandgebundenes Begrünungssystem (rechts) und eine begrünte Fassade in Form eines bodengebundenen Bewuchses an Kletterhilfen (links).



Abbildung 2.11 Beispiele für begrünte Fassaden, links bodengebundener Bewuchs an Kletterhilfen (Swiss Re Bürogebäude München), rechts wandgebundenes Begrünungssystem (Stadtverwaltung Venlo Niederlande); (Quelle: Bundesverband GebäudeGrün)

3 Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse

3.1 Grundlagen zur Bewertung der Brandausbreitung entlang biogener Fassaden

Biogene Fassaden setzen sich aus brennbaren organischen Stoffen zusammen. Diese Stoffe sind in der Regel wie unbehandeltes Holz als normalentflammbar einzustufen. Das bedeutet: Ein Mitbrand der eigentlichen Fassaden im Primärbrandbereich ist, wie in PAPER I und PAPER II dargestellt, letztlich unvermeidbar und bei Verwendung entsprechender Fassaden und bei Erfüllung der Schutzzielkriterien nach Abschnitt 2.1 folglich zu akzeptieren. Im Fokus steht daher die selbständige Brandausbreitung entlang der Fassade außerhalb des eigentlichen Primärbrandes. Diese vertikale Brandausbreitung über die Primärflamme hinaus ist zu begrenzen, da, wie PAPER I, PAPER II und PAPER III beschreiben, eine schnelle Brandausbreitung über mehrere Geschosse für die Feuerwehr aufgrund der notwendigen Personalstärke und der technischen Einsatzgrenzen kritisch ist. In den meisten Industrieländern spielt der Einsatz der Feuerwehr, wie in Abschnitt 2.1 ausgeführt, eine entscheidende Rolle zur Gewährleistung der Bauwerkssicherheit bezogen auf den Brandschutz. Eine Strategie, um die Bauwerkssicherheit im Brandfall sicherzustellen, ist die Ausbreitung von Feuer und Rauch so zu verzögern, dass Bewohner:innen ausreichend Zeit zur Flucht haben und die Feuerwehr noch in der Lage ist, das Feuer unter Kontrolle zu bringen, bevor es zu groß wird (European Commission 1994). Die genaue Festlegung der Schutzziele obliegt den jeweiligen Mitgliedstaaten und diese Festlegungen können sich unterscheiden, vgl. PAPER I. Die grundsätzliche Strategie, die Brandausbreitung entlang einer Fassade bzw. einer Außenwandbekleidung zu begrenzen, bleibt jedoch bestehen. Abschnitt 1.2 enthält auszugsweise Beispiele, bei denen dieses Schutzziel nicht eingehalten wurde, und die sich daraus ergebenden Konsequenzen.

Eine unkontrollierte Brandausbreitung außerhalb des Primärbrandes zu verhindern, ist folglich eine entscheidende Grundlage für die brandschutztechnische Bewertung von biogenen Fassaden. Sofern konstruktive brandschutztechnische Maßnahmen zur Begrenzung der Brandausbreitung zum Einsatz kommen sollen, steht bei ihrer Bewertung die jeweilige Wirkung im Vordergrund.

Im Hochhausbereich kommen üblicherweise auskragende Platten oder geschlossene Brüstungen als konstruktive Maßnahmen zum Einsatz, um die Ausbreitung entlang der Fassade außerhalb des Primärbrandes zu begrenzen (MHHR, vom April 2008). Aus Brandversuchen (Bechtold 1977; Bechtold et al. 1978) ist bekannt, dass sich für Auskragungen erst ein Einfluss

erkennen lässt, wenn diese größer als ein Drittel der Fensterhöhe sind. Ab dieser Auskrangungstiefe strömen die Heißgase mit geringerer Geschwindigkeit horizontal bis zum Plattenrand und werden dort umgelegt. Gibt es eine Brüstung oberhalb der Auskrangung, verläuft die Flammenachse eher senkrecht. Ist keine Brüstung vorhanden, werden die Heißgase nach Umströmen des freien Plattenrandes leicht zurückgelenkt. Die 500°C-Isotherme verläuft jedoch ebenfalls senkrecht, vgl. Abbildung 3.1. (Bechtold 1977; Bechtold et al. 1978)

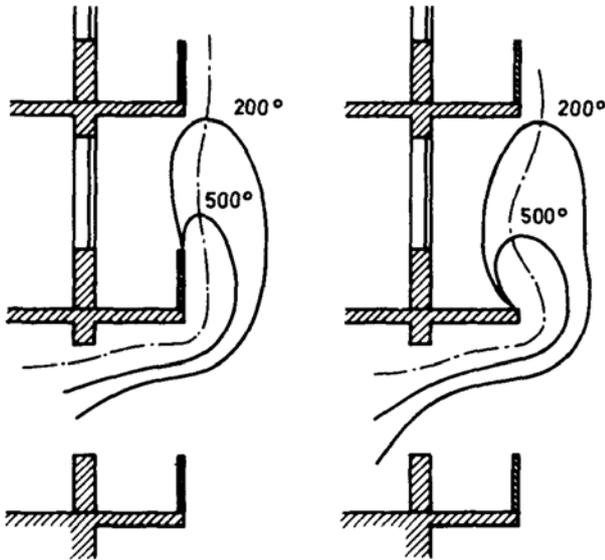


Abbildung 3.1 Einfluss von Kragplatten mit oder ohne Brüstung auf das Temperaturfeld vor der Fassade (Bechtold 1977)

In einer weiteren Versuchsreihe (Oleszkiewicz 1990a; Yung et al. 1988) konnte eine 1,22 m auskragende horizontale Platte, die direkt über der Fensteröffnung angeordnet war, die Brandausbreitung auf eine brennbare Fassade oberhalb des Primärbrandgeschosses wirkungsvoll begrenzen. Die Versuchsreihe (Oleszkiewicz 1991) umfasste Auskrangungen von 1 m, 0,6 m und 0,3 m. Die 1-m-Auskragung erwies sich als sehr wirksam. Weitere Beispiele für Versuchsreihen sind (Morgado et al. 2015) mit einer 0,55 m auskragenden Platte, (Mao et al. 2022) mit verschiedenen Auskrangungstiefen im Maßstab eins zu acht, (Harrison et al. 2010; Kumar et al. 2010) mit verschiedenen Auskrangungstiefen im Maßstab eins zu zehn, (Zhao et al. 2019) zum Verhalten der Flamme unterhalb der Auskrangung und (Yamaguchi et al. 2005) in kleinmaßstäblichen Experimenten.

Bei auskragenden Platten oder geschlossenen Brüstungen beinhaltet die Strategie, den Brand so von der Außenwand abzulenken, dass die Heißgase die Außenwand oberhalb des Primärbrandgeschosses nicht erfassen können. Die Brandausbreitung soll folglich auf das Primärbrandgeschoss begrenzt werden. In der Vergangenheit gab es Ideen und Bestrebungen, auskragende Platten (Harmathy 1976), die teilweise erst im Brandfall von der Außenwand wegklappen (Harmathy 1974), für mehrgeschossigen Standardgebäude zu etablieren. Dies hat sich nicht durchgesetzt und auskragende Platten sind heute typischerweise erst im Hochhausbereich anzutreffen.

Bei mehrgeschossigen Gebäuden unterhalb der Hochhausgrenze kommen im Gegensatz dazu üblicherweise konstruktive brandschutztechnische Maßnahmen zum Einsatz, welche die

Brandausbreitung entlang der Fassade begrenzen sollen. Hier steht daher nicht die Ablenkung der Primärflamme im Fokus, sondern die reine Brandausbreitung entlang der Fassade, beispielsweise bei hinterlüfteten Fassaden (Čolić et al. 2020).

Bei normalentflammbaren biogenen Fassaden wirken diese konstruktiven brandschutztechnischen Maßnahmen erst außerhalb des Primärbrandes, wie PAPER I und PAPER II ausführen. Der Brand der Fassade im Primärbrandbereich ist unvermeidbar und muss akzeptiert werden. Je nach Flammenhöhe können die Flammen mehrere Geschossgrenzen überschreiten. Die konstruktiven brandschutztechnischen Maßnahmen oberhalb der Primärflamme sind relevant für die Begrenzung der Brandausbreitung, vgl. Abbildung 3.2.

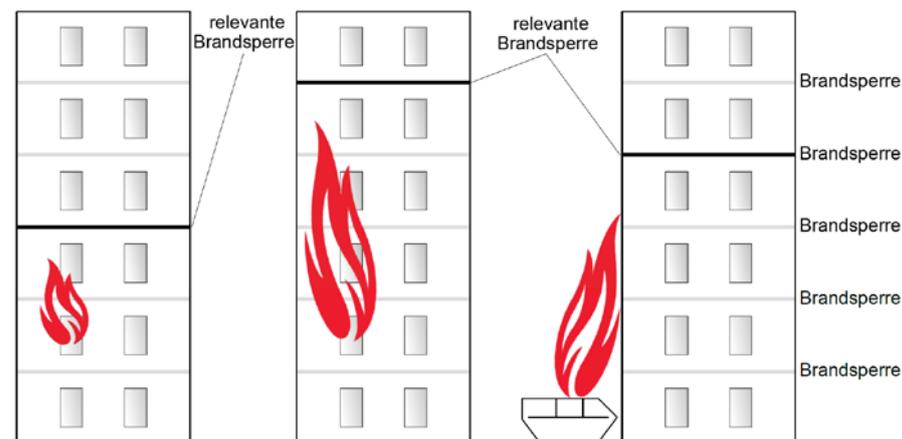


Abbildung 3.2 Darstellung der verschiedenen Brandszenarien an der Fassade und der jeweiligen relevanten Brandsperre

Untersuchungen von entsprechenden brennbaren biogenen Fassaden im Rahmen von Brandversuchen beobachten vor allem die Brandweiterleitung entlang der Fassade. Die in Abschnitt 2.2 aufgeführten Prüfverfahren für Fassaden unterscheiden sich teilweise sehr stark. Einige Prüfverfahren, wie das Verfahren nach (DIN 4102-20:2017-10), sind für Wärmedämmverbundsysteme aus expandiertem Polystyrol-Hartschaum konzipiert worden; sie entsprechen keinem realistischen Einwirkungsszenario, wie auch Abschnitt 2.2 und PAPER I darlegen. Um zu prüfen, welche Verfahren sich prinzipiell für die Bewertung von normalentflammbaren Fassaden eignen, ist es zunächst entscheidend, das Ziel der versuchstechnischen Untersuchung zu definieren.

Um eine normalentflammbare Fassade mit oder ohne konstruktive brandschutztechnische Maßnahmen zu bewerten und zu untersuchen, sind zwei Kriterien zentral:

- Zu bewerten sind der selbständige Mitbrand der Fassade und die Wirkungsweise der konstruktiven brandschutztechnischen Maßnahmen bei einem selbständigen Mitbrand außerhalb des Primärbrandbereiches.
- Der Einfluss der Primärflamme auf die Fassade ist zu bewerten, um beispielsweise zu untersuchen, wie sich individuelle Fassadenkonstruktionen in Bezug auf die Vorerwärmung der Außenwandbekleidung außerhalb des Primärbrandes verhalten, wie die Fassade im Primärbrandbereich aufreißt usw.

Diese zwei Kriterien können sich in versuchstechnischen Untersuchungen stark unterscheiden. Nahezu alle in Abschnitt 2.2 aufgeführten Prüfverfahren eignen sich für die Untersuchung des selbständigen Mitbrandes der Fassade und zur Bewertung der Wirkungsweise der konstruktiven brandschutztechnischen Maßnahmen bei einem selbständigen Mitbrand, da primär eine initiale Zündung der brennbaren Außenwandbekleidung und ein anschließendes Beobachten des Brandes der Außenwandbekleidung im Fokus stehen. Im Rahmen dieser Beobachtungszeit lassen sich die Brandausbreitung und mögliche angeordnete Maßnahmen untersuchen. Dieses Kriterium stand bei der Untersuchung in PAPER II im Vordergrund. Für eine repräsentative initiale Zündung der brennbaren Fassade eignen sich aufbauend aus den Erkenntnissen aus PAPER II besonders gut Sockelbrandversuche, wie sie in Abschnitt 3.5 aufgeführt sind. Die Breite der Brandquelle sollte der einer realistischen Brandeinwirkung entsprechen. Ein Sockelbrandversuch nach (DIN 4102-24:2022-12) erscheint indes ungeeignet, da aufgrund der hohen Primärflamme ein selbständiger Mitbrand auf der zur Verfügung stehenden Prüfkörperhöhe nicht zielführend zu untersuchen ist. Nötig wäre ein deutlich größerer Prüfkörper (Höhe), als in (DIN 4102-24:2022-12) beschrieben.

Im Rahmen der reinen Untersuchung des selbständigen Mitbrandes der Fassade wird die Einwirkung einer entsprechend repräsentativen Primärflamme ggf. vernachlässigt. Dies betrifft mit Blick auf Abschnitt 2.1 beispielsweise die Größe der Primärflamme und die sich in Realität daraus ergebenden höheren Temperaturverläufe entlang der Fassade. Dies ist bei entsprechenden Untersuchungen und sich daraus ableitenden Maßnahmen zu berücksichtigen.

Sofern eine neuartige Fassadenkonstruktion untersucht werden soll, ist ein repräsentativer Brandversuch mit einer der Realität entsprechenden Primärbrandflamme notwendig. Der Grund: Die Brandweiterleitung entlang der Fassade kann beispielsweise durch eine Vorerwärmung, durch ein frühzeitiges Öffnen der Fassadenkonstruktion im Bereich des Primärbrandes, durch das gemeinsame Wirken des Primärbrandes und des Fassadenbrandes und durch weitere Punkte entscheidend beeinflusst werden. Fassadenbrandversuche nach (Assessment of Fire Performance of Facades - Medium; DIN 4102-20:2017-10; ÖNORM B 3800-5:2013; PN-B-02867:2013; Prüfbestimmung für Aussenwandbekleidungssysteme) entsprechen, mit Blick auf die geringe Brandeinwirkung (nicht vergleichbar mit einem realen Brandereignis nach Abschnitt 2.1) nicht diesem Vorgehen. Für entsprechende Untersuchungen eignen sich auf der einen Seite ebenfalls Sockelbrandversuche mit repräsentativer Brandlast, die einer Primärflamme aus einer Fensteröffnung entsprechen oder Brandversuche nach Abschnitt 2.2 mit einer Flamme aus einer Öffnung, die realen Brandeinwirkungen aus einem Raumbrand entsprechen, wie beispielsweise (Assessment of Fire Performance of Facades - Large). Wie in PAPER III dargestellt, können ungeschützte oder nur anfänglich geschützte Holzoberflächen im Raum die Brandauswirkung auf die Fassade verstärken. Dieser Sachverhalt ist bei der Versuchsplanung unter Umständen zu berücksichtigen. Die Studie (Sjöström et al. 2023) verglich die Brandeinwirkung aus dem Prüfverfahren (Assessment of Fire Performance of Facades - Large) mit Einwirkungen aus Realbrandversuchen in Räumen mit Massivholzumfassungsbau teilen (Brandon et al. 2022) und bewertete sie als repräsentativ, siehe Abbildung 3.3. Auch die Prüfverfahren (LEPIR 2; SP FIRE 105; NFPA 285; CAN/ULC-S134-13) wurden dahingehend bewertet. Alle vier Testverfahren lagen deutlich unter den Temperaturverläufen der Realraumbrandversuche mit Massivholzumfassungsbau teilen. Während die beiden Prüfverfahren (NFPA 285; CAN/ULC-S134-13) kurzzeitig vergleichbare Temperaturen erreichen, liegen die

beiden Prüfverfahren (LEPIR 2; SP FIRE 105) durchgehend unter den Temperaturen der Realbrandversuche, vgl. Abbildung 3.3 (Sjöström et al. 2023).

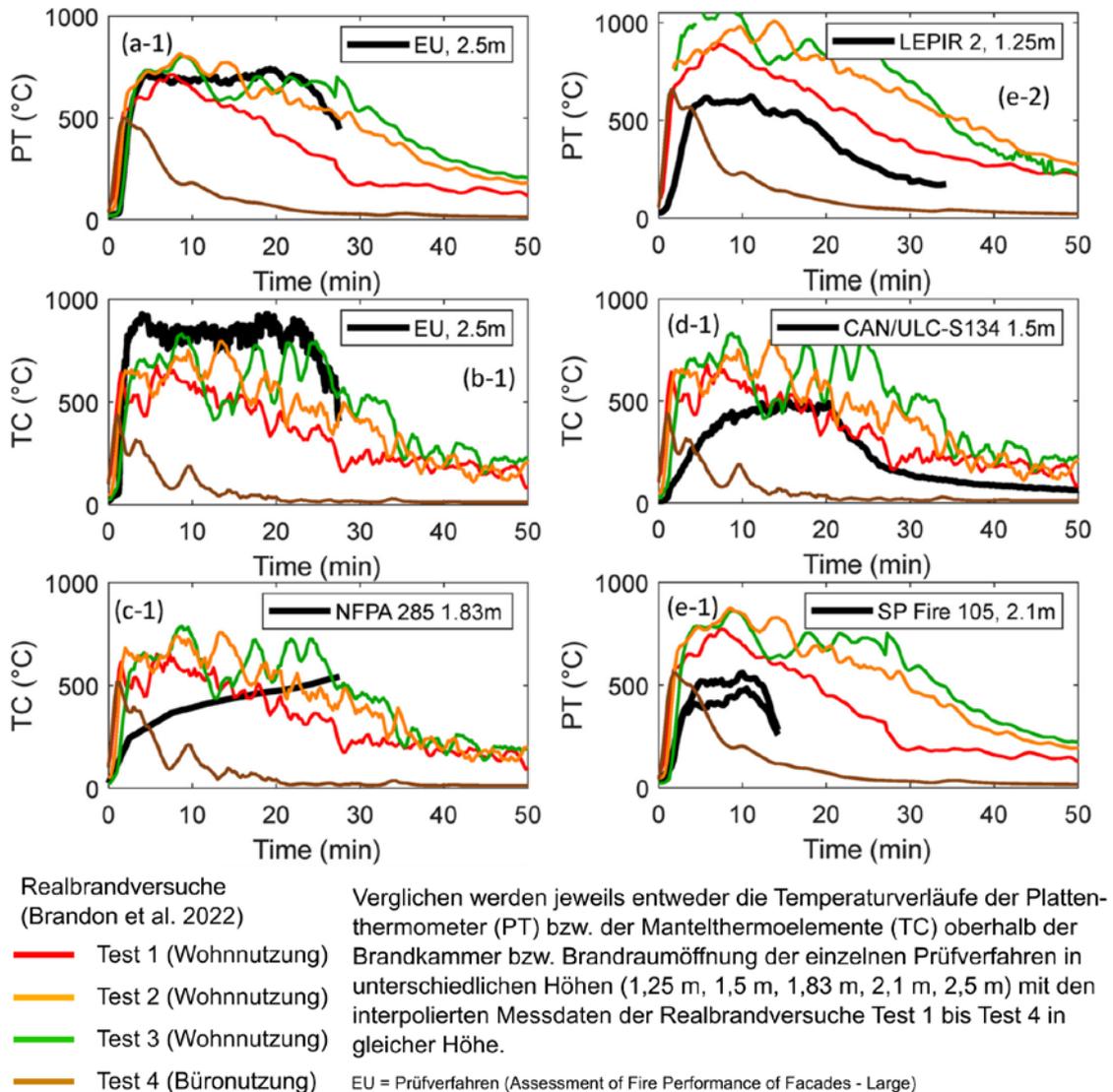


Abbildung 3.3 Vergleich der Temperaturen der Mantelthermoelemente (TC) und der Plattenthermoelemente (PT) der vier Tests (farbig) aus (Brandon et al. 2022) mit denen der Prüfverfahren (LEPIR 2; Assessment of Fire Performance of Facades - Large; SP FIRE 105; NFPA 285; CAN/ULC-S134-13); basierend auf (Sjöström et al. 2023)

Für die Bewertung des selbständigen Mitbrandes der Konstruktion außerhalb des Primärbrandes ist auch bei diesen Prüfverfahren ein Prüfkörper mit ausreichender Höhe notwendig. Die Standardprüfkörperhöhen der meisten Prüfverfahren reichen mit Blick auf Tabelle 2.1 hierfür nicht aus, wie beispielsweise für (Assessment of Fire Performance of Facades - Large) in (Bergius 2023) deutlich wird.

Ziel von PAPER I war es, eine Grundlage für die Beurteilung von normalentflammbaren Holzfassaden zu erarbeiten. Im Verlauf der Untersuchungen von PAPER II, PAPER III, PAPER IV und PAPER V zeigte sich, dass die Brandausbreitung entlang der Fassade besser systematisch (in Abhängigkeit der jeweiligen konkreten Fragestellung, der Materialität und der Konstruktion) zu

untersuchen ist; allgemeine übergreifende Festlegungen sind nicht sachdienlich. Die Formulierung zur Begrenzung der horizontalen Brandausbreitung in PAPER I lautet *„die horizontale Brandausbreitung soll begrenzt sein, d. h., die Fassade darf sich horizontal an beliebiger Stelle max. in einer Breite von in Summe nicht mehr als das Vierfache der Primärflammenbreite (z. B. Fensterbreite) am Brand beteiligen“*. Dies ist aus heutiger Sicht nur als eine gewählte Strategie zu werten und keineswegs als allgemeingültiges Schutzziel zu verstehen. Im vorliegenden Dokument liefern PAPER II, PAPER III, PAPER V und die Abschnitte 3.2.4 und 3.5 konkrete Untersuchungsverfahren für unterschiedliche Fragestellungen bezogen auf die Brandausbreitung entlang der Fassade.

3.2 Holzfassaden aus brandschutztechnischer Sicht

3.2.1 Ergebnisse aus Paper II

Holzfassaden erfordern besondere konstruktive Brandschutzmaßnahmen, um die Brandausbreitung über die Außenwandbekleidung von Geschoss zu Geschoss zu verhindern oder zu begrenzen. Der kritischste Konstruktionsfall sind in diesem Zusammenhang hinterlüftete Holzfassaden, vgl. PAPER II. Im Vergleich zu nichtbrennbaren Fassaden kann eine Kombination aus hinterlüftetem Hohlraum und brennbarem Fassadenmaterial die Brandausbreitung innerhalb des Hohlraums stark erhöhen.

Schwerpunkt von PAPER II ist daher die brandschutztechnisch sichere Planung und Konstruktion von hinterlüfteten Holzfassaden. Zahlreiche in PAPER II ausführlich aufgeführte internationale Forschungsprojekte identifizierten Brandsperren als wesentliche konstruktive Maßnahme, um die Brandausbreitung an Holzfassaden auf ein akzeptables Maß zu beschränken.

Um weitere Erkenntnisse zur wirksamen Begrenzung der Brandausbreitung an Holzfassaden zu erlangen, wurden fünf Brandversuche im Großmaßstab mit verschiedenen Arten von Holzfassadenbekleidungen und unterschiedlichen Brandsperren durchgeführt und in PAPER II mit den bisherigen Erkenntnissen verglichen und ausgewertet. Ziel war es, konstruktive Maßnahmen an Holzfassaden über einen längeren Zeitraum unter Brandbeanspruchung zu untersuchen.

Horizontale Brandsperren, welche die durchgehende Holzschalung und den Lüftungsspalt trennen, können die Brandausbreitung an Holzfassaden wirksam begrenzen. Typischerweise werden horizontale Brandsperren (in der Regel aus Stahlblech, Holz oder mineralischen Baustoffen) in jedem Geschoss in Deckenebene und über die gesamte Fassade ausgeführt. Die Abmessungen und die Ausführung der horizontalen Auskragung vor der Fassadenbekleidung hängen in erster Linie von der Schalungsart der Holzfassade ab.

Der Brand der Holzfassade im Primärbrandbereich ist unvermeidbar und zu akzeptieren, wie in Abschnitt 3.1 dargelegt. Zu begrenzen ist allerdings die vertikale Brandausbreitung über die Primärflamme hinaus, da eine weitere unkontrollierte Brandausbreitung außerhalb des Primärbrandes verhindert werden soll.

Einen maßgebenden Beitrag zur Begrenzung der Brandausbreitung entlang der Fassade liefert der Abschluss der Außenwand, wie in PAPER II ausgeführt. Außenwände aus brennbaren

Baustoffen müssen außenseitig einen Abschluss aus nichtbrennbaren Baustoffen zur hinteren Begrenzung des Lüftungsspalt erhalten. Hintergrund dieser Forderung ist, dass auf der einen Seite die Holzfassade und auf der anderen Seite die Außenfläche der Außenwand den Lüftungsspalt bilden. Bestehen beide Oberflächen aus brennbaren Materialien, breitet sich das Feuer innerhalb des Hohlraums deutlich schneller aus und erreicht schneller größere Höhen.

PAPER II stellt weiter dar, dass die Schalungsart der Holzschalung in Kombination mit der Unterkonstruktion und dem Lüftungsspalt die Brandausbreitung entlang der Fassade stark beeinflussen. Im Allgemeinen war festzustellen, dass geschlossene Schalungen zu einer geringeren Brandausbreitung entlang der Fassade führen als offene Schalungen. Entscheidend für die Brandausbreitung ist der Grad der thermisch bedingten Fugenbildung der Schalung. Eine schnellere Brandausbreitung tritt in der Regel nach Auftreten der ersten Fugen in der Schalung im Bereich der Primärflamme auf. Hintergrund ist, dass die Schalung mehrseitig dem Feuer ausgesetzt wird. Hinsichtlich der Brandausbreitung verhalten sich formschlüssige Schalungen mit z. B. Nut-Feder-Verbindungen, die über eine längere Branddauer durchgehende Fugen verhindern, besser als kraftschlüssige Schalungen.

Im Vergleich zu einer horizontal ausgerichteten Schalung führt eine vertikal ausgerichtete Schalung zu einer schnelleren und stärkeren vertikalen Brandausbreitung. Dies hat zwei Ursachen: Zum einen ist davon auszugehen, dass die Abbrandgeschwindigkeit von Holz in Faserrichtung größer ist als senkrecht zur Faser. Zum anderen trägt die Kreuzlattung ebenfalls zu einer schnelleren Brandausbreitung bei, da die Kreuzlattung typischerweise für vertikal angeordnete Schalungen verwendet wird. Das bedeutet: Sowohl vertikale als auch horizontale Latten werden unter der Schalung angeordnet, wodurch der Lüftungsspalt auf die doppelte Größe anwächst. Der größere Hohlraum und die dreiseitige Brandeinwirkung auf die vertikal verlaufende Lattung beschleunigen die Brandausbreitung in vertikaler Richtung.

Die geschossweise angeordneten, horizontalen Brandsperren sind bezogen auf ihre notwendige horizontale Auskragung vor der Außenwandbekleidung in Abhängigkeit der jeweils zum Einsatz kommenden Schalungsart auszuführen. Dies beschreibt PAPER II. Eine weitere Grundlage ist die nötige form- und kraftschlüssige Befestigung der Brandsperren. Schließlich dehnen sich Brandsperren aus Stahlblech unter thermischer Beanspruchung aus, was zu einer Fugenöffnung zwischen den Befestigungspunkten führt und die Brandausbreitung auf den Bereich darüber begünstigt.

3.2.2 Begrenzung der Tiefe des Lüftungsspalts

Die Tiefe des Lüftungsspalt hinter Holzfassadenschalungen richtet sich, wie Abschnitt 2.4 ausführt, i. d. R. nach der Größe der Lattung und folglich konstruktiven Gesichtspunkten. Die in PAPER II beschriebenen internationalen Brandversuche an Holzfassaden folgen den gleichen konstruktiven Gesichtspunkten. Diese Eingangsparameter sind verantwortlich für innerhalb der Studien aufgeführte Begrenzungen des Lüftungsspalt, da die Ergebnisse i. d. R. auf die tatsächlich untersuchte Konstruktion begrenzt werden.

PAPER II führt weiter aus, dass mit Zunahme des Lüftungsspalt die Brandausbreitung entlang der Holzfassade zunimmt. Zurückzuführen ist dieser Effekt jedoch nicht auf die eigentliche

Größe des Lüftungsspalt, sondern auf die damit konstruktiv einhergehenden Gesichtspunkte, wie Änderung der Faserrichtung der Schalung, dreiseitiger Abbrand der Unterkonstruktion in Faserrichtung usw.

Welchen Einfluss isoliert die Größe des Lüftungsspalt auf eine Brandausbreitung entlang der Fassade hat, konnte PAPER II nicht abschließend klären. International untersuchten nur wenige Studien (Foley et al. 1995; Ingason 1994; Ingason et al. 1998; Karlsson et al. 1995; Livkiss et al. 2018) den Einfluss der Brandausbreitung innerhalb eines Spaltes zwischen zwei Scheiben (Lüftungsspalt). Alle Untersuchungen kommen zu dem Schluss, dass die Flammhöhen mit Reduzierung der Lüftungsspaltgröße (Spalttiefe) zunehmen.

Zuletzt untersuchten (Livkiss et al. 2018) die Flammhöhen bzw. -längen und die Wärmeübertragung in Hinterlüftungsspalten. Hierzu wurde ein Gasbrenner zwischen zwei 1,8 m hohen und 0,8 m breiten Wandscheiben angeordnet. Die Tiefe des Hinterlüftungsspalt variierte zwischen 20 mm bis 100 mm; teilweise wurde auch nur eine Wandscheibe (keine Hinterlüftung) zum Vergleich angeordnet. Neben der visuellen Beobachtung der Flammhöhe im Spalt wurden auch die Strömungsgeschwindigkeiten im Spalt und die einfallende Wärmestromdichte auf der Rückwand gemessen. Anders als bei der Versuchsreihe von (Karlsson et al. 1995) wurde der Gasbrenner in dieser Versuchsreihe nicht mittig im Spalt, sondern direkt an einer der Wandscheiben positioniert. Dieser Aufbau entspricht näherungsweise sehr gut sowohl dem Prinzip einer brennenden Holzschalung als auch eines nichtbrennbaren Abschlusses nach PAPER II. Allerdings kamen bei dieser Untersuchung nur nichtbrennbare Wandscheiben zum Einsatz. (Livkiss et al. 2018)

Abbildung 3.4 zeigt die Ergebnisse der Studie für die Flammenlänge im Hinterlüftungsspalt in Abhängigkeit der Größe des Hinterlüftungsspalt und der Brennerleistung. (L) bezeichnet die Flammenlänge, (W) die Größe des Hinterlüftungsspalt und (Q') die Leistung des Gasbrenners. Dargestellt sind zudem links die Ergebnisse von (Karlsson et al. 1995) und rechts die lineare Korrelation nach (Ingason 1994). Insgesamt zu beobachten war eine bis zu 2,2-fach größere Ausdehnung der Flamme im Vergleich zum Test an nur einer Wand (keine Hinterlüftung). Mit Zunahme der Hinterlüftungsspaltgröße nimmt die Flammenlänge ab. (Livkiss et al. 2018)

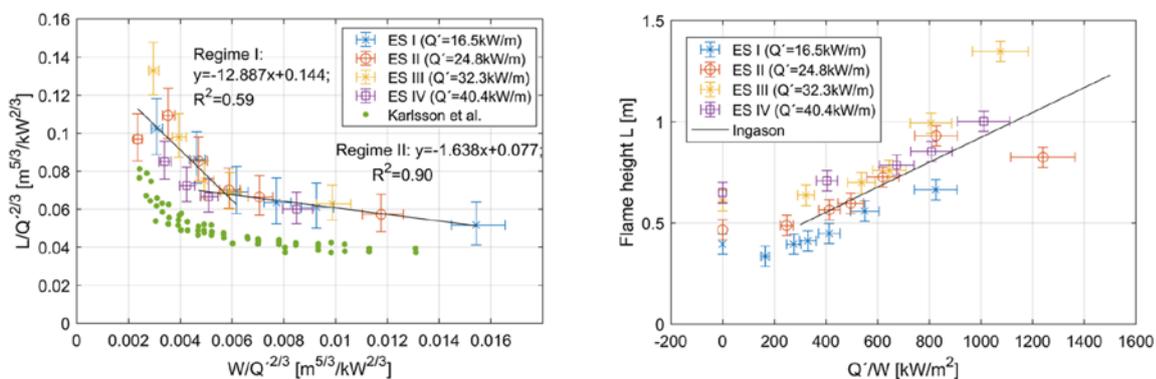


Abbildung 3.4 Darstellung der durchschnittlichen Flammenlängen in Abhängigkeit der Größe des Hinterlüftungsspalt und der Brennerleistung, links mit den Ereignissen aus (Karlsson et al. 1995) und rechts mit der linearen Korrelation nach (Ingason 1994); (L) Flammenlänge, (W) Größe des Hinterlüftungsspalt und (Q') Leistung des Gasbrenners

Fazit: Eine schnellere Brandausbreitung innerhalb des Lüftungsspalt einer Holzschalung ist also per se nicht direkt auf die Vergrößerung des Lüftungsspalt selbst, sondern auf die in PAPER II beschriebenen konstruktiven Veränderungen, wie Ausbildung einer Kreuzlattung, Änderung der Faserrichtung usw., zurückzuführen.

3.2.3 Anwendbarkeit von Holzschindelfassaden

Zur brandschutztechnischen Anwendbarkeit von Holzschindelfassaden waren zum aktuellen Zeitpunkt in den einschlägigen Regelwerken i. d. R. keine Hinweise zu finden. Aus architektonischer Sicht sollen entsprechende Fassaden aber regelmäßig zum Einsatz kommen.

In der Schweiz wurde im Rahmen einer Genehmigungsplanung für ein konkretes Bauvorhaben ein Brandversuch (Stierli et al. 2017) an einer Holzschindelfassade durchgeführt. Anhand des prinzipiellen Aufbaus einer Holzschindelfassade und den Ergebnissen des Brandversuchs lassen sich folgende Prinzipien für einen brandschutztechnischen Betrieb ableiten:

- Eine Holzwerkstoffplatte ist der äußere Abschluss des Lüftungsspalt. Im Bereich der Außenwand wird der Lüftungsspalt durch den nichtbrennbaren Abschluss nach PAPER II begrenzt.
- Auf diese Holzwerkstoffplatte werden die Holzschindel vertikal mit zwei Drittel ihrer Fläche und horizontal zur Hälfte überlappend aufgebracht.
- Die mechanische Befestigung der Schindel erfolgt mittels mehrfacher Befestigungsmitteln über die gesamte Breite je Schindel.

Aufgrund des äußeren Abschlusses des Lüftungsspalt in Form einer Holzwerkstoffplatte verhält sich die Fassade isoliert bezogen auf die Brandausbreitung im Lüftungsspalt wie eine mittels Plattenwerkstoff geschlossene Fassade nach PAPER II. Kritischer verhält sich dafür die Brandweiterleitung entlang der Holzschalung in Form der Holzschindel. Dies tritt vor allem nach einer entsprechenden Alterung der Schindel und der Ausbildung von Fugen und Spalten im Überlappungsbereich auf. Maßgebend sind daher die oben genannten Prinzipien (drei Spiegelstriche) und insbesondere die ausreichende mechanische Fixierung. Sofern diese Gegebenheiten eingehalten sind und die Fassade einer regelmäßigen Pflege und Wartung unterliegt, lässt sie sich für eine brandschutztechnische Bewertung in die Kategorie kraftschlüssige Schalung einordnen; zu wählen sind die entsprechenden Maßnahmen nach PAPER II.

3.2.4 Bewertung von belüfteten Holzfassaden

Eine Alternative zu hinterlüfteten Holzfassaden sind belüftete Holzfassaden. Die Anforderungen an den Holzschutz erfüllt diese Konstruktionsform, wie in Abschnitt 2.4 dargestellt, ebenfalls problemlos. Aus PAPER II (Test 4), (Korhonen et al. 2005) und den unveröffentlichten Versuchsberichten zu (Bart et al. 2019) ist bekannt, dass belüftete Holzfassaden aufgrund des fehlenden Kamineffekts zu einer deutlich geringeren Brandausbreitung neigen als hinterlüftete Holzfassaden im gleichen Zeitraum.

Im Rahmen eines Brandversuchs (Engel 2023a; Fischer 2022) an einem 9 m hohen Fassadenausschnitt, der in einer Innenecke positioniert war und über einen 4 m und einen 3 m breiten Schenkel verfügte, wurde das Verhalten einer belüfteten Holzfassade bezogen auf die

Brandausbreitung für ein konkretes Bauvorhaben untersucht, vgl. Abbildung 3.5. Anhand dieser Versuchsdaten lassen sich ebenfalls allgemeine Rückschlüsse auf die Brandausbreitung bei belüfteten Fassaden ziehen.

Die Holzschalung der Fassade war eine vertikale Nut-Feder-Schalung auf einer Kreuzlattung. Der Lüftungsspalt wies eine Tiefe von 48 mm auf. Die Bewertung der Fassade erfolgte in einem Sockelbrandversuch mit 140 kg Brandlast in Form von vier Holzkrippen mit je 35 kg und den Abmessungen 500 mm x 500 mm in einer Innenecke. Die Holzkrippen wurden direkt in der Innenecke positioniert, vgl. Abbildung 3.5.

Die Fassade wurde als belüftete Fassade ausgeführt. Hierzu waren im Bereich der geplanten Geschosswechsel Kanthölzer mit den Abmessungen 48 mm x 48 mm (Höhe x Tiefe) angeordnet, die den Lüftungsspalt hinter der Holzschalung nach oben hin vollkommen abgeschlossen haben, vgl. Abbildung 3.5. Direkt unterhalb dieser Kanthölzer befanden sich 150 mm hohe nichtbrennbare Dämmpakete, die den Lüftungsspalt im Brandfall zusätzlich schließen. Der Lüftungsspalt wurde im Rahmen des Brandversuches somit auf 198 mm Länge im oberen Geschossbereich vollständig geschlossen, vgl. Abbildung 3.5. Im Bereich der Geschossstöße sollte damit der Abbrand der Holzschalung verlangsamt (einseitiger Abbrand) und die Flammenlängen auf Grund des fehlenden Kamineffektes begrenzt werden. Die belüfteten Fassadenfelder verfügen je Geschoss über 10 mm hohen Zuluftöffnungen (100 cm²/m) für die Fassadenbelüftung, vgl. Abbildung 3.5.

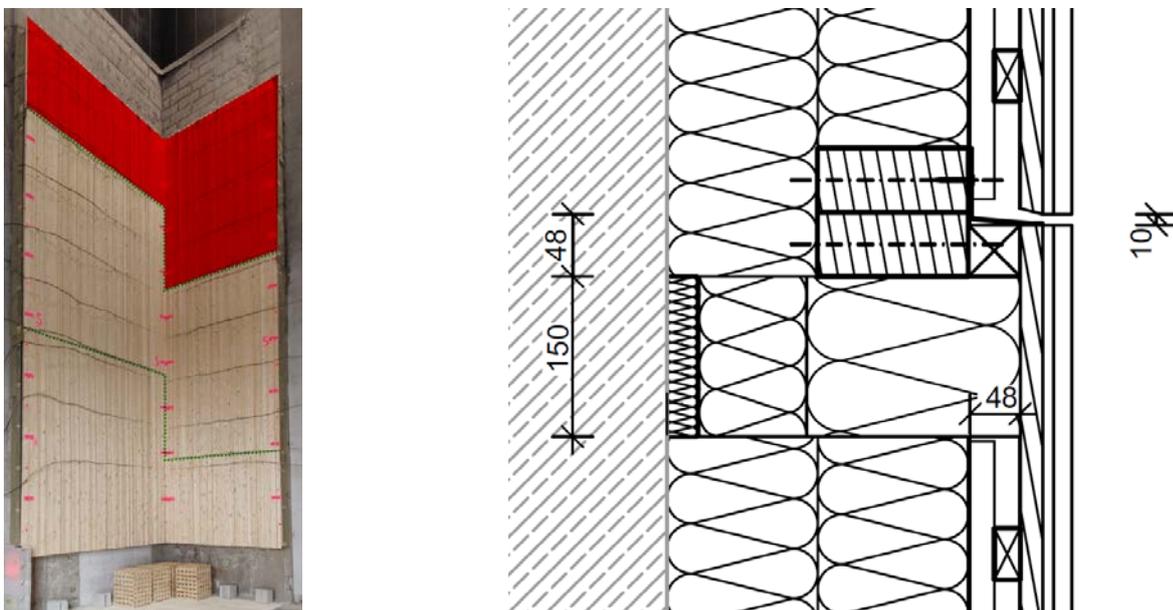


Abbildung 3.5 Links: Fassadenprüfkörper der belüfteten Fassade (Lüftungsspaltverschluss grün gestrichelt) mit Brandlast (Holzkrippen) und Darstellung der hinterlüfteten Bereiche (rot); rechts: Vertikalschnitt des Fassadenaufbaus mit Lüftungsspaltverschluss im Geschosswechsel [Angaben in mm]

Für den Brandversuch wurden an den beiden Schenkeln des Prüfstandes vertikal jeweils drei Fassadenfelder angeordnet, vgl. Abbildung 3.5. Die unteren beiden Fassadenfelder wurden jeweils als belüftete Fassaden und der obere Bereich (rot in Abbildung 3.5) als hinterlüftete Fassade ausgeführt. Aufgrund verspringender Geschossdecken war auch ein Versprung der

horizontalen Brandsperrern direkt in der Innenecke notwendig. In der Innenecke wurde die Fassade mittels drei Kanthölzern (je 48 mm x 48 mm) verblockt und zusätzlich jeweils links und rechts im Bereich des Geschossversprungs ein 150 mm Dämmpaket angeordnet.

Abbildung 3.6 zeigt die Temperaturen zu unterschiedlichen Prüfminuten im Lüftungsspalt, bezogen auf den Fassadenprüfkörper, als Konturgrafik. In den Konturgrafiken sind die Verläufe des Lüftungsspaltverschlusses (Kantholz + Dämmpaket) grau gestrichelt. Oberhalb des letzten Lüftungsspaltverschlusses des jeweiligen Schenkels wurde die Fassade, wie beschrieben, als hinterlüftete Fassade ausgeführt. Die Fassade verfügte über 10 mm hohe Zuluftöffnungen je Geschoss für die Fassadenbelüftung (100 cm²/m). Direkt in der Innenecke erreichten die Flammen nach zweieinhalb Minuten das obere Ende des Fassadenprüfkörpers. Die höchsten Temperaturen innerhalb des Lüftungsspalt wurden im oberen Bereich der hinterlüfteten Fassade erreicht, obwohl sich diese bis auf einem kleinen Bereich direkt im Inneneck außerhalb der Primärflamme der Holzkippen befand.

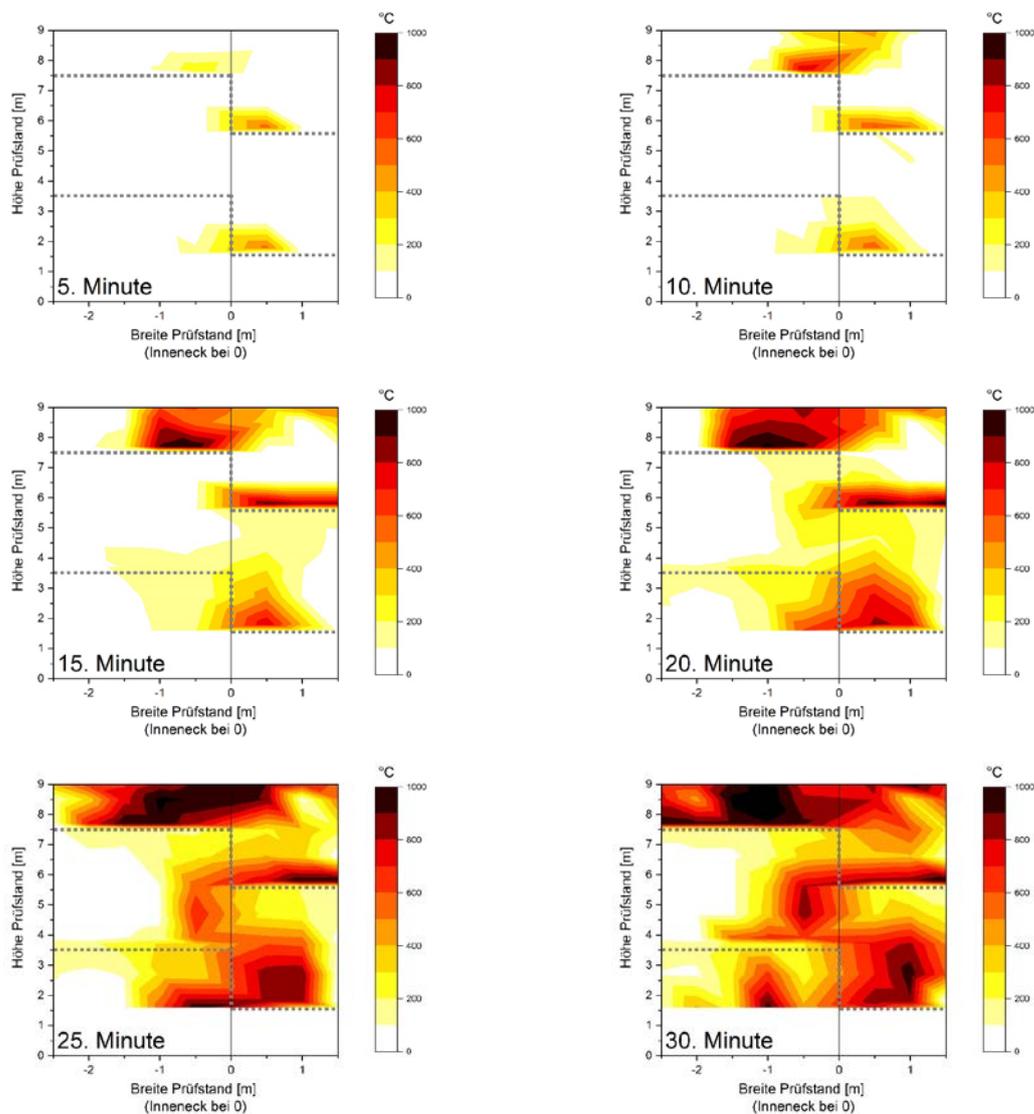


Abbildung 3.6 Temperaturen zur 5., 10., 15., 20., 25. und 30. Prüfminute im Lüftungsspalt der belüfteten Fassade als Konturgrafik

Ursächlich für die höheren Temperaturen im Lüftungsspalt im unteren Fassadenbereich auf der rechten Seite gegenüber der linken Seite sind die 10 mm hohen Zuluftöffnungen. Während rechts die Flammen direkt in die Öffnung und folglich in den Lüftungsspalt eindringen konnten, schützte links eine geschlossene Nut-Feder-Schalung den Lüftungsspalt. Für die Konturgrafiken ist zu berücksichtigen, dass sich im Bereich der Innenecke (0 auf x-Achse) keine Thermo-elemente befanden; die Verläufe zwischen -1 und 1 auf der x-Achse können folglich Ungenauigkeiten aufweisen.

Im unteren, belüfteten Bereich erfolgte der Abbrand der Holzschalung größtenteils im direkt beaufschlagten Primärbrandbereich der Holzrippen. Im oberen Bereich trat außerhalb des Primärbrandes ein im direkten Vergleich stärker Abbrand und eine größere horizontale Brandausbreitung auf. Dies wird auch an Hand des Prüfkörpers nach Versuchsende deutlich. Abbildung 3.7 zeigt den Versuchskörper nach dem Brandversuch und nach Rückbau der Holzschalung. Es ist ersichtlich, dass sich im Bereich der belüfteten Fassade der Abbrand auf den Primärbrandbereich beschränkt. Eine ausgeprägte horizontale Brandausbreitung erfolgte nicht. Im Lüftungsspalt war im belüfteten Bereich die diffusionsoffene Folie und die Unterkonstruktion, anders als im hinterlüfteten Bereich, größtenteils noch in Takt. Die diffusionsoffene Folie bestand aus Polyester-Vlies und wies einen Schmelzpunkt von ca. 250°C auf (Stratmann 1969). Wie Abbildung 3.7 verdeutlicht, breiteten sich in den belüfteten Bereichen Heißgase innerhalb des Lüftungsspalts aufgrund des fehlenden Kamineffekts deutlich geringfügiger aus.



Abbildung 3.7 Fassade (link) direkt nach Brandversuch, (rechts) nach Rückbau der Holzschalung

Der Versuch hat das bezogen auf die Brandausbreitung positivere Verhalten von belüfteten Fassaden erneut bestätigt. Belüftete Holzfassaden bieten folglich aus brandschutztechnischer Sicht Vorteile und sollten weiter untersucht werden. Die in PAPER II beschriebenen Maßnahmen für Brandsperrern beziehen sich größtenteils auf hinterlüftete Fassaden. Mit Blick auf die Ergebnisse wäre es denkbar, diese Maßnahmen für belüftete Fassaden weiter anzupassen. Bei weiteren Untersuchungen sollten folglich die konstruktiven Prinzipien für Brandsperrern, die den selbständigen Mitbrand begrenzen, und der Einfluss, der sich durch das Schließen des Lüftungsspalt auf die Löschmaßnahmen ergibt, im Fokus stehen.

3.3 Brandeinwirkung auf die Fassade durch brennbare Oberflächen im Raum

3.3.1 Ergebnisse aus Paper III

In PAPER III wird untersucht, ob ungeschützte freiliegende oder nur initial geschützte Oberflächen der Holzkonstruktion als strukturelle Brandlast zu einer kritischeren Brandeinwirkung auf die Fassade führen können. Hierzu wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens TIMpuls (Engel et al. 2022) fünf Raumbrandversuche in Originalgröße durchgeführt: drei Versuche in einem quadratischen Raum (4,5 m × 4,5 m) und zwei in einem doppelt so breiten Raum (4,5 m × 9 m). Die Versuche erfolgten mit einer im Vergleich zu anderen internationalen Brandversuchen hohen mobilen Brandlastdichte von 1 085 MJ/m². Der erste Versuch fand in einem Raum statt, der einen nichtbrennbaren mineralischen Massivbau repräsentierte; in den anderen Versuchen wurden die freiliegenden, nur anfangs geschützten Oberflächen der Holzkonstruktion schrittweise vergrößert.

Die gemessene Brandraumtemperatur, die Wärmefreisetzungsrates, die Temperatur an der Fassade, die Flammenhöhen entlang der Fassade, die Wärmestromdichte und die Strömungsgeschwindigkeiten entlang der Fassade stellt PAPER III ausführlich dar.

In der Brandentwicklungs- bzw. -ausbreitungsphase gibt es zwischen den fünf Versuchen fast keine und in der Vollbrandphase nur geringfügige Unterschiede bei den gemessenen Brandraumtemperaturen. Der Einfluss der strukturellen Brandlast zeigt sich bei den durchgeführten Versuchen erst anschließend. Nach den Erkenntnissen aus PAPER III bestimmen den Verlauf der Brandraumtemperatur in der Abklingphase in erster Linie die freiliegenden bzw. nur anfänglich geschützten Holzoberflächen, die sich am Brandgeschehen beteiligen. Zu beachten ist hierbei jedoch, dass bei ventilationsgesteuerten Bränden der Sauerstoffmangel die Verbrennung bestimmt. Je mehr mobile Brandlast vorhanden ist, desto geringer ist der Einfluss der strukturellen Brandlast in der Brandentwicklungs- und Vollbrandphase. Im Vergleich zu den in PAPER III dargestellten Erkenntnissen aus internationalen Untersuchungen fällt der Einfluss der strukturellen Brandlast in diesen Phasen geringer aus, da die fünf Versuche mit verhältnismäßig hoher Brandlast erfolgten.

Die zusätzliche strukturelle Brandlast führte zu einem Anstieg der Temperaturen an der Fassade. Bei den in PAPER III beschriebenen Versuchen traten an der Fassade in der Vollbrandphase maximale Temperaturabweichungen von durchschnittlich ca. 120°C bis 200°C auf. Eine freiliegende Massivholzdecke hat hierbei einen größeren Einfluss als freiliegende Massivholzwände.

Es gab keinen signifikanten Unterschied beim Vergleich der Flammenlängen zwischen den Versuchen in der Brandentwicklungs-, -ausbreitungs-, und Vollbrandphase. Aufgrund der zusätzlichen strukturellen Brandlast verlängerte sich der Brand jedoch zeitlich. Dies führte wiederum zu länger anhaltenden, höheren Flammen an der Fassade.

Eine freiliegende Massivholzdecke führte zu höheren Wärmestromdichten an der Fassade als eine freiliegende Massivholzwand. Nicht bestätigt wurde die in PAPER III auf Basis anderen internationaler Versuche aufgestellte Hypothese, dass die einwirkende Wärmestromdichte auf

die Fassade etwa dreimal so hoch ist, wenn eine Massivholzdecke anstelle einer nicht brennbaren Decke verwendet wird. Der Grund hierfür könnte in den unterschiedlichen Brandlastdichten und der Breite der Öffnung liegen.

Die Ergebnisse der Gasströmungsgeschwindigkeitsmessung an der Fassade stützen aber die Hypothese, dass die Strömungsgeschwindigkeiten mit zunehmender struktureller Brandlast ansteigen.

Fazit aus PAPER III: Die international vorliegenden Erkenntnisse aus Großbrandversuchen reichen derzeit nicht aus, um den Einfluss struktureller Brandlast auf den Fassadenbereich abschließend zu bewerten. Da viele Faktoren wie Geometrie, Öffnungsfaktor, Anordnung der Holzoberflächen, Brandlastdichte, Raumgröße, Schutzzeiten der Bekleidungen etc. eine entscheidende Rolle spielen, lassen sich derzeit keine generellen Aussagen zum Einfluss freiliegender bzw. nur anfangs geschützter Holzoberflächen auf die Brandeinwirkung an der Fassade treffen.

3.3.2 Weitere Erkenntnisse aus aktuellen internationalen Studien

(Kotsovinos et al. 2023) präsentiert in der jüngsten Studie zur „CodeRed“-Versuchsreihe die Ergebnisse eines Realbrandversuches in einem 10,27 m breiten, 34,27 m langem und 3,1 m hohen Raum (352 m²). Alle Parameter, wie Raumgeometrie inkl. Anordnung der Öffnungen, Öffnungsfaktor (0.071 m^{1/2}) und Brandlast (394 MJ/m² auf 174 m²), entsprachen mit Ausnahme der Jahreszeit bei Versuchsdurchführung und der brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung (Kapselung) der Massivholzdecke dem zuvor durchgeführten Versuch „CodeRed #01“. Die Parameter und eine Zusammenfassung der Ergebnisse von CodeRed #01 und weiterer Versuche der Reihe erläutert Abschnitt 2.2 in PAPER III.

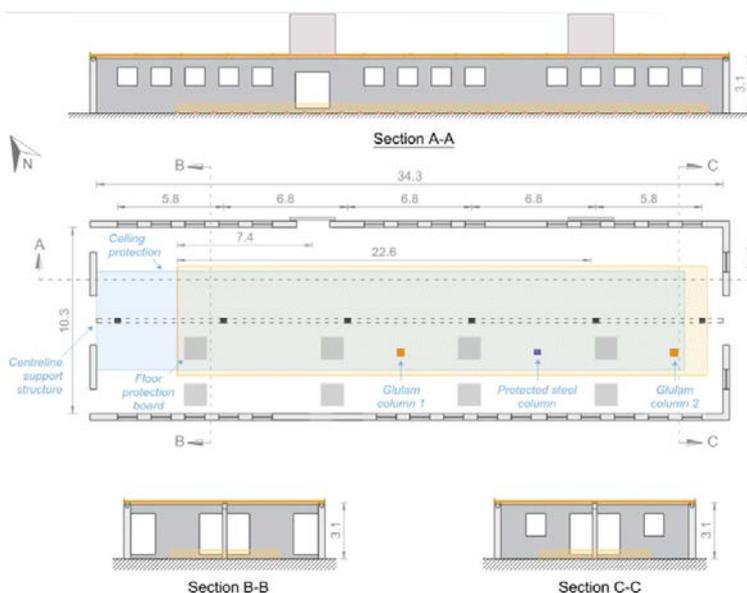


Abbildung 3.8 Grundriss und Schnitte des Brandraums „CodeRed #04“ mit Einheiten in Metern. Die gelbe Fläche zeigt die mobile Brandlast in Form von Holzkrippe und die blaue Fläche den Teil der Decke, der brandschutztechnisch wirksam bekleidet ist (Kotsovinos et al. 2023)

Abweichend zum Versuch „CodeRed #01“ wurden im Versuch „CodeRed #04“ 48 % der Deckenfläche mit einer brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung (Kapselung) versehen. Die brandschutztechnisch wirksam bekleidete Fläche war 160,85 m² groß und wurde in der Mitte des Raumes oberhalb der Brandlast angeordnet, vgl. Abbildung 3.8. Die brandschutztechnisch wirksame Bekleidung (Kapselung) bestand aus drei 12,5 mm dicken Gipsplatten und entsprach der Klassifizierung K₂60 nach (DIN EN 13501-2:2016-12). (Kotsovinos et al. 2023)

Die Hauptwirkung der brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung (Kapselung) war bei der Verringerung der äußeren Flammen im Bereich der Öffnungen zu beobachten: Die Flammenlängen, die aus den Öffnungen schlugen, betrugen etwa 1,5 m. Die Flammenlängen beim identischen Versuch mit komplett ungeschützter Massivholzdecke betrugen im Vergleich 2,5 – 3 m. Dieser Effekt wird auch mit Blick auf die gemessenen Temperaturen deutlich, vgl. Abbildung 3.9. (Kotsovinos et al. 2023)

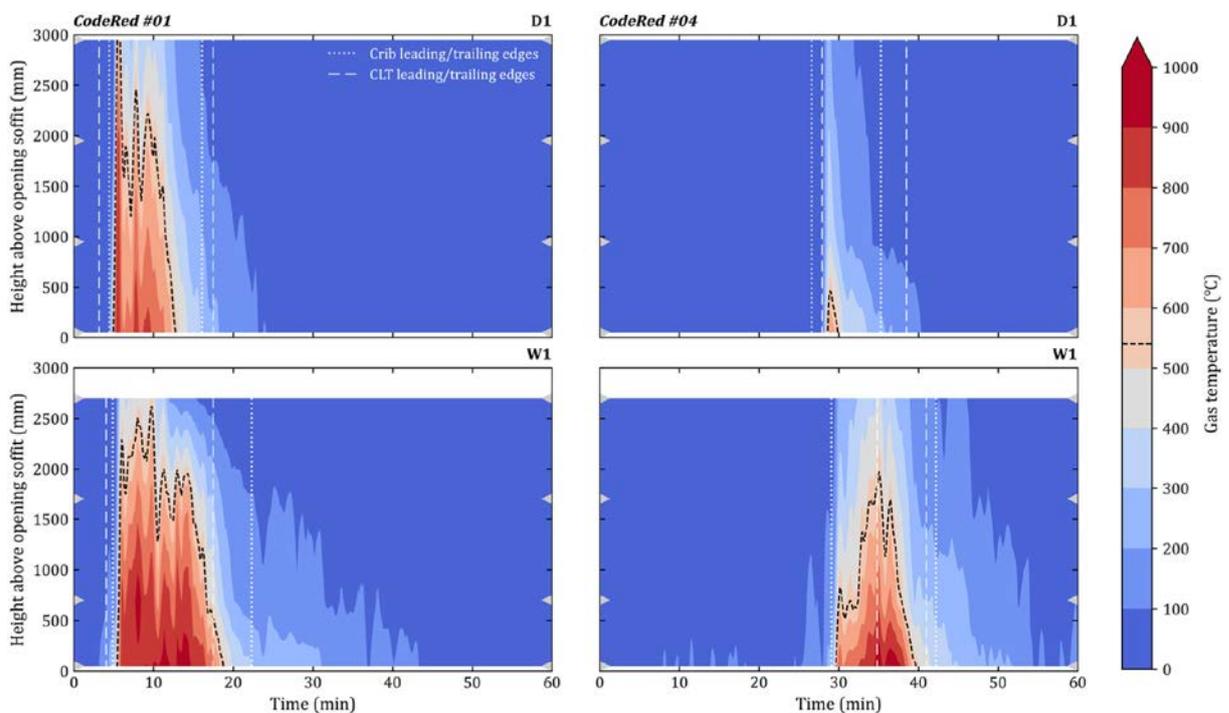


Abbildung 3.9 Temperaturentwicklung an der Fassade oberhalb der Öffnungen D1 (Door) und W1 (Window) während CodeRed #01 und CodeRed #04. Die grauen Dreiecke stellen die Positionen der Thermoelemente dar (Temperaturen dazwischen linear interpoliert) (Kotsovinos et al. 2023)

(Glew et al. 2022) prüften in ihrer Studie die Anwendbarkeit des Berechnungsverfahrens nach (Law et al. 1989), um die Flammenlänge bei Vorhandensein zusätzlicher struktureller Brandlast zu bestimmen. Prinzipien dieses Berechnungsverfahrens führen u. a. (DIN EN 1991-1-2:2010-12) und (DIN EN 1993-1-2:2010-12) auf. Maßgebende Parameter zur Bestimmung der Flammenlänge nach (Law et al. 1989) sind die Brandlast, die Verbrennungsgeschwindigkeit bzw. der Massestrom und die Raum- und Öffnungsgeometrie. Das Verfahren beruht auf der Annahme, dass die Vollbrandphase einsetzt, wenn noch 80 % der Brandlast im Raum vorhanden sind; sie endet, wenn nur noch 30 % übrig sind. Letztlich folgt hieraus, dass sich in der Vollbrandphase die Hälfte der Brandlast im Raum mit konstanter Rate am Brand beteiligt (Law 1978). Die Berechnung berücksichtigt nur die mobile Brandlast. (Glew et al. 2022) überprüfte

das Modell anhand von Versuchsdaten durchgeführter Brandversuche mit zusätzlicher struktureller Brandlast. Diesen Ergebnissen zufolge unterschätzt das (Law et al. 1989)-Modell die Flammenlänge und die Temperatur in Räumen mit hoher struktureller Brandlast teilweise erheblich (Glew et al. 2022). Das Verfahren sollte bei Vorhandensein struktureller Brandlast folglich nicht angewandt werden. Zu berücksichtigen bleibt hierbei, dass bereits (Bartlett et al. 2019b; Empis 2010) Unsicherheiten für dieses Modell, beim Vergleich mit realen Versuchsdaten ohne strukturelle Brandlast, aufzeigte.

3.4 Begrünte Fassaden aus brandschutztechnischer Sicht

PAPER IV ist eine erste Grundlage, um den Stand der Technik zum Brandschutz von begrünten Fassaden darzustellen und in einer ersten orientierenden Versuchsreihe an mittelmaßstäblichen Prüfkörpern erste Tendenzen und Erkenntnisse zum Brandverhalten begrünter Fassaden zu sammeln. Zum Brandverhalten begrünter Fassaden und der daraus folgenden Brandweiterleitung über die Fassaden standen zum damaligen Zeitpunkt (2020) nur wenige Erkenntnisse zur Verfügung.

Im Rahmen von PAPER IV wurden in mittelmaßstäblichen Brandversuchen vier Begrünungen untersucht: Kriechspindel (*Euonymus fortunei*), Blauregen (*Wisteria floribunda*), Wilder Wein (*Parthenocissus quinquefolia*) und eine Pflanzenmischung aus Kräutern und Sträuchern (typisch für wandgebundene Begrünungen). Die Auswertung bereits vorhandener Erkenntnisse und der durchgeführten Versuche ergab: Bei einer Brandbeanspruchung ist mit einem Austrocknen der Begrünung und im weiteren Verlauf mit einer schlagartigen Brandausbreitung („Strohfeuer“) begrenzender Bereiche außerhalb des Primärbrandes zu rechnen. Bei der Kriechspindel und beim Blauregen waren Pflanzenteile jedoch auch nach dem Brandversuch noch vital mit entsprechendem Feuchtegehalt. Entscheidend für die Brandweiterleitung ist zusätzlich die vorhandene tote Pflanzenmasse, die eine zusätzliche Brandlast darstellt. Die Versuche liefern rein orientierende Erkenntnisse. Nicht untersucht wurden klimatische Einflüsse wie Trockenheit im Winter und deren Einfluss auf das Brandverhalten von Begrünungen.

Die Auswertungen lieferten zwei Erkenntnisse: Erstens ist die regelmäßige Pflege und Wartung eine sehr wichtige Grundlage für eine brandschutztechnisch sichere Fassadenbegrünung. Großflächig abgestorbene Pflanzen müssen zeitnah erkannt und entfernt werden. Zweitens weisen die Eigenschaften immergrün und sommergrün aus brandschutztechnischer Sicht jeweils Vor- und Nachteile auf. Immergrüne Pflanzenarten haben im Falle von Nährstoffmangel, Absterben und anderen Faktoren eine auffällige Farbgebung. Damit lässt sich die Pflege der Fassadenbegrünung leichter überwachen. Der Vorteil sommergrüner Pflanzenarten ist ihre in der Regel geringere Totmasse, insbesondere wenn aufgrund des relativ großen Ästeabstandes und der Größe der Kletterhilfe das großflächige Abfallen vertrockneter Blätter ungehindert möglich ist.

Empfehlungen aus PAPER IV: Eine brandschutztechnisch sichere Fassadenbegrünung ist durch die Vorauswahl der Pflanzenart und Konstruktionsform zu gewährleisten. Sofern keine ausreichende Datenbasis zur Verfügung steht, sind orientierende Brandversuche durchzuführen. Maßgebend ist das Brandverhalten der Begrünung außerhalb des Primärbrandbereiches. Weniger effektiv und nur in Einzelfällen sinnvoll erscheint die Anordnung von geschossweisen

Brandsperrern, wie bei Holzfassaden üblich. Die Brandsperrern würden bei selbständig wachsenden Kletterpflanzen überwuchert werden und wären nur durch intensive Wartung und Pflege weiterhin effektiv wirksam.

Fazit aus PAPER IV: Fassadenbegrünungen sind ein umfangreiches Forschungsfeld der Zukunft; insbesondere brandschutztechnische Gesichtspunkte sind weiter zu untersuchen. PAPER IV ist folglich nur als Grundlage für weitere Untersuchungen zu werten und dient nicht als Beurteilungsgrundlage für begrünte Fassaden.

PAPER V präsentiert den ersten Teil einer größeren Untersuchung zum Brandverhalten von begrünten Fassaden. Ziel von PAPER V war, den aktuellen internationalen Forschungsstand zu diesem Themenfeld tiefergehend zu untersuchen und zu diskutieren. Allerdings ist international noch immer wenig Forschung zum Brandverhalten von begrünten Fassaden vorhanden.

Bei begrünten Fassaden handelt es sich entweder um eigenständig wachsende bodengebundene Kletterpflanzen direkt an der Außenwand oder an separaten Kletter- bzw. Rankhilfen oder um wandgebundene Systeme, sogenannte „Living Walls“. „Living Walls“ sind komplexe Systeme mit einem Hinterlüftungsspalt, einer Tragkonstruktion, Fassadenpaneelen, Substrat, Vliesen, Bewässerungssystemen und den Pflanzen selbst. Sie unterscheiden sich von Hersteller zu Hersteller erheblich. Die herstellereigenen Systeme lassen sich nur durch großmaßstäbliche Brandversuche am jeweiligen Gesamtsystem sinnvoll untersuchen. Daher lag der Schwerpunkt der in PAPER V beschriebenen Versuchsreihe auf Kletterpflanzen mit Kletter- bzw. Rankhilfen.

Untersucht wurde die Entflammbarkeit begrünter Fassaden in 40 Brandversuchen im mittleren Maßstab mit der Prüfmethode Single Burning Item (SBI) nach (DIN EN 13823:2020-09). Schwerpunkt der Untersuchung waren insgesamt 25 Kletterpflanzenarten. Der Haupteinflussfaktor auf das Brandverhalten von Pflanzen ist der Feuchtigkeitsgehalt. Ein Vergleich der Wärmefreisetzungsrate von vitalen Pflanzen (normaler Feuchtigkeitsgehalt) zeigt ein vergleichbares Verhalten. Im Verlauf der Beanspruchung kommt es zu kurzen Spitzen der Wärmefreisetzungsrate. Diese Spitzen sind die bekannten, in PAPER IV erstmals erwähnten „Strohfeuer“. Sie entstehen, wenn Teile der Pflanzen durch die Brandeinwirkung austrocknen und sich dann schlagartig entzünden. Die Pflanzenart selbst hat keinen signifikanten Einfluss auf das Brandverhalten. Bei allen Versuchen trat mit vitalen, gepflegten Pflanzen eine horizontale Brandausbreitung in nur sehr geringem Umfang und nach Abschalten des Brenners ein Selbstverlösch auf. Auch ein direkter Vergleich zwischen jungen und alten Pflanzen sowie der Vergleich des jahreszeitlichen Einflusses zwischen Sommer und Winter ergab keinen signifikanten Unterschied bei vitalen, gepflegten Pflanzen.

Ein entscheidender Unterschied lag bei getrockneten Pflanzen vor. Hier trat zu Beginn eine abrupte Wärmefreisetzungsrate auf. Abgestorbene Pflanzen sowie ungepflegte Pflanzen mit einem hohen Anteil an Totholz stellen folglich den kritischsten Fall dar. Pflege und Wartung einer begrünten Fassade sind daher der wichtigste Faktor für die Aufrechterhaltung der Brandsicherheit. Totholz in Form von abgestorbenem Laub, Ästen oder Vogelnestern ist regelmäßig zu entfernen. Außerdem ist stetig zu prüfen, ob die Pflanzen noch vital sind und einen norma-

len Feuchtigkeitsgehalt aufweisen. Zusätzlich sind die Pflanzen regelmäßig zurückzuschneiden. Unkontrolliertes Wachstum kann zu viel Totholz führen – vor allem bei lichtfliehenden Pflanzen.

Im nächsten Schritt ist es notwendig die Erkenntnisse aus den mittelgroßen Versuchen im großen Maßstab zu überprüfen; insbesondere die vertikale Brandausbreitung ist hierbei genauer zu bewerten. Diese Untersuchungen erfolgen im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts Fire-Safe Green (Engel 2023b).

3.5 Begrünte Fassaden in Kombination mit Holzfassaden

3.5.1 Ziel der Untersuchung

Eine zentrale Frage aus Abschnitt 1.3 bezieht sich auf die Wechselwirkungen von Holz- und begrünten Fassaden im Brandfall. Nach den Ergebnissen aus PAPER IV und PAPER V erfolgt die Wärmeabgabe von trockenen Pflanzenteilen innerhalb kurzer Zeitspannen. Diese punktuellen „Strohfeuer“ führen folglich nicht zu einer kontinuierlichen Wärmeabgabe über einen längeren Zeitraum.

Somit ist zu klären, welchen Einfluss ein sehr kurzfristiger Wärmestrom auf die Außenwand, die Fenster und die dahinterliegenden Bereiche hat und welches Risiko damit verbunden ist. Zu untersuchen ist, ob der Wärmestrom einer brennenden begrünten Fassade ausreicht, um eine dahinterliegende Außenwandverkleidung aus Holz zu entzünden und ob die brennende begrünte Fassade brandschutztechnische Maßnahmen, wie sie PAPER II beschreibt, negativ beeinflusst. Konkret: Führt eine begrünte Fassade im Bereich von Brandsperren zu einem Zündschnurreffekt und kann sie Teile der Holzfassade oberhalb der Brandsperren entzünden?

3.5.2 Prüfstand und Brandlast

Der Versuchsstand wies eine Abmessung von 2,5 m × 4,0 m (B × H) auf, siehe Abbildung 3.10. Die Holzfassade in Verbindung mit der begrünten Fassade wurde in einem Bereich von 2,0 m × 4,0 m (B × H) angeordnet. In 2 m Höhe und damit mittig zur Prüfstandhöhe war eine Brandsperre aus Stahlblech angeordnet – gemäß den Vorgaben aus PAPER II zur Trennung der Holzfassade, siehe Abschnitt 3.5.4.

Als Brandlast dienten drei 15 ± 1 kg Holzkrippen, die vor der Fassade für ein Sockelbrandszenario angeordnet wurden, siehe Abbildung 3.10. Die Holzkrippen bestanden aus gehobeltem Fichtenholz mit einer mittleren Rohdichte von ca. 450 kg/m^3 und einer Holzfeuchte von 13,7 % in Form von $40 (\pm 2) \text{ mm} \times 40 (\pm 2) \text{ mm} \times 500 (\pm 10) \text{ mm}$ großen Stäben in versetzten Lagen bei kreuzweiser Anordnung (90°) und einem Holz-Luft-Verhältnis von 1:1. Die Grundfläche einer Holzkrippe betrug $500 \times 500 \text{ mm}$. Die Holzkrippen wurden auf eine 70 mm hohe Unterkonstruktion gestellt, um eine unterseitige Sauerstoffzufuhr zu ermöglichen.

Den Hintergrund für die Dimensionierung der Holzkrippen bezogen auf das Sockelbrandszenario stellten Kalibrierungsversuche mit unterschiedlichen Holzkrippen (12,5 kg, 15 kg, 17,5 kg) im Vorfeld dar. Ziel war es, eine Brandbeanspruchung zu generieren, die den Bereich unterhalb der Brandsperre in 2 m Höhe vollflächig beaufschlagt, ohne dabei die Bereiche der Holzfassade oberhalb der Brandsperre direkt zu entzünden. Die Primärflamme sollte jedoch ausreichen, eine begrünte Fassade, die vor der Brandsperre vorbeigeführt wird, im Bereich oberhalb der Brandsperre zu entzünden. Auf Basis der Kalibrierungsversuche wurden 15 ± 1 kg Holzkrippen gewählt, die eine kontinuierliche Primärflamme von ca. 2,0 m erzeugen, wobei Flammenspitzen bis zu 2,5 m hoch reichen.

Die Versuche wurden im Februar 2023 in München durchgeführt.

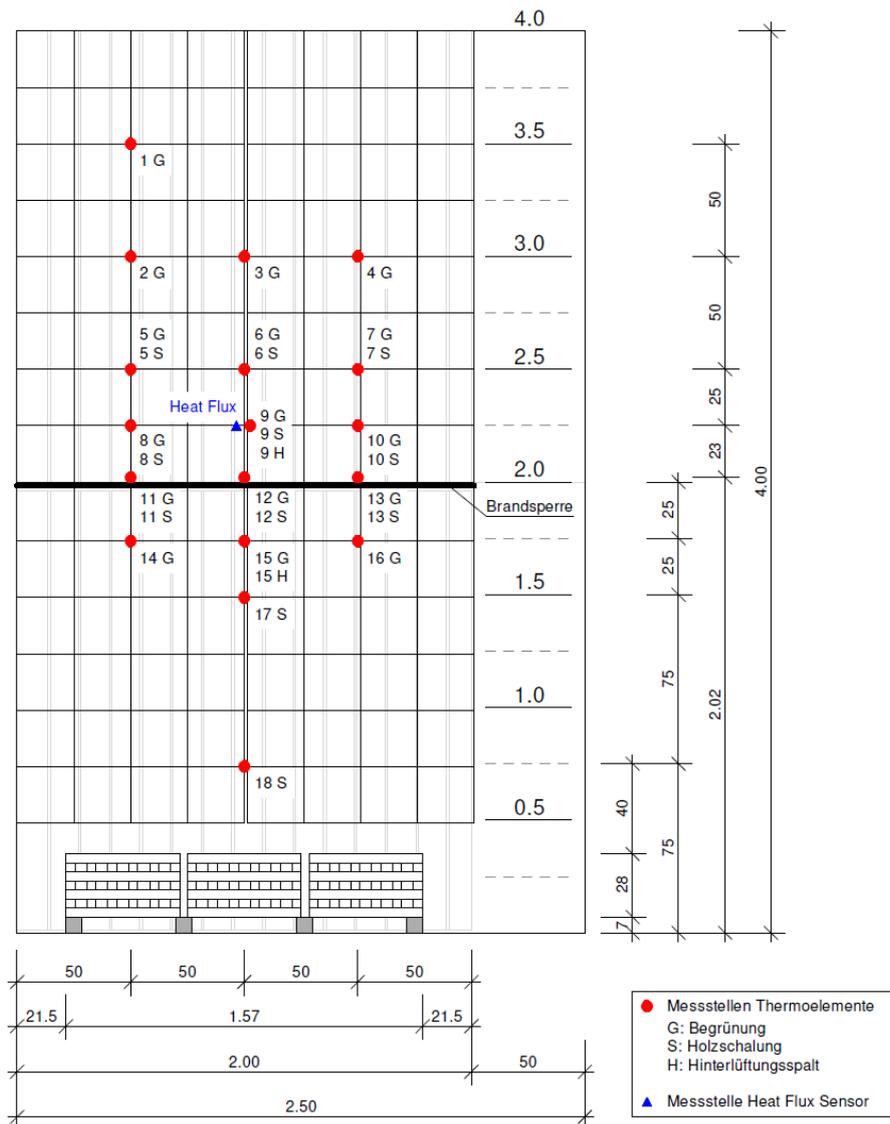


Abbildung 3.10 Ansicht Fassadenprüfstand mit zugehörigen Abmessungen und Messstellen (Schoofs 2023)

3.5.3 Messtechnik

Zur Temperaturmessung wurden 29 Mantelthermoelemente vom Typ K nach (DIN EN 60584-1:2014-07) mit einem Außendurchmesser von 3 mm am Prüfstand angeordnet. Alle Mantelthermoelemente wurden horizontal entlang der Fassade parallel zur Isotherme geführt; befestigt waren sie mit Draht entweder im Hinterlüftungsspalt, auf der Holzschalung oder am Rankgitter. Die Position war mittig im Hinterlüftungsspalt oder auf der Holzschalung bzw. dem Rankgitter.

Die Wärmestromdichte erfasste ein sogenannter „Total Heat Flux Meter“ (ISO 14934-1:2010) vom Typ SBG01 des Herstellers Hukseflux (Hukseflux Thermal Sensors 2023). Dieser wassergekühlte Sensor misst sowohl die Strahlungswärme als auch die konvektive Wärmeübertragung, die auf einer ebenen, schwarzen Fläche aus einem Einfallwinkel von 180° empfangen wird. Die schwarze Beschichtung absorbiert die gesamte Strahlung und wandelt sie im Moment der Absorption in Wärme um. Die Wärme fließt durch den internen Thermopile-Sensor

zum Metallkörper. Der Thermopile-Sensor erzeugt ein Ausgangsspannungssignal, das proportional zur Bestrahlungsstärke ist und vom Datenlogger aufgezeichnet wird. Der wassergekühlte Metallkörper fungiert parallel als Wärmesenke (Hukseflux Thermal Sensors 2023). Der Total Heat Flux Meter SBG01 verwendet den Thermopile-Sensor des Schmidt-Boelter-Modells und die Folientechnologie des Gardon-Modells nach (ISO 14934-4:2014).

Abbildung 3.10 und Abbildung 3.11 zeigen die Positionen der Thermoelemente und des Total Heat Flux Meters. Die Messaufnahme des Total Heat Flux Meters befand sich in der Ebene der Holzschalung (Vorderkante).

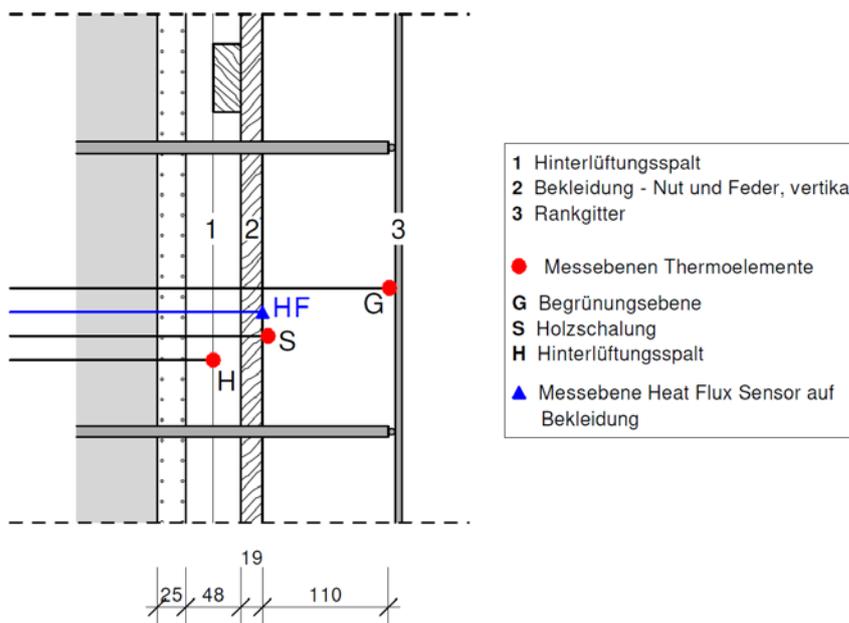


Abbildung 3.11 Schnitt Fassadenprüfstand mit zugehörigen Abmessungen und Messstellen (Schoofs 2023)

Alle Versuche wurden mit einer Videokamera aufgezeichnet.

3.5.4 Prüfkörper

Bei allen drei Versuchen kam als Außenwandbekleidung eine hinterlüftete vertikale Nut-Feder-Fichtenholzschalung zum Einsatz. Die vertikale Nut-Feder-Schalung bestand aus Brettern mit den Abmessungen 2000 mm × 146 mm (Deckmaß 125 mm) × 19 mm (B × H × T). Die Bretter wiesen eine mittlere Rohdichte von 410 kg/m³ und eine Holzfeuchte von 14,1 % auf. Sie wurden auf eine Kreuzlattung mit den jeweiligen Latten-Abmessungen von 24 mm × 60 mm (B × H) aufgebracht. Es ergab sich folglich ein Hinterlüftungsspalt von 48 mm für die Holzschalung. Der rückseitige Abschluss des Hinterlüftungsspalts erfolgte, gemäß den Vorgaben aus PAPER II, durch eine Gipsfaserplatte. Bei Test 2 wurde die verkohlte Holzschalung aus Test 1 im Bereich unterhalb der Brandsperrre wiederverwendet. Da bei dieser Untersuchung nicht die Brandausbreitung entlang der Holzschalung bezogen auf die Zeit im Fokus stand, wird dadurch nicht das Versuchsergebnis für die Untersuchung der Wechselwirkung Holz- und begrünte Fassade oberhalb der Brandsperrre beeinflusst.

Als Brandsperrre kam ein dreifach gekantetes, 3 mm dickes Stahlblech zum Einsatz. Die Brandsperrre kragte 100 mm vor die Holzschalung aus und wurde gemäß Abschnitt 3.5.2 in

2,0 m Höhe angeordnet. Die Brandsperre reichte bis zur Ebene der Gipsfaserplatte. Die Verschraubung der Brandsperre erfolgte gemäß PAPER II alle 200 mm mittels Stahlschrauben bis in die tragende Unterkonstruktion.

Die Rankgitter aus Edelstahl wurden 110 mm vor der Holzschalung angeordnet. Die vier Rankgitter wurden jeweils mittels sechs Gewindestangen, Gewindemuffe und Gewindestift am Prüfstand fixiert. Die Maschenweite der Rankgitter betrug 250 mm.

Test 1 erfolgte als Referenzversuch mit Rankgitter ohne Begrünung. Bei Test 2 und Test 3 bestand die Begrünung aus Efeu (*Hedera helix*). Die Begrünungsdichte und der Feuchtegehalt sind Tabelle 3.1 zu entnehmen. Die Pflanzen waren mehr als 15 Jahre alt und wiesen eine entsprechende Verholzung auf. Die Anordnung der Begrünung zeigt Abbildung 3.12. Die Begrünung war mit Draht an den Rankgittern befestigt. Zweige, Äste und Blätter des Efeus reichten bis an die Holzschalung heran und füllten folglich den Bereich zwischen Holzschalung und Rankgitter, siehe Abbildung 3.13.

Tabelle 3.1 Beschreibung der einzelnen Versuchsaufbauten

Test	Abstand Rankgitter - Schalung [mm]	Begrünungsart	Begrünungsdichte [kg/m ²]	Feuchtegehalt Begrünung ^b [%]
1	110	-	-	-
2	110	Efeu (<i>Hedera helix</i>)	8,3 ^a	195
3	110	Efeu (<i>Hedera helix</i>)	5,8	191

^a nur 3,38 m² (1,5 m x 2,25 m; b x h) der Fassadenfläche im oberen mittleren Bereich; ^b nach 1.4 PAPER V



Abbildung 3.12 Fotodokumentation der angeordneten Begrünung bei Test 2 (links) und Test 3 (rechts)



Abbildung 3.13 Fotodokumentation der Seitenansicht mit Anordnung der Begrünung und Brandsperre



Abbildung 3.14 Brandeinwirkung durch drei 15 kg Holzkippen für den Referenzversuch Test 1 (8. Prüfminute)

3.5.5 Versuchsdurchführung

Die Entzündung der Holzkippen erfolgte jeweils durch 150 ml Isopropanol in Blechwannen. Wie in Abschnitt 3.5.2 erläutert, sollten die drei Holzkippen eine ca. 2 m hohe Primärflamme erzeugen, die den Fassadenbereich unterhalb der Brandsperre flächig beaufschlagt und deren Flammenspitzen ausreichen, um die Begrünung oberhalb der Brandsperre zu entzünden. Die Brandeinwirkung durch die drei 15 kg Holzkippen für den Referenzversuch Test 1 ohne Begrünung zeigt Abbildung 3.14. Die Versuche Test 2 und Test 3 wurden jeweils abgebrochen, wenn oberhalb der Brandsperre keine Begrünung mehr vorhanden war. Test 1 wurde nach 8,5 Minuten, Test 2 nach 11 Minuten und Test 3 nach 7 Minuten beendet und abgelöscht. Ablöscht wurde nur die Holzkippen und der Fassadenbereich unterhalb der Brandsperre. Der Versuchsverlauf ist den Videodateien des digitalen Anhangs aus Abbildung 3.15 zu entnehmen. Nach Versuchsende knüpfte eine 60-minütige Beobachtungszeit der oberen Holzschalung an.

Wie in PAPER IV und PAPER V beschrieben, war im Rahmen der Versuchsdurchführung erneut zu beobachten, dass durch die Brandeinwirkung getrocknete Bereiche der begrünten Fassade kurzzeitig aufflammten. Bei Test 3 erfolgte dies etwas früher als bei Test 2, siehe Videodateien des digitalen Anhangs aus Abbildung 3.15.

Die Versuche wurden an einem windgeschützten Prüfstand im Freien direkt hinter einer Gebäudewand durchgeführt. Die Umgebungstemperatur lag bei durchschnittlich 16,2°C und der durchschnittliche Luftdruck bei 1017 hPA. Die genauen Wetterdaten können (Schoofs 2023) entnommen werden.

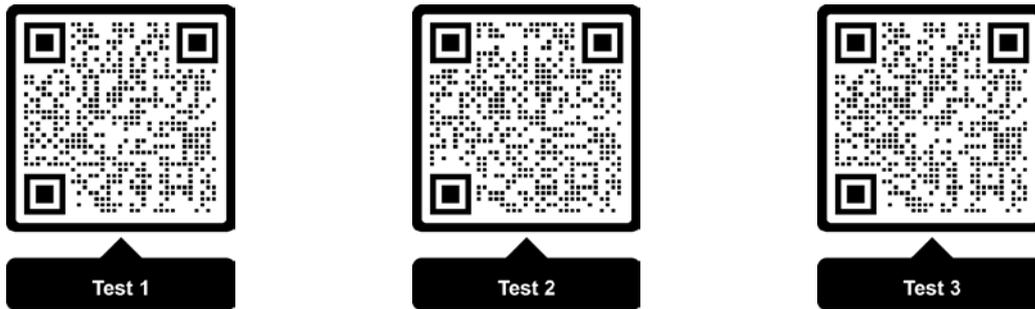


Abbildung 3.15 QR-Code mit Links zu den Videodateien des digitalen Anhangs für Test 1, Test 2 und Test 3

3.5.6 Ergebnisse

Abbildung 3.16 stellt den Temperaturverlauf in Versuchsstandmitte 250 mm unterhalb der Brandsperre in der Ebene des Rankgitters für alle drei Versuche dar. Das Temperatur-Zeit-Diagramm gibt Aufschluss über die Primärflamme der Holzkrippen und die daraus entstehende Einwirkung.

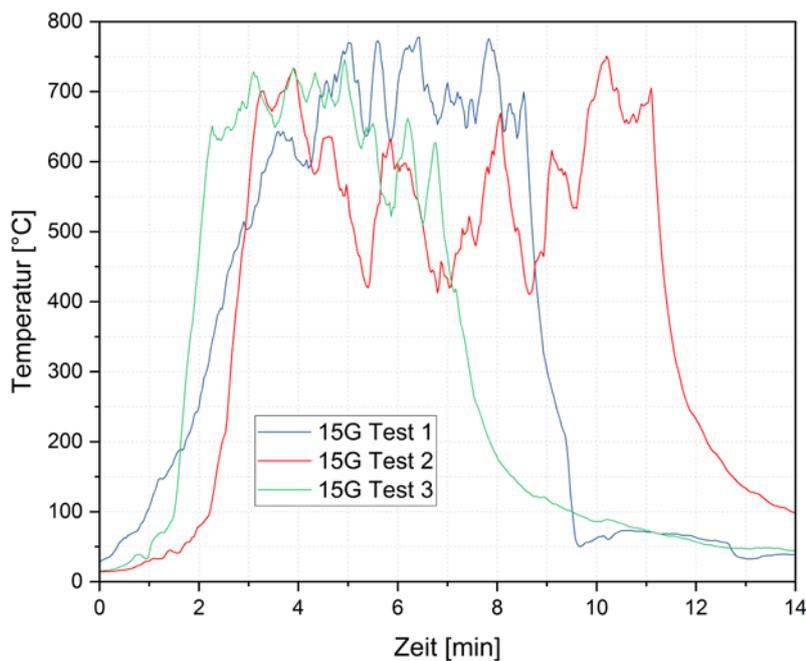


Abbildung 3.16 Temperatur-Zeit-Diagramm für die Messstelle 250 mm unterhalb der Brandsperre für Test 1, Test 2 und Test 3

Abbildung 3.17 bis Abbildung 3.19 zeigen die Temperaturverläufe der Messstellen in der Mittelachse des Prüfstandes oberhalb der Brandsperre sowohl direkt auf der Holzschalung (Messstellen mit Bezeichnung S) als auch im Bereich der Rankgitter (Messstellen mit Bezeichnung G) für Test 1, Test 2 und Test 3. Außerdem enthält Abbildung 3.20 die direkt auf Ebene der Holzschalung gemessene Wärmestromdichte für die drei Versuche.

Die Wärmestromdichte (\dot{q}'') wird durch das Ausgangsspannungssignal des Total Heat Flux Meters am Datenlogger nach Gleichung (3-1) berechnet. Die Empfindlichkeit des Sensors ist im zugehörigen Produktzertifikat angegeben.

$$\dot{q}'' = \frac{U}{S} + \sigma(T + 273,15)^4 \quad [\text{W/m}^2] \quad (3-1)$$

U	[V]	Ausgangsspannung
S	[V/(W/m ²)]	Empfindlichkeit des Sensors $0,463 \times 10^{-6}$ V/(W/m ²)
σ	[W/(m ² K ⁴)]	Stefan-Boltzmann-Konstante $5,67 \times 10^{-8}$ W/(m ² K ⁴)
T	[°C]	Temperatur

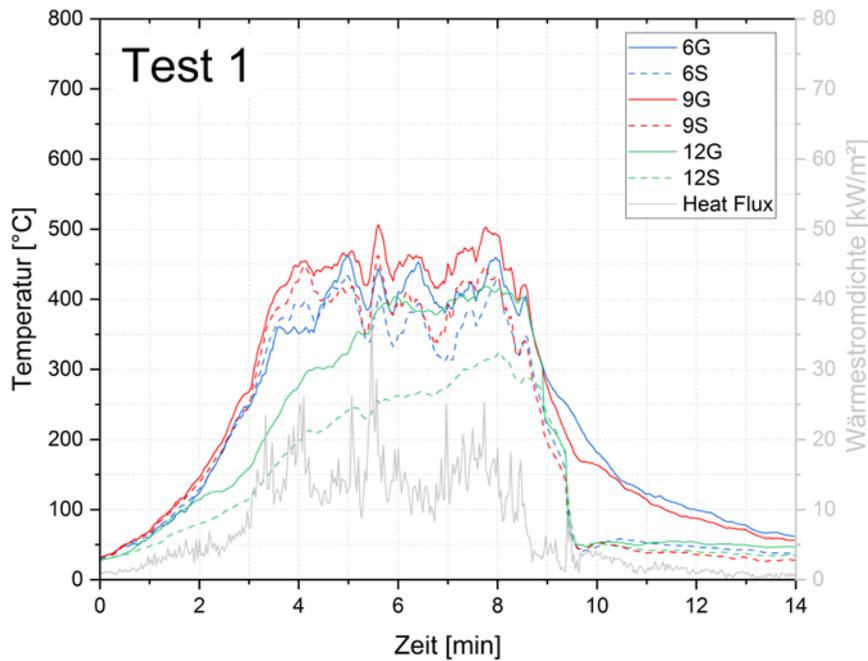


Abbildung 3.17 Temperatur-Zeit-Diagramm für die Messstellen in der Mittelachse des Prüfstandes oberhalb der Brandsperre für Test 1 mit Verlauf der Wärmestromdichte in Grau; Messstellenbezeichnung nach Abbildung 3.10 und Abbildung 3.11

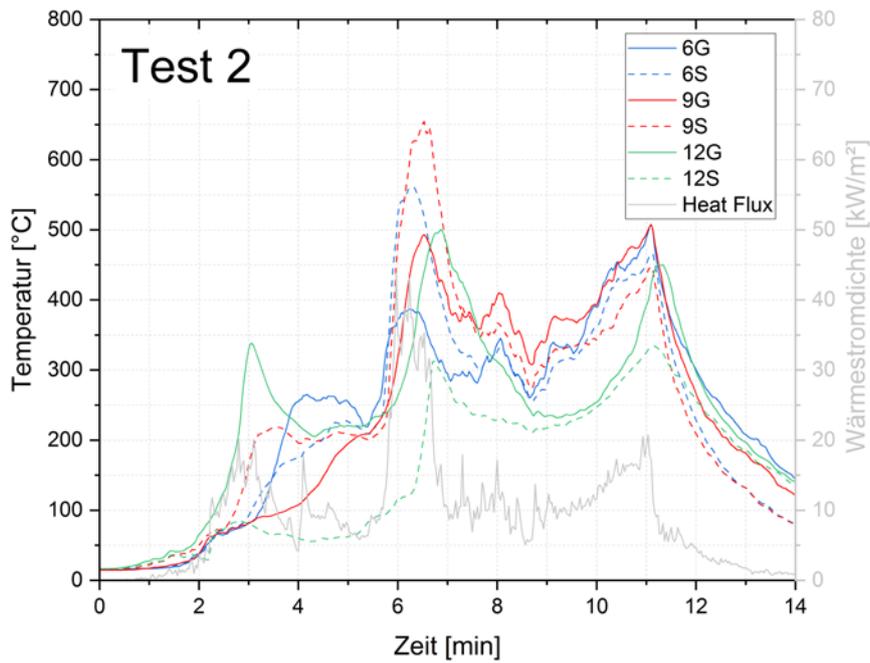


Abbildung 3.18 Temperatur-Zeit-Diagramm für die Messstellen in der Mittelachse des Prüfstandes oberhalb der Brandsperre für Test 2 mit Verlauf der Wärmestromdichte in Grau; Messstellenbezeichnung nach Abbildung 3.10 und Abbildung 3.11

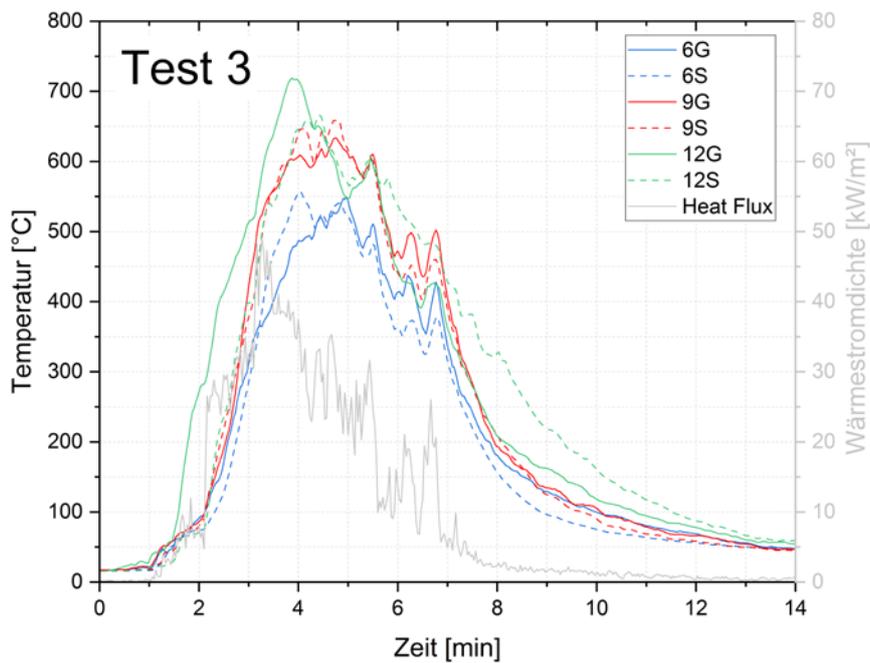


Abbildung 3.19 Temperatur-Zeit-Diagramm für die Messstellen in der Mittelachse des Prüfstandes oberhalb der Brandsperre für Test 3 mit Verlauf der Wärmestromdichte in Grau; Messstellenbezeichnung nach Abbildung 3.10 und Abbildung 3.11

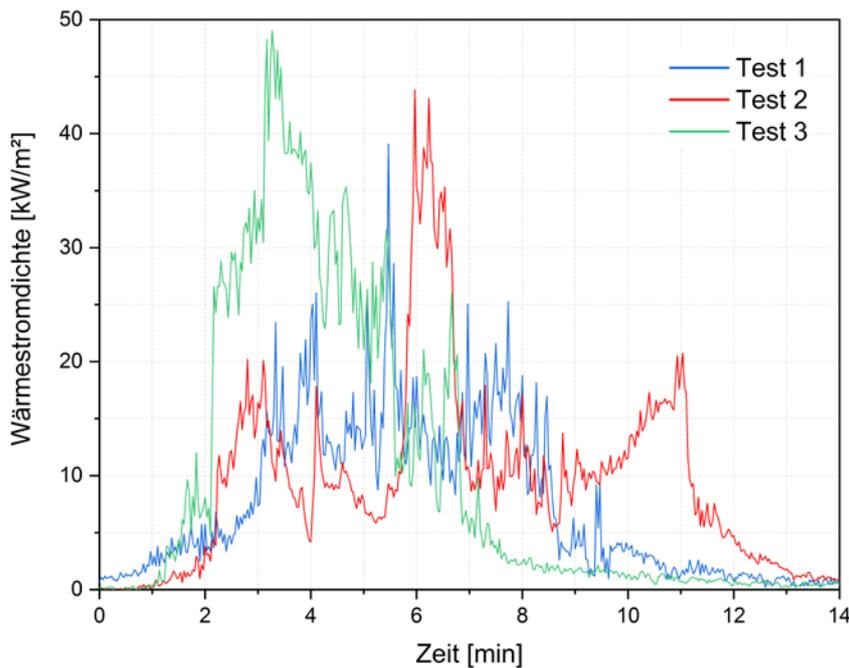


Abbildung 3.20 Gegenüberstellung der Wärmestromdichte für alle drei Versuche

Bei allen drei Versuchen stellte sich weder während der Versuchsdurchführung noch im Rahmen der anknüpfenden Beobachtungszeit ein selbständiger Brand auf der Holzschalung oberhalb der Brandsperre ein.

3.5.7 Diskussion

Im Rahmen der Versuche wurde ein Abstand von 110 mm zwischen Rankgitter und Holzschalung gewählt. Diese Wahl soll eine möglichst kritische Brandeinwirkung der begrünten Fassade aufgrund des geringen Abstandes zur Holzschalung generieren. Aus Abschnitt 2.5 ist bekannt, dass Wandabstände für bodengebundene Begrünungen von 50 mm bis 200 mm zur Kletterhilfe üblich sind (Mahabadi et al. 2018; Pfoser 2018). Diese Richtwerte orientieren sich an typischen mineralischen Außenwänden ohne Brandsperren. Die Bemessung des Wandabstandes muss auf die Pflanzenwahl und folglich die jeweilige Pflanzenwüchsigkeit abgestimmt sein. Ein ausreichender Mindestabstand zur Außenwand ist notwendig, da vor allem Pflanzen mit dichter Blattmasse einen Hitzestau begünstigen und folglich absterben können. Um eine Überhitzung zu vermeiden, muss eine Luftzirkulation an der Fassade durch einen ausreichenden Abstand der Rankgitter zur Außenwand uneingeschränkt möglich sein (Pfoser 2018). Aufbauend auf diesen Erkenntnissen aus der Literatur erfolgte im Rahmen von (Schoofs 2023) eine Umfrage in Planer- und Herstellerkreisen begrünter Fassaden. Die Umfrage ergab mit Blick auf real durchgeführte Projekte einen üblichen Abstand (Mittelwert) von 180 mm für mineralische Außenwände und einen Abstand von ca. 200 mm für Holzfassaden.

Im vorliegenden Anwendungsfall von Holzfassaden sind für mehrgeschossige Gebäude auskragenden Brandsperren aus Stahlblech nach PAPER II in jedem Geschoss notwendig. Die Auskragungen der Brandsperren vor der Holzschalung reichen von 50 mm bis 250 mm je nach Schalungsart. Diese Brandsperren definieren zudem auch einen Mindestabstand der Begrünung zur Außenwand, da die Pflanze auf der einen Seite nicht durch die Brandsperre hindurch

wachsen kann und auf der anderen Seite ein ausreichender Mindestabstand zur Stahlbrandsperrre nötig ist, um eine Überhitzung der Pflanze in diesem Bereich zu vermeiden. Mit Zunahme der Auskrugung der Brandsperrre nimmt auch der Abstand des Rankgitters zur Holzschalung zu; folglich nimmt die Einwirkung aus dem Abbrand der Begrünung aufgrund des größeren Abstandes ab. Dies ist der Grund, warum im vorliegenden Fall eine Nut-Feder-Holzschalung mit verhältnismäßig geringer Auskrugung der Brandsperrren gewählt wurde. Bei einer offenen Schalung ist es weiter möglich, dass der einwirkende Wärmestrom nicht flächig auf die Holzschalung, sondern in Teilen in den Hinterlüftungsspalt einwirkt und dadurch geringe Belastungen auf der Schalung selbst zustande kommen. Eine geschlossene Holzschalung ist aufgrund des geringen Abstandes zur Begrünung und der geschlossenen Oberfläche der kritischste Fall. Für die Versuche wurde ein Mindestabstand von 110 mm zwischen Rankgitter und Holzschalung gewählt. Anders als in der Realität üblich wurde im Rahmen der Versuche die Begrünung direkt bündig vor der 100 mm auskrugenden Brandsperrre vorbeigeführt. Weiter wurde, wie in Abschnitt 3.5.4 beschrieben, der Bereich zwischen Holzschalung und Rankgitter flächig mit Pflanzentrieben eines über 15 Jahre alten Efeus (*Hedera helix*) gefüllt. Die Wahl fiel auf Efeu, da er eine hohe Blattmasse und einen verhältnismäßig großen Triebdurchmesser hat. Die Versuchsanordnung und die Begrünungsdichte nach Abschnitt 3.5.4 sollten eine ungepflegte und folglich mit Blick auf die Brandeinwirkung kritische Fassadenbegrünung simulieren, die zwar nicht über größere Mengen an Totholz verfügte, aber auch nicht regelmäßig zurückgeschnitten wurde. Bei der Begrünungsdichte ist zu berücksichtigen, dass bei selbstständig gewachsenen Kletterpflanzen die verholzten Haupttriebe einen repräsentativen Teil des Gewichtes ausmachen. Im vorliegenden Fall lag der Fokus aufgrund der manuellen Anordnung der Pflanzen auf der Blattmasse, den Jungtrieben und den verholzten Nebentrieben. Diese Teile stellen aufgrund ihrer Fläche und des schnellen Trocknens den größten Teil der kurzweiligen flächenbezogenen Brandleistung dar. Große verholzten Haupttriebe befinden sich direkt am Rankgitter und brennen dort wie Holzquerschnitte kontinuierlich ab.

Zu klären war die Frage, ob eine begrünte Fassade im Bereich von Brandsperrren zu einem Zündschnurreffekt führt und sich Teile der Holzfassade oberhalb der Brandsperrren aufgrund der brennenden Pflanzenmasse entzünden können. Für die Untersuchung wurde der beschriebene Versuchsaufbau gewählt. Der mittelmaßstäbliche Versuchsaufbau ist in diesem Fall repräsentativ, da die Pflanzenmasse und -anordnung die eigentlich mögliche flächenbezogene Brandleistung bzw. maximale Wärmefreisetzung der Begrünung bestimmen und nicht die Größe des Versuchsstandes oder die Größe der Brandeinwirkung.

Bei beiden Versuchen mit angeordneter Begrünung stellte sich weder während der Versuchsdurchführung noch im Rahmen der anknüpfenden Beobachtungszeit ein selbständiger Brand auf der Holzschalung oberhalb der Brandsperrre ein. Dies lässt sich am besten visuell an den beiden Holzschalungen nach Beendigung der Brandversuche beurteilen, siehe Abbildung 3.21. Eine Verfärbung und Verkohlung stellte sich in Teilbereichen der Holzschalung aufgrund der Brandeinwirkung aus der Begrünung ein. Am intensivsten fiel die Verkohlung im mittleren, unteren Bereich der Fassade direkt oberhalb der Brandsperrre aus. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich einzelne Holztriebe des mit Draht befestigten Efeus nach Abbrand der Blätter und Jungtriebe vom Rankgitter lösten und auf der Brandsperrre abbrannten. Die auf der Brandsperrre brennende Pflanzenmasse ist in den Videos (siehe Abbildung 3.15) zu erkennen. Auch diese Brandeinwirkung führte nicht zu einem selbständigen Brand der Holzfassade in diesem

Bereich. Die direkte Brandeinwirkung auf den unteren Bereich der Holzschalung durch brennende Pflanzenteile auf der Brandsperre wäre für offene Schalungen infolge der dreiseitigen Brandeinwirkung auf den Holzquerschnitt kritischer als im vorliegenden Fall. Aufgrund des beschriebenen größeren Abstandes der Begrünung zur Holzschalung und der größeren Auskragungen der Brandsperren von 200 mm bis 250 mm ist jedoch bei offenen Schalungen nicht mit einer Brandeinwirkung direkt an der Holzschalung zu rechnen.



Abbildung 3.21 Fotodokumentation der Holzschalung oberhalb der Brandsperre nach Beendigung des Versuches und der Beobachtungszeit für Test 2 (links) und Test 3 (rechts)

Mit Blick auf die gemessene Wärmestromdichte im Bereich der Holzschalung ausgehend vom Brand der Begrünung ist feststellbar, dass Test 2 Spitzenwerte über 30 kW/m^2 und Test 3 Spitzenwerte über 40 kW/m^2 erreichte, die mehrere Minuten anhielten, siehe Abbildung 3.17.

Bekannt ist, dass die Entzündung eines Materials u. a. von der Einwirkungsdauer abhängig ist. Bei langen Einwirkungszeiten (Monate bis Jahre) kann sich Holz entzünden, obwohl die Oberflächentemperatur des Holzes niedriger ist als die Entzündungstemperatur, die bei Tests mit kurzer Dauer (Minuten bis Tage) ermittelt wurde (Babrauskas 2002; Babrauskas 2003).

Bei der Entzündung von Holz ist zwischen der Entzündung mittels Pilotflamme und der Selbstentzündung rein aus der Strahlungswärme (ohne Pilotflamme) zu unterscheiden. Bei der Entzündung mittels Pilotflamme ist zu beachten, dass die Pilotzündung nur erfolgt, wenn sich die Pilotflamme innerhalb des Pyrolysegasstroms befindet. Bei größeren Entfernungen, jenseits des Pyrolysegasstroms, geht die Zündung nicht von der Pilot- bzw. Zündflamme aus. (Simms et al. 1958; Simms 1963) Mit Blick auf die kurzen Strohfeuer und den großen Abstand der Begrünung zur Holzschalung steht, neben der Entzündung mittels Pilotflamme, folglich auch die Selbstentzündung mittels Strahlungswärme im Fokus.

Im Gegensatz zur Entzündung mittels Pilotflamme und kontinuierlicher Beaufschlagung untersuchten nur wenige Forschende die Selbstentzündung von Holz unter Strahlungswärme (Babrauskas 2002). Tabelle 3.2 zeigt einige ermittelte Entzündungszeiten durch Strahlungswärme in Abhängigkeit der Wärmestromdichte unterschiedlicher Studien.

Tabelle 3.2 Ermittelte Entzündungszeiten durch Strahlung in Abhängigkeit der Wärmestromdichte unterschiedlicher Versuchsreihen für Holz

Quelle	Orientierung	Feuchtegehalt [%]	Beaufschlagte Fläche [mm]	Zeit bis zur Entzündung [s]	Wärmestrom- dichte [kW/m ²]
(Jaskółowski et al. 2014)	Horizontal	9,2-9,6	100 × 100	509-865 59-194 20-46	20 30 50
(Lawson et al. 1952)	Vertikal	0	50 × 50	10 70	52-63 33-36
(Simms et al. 1958)	Vertikal	0	50 × 50	abh. Abstand	25
(Simms 1961)	Vertikal	0	k. A.	8 16	105-140 80-100
(Simms et al. 1967)	Vertikal	0	76 × 76 150 × 150	45-93 79-130	46-79 42-46
(Shi et al. 2013)	Horizontal	10,2-12,1	100 × 100	23-119 10-27	50 75
(Shields et al. 1993)	Vertikal			40-59	50
	Horizontal	k. A.	100 × 100	42-96	40
	Horizontal			16-38	50

Auch die Dicke der Holzschalung hat, neben weiteren Faktoren wie beispielsweise der Dichte oder der Holzart (Simms et al. 1967), Einfluss auf die Entzündungszeit (Babrauskas 2003). Dies verdeutlichen beispielhaft die nachfolgenden Studien.

(Kim et al. 1992) führten Versuche mit einem Cone-Kalorimeter durch und ermittelten für ein 6 mm dickes Holzpaneel (Rohdichte 780 kg/m³) eine Entzündungszeit von 248 s bei einer Wärmestromdichte von 25 kW/m² und von 60 s bei 50 kW/m². Für ein 3 mm dickes Holzpaneel (Rohdichte 617 kg/m³) ermittelten sie eine Entzündungszeit von 121 s bei einer Wärmestromdichte von 25 kW/m² und von 43 s bei 50 kW/m².

(Mikkola 1989) führte Versuche mittels Cone-Kalorimeter an Fichtenholzpaneelen durch. Die Fichtenholzpaneele wiesen eine Rohdichte von 440 kg/m³ und eine Holzfeuchte von ca. 10 % auf. Die Ergebnisse sind Tabelle 3.3 zu entnehmen.

Tabelle 3.3 Einfluss der Dicke auf die Entzündung von Fichtenholzpaneelen; basierend auf (Babrauskas 2003)

Dicke [mm]	Entzündungszeit [s] bei bestimmten Wärmestromdichten [kW/m ²]					
	15	20	30	40	50	70
2	-	83±15	32±6	23±4	16±3	-
6	-	285±25	54±7	36±5	14±4	10±3
37	2070±150	470±70	63±10	38±4	16±3	8,5±1,5

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich die Ergebnisse zum Teil stark unterscheiden und keine ausreichende Datengrundlage zur Verfügung steht um die Entzündungszeit in Abhängigkeit der Wärmestromdichte für Holz abschließend zu bewerten. (Babrauskas 2002) zufolge haben die meisten Forschenden viel zu kurze und in der Anzahl zu wenige Tests durchgeführt, um die Randbedingungen festzulegen. Seine Schlussfolgerung ist, dass sich Holz bei etwa 4,3 kW/m² selbst entzündet, wenn eine Belastung nicht nur Minuten, sondern

Stunden auftritt und für kurzzeitige Einwirkungen ein Wert von 20 kW/m^2 am besten den vorhandenen Forschungsergebnissen entspricht. (Bartlett et al. 2019a) verglich ebenfalls die vorhandenen Untersuchungen und stellte fest, dass die Studien ihm vorliegenden einigermaßen übereinstimmen und dass die kritischen Wärmestromdichten für die Zündung mit Pilotflamme bei etwa 10 bis 13 kW/m^2 bzw. für die Zündung ohne Pilotflamme bei 25 bis 33 kW/m^2 liegen. Diese Wertebereiche werden auch durch (White et al. 2001) bestätigt.

Die im Rahmen der Versuche gemessenen Wärmestromdichten auf der Holzschalung lagen, mit Blick auf Größe der Beanspruchung, über den zuvor aufgeführten Werten für eine Selbstentzündung. Die Dauer der Einwirkung war jedoch verhältnismäßig kurz und lag teilweise unter den in Tabelle 3.2 aufgeführten Werten. Die Holzschalung verkohlte im Rahmen der Versuche zwar in Teilbereichen (Beginn der Pyrolyse), siehe Abbildung 3.21; ein aktives Brennen der Schalung stellte sich jedoch nicht ein. Zurückzuführen sind die Unterschiede in den Wertebereichen auf die geringe Datengrundlage, die Unterschiede bei der Holzfeuchte (Moghtaderi et al. 1997; Werther 2016), den Fakt, dass es in der Vergangenheit abweichende Definitionen für den Zeitpunkt der Entzündung (Beginn der Verkohlung bzw. des Pyrolyseprozesses gegenüber dem Einstellen einer Flamme) gab (Babrauskas 2002), und die Unterschiede, die durch die Prüfanordnung und das Prüfgerät selbst entstehen können (Babrauskas 2002; Bartlett et al. 2019a). Weiter bleibt zu berücksichtigen, dass der Sensor im Versuch für Messbereiche von 5 bis 25 kW/m^2 kalibriert war. Bei höheren Messbereichen kann es laut Herstellerangabe zu Ungenauigkeiten kommen, die jedoch nicht weiter quantifiziert werden können.

Die Temperatur-Zeit-Diagramme lassen weiter den Schluss zu, dass eine größere Menge vitaler Pflanzenmasse eine längere Zeit braucht, um auszutrocknen. Damit einhergehend schützt die vitale, stärker begrünte Fassade anfänglich eine größere Zeitspanne vor der direkten Einwirkung der Primärflamme, siehe Abbildung 3.17.

3.5.8 Fazit

Ein möglicher Abbrand der Begrünung führt nicht zu einer Entzündung der dahinterliegenden Holzfassade. Voraussetzungen hierfür sind ein Mindestabstand von 110 mm zwischen Rankgitter und Holzschalung und eine regelmäßige Pflege und Wartung der Begrünung, bei der Totholz entfernt wird.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war, das Brandverhalten von Holz- und begrünten Fassaden zu untersuchen und aus den Ergebnissen Vorschläge für brandschutztechnisch sichere Konstruktionen abzuleiten. Zu berücksichtigen war dabei auch ein möglicher Einfluss des mehrgeschossigen Holzbaus aufgrund zusätzlicher struktureller Brandlast auf den Fassadenbrand. Fokus der Untersuchung von entsprechenden brennbaren Fassaden im Rahmen von Brandversuchen war die Beobachtung der Brandweiterleitung entlang der Fassade. Zu bewerten waren der selbständige Mitbrand der Fassade, die Wirkungsweise von konstruktiven brandschutztechnischen Maßnahmen außerhalb des Primärbrandbereiches und der Einfluss der Primärflamme auf die Fassadenkonstruktion.

Brandschutztechnisch sichere Holzfassaden lassen sich durch konstruktive Maßnahmen auch bei mehrgeschossigen Gebäuden erreichen. Um die Brandausbreitung über die Holzfassade von Geschoss zu Geschoss zu begrenzen, sind besondere konstruktive Brandschutzmaßnahmen in Form von Brandsperren notwendig. Einen maßgebenden Beitrag zur Begrenzung der Brandausbreitung entlang der Fassade leisten der Abschluss der Außenwand, die Schalungsart der Holzfassade in Kombination mit der Unterkonstruktion und natürlich die Brandsperre selbst. Im Allgemeinen war festzustellen, dass geschlossene Holzschalungen zu einer geringeren Brandausbreitung entlang der Fassade führen als offene Schalungen.

Die zusätzliche Brandlast, die sich für mehrgeschossigen Holzgebäude aus ungeschützten oder nur initial geschützten Konstruktionen ergibt, hat einen Einfluss auf den Fassadenbrand. Sie kann zu einem Anstieg der Temperaturen, zu größeren Flammenlängen, einer höheren Wärmestromdichte und zu zeitlich schneller aus der Öffnung schlagenden Bränden an der Fassade führen. Insgesamt zeigt sich, dass aktuell die international vorliegenden Erkenntnisse aus Großbrandversuchen nicht ausreichen, um diese Frage abschließend zu beantworten. Viele Faktoren spielen dabei eine entscheidende Rolle: Zu nennen sind Geometrie, Öffnungsfaktor, Anordnung der Holzoberflächen, Brandlastdichte, Raumgröße, Schutzzeiten der Bekleidungen usw. Daher lassen sich derzeit noch keine generellen Aussagen zum Einfluss freiliegender bzw. nur anfangs geschützter Holzoberflächen auf die Brandeinwirkung an der Fassade treffen. Auf jeden Fall ist dieser Einfluss bei der Konstruktion von entsprechenden Fassaden zu berücksichtigen. Die Kombination außergewöhnlich kritischer Einwirkungen auf die Fassade aufgrund der zusätzlichen strukturellen Brandlast gilt es zu vermeiden. Beispielsweise wenn alle Umfassungsbauteile eines Raumes ungeschützt und freiliegend sind und eine

kritische Variante einer Holzfassade wie eine offene vertikale Holzschalung vorliegt. Zudem sind die aktuell verfügbaren Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Flammenlängen aus Öffnungen nicht für die Anwendungsfälle mit zusätzlicher struktureller Brandlast ausgelegt und validiert und folglich kritisch zu hinterfragen.

Für die brandschutztechnische Bewertung von begrünten Fassaden gibt es aktuell nur wenige Untersuchungen. Mittelmaßstäbliche Brandversuche zeigten: Haupteinflussfaktor auf das Brandverhalten von Pflanzen ist der Feuchtigkeitsgehalt. Die Pflanzenart selbst spielt eine untergeordnete Rolle in Bezug auf das Brandverhalten und ist nach diesen Erkenntnissen, – zumindest für die untersuchten Varianten – zu vernachlässigen. Auch der direkte Vergleich von jungen und alten Pflanzen sowie der Vergleich eines jahreszeitlichen Einflusses von Sommer und Winter zeigte keinen signifikanten Unterschied bei vitalen, gepflegten Pflanzen. Im Verlauf von Bränden an begrünten Fassaden kommt es zu kurzen Wärmefreisetzungsspitzen. Diese Spitzen werden als „Strohfeuer“ bezeichnet. Sie entstehen, wenn Teile der Pflanzen durch die Brandeinwirkung austrocknen und sich dann schlagartig entzünden. Bei vitalen, gepflegten Pflanzen tritt eine horizontale Brandausbreitung nur in sehr geringem Umfang auf. Weiter verhalten sich vitale begrünte Fassaden nach Ende der Primärbrandeinwirkung selbstverlöschend.

Für eine Kombination aus Holz- und begrünter Fassade lässt sich festhalten, dass ein Abbrand der Begrünung nicht zu einer Entzündung der dahinterliegenden Holzfassade führt. Voraussetzung ist ein Mindestabstand von 110 mm zwischen Rankgitter und Holzschalung und eine regelmäßige Pflege und Wartung der Begrünung.

Im Rahmen der Untersuchung wurden auf Basis experimenteller Untersuchungen brandschutztechnische Prinzipien für eine sichere Konstruktion erarbeitet. Einige Fragen blieben jedoch offen. Zudem ergaben sich aus den Untersuchungen neue Fragen. Insbesondere sind folgende Punkte genauer zu untersuchen:

Brennbare biogene Fassaden im Allgemeinen

- Brandversuche an brennbaren biogenen Fassaden im Großmaßstab mit einer realistischen Brandeinwirkung sollten mit üblicherweise auf EPS WDVS ausgerichteten Normprüfverfahren verglichen werden, um deren Anwendbarkeit für diese Fassadenarten zu prüfen. Im Fokus sollte dabei die Vergleichbarkeit vorliegender Erkenntnisse aus standardisierten Prüfverfahren mit realen Brandbedingungen stehen.

Holzfassaden

- Die konstruktive Ausbildung von Brandsperren in Innenecken ist weiter zu untersuchen. Die aktuellen, international verfügbaren Festlegungen zu diesem Thema beruhen in der Regel allesamt auf wenigen Versuchen und wurden folglich eher über getroffene Annahmen festgelegt.
- Die notwendigen konstruktiven Maßnahmen für brandschutztechnisch sichere belüftete Holzfassaden sind genauer zu untersuchen. Aktuell orientieren sich die meisten experimentellen Untersuchungen und Festlegungen am kritischsten Fall und folglich

an der hinterlüfteten Holzschalung. Belüftete Holzschalungen bieten aus brandschutztechnischer Sicht ein großes Potenzial.

- Natürliche, nachhaltige Verfahren zur Verbesserung des Brandverhaltens von Holzschalungen sollten auf materialtechnischer Basis weitreichend untersucht werden. So könnten einfache Verfahren wie eine Vorverkohlung (Lin et al. 2023) das Brandverhalten der Holzfassade insbesondere zu Beginn verbessern.
- Weiter gilt es, Möglichkeiten zur konstruktiven Unterteilung der Holzfassade im Bereich von Brandwänden, beispielhaft durch vertikale Brandsperren, genauer zu untersuchen. Fokus dieser Untersuchungen sollten Windeinwirkungen, deren Einfluss auf das Flammenbild und die sich daraus ergebenden Einwirkungen auf die Brandsperre sein.
- Das ästhetische Erscheinungsbild einer Fassade spielt aus architektonischer Sicht eine entscheidende Rolle. Weit auskragende Brandsperren stehen oft im Widerspruch zu architektonischen Ansprüchen. Großes Potential bietet hier die Entwicklung von nicht sichtbaren Brandsperren, die architektonischen Ansprüchen gerecht werden, ohne das Sicherheitsniveau zu senken. Vor allem die konsequente Weiterentwicklung von versteckten, aktiv ausklappenden Brandsperren könnte diesen Zwiespalt lösen.

Einfluss des Holzbaues auf die Brandeinwirkung an der Fassade

- Zusätzliche Großversuche sind nötig, um dieses Thema weiter zu untersuchen und zu quantifizieren. Die aktuelle Grundlage reicht nicht aus, um grundlegende Antworten geben zu können. Im Rahmen weiterer Versuche ist auch ein möglicher Kohleabfall für Brettsperrholzdecken und dessen Einfluss auf die Brandeinwirkung auf die Fassade genauer zu untersuchen.
- Durch numerische Strömungssimulation (Computational Fluid Dynamics) sollte mit Hilfe der vorhandenen Ergebnisse aus den Großbrandversuchen Feldmodelle kalibriert werden, um Vorhersagen für Anwendungsfälle mit abweichenden Parametern (z.B. Geometrie, Öffnungsfaktor, Anordnung der Holzoberflächen, Brandlastdichte, Raumgröße, Schutzzeiten der Bekleidungen usw.) zu erzielen. Diese Modelle sind mit Hilfe zukünftiger Großbrandversuche weiter zu validieren, um einen belastbaren Ansatz zur Bewertung dieser Fragestellung und zur Vorhersage der Brandeinwirkung auf die Fassade zu erhalten.
- Die bis dato üblichen Rechenverfahren zur Bestimmung der Flammenlänge aus einer Öffnung sollten auf den Anwendungsfall zusätzlicher struktureller Brandlast erweitert werden. Hierzu sind die zuvor aufgeführten Validierungsversuche und die zu erstellenden Feldmodelle notwendig.

Begrünte Fassaden

- Im nächsten Schritt sind die Erkenntnisse aus den mittelmaßstäblichen Versuchen im Großmaßstab zu überprüfen und die vertikale Brandausbreitung genauer zu untersuchen.
- Die Definition der angemessenen Pflege und Wartung für brandsichere begrünte Fassade ist tiefergehend auszuarbeiten. Hierbei ist das Wachstumsverhalten der Pflanzen zu berücksichtigen. Zu klären ist, welche Intervalle notwendig sind und wann die unterschiedlichen Pflegemaßnahmen erforderlich sind.
- Zu untersuchen ist auch der Einfluss eines sehr kurzweiligen Wärmestroms einer brennenden Fassadenbegrünung auf die Außenwand, die Fenster und die dahinterliegenden Bereiche. Welches Risiko ergibt sich daraus für eine Brandausbreitung?

PAPER I

Analyse der zulässigen Brandausbreitung über die Fassade

Thomas Engel, Norman Werther

Abstract

Aufbauend auf den grundlegenden Forderungen der Bauordnung lassen sich aktuell in Deutschland verschiedene Erläuterungen zur Konkretisierungen des Schutzziels „Begrenzung der Brandausbreitung über die Fassade“ finden. Eine allgemeingültige Festlegung gibt es bisher nicht. Diese Festlegung wäre jedoch, insbesondere für die Betrachtung von neuen Fassaden und Außenwandbekleidungen, eine wichtige Basis. Die nachfolgende Studie beschreibt die aktuell in Deutschland zur Verfügung stehenden Grundlagen zur Bewertung „brandschutztechnisch sicherer“ Fassaden. Diese sind Prüfverfahren für Fassadenbrandversuche, Hintergründe für die Prüfverfahren, Vorgaben aus bauordnungsrechtlichen Richtlinien und Auslegungen der Bauaufsicht. Weiter werden die Vorgaben der europäischen Nachbarländer, die bereits ein konkretes Schutzziel definiert haben, dargestellt. Als Ergebnis stellt die Studie einen Vorschlag für Beurteilungskriterien für „brandschutztechnisch sichere“ Fassaden vor.

Keywords Fassadenbrand; Schutzziel; Brandschutz; Bauordnung; brennbare Fassaden

Analysis of the acceptable fire spread at the façade

In addition to the fundamental requirements of the German Building Code, there are several mostly contradictory concretizations of the fire safety objective "limitation of fire spread at the facade ". There is currently no universal definition. However, this definition would be an important basis, in particular for the consideration of facades and exterior wall cladding made of combustible building materials. The following article describes the principles to evaluate fire-safe facades currently available in Germany. These comprises, facade fire-test methods, backgrounds about the test methods, specifications from building regulations guidelines and interpretations of the building authorities. Furthermore, the specifications of neighboring European

countries, which already have defined a specific fire safety objective for facades, are presented. As a result, the article presents a proposal for assessment criteria for fire-safe facades.

Keywords façade-fire; protection objective; fire protection; building-regulations; flammable façades

1 Brandszenarien an der Fassade

Die Betrachtung der Brandausbreitung an Fassaden beruht auf denen in Abbildung PI. 1 dargestellten drei Einwirkungsszenarien:

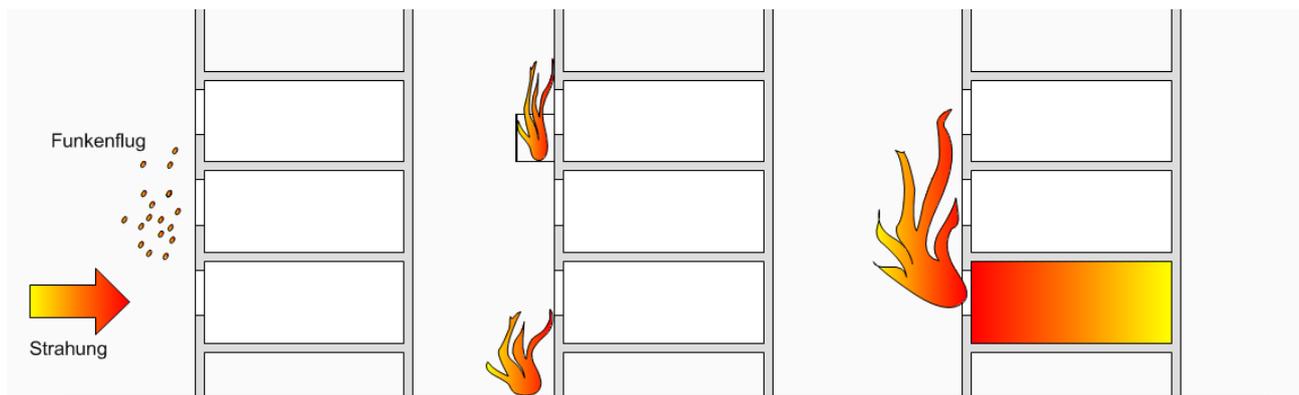


Abbildung PI. 1 Brandszenarien a) Brand eines benachbarten Gebäudes b) Brand außerhalb des Gebäudes c) Brand innerhalb eines Gebäudes; Fire scenarios a) Fire of a neighboring building b) Fire outside the building c) Fire inside a building

Hierbei stellt das Szenario c) „Brand innerhalb eines Gebäudes“ sowohl den häufigsten als auch den kritischsten Brandfall für eine Brandeinwirkung an der Fassade dar [1]. Bei diesem Szenario ist, belegt durch Untersuchungen von Realbrandereignissen und Brandversuchen, mit einer durchschnittlichen Flammenlänge zwischen 3,0 m und 4,5 m, die aus der Öffnung schlägt, zu rechnen. Flammenspitzen können bis zu 6 m betragen [2].

Ergänzend dazu zeigen heutige Erkenntnisse und Erfahrungswerte, dass ebenso das Szenario b) für eine brandschutztechnische sichere Planung zu berücksichtigen ist und für den Sockelbereich eines Gebäudes maßgebend sein kann.

2 Schutzziel in Deutschland, Österreich und in der Schweiz

2.1 Anforderungen aus der Musterbauordnung zur Brandausbreitung an der Fassade

Exemplarisch wird innerhalb dieser Studie auf die Vorgaben der Musterbauordnung (MBO) [3] verwiesen. Die zugehörigen landesspezifischen Bauordnungen enthalten sinngemäße Formulierungen.

„§ 28 Musterbauordnung (MBO)

Absatz 1: Außenwände und Außenwandteile wie Brüstungen und Schürzen sind so auszubilden, dass eine Brandausbreitung auf und in diesen Bauteilen ausreichend lang begrenzt ist.“

§ 28 Absatz 1 der MBO beschreibt somit ein Schutzziel in einer relativ offenen Formulierung ohne konkrete Vorgaben zu machen. In Absatz 3 sind präzise materialtechnische Vorgaben gemacht, mit denen das in Absatz 1 formulierte Schutzziel erreicht werden kann. In Absatz 5 sind Vereinfachungen für die Gebäudeklassen 1 bis 3 festgehalten.

Absatz 3: Oberflächen von Außenwänden sowie Außenwandbekleidungen müssen einschließlich der Dämmstoffe und Unterkonstruktionen schwerentflammbar sein [...] Baustoffe, die schwerentflammbar sein müssen, [...] dürfen nicht brennend abfallen oder abtropfen.

Absatz 5: Absätze 2, 3 und 4 Satz 1 gelten nicht für Gebäude der Gebäudeklassen 1 bis 3; Absatz 4 Satz 2 gilt nicht für Gebäude der Gebäudeklassen 1 und 2 [3] S. 22-23

Weitere konkrete Schutzziele werden in der Musterbauordnung, als auch in den jeweiligen Landesbauordnungen nicht formuliert.

Bei Sonderbauten sowie bei Mittel- und Großgaragen können sich weitergehende Anforderungen aus den entsprechenden Spezialvorschriften, bzw. bei Sonderbauten auch einzelfallbezogen über § 51 MBO [3] ergeben.

2.2 Bisher definierte Schutzziele „Brandausbreitung über Außenwandbekleidung“ in Deutschland

Aktuell können unterschiedlichen Veröffentlichungen verschiedene Formulierungen zur Konkretisierung des Schutzziels „Brandausbreitung über die Fassade“ aus Kapitel 2.1 entnommen werden, die in ihrer Aussage, je nach Lesart, nicht ganz deckungsgleich sind. Eine allgemeingültige Festlegung gibt es hierfür nicht. Nachfolgend werden einige Schutzzieldefinitionen, die in Artikeln und wissenschaftlichen Ausarbeitungen definiert wurden, chronologisch dargestellt:

09.2012: *„Das baurechtliche Brandschutzziel an der Gebäudeaußenwand muss darin bestehen, eine schnelle Brandausbreitung **über mehr als zwei Geschosse ober- bzw. unterhalb der Brandausbruchstelle** vor dem Löschangriff der Feuerwehr (**Zeitraum von 15 – 20 Minuten**) zu verhindern. Eine Gefährdung der Rettungskräfte durch großflächig abstürzende, brennende oder nichtbrennende Fassadenteile bzw. durch brennendes Abtropfen ist auszuschließen.“*[4]

11.2012: *„Das baurechtliche Brandschutzziel an der Gebäudeaußenwand muss darin bestehen, eine schnelle Brandausbreitung **über mehr als zwei Geschosse oberhalb bzw. unterhalb der Brandausbruchstelle** vor dem Löschangriff der Feuerwehr zu verhindern. Eine Gefährdung der Rettungskräfte durch großflächig abstürzende Fassadenteile ist auszuschließen.“*[5]

07.2017: *„Die Brandausbreitung an der Außenwand darf vor dem Löschangriff der Feuerwehr eine Ausdehnung **von zwei Geschossen im Gebäude nicht überschreiten**. Dabei wird eine*

zu gewährleistende „Schutzzeit“ von Brandbeginn bis Löschbeginn von **maximal 25 Minuten** vorausgesetzt. Zusätzlich ist eine Gefährdung der Rettungskräfte durch großflächig abstürzende, brennende oder nichtbrennende Fassadenteile bzw. durch brennendes Abtropfen auszuschließen.“ [6]

07.2017: „Die Brandausbreitung an der Außenwand darf vor dem Löschangriff der Feuerwehr eine Ausdehnung **über mehr als zwei Geschosse im Gebäude nicht überschreiten**. Dabei wird eine zu gewährleistende „Schutzzeit“ von Brandbeginn bis Löschbeginn von **maximal 25 Minuten** vorausgesetzt. Zusätzlich ist eine Gefährdung der Rettungskräfte durch großflächig abstürzende, brennende oder nichtbrennende Fassadenteile bzw. durch brennendes Abtropfen auszuschließen.“ [7]

Die beiden im Jahr 2012 aufgestellten Formulierungen beschreiben augenscheinlich ein Schutzziel für eine Brandausbreitung auf der Außenwandbekleidung außerhalb des Gebäudes. Im Jahre 2017 wird ein direkter Bezug zur Brandausbreitung innerhalb des Gebäudes gemacht und die Schadenausbreitung an der Außenwandbekleidung nicht mehr weiter beschrieben. Ohne eine differenzierte Betrachtung der Brandausbreitung innerhalb und/oder außerhalb des Gebäudes entsteht der Eindruck, als ob hier eine Differenz von einem Geschoss bestehen würde.

2.3 Formuliertes Schutzziel in Österreich

In Österreich existiert ein in der OIB Richtlinie 2 (2015 Abschnitt 3.5.6) festgeschriebenes konkretes Schutzziel für Fassadenbrände:

„Bei Gebäuden der Gebäudeklasse 4 und 5 sind vorgehängte hinterlüftete, belüftete oder nicht hinterlüftete Fassaden so auszuführen, dass eine Brandweiterleitung über die Fassade auf das zweite über dem Brandherd liegende Geschoss, und das Herabfallen großer Fassadenteile wirksam eingeschränkt wird.“ [8]

Konkret bedeutet dies, dass die maximale Brandausbreitung auf zwei Geschosse einzugrenzen ist, vgl. Abbildung PI. 2.

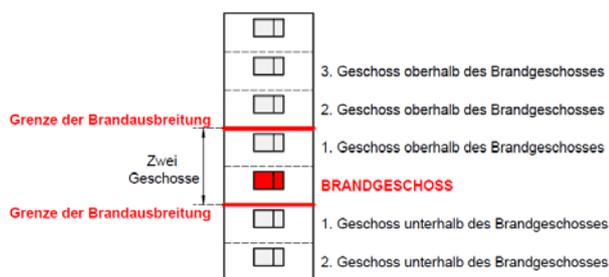


Abbildung PI. 2 Darstellung des Schutzziel für Fassaden für Österreich – „zwei Geschosse“; Fire safety objective for facades in Austria - "two storeys"

2.4 Formuliertes Schutzziel in der Schweiz

Als Basis für ein umfangreiches (länderübergreifendes) Forschungsprogramm der Lignum (Holzwirtschaft Schweiz) bezüglich des Brandverhaltens von Holz-Außenwandbekleidungen wurde für die Schweiz bereits im Jahre 2003 folgendes Schutzziel formuliert:

„Bei einem Brand an der Aussenwand darf es vor dem Löschangriff der Feuerwehr nicht zu einer Brandausbreitung über mehr als zwei Geschosse oberhalb der Brandetage kommen.“
[9]

Hieraus ergibt sich eine Begrenzung der Brandausbreitung auf maximal 3 Geschosse, vgl. Abbildung PI. 3.

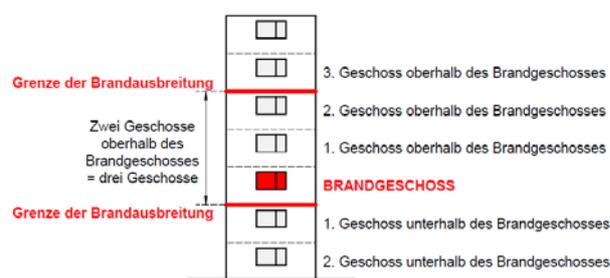


Abbildung PI. 3 Darstellung des Schutzziel für Fassaden für die Schweiz - "drei Geschosse"; Fire safety objective for facades in Switzerland - "three storeys"

Dieses Schutzziel wurde im Anschluss in die für die ganze Schweiz verbindlichen Brandschutzvorschriften übernommen. Die VKF-Brandschutzrichtlinie „Verwendung von Baustoffen“ hält in Ziffer 3.1.1 Absatz 2 für Gebäude mittlerer Höhe (d.h. bis zur Hochhausgrenze) folgendes fest:

„Brennbare Aussenwandbekleidungen und/oder Wärmedämmungen sind konstruktiv so zu unterteilen, dass sich ein Brand an der Aussenwand vor dem Löschangriff durch die Feuerwehr um nicht mehr als zwei Geschosse oberhalb des Brandgeschosses ausbreiten kann.“
[10]

Der voranstehende Vergleich der Schutzziele in Kapitel 2.3 und 2.4 zeigt, dass sich das Schutzziel in Österreich im Vergleich zur dem in der Schweiz um ein Geschoss unterscheidet.

3 Brandschutztechnische Prüfung von Außenwandbekleidungen / Fassaden in Deutschland

3.1 Grundlagen

Gemäß den Anforderungen der MBO müssen Außenwandbekleidungen bei Gebäuden der Gebäudeklasse 4 und 5 schwerentflammbar sein [3]. Die Anforderung „schwerentflammbar“ wird national durch die Brandschachtprüfung (nach 6.1.3.1 DIN 4102-1) und die Brennkastenprüfung (nach 6.2.5 DIN 4102-1) bzw. europäisch durch den SBI-Test (nach DIN EN 13823) beurteilt. Nichtbrennbare Außenwandbekleidungen durchlaufen zusätzliche Prüfverfahren.

Derzeit legen die Zulassungsgrundsätze des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) fest, welche Systeme im Großversuch zu untersuchen sind. In diesen Fällen ist eine Prüfung nach DIN 4102-20 im Rahmen des Zulassungsverfahrens durch das DIBt, siehe auch Hinweis in der MVV TB [11] Kapitel A 2.1.5 zur Bestimmung des Systembrandverhaltens von Außenwandbekleidungen und Fassadenbeschichtungen einschließlich etwaiger Brandschutzmaßnahmen, notwendig. Die Bewertung der durchgeführten Großversuche erfolgt durch das DIBt unter Einbeziehung des zuständigen Sachverständigenausschusses (SVA).

Dies trifft zum Beispiel für WDVS mit EPS als Dämmstoff zu, bei denen die Dämmdicke mehr als 100 mm beträgt. Versuche haben gezeigt, dass bis zu einer Dämmstoffdicke von 100 mm die Belastung durch die Schmelze im Brandfall so gering ist, dass der verputzte Sturz nicht aufreißt. Schwerentflammbare WDVS, z.B. aus EPS, mit Dämmstoffdicken von mehr als 100 mm werden deshalb mit Brandschutzmaßnahmen (Brandsperrern) ausgeführt [12]. Der Forschungsbericht BI5-8001 96-18 der MFPA Leipzig [2] kommt jedoch zum Schluss, dass eine Bewertung durch das Laborprüfverfahren im Brandschacht bereits für Dämmstoffdicken über 80 mm nicht mehr möglich ist, da die Proben in die Prüfgeräte nicht eingebaut werden können [2]. Zwischen 80 mm und 100 mm werden die Ergebnisse der Brandschachtprüfung durch die Prüfstellen extrapoliert. Ab 100 mm ist eine Prüfung nach DIN 4102-20 im Rahmen des Zulassungsverfahrens notwendig.

In diesem Fall (EPS-Bekleidung > 100 mm) ist folglich eine Systemprüfung zur Erreichung der Anforderung schwerentflammbar, anstelle reiner Baustoffprüfungen, nötig. Wie und ob diese Regelungen auch auf andere Systeme ausgeweitet werden können steht aktuell offen. Beispielsweise können Holzbekleidungen aus normalentflammbaren Baustoffen durch konstruktive Maßnahmen ein „schwerentflammbares Systemverhalten“ aufweisen.

3.2 DIN 4102-20

Der in DIN 4102-20:2017-10 aufgeführte Versuchsstand stellt eine Innenecke der Gebäudeaußenwand mit Fensteröffnung dar. Der Prüfkörper ist aus zwei rechtwinklig zueinander angeordneten Schenkeln konstruiert. Hierbei muss der lange Schenkel eine Mindestlänge von $l_1 \geq 2,0$ m und der kurze Schenkel eine Mindestlänge von $l_2 \geq 1,0$ m einhalten. Die Höhe des Prüfkörpers beträgt 5,5 m.

Das Prüffeuer kann wahlweise durch einen Gasbrenner oder durch eine Holzkrippe mit einer Grundfläche von 500/500 [mm] und einer Brandlastmasse von $30 \pm 1,5$ [kg] bei einem Holz-Luft-Verhältnis von 1:1 gestellt werden.

Die Dauer der Beflammung beträgt 20 min. Darauf folgt eine Beobachtungszeit von mindestens 40 min. Die Prüfung endet, wenn weder optisch noch durch Messungen der Temperatur Branderscheinungen und/oder Glimmen oder Schwelen feststellbar sind. Die maximale Prüfzeit beträgt 15 h [13].

Zwar sind in der DIN 4102-20 keine Versagens- bzw. Bewertungskriterien festgelegt, im Normentwurf E DIN 4102-20:2010-03 [14] waren diese jedoch noch vorgesehen und sind in Abbildung PI. 4 dargestellt. Weiter stellt Abbildung PI. 4 den Prüfstand und die Versagens- bzw. Bewertungskriterien schematisch an einem realen Gebäudeausschnitt dar.

Die Ergebnisse der Temperaturverteilung vor der Fassade sind in Abbildung PI. 5 bis Abbildung PI. 7 dargestellt.

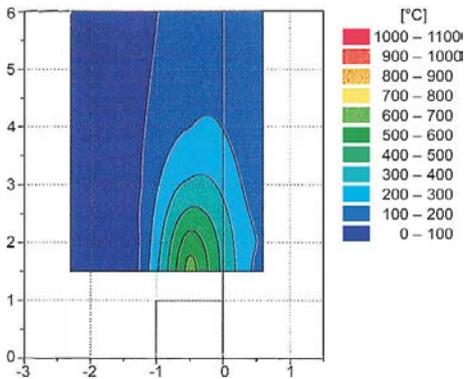


Abbildung PI. 5 Temperaturverteilung an der Fassade für 25±1 kg Holzkippe [DIN 4102-20] [2]; Temperature distribution on the facade for 25 ± 1 kg wooden crib [DIN 4102-20] [2]

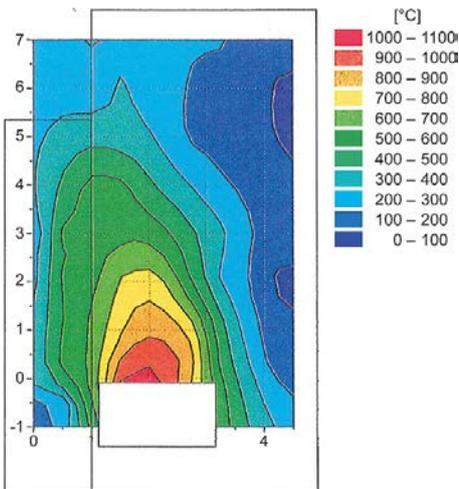


Abbildung PI. 6 Temperaturverteilung an der Fassade für 500 kg Realbrandlast Möbel [2]; Temperature distribution on the facade for 500 kg fuel load furniture [2]

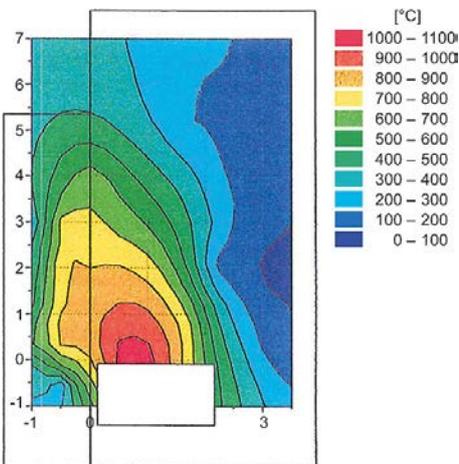


Abbildung PI. 7 Temperaturverteilung an der Fassade für 475 kg Holzkippe [2]; Temperature distribution on the facade for 475 kg wooden crib [2]

4 Grundlagen für die brandschutztechnische Bewertung von Außenwandbekleidungen für Gebäude der Gebäudeklasse 4 und 5

Ein klar definiertes Schutzziel als Vorgabe zur Begrenzung der Brandweiterleitung über Außenwandbekleidungen wäre auch in Deutschland für die Betrachtung von Fassaden aus brennbaren Baustoffen, wie z.B. Holzbekleidungen, eine wichtige Grundlage. Dies lässt sich jedoch infolge der Ausführungen nach Abschnitt 2 nicht eindeutig ableiten und festlegen.

Bei Gebäuden normaler Art und Nutzung der Gebäudeklasse 4 und 5 müssen nichttragende Außenwände und nichttragende Teile tragender Außenwände aus nichtbrennbaren Baustoffen bestehen, oder, sofern sie aus brennbaren Baustoffen bestehen, als raumabschließende Bauteile feuerhemmend sein. An Öffnungen (wie Fenster und Türen) werden bauordnungsrechtlich keine Anforderungen gestellt [3]. Daraus lässt sich schließen, dass eine geschossweise Brandweiterleitung durch eine aus einer Öffnung schlagenden Flamme bauordnungsrechtlich toleriert wird. Dies lässt sich auch am Beispiel einer Pfosten-Riegel-Fassade aus Glas veranschaulichen. An die Fassade wird, da es sich um einen nichtbrennbaren Baustoff handelt, keine Anforderungen gestellt, das heißt im Falle eines Brandes in einer Nutzungseinheit wird bauordnungsrechtlich ein geschossweiser Brandüberschlag toleriert.

Bei Gebäuden normaler Art und Nutzung der Gebäudeklassen 1 - 3 sind Außenwandbekleidungen aus normalentflammbaren Baustoffen, auch in Kombination mit einem Hinterlüftungsspalt, ohne besondere Maßnahmen zulässig [3]. Diese Gebäude besitzen in der Regel nicht mehr als drei oberirdische Geschosse (Höhe der Fußbodenoberkante des höchstgelegenen Geschosses, in dem ein Aufenthaltsraum möglich ist ≤ 7 m). Bei Gebäuden der Gebäudeklassen 4 und 5 müssen Außenwandbekleidungen mindestens schwerentflammbar sein. Bei hinterlüfteten Außenwandbekleidungen sind darüber hinaus besondere Vorkehrungen zu treffen. Diese Maßnahmen werden in der technischen Baubestimmung „Anhang 6 Hinterlüftete Außenwandbekleidungen“, die in der MVV TB gelistet ist, definiert. Diese technische Baubestimmung fordert u.a. horizontale Brandsperrern in jedem zweiten Geschoss und vertikale Brandsperrern im Bereich von Brandwänden [11].

Aus den Absätzen zuvor lässt sich schließen, dass zwar ein geschossweiser Brandüberschlag bauordnungsrechtlich toleriert wird, eine Begünstigung der Brandweiterleitung durch normalentflammbare Baustoffe oder durch einen Hinterlüftungsspalt ab Gebäudeklasse 4 und 5 jedoch unzulässig ist. Das bedeutet konkret, dass das bauordnungsrechtliche Schutzziel an Fassaden eine begünstige Brandausbreitung durch Baustoff oder Konstruktion in mehrere Geschosse oberhalb und unterhalb der Brandausbruchsstelle verhindern muss. Dies zeigt auch das nachfolgende Beispiel.

Bei Wärmedämmverbundsystemen aus expandiertem Polystyrol (EPS) für Gebäude normaler Art und Nutzung der Gebäudeklassen 4 und 5, müssen die Dämmstoffe an sich, bzw. das ganze System bei Dämmstoffdicken > 100 mm schwerentflammbar sein. Hierzu sind beispielsweise s.g. „Brandriegel“ im Sockelbereich, über dem Erdgeschoss und alle zwei Geschosse sowie beim Übergang zu brennbaren Bestandteilen des Daches notwendig [16]. Zuvor genannte Maßnahmen sind augenscheinlich darauf ausgerichtet, einer vertikalen Brandausbreitung auf/in der Fassade über einen Bereich von mehr als zwei Geschossen entgegenzuwirken.

Gegen eine horizontale Brandausbreitung sind entsprechende Maßnahmen an den Grenzen von Brandabschnitten vorgesehen [17].

Maßgebend für eine mögliche Brandweiterleitung über die Fassade ist auch, dass ein Brand für die Feuerwehr beherrschbar bleiben muss. Als maßgebendes Szenario zur Bedarfsplanung von Feuerwehren in Städten wird der s.g. „kritische Wohnungsbrand“ herangezogen. Ein Wohnungsbrand im Obergeschoss eines mehrgeschossigen Gebäudes mit verrauchten Rettungswegen [18]. Ein Brand, der sich bei Eintreffen der Feuerwehr bereits in mehrere Geschosse ausgebreitet hat und dort die Dimension eines Entstehungsbrandes überschritten hat, ist folglich weder in deutschen Städten, noch auf dem Land für die Feuerwehr geregelt leistbar. Dies lässt sich auch durch die technischen Spezifikationen anlagentechnischer Brandschutzmaßnahmen begründen. Eine trockene Steigleitung nach DIN 14462, die oft ab Gebäudeklasse 5 Verwendung findet, ist beispielweise nur für eine gleichzeitige Löschmittelabgabe in drei Geschossen ausgelegt. Selbiges gilt für Wandhydranten des Typs F [19]. Ein Brand in mehr als drei Geschossen innerhalb des Gebäudes ist hier also bereits aus technischer Sicht ausgeschlossen. Diese Grenzen sind grundsätzlich durch das Bauordnungsrecht berücksichtigt, müssen jedoch bei der Verwendung neuartiger Konstruktionen oder abweichender Baustoffklassen dezidiert betrachtet werden.

5 Brandschutztechnische Beurteilungskriterien für den Einsatz von Außenwandbekleidungen aus normalentflammbaren Baustoffen für Gebäude der Gebäudeklasse 4 und 5

Aus Sicht der Bauaufsicht ist der Einsatz normalentflammbarer Außenwandbekleidungen wie nachfolgend beschrieben zu bewerten: *„Wenn nun normalentflammbare Fassadenbekleidungen dort zulässig gemacht werden sollen, wo bislang nur schwerentflammbare zulässig sind, sollte das Anforderungsniveau dafür im Ergebnis nicht geringer angesetzt werden. Wo sich notgedrungen ein „Weniger“ durch die Baustoffklasse ergibt, könnte dementsprechend ein „Mehr“ an konstruktiven Maßnahmen erforderlich werden. Dafür erhoffen wir uns Vorschläge/Ergebnisse aus der Forschung.“* [17]

Ein weiterer wichtiger Grundsatz ist, dass wirksame Löscharbeiten möglich sein müssen und die Brandstellen für die Feuerwehr folglich mit den zur Verfügung stehenden technischen Mitteln löschar sein muss (z.B. Brand in Hinterlüftungsspalt, oder Zugänglichkeit bezogen auf die Höhe).

Zum aktuellen Zeitpunkt werden für brennbare Außenwandbekleidungen aus Holz in Brandschutznachweisen in Deutschland bauordnungsrechtliche Abweichungen definiert und dabei auf in Österreich [8] oder in der Schweiz [9, 10] zugelassene Systeme verweisen. Wie im Abschnitt 2 beschrieben liegen diesen Lösungen jedoch unterschiedliche Schutzziele zu Grunde, die eine Anwendung in Deutschland nicht ohne weiteres zulassen.

Bei einer Definition eines Schutzziels für Deutschland müssen die beschreibenden Parameter klar definiert sein um Missverständnissen vorzubeugen. Nur dadurch lassen sich mögliche konstruktive Maßnahmen auf ihre Wirksamkeit hin bewerten. Die einfache Formulierung „der Brand darf eine Ausdehnung von zwei Geschossen im Gebäude nicht überschreiten“ ist nicht ohne weiteres in konkrete Anforderungen zu überführen. Konkret muss geklärt sein, wie der

Mitbrand der Fassade bzw. die Brandausbreitung in darüber liegende Geschosse durch eine aus einer Öffnung austretenden Flamme zu bewerten ist.

Nachstehende Aspekte und Anforderungen sollen in der konkreten Beurteilung der brand-schutztechnischen Sicherheit von Fassaden und Außenwandbekleidungen, insbesondere in Verbindung mit dem Werkstoff Holz, berücksichtigt werden:

- Die Flammenhöhen aus der Fensteröffnung des Primärbrandes lassen sich über ein allgemeines Schutzziel nicht definieren oder begrenzen.
- Die vertikale Brandausbreitung soll begrenzt werden. Außerhalb der Flamme aus dem Primärbrandgeschoss bzw. des Sockelbrandes soll keine weiterführende vertikale Brandausbreitung über die Geschosstrennung (i.d.R. Deckenebene) erfolgen.
- Die horizontale Brandausbreitung auf der brennbaren Außenwandbekleidung soll sich nicht wesentlich außerhalb der Flammenbreite aus dem Primärgeschoss ausdehnen.
- Brandabschnittstrennungen dürfen nicht negativ beeinflusst werden.
- Wirksame Löscharbeiten müssen möglich sein.

Die Flammenhöhe aus der Fensteröffnung des Primärbrandgeschosses lässt sich bauordnungsrechtlich nicht begrenzen. Es sind zwar für unterschiedliche Nutzungen statistische Annahmen für durchschnittliche Brandlastdichten bekannt, diese können jedoch von der realen Situation stark abweichen. Jede Person hat das Recht auf die freie Entfaltung seiner Persönlichkeit und das gilt auch für den Wohn- oder Arbeitsraum. Folglich wird es auch immer wieder Extremfälle, wie stark verwaahlte Wohnungen mit enormer Ansammlung von Gegenständen und somit stark erhöhter Brandlast, geben. Brände in Räumen verlaufen in der Regel zudem ventilationsgesteuert. Bei stark erhöhter Brandlast werden mehr brennbare Pyrolysegase nach außen transportiert und es entstehen folglich größere Flammenlängen an der Fassade. Zudem beeinflusst die Fenstergeometrie die Flammenlänge. Dieser Sachverhalt kann nicht über das Bauordnungsrecht reguliert werden.

Die vertikale Brandausbreitung über brennbare Außenwandbekleidungen lässt sich über Brandsperren pro Geschoss, in der Regel in Deckenebene, begrenzen. Der Abstand der Brandsperren untereinander muss dabei der typischen Geschosshöhe, in der Regel circa 3 m, entsprechen. Die Brandsperren sind in jedem Geschoss notwendig. In der Regel sind die Brandsperren auf Höhe der raumabschließenden Decke anzuordnen. Dadurch kann sichergestellt werden, dass mit normalentflammbaren Bekleidungen (wie z.B. Holzbekleidungen) eine Brandausbreitung auf weitere Geschosse außerhalb der Primärflamme unterbunden wird.

Sofern die Brandsperren innerhalb eines Geschosses, beispielsweise erst in Höhe des Fenstersimses, angeordnet werden sollen, kann es notwendig sein die Außenwand, sprich die Wand hinter der Außenwandbekleidung, raumabschließend feuerhemmend (bei nichttragenden Außenwänden nach Außenbrandkurve) auszuführen, Fenster und Türen sind ausgenommen. Dies wäre für brennbare Außenwände grundsätzlich bauordnungsrechtlich gemäß MBO [3] notwendig, aber in diesem Fall auch für nichtbrennbare Außenwände (z.B. Glasfassaden

mit davor befindlicher normalentflammbarer Außenwandbekleidung) sinnvoll. Dadurch soll eine Brandweiterleitung in andere Geschosse durch einen Einbrand in das Geschoss, in dem sich die wirksame Brandsperre befindet, verhindert werden.

Die horizontale Brandausbreitung soll begrenzt sein, d.h. die Fassade darf sich horizontal an beliebiger Stelle maximal in einer Breite von in Summe nicht mehr als das Vierfache der Primärflammenbreite (z.B. Fensterbreite) am Brand beteiligen. Ist dies nicht erfüllt, sind vertikale Brandsperren notwendig.

Im Bereich von Brandwänden sind besondere Maßnahmen zur Sicherstellung der Brandabschnittsbildung notwendig. Eine horizontale Brandweiterleitung über diesen Bereich muss ausgeschlossen sein, z.B. durch nichtbrennbare Außenwandbekleidungen ≥ 1 m.

Wirksame Löscharbeiten sind möglich, wenn die Feuerwehr die brennende Außenwandbekleidung gezielt ablöschen kann. Dies kann durch im Gebäude vorhandene Öffnungen, wie beispielsweise Fenster oder Balkone, oder ggf. über Hubrettungsfahrzeuge erfolgen. Letzteres führt zur Notwendigkeit von Aufstellflächen gemäß Richtlinien über Flächen für die Feuerwehr [20].

6 Fazit

Ein klar definiertes Schutzziel als Vorgabe zur Begrenzung der Brandweiterleitung über Außenwandbekleidungen wäre auch in Deutschland für die Betrachtung von Fassaden und Außenwandbekleidungen aus brennbaren Baustoffen an Gebäuden der Gebäudeklasse 4 und 5 eine wichtige Grundlage. Dadurch lassen sich konstruktive Maßnahmen für normalentflammbare Außenwandbekleidungs-systeme auf ihre brandschutztechnische Wirksamkeit hin untersuchen und sinnvolle Systemlösungen für „brandschutztechnisch sichere“ Fassaden mit akzeptierbaren Brandschäden finden.

Der ursprünglich, mit Blick auf WDVS mit EPS, entwickelte Fassadenbrandversuch nach DIN 4102-20 ist für die orientierende Prüfung von normalentflammbaren Fassadensystemen geeignet. Dies lässt sich dadurch begründen, dass für normalentflammbare Fassaden das Schutzziel darin besteht ein selbständiges Mitbrennen außerhalb der Primärflamme über Geschosstrennungen hinweg zu verhindern. Das Prüffeu-er des DIN 4102-20 Versuches mit einer Brandlast von $30 \pm 1,5$ kg bildet lediglich die Flammenspitze eines realistischen Raumbrandes, mit entsprechend deutlich mehr Brandlast, ab. Dieses Prüffeu-er ist jedoch rein zur Bewertung des selbständigen Mitbrands außerhalb der Primärflamme ausreichend.

Die umfangreichen Erkenntnisse der Nachbarländer (v.a. der Schweiz [10] für Holzfassaden) mit schutzzielorientierten Vorgaben zur Beurteilung des Gesamtbrandverhaltens von normalentflammbaren Außenwandbekleidungs-systemen lassen sich, bei Vorliegen eines klar definierten Schutzziels, auch auf Deutschland adaptieren.

Literatur

- [1] Kotthoff, I. (2013) Gedämmte Gefahr? in: Feuertrutz, Ausgabe 01/2013.
- [2] Kotthoff, I. (2000) Forschungsbericht BI5-8001 96-18: Erarbeitung realer Prüfbedingungen für die Durchführung von Original-Brandprüfungen an B 1-Fassadensystemen und eines Verfahrens zur Berechnung von Brandabläufen an Fassaden Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig e.V. vom 03.10.2000, 1. Ausfertigung.
- [3] ARGEBAU Bauministerkonferenz, Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder (2002) Musterbauordnung idF v. November 2002 zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 22.02.2019.
- [4] Kotthoff, I. (2012) Grundlagen für die Zulassung und Normung des Brandverhaltens von Fassadenbekleidungen in: Braunschweiger Brandschutz-Tage 2012. Dietmar Hosser [Hrsg.], Braunschweig, 09.2012.
- [5] Kotthoff, I. (2012) Mechanismen der Brandausbreitung an der Gebäudeaußenwand: Brandverhalten von WDVS unter besonderer Berücksichtigung von Polystyrol-Hartschaum in: 9. Hessischer Energieberaterstag. Frankfurt, 22. November 2012.
- [6] Kotthoff, I. (2017) Analyse der Brandausbreitung über die Fassade in: Feuertrutz, Ausgabe 07/2017.
- [7] Kotthoff, I.: Brand des „Grenfell tower“ Hochhauses am 15. Juni 2017 in London: Eine Analyse der Brandausbreitung über die Fassaden [online] [Zugriff am: 16.10.2019]. Verfügbar unter: https://www.farbe-bw.de/fileadmin/Bundesverband_Farbe/Bundesverband/Mitarbeiter/Nicolai/IBF-Grenfell-tower-london-06-2017-c.pdf
- [8] Österreichisches Institut für Bautechnik [Hrsg.] (2015) OIB-Richtlinie 2 Brandschutz OIB-330.2-011/15. Ausgabe: März 2015.
- [9] BART, B.; Kotthoff, I.; WIEDERKEHR, R. Et al. (2019) Lignum-Dokumentation Brandschutz 7.1 Aussenwände - Konstruktion und Bekleidungen. Lignum, Holzwirtschaft Schweiz [Hrsg.], Zürich.
- [10] Vereinigung Kantonalen Feuerversicherungen (VKF) [Hrsg.] (2015) VKF-Brandschutzrichtlinie 14-15 Verwendung von Baustoffen. Bern.
- [11] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt) (2017) Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen idF v. Ausgabe August 2017 mit Druckfehlerkorrektur vom 11. Dez. 2017.
- [12] Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V. (2016) Technische Systeminformation, Kompendium WDVS und Brandschutz. Ausgabe 2016, Baden-Baden.

- [13] DIN 4102-20:2017-10 (2017) Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 20: Ergänzender Nachweis für die Beurteilung des Brandverhaltens von Außenwandbekleidungen. Beuth, Berlin.
- [14] Normvorschlag DIN 4102-20:2010-03 (2010) Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen Teil 20: Besonderer Nachweis für das Brandverhalten von Außenwandbekleidungen. NA 005-52-01 AA.
- [15] Grimm, W. (2018) Fassadenbrandprüfung in Deutschland und Österreich. [Seminararbeit]. Technische Universität München.
- [16] Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme e.V. [Hrsg.] (2014) Technische Systeminfo 6: WDV-Systeme zum Thema Brandschutz., 03/2014, Baden-Baden.
- [17] Bell, A. (2019) Schriftliche Antwort per Mail auf Nachfrage bzgl. brandschutztechnisches Schutzziel an Fassaden an die Projektgruppe Brandschutz der Bauministerkonferenz.
- [18] AGBF-BUND [Hrsg.] (2015) Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren für Qualitätskriterien für die Bedarfsplanung von Feuerwehren in Städten, Bonn, vom 16. September 1998, Fortschreibung vom 19. November 2015.
- [19] DIN 14462:2012-09 (2012) Löschwassereinrichtungen – Planung, Einbau, Betrieb und Instandhaltung von Wandhydrantenanlagen sowie Anlagen mit Über- und Unterflurhydranten. Beuth, Berlin.
- [20] ARGEBAU Bauministerkonferenz, Konferenz der für Städtebau, Bau- und Wohnungswesen zuständigen Minister und Senatoren der Länder [Hrsg.] (2007) Muster-Richtlinien über Flächen für die Feuerwehr. Fassung Februar 2007

Hinweis

Dies ist die angenommene Version desfolgenden Artikels: Engel, T.; Werther, N. (2020) Analyse der zulässigen Brandausbreitung über die Fassade. Bautechnik 97, H. 8, S. 558–565, die in endgültiger Form veröffentlicht wurde unter <https://doi.org/10.1002/bate.202000007>. Dieser Artikel darf für nicht-gewerbliche Zwecke entsprechend der Wiley Selbstarchivierungs-Richtlinie verwendet werden.

PAPER II

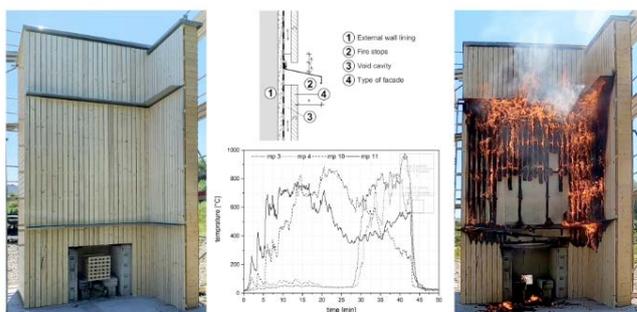
Structural means for fire-safe wooden façade design

Thomas Engel, Norman Werther

Abstract

This study investigates five fire stop variants used to limit the spread of fire on wooden façades. For this purpose, five fire tests using various types of wooden façade claddings and different fire stops were conducted as full-scale tests and compared to the existing findings. The influences and interactions between the material qualities of the external wall behind the façade cladding, the construction type of the wooden façade cladding, the design of the substructure, the depth of the ventilation gap, and the design of the fire stops were investigated. In evaluating the fire stops, the design of the interior corners, the joint design, and the influence of thermal expansion were examined. Finally, design proposals for the design of fire stops at wooden façades in order to limit the spread of fire were derived based on this evaluation. The outlook presents further needs that need to be investigated in the future in order to clarify undiscussed aspects or points that were ultimately not evaluated within the scope of this study.

Keywords fire safety; wooden façade; façades; fire spread; fire stop; spread of fire



1 Introduction

The planning and execution of aesthetic façade constructions has always been an essential aspect of good architectural design. As a result, the building envelope is the first thing that catches the eyes of the viewers, i.e., the face of a building.

Wood material can be used to create aesthetic façades. Therefore, there is a great demand for feasible and safe wooden façades, even on tall buildings. Furthermore, timber is the world's leading renewable building material and is one of the key materials for the development of sustainable construction solutions. In the construction industry, timber can make a significant contribution to both the necessary decarbonization and the targeted use of renewable raw materials. [1, 2]

However, concerns about the use of wood as a building material relate to the fact that wood is a combustible material. The potentially uncontrolled spread of fire through the façade is one of the key risks in the event of a fire. Ignoring the existing fire design principles usually results in fire incidents with an enormous degree of damage, regardless of the building material. Examples include the Grenfell Tower fire in UK [3] or, most recently, the fire in Ulsan, South Korea [4].

2 Basics of design

2.1 Differentiation between façade and external wall

This article describes structural measures used for fire-safe wooden façades. In this context, the façade refers to the building envelope. This does not include the exterior wall, which separates the interior space of a building from the surroundings. Figure PII. 1 represents the façade and substructure and the actual external wall (gray).

2.2 Types of wooden façades

Wooden façades can be used in various constructive designs, as shown in Figure PII. 1.

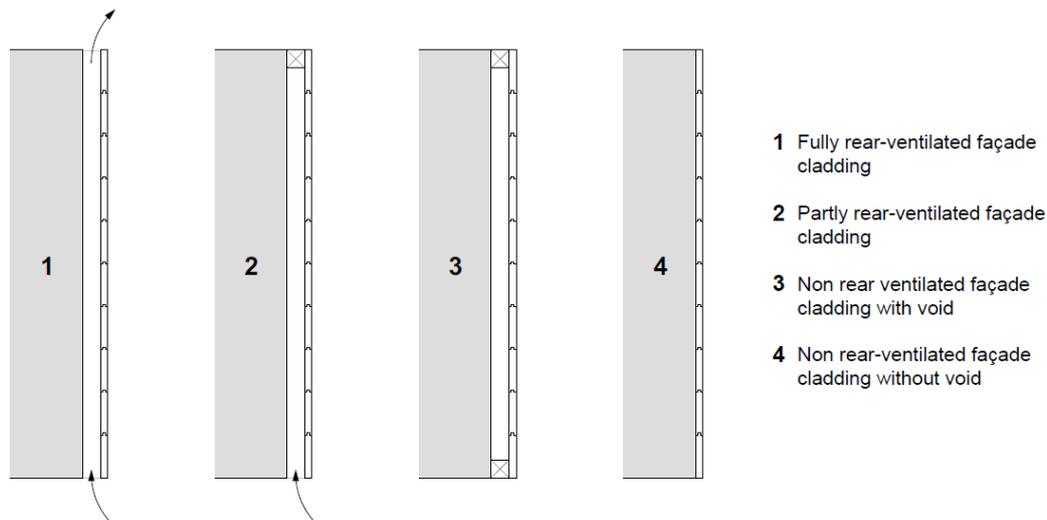


Figure PII. 1 Overview of structural designs of wooden façades

In most cases, wooden façades are designed as rear-ventilated façades by virtue of the requirements for weather and moisture protection [5]. This constructive design helps to remove moisture that has penetrated from the outside and condensation that has formed, which ensures durability [6, 7]. Regarding ventilated façades, a distinction is made between fully rear-ventilated façade claddings (open at the top and bottom) and merely partially rear-ventilated façade claddings, as shown in Figure PII. 1. Non-rear-ventilated wooden façade claddings are less common because of the aforementioned durability aspects.

However, rear-ventilated façade claddings represent the most critical case with respect to the fire safety of wooden façades. In comparison to non-combustible ventilated façades [8], the existence of a rear-ventilated void cavity and the presence of wood as combustible material can greatly increase the propagation of fire within the ventilated cavity. [9,10,11] Therefore, the focus of this study is on the fire safety of wooden claddings in rear-ventilated façade systems.

Another important influencing factor is the various types of cladding used in rear-ventilated wooden façades. Table PII. 6 shows the common types of cladding typically used in practice. The types shown in Table PII. 6 range from closed façades (closed façade surface, e.g., wood-based panels) to open designed façades (no closed façade surface, e.g., open cladding). Figure PII. 23 and Figure PII. 24 of the appendix show actual examples.

2.3 Basics regarding the spread of fire on wooden façades

Fully rear-ventilated, partially rear-ventilated, and non-ventilated wooden façades have been used for some time, even on taller buildings. In this case, special constructive fire protection measures must be taken in order to prevent or limit the contribution of the façade cladding to fire spreading from story to story. Within this context, ventilated wooden façades in particular represent the most critical design case. Studies that directly compared non-ventilated and ventilated wooden façades concluded that wooden claddings with rear-ventilated cavities released almost twice as much energy as wooden façade claddings without rear-ventilated cavities, thus resulting in more severe flame formation and accelerated fire spread [9,11,12].

Numerous research projects have identified fire stops as essential design measures in limiting the spread of fire on wooden façades to an acceptable level [13,14,15,16,17,18,19,20]].

Hietaniemi, et al. [11] have summarized the results of several studies. When there are fire stops in the rear-ventilated cavity, the fire propagation speed is halved to about 20 cm/min from the speed of 40 cm/min, which corresponds to an open fully rear-ventilated cavity. [11,12]

The spread of fire on wooden façades can be effectively limited by means of horizontal fire stops (projections) which break the continuous wooden cladding and ventilation cavity in separate areas. Typically, horizontal fire stops (usually made of steel sheet, wood, or mineral building materials – as shown in Figure PII. 2) are executed on each story at the level of the floor slabs and over the entire façade. The dimensions and design of the horizontal projection in front of the façade cladding primarily depend on the type of façade cladding used (as shown in Table PII. 6). [13, 14]

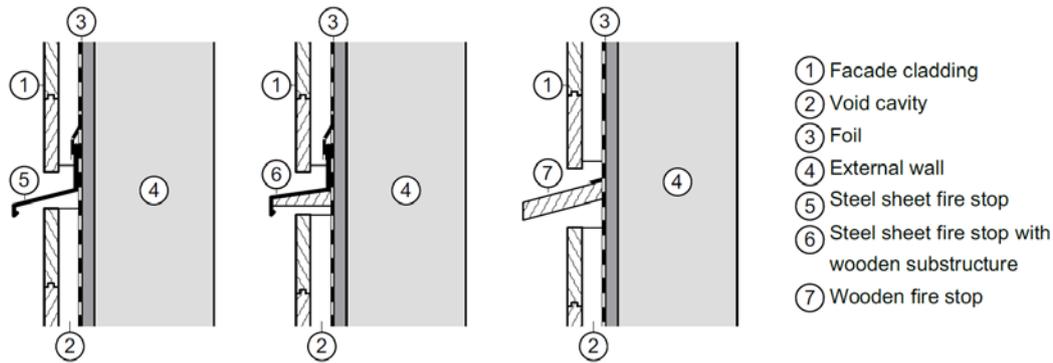


Figure PII. 2 Schematic illustration of typical horizontal fire stops (projections)

The spread of fire in interior corners of wooden façades should be limited by special measures, such as horizontal fire stops with a larger horizontal projection in front of the façade cladding, or by using non-combustible façade claddings in the area of the interior corners. [13, 14]

Another alternative for preventing the spread of fire at the façade is to use projecting non-combustible panels or slabs above openings. These projections deflect the fire plume away from the façade [21,22,23,24]. This solution is often used in high-rise buildings [25] but restricts the architectural design options for the façade.

2.4 Analysis existing experimental investigations

The fire safety of wooden façades was investigated by the Swiss Lignum research group as part of an experimental campaign in the early 2000s.

33 façade fire tests using various wooden façade claddings and different structural fire protection measures were conducted at MFPA in Leipzig, Germany, but the results were never fully published. The face of the test stand had a height of 8.3 m and a width of 3.3 m and was made of masonry. The influence of an interior corner was investigated via four tests. In the MFPA set-up, the main face of the test stand had a width of 2.4 m and the return wall (wing) had a width of 1.4 m. The combustion chamber was located at the bottom of the main wing. A 50 kg wooden crib was used as the fire load in 27 of the tests, and a 25 kg wooden crib in two of the tests. The 25 kg wooden cribs were used in conjunction with a corner application of the walls.

In addition, six real-scale fire experiments were performed in a vacant building in Merkers, Germany which was lined with wooden façade claddings (about 700 m²). The experiments sought to validate the results of the aforementioned fire tests on an actual building using realistic fire loads [13]. An experiment with a fire source outside of the building in front the façade (100 kg wood crib), a balcony fire experiment (150 kg wood crib), and four compartment fires with wooden cribs (fuel load density 600 MJ/m² and 800 MJ/m² respectively) were conducted.

These real-scale fire experiments confirmed that the various structural measures investigated in the 33 fire tests that effectively limit the spread of fire can also be applied to actual buildings. It was thus concluded that the overall findings from the façade tests could be transferred to real buildings for further application. It should be noted, however, that only fire stops made of steel sheet were used in the real-scale fire experiments.

Following evaluation and interpretation of the results, the structural fire safety measures were published in [13]. An overview of the findings is summarized in Table PII. 1 for buildings of medium height (>11 m; ≤ 30 m total height).

Table PII. 1 Minimum projection of horizontal fire stops depending on the type of cladding [13].

Cladding type	Orientation	Depth of the ventilation cavity	Overhang/projection depth of the horizontal fire stop	
			sheet steel or mineral-bonded panels	wood or wood-based material
Wood-based panels	horizontal or vertical	≤ 100 mm	≥ 10 mm without ^b	≥ 20 mm without ^b
Form-fit paneling and cladding Profile with tongue and groove	horizontal or vertical	≤ 100 mm	≥ 10 mm without ^b	≥ 20 mm without ^b
Force-fit paneling and cladding	horizontal	≤ 50 mm	≥ 10 mm without ^b	≥ 20 mm without ^b
		≤ 100 mm	≥ 50 mm ≥ 10 mm ^a without ^b	≥ 50 mm ≥ 20 mm ^a without ^b
	vertical	≤ 100 mm	≥ 100 mm ≥ 50 mm ^a without ^b	≥ 100 mm ≥ 50 mm ^a without ^b
		≤ 100 mm	≥ 100 mm ^a	≥ 100 mm ^a
Open cladding Strip cladding Cover cladding	horizontal	≤ 50 mm	≥ 50 mm ^a ≥ 100 mm ^c	≥ 100 mm ^c
Inverting cladding Cover strip cladding	vertical	≤ 100 mm	≥ 200 mm	≥ 200 mm

^a Cladding of oak, sweet chestnut, robinia, elm

^b Only for partly ventilated (not fully ventilated)

^c Joint between boards ≤ 10 mm, otherwise fire stop ≥ 200 mm

Specific regulations are presented herein along with the full documentation for façades with window bands, façades with single balconies in timber construction, and for other construction types [13].

Design solutions for the interior corners of façades with wooden claddings are also presented in [13]. In these areas, the overhang of the horizontal fire stop is recommended to be at least twice the projection of the standard case, which is typically in the range of 150 mm to 300 mm.

The wooden façades investigated were extinguished after an average time of 24 minutes. The basis for this approach was the assumption in [26], in which it was interpreted that the fire service arrives on site after a period of 15 minutes, so the spread of fire on the façade over a longer period need not be investigated. For this reason, the fire was always extinguished after 15 or 20 minutes, but a longer exposure time was also considered in individual cases [13]. Figure PII. 3 shows the relevant test durations after which the façades were extinguished; only fire tests on façades with wooden claddings are shown.

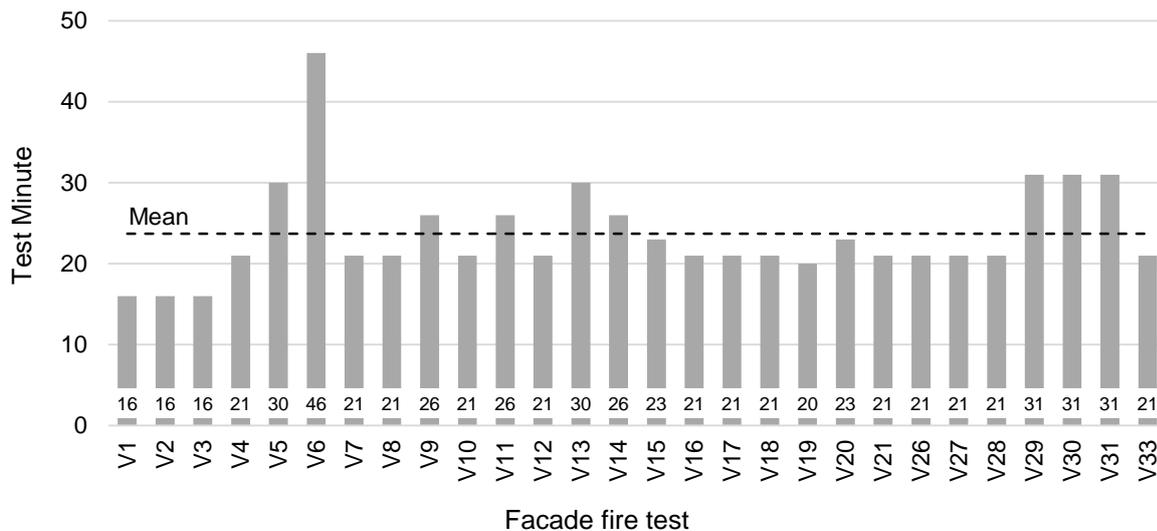


Figure PII. 3 Diagram showing the test duration in minute at which the façade fire tests were extinguished

Based on the results of the Lignum fire tests, the fire behavior of wooden façades can be reliably assessed up to a fire duration of about 20 minutes. No statements can be made about the behavior of wooden façades exposed to fire for longer durations. Therefore, further investigations were needed regarding whether the design measures developed in [13] can effectively limit the spread of fire in the event of longer fire exposures. A study of wooden façades in Sweden found that, in wooden façades with a rear-ventilated cavity, the spread of fire in the rear ventilation cavity increases sharply from 10 minutes onwards. This result supports the aforementioned concern [9].

Based on the Swiss results, an Austrian research team investigated five further wooden façade systems and fire stops on a façade test stand in accordance with ÖNORM B 3800-5 [16, 27]. In summary, the results reflected the following findings [14] (Table PII. 2).

Table PII. 2 Dimensions of the overhang/projection for fire stops depending on the type of cladding [14]

Cladding type	Material fire stop	Overhang
All exterior wall cladding including open cladding (vertical and horizontal) with the following conditions: Board ≥ 20 mm x 70 mm. Joint ≤ 10 mm.	Steel sheet	≥ 200 mm
	Timber with sheet metal covering	
	Timber $d \geq 40$ mm	
Form-fit paneling and cladding, force-fit paneling and cladding, wood-based panels	Steel sheet	≥ 100 mm
	Timber with sheet metal covering	

Five variations of a fire-safe design are presented for interior corners. Depending on the type of cladding and the distances to window openings, these show projections for horizontal fire stops of 100 mm to 300 mm in the interior corner.

According to the Austrian design rules, it is permitted to omit fire stops between the penultimate story and the last story. [14]

A French research team also investigated the behavior of wooden façades [15-18] in the case of fire. The investigations in France were the basis for the French façade guide for wooden façades [19]. In comparative studies, it was shown that fire stops delay the temperature increase into the rear-ventilation cavity for almost 10 minutes [18]. The specifications from [19] are summarized below. The guideline requires mounting the fire stops to the structural wall with a fixation spacing of no greater than 500 mm (Table PII. 3).

Table PII. 3 Dimensions of the overhang of fire stops according to the type of cladding and the material of the external wall behind the wooden façade [19]

Thickness Cladding	Materiality of the lining behind the wooden façade (surface of the external wall)	Overhang of the fire stop for		
		Panel with closed joints	Horizontal wood cladding	Vertical wood cladding
≥ 26 mm ^a	Non-combustible	≥ 150 mm ^c	≥ 150 mm ^c	≥ 200 mm ^c
	Stone wool	≥ 150 mm ^c	≥ 150 mm ^c	≥ 250 mm ^c
18 - 22 mm ^a	Non-combustible	≥ 200 mm ^c	-	-
20 - 22 mm ^a	Non-combustible	-	≥ 200 mm ^b	≥ 200 mm ^b

^a For untreated wood

^b Reinforced fire stop made of wood with sheet metal covering

^c Steel sheet or wood with sheet metal covering possible for fire stops

3 Large-scale fire tests

3.1 Aim of the study

The aim of the testing was to investigate the spread of fire on wooden façades outside the primary fire plume of the window opening. Guidance on the design and choice of relevant fire stops was furthermore derived from the tests.

The burning of the wooden façade in the primary fire area is unavoidable and must therefore be accepted. The vertical spread of fire must nevertheless be limited. There should be no further uncontrolled fire spread outside of the flame from the primary fire.

Depending on the flame height, the flames can overrun several fire stops [26]. In typical room fires, as evidenced by studies of real fire incidents and fire tests, average flame heights of between 2.0 m and 4.5 m and flame peaks up to 6.0 m outside the opening can be expected. This depends on the fuel load, room geometry, ventilation conditions, opening geometry, and wind conditions. [24,29,30] The fire stop above the fire plume represents the relevant measure for limiting the spread of fire, as shown in Figure PII. 4.

Given that the burning of the wooden façade in the primary fire area is unavoidable, the size of the resulting flame from an internal fire (e.g., from a window opening in a compartment fire) or an external fire (e.g., from a fire that occurs outside of the building in front of the façade) played no role in this investigation. For both scenarios, the governing factor is the fire propagation along the wooden façade above the primary flame. The aim was to obtain approaches for evaluating the fire stop above the primary flame.

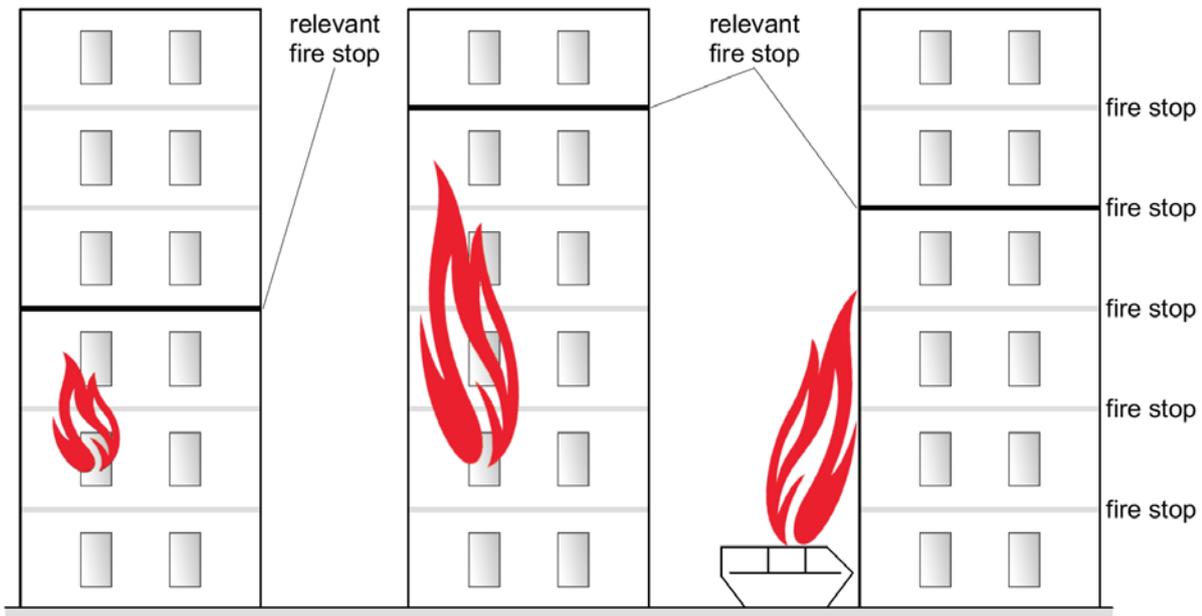


Figure PII. 4 Various fire scenarios at the façade and representation of the relevant fire stop for a wooden façades

Crucial for the following investigation is the degree of effectiveness of the constructive fire stops and protection measures. Of importance are:

- Whether or not the fire stop can limit the vertical and horizontal spread of fire outside the area of the fire plume coming from the window opening
- Whether or not self-extinction at the façade occurs after the compartment fire is extinguished
- Whether or not the spread of fire can be delayed by the fire safety measures

The primary focus herein is on the vertical spread of fire, because the Swiss studies have already shown that the horizontal spread of fire occurs only to a very small extent at wooden façades [13].

3.2 Test set-up

For reasons of repeatability and reproducibility, the tests were performed on a façade test stand based on German standard DIN 4102-20 [31]. This test method considers a fire exposure via a combustion chamber with a 30 kg wooden crib, as shown in Figure PII. 5. Although the thermal exposure of a 30 kg wooden crib is not entirely equivalent to that of a flame coming

from a window opening in a fully developed compartment fire, a similar thermal exposure occurs at the façade in the area of the flame tip and above the lintel of the opening [28,29]. For this reason, the test method was suitable for investigating fire propagation outside the primary fire plume at the flame tip.

A two-layer lining of 18 mm gypsum boards type F was used as the exterior face of the test stand, and the respective façade claddings being tested were mounted upon it. The dimensions of the test stand and the position of the fire stops are shown in Figure PII. 5. To exclude an early failure of the fire stops, the fixation of any fire stop was anchored into the structural timber elements behind the gypsum lining. [32]

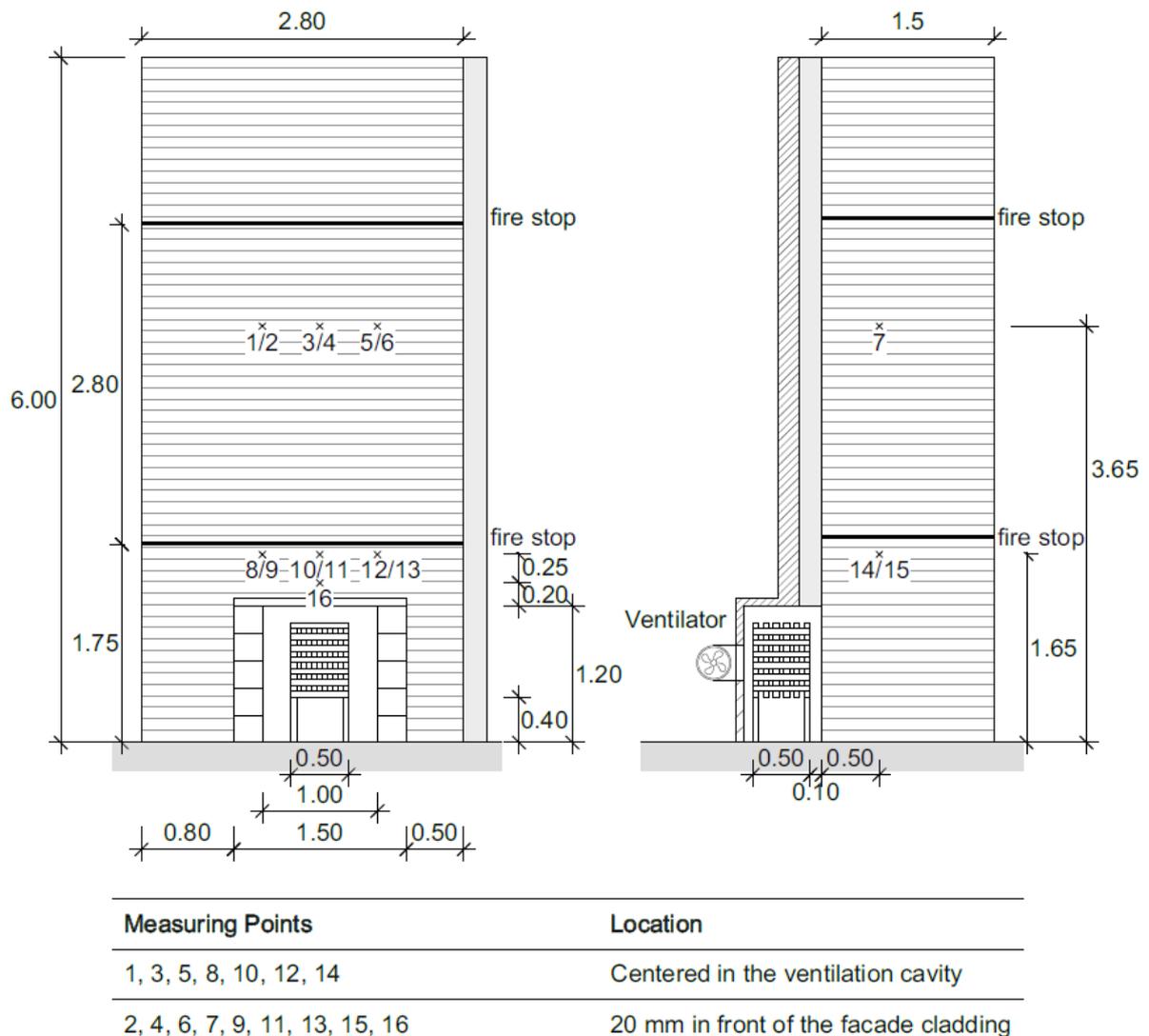


Figure PII. 5 Façade test stand with dimensions and measuring points; unit of dimensions [m]

As a fire load, 30 (± 1.5) kg of wooden cribs made of planed spruce timber with a density of 475 (± 25) kg/m³ and a wood moisture content of 12.4% were arranged in the form of 40 (± 2) x 40 (± 2) x 500 (± 10) mm sticks in staggered layers with a crosswise arrangement (90°) at a wood-to-air ratio of 1:1 in the combustion chamber. The base area of the wooden cribs was 500 x 500 mm.

The combustion chamber (1.0 m wide and 0.8 m deep) was built from aerated concrete blocks, and a rectangular opening with dimensions 300 x 250 mm (w x h) corresponding to an area of 0.075 m² was arranged at the backside for a mechanical ventilation of the crib, as shown in Figure PII. 5.

Due to the standardized test set-up, only façade fires spreading over one and a half stories can be investigated. It is known from studies on parallel room fires over two superimposed stories that the plume and the flame height increase [33,34]. The same phenomenon can be expected in the case of a façade fire over several stories. In view of the unpublished test reports from Switzerland, it can be seen that, in the case of a fire spreading over the fire stops, parts of the wooden facade of the story below are already burned down. This leads to the conclusion that the test method was adequate for a basic investigation.

3.3 Measurements

16 sheathed thermocouples of type K according to EN 60584-1 [35] with an outer diameter of 3 mm were arranged on the test rig for temperature measurement, as shown in Figure PII. 5. The thermocouples were guided through a hole from the rear of the test stand onto the façade and fixed either in the rear ventilation cavity or on the surface of the façade by means of wire. They were positioned centrally in the rear-ventilated void cavity or at a distance of 20 mm from the façade cladding [32]. Figure PII. 5 and Figure PII. 6 show the positions of the thermocouples.

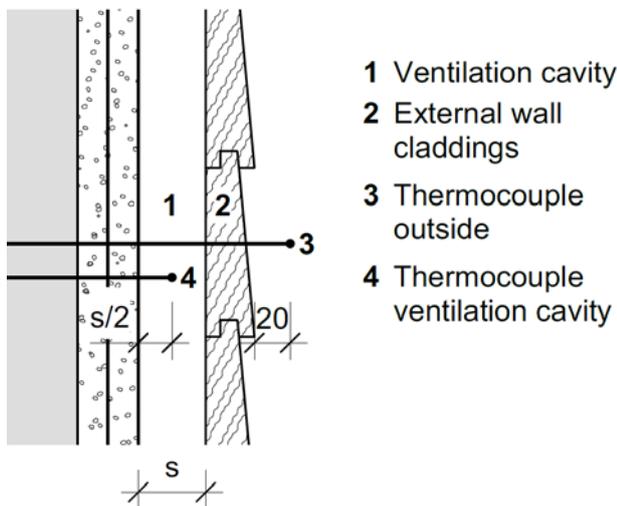


Figure PII. 6 Description of the temperature measuring points [in mm]

All sheathed thermocouples were orientated horizontally along the façade at ≥ 130 mm parallel to the isotherm in order to enable a correct temperature measurement.

In addition, all tests were recorded using a video camera and thermal imaging camera.

3.4 Specimen

The individual experimental set-ups are shown in Table PII. 4.

Table PII. 4 Description of the individual experimental set-ups

Test	Cladding	Substructure	Depth ventilation cavity	Fire stops (Figure PII. 6)	Overhang fire stops	Screw spacing fire stops	Wood moisture content cladding	Window reveal lining at the outer edges of the combustion chamber	Rain deflector site (Figure PII. 28)	Figure
1 [36]	Horizontal tongue and groove cladding/boards made of spruce (25 x 146 mm), see Figure PII. 25 of the appendix	Vertical spruce battens (24 x 50 mm) with a spacing of 625 mm	24 mm	Horizontal batten (20 x 40 mm), which limited the rear ventilated void cavity to 4 mm. <i>Only one fire stop at a height of 3 m</i>	-	625 mm	13.1%	yes	yes	Figure PII. 7
2 [37]	Horizontal inverted cladding/boards made of spruce (24 x 135 mm)	Vertical spruce battens (24 x 50 mm) with a spacing of 625 mm	24 mm	Steel sheet (2 mm thick)	100 mm	400 mm	11.7%	yes	yes	Figure PII. 8
3 [38]	Vertical tongue and groove cladding/boards made of spruce (25 x 146 mm) ^a , see Figure PII. 25 of the appendix	Cross lathing with vertical and horizontal spruce battens (each 24 x 50 mm) with a spacing of 625 mm	48 mm	Timber board (22 mm) wood moisture 12.8%	40 mm	400 mm	13.0%	no	yes	Figure PII. 9
4 [39]	Vertical tongue and groove cladding made of spruce (25 x 146 mm) ^a , see Figure PII. 25 of the appendix	Cross lathing with vertical and horizontal spruce battens (each 24 x 50 mm) with a spacing of 625 mm	48 mm	The rear ventilated cavity was closed at the top end of each story by a timber batten (36 x 48 mm) ^b	-	625 mm	12.8%	yes	yes	Figure PII. 10
5 [40]	Vertical open cladding made of spruce (22 x 100 mm) The distance between the boards was 10 mm each	Cross lathing with vertical and horizontal spruce battens (each 24 x 50 mm) with a spacing of 625 mm	48 mm	Steel sheet (2 mm thick)	250 mm	300 mm	12.0%	no	yes	Figure PII. 11

^aThe corner wall was lined with horizontally laid tongue and groove cladding (25 x 146 mm), as in Test 1.

^bNo fire stops were placed at the interior corner and the adjacent sidewall.

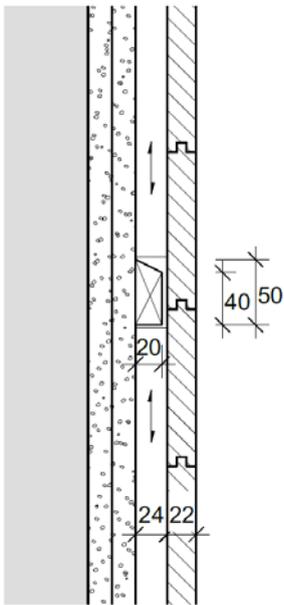


Figure PII. 7 Vertical section and photo of the façade structure with visualized fire stop in Test 1 [in mm]

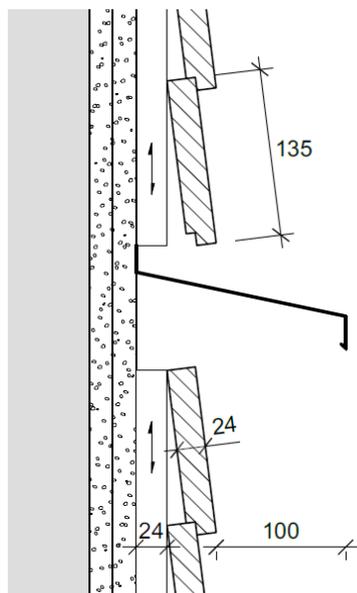


Figure PII. 8 Vertical section and photo of the façade structure in Test 2 [in mm]

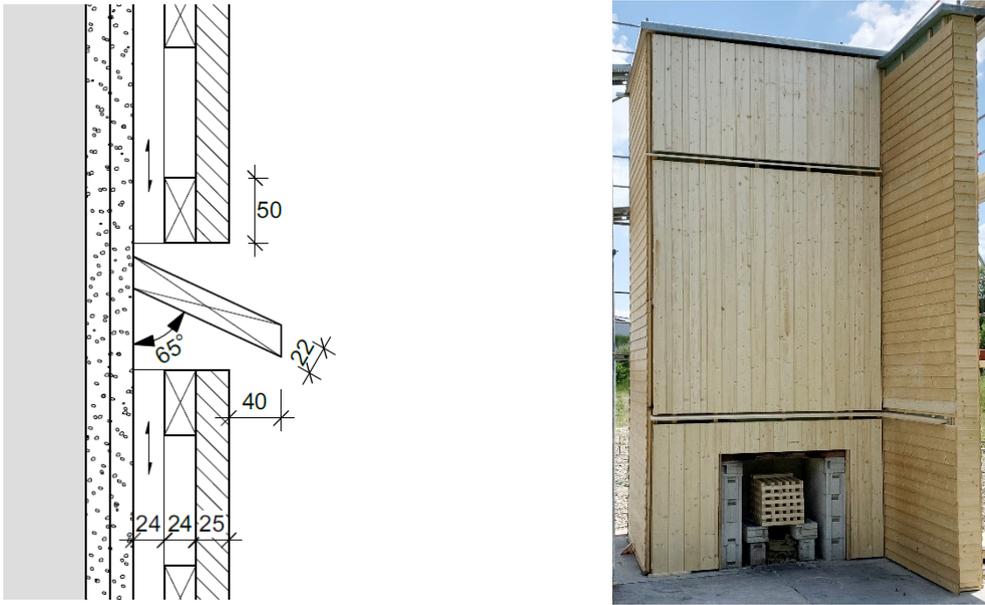


Figure PII. 9 Vertical section and photo of the façade structure in Test 3 [in mm]

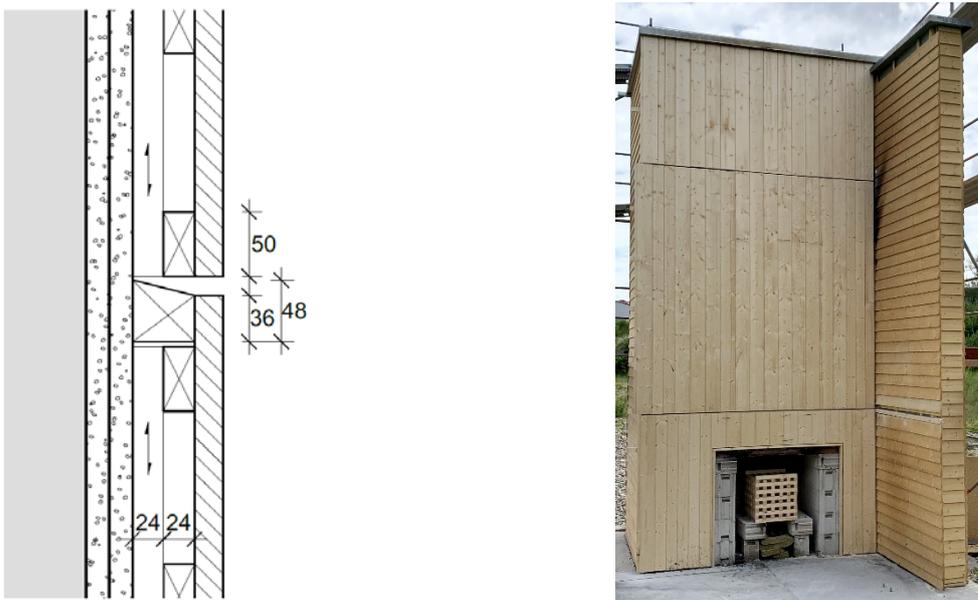


Figure PII. 10 Vertical section and photo of the façade structure in Test 4 [in mm]

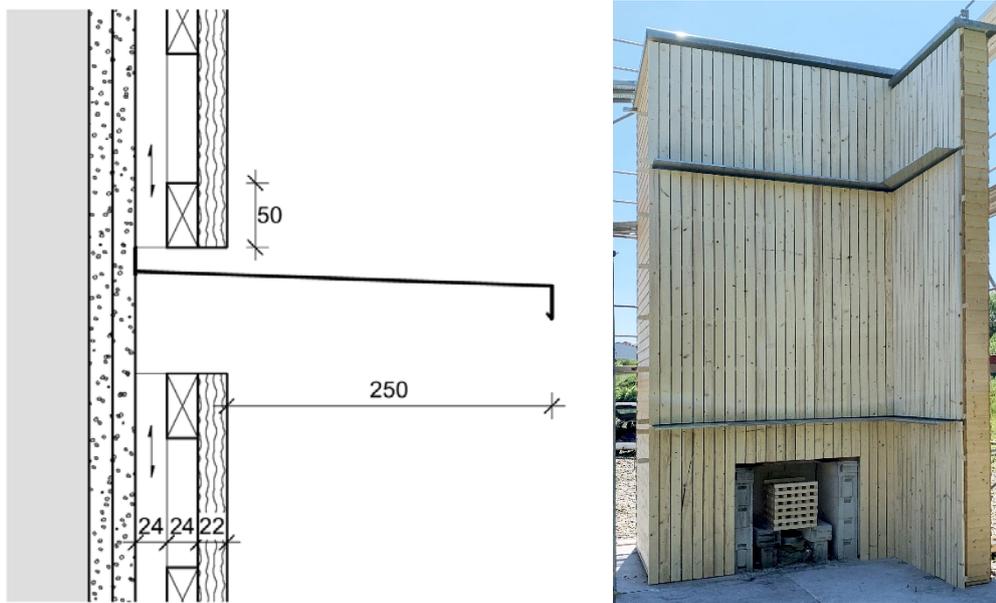


Figure PII. 11 Vertical section and photo of the façade structure in Test 5 [in mm]

3.5 Test procedure

The tests were performed on a wind-protected outdoor test stand. The corresponding weather data are provided in Table PII. 7 of the appendix.

An overpressure ventilation in the combustion chamber was enabled by a fan located at the rear side and started 120 seconds after ignition.

The flame spread over the individual fire stops was reported with an indication of the time based on the observations and measurements. The tests were stopped when the second fire stop was exceeded or the flames reached the upper end of the test stand.

4 Results

4.1 General

Table PII. 5 shows, for each test, the point in time at which: i) The flame coming from the combustion chamber evenly impinged the façade, ii) The first fire stop or the second fire stop was exceeded, and iii) The test was stopped and the fire extinguished. In addition, the test observations with regard to any horizontal fire spread and self-extinction of the façade cladding are presented in Table PII. 5. The observations from each test are briefly summarized in the following. Also shown are the temperature-time curve of measuring points 3, 4, 10, and 11, which were located in the centerline directly above the combustion chamber according to Figure PII. 6 in addition to at least one image of the respective façade immediately before extinguishing (end of test).

Table PII. 5 List of experimental observations over time

Observed fire impact on cladding	Test 1 [min]	Test 2 [min]	Test 3 [min]	Test 4 [min]	Test 5 [min]
Flame tip above combustion chamber	01:00	01:00	01:30	01:00	01:30
Burning above first fire stop	40:00 ^a	02:00	01:45	01:00	27:00
Burning above second fire stop	- ^a	-	27:30	46:30	39:30
Test end	47:00	46:30	30:00	50:00	42:30
Horizontal fire spread	no	only under 1. fire stop	yes in the area of fire stops	no	yes
Self-extinguishing	no	yes	no	no	no

^a only one fire stop in 3 m height, as shown in section 3

4.2 Test 1

As per section 3.4, only one fire stop at a height of 3 m from the lower edge of the test stand was installed. This fire stop was exceeded after 40:00 minutes and the test ended after 47:00 minutes. No horizontal fire spread was observed during the test, as shown in Figure PII. 12. A self-extinction did not occur.

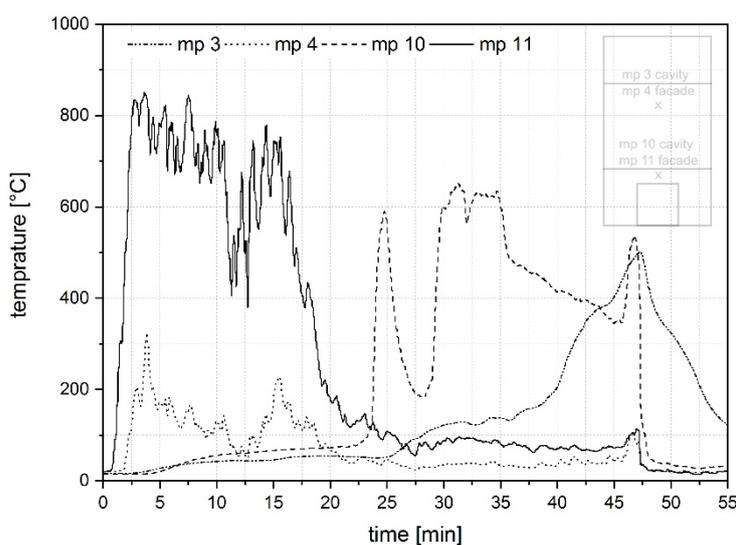


Figure PII. 12 Temperature-time diagram for measuring points [mp] 3, 4, 10, and 11 and a photo of Test 1 at minute 47

4.3 Test 2

The first charring above the first fire stop resulting from the flames coming from the combustion chamber was detected after 02:00 minutes, but the façade above the first fire stop did not exhibit flaming combustion. The test was stopped after 46:30 minutes; self-extinction occurred. A horizontal spread of fire and charring of the façade cladding was only detected below the first fire stop due to the horizontal deflection of the flames, as shown in Figure PII. 13.

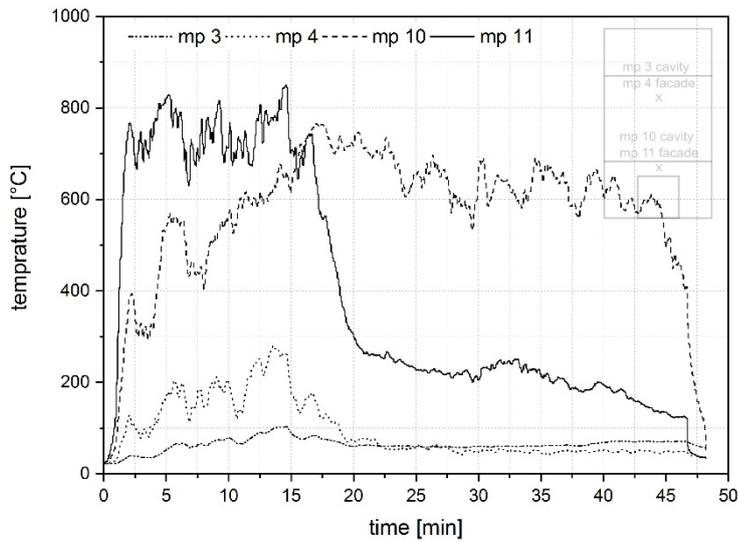


Figure PII. 13 Temperature-time diagram for measuring points [mp] 3, 4, 10, and 11 and a photo of Test 2 at minute 46

4.4 Test 3

After 01:40 minutes in Test 3, it was apparent that the first fire stop (overhanging wooden board) could no longer exclude a burning of the wooden cladding above the fire stop for the flame coming from the combustion chamber. Burning above the second fire stop was observed after 27:30 minutes. The test was terminated after 30:00 minutes because the flames reached the upper edge of the test stand. No self-extinction occurred. An obvious horizontal fire spread was observed directly in the area of each of the wooden fire stops, as shown in Figure PII. 14.

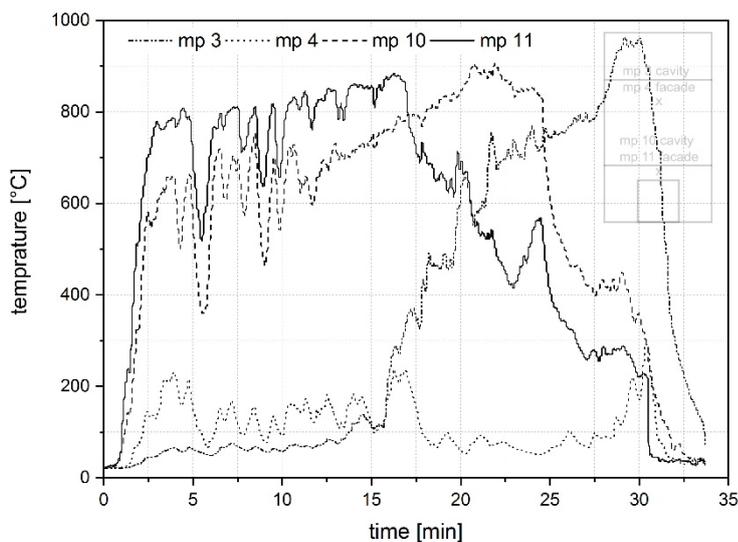


Figure PII. 14 Temperature-time diagram for measuring points [mp] 3, 4, 10, and 11 and a photo of Test 3 at minute 30

4.5 Test 4

In Test 4, with a closed rear-ventilated cavity at the top end of each story, the first fire stop exhibited no protection ability after only 01:00 minutes, and the second fire stop was no longer able to prevent burning of the wooden cladding above the fire stop after 46:30 minutes. The test was stopped after 50:00 minutes. Self-extinction did not occur. No horizontal spread of fire was detected, as shown in Figure PII. 15.

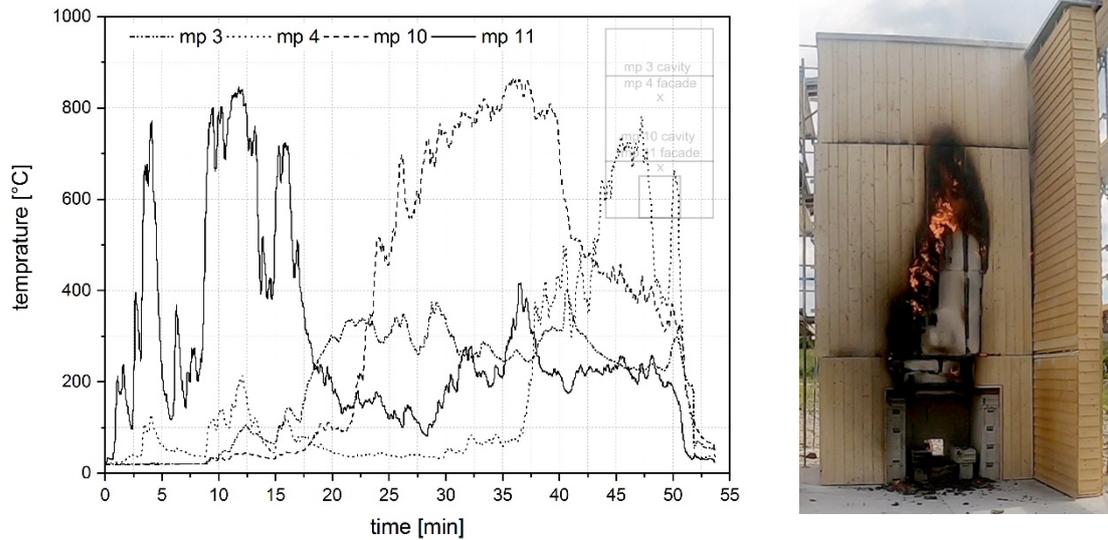


Figure PII. 15 Temperature-time diagram for measuring points [mp] 3, 4, 10, and 11 and a photo of Test 4 at minute 50

4.6 Test 5

The large overhang of the steel sheet fire stop in Test 5 prevented the spread of fire above the first fire stop for up to 27:00 minutes, as shown in Figure PII. 26 of the appendix. The fire spread above the first fire stop was caused by a gap between the steel sheet fire stop and the wall, through which hot gases rose, and by a deformation/lifting of the steel sheet fire stop in the direction of the wooden façade. Due to the massive burning of the façade cladding, the second fire stop was first spilled by the fire in the corner area after 39:30 minutes. The test was stopped after 42:30 minutes. Self-extinction did not occur. Horizontal fire spread was observed in the entire façade area above the first fire stop, as shown in Figure PII. 16.

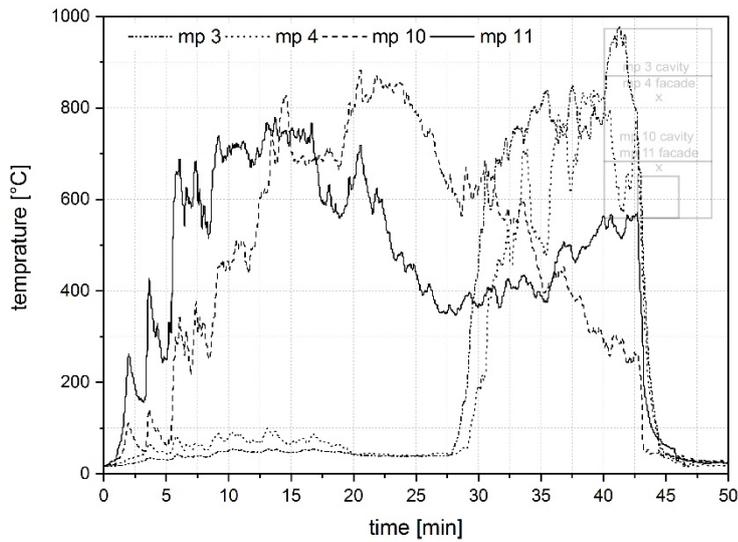


Figure PII. 16 Temperature-time diagram for measuring points [mp] 3, 4, 10, and 11 and a photo of Test 5 at minute 42

5 Fire design measures for wooden façades

5.1 General

The aim of this study was to define constructive measures that can prevent or limit the spread of fire on the wooden façade outside the primary flame area without any premature intervention by fire services. Furthermore, measures which able to lead to a self-extinction in consideration of the investigated scenarios were also to be identified.

The design measures described in the following sections can be derived in consideration of the experimental investigations in section 2 and the test conducted in section 3.

Figure PII. 17 shows the typical structure of a ventilated wooden façade. Following the numbering shown in Figure PII. 17, the respective design principles for these components are described below.

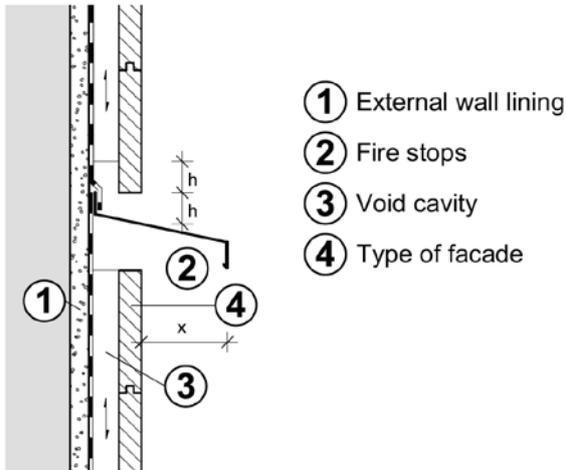


Figure PII. 17 Typical structure of a ventilated wooden façade

5.2 External wall lining behind the wooden façade (No. 1)

The outer surface of the external wall (No.1 in Figure PII. 17) should be made of non-combustible building materials. The major influence of the combustibility of the outer face of the wall forming the inner boundary of the ventilation cavity was already confirmed in the French investigations [18]. The rear-ventilated void cavity is formed by the wooden façade on one side and by the outer surface of the exterior wall on the other. If both surfaces are made of combustible materials, the fire spread will spread much faster within the void cavity and thus reach greater heights more quickly. A direct comparison of the previously described Test 1 and an unpublished industrial test [41] with a similar set-up but using wood fiberboard as the outer surface of the exterior wall also clearly shows this significant influence, as shown in Figure PII. 18. It should be noted that the measuring point for the variant with wood fiberboard was located 650 mm higher. Much higher temperatures occurred even though the measuring point for the variant with wood fiberboard was farther away from the combustion chamber.

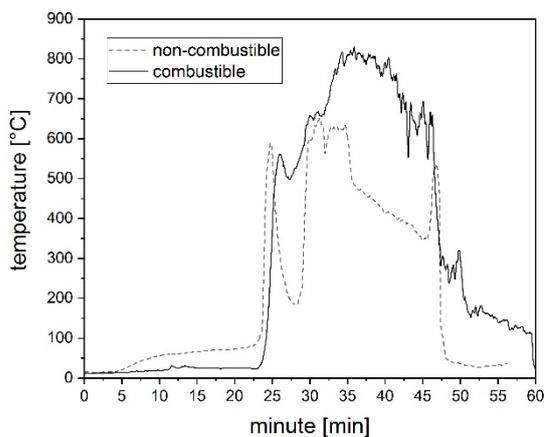


Figure PII. 18 Temperature-time curve measured in the rear-ventilated cavity for combustible and a non-combustible linings of the outer wall behind the façade cladding

No further fire stops were arranged during the test with the wood fiberboard, so the test had to be stopped after only 31 min, after which the flames had reached the upper end of the test stand.

For light timber frame or mass timber structures, it is recommended to use a layer of 2 x 12.5 mm or 1 x 18 mm gypsum plasterboard type F or gypsum fiberboard as the outer face of the external wall elements. Beyond the positive influence on the façade, such layers also provide 30 minutes of encapsulation for the wall elements behind [42].

The typical foils or membranes less than 0.5 mm thick that are required for weather protection or moisture control on top of the outer gypsum layer (as shown in Figure PII. 17) have no negative impact on the aforementioned behavior and, due to the low total heat of combustion, they make no noteworthy contribution to the spread of fire inside the ventilation cavity.

5.3 Type of façade (No. 4) and ventilation void cavity (No. 3)

In view of the available test reports listed in section 2.4 and the findings obtained in our own investigation, it can be concluded that the fire behavior of a wooden façade is strongly dependent on the type of cladding and its application. This means that the type of façade in combination with the design of the substructure and ventilation cavity has a great influence on the spread of fire along the façade and, therefore, on the performance of fire stops.

In general, it was seen that a closed façade cladding design and reducing the depth of the rear-ventilation cavity resulted in improved façade performance with regard to fire spread. It can thus be stated that the types of façade claddings listed in Table PII. 6 - from top to bottom - should be assessed more critically from a fire safety point of view. This ranking also applies to the horizontal spread of fire. Looking at Table PII. 5, it can be stated that a horizontal fire spread outside the fire stops was only observed for open façade claddings.

A panel cladding designed as a completely closed system represents the best design with regard to vertical and horizontal fire spread, and a vertical open cladding with four-sided fire exposure at the cladding thus represents the worst variant.

The spread of fire on open claddings exposed to fire on four sides is well illustrated by the experiments regarding vertical and horizontal fire propagation in [43]. The horizontal fire spread increased significantly at a smaller spacing. However, the vertical fire spread was significantly greater than the horizontal in all of the investigational set-ups.

The decisive factor with respect to the spread of fire is the degree of the thermal induced formation of gaps for the façade cladding. In all of the tests conducted, faster fire spread was observed after the first gaps appeared in the cladding towards the rear-ventilation cavity in the area of the primary flame, because the cladding was exposed to fire on two sides and sufficient oxygen was available. Regarding to the overall fire behavior, form-fit claddings with, e.g., tongue-and-groove joints which prevent continuous gaps for a longer fire duration typically behave better than force-fit claddings, especially when thermal deformation and shrinkage are taken into account. The thickness of the cladding is an essential factor for the time at which continuing gaps in the façade cladding over its entire surface occur. It has already been shown

in other studies that the increase in the thickness of the wooden cladding led to a temporary reduction in the heat release [17]. Considering the tests performed tests and the test results, claddings with a nominal thickness of ≥ 21 mm are recommended. Local reductions can be tolerated, but the thickness should not be less than 12 mm. Furthermore, the wooden cladding should have a minimum density of 350 kg/m^3 .

During the tests, it was also observed that vertically oriented cladding led to a faster and more severe vertical fire spread than a horizontally oriented cladding. This outcome can be ascribed to two causes in particular. On the one hand, the burning rate of wood in the direction of the grain can be assumed to be twice as high as that perpendicular to the grain [44] and, on the other hand, the additional substructure (crosswise lathing) in conjunction with the increased ventilated void cavity also contributes to a faster and a more intensive spread of fire. The reason for this is that cross-lathing is typically used for vertically arranged wooden cladding. This means that both vertical and horizontal battens are arranged underneath the cladding (as shown in Figure PII. 27 of the appendix), thus increasing the ventilation cavity to twice the size. The larger cavity and three-sided fire exposure on the vertically running lathing contributes to a faster spread of fire in the vertical direction and to a more severe exposure at horizontal fire stops.

Based on the tests performed, the ventilation cavity should be limited to a maximum depth of 50 mm (cross-lathing with max. 2×25 mm). In the case of cross lathing, the ventilation cavity should be closed at horizontal intervals of no more than 5 m by doubling up the vertical battening, as shown in Figure PII. 19.

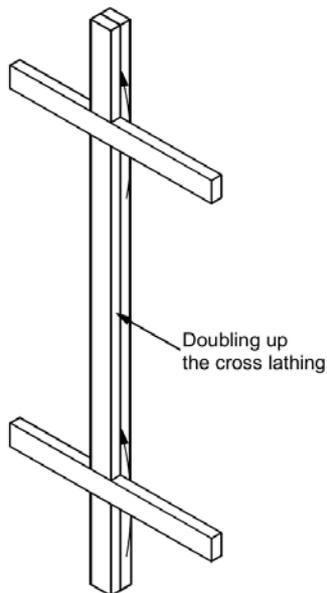


Figure PII. 19 Representation of doubling up the cross lathing to avoid uncontrolled horizontal fire spread in the void cavity

Furthermore, the ventilation cavity should be fully blocked (width ≥ 50 mm) at the lateral ends of the façade and the internal corners, as shown in Figure PII. 20.

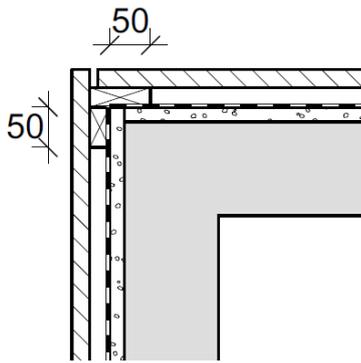


Figure PII. 20 Design principle for blocking the lateral ends of the façade

Another positive measure gained from the test regarded the reveal lining around the window opening and the diagonally fixed rain deflector above the window. Both prevented a direct spread of fire into the ventilated void cavity, as shown in Figure PII. 28 of the appendix.

It should also be noted that, after the end of the test, the façade fires were able to be extinguished quickly and with little water. No special tactics or equipment was needed. This confirms the comparative studies on extinguishing techniques on wooden façades in [45].

5.4 Fire stops (No. 2)

The investigations in section 2.3 show that partially rear-ventilated façades perform better than fully rear-ventilated façades with respect to fire spread [11, 12]. This was also proven as part of the test series presented earlier. The blocking of the rear-ventilation cavity by timber battens is an effective means of slowing down the spread of fire along wooden façades. However, self-extinction or a reduction of the spread of fire across a story level cannot be achieved using this structural measure alone. Overhanging fire stops arranged at the floor level are more suitable with respect to the latter two requirements. As per the Swiss and Austrian guidance documents [13, 14], fire stops made of steel sheet, timber with sheet metal covering, and mineral-bonded boards are recommended as horizontal fire stops. In the current test series, the positive effect of horizontal steel sheets as fire stops was also confirmed over a longer test period. However, the effect of common wooden boards as horizontal fire stops (Test 3) could not be confirmed for a longer test period as part of this test series.

After a certain period, the wooden fire stops contributed to the spread of fire due to burning themselves and becoming charred through, but they also enlarged the horizontal affected area exposed by the flames, as shown in Figure PII. 14 in Test 3. Considering the tests performed, combustible fire stops, even those with sheet metal support, are not an effective means of preventing the spread of fire over a longer period of time.

Fire stops made of mineral-bonded boards were not explicitly investigated in the full-scale tests. However, challenges surrounding the adequate fixation of the fire stops were identified in model set-ups [32].

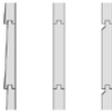
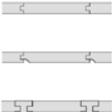
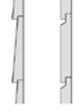
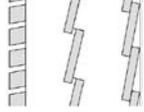
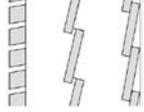
Composite fire stops made of steel sheets and mineral-based boards might offer advantages in terms of thermal expansion effects or fixation, but the behavior of such composite fire stops requires further investigation.

Effective fire stops should be made of steel sheets with a thickness ≥ 2 mm. The fire stops must tightly fixed to the non-combustible substructure, as shown in section 5.2, and the fasteners (screws $d \geq 5.0$ mm) should be anchored at least 35 mm into the load-bearing structure of the wall behind, as shown in Figure PII. 29 of the appendix.

As mentioned in section 5.3, varying fire exposure may occur on the fire stops, depending on the type of façade cladding. The three relevant influencing factors are the design of the façade cladding, the design of the substructure, and the depth of the ventilation cavity. Based on the available information in the literature and the tests performed, the overhang depth x (as shown in Figure PII. 17 and provided in Table PII. 6) are recommended. The objective was to prevent a spill by the flames of the relevant fire stop above the primary flame for a period of > 30 min. Such behavior offers fire services in particular a chance to fight the façade fire after the executing their primary measures (e.g., occupant rescue). The most important effect on the horizontal fire stop is not the primary flame from the window opening itself, but rather the extensive burning of the façade cladding in the relevant story, as is obvious from Test 5. In principle, self-extinction can also be expected with these designs after the cladding below the relevant fire stop has charred completely. However, further tests which also take into account influencing factors like wind must be performed in order to confirm this point conclusively.

Interior corners have a noticeable influence on the flame height and the resulting temperatures in façade fires. This fact has already been demonstrated in a variety of studies [46]. These effects, which are particularly prominent for combustible wooden façades, must be considered when designing fire stops in interior corners. Based on the tests conducted and the information available from the literature, Table PII. 6 also provides the overhang depth x (according to Figure PII. 17) for interior corners. The area of the increased overhang in interior corners should be at least 1.0 m to each side, as shown in Figure PII. 22.

Table PII. 6 Overhang x depending on the various types of cladding for wooden façades

Cladding type	Scheme	Orientation	Overhang x	Overhang x in interior corner	
Wood-based panels		horizontal or vertical	≥ 50 mm	≥ 150 mm	
Form-fit paneling and cladding		horizontal	≥ 50 mm	≥ 150 mm	closed façades
Profile with tongue and groove		vertical	≥ 100 mm	≥ 150 mm	
Force-fit paneling and cladding		horizontal	≥ 100 mm	≥ 150 mm	
		vertical	≥ 150 mm	≥ 200 mm	
Open cladding		horizontal	≥ 200 mm	≥ 250 mm	open façades
Strip cladding					
Cover cladding					
Inverting cladding		vertical	≥ 250 mm	≥ 250 mm	
Cover strip cladding					

During the observations for Test 5, it became obvious that fire spread across the horizontal fire stop may occur even though no direct exposure by flames exists, as shown in Figure PII. 16 and Figure PII. 26 of the appendix. This fact can be explained by three factors. On the one hand, the steel fire stops expanded under the thermal exposure, which consequently led to a joint opening in between the screwed spots of the fire stop, as shown in Figure PII. 21. The thermal exposure on the above structural timber elements (timber battens and cladding) increased through these gaps. Screw spacings of 300 - 400 mm were used in the five tests. Taking into account the temperature exposure according to section 4 of about 800°C and considering an expansion coefficient for steel of $11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ obtains an approximate thermal expansion in one dimension for a 400 mm spacing of 3.52 mm [47]. This thermal expansion would, approximately, lead to a gap of about 27 mm depth between the steel sheet and the outer wall face, which was confirmed by the test evaluation. Figure PII. 21 shows the fire stop after the test, with reduced deformation but with a gap still present. In practice, fixation distances of ≤ 200 mm are recommended based on the test findings. In addition, in consideration of the effect of thermal expansion and weather resistance, the fire stops should have 20 mm slotted holes into which fasteners are inserted centrally. Furthermore, panel joints behind the fire stops should be avoided, filled, or calked.



Figure PII. 21 View of the fire stop from above with gap caused by thermal expansion

The second factor regarding fire propagation across fire stops can also be attributed to the effect of thermal deformation and the upwards lifting of the steel sheet fire stops. During Test 5, it was observed that the fire stop, which was subjected to high fire exposure, lifted upward and moved closer to the timber lathing and the cladding above. The reduced distance and the high temperatures of the steel sheet fire stops caused a spread of fire to the wooden cladding and the timber lathing, as shown in Figure PII. 30 of the appendix. To counteract this effect, substructures and other combustible components should be arranged at a distance of $h \geq 20$ mm (Figure PII. 17) to the steel sheet fire stops.

The third factor regarding fire spread without direct fire exposure at the fire stops can be the result of insufficient joint overlapping along the longitudinal direction of the fire stops and in the corners. Taking into account the thermal expansion, deflections and other deformations, the tests showed that a longitudinal overlap of 50 mm is not sufficient in all cases. For this reason, longitudinal joints in steel sheet fire stops should be joined mechanically or by welding in a friction-locked and jointless manner, or they should be designed with a joint overlap of at least 300 mm. In the area of both sides of interior corners, the fire stops with a length of ≥ 1.0 m should have the aforementioned friction-locked jointless connections, as shown in Figure PII. 22.

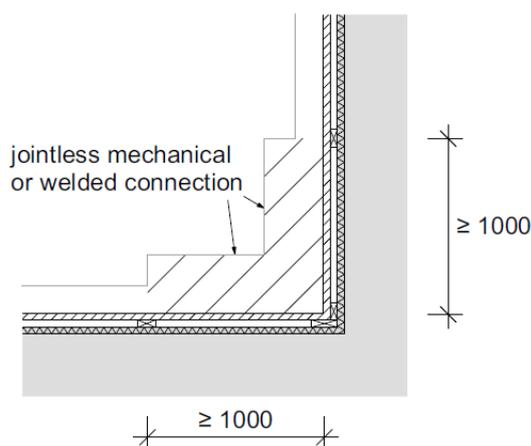


Figure PII. 22 Representation of the fire stops in the inner corner with jointless mechanical or welded connection (hatching).

6 Conclusion and outlook

The aim of this study was to investigate fire stops on wooden façades when exposed to fire over a longer period of time and to evaluate their influence on the spread of fire.

During the research, fire stops made of steel sheet were identified as the most promising option for reducing the spread of fire. It also seems possible, taking into account various boundary conditions, that they can be used in the design of self-extinguishing wooden façades.

The decisive influencing factors for the dimensioning of the fire stops are:

- The type of the wooden façade cladding and substructure,
- The depth of the rear-ventilation void cavity, and
- The reaction to fire classification of the outer wall layer behind the wooden façade.

When designing fire stops for wooden façades, attention must be paid to the design of the fastening and the joint formation due to effects such as thermal expansion in addition to the dimensioning of interior corners.

By taking these parameters into consideration, fire-safe wooden façades can be designed regarding the respective fire safety requirements.

In the context of further investigations, other possible types of façade claddings should be considered in more detail and should consider a variety of effects, such as the fire of several floors below the relevant fire stop, as well as wind effects.

Within the scope of this study, only façade fires with a spread over one and a half stories were investigated. Further investigations are necessary in order to reach conclusions about the fire intensity of facade fires over several floors.

In addition, the topics of self-extinction, the fire stop interior corner design, and the investigation of the performance of composite boards made from steel and mineral materials represent other areas in need of further research.

The aesthetic appearance of a façade plays a decisive role in building design from an architectural point of view. Wide overhanging fire stops will usually be in conflict with architectural demands. For this reason, design options allowing architectural demands without reducing the safety level should be developed. In particular, the consequent further development of active and passive flame deflectors [48] could play a future role in this context.

References

- [1] United Nations Economic Commission for Europe; Green Building. <https://unece.org/forests/green-building>. Accessed 28 June 2021
- [2] Hildebrand J, Hagemann N, Thrän D (2017) The contribution of wood-based construction materials for leveraging a low carbon building sector in Europe. *Sustainable Cities and Society* 34:405–418. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.06.013>
- [3] Moore-Bick M (2019) Grenfell Tower Inquiry: Phase 1 Report; Report of the public inquiry into the fire at Grenfell Tower on 14 JUNE 2017. Volume 4
- [4] Yeung J, Kwon J, Bae G (2020) Dozens hospitalized after fire engulfs 33-story apartment building in South Korea. CNN. <https://edition.cnn.com/2020/10/09/asia/ulsan-korea-building-fire-intl-hnk/index.html>. Accessed 30 March 2021
- [5] German Institute for Standardization (2012) DIN 68800-2:2012-02 Wood preservation - Part 2: Preventive constructional measures in buildings. Berlin
- [6] German Institute for Standardization (2010) DIN 18516-1:2010-06 Cladding for external walls, ventilated at rear - Part 1: Requirements, principles of testing. Berlin
- [7] Mayer E, Künzle H (1984) Notwendige Hinterlüftung an Außenwandbekleidungen aus großformatigen Bauteilen. IBP-Mitteilung 11 (1984). Nr. 92. Fraunhofer-Institut für Bauphysik
- [8] Kolaitis D, Asimakopoulou E, Founti M (2016) A full-scale fire test to investigate the fire behaviour of the "Ventilated Façade" system. Conference: Interflam 2016
- [9] Boström L, Skarin C, Dunny M, McNamee R (2016) Fire test of ventilated and unventilated wooden façades (SP Rapport)
- [10] Colwell S, Baker T (2013) Fire Performance of External Thermal Insulation for Walls of Multistorey Buildings. BRE Trust. 3rd edition 2013
- [11] Hietaniemi J, Hakkarainen T, Huhta J, Jumppanen U-M, Kouhia I, Vaari J, Weckman H (2003) Ontelotilojen paloturvallisuus. Ontelopalojen leviämisen katkaiseminen. Espoo: Tiedotteita
- [12] Korhonen T, Hietaniemi J (2005) Fire Safety of Wooden Façades in Residential Suburb Multi-Storey Buildings. Espoo 2005. Technical Research Centre of Finland. VTT Working Papers 32
- [13] Bart B, Kotthoff I, Wiederkehr R, et al. (2019) Lignum-Dokumentation Brandschutz 7.1 Aussenwände - Konstruktion und Bekleidungen. Lignum, Holzwirtschaft Schweiz, Zürich

- [14] Austrian Standards Institute (2015) ÖNORM B 2332:2015 Fire resistant execution of façades of timber and of wood-based panels for building classes 4 and 5 — Requirements and examples for execution. Wien
- [15] Hakkarainen T, Oksanen T, Mikkola E (1997) Fire behaviour of façades in multi-storey woodframed houses. Espoo 1997, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita - Meddelanden Research Notes 1823
- [16] Teibinger M, Matzinger I, Schober P (2013) Experimental study of the fire performance of wooden façades; MATEC Web of Conferences Volume 9; 1st International Seminar for Fire Safety of Façades; Paris <https://doi.org/10.1051/mateconf/20130902004>
- [17] Dhima D, Gaillard JM (2017) Experimental Study of the Fire Behaviour of Wooden Façades. Fire Science and Technology 2015:193-203. https://doi.org/10.1007/978-981-10-0376-9_19
- [18] Hameury S, Koutaiba E M, Anest-Bavoux P, Jullien Q, Lardet P, Georges V, Pinoteau N, Dhima D (2018) Fire safety of façades in medium and high-rise wood building. The French Experience, 2018 World Conference on Timber Engineering, Seoul
- [19] CSTB (2020) Bois construction et propagation du feu par les façades; Appréciation de laboratoire; 25/11/2020 – Version 3.0; CSTB & Institut Technologique FCBA
- [20] Dhima D, Hameury S (2017) Fire behaviour of wooden façades – State of the art in France. FAÇADES WORKSHOP Fire Safe Use of Bio-Based Building Products for Façades - Challenges and Limitations, Detailing and Testing, Barcelona
- [21] Martin Y, Eeckhout S, Lassoie L, Winnepeninckx E, Deschoolmeester B (2017) Fire safety of multi-storey building façades. BBRI. Brussels
- [22] Jullien Q, Koutaiba E M, Bavoux P A, Pinoteau N (2019) Horizontal deflectors impact on vertical wooden façade combustion. FSF 2019- 3rd International Symposium on Fire Safety of Façades, Paris
- [23] Oleszkiewicz I (1990) Fire exposure to exterior walls and flame spread on combustible cladding. Fire Technol 26:357–375. <https://doi.org/10.1007/BF01293079>
- [24] Kordina K, Jeschar R, Bechtold R, Ehlert K-P, Wesche J (1978) Brandversuche Lehrte; Schriftenreihe „Bau- und Wohnforschung" des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau; Nr. 04.037, 1978, Bonn-Bad Godesberg
- [25] Fachkommission Bauaufsicht Projektgruppe MHHR (2002) Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb von Hochhäusern. Fassung April 2008 zuletzt geändert durch Beschluss der Fachkommission Bauaufsicht vom Februar 2012
- [26] Regierungskonferenz für die Koordination des Feuerwehrwesens (RKKF) (1999) Feuerwehr 2000 plus, Konzeption; Herlsau

- [27] Austrian Standards Institute (2013) ÖNORM B 3800-5:2013 Fire behaviour of building materials and components - Part 5: Fire behaviour of façades - Requirements, tests and evaluations. Wien
- [28] Engel T, Werther N (2020) Analyse der zulässigen Brandausbreitung über die Fassade. Bautechnik 97:558–565. <https://doi.org/10.1002/bate.202000007>
- [29] Kotthoff I (2000) Forschungsbericht BI5-8001 96-18: Erarbeitung realer Prüfbedingungen für die Durchführung von Original-Brandprüfungen an B 1-Fassadensystemen und eines Verfahrens zur Berechnung von Brandabläufen an Fassaden. Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig e.V. 1. Ausfertigung, 3. Okt. 2000
- [30] Abecassis Empis C (2010) Analysis of the compartment fire parameters influencing the heat flux incident on the structural façade. Dissertation, Edinburgh
- [31] German Institute for Standardization (2017) DIN 4102-20:2017-10 Fire behaviour of building materials and building components - Part 20: Complementary verification for the assessment of the fire behaviour of external wall claddings. Berlin
- [32] Grimm W (2020) Fire performance of wooden façades (Holzfassaden aus brandschutz-technischer Sicht). Master Thesis, Technical University of Munich
- [33] Ren F, Zhang X, Hu L, Sun X (2019) An experimental study on the effect of fire growth in a lower-floor compartment on fire evolution and facade flame ejection from an upper-floor compartment. Proc Comb Inst 37:3909–3917. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.07.014>
- [34] Bechtold R (1977) Zur thermischen Beanspruchung von Außenstützen im Brandfall. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der Technischen Universität Braunschweig. Dissertation, Technische Universität Braunschweig
- [35] European Committee for Electrotechnical Standardization (2013) EN 60584-1 Thermocouples – Part 1: EMF specifications and tolerances (IEC 60584-1:2013). Brussels
- [36] Grimm W, Engel T (2020) Versuchsbericht; Brandversuche an Holzfassaden – Versuch 1; Horizontale Nut und Feder-Schalung mit Reduzierung der Hinterlüftung. Technical University of Munich
- [37] Grimm W, Engel T (2020) Versuchsbericht; Brandversuche an Holzfassaden – Versuch 2; Horizontale Stülpchalung mit Stahlblechschürze (100 mm). Technical University of Munich
- [38] Grimm W, Engel T (2020) Versuchsbericht; Brandversuche an Holzfassaden – Versuch 3; Vertikale Nut und Feder-Schalung mit Holzschürze (40 mm). Technical University of Munich

- [39] Grimm W, Engel T (2020) Versuchsbericht; Brandversuche an Holzfassaden – Versuch 4; Vertikale Nut und Feder-Schalung mit Unterbrechung der Hinterlüftung. Technical University of Munich
- [40] Grimm W, Engel T (2020) Versuchsbericht; Brandversuche an Holzfassaden – Versuch 5; Vertikale Offene Schalung mit Stahlblechschräge (250 mm). Technical University of Munich
- [41] Grimm W, Engel T (2020) Versuchsbericht; Brandversuche an Holzfassaden – Versuch 6; Holztafelbauwand mit horizontaler Nut und Feder-Schalung. Technical University of Munich
- [42] Engel T, Brunkhorst S, Steeger F, Winter S, Zehfuß J, Kampmeier B, Werther N (2020) TIMpuls Grundlagenforschung zum Brandschutz im Holzbau – Abbrandraten, Schutzzeiten von Bekleidungen und Nachbrandverhalten von Holz. Bautechnik 97:97-107 <https://doi.org/10.1002/bate.202000043>
- [43] Jiang L, Zhao Z, Tang W, Miller C, Gollner M (2018) Flame spread and burning rates through vertical arrays of wooden dowels. Proceedings of the Combustion Institute. 37. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2018.09.008>
- [44] White R H, Dietsberg M A (2010) Fire Safety of Wood Constructions. Wood Handbook – Wood as an Engineering Material, Chapter 18, General Technical Report FPL-GTR-190 Madison WI
- [45] Hox K, Bøe A S (2017) Slokkemetoder med lite vann, SP Fire Research, Trondheim, Norway, A17 20099-01:1, 2107
- [46] Serway R, Jewett J W (2014) Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics. Ninth Edition. Cengage Learning Brooks/Cole, Boston
- [47] McGrattan K, Stroup D (2020) Wall and Corner Effects on Fire Plumes as a Function of Offset Distance. Fire Technol 57:977–985. <https://doi.org/10.1007/s10694-020-01053-2>
- [48] Harmathy T Z (1974) Flame deflectors. Building Research Note, 1974-10. Fire Research Section Division of Building Research, NRC. Ottawa

Appendix



Figure PII. 23 Façade as vertical cover strip cladding



Figure PII. 24 Façade as vertical tongue and groove cladding

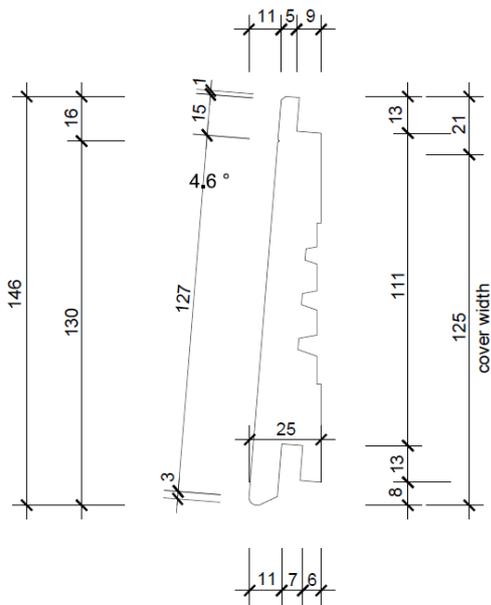


Figure PII. 25 Dimensions of the wooden boards used for the tongue and groove cladding [in mm]



Figure PII. 26 Photo of Test 5 at minute 28

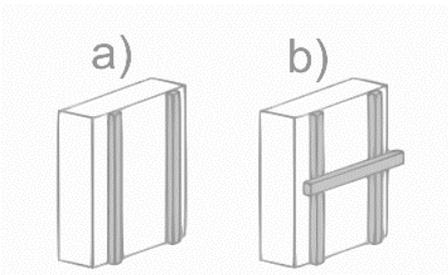


Figure PII. 27 Substructure as a) vertical or b) cross-lathing



Figure PII. 28 Reveal lining and rain deflector site

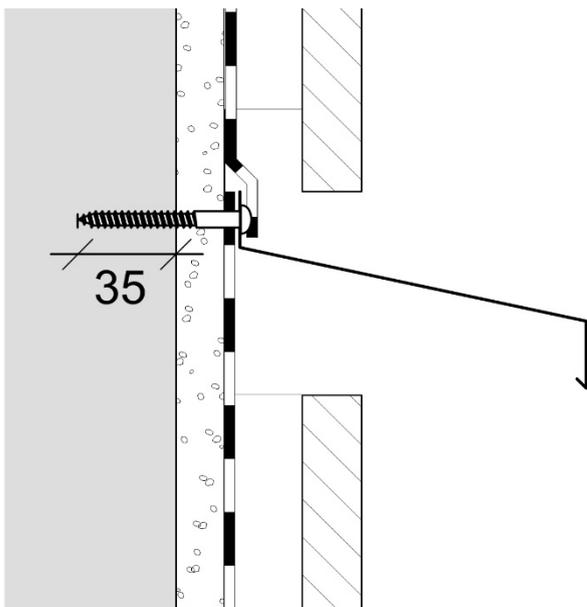


Figure PII. 29 Anchorage depth of the screw for fixing the fire stops [in mm]

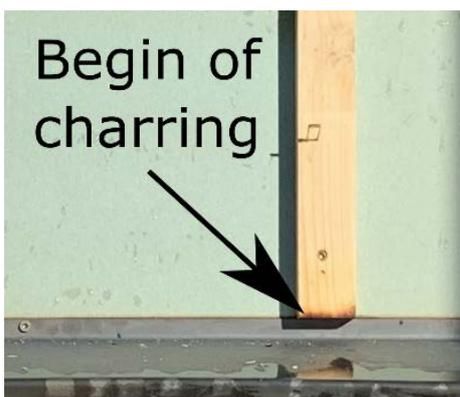


Figure PII. 30 Onset of charring on the substructure in Test 2

Table PII. 7 Weather data of the individual fire tests

Test	Temperature [°C]	Air pressure ^a [hPa]	Weather
1	21,0	1023	sunny
2	27,3	1019	sunny
3	23,2	1021	slightly cloudy
4	20,6	1020	cloudy
5	20,1	1031	sunny

^a taken from regular data of the German Weather Service

Electronic supplementary material



PAPER III

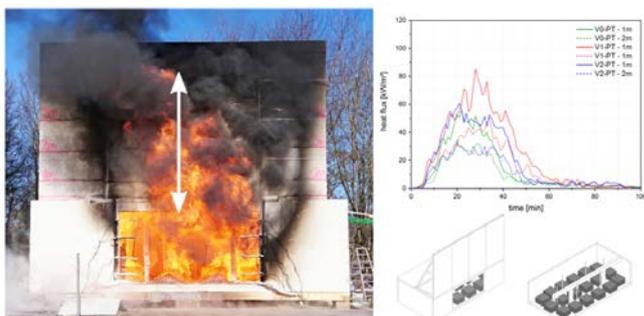
Impact of mass timber compartment fires on façade fire exposure

Thomas Engel, Norman Werther

Abstract

This study investigates whether timber surfaces that are initially exposed to fire or partially protected timber components can lead to a more critical fire exposure on the façade. Five full-scale fire tests were carried out. Three tests with a square compartment (4.5 x 4.5 m²) and two with a double-width compartment (4.5 x 9 m²). The tests were conducted with a high fire load density (1085 MJ/m²). While the first test was carried out in a non-combustible compartment, the exposed timber surfaces were subsequently increased in the other tests. The measured compartment gas temperature, heat release rate, temperature on the façade, flame heights along the façade, heat flux and velocities along the façade are presented in this publication. The influence of exposed or only initially protected timber surfaces on the fire impact on the façade is investigated with the help of these results. Finally, these findings are presented and compared with the results of other internationally conducted fire tests from literature. Additional structural fire load leads to an increase in temperatures on the façade. However, there is no significant difference in flame height between the tests. Another result was that an exposed mass timber ceiling leads to higher heat fluxes on the façade than an exposed mass timber wall.

Keywords fire safety; multi-storey timber buildings; façades; fire exposure; mass timber, exposed timber surface



1 Introduction

Timber constructions are increasing in popularity due to their high degree of prefabrication and environmental benefits. Several studies show that exposed timber surfaces or partially protected timber components can cause a fire to develop faster, be more intense, last longer and may have a relevant impact on the fire exposure on the façade than in non-combustible compartments [1], [2].

This leads to the hypothesis that more exposed timber in the form of a structural fire load can lead to more critical effects on the façade, a hypothesis that needs to be investigated further.

The fact that the most frequent mode of significant fire spread is via the façade shows just how important this aspect is [3]. This is also proven by statistics provided by German fire brigades [4], [5].

2 Analysis of existing previous experimental investigations

2.1 Reduced-scale fire experiments

Gorska et al. [6],[7] investigated the effect of exposed timber walls and ceilings on the compartment fire dynamics in 24 medium-scale compartment (0.5 m x 0.5 m x 0.37 m with opening 0.3 m x 0.28 m) experiments. The compartments were constructed with cross-laminated timber (CLT). The contribution of the structural timber to heat-release-rates, the temperatures on the façade, the flame-heights outside the opening and velocity fields at the opening were investigated and compared to each other within the series of experiments. A significant increase in the magnitude of the external flames and of the temperatures at the façade due to exposed timber surfaces was observed. The data indicate that exposing more CLT surfaces to fire in the compartment results in larger external flames, and consequently in higher temperatures. However, the increase in temperature is not directly proportional to the area of CLT exposed to fire. In addition, a significant increase in velocities [7] and in radiant heat fluxes were detected as more CLT panels were left exposed. *“The increase of radiant heat flux, especially at lower heights closer to the opening, presents up to five-time bigger values when compared to the baseline scenario. This change implies that the façade is exposed to five times more heat, which indicates that fire spread due to ignition of the façade materials is much more likely to happen.”* [6]

Nothard et al. [8] investigated the influence of a combustible CLT ceiling on the compartment fire dynamics in 1/8 reduced scale fire experiments. The CLT ceiling leads to a significant increase in the rate of fire spread in the compartment. These more rapid transitions to a fully developed fire led to an earlier fire exposure at the façade. [8]

Bartlett et al. [9] carried out a series of eight reduced-scale compartment fire experiments to examine the effects of the quantity and location of exposed timber on the heat fluxes to the façade from the resulting external fire plume. The compartments had internal dimensions of 700 mm x 700 mm x 700 mm, and were constructed from CLT panels and vermiculite board. It was concluded that increasing the quantity of exposed timber in the compartment results in

an increased peak in the heat fluxes and increased burning durations outside. This means that there is a strong correlation between flame height and incident heat fluxes. [9]

The experiments presented above show that exposed timber surfaces in the compartment lead to an increase in heat flux and flame height outside the opening. However, it should be noted that the experiments were all carried out on a reduced scale. An attempt was subsequently made to reproduce the full-scale fire tests presented in this study (Sect. 3) by experiments on a scale of 1/10. It turned out that the fire dynamics in the room, and especially on the façade, could not be reproduced appropriately. [10]

2.2 Full-scale fire tests

Maag et al. [11] carried out a series of fire tests on wooden modular hotels with light timber frame walls and ceilings to investigate the behavior of modular hotels subjected to natural fires. The light timber frame walls and ceilings had non-combustible and combustible linings. The influence of combustible linings on the fire severity was clearly observed after flashover occurred. The external flame was more intense for the module with combustible wall and ceiling linings than for the modules with non-combustible wall and ceiling linings. Consequently, the total energy release was significantly lower in the tests with non-combustible linings and the fire spread to the upper module after about 40 minutes. In the test with combustible linings, on the other hand, the fire spread after just eight minutes. When evaluating the results, it must be taken into account that window panes were installed and the fire propagation to the upper floor depended on the bursting of the panes. [11], [12]

Su & Loughheed [13] conducted four full-scale fire tests with two compartments made of light timber frames, one made of lightweight steel-frames and one made of CLT. As part of these tests, they measured the heat flux on the façade 3.5 m above the compartment openings. The measurements concluded that the involvement of the timber joists and OSB linings in the fire led to the increase of the heat release rate and heat fluxes to the façade and adjacent structures. [13]

Hakkarainen [14] investigated the gas temperature development and charring behavior of timber frame and mass timber compartments. For this purpose, she conducted three full-scale fire tests with glued laminated timber (GLT) wall and ceiling elements and one test with light timber frame elements. In the first test (Test 1), all GLT walls and the ceiling were unprotected and directly exposed to the fire. In the other tests, the walls and ceilings were protected by gypsum-plasterboards of different thicknesses (thickness increasing from Test 2 to Test 4).

In Test 1 and 2, the heat flux showed an increasing trend until the fire was extinguished. Test 3 and 4 exhibited heat flux maxima approximately 20–30 min after flashover, followed by a decrease of the heat flux when the movable fire load was consumed, as shown in Figure PIII. 1.

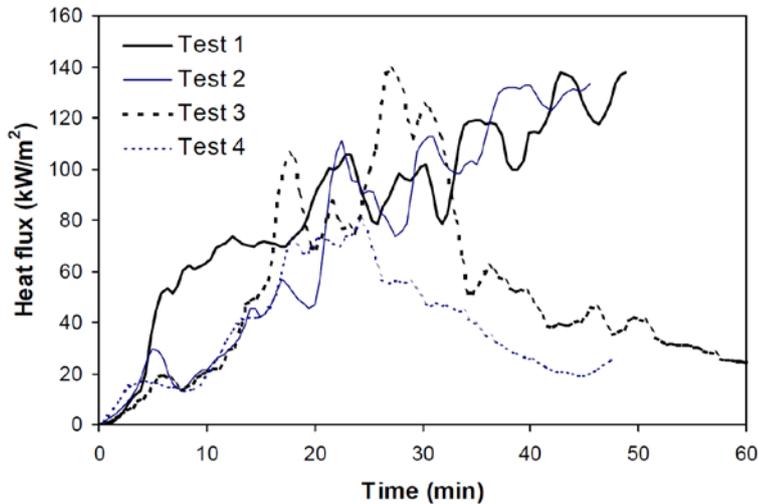


Figure PIII. 1 Heat flux measurements on the façade 2.2 m above the opening from the four tests [2] based on [13]

Based on Hakkarainen's visual observations and the energy balance considerations, she concluded that a large part of the pyrolysis gases burned outside the compartment in the case of exposed or partially protected (Test 1 and 2) timber surfaces. According to the calculation, about 15% of the combustion took place outside the room in the case of the protected timber structure, while the proportion of external combustion in the unprotected structure was about 50%. [14]

Su et al. [15] investigated, among other things, the influence of the exposed timber surface in five large-scale fire tests. The impact on the façade was not part of the investigation. However, they came to the conclusion that flashover and fire impingement on the facade occurs earlier in the case of exposed CLT [15]. This assumption is confirmed in Hadden et al. [16]. He further concludes that the addition of pyrolysis gases from the exposed timber surfaces will prolong the compartment fire and potentially increase the heat release rate both inside and outside the compartment [16].

Su et al. [17] conducted six large CLT compartment fire tests to quantify the CLT contribution to compartment fires. In all the tests with unprotected und directly exposed CLT surfaces, flashover occurred earlier, the fully developed fire lasted longer and the heat release rates and heat fluxes to the exterior façade were higher than in the baseline tests with protected CLT surfaces. [17]

The influence of combustible surfaces and ventilation factors on the dynamics of compartment fires (including external flaming) was investigated as part of the Épernon Fire Tests [18]. The test series includes three standard furnace fire resistance tests and six compartment fire tests with loadbearing reinforced concrete slabs and loadbearing CLT slabs. The six compartment tests can be divided into three groups, Scenario 1, Scenario 2 and Scenario 3. Each of these groups includes two tests under the same conditions, investigating the influence of a CLT slab compared to a concrete slab as a ceiling. Scenarios 1 - 3 differ in the respective ventilation conditions. [18]

A mock-up façade was installed above the compartment opening in order to monitor external flaming for the four compartment tests of Scenarios 2 and 3 [18], [20]-[23]. The incident heat flux to the façade was approximately three times greater when a timber ceiling was used instead of a concrete ceiling. According to the report, this is due to the additional pyrolysis by the burning CLT slabs, which burns in the outer plume due to a lack of oxygen in the compartment. [18], [19]

The gas phase temperatures above the openings are shown in Figure PIII. 2. As with the heat fluxes, the presence of an exposed timber ceiling significantly increases the temperatures in the external fire plume. It can be seen that the temperatures fall as a function of the height. [18], [19]

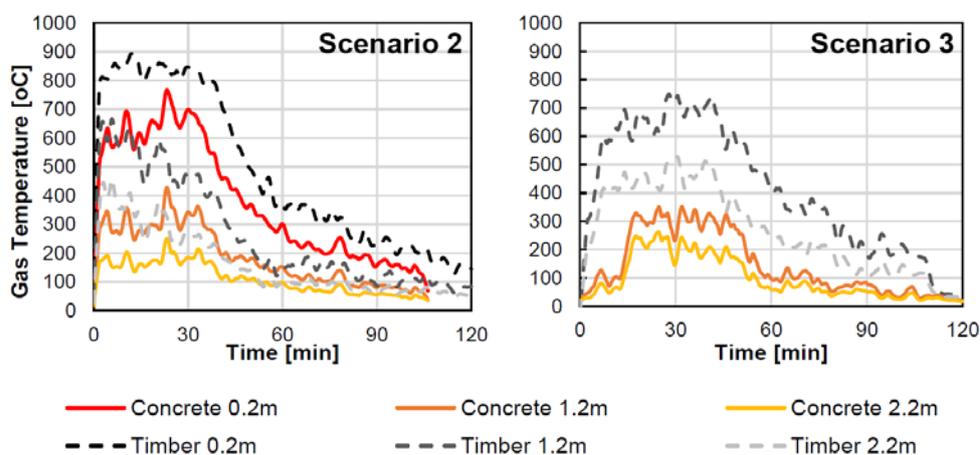


Figure PIII. 2 Temperatures at the centerline of the mock-up façade for Scenarios 2 (left) and 3 (right) [18]

Brandon et al. [24] and Sjöström et al. [25] conducted five full-scale compartment fire tests within CLT and GLT constructions. Four of the tested compartments represent a typical residential compartment. The other tested compartment aimed to be representative of office occupancy. The residential fires tests had unprotected, directly exposed mass timber areas of 54 m² for test 1, 91 m² for test 2, 96 m² for test 3 and 97 m² for test 5. Test 4 represented an office occupancy with large ventilation openings and an exposed mass timber area of 97 m². Along with other components in all tests, the timber ceiling was completely exposed to fire from the beginning of the tests. Among many other measurements, exposure to the façade above the openings was investigated and the results were presented in a separate report by Sjöström et al. [25]. An increase of roughly 40 m² of exposed surface area (from (from 54 m² to 94 m²) resulted in a temperature increase of 100 to 130 °C at the façade at all heights up to 3.5 m above the opening in these tests. Additionally, an increased fire plume height of up to 1 m was observed, as shown in Figure PIII. 3. The most significant effect of increasing the exposed areas of the timber surface in the compartment was a prolonged duration of the fully developed fire phase. [24], [25]

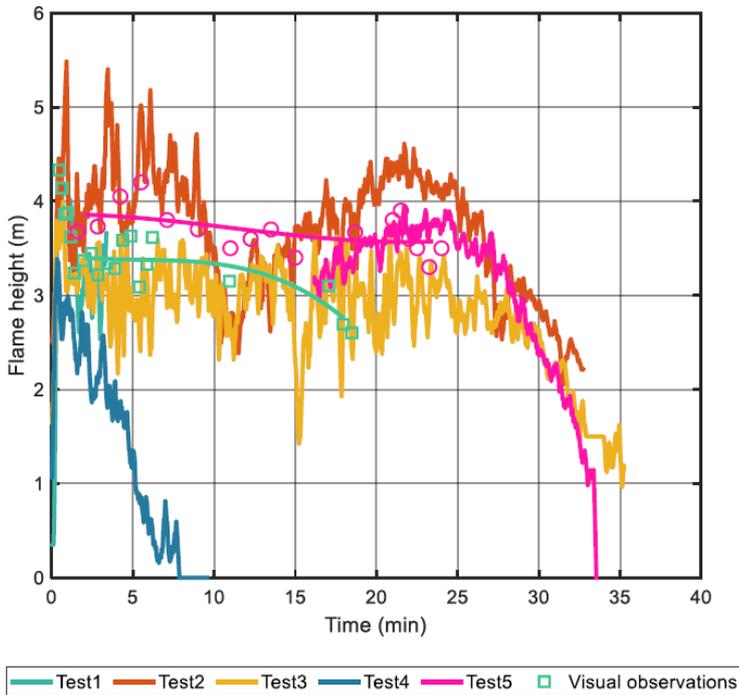


Figure PIII. 3 Flame heights determined by data obtained by image analysis or visual observations [25]

Kotsovinos et al. [26] investigated the fire dynamics of large compartments. The test CodeRed #01 was carried out inside a large open-plan compartment with a floor area of 352 m². The compartment had a fully exposed CLT ceiling and GLT columns. Previously, the research team had already carried out two comparable tests in non-combustible compartments [27], [28]. In a first comparison, the research team concluded that the CLT ceiling impacts the total HRR substantially, nearly doubling the peak HRR from 69 [27] and 58 MW [28] to 121 MW [26]. This extra heat release rate (HRR) impacts the amount of external flaming. External flames were observed 6 min after ignition of roughly 2.5 to 3 m in height. An initial visual comparison showed an increase in flame lengths due to the presence of exposed timber surfaces. Figure PIII. 4 shows the heat flux on the façade for the door and window opening. [26]

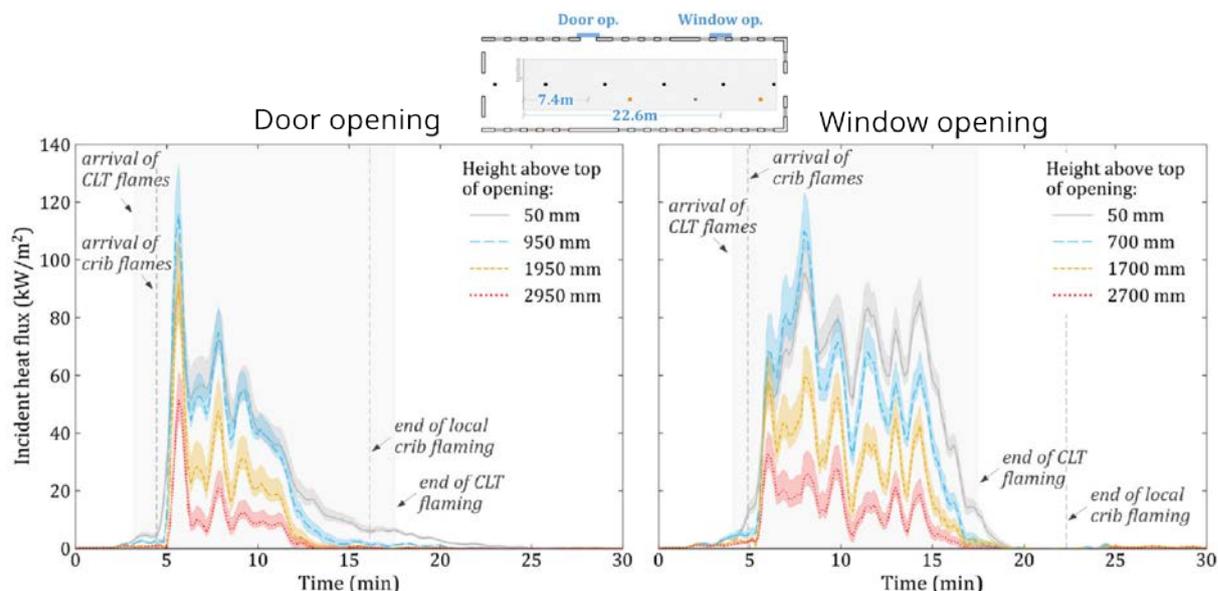


Figure PIII. 4 Incident heat fluxes to the façade measured at various heights above the opening soffit (CodeRed #01) [26]

Kotsovinos et al. [29] investigated the influence of the ventilation in another compartment fire test, which was similar in geometry and fire load to the previously cited CodeRed #01 [26]. For this CodeRed #02 test, the opening factor was reduced from $0.071 \text{ m}^{1/2}$ to $0.039 \text{ m}^{1/2}$. The differences in ventilation resulted in higher external flames (3 - 3.5 m) and the flames protruded much further (laterally) from the compartment. In addition, the duration of the external flames was longer. A direct comparison of the heat flux on the façade of CodeRed #01 and CodeRed #02 is given by comparing Figure PIII. 4 and Figure PIII. 5.

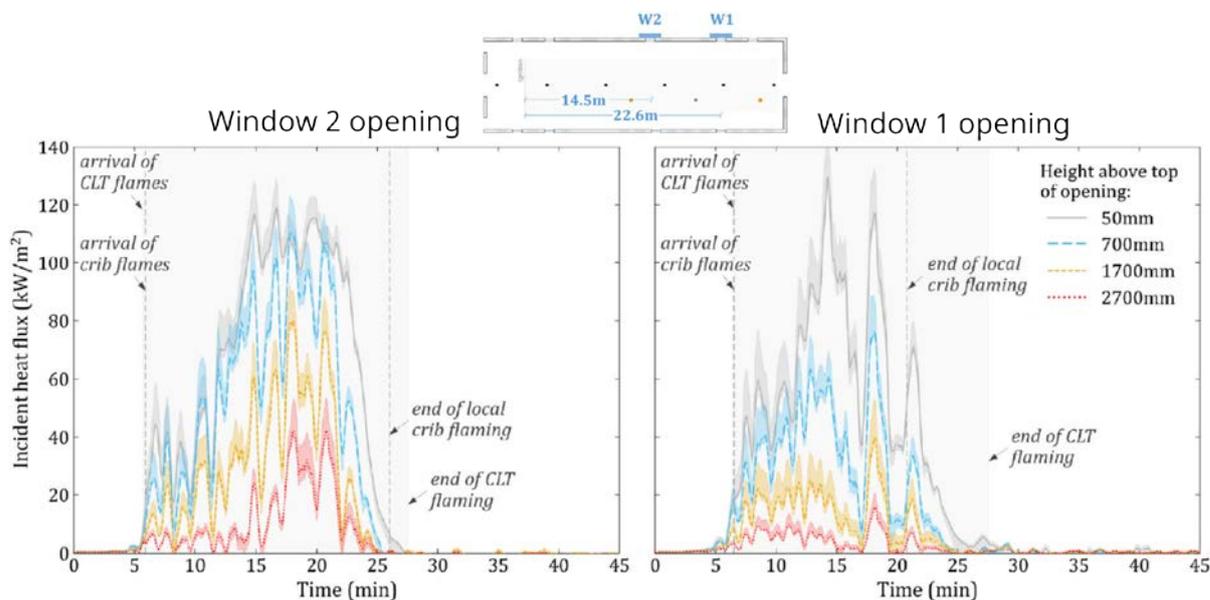


Figure PIII. 5 Incident heat fluxes to the façade measured at various heights above the opening soffit (CodeRed #02) [29]

3 TIMpuls full-scale compartment fire tests

3.1 Aim of the study

The TIMpuls full-scale compartment fire tests serve as evidence of the knowledge and findings gained during the three-year research project [30]. The load-bearing capacity, compartmentation, self-extinguishing properties and extinguishing by the fire brigade (post-fire behavior) as well as the limitation of the spread of fire were investigated. Compared to the full-scale compartment fire tests described above, the high fire load density of 1085 MJ/m² required for residential occupancy can be considered as a special feature of the TIMpuls fire tests. The variation between exposed, initially protected and fully encapsulated timber elements and their influence on the fire dynamics is of particular importance within the test campaign.

The aims of the TIMpuls full-scale compartment fire tests are:

- Verification of the results of previously conducted furnace tests in a real fire compartment
- Influence of exposed or only initially protected timber surfaces on the fire dynamics
- Behavior of the fire protection lining and its protection times under natural fire conditions
- Self-extinguishing and post-fire behavior of timber constructions
- Extinguishability of typical timber constructions by the fire brigade
- Investigation of the fire impact on the façade and on the stories above the compartment fire due to the additional structural fire load
- Investigation of the effects of structural fire protection measures in element joints and joints to other building components
- Evaluation of the compartmentation (fire and smoke) under natural fire exposure

This paper presents the investigation into the influence of additional structural fire loads on the façade and the stories above the fire compartment of origin.

3.2 Test set-up

The first test serves as a reference test and is intended to represent a non-combustible building, e.g. made of masonry or reinforced concrete. All structural elements were encapsulated by 2 x 25 mm Gypsum plasterboard type F. In the other four tests, different combinations of timber constructions, such as cross-laminated timber (CLT), glued-laminated timber (GLT) and light timber frame (LTF) were used, each in combination with gypsum plasterboard type F (GPF) or gypsum fiberboard (GF) or exposed, as shown in Table PIII. 1. A detailed overview of the wall and ceiling structures used in the tests is given in Table PIII. 4 of the appendix.

Compartment

The internal dimension of the floor area was $4.5 \times 4.5 \text{ m}^2$ (LxW) for the first three compartment fire tests V0, V1, V2 and $4.5 \times 9 \text{ m}^2$ (LxW) for two following compartment fire tests V3, V4. The geometric ratio of the floor area of one to two made it possible to observe the spatial influence on the fire dynamics, as shown in Figure PIII. 6 to Figure PIII. 11. In order to represent typical room heights, the internal dimension of the test rooms is approx. 2.4 m, as shown in Table PIII. 1.

All compartments have just one window opening. The opening is $2.4 \times 2.2 \text{ m}^2$ (WxH) in the small room ($4.5 \times 4.5 \text{ m}^2$) and $4.2 \times 2.2 \text{ m}^2$ (WxH) in the large room ($4.5 \times 9 \text{ m}^2$). This results in a constant opening factor of $0.094 \text{ m}^{1/2}$. The opening was open from the beginning of each test.

The floor covering was made of gypsum plasterboard or gypsum fibreboard.

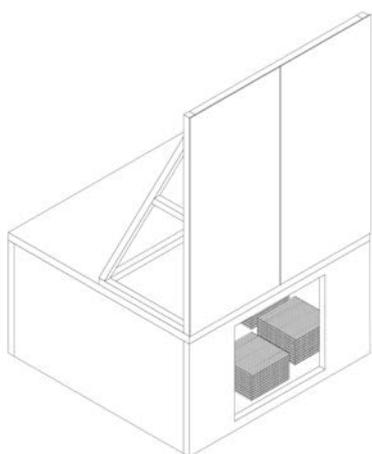


Figure PIII. 6 Perspective V0,V1,V2

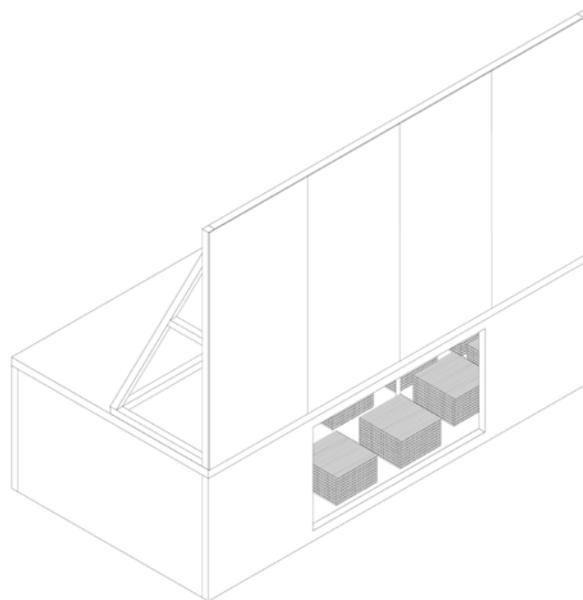


Figure PIII. 7 Perspective V3 & V4

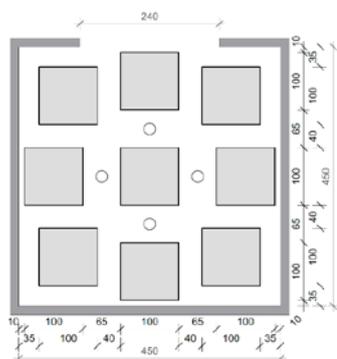


Figure PIII. 8 Floor plan with arrangement of the 9 wooden cribs and the four thermocouple trees (circle) for tests V0, V1, V2 [in cm]

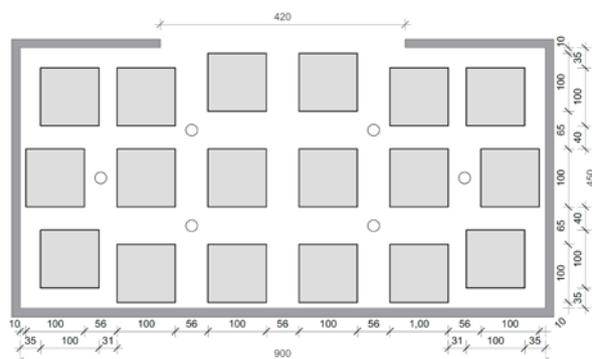


Figure PIII. 9 Floor plan with arrangement of the 18 wooden cribs and the six thermocouple trees (circle) for test V3 [in cm]

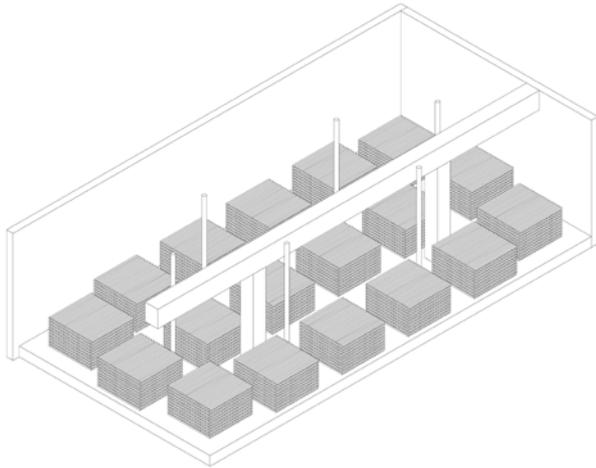


Figure PIII. 10 3D-model of test V4

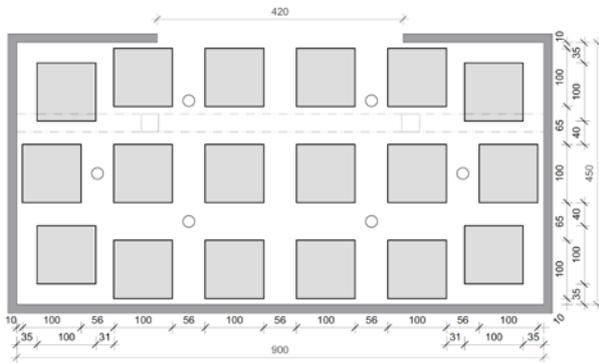


Figure PIII. 11 Floor plan with arrangement of the 18 wooden cribs and the six thermocouple trees (circle) for test V4 [in cm]

Fire load

For the tests, a fire load density was selected that is appropriate for residential buildings. According to [31], this results in a characteristic fire load density of 1,085 MJ/m² for the 90 % quantile.

The fire load was designed in the form of wooden cribs. The floor area of the individual wooden cribs that are evenly distributed in the compartment is 1 × 1 m² each. They are made of sticks of the dimensions $W \times H = 40 \times 40 \text{ mm}^2$. The surface to air ratio of the cribs is 1:1. Taking into account the wood moisture and the density of the wood, the fire load of 1085 MJ/m² described above corresponds to approx. 74 kg/m² of wood. In total, approx. 1.5 tons of wood were used in the small compartment (4.5 × 4.5 m²) and approx. 3 tons of wood in the large compartment (4.5 × 9 m²). The arrangement of the wooden cribs in the compartments are shown in Figure PIII. 8, Figure PIII. 9 and Figure PIII. 11. Due to the very high fire load, the tests that were carried out can be defined as unique. This is also evident when comparing the fire load densities for Europe specified in Eurocode 1 or in the respective national annexes, as shown in Table PIII. 5 of the appendix.

Façade shield

The façade shield above the window opening was constructed from cement-bonded sandwich panels mounted on a timber substructure. The use of cement-bonded sandwich panels was intended to reduce the influence of evaporating water steam to the measurements.

3.3 Test procedure

Two wooden cribs arranged along wall 3, starting from the corner of wall 2 and 3, were always used for ignition. The two wooden cribs were equipped with two ignition trays 39 x 39 x 1200 mm³ (W x H x L) with 200 ml of isopropanol in each. The four trays are ignited directly one after the other and then the test time started. All observations were documented during the test time.

The tests V1, V2, V3 and V4 did not self-extinguish. They were therefore all extinguished by the fire brigade.

The weather data for the individual tests are provided in Table PIII. 6 of the appendix.

3.4 Instrumentation

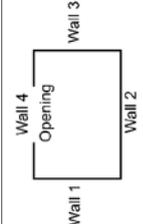
Extensive instrumentation was arranged to measure the influence of the fire dynamics and the thermal exposure on the structure. The temperature development of the gas in the compartment, on the façade and within the building components as well as element joints and joints to other building components was measured, as was the incident heat flux received by the ceiling, by wall 1 and by the façade. The gas flow velocities were also measured in the opening, within the compartment and on the façade as was the separate mass losses for the floor and other components. A total of up to 300 type-K thermocouples, 6 plate thermometers, 10 bidirectional probes and 6 cameras were used as part of each fire test.

Following a more detailed description of the instrumentation used in the tests, the effect of the fire on the façade is described.

Four thermocouple trees each were arranged in the compartment test for V0, V1, V2 and six for V3 and V4, as shown in Figure PIII. 8, Figure PIII. 9 and Figure PIII. 11. To measure the gas temperature, five thermocouples were arranged per thermocouple tree at heights of 50, 100, 150, 200 and 230 cm. Sheathed thermocouples of type K according to EN 60584-1 [32] with an outer diameter of 1 mm were arranged for V0 and V1, and with an outer diameter of 3 mm for V2, V3, V4. A plate thermocouple was installed 10 cm below the ceiling in all tests. This corresponds to a height of 230 cm in relation to the compartment.

In order to determine the mass loss, the floor and the structural components (walls, ceiling) were each placed on decoupled floor frames and these frames were supported on individual load cells. A total of eight load cells were positioned under the frames for V0-V2 and 10 for V3 and V4.

Table PIII. 1 Description of the individual experimental set-ups

Test	V0	V1	V2	V3	V4
Compartment size (W x L x H)		4.5 m x 4.5 m x 2.4 m		4.5 m x 9.0 m x 2.4 m	
Floor space		20.25 m ²		40.5 m ²	
Opening size (W x H)		2.4 m x 2.2 m		4.2 m x 2.2 m	
Fire load density	1085 MJ/m ²				
Wall 1	100 mm CLT 2 x 25 mm GPF	100 mm CLT 18 mm GF	150 mm CLT	140 mm LTF 2 x 12.5 mm GF + 12 mm OSB	150 mm CLT
Wall 2	100 mm CLT 2 x 25 mm GPF	100 mm CLT 18 mm GF	140 mm LTF 2 x 18 mm GF	140 mm LTF 2 x 18 mm GF + 12 mm OSB (half wall)	140 mm LTF 2 x 18 mm GF
Wall 3	100 mm CLT 2 x 25 mm GPF	100 mm CLT 18 mm GF	150 mm CLT	140 mm LTF 2 x 18 mm GPF	140 mm LTF 2 x 18 mm GPF
Wall 4	100 mm CLT 2 x 25 mm GPF	100 mm CLT 18 mm GF	140 mm LTF 2 x 18 mm GF	140 mm LTF 2 x 18 mm GF	140 mm LTF 2 x 18 mm GF
Ceiling	180 mm GLT 2 x 25 mm GPF	180 mm GLT	220 mm LTF 2 x 18 mm GF	180 mm GLT	180 mm GLT
Linear components	-	-	-	-	2 x Column ¹ 1 x Beam ²
Exposed surface (initial) ³	-	35 %	37 %	42 %	58 %

CLT = Cross-laminated timber; LTF = Light timber frame; GLT = Glued-laminated timber; GPF = Gypsum plasterboard type F; GF = Gypsum fiberboard; OSB = Oriented strand board

¹ Column – 300x300 mm² GLT; ² Beam – 300x320 mm² GLT; ³ As percentage of the total compartment surfaces excluding floor and window opening.

30 thermocouples, two plate thermocouple and two bidirectional probes for measuring the gas flow velocity were placed on the façade shield for V0-V2 and 54 thermocouples, two plate thermocouple and two bidirectional probes for V3 and V4. Sheathed thermocouples of type K according to EN 60584-1 [32] with an outer diameter of 3 mm, plate thermocouple according to EN 1363-1 [33] and bidirectional probes of the type BS11 according to [34] were used.

The thermocouples were positioned at a distance of 20 mm from the surface of the façade, the plate thermocouple and the bidirectional probes at a distance of 50 mm. They were fixed to a taut wire in front the façade. Figure PIII. 12 and Figure PIII. 13 show the positions of the thermocouples.

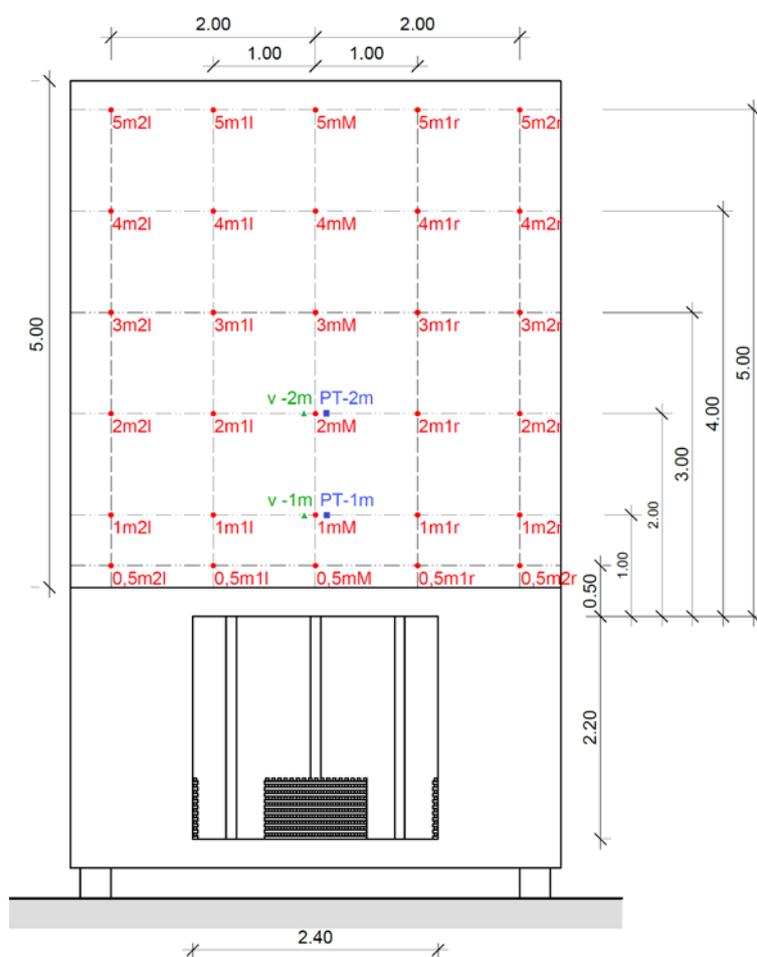


Figure PIII. 12 Façade shield V0-V2 with dimensions and measuring points; unit of dimensions [m] (red ● = sheathed thermocouples, blue ■ = plate thermocouple, green ▲ = bidirectional probes)

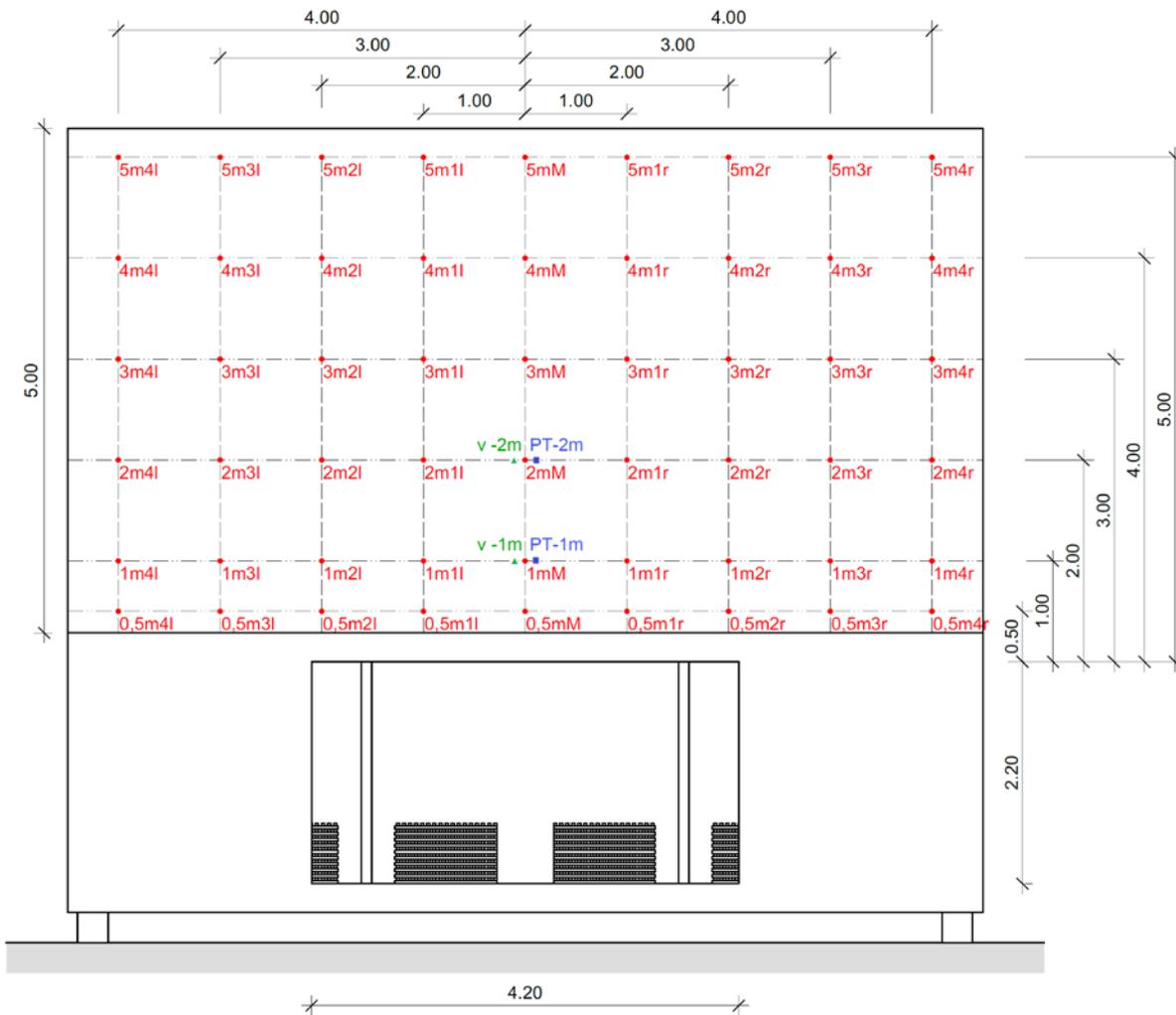


Figure PIII. 13 Façade shield V3 and V4 with dimensions and measuring points; unit of dimensions [m] (red ● = sheathed thermocouples, blue ■ = plate thermocouple, green ▲ = bidirectional probes)

4 Results of the fire tests

4.1 Gas temperature

Figure PIII. 14 to Figure PIII. 18 show the gas temperatures in the compartment at different heights for each test. The measurements of the thermocouple (TC) trees are presented as an average value over the four trees (V0-V2) or the six trees (V3 and V4). In addition, the plate thermocouple (PT) on the ceiling is also shown.

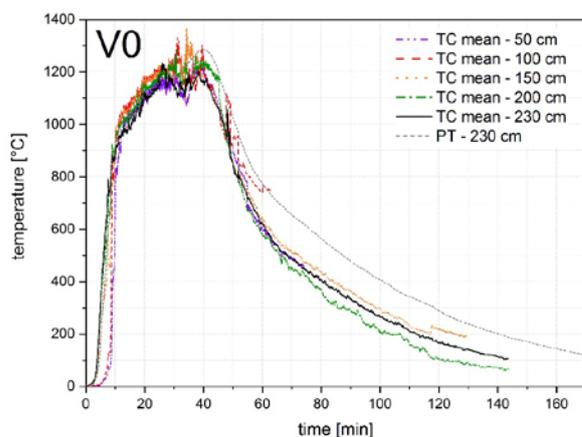


Figure PIII. 14 Gas temperatures for V0 in the compartment at different heights

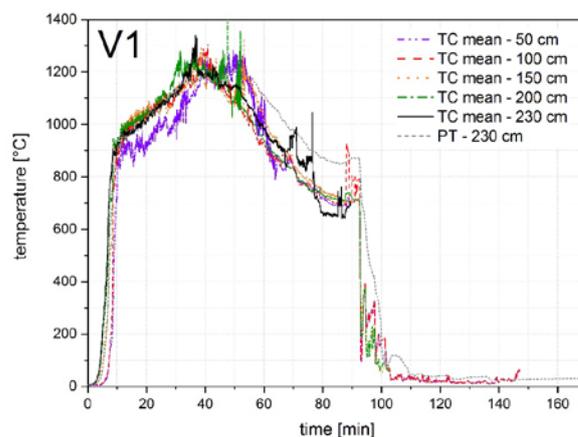


Figure PIII. 15 Gas temperatures for V1 in the compartment at different heights

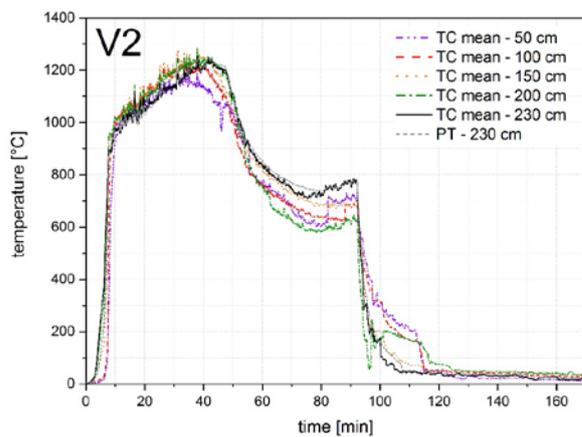


Figure PIII. 16 Gas temperatures for V2 in the compartment at different heights

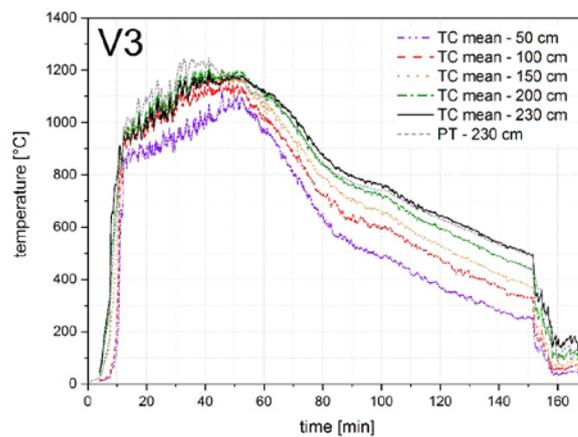


Figure PIII. 17 Gas temperatures for V3 in the compartment at different heights

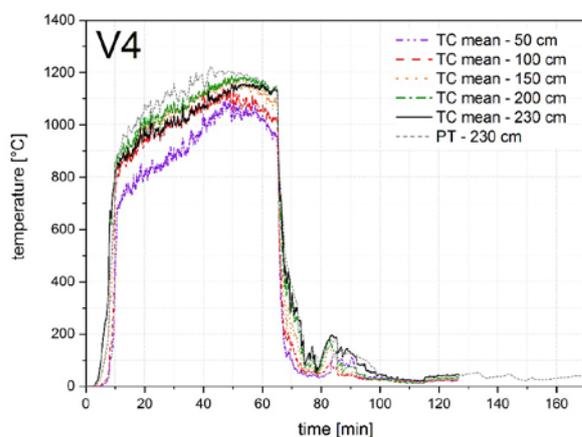


Figure PIII. 18 Gas temperatures for V4 in the compartment at different heights

4.2 Heat release rate

The heat release rate from the measurement data of the mass loss is calculated by determining the mass loss rate and assuming a calorific value of 17.28 MJ/kg, a wood moisture content of 14 % and a combustion efficiency of 0.9. Due to the strongly fluctuating measurement data, a moving average was first formed over 9 measurement cycles (recording frequency 1 s). The measurement data were then used as 25 min average values to calculate the heat release rate, as shown in Figure PIII. 19 and Figure PIII. 20. [35]

An existing strong oscillation can be seen despite the smoothing measures for the calculated heat release rates of the floor (movable fire loads) in Figure PIII. 19 and the structural components (structural fire load) in Figure PIII. 20. Furthermore, it must be taken into account that the recorded data of the mass loss includes the dehydration loss as well as the falling off of lining parts. The heat release rates shown, especially for the structural fire load, are therefore burdened with an unnamable imprecision.

In order to describe the influence of the structural fire load more precisely, the heat release rate from the combustible structure was determined mathematically based on the charring rate. The following assumptions were made for the determination: I) charring starts at 300°C [36], II) the protection time of a lining corresponds to the time until 300°C is reached behind the lining (t_{ch} [36]), III) the failure time of the fire protection lining corresponds to the time until the difference between gas temperature in the compartment and measured temperature behind the lining is less than 50°C [37] (t_f [36]) and IV) a reduced charring rate of 70% is assumed between t_{ch} and t_f (k_2 [36]). The residual cross-section of the timber components was recorded measured after the tests and the surface area of the timber components is known, as shown in Table PII. 4 and in Table PIII. 4 & Table PIII. 7 of the appendix. Mean values were determined.

The heat release rate is calculated with the help of this information and the aforementioned specifications for calorific value, wood moisture and combustion efficiency, in connection with an assumed density of wood of 450 kg/m³, as shown in Figure PIII. 21. It should be noted that the calculation is based on the same assumptions for solid timber, light timber frame components and OSBs. Charring is assumed to be constant over time. In the case of V3, calculations are only made up to the 90th minute, as there is no constant charring at this point because there is no longer a movable fire load. These assumptions also lead to uncertain results. However, they should provide a trend and enable comparability. For a better comparison of the two approaches to determining the heat release rate (mass loss vs. charring rate), the results are compared directly to each other in Figure PIII. 40 to Figure PIII. 43 of the appendix. It can be stated that the results have a similar range of values.

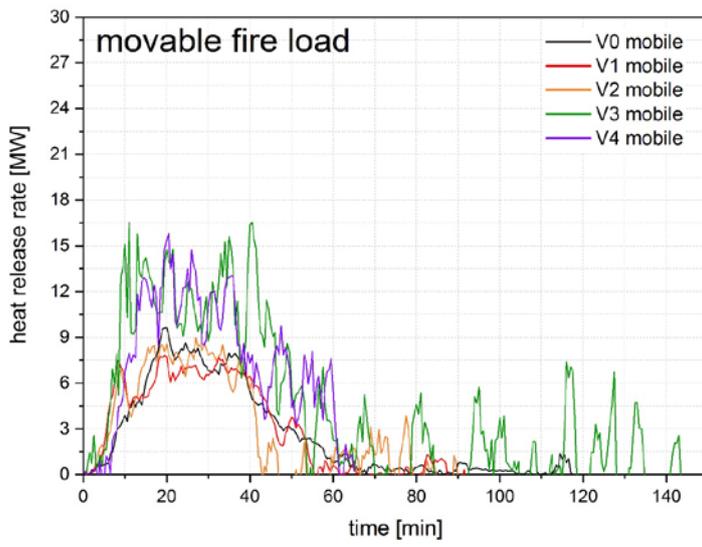


Figure PIII. 19 Comparison of heat release rates V0-V4 for the floor (movable fire load)

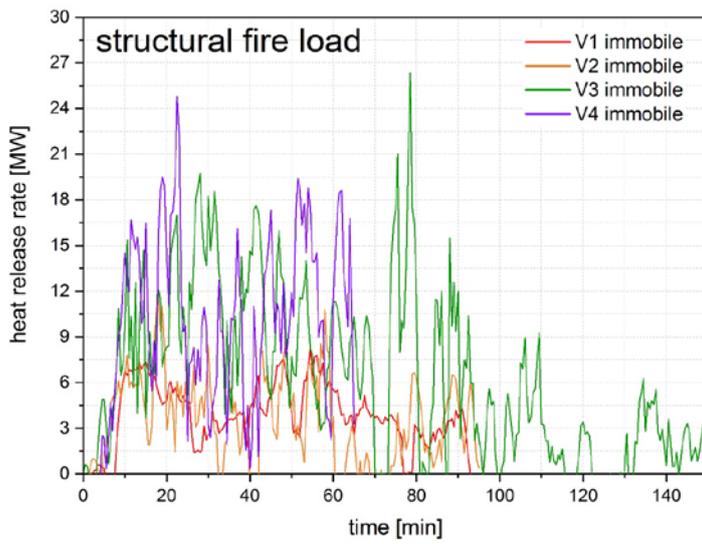


Figure PIII. 20 Comparison of heat release rates V0-V4 for the structural components (structural fire load)

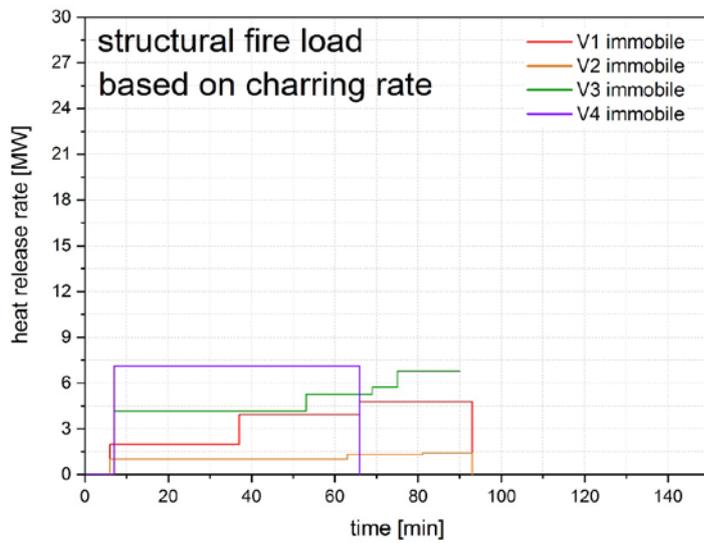


Figure PIII. 21 Comparison of heat release rates V0-V4 for the structural fire load derived from measured char depth at the end of the test

4.3 Façade temperatures

Figure PIII. 22 to Figure PIII. 26 show the temperature curves at different heights along the façade. For a better overview, the measured values are presented as averages over one minute (recording frequency 10 s) and only the measuring points located centrally above the opening (thermocouples (TC) at heights of 0.5, 1, 2, 3, 4 and 5 m above the lintel) and the two plate thermocouples (PT) are shown. The development of the external gas temperature of the tests during the first 60 minutes for the measuring points which were located centrally above the opening at different heights are shown in Figure PIII. 27 and Figure PIII. 28.

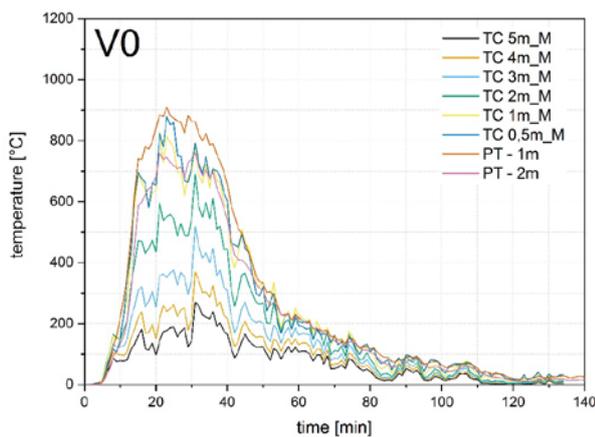


Figure PIII. 22 Temperature–time diagram of V0 façade for measuring points located centrally above the opening at different heights

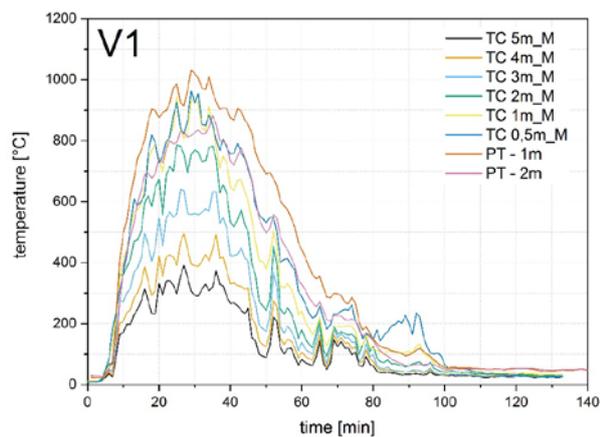


Figure PIII. 23 Temperature–time diagram of V1 façade for measuring points located centrally above the opening at different heights

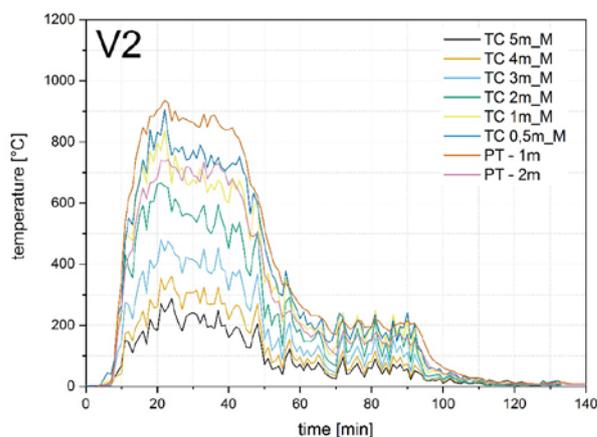


Figure PIII. 24 Temperature–time diagram of V2 façade for measuring points located centrally above the opening at different heights

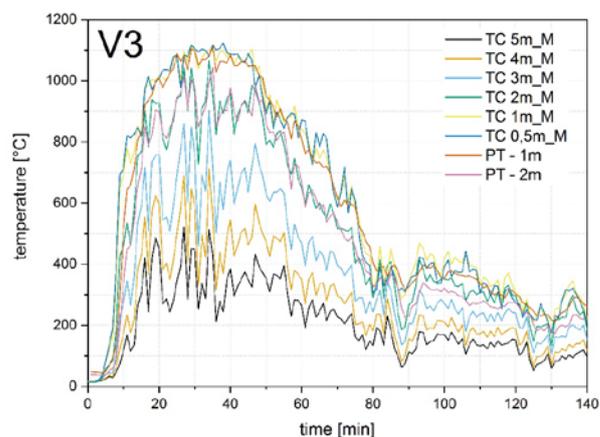


Figure PIII. 25 Temperature–time diagram of V3 façade for measuring points located centrally above the opening at different heights

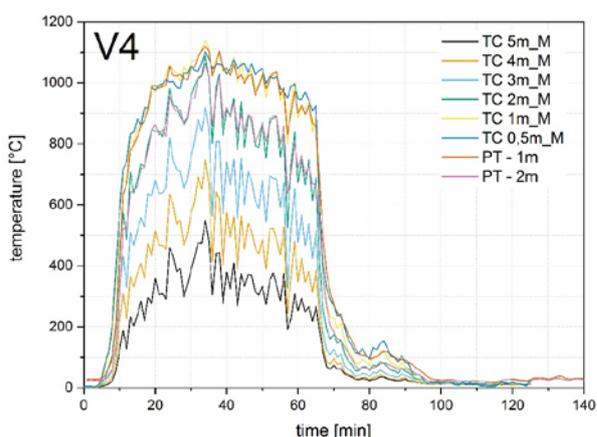


Figure PIII. 26 Temperature–time diagram of V4 façade for measuring points located centrally above the opening at different heights

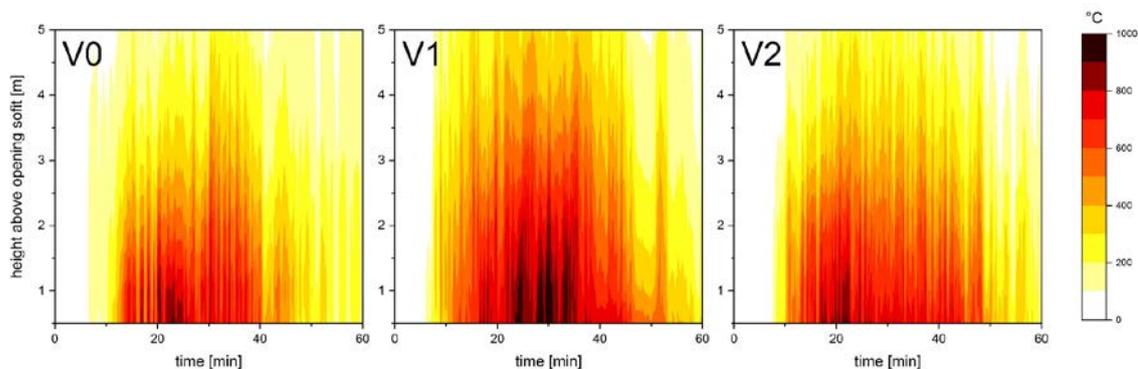


Figure PIII. 27 External gas temperature development throughout the first 60 minutes of V0, V1 and V2 for the measuring points located centrally above the opening at different heights

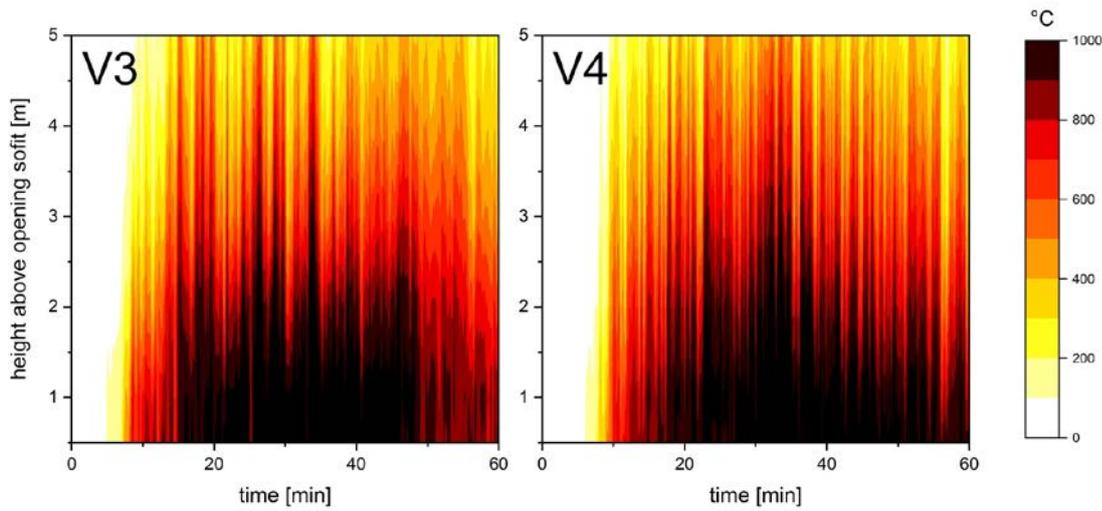


Figure PIII. 28 External gas temperature development throughout the first 60 minutes of V3 and V4 for the measuring points located centrally above the opening at different heights

4.4 Flame heights

The flame heights above the opening were measured visually. For this purpose, height marks were placed on the façade shield and the flame heights were observed at 30-second intervals as a weighted average [38]. A weighted moving average from two data points was chosen for better visualization, as shown in Figure PIII. 29 and Figure PIII. 30. The flame heights can be seen in the videos of the digital appendix.

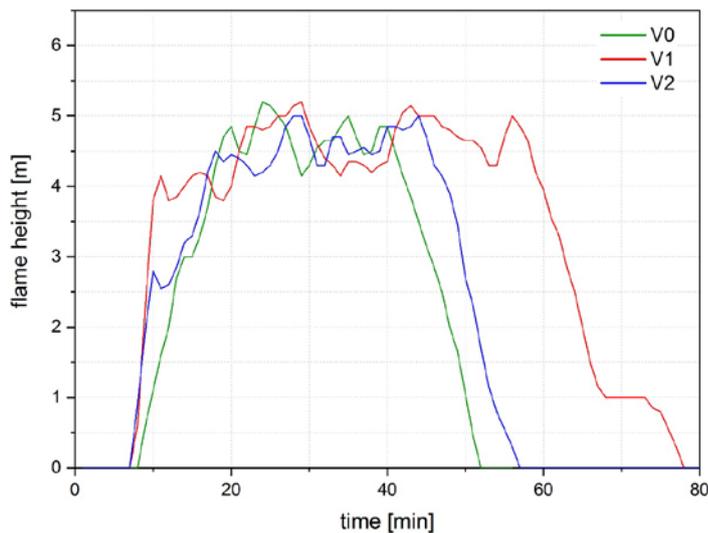


Figure PIII. 29 Flame heights above the opening for V0, V1 and V2

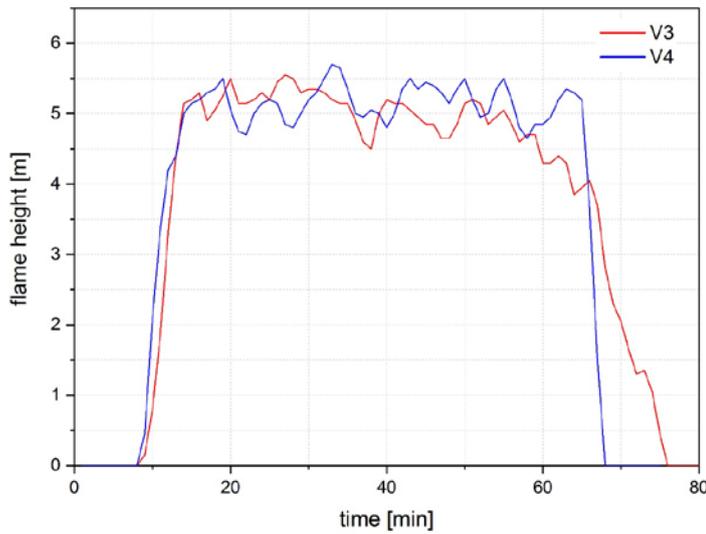


Figure PIII. 30 Flame heights above the opening for V3 & V4

4.5 Heat flux on the façade

The incident heat fluxes were calculated by converting the temperatures measured by the two plate thermocouples (PT), placed on the façade centrally 1 and 2 m above the opening, as shown in Figure PIII. 12, Figure PIII. 13 and Sect. 4.3, according to the method used by Häggkvist et al. [39] and Ingason et al. [40] using equation (1) below:

$$\dot{q}_{inc}'' = \sigma T_{PT}^4 + \frac{(h + K_{PT})(T_{PT} - T_{\infty}) + C_{PT} \frac{dT_{PT}}{dt}}{\varepsilon_{PT}} \quad (1)$$

Where σ is the Stefan-Boltzmann constant ($5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$), T_{PT} is the temperature of the PT, h is the convective heat transfer coefficient ($10 \frac{W}{m^2 K}$), K_{PT} is the effective heat transfer coefficient due to conduction ($8 \frac{W}{m^2 K}$), T_{∞} is the ambient temperature, C_{PT} is the heat capacity of the PT ($4200 \frac{J}{m^2 K}$) and ε_{PT} is the emissivity of the PT surface (0.8). Note: When comparing directly with results from other research, the uncertainties or inaccuracies regarding emissivity = (0.7 to 0.9) and heat transfer coefficient = (5 to $25 \frac{W}{m^2 K}$) must be taken into account [26].

The heat flux is shown as an average over one minute (measuring frequency 25 seconds) for better visualization, as shown in Figure PIII. 31 and Figure PIII. 32.

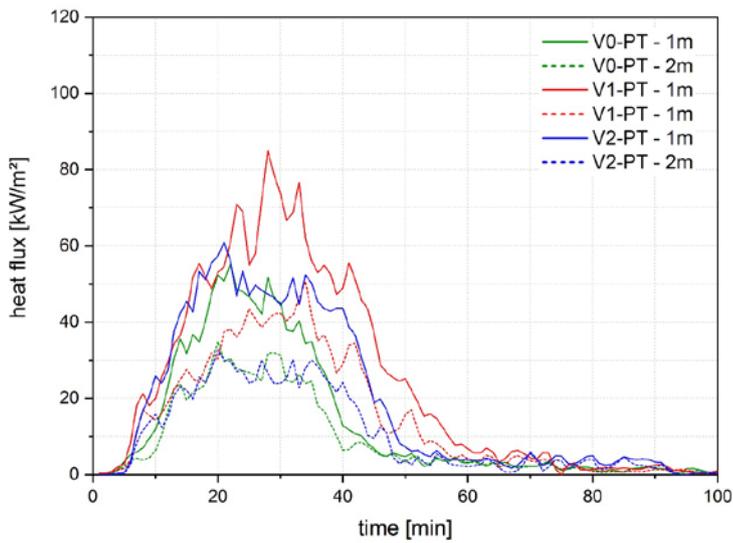


Figure PIII. 31 Heat flux measured centrally above the opening at a height of 1 and 2 m for V0, V1 and V2

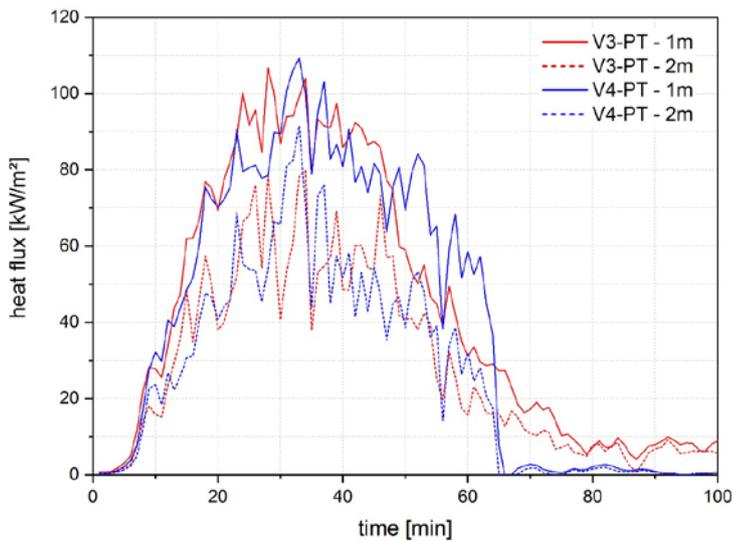


Figure PIII. 32 Heat flux measured centrally above the opening at a height of 1 and 2 m for V3 & V4

4.6 Gas flow velocities

The gas flow velocities on the façade were measured using bidirectional probes placed centrally above the opening at a height of 1 and 2 m, as shown in Figure PIII. 33 and Figure PIII. 34. The probes measure the differential pressure caused by a flow movement at the probe and calculate a direction-dependent flow velocity accordingly using equation (2) below [30], [34]:

$$V = \sqrt{\frac{2 \Delta p T}{p_0 T_0}} \tag{2}$$

Equation (2) is derived from the Bernoulli equation, where p_0 is the standard density of air ($1.293 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$), T_0 is the temperature at $0 \text{ }^\circ\text{C}$ (273.15 K), T is the measured temperature and Δp is the differential pressure.

It should generally be noted that the bidirectional probes are sensitive to weather conditions. The evaluation of the measurement data in test V3 and V4 showed that some of the probes failed or delivered incorrect results. For this reason, these results V3 and V4 are not shown.

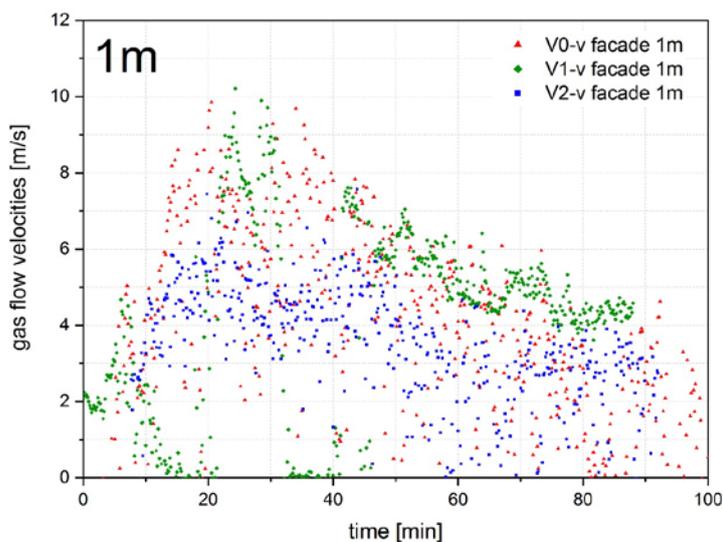


Figure PIII. 33 Comparison of the gas flow velocities on the façade at 1 m height of V0, V1 and V2

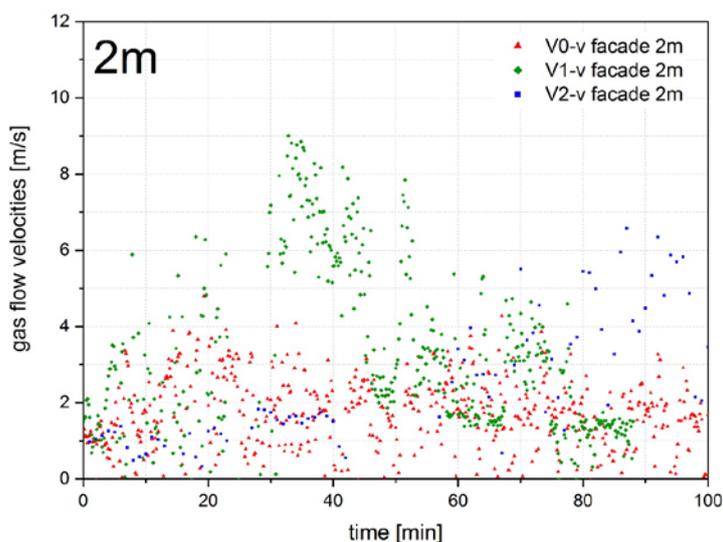


Figure PIII. 34 Comparison of the gas flow velocities on the façade at 2 m height of V0, V1 and V2

5 Discussion

The results of the tests are presented in Table PIII. 2 for further discussion.

Gas temperature

The gas temperatures in the fire growth phase show almost no differences between non-combustible and combustible structures due to an identical movable fire load density and ignition process. This phenomenon is caused by the relatively high fire load density in the TIMpuls fire tests.

The fully-developed fire phase, which always starts at about the 10th minute of the tests, shows only minor differences in the temperature curve ($\Delta T < 150 \text{ K}$) up to the 40th minute of the test. The influence of the structural fire load becomes obvious based on Figure PIII. 35.

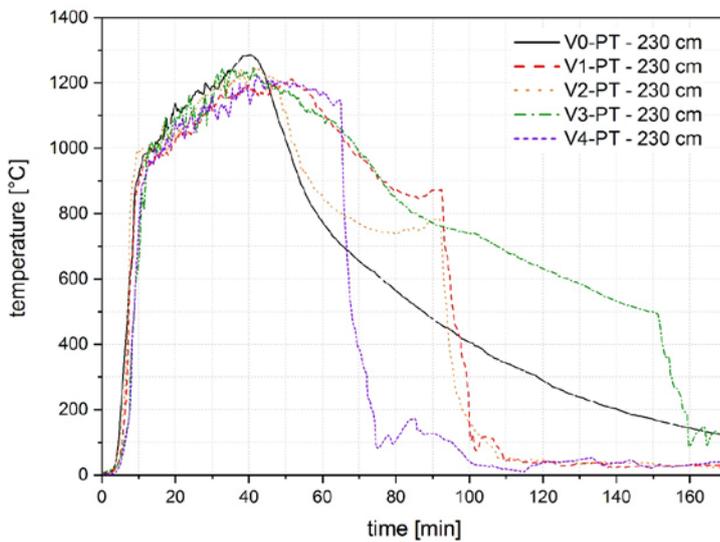


Figure PIII. 35 Comparison of the gas temperatures in the compartment at the plate thermocouple at a height of 230 cm

Table PIII. 2 Summary of the test results

Test	V0	V1	V2	V3	V4
Max. compartment gas temperature	1350	1400	1290	1250	1220
Time to flashover	[min]	9	8	10	10
Duration of fully-developed fire phase	[min]	36	34	42	45
Onset of the beginning decay phase	[min]	45	42	52	55
Char fall-off on CLT walls	[min]	85	80	-	-
Max. HRR by movable fire load	[MW]	10	9	16.5	16
Start time of charring behind fire protection lining ¹	[min]	37	63	53 / 75 ²	-
Failure time of fire protection lining ³	[min]	66	81	69 / 95 ²	-
Extinguishing by fire brigade	[min]	93	92	150	65
Self-extinguishing ⁴	[min]	220	-	-	-
Max. façade temperature	[°C]	1080	950	1180	1160
Max flame height	[m]	5.2	5	5.7	5.5
First flames on the façade	[min]	9	8	10	10
No longer flames on façade	[min]	52	56	76	-
Max. heat flux	$\left[\frac{\text{kW}}{\text{m}^2}\right]$	55	61	107	109
Max. gas flow velocity	[m/s]	9.9	7.6	-	-

¹ The start time of charring behind the fire protection lining is defined as exceeding a temperature of 300 °C [36]

² First value for 2 x 12.5 mm, second value for 2 x 18 mm gypsum fiberboard

³ The failure time of the fire protection lining corresponds to the time until less than 50°C difference between gas temperature in the compartment and measured temperature behind the lining is reached [37]

⁴ Self-extinguishing is defined as the complete extinguishing (no smouldering) of the movable and structural fire load (construction)

In the fully-developed fire phase of a ventilation-controlled fire, there is not enough oxygen available to combust all pyrolysis gases inside the fire compartment. The availability of additional fuel does not influence the conditions in the compartment, as shown in Figure PIII. 35. As described in Sect. 2.2, other researchers have concluded that the additional fire load in the form of the structural fire load leads to an earlier flashover and an earlier fire impact on the façade. These differential observations between the TIMpuls project and other tests are due to the relatively high fire load mentioned above, see Table PIII. 3. The more movable fire load is available, the lower the influence of the structural fire load in the fire development phase.

Table PIII. 3 Comparison of the fire load densities of the tests cited in Sect.0

Test	Su et al. [15]	Su et al. [17]	Épernon Fire Tests [18]	Brandon et al. [24]	Kotsovinos et al. [26]	Kotsovinos et al. [29]	TIMpuls
Fire load density	550 MJ/m ²	550 MJ/m ²	891 MJ/m ²	560 MJ/m ²	374 MJ/m ²	377 MJ/m ²	1085 MJ/m ²
Opening factor [41]	0.03 m ^{1/2}	0.03 m ^{1/2} / 0.06 m ^{1/2}	0.050 m ^{1/2} / 0.032 m ^{1/2}	0.062 m ^{1/2} / 0.25 m ^{1/2}	0.071 m ^{1/2}	0.039 m ^{1/2}	0.094 m ^{1/2}
Time to flashover	5 - 7 min	10 - 15 min	2 min	4 - 17 min	(5.6 min)*	(7.3 min)*	8- 10 min

* localised flashover

The time of the flashover depends on many factors (geometry, opening area, arrangement of timber surfaces, etc.) and is therefore not investigated in more detail. However, it is obvious from the tests that the influence of exposed timber surfaces is lower when the fire load is increased.

Façade temperatures

Comparing the measured temperatures on the façade, it becomes clear that the additional structural fire load leads to an increase in temperatures. It should be noted that only tests V0 to V2 can be directly compared with each other. V3 and V4 can only be evaluated with each other due to the changed geometry. When comparing V0 (reference test fully encapsulated) with V1 and V2, maximum temperature deviations averaging approx. 120 - 200 °C can be seen on the façade in the fully developed fire phase in the area of the opening, as shown in Figure PIII. 36, Figure PIII. 37. This temperature increase is in a similar range to the studies of Sjöström et al. [25].

Although 100 % of the wall and ceiling surfaces contributed to the fire from the middle of test V1 (37th and 66th min as shown in Table PIII. 2), an increased temperature profile is obvious beforehand. This confirms that an exposed mass timber ceiling has a greater impact on the

façade than exposed mass timber walls. One possible explanation is that the flames are able to run along the combustible ceiling towards the opening in conjunction with the narrow lintel of 20 cm above the opening (floor-to-ceiling opening) in these tests.

Higher temperatures occur on the façade in test V1 than in test V2. However, it must be noted, that a sleet shower set in for a short time (approx. 10 min) during the V2 test. Due to the short duration compared to the test time, the authors do not assume a critical influence for the measurement results.

Comparing V3 and V4 shows that the increase from 42% to 58% of the ratio of exposed mass timber surface does not result in any noteworthy increase in temperatures on the façade, as shown in Figure PIII. 38, Figure PIII. 39.

One reason for this is that the exposed ceiling has the greatest influence on the façade and both tests had a corresponding and identical ceiling. On the other hand, the tests have a high fire load density (Table PIII. 5), which leads to a strong fire impact on the façade regardless of the exposed surfaces.

Whether an exposed ceiling has a higher impact on the façade fire exposure, especially in combination with floor-to-ceiling openings, than a percentage increase in exposed walls should be investigated further.

In order to examine the question as to whether the second storey above the fire compartment is exposed to a higher risk with regard to fire exposure along the façade in the case of exposed mass timber surfaces in more detail, the temperatures were illustrated in the center above the opening at a height of 3 m, as shown in Figure PIII. 37 and Figure PIII. 39. The reason for this hypothesis is that I) the second storey above the fire compartment begins 3 m above the floor-to-ceiling opening and II) a fast fire spread over more stories is critical for the fire brigade due to the necessary number of staff and the technical limits of e.g. dry or wet risers [42],[43],[44]. Comparing V0 and V1 shows that V1 reaches 200 °C at the facade about 4 min earlier and while V0 reaches peak temperatures between 400 and 500 °C, V1 reaches temperatures above 600 °C at the facade. To quantify the influence of these differences more precisely, one possible question would be which temperatures cause glass to fail. Babrauskas [45] shows that it is very difficult to predict when glass will actually break enough to fall out in a real fire. Morris [46] concludes that double-glazed windows with 6 mm thick glass fail at about 600°C. Whether the temperature difference of approx. 200 °C on average actually leads to a higher risk in reality cannot be answered conclusively. However, considering Morris' results, it seems possible.

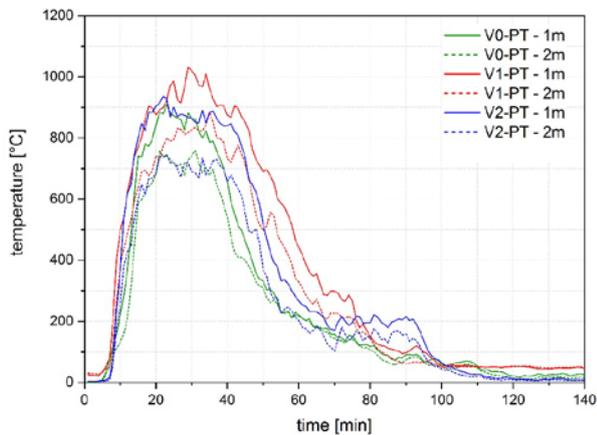


Figure PIII. 36 Comparison of the temperature-time diagrams of the plate thermocouples centered above the opening at a height of 1 and 2 m on the façade for V0, V1, V2

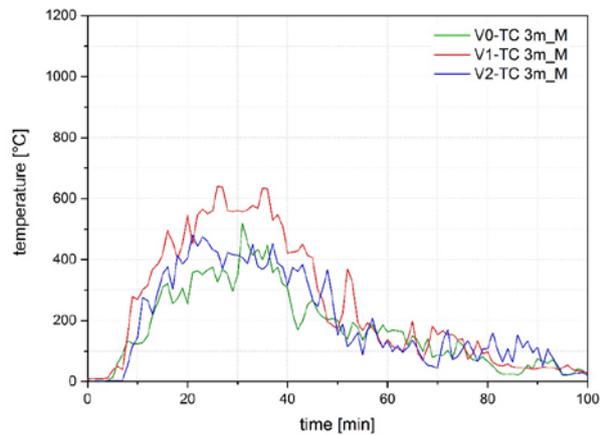


Figure PIII. 37 Comparison of the temperature-time diagrams of the thermocouples centered above the opening at a height of 3 m on the façade for V0, V1, V2

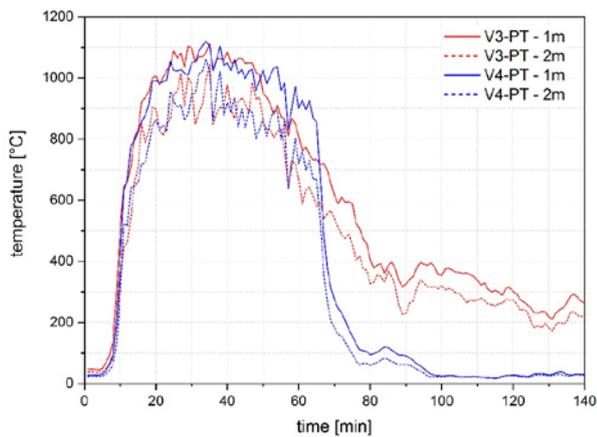


Figure PIII. 38 Comparison of the temperature-time diagrams of the plate thermocouples centered above the opening at a height of 1 and 2 m on the façade for V3 & V4

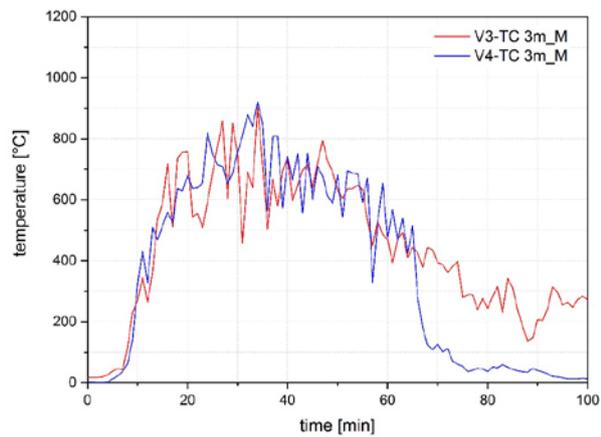


Figure PIII. 39 Comparison of the temperature-time diagrams of the thermocouples centered above the opening at a height of 3 m on the façade for V3 & V4

Flame heights

Figure PIII. 29 and Figure PIII. 30 show that there is no significant difference in flame height between V0, V1 and V2 or between V3 and V4. Looking at the temperatures on the façade, it can be seen that although there is a difference in this series of tests in terms of the temperature of the flame, the height itself is not affected by an additional structural fire load. Differences in the comparison of V0, V1 and V2 exist at the beginning and after the 40th minute, but not in the fully developed fire. V1 and V2 have a more intense flame on the façade a few minutes before V0. The difference is greatest for V1 compared to V0. From the 40th minute, the flames on the façade of V0 decreased, and no more flames were observed on the façade from about the 53rd minute. For V2, this occurred 5 minutes and for V1 26 minutes later.

The higher deviation of V1 at the beginning, and especially from the 40 minute onwards, is obviously due to the additional structural fire load (after 37 minutes the wall surfaces began to contribute to the fire in addition to the ceiling). Due to the additional structural fire load, the fire duration was prolonged. The wooden cribs (movable fire load) burn down more slowly due to the ventilation conditions (ventilation-controlled fire) and the additional structural fire load in the compartment. The prolonged fire causes longer-lasting flames on the façade.

These results from TIMpuls contradict the findings of Sjöström et al. [25] and Kotsovinos et al. [26]. These two studies concluded that additional structural fire load leads to an increase in flame heights. The reason for this could be the high fire load density and the large width of the opening selected in TIMpuls. Due to this high fire load density, high flames are formed independently and the influence of the additional structural fire load is thus reduced.

Heat flux on the façade

Figure PIII. 31 shows that V0 and V2 behave very similarly in terms of heat flux. However, there are large deviations between V0 and V1, with peak deviations of up to 35 kW/m². Because this peak deviation occurs before the 35th minute, an influence of the initially protected CLT walls can be ruled out. It can therefore be concluded that an exposed CLT ceiling leads to higher heat fluxes on the façade than an exposed mass timber wall. This theory is also supported by Bartlett et al. [9]. As in [9], it is assumed that more unburnt gases leave the compartment directly without mixing with the gases in the compartment with an exposed ceiling, and consequently burn in the plume.

The results from the Épernon Fire Tests [18], that the incident heat flux on the façade is approximately 3 times greater when a timber ceiling is used instead of a concrete ceiling, could not be confirmed. The reason for this could again be the different fire load densities and the width of the opening. The influence of the exposed ceiling decreases with a high fire load density and a large width of the opening (opening factor in Table PIII. 3), as in the TIMpuls tests.

Figure PIII. 32 shows that an increase of the exposed timber surface does not lead to any differences in the course at the beginning and during the fully developed fire phase.

Gas flow velocities

Figure PIII. 33 and Figure PIII. 34 compare the gas flow velocities on the façade at a height of 1 and 2 m for V0, V1 and V2.

It can be seen that V0, V1 and V2 have similar gas flow velocities at 1 m height. This is because the persistent flame is always located in this area.

Comparing the gas velocities at a height of 2 m shows that V0 and V2 have similar results. V1 has higher results in a direct comparison. The fact that the wall lining starts to fail at the 37th minute and both wall and ceiling surfaces contributed to the fire could explain the increase in gas velocity.

6 Conclusion and outlook

The aim of this study was to investigate whether exposed timber surfaces or initially protected timber components can lead to more critical effects on the façade.

Five full-scale fire tests were carried out to investigate this. Three tests in a square compartment (4.5 x 4.5 m) and two in a double-width compartment (4.5 x 9 m). The tests were conducted with a high, movable fire load density (1085 MJ/m²). While the first test was carried out in a fully encapsulated (non-combustible) compartment, the exposed timber surfaces were subsequently increased. The influence of exposed or only initially protected timber surfaces on the fire impact on the façade was investigated using the measured gas temperature, heat release rate, temperature on the façade, flame heights along the façade, heat flux and velocities along the façade .

There are almost no differences in the gas temperatures in the growth phase of the fire, and there are only minor differences in the temperature curves in the fully-developed fire phase. The influence of the structural fire load becomes visible afterwards. The course of the gas temperature in the decay phase is thus primarily defined by the exposed, or only initially protected timber surfaces involved in the fire (structural fire load).

In the fully-developed fire phase of a ventilation-controlled fire, the lack of oxygen governs the combustion. The more movable fire load is available, the lower the influence of the structural fire load in the fire development phase.

Additional structural fire load leads to an increase in temperatures on the façade. In these tests, maximum temperature deviations increases averaging approx. 120 - 200 °C occurred on the façade in the fully-developed fire phase. An exposed mass timber ceiling has a greater impact on the façade than exposed mass timber walls. The specific influence an exposed ceiling has on the façade fire exposure requires further investigation.

There is no significant difference in flame height between the tests. Due to the additional structural fire load, the fire is lengthened in time. The prolonged fire causes longer-lasting higher flames on the façade.

An exposed mass timber ceiling leads to higher heat fluxes on the façade than an exposed mass timber wall. The theory that the incident heat flux on the façade is approximately three times greater when a mass timber ceiling is used instead of a non-combustible ceiling could not be confirmed. The reason for this could again be the different fire load densities and the width of the opening.

Furthermore, the results of the gas flow velocity measurement on the façade support the hypothesis that the gas velocities increase with a growing structural fire load.

Overall, it is evident that the internationally available findings from full-scale fire tests are currently insufficient to conclusively clarify this issue. Since many factors such as geometry, opening factor [29], [47], arrangement of timber surfaces [47], fire load density, compartment size, protection times of linings, etc. play a decisive role, it is not possible to make any general statements at the present time. In order to further investigate and quantify this important topic,

additional full-scale tests are necessary. The series of tests [48] or the unpublished parts of the CodeRed test series [26], [29] could provide further results. Unfortunately, the measurement results on the façades have not yet been published.

Acknowledgments

The research has been funded by the German Federal Ministry of Food and Agriculture through the project management agency Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). The Bavarian Carpenters' Guild Association (Landesinnungsverband des Bayerischen Zimmererhandwerks) coordinated co-financing by the timber industry. All research partners staff from Technische Universität Braunschweig, Magdeburg-Stendal University of Applied Sciences and the Institute of Fire and Civil Protection Heyrothsberge involved in these tests are acknowledged. The following research staff that helped to carry out these tests successfully are gratefully acknowledged: Sven Brunkhorst, Daniel Butscher, Franziska Heumann, Björn Kampmeier, Christoph Kurzer, Markus Lechner, Michael Neske, Felix Steeger, Stefan Winter and Jochen Zehfuß as well as the students. We would also like to extend our heartfelt thanks to the TUM Fire Brigade Garching and Gump & Maier GmbH for their technical support.

References

- [1] Reitan N K, Friquin K L, Mikalsen R F (2019) Brannsikkerhet ved bruk av krysslaminert massivtre i bygninger - en litteraturstudie. Rep. 2019:09 RISE Research Institutes of Sweden, Trondheim
- [2] Friquin K L, Reitan N K, Mikalsen R F (2019) Fire Exposure on Façades of Cross-Laminated Timber Buildings – A Review. FSF 2019- 3rd International Symposium on Fire Safety of Façades, Paris
- [3] Brandon D, Just A, Andersson P, Östman B (2018) Mitigation of Fire Damages in Multi-storey Timber Buildings - Statistical Analysis and Guidelines for Design. Rep. RISE Report 2018:43, RISE Research Institutes of Sweden, Stockholm
- [4] Göldner M (2021) Evaluation of fire and hazard prevention measures - Part 4: Determination and evaluation of quantified propagation factors (Evaluierung der Maßnahmen des vorbeugenden Brand- und Gefahrenschutzes - Teil 4: Ermittlung und Bewertung quantifizierter Ausbreitungsfaktoren). Master Thesis, Technical University of Munich
- [5] Maiworm B, Göldner M (2021) Einsatzstellenbegehungen – Fokus: Hat das Gebäude funktioniert? Braunschweiger Brandschutz-Tage 2021 241:63-82
- [6] Gorska C (2019) Fire Dynamics in Multi-Scale Timber Compartments. Dissertation, The University of Queensland
- [7] Gorska C, Hidalgo J P, Torero J L (2021) Fire dynamics in mass timber compartments. Fire Saf J 120:103098. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2020.103098>
- [8] Nothard S, Lange D, Hidalgo J P, Gupta V, McLaggan M S (2020) The response of exposed timber in open plan compartment fires and its impact on the fire dynamics. SiF 2020 – The 11th International Conference on Structures in Fire, Brisbane. <https://doi.org/10.14264/5d97785>
- [9] Bartlett A I, Kanellopoulos G, Law A (2019) Heat Flux Distribution on a Facade from Timber-Lined Compartments. Interflam 2019:1995-2002, London
- [10] Berger H (2021) Investigation of the effects between full scale and small scale fire tests (Untersuchung der Skalierungseffekte bei Brandversuchen). Master Thesis, Technical University of Munich
- [11] Maag T, Fontana M (2000) Brandversuche an Modulhotels in Holzbauweise. Report, Swiss Federal Institute of Technology ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004031004>
- [12] Frangi A, Fontana M (2005) Fire performance of timber structures under natural fire conditions. Proc. Fire Safety Science, 2005:279-290: International Association for Fire Safety Science. <https://doi.org/10.3801/IAFSS.FSS.8-279>

- [13] Su J, Loughheed G D (2014). Fire safety summary - Fire research conducted for the project on mid-rise wood construction. Client Report A1-004377.1, National Research Council Canada
- [14] Hakkarainen T (2002) Post-Flashover Fires in Light and Heavy Timber Construction Compartments. *Journal of Fire Sciences* 20:133-175. <https://www.doi.org/10.1177/0734904102020002074>
- [15] Su J, Leroux P, Lafrance P-S, Berzins R, Gratton K, Gibbs E, Weinfurter M (2018). Fire Testing of Rooms with Exposed Wood Surfaces in Encapsulated Mass Timber Construction. Client Report A1-012710.1, National Research Council Canada
- [16] Hadden R M, Bartlett A I, Hidalgo J P, Santamaria S, Wiesner F, Bisby L A, Deeny S, Lane B (2017) Effects of exposed cross laminated timber on compartment fire dynamics. *Fire Saf J* 91:480-489. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.074>
- [17] Su J, Lafrance P-S (2018). Fire Safety Challenges of Tall Wood Buildings - Phase 2: Task 2 & 3 - Cross Laminated Timber Compartment Fire Tests. NFPA Rep. No. FPRF-2018-01. NRC Rep. No. A1-012710.1, National Research Council Canada
- [18] Épernon Fire Tests Programme (2020) Synthesis Report; Report n° EFTP-2020/01; October 13, 2020. <http://www.epernon-fire-tests.eu/>
- [19] Bartlett A, Law A, McNamee R J, Zehfuss J, Mohaine S, Tessier C, Bisby L (2019) Heat fluxes to a façade resulting from compartment fires with combustible and non-combustible ceilings. FSF 2019 - 3rd International Symposium on Fire Safety of Façades, Paris
- [20] Robert F et al (2019) ÉPERNON FIRE TESTS PROGRAMME - Test report n° 013598: CLT slab (Natural Fire Test – Scenario 2), CERiB FireTesting Centre, France. <http://www.epernon-fire-tests.eu>
- [21] Robert F et al (2019) ÉPERNON FIRE TESTS PROGRAMME - Test report n° 013597: CLT slab (Natural Fire Test – Scenario 2), CERiB FireTesting Centre, France. <http://www.epernon-fire-tests.eu>
- [22] Robert F et al (2019) ÉPERNON FIRE TESTS PROGRAMME - Test report n° 013599: CLT slab (Natural Fire Test – Scenario 2), CERiB FireTesting Centre, France. <http://www.epernon-fire-tests.eu>
- [23] Robert F et al (2019) ÉPERNON FIRE TESTS PROGRAMME - Test report n° 013600: CLT slab (Natural Fire Test – Scenario 2), CERiB FireTesting Centre, France. <http://www.epernon-fire-tests.eu>
- [24] Brandon D, Sjöström J, Temple A, Hallberg E, Kahl F (2021) Final Project Report - Fire Safe implementation of visible mass timber in tall buildings – compartment fire testing. RISE Report 2021:40, RISE Research Institutes of Sweden

- [25] Sjöström J, Brandon D, Temple A, Hallberg E, Kahl F (2021) Exposure from mass timber compartment fires to facades. RISE Report 2021:39, RISE Research Institutes of Sweden
- [26] Kotsovinos P, Rackauskaite E, Christensen E, Glew A, O'Loughlin E, Mitchell H, Amin R, Robert F, Heidari, M, Barber D, Rein G, Schulz J (2022) Fire dynamics inside a large and open-plan compartment with exposed timber ceiling and columns: CodeRed #01. Fire and Materials. <https://doi.org/10.1002/fam.3049>
- [27] Rackauskaite E, Bonner M, Restuccia F, et al. (2021) Fire experiment inside a very large and open-plan compartment: x-ONE. Fire Technol 58:905–939 <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01162-6>
- [28] Heidari M (2021) Travelling fires methodology and probabilistic design of structures. PhD thesis. Imperial College London
- [29] Kotsovinos P, Christensen E G, Rackauskaite E, Glew A, O'Loughlin E, Mitchell H, Amin R, Robert F, Heidari, M, Barber D, Rein G, Schulz J (2022) Impact of ventilation on the fire dynamics of an open-plan compartment with exposed timber ceiling and columns: CodeRed #02. Fire and Materials. <https://doi.org/10.1002/fam.3082>
- [30] Engel T, Brunkhorst S, Steeger F, Butscher D, Kurzer C, Werther N, Winter S, Zehfuß J, Kampmeier B, Neske M (2022) Schlussbericht zum Verbundvorhaben TIMpuls - Brandschutztechnische Grundlagenuntersuchung zur Fortschreibung bauaufsichtlicher Regelungen im Hinblick auf eine erweiterte Anwendung des Holzbaus. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe; Gülzow-Prüzen <https://doi.org/10.14459/2022md1661419>
- [31] German Institute for Standardization (2015) DIN EN 1991-1-2/NA National Annex - Nationally determined parameters - Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire. Berlin
- [32] European Committee for Standardization (2013) EN 60584-1 Thermocouples - Part 1: EMF specifications and tolerances (IEC 60584-1:2013). Brussels
- [33] European Committee for Standardization (2020) EN 1363-1:2020 Fire resistance tests - Part 1: General requirements. Brussels
- [34] Starke H (2009) Kalibrierung von bidirektionalen Sonden - Calibration of Bidirectional Probes. Jahresbericht 2006/2007/2008, IdF Sachsen-Anhalt, Heyrothsberge 2009
- [35] Brunkhorst S, Zehfuß J; Engel T, Kurzer C, Werther N, Steeger F, Butscher D (2021) TIMpuls Grossversuche an Holzbauten. Braunschweiger Brandschutz-Tage 2021
- [36] European Standard (2009) Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design; German version EN 1995-1-2:2004 + AC:2009

- [37] European Committee for Standardization (2019) EN 13381-7 Test methods for determining the contribution to the fire resistance of structural members - Part 7: Applied protection to timber members. Brussels
- [38] Ahrens J (2021) Influence of the immobile fire load on the fire effect on the façade (Einfluss der immobilen Brandlast auf die Brandeinwirkung auf der Fassade). Master Thesis, Technical University of Munich
- [39] Häggkvist A, Sjöström J, Wickström U (2021) Using plate thermometer measurements to calculate incident heat radiation *Journal of Fire Sciences* 31(2):166–177 <https://doi.org/10.1177/0734904112459264>
- [40] Ingason H, Wickström U (2007) Measuring incident radiant heat flux using the plate thermometer *Fire Saf J* 42: 161–166 <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2006.08.008>
- [41] European Standard (2009) Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire; EN 1991-1-2:2002 + AC:2009
- [42] Engel T, Werther N (2020) Analyse der zulässigen Brandausbreitung über die Fassade. *Bautechnik* 97:558–565. <https://doi.org/10.1002/bate.202000007>
- [43] European Commission (1994) Communication of the Commission with regard to the interpretative documents of Council Directive 89/106/EEC (94/C 62/01). *Official Journal of the European Communities*
- [44] NFPA (2016) NFPA 14 - Standard for the Installation of Standpipe and Hose Systems
- [45] Babrauskas V (2010) Glass breakage in fires https://fireevacuationplan.ru/articles/dataFolder/to139_GlassBreak.pdf Accessed 16 May 2022
- [46] Morris B (1999) Fire spread in multi-storey buildings with glazed curtain wall facades. (LPR 11: 1999), Loss Prevention Council, Borehamwood, England
- [47] Brunkhorst S, Zehfuß J (2020) Experimental and Numerical Analysis of Fire Development in Compartment Fires with Immobile Fire Load. *International Scientific Conference on Woods & Fire Safety*. https://doi.org/10.1007/978-3-030-41235-7_28
- [48] Hopkin D, Wegrznski W, Spearpoint M, Fu I, Krenn H, Sleik T, Gorska C, Stapf G, (2022) Large-Scale Enclosure Fire Experiments Adopting CLT Slabs with Different Types of Polyurethane Adhesives: Genesis and Preliminary Findings; *Fire* 5, 39. <https://doi.org/10.3390/fire5020039>
- [49] DS/EN 1991-1-2 DK NA:2014 National Annex to Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire+
- [50] NF EN 1991-1-2/NA:2007 Annexe nationale à la Eurocode 1 — Actions sur les structures - Partie 1-2 : Actions générales - Actions sur les structures exposées au feu

- [51] NA to BS EN 1991-1-2:2002 UK National Annex to Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-2: General actions – Actions on structures exposed to fire
- [52] PD 6688-1-2:2007 Background paper to the UK National Annex to BS EN 1991-1-2
- [53] N.A. to I.S. EN 1991-1-2:2002 Irish National Annex to Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General Actions - Actions on structures exposed to fire
- [54] Appendice Nazionale Italiana alla UNI EN 1991-1-2:2005 Parametri adottati a livello nazionale da utilizzare per le strutture esposte al fuoco

Appendix

An overview of the individual wall and ceiling structures used in the TIMpuls compartment full-scale fire tests is shown in Table PIII. 4.

Table PIII. 4 Overview of the timber constructions

Wall structures

		<p>100 mm cross-laminated timber wall (five layers 20 20 20 20 20 mm) with 18 mm gypsum plasterboard type F / gypsum fiberboard</p>
		<p>150 mm cross-laminated timber wall (five layers 34 24 34 24 34 mm)</p>
		<p>140 mm light timber frame with 2x 18 mm gypsum plasterboard type F / gypsum fiberboard</p>
		<p>140 mm light timber frame with 12 mm oriented strand board und 2x 12.5 mm gypsum fiberboard</p>

Ceiling structures

		<p>180 mm glued-laminated timber</p>
		<p>220 mm light timber frame with 22 mm suspension and 2x 18 mm gypsum fiberboard</p>

Table PIII. 5 shows the fire load density to be used according to Eurocode 1 or the National Annex.

Table PIII. 5 Comparison of statistical fire load densities for dwellings in Europe

EN 1991-1-2 [41]	Germany [31]	Denmark [49]	France [50]	Great Britain [51], [52]	Ireland [53]	Italy [54]
948 MJ/m ²	1085 MJ/m ²	200 MJ/m ² *	930 MJ/m ²	870 MJ/m ²	870 MJ/m ²	948 MJ/m ²
80% fractile	90% quantile	80% fractile	90% quantile	80% fractile	80% fractile	80% fractile

* related to A_t, total area of enclosure (walls, ceiling and floor, including openings)

Table PIII. 6 shows the mean values of the weather data over the test time measured per minute.

Table PIII. 6 Weather data from the weather station located directly next to the test area, shown as mean values of the minute measurements over the test period for different heights

Height	Temperature [°C]			Wind speed [km/h]				Air pressure [hPa] -
	1 m	0.2 m	0.5 m	1 m	2 m	5 m	10 m	
V0	-1.0	1.0	1.0	1.0	1.2	1.3	1.5	962
V1	6.8	0.7	0.7	1.1	1.2	1.4	1.3	954
V2	3.4	0.9	0.8	1.3	1.4	1.6	1.8	951
V3	10.1	1.4	1.7	1.8	1.8	1.9	2.0	961
V4	-5.0	2.6	2.5	2.9	2.9	3.0	3.1	971

Table PIII. 7 shows the parameters for determining the heat release rate via the charring rate

Table PIII. 7 Parameters for determining the heat release rate via the charring rate

	Components	300°C on the timber surface	≤ 50°C deviation behind the lining to the compartment	Residual cross-section	Timber surface area
V1	Exposed GLT ceiling	6 min	-	107 mm	20.3 m ²
	Initially protected CLT walls	37 min	66 min	70 mm	37.9 m ²
V2	Exposed CLT walls	6 min	-	79 mm	10.8 m ²
	LTF walls	63 min	81 min	115 mm	1.6 m ²
	LTF ceiling	63 min	81 min	205 mm	2.9 m ²
V3	Exposed GLT ceiling	7 min	-	107 mm*	40.5 m ²
	LTF wall (2x 12.5 mm GF + 12 mm OSB)	53 min	69 min	115 mm*	10.8 m ² OSB + 1.0 m ²
	LTF wall (2x 18 mm GPF / GF + 12 mm OSB)	75 min	95 min	8 mm OSB*	10.8 m ² OSB
	LTF wall (2x 18 mm GPF / GF)	75 min	95 min	128 mm*	2.2 m ²
V4	Exposed GLT ceiling	7 min	-	125 mm	40.5 m ²
	Exposed GLT column	7 min	-	175 x 175 mm	2.5 m ²
	Exposed GLT beam	7 min	-	265 x 185 mm	6.1 m ²
	Exposed CLT wall	7 min	-	100 mm	10.8 m ²
	LTF wall (2x 18 mm GPF / GF)	-	-	-	-

* Determined up to the 90th minute via the 300°C isotherm of the thermocouples in the component

Figure PIII. 40 to Figure PIII. 43 shows the results of the two methods for determining the heat release rate (mass loss vs. charring rate) for each test.

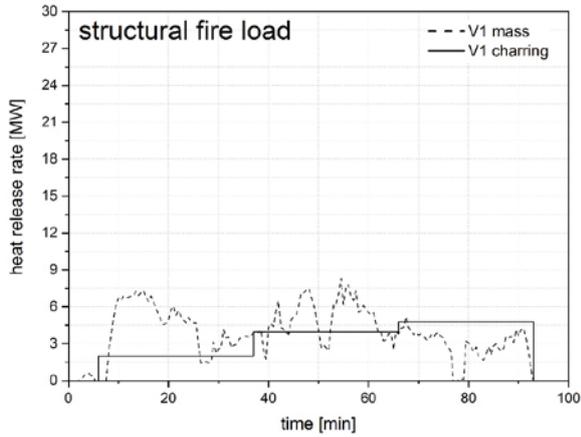


Figure PIII. 40 Results of the two methods for determining the heat release rate (mass loss vs. charring rate) for V1

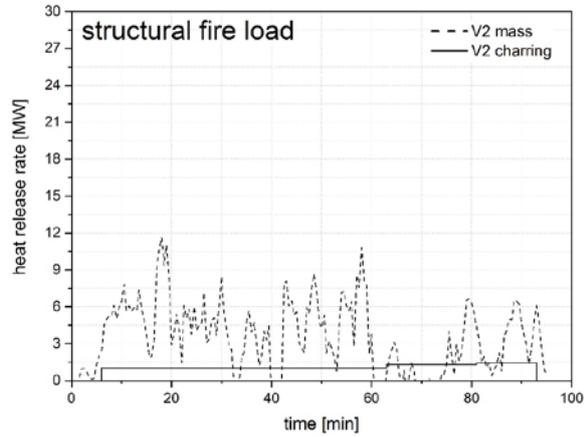


Figure PIII. 41 Results of the two methods for determining the heat release rate (mass loss vs. charring rate) for V2

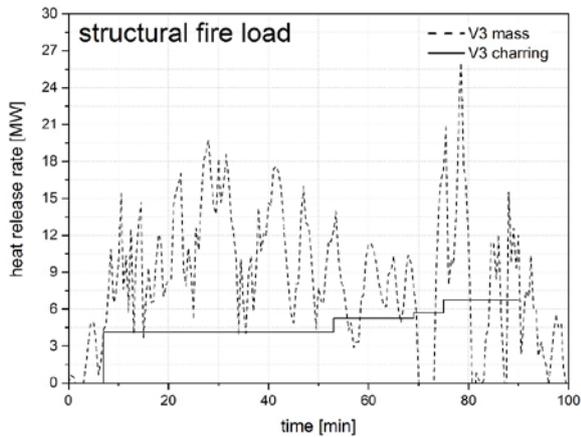


Figure PIII. 42 Results of the two methods for determining the heat release rate (mass loss vs. charring rate) for V3

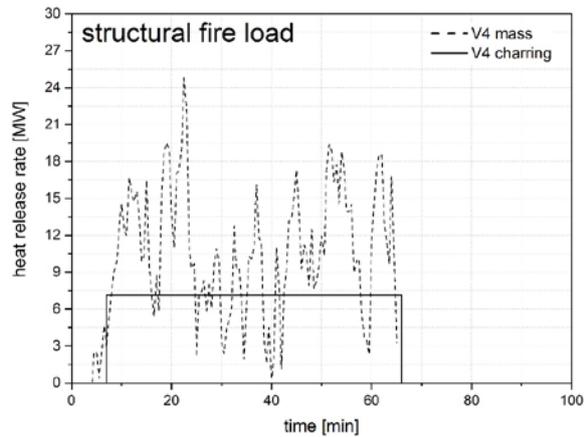


Figure PIII. 43 Results of the two methods for determining the heat release rate (mass loss vs. charring rate) for V4

Electronic supplementary material



PAPER IV

Begrünte Fassaden aus brandschutztechnischer Sicht

Thomas Engel, Julia Noder

Abstract

In den letzten Jahren gewinnen begrünte Fassaden mit Blick auf eine nachhaltige Stadtentwicklung zunehmend an Bedeutung. Zum Brandverhalten von begrünten Fassaden und der daraus folgenden Brandweiterleitung über die Fassaden stehen nur eine geringe Anzahl an Erkenntnissen zur Verfügung. Dieser Artikel stellt den aktuellen Stand der Forschung zur brandschutztechnischen Bewertung von begrünten Fassaden dar. Darüber hinaus beschreibt er die Erkenntnisse aus vier durchgeführten orientierenden großmaßstäblichen Brandversuchen mit Fassadenbegrünungen. Bei den untersuchten Begrünungsformen handelt es sich um Kriechspindel, Blauregen, Wilden Wein, Kiwi, Stauden und Kräuter. Die Auswertung der bereits zur Verfügung stehenden und aktuell durchgeführten Versuche zeigen, dass bei der richtigen Wahl der Pflanzenart und Konstruktionsform brandschutztechnisch sichere Lösungen erzielt werden können. Im laufenden Betrieb stellt darüber hinaus die regelmäßige Pflege und Wartung eine wichtige Grundlage dar.

Keywords Brandschutz; Begrünte Fassaden, Brandverhalten; Fassadenbegrünung; Kletterpflanzen

Fire performance of green facades

In recent years, green facades have become increasingly important in terms of sustainable urban development. Only a small amount of knowledge is available on the fire behaviour of green facades and the resulting fire spread on the facades. This article presents the current state of research on the fire safety evaluation of green facades. Furthermore, it describes the results of four orienting large-scale fire tests with green facades. The forms of greenery investigated are wintercreeper euonymus, wisteria, creeper, hardy kiwi, perennials and herbs. The evaluation of the already available and currently performed tests show that fire protection so-

lutions can be achieved if the correct plant species and construction form are chosen. Furthermore, regular care and maintenance of facade greening is an important basis during building operation.

Keywords Fire protection; green facades, fire behaviour; facade greening; living walls; climbing plants

1 Grundlagen

1.1 Begrünungsinitiative in Städten

In den letzten Jahren gewinnen begrünte Fassaden zunehmend an Bedeutung. Obwohl die Städte nur zwei Prozent der globalen Landfläche einnehmen, lebt über die Hälfte der Weltbevölkerung in Städten und urbanen Ballungsräumen. Drei Viertel der europäischen Bevölkerung wohnen in städtischen Gebieten und dieser Anteil wird nach Prognosen noch stark zunehmen [1]. Die dadurch einhergehend notwendige nachhaltige Stadtentwicklung setzt eine ausreichende Menge an Grün- und Erholungsflächen voraus. Der zunehmende Mangel an Wohnflächen steht jedoch oft der Neuschaffung von öffentlichen Grünflächen entgegen und stellt die zuständigen Behörden somit vor große Herausforderungen. Eine mögliche Lösung wäre das Begrünen der zahlreichen vorhandenen horizontalen und vertikalen Gebäudeflächen.

1.2 Arten von Fassadenbegrünungssystemen

Zum Begriff Fassadenbegrünungssystem zählen neben der Pflanze selbst weitere Bestandteile, wie z. B. Gerüstkletterhilfen, Verankerungen, Unterkonstruktionen, Bewässerungsanlagen und herstellereigenspezifische Systeme, die gezielt an die Außenwand angebracht werden, um das Wachstum, die Dauerhaftigkeit und die ästhetischen Aspekte einer Wandbegrünung zu gewährleisten. Die Begrünungsvielfalt basiert auf traditionellen bodengebundenen Fassadenbegrünungen mit Kletterpflanzen, wandgebundenen Systemen sowie einer Mischform. Bodengebundene Begrünungen (mit Bodenanschluss) werden aufgrund des pflanzenspezifischen Kletterverhaltens in Selbstklimmer oder Gerüstkletterpflanzen unterteilt, vgl. Abbildung PIV. 1. Wandgebundene Begrünungen (ohne Bodenanschluss) zeichnen sich durch eingebaute Bewässerungssysteme, beliebige Begrünungsgrößen, sowie Austauschbarkeit der Pflanzen aus. Diese ermöglichen durch autarke Modul- oder Regalsysteme, vgl. Abbildung PIV. 1, eine flächige Fassadenbegrünung bereits ab dem Zeitpunkt der Gebäudefertigstellung. Im Falle einer Mischform werden beispielweise die unteren Geschosse mit bodengebundenen Gerüstkletterpflanzen und die oberen Geschosse mit Trogpflanzen ausgestattet. Aufgrund der Vielfalt ist für fast jeden Fassadentyp eine passende Fassadenbegrünung herstellbar [2].

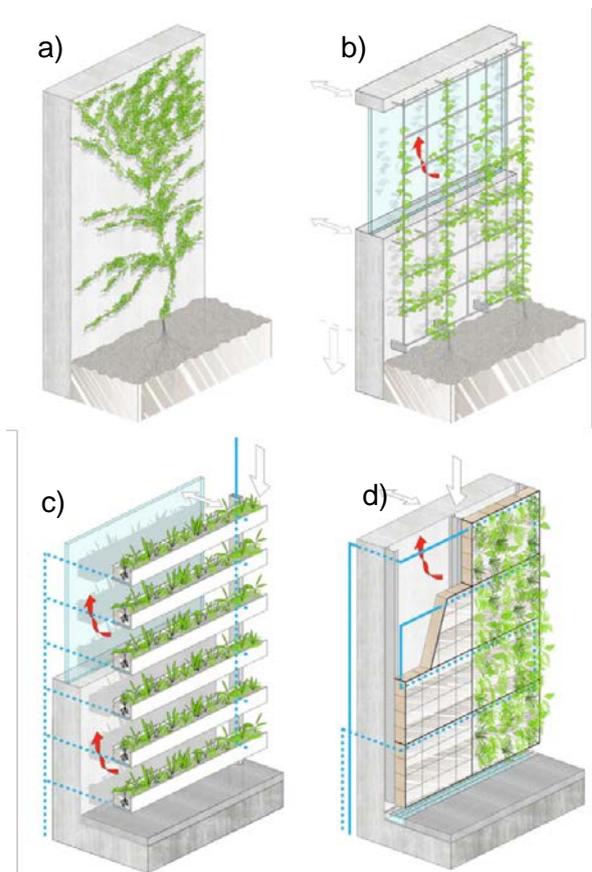


Abbildung PIV. 1 Ausbildungsformen der Fassadenbegrünung a) mit Selbstklimmer b) mit Gerüstkletterpflanzen c) wandgebundenes lineares System d) wandgebundenes modulares System; Types of facade greening a) climbing plant without frame b) climbing plants with frame c) in-line living wall d) modular living wall [2]

1.3 Pflanzenarten

Es existieren rund 150 geeignete Kletterpflanzen für Fassadenbegrünung [3], wobei in Deutschland vor allem Efeu, Wilder Wein und Blauregen weit verbreitet sind. Der Efeu zeichnet sich durch seine lichtfliehende Wachstumsform (negativ phototrop) sowie den natürlichen Verzicht auf saisonalen Laubabfall (immergrün) aus. Ein weiteres Beispiel für eine immergrüne Pflanzenart stellt die Kriechspindel dar. Anders als der Efeu weist dieser jedoch keine negativ phototrope Wachstumsrichtung auf.

Der Selbstklimmer, Wilder Wein, gilt aufgrund geringer Standortansprüche, hoher Vitalität, einfacher Handhabung, sowie der Kosteneinsparung durch Verzicht auf Kletterhilfen als besonders beliebt. Beim Blauregen handelt es sich um eine Schlingpflanze, die sich durch geringe Triebdichte, wenig Pflanzentotmasse und blau-violette Blüten auszeichnet.

Darüber hinaus finden die Pflanzenarten Traubenkiwi und kleinwüchsige, für wandgebundene Systeme geeignete Sorten vom Geißblatt, Kriechspindel, japanischer Stechpalme und Herzblattlilie immer mehr Anwendung in der Fassadenbegrünung.

1.4 Bauordnungsrechtliche Einstufung der Fassadenbegrünungssysteme

Exemplarisch wird innerhalb dieses Textes auf die Bayerische Bauordnung (BayBO) und deren Kommentierung verwiesen. Die weiteren 15 landesspezifischen Bauordnungen enthalten sinngemäße Ausführungen. Die BayBO als Gesetz, hat gemäß Anwendungsbereich nach Art. 1 eine Gültigkeit für „*baulichen Anlagen und Bauprodukte. Es gilt auch für Grundstücke sowie für andere Anlagen und Einrichtungen, an die nach diesem Gesetz oder in Vorschriften auf Grund dieses Gesetzes Anforderungen gestellt werden.*“ [4]

Bauliche Anlagen sind nach Art. 2 Abs. 1 Satz 1 BayBO mit dem Erdboden verbundene, aus Bauprodukten hergestellte Anlagen [4].

Bei Bauprodukten handelt es sich um Erzeugnisse, die hergestellt werden, also um künstliche Ergebnisse menschlicher Tätigkeit. Weiter besteht der Herstellungs- und Verwendungszweck der Bauprodukte im Einbau in bauliche Anlagen oder in der Verwendung als bauliche Anlage [5]. Bauprodukte sind somit nach Art. 2 Abs. 11 BayBO Produkte, Baustoffe, Bauteile, Anlagen und Bausätze, die hergestellt werden, um dauerhaft in bauliche Anlagen eingebaut zu werden, bzw. aus ihnen vorgefertigte Anlagen, die hergestellt werden, um mit dem Erdboden verbunden zu werden [4].

Der Anwendungsbereich der BayBO schließt weiterhin das Grundstück selbst, als auch andere Anlagen und Einrichtungen ein, an die nach der Bauordnung oder in Vorschriften auf Grund der Bauordnung Anforderungen gestellt werden. Andere Anlagen und Einrichtungen sind solche, die nicht unter den Begriff der baulichen Anlagen und Bauprodukte fallen. Andere Anlagen in diesem Sinn sind z. B. Bäume (Art. 7 Abs. 1 Satz 1 Nr. 2, Art. 81 Abs. 1 Nr. 7) oder Hecken als Einfriedungen (Art. 57 Abs. 1 Nr. 7) [5].

Unter Berücksichtigung des Anwendungsbereiches der Bauordnung lässt sich feststellen, dass Befestigungssysteme und Rankhilfen von Fassadenbegrünungen in den Anwendungsfall als Bauprodukte fallen. Die Vegetation der Fassadenbegrünung, als nicht künstlich erzeugtes Produkt, kann jedoch maximal als andere Anlage und Einrichtung gewertet werden. Eine klare bauordnungsrechtliche Forderung an Fassadenbegrünungen lässt sich jedoch, bis auf die allgemeinen Anforderungen an Außenwandbekleidungen nach Art. 26 Abs. 3, innerhalb der Bauordnung aktuell nicht finden [4]. Ob die Anforderungen an Außenwandbekleidungen auch für die Fassadenbegrünung selbst ihre Gültigkeit besitzen, ist fraglich. Sehr wünschenswert wäre, dass sich die Vertreter/innen der Bauaufsicht auf eine finale Einstufung zur weiteren Betrachtung einigen.

2 Brandschutztechnische Bewertung von begrünten Fassaden

2.1 Schutzziel für Fassadenbrände

Die Betrachtung der Brandausbreitung an Fassaden beruht auf drei Einwirkungsszenarien. Diese sind „Brand eines benachbarten Gebäudes“, „Brand außerhalb des Gebäudes“ und „Brand innerhalb eines Gebäudes“. Der „Brand innerhalb eines Gebäudes“ und der „Brand außerhalb des Gebäudes“ stellen die häufigsten, als auch die kritischsten Brandfälle für eine

Brandeinwirkung an der Fassade dar. Für Standardgebäude der Gebäudeklasse 4 und 5 müssen zum aktuellen Zeitpunkt Oberflächen von Außenwänden sowie Außenwandbekleidungen einschließlich der Dämmstoffe und Unterkonstruktionen schwerentflammbar sein und die Baustoffe, die schwerentflammbar sein müssen, dürfen nicht brennend abfallen oder abtropfen. Weitere konkrete Schutzziele wurden seitens der Bauaufsicht nicht formuliert. Ein eindeutiges deutsches Schutzziel für die Begrenzung der Brandweiterleitung über Außenwandbekleidungen wäre für die Betrachtung von Fassaden aus brennbaren Baustoffen jedoch eine wichtige Grundlage [6].

Der Begriff schwerentflammbar lässt sich, mit Blick auf die Klassifizierungsnorm DIN 4102-1, wie folgt definieren: Unter einer, aus einer Wandöffnung schlagenden Flamme darf sich die Brandausbreitung nicht wesentlich außerhalb des Primärbrandbereichs erstrecken [7]. Diese Definition ist mit Blick auf das ursprüngliche bauordnungsrechtliche Schutzziel als Grundlage heranzuziehen, auch wenn die DIN 4102-1 keine Grundlage für Fassadenbrandprüfungen darstellt. Die Zulassungsgrundsätze des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) legen für Außenwandbekleidungen fest, welche Systeme im Großversuch zu untersuchen sind [6].

2.2 Brandschutztechnische Risikobeurteilung für begrünte Fassaden

Eine Auswertung von 54 Brandereignissen mit Fassadenbegrünung (Presseartikelsammlung in einem Betrachtungszeitraum von circa fünfeneinhalb Jahren) ergibt, dass in den meisten Fällen Efeu gebrannt hat. Durch die relativ hohe Anhäufung von abgestorbenen Pflanzenteilen (Totholz im Efeu), die durch die Pflanzeigenschaft „negativ phototrop“ und „immergrün“ begünstigt wird, haben Efeubrände zu einer zum Teil raschen und großflächigen Brandausbreitung geführt [8]. Darüber hinaus können im Brandfall beim Ausdampfen von ätherischen Ölen aus den Pflanzen Durchzündungseffekte entstehen.

Die Realbrandereignisse belegen, dass Brände an Fassadenbegrünungen meist sehr ähnlich ablaufen. Zunächst erfolgt die Verbrennung von Trockenlaub, danach entzünden sich das Totholz und eine evtl. vorhandene brennbare Kletterhilfe. In den meisten Fällen brennen die trockenen Pflanzenteile innerhalb von wenigen Sekunden ab. Nach dem Abbrand des Totholzes erlischt das Feuer in vielen Fällen eigenständig. Fassadenbereiche mit vitalen und gepflegten Pflanzen tragen in der Regel nicht zur Brandweiterleitung bei [8].

Als Ursachen für kritische Brände an begrünten Fassaden lassen sich folglich fehlende Pflegemaßnahmen und ein unsachgemäßer Umgang mit Flammen bei Garten- bzw. Bauarbeiten (z. B. das Abflammen der Efeuwurzeln) ausmachen. In einigen Fällen handelt es sich um bereits vollflächig abgestorbene Fassadenbegrünungen, deren Bodenwurzeln zuvor abgeschnitten, jedoch die Begrünung selbst nicht von der Fassade entfernt wurde [9].

2.3 Stand der Forschung zum Brandverhalten von begrünten Fassaden

Bisher durchgeführte Untersuchungen an begrünten Fassaden

Untersuchungen zum Brandverhalten von begrünten Fassaden wurden insbesondere durch die Magistratsabteilung 39 der Stadt Wien in Verbindung mit der Universität für Bodenkultur

Wien durchgeführt. Bis 2014 sind in Europa kaum tiefergehende Untersuchungen zum Brandlastpotential von begrünten Fassaden durchgeführt worden [10]. Tabelle PIV. 1 stellt die bisher bekannten Untersuchungen chronologisch dar.

Tabelle PIV. 1 Liste bisher durchgeführter Brandversuche an begrünten Fassaden; List of fire tests on green facades

Institution	Zeitraum	Art der Untersuchung
Departement for Communities and Local Government in London	2013	Fünf Brandversuche an herstellerepezifischen Wandbegrünungssystemen Studie „Fire Performance of Green roofs and Walls“ [11]
Universität für Bodenkultur Wien	2016 - 2017	Brandversuche im Muffelofen im Rahmen von Bachelorarbeiten zur Ermittlung der Entflammbarkeit und des Brandverhaltens von Kletterpflanzen [12,11]
Magistratsabteilung 39 Stadt Wien (PÜZ)	2015-2018	Vier großmaßstäbliche Brandversuche in Anlehnung an ÖNORM B 3800-5 mit Efeu, Fingerblättrige Klettergurke in Verbindung mit Wildem Wein, sowie Japanischer Blauregen in Verbindung mit Kletterhortensie mit zwei unterschiedlichen Abständen zur Brandkammer [10]
Technische Universität München	2019	Vier großmaßstäbliche Brandversuche im Rahmen einer Masterarbeit mit Kriechspindel, Blauregen, Wildem Wein, Kiwi, Stauden und Kräuter [9]

Brandversuche im Muffelofen

Im Rahmen vom Bachelorarbeiten wurden in Wien das Brandverhalten von Begrünungspflanzen im Muffelofen untersucht. Die gewählten Pflanzen wurden in [13] bei einer konstanten Temperatur von ca. 850°C und in [12] bei unterschiedlichen Temperaturen in einem Muffelofen thermisch beansprucht, mit dem Ziel, den Zeitpunkt und die Dauer der Rauch- und Brandentwicklung zu bestimmen. Tabelle PIV. 2 stellt Ergebnisauszüge aus [13] dar.

Tabelle PIV. 2 Entflammbarkeit von Kletterpflanzen untersucht im Muffelofen; Flammability of climbing plants tested in muffle furnace [13]

Sehr stark entflammbar	Stark entflammbar	Schwach entflammbar	Sehr schwach entflammbar
Immergrünes Geißblatt	Winterjasmin	Zier-Kiwi	Großblütige Alpen-Waldrebe
	Hopfen	Trompetenwinde	
	Wald-Geißblatt	Schilling-Knöterich	
	Kletterrose	Wilder Wein	
	Ramblerrose	Chinesischer Blauregen	
	Akebie / Klettergurke		
	Pfeifenwinde		
	Anemonen-Waldrebe		
	Efeu		
	Kletterhortensie		
	Japanisches Geißblatt		
	Weinrebe		
	Japansicher Blauregen		

sehr starke Entflammbarkeit = entflammt zwischen 0 und 30 Sekunden
 starke Entflammbarkeit = entflammt zwischen 30 und 60 Sekunden
 schwache Entflammbarkeit = entflammt zwischen 60 und 120 Sekunden
 sehr schwache Entflammbarkeit = entflammt zwischen 120 und mehr Sekunden

Großmaßstäbliche Brandversuche

Die Magistratsabteilung 39 der Stadt Wien hat bislang vier Fassadenbrandversuche in Anlehnung an ÖNORM B 3800-5:2013 durchgeführt [10]:

- Versuch 1: Efeu (kein Abstand zum Brandkammersturz)
- Versuch 2: Klettergurke und Wilder Wein (kein Abstand zum Brandkammersturz)
- Versuch 3: Blauregen und Kletterhortensie (1,0 m Abstand zum Brandkammersturz)
- Versuch 4: Blauregen und Kletterhortensie (0,6 m Abstand zum Brandkammersturz)

Bei den Versuchen wurden vitale Pflanzen ohne Totholz untersucht. Tabelle PIV. 3 stellt die Auswertung der Versuche aus [10] dar:

Tabelle PIV. 3 Übersicht der Versuchsergebnisse aus; Overview of the test results from [10]

	Brandweiterleitung nach oben hin	Brandweiterleitung seitlich	Abfallen brennender Teile	Nach ÖNORM B 3800-5
Versuch 1	Ja	Nein	Nein	Negativ
Versuch 2	Ja	Nein	Nein	Negativ
Versuch 3	Nein	Nein	Nein	Positiv
Versuch 4	Ja	Nein	Nein	Negativ

3 Durchgeführte großmaßstäbliche Brandversuche

3.1 Versuchskonzeption

Im Rahmen einer Masterarbeit an der Technischen Universität München [9] wurden vier unterschiedliche, vitale Fassadenbegrünungen in Anlehnung an die DIN 4102-20 [14] brandschutztechnisch untersucht, vgl. Tabelle PIV. 4. Die Pflanzenauswahl erfolgte anhand diverser Herstellerempfehlungen und sollte die aktuell regelmäßig zum Einsatz kommenden Pflanzen abdecken.

Tabelle PIV. 4 Übersicht der durchgeführten Brandversuche; Overview of the conducted fire tests

Bezeichnung	Durchgeführt am	Hinterlüftungsspalt
BV_Kriechspindel	12.07.2019	Nein
BV_Blauregen	12.07.2019	200 mm
BV_Wilder Wein	12.07.2019	Nein
BV_Kiwi, Stauden, Kräuter	12.07.2019	Nein

Der Prüfstand setzte sich aus einem ausgesteiften Holzrahmen mit darauf montierten Gipsfaserplatten und 16 isolierten Drahtthermoelementen vom Typ K (2 x 0,5 mm) gemäß DIN EN 1363-1 [15] in unterschiedlichen Höhen vgl. Abbildung PIV. 2 zusammen. Die Höhe des Prüfstandes wurde in Anlehnung an die DIN 4102-20 so gewählt, dass die Brandweiterleitung über die Fassadenbegrünung bewertet werden kann. Die Versuche erfolgten im Freien.

Die erforderliche thermische Beanspruchung wurde zuvor durch zwei Referenzprüfungen überprüft. Die zwanzigminütige Beanspruchung erfolgte durch Verbrennung einer Holzkrippe mit einer Masse von 20 ± 1 kg, vgl. Abbildung PIV. 3. Die Temperaturmessung an den Thermoelementen wurde im Sekundentakt erfasst.

Zu Gunsten einer ungehinderten Flammenausbreitung aus der Brandkammer wurden Pflanzengefäße direkt vor dem Versuchsbeginn entfernt. Flammenhöhen und -ausbreitung wurden durch Video- und Wärmebildkameraaufzeichnung dokumentiert. Der Fokus der visuellen Beobachtung wurde auf die Brandweiterleitung durch die Fassadenbegrünung gelegt, genauer auf die Entflammung von Pflanzen und Kletterhilfen und das Abfallen von brennenden Teilen.

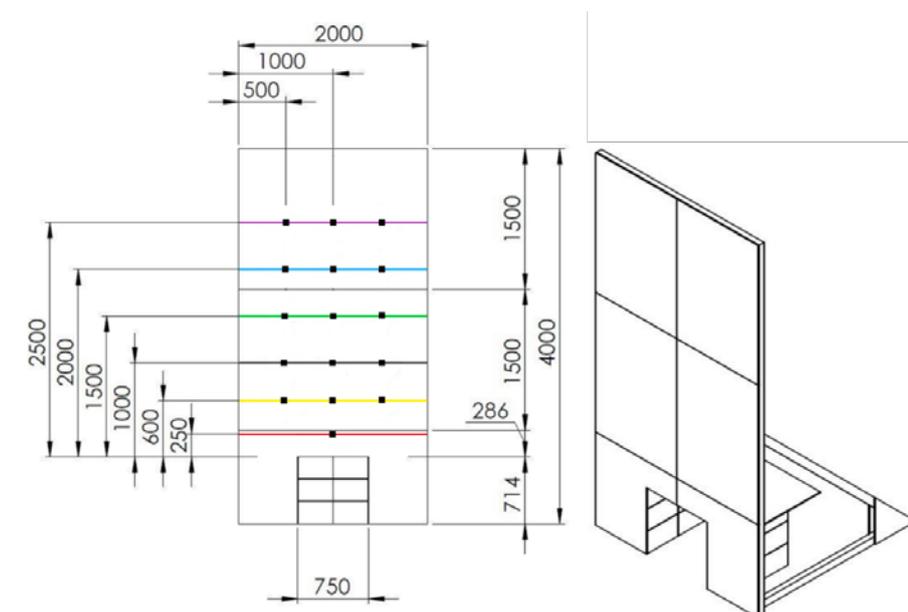


Abbildung PIV. 2 In Anlehnung an DIN 4102-20 hergestellter Prüfstand mit 16 Temperaturmessstellen; Test stand manufactured according to DIN 4102-20 with 16 temperature measuring points

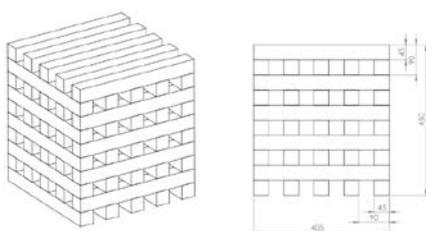


Abbildung PIV. 3 Holzkrippe (20 ± 1 kg); wooden crib (20 ± 1 kg)

3.2 Ziele der Untersuchung

Die Brandversuche sollten aufzeigen, inwiefern sich eine Fassadenbegrünung infolge eines Feueraustritts aus einer Fassadenöffnung am Brandgeschehen beteiligt. In dem flammenbeaufschlagten Bereich (Primärbrand) ist von einer vollständigen Verbrennung der Begrünung auszugehen. Für eine Beurteilung der Schwerentflammbarkeit von Fassadenbegrünungen ist es entscheidend, die eigenständige Brandausbreitung außerhalb des Stützfeuers (Primärbrandbereich) zu erfassen. Dadurch kann festgestellt werden, ob durch Fassadenbegrünungen eine Brandweiterleitung entlang der Fassade begünstigt wird.

Durch die zwanzigminütige Versuchsdauer sollte sowohl das Brandweiterleitungspotenzial vitaler, als auch, durch thermische Beanspruchung, vertrockneter Pflanzenteile untersucht werden. Des Weiteren wurde das Abfallen brennender Pflanzenteile sowie die abgebrannte Fläche der Begrünung dokumentiert. Nach dem Ablöschen der Brandlast in der Brandkammer wurde das eigenständige Weiterbrennen, bzw. das Selbstverlöschen der Begrünung beobachtet. Aus dem, im Rahmen der orientierenden Brandversuche, ermittelten Brandverhalten von Fassadenbegrünungen sollten Tendenzen für brandschutztechnisch sichere Lösungen für Fassadenbegrünungen an mehrgeschossigen Gebäuden (Gebäudeklasse 4 und 5) abgeleitet werden.

3.3 Beschreibung der einzelnen Versuche

Beim Versuch 1 BV_Kriechspindel wurden zwei auf Metallgitter gewachsene Kriechspindel durch Gewindestangen am Prüfstand positioniert und damit eine begrünte Fläche von 1,2 m x 3,5 m geschaffen, vgl. Abbildung PIV. 4. Bei diesem Versuch konnte, aufgrund einer geringfügigen Flammenausbreitung in der 11. Minute, ein kegelförmiger Abbrand der Begrünung bis zu einer Höhe von 2,5 m über dem Brandkammersturz beobachtet werden. Die mehrfach während des Versuches beobachtete lokale Entflammung des Spindelstrauchs steht in Zusammenhang mit der Verbrennung verdampfender Pflanzenextrakte und dauerte in der Regel nur wenige Sekunden an. Eine vertikale Brandweiterleitung auf der Fassade oberhalb von 2,5 m über dem Brandkammersturz war nicht zu beobachten. Der darüber befindliche 0,9 m breite Streifen der Kriechspindel wies auch nach dem Brandversuch noch einen für vitale Pflanzen üblichen Feuchtegehalt auf, vgl. Abbildung PIV. 4 [9].

Beim Versuch 2 BV_Blauregen wurde ein 6 Jahre alter, auf einem Glasfaserklettergerüst gewachsener 3,25 m hoher Blauregen untersucht, vgl. Abbildung PIV. 5. Trotz einer durchschnittlichen thermischen Beanspruchung von 750°C (0,25 m über dem Brandkammersturz) und einer zusätzlichen Flamme durch den kurzzeitigen Mitbrand der schwerentflammaren Kletterhilfe (0,25 m bis 0,8 m über dem Sturz), konnte keine Entflammung der vertrockneten Pflanzenteile beobachtet werden [9].

Beim Versuch 3 BV_Wilder Wein wurden mit Hilfe von zwölf 100 cm großen Selbstklimmer eine kegelförmige Direktbegrünung geschaffen. Zu Beginn der Prüfung fand bei den Pflanzenteilen nahe der Brandkammer eine sehr rasche pyrolytische Zersetzung statt, dies jedoch ohne aktive Flammenbildung. Aufgrund der sehr geringen Begrünungsdichte wurde ab der 10. Minute keine Veränderung mehr registriert. Im Anschluss wurde daher eine brennende Fackel verwendet, um das Brandweiterleitungspotenzial der, außerhalb des Primärbrandbereiches befindlichen, ausgetrockneten Pflanzenteile zu überprüfen. Durch direkte Einwirkung der Fackel konnte eine Entflammung der trockenen Begrünungsteile beobachtet werden, vgl. Abbildung PIV. 6. Im Anschluss wurde der Versuch nach 13 Minuten beendet [9].

Beim Versuch 4 BV_Kiwi, Stauden, Kräuter wurde die Fassadenfläche mit zehn Kiwi-Pflanzen (links) und mit insgesamt 36 kleinwüchsigen Pflanzen (Geißblatt, japanische Stechpalme und Kriechspindel, rechts) begrünt, vgl. Abbildung PIV. 7. Die Pflanzen wurden mittels Heftklammern befestigt. Die gemessene Temperatur betrug im Durchschnitt 660°C (0,25 m über dem

Brandkammersturz). Es konnten sowohl lokale Entflammungen (Zeitspanne wenige Sekunden) auf Seiten des Kiwi, als auch auf Seiten der Stauden und Kräutern beobachtet werden. Eine vertikale Brandausbreitung außerhalb des Primärbrandherdes war nicht zu erkennen [9].



Abbildung PIV. 4 Versuch BV_Kriechspindel, vorher- und nachher; Fire test BV_Kriechspindel, before and after [9]



Abbildung PIV. 5 Versuch BV_Blauregen, vorher- und nachher. Fire test BV_Blauregen, before and after [9]



Abbildung PIV. 6 Versuch BV_Wilder Wein, vorher und nachher inkl. brennender Fackel; Fire test BV_Wilder Wein before and after incl. burning torch [9]



Abbildung PIV. 7 Versuch BV_Kiwi. Stauden und Kräuter, vorher- und nachher; Fire test BV_Kiwi. Stauden und Kräuter before and after [9]

3.4 Ergebnisse

Die Temperatur-Zeit-Verläufe belegen die bereits aus [10] gewonnene Erkenntnis, dass ab einer Temperatur von ca. 550°C eine Entzündung der Pflanzenmasse zu erwarten ist, vgl. Abbildung PIV. 8. Die höchste gemessene Temperatur von 847°C wurde beim BV_Kriechspindel erfasst. Die leichten Temperaturschwankungen nach unten sind auf geringfügige Windeinflüsse zurückzuführen und der deutliche Temperaturanstieg in der 12. Minute hängt mit der Durchzündung verdampfender brennbarer Pflanzenextrakte zusammen.

Bis auf BV_Blauregen, bei dem keine Entflammung, sondern nur langsames Austrocknen und Verkohlen der Pflanze erfasst wurden, konnte bei allen anderen Brandversuchen eine begrenzte Entflammung der Begrünung innerhalb des Primärbrandherdes beobachtet werden.

Es fand jedoch weder eine eigenständige Brandausbreitung oberhalb des Stützfeuers statt, noch trat ein Abfallen brennender Pflanzenteile dabei auf, vgl. Tabelle PIV. 5. Beim BV_Wilder Wein ist auf Grund der geringen Begrünungsdichte keine repräsentative Aussage möglich [9].

Tabelle PIV. 5 Übersicht der Versuchsergebnisse; Overview of test results

Brandversuche	Entflammung	Brandweiterleitung	Brennen- des Abfal- len	Abgebrannte Fläche
BV_Kriechspindel	ja	geringfügig	nein	kegelförmig
BV_Blauregen	nein	nein	nein	keine
BV_Wilder Wein	ja	auf Grund geringer Begrünungsdichte nicht aussagekräftig	nein	nicht erkennbar
BV_Kiwi, Stauden, Kräuter	ja	nein	nein	kegelförmig

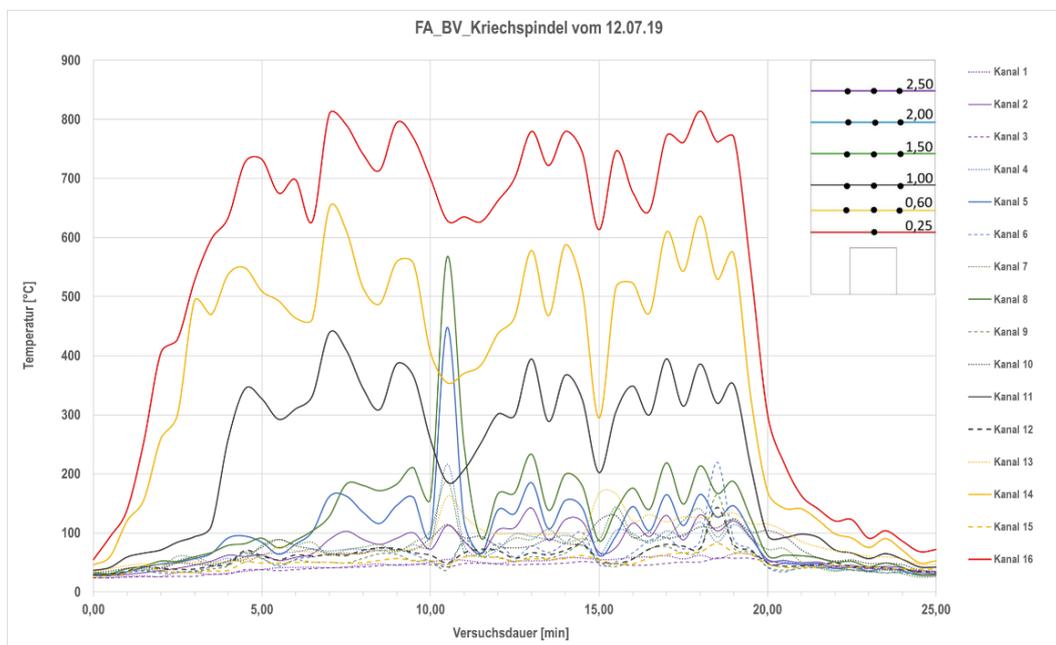


Abbildung PIV. 8 Temperatur-Zeit-Diagramm Brandversuch BV_Kriechspindel; Temperature-time-diagram of fire test BV_Kriechspindel [9]

4 Versuchsauswertung und Ableitung von Maßnahmen

Die orientierenden großmaßstäblichen Untersuchungen der verschiedenen Begrünungsarten ergaben, dass die aus der Brandkammer (simulierte Fensteröffnung) schlagenden Flammen zu keiner wesentlichen Brandausbreitung außerhalb des Primärbrandbereichs führten. Durch diese Brandversuche kann somit im ersten Schritt ein äquivalent schwerentflammbares Verhalten der jeweiligen Fassadenbegrünungsarten festgestellt werden.

Am kritischsten verhielt sich der Wilde Wein. Ursache dafür war die Brennbarkeit der ausgetrockneten Triebe. Zu berücksichtigen ist, dass auch hier nur durch aktives Eingreifen (Fackel) eine Brandweiterleitung erreicht werden konnte. Die Begrünungsdichte war jedoch verhältnismäßig gering angesetzt.

Die Pflanzenarten Kriechspindel, Blauregen und Kiwi, sowie die untersuchten Stauden und Kräuter verhielten sich aus brandschutztechnischer Sicht sehr unkritisch. Besonders der Blauregen nahm zu keinem Zeitpunkt aktiv am Brandgeschehen teil. Sowohl bei der Kriechspindel als auch beim Blauregen waren die Pflanzenteile außerhalb der Primärflamme nach dem Versuch noch vital und flüssigkeitsführend.

Grundsätzlich kann festgehalten werden, dass für brandschutztechnisch sichere Begrünungssysteme ohne weitere brandschutztechnisch konstruktive Maßnahmen keine negativ phototropen Pflanzensysteme (z.B. Efeu) zum Einsatz kommen sollten. Entscheidend für die Brandweiterleitung ist die vorhandene tote Pflanzenmasse, die eine zusätzliche Brandlast darstellt und bei negativ phototropen Pflanzenarten in großen Mengen vorkommt. Da das Brandweiterleitungspotenzial mit der Begrünungsdichte der Pflanze und der damit verbundenen Ansammlung von brennbaren Gasen aus ätherischen Ölen zusammenhängt, sollten grundsätzlich Pflanzen mit einer geringen Brennbarkeit gewählt werden, vgl. Abschnitt 2.3.

Darüber hinaus stellt die regelmäßige Pflege und Wartung eine sehr wichtige Grundlage für eine brandschutztechnisch sichere Fassadenbegrünung dar. Großflächig abgestorbene Pflanzen (Brandlast) müssen zeitnah erkannt und entfernt werden.

Die Eigenschaften immergrün, bzw. sommergrün weisen aus brandschutztechnischer Sicht jeweils beide Vor- und Nachteile auf. Immergrüne Pflanzenarten (z. B. Kriechspindel) weisen im Falle von Nährstoffmangel, Absterben und anderen Faktoren eine auffällige Farbgebung auf. Dies ist insbesondere mit Blick auf die Überwachung der Pflege der Fassadenbegrünung von Vorteil. Der Vorteil von sommergrünen Pflanzenarten (z. B. Blauregen) ist, dass sie in der Regel eine geringere Totmasse aufweisen, insbesondere dann, wenn aufgrund des relativ großen Ästeabstandes das großflächige Abfallen vertrockneter Blätter ungehindert möglich ist.

Es erscheint zielführend, eine brandschutztechnisch sichere Fassadenbegrünung durch eine gut überlegte Vorauswahl der Pflanzenart und Konstruktionsform zu gewährleisten. Sofern keine ausreichende Datenbasis zur Verfügung steht, sind orientierende Brandversuche durchzuführen. Maßgebend ist das Brandverhalten der Begrünung außerhalb des Primärbrandbereiches.

Weniger effektiv und nur in Einzelfällen sinnvoll erscheint aus Sicht der Autoren eine Anordnung von geschossweisen Brandsperren, wie beispielsweise bei Holzfassaden üblich. Die Brandsperren würden bei selbständig wachsenden Kletterpflanzen überwuchert werden und wären nur durch intensive Wartung und Pflege weiterhin effektiv wirksam. Die Magistratsabteilung 39 der Stadt Wien hat in ihrer Veröffentlichung allgemeine Vorschläge für die brandschutztechnische Betrachtung einer Fassadenbegrünung mit Kletterpflanzen gegeben, u.a. werden hier Schutzabstände von 1,0 m über Öffnungen in der Außenwand und zum Dach hin, in denen keine Begrünung angeordnet werden darf, empfohlen [10]. Ziel der Maßnahme ist es, durch definierte Abstände von der Primärbrandflamme, die Entzündung und die darauffolgende kurzzeitige vertikale Brandweiterleitung entlang der Fassadenbegrünung zu verhindern [10]. Diese Maßnahmen sind jedoch praktisch im laufenden Betrieb eines Gebäudes nur schwer sicherzustellen und erfordern ebenfalls ein hohes Maß an Wartung und Pflege. Begründen lässt sich die Maßnahme durch das österreichische Schutzziel [6]. Der 1,0 m Abstand soll eine Brandweiterleitung über die Fassade im zweiten Geschoss über dem Brandgeschoss

verhindern. Wirksam wird die Maßnahme an einer Öffnung, die im zweiten Geschoss über dem Brandgeschoss liegt. Durch die fehlende Begrünung im Bereich der Öffnungsfläche und dem 1,0 m breiten Streifen oberhalb, will man die Brandweiterleitung verhindern. Die Wirksamkeit dieser Maßnahmen, die in Normversuchen nach ÖNORM B 3800-5 an einem witterungsunabhängigen Prüfstand im Labor untersucht wurden, ist mit Blick auf reale durchschnittliche Flammenlängen zwischen 3,0 m und 4,5 m, bzw. Flammenspitzen bis zu 6 m, die aus einer Öffnung schlagen und unter Berücksichtigung von Windeinflüssen, fraglich [16], aus Sicht des direkten Vergleichs mit anderen rein normativ bereits geprüften Fassadenkonstruktionen jedoch nachvollziehbar. Bzgl. der unterschiedlichen Ansätze Deutschlands und Österreichs zur Schutzzieldefinition wird auf [6] verwiesen.

Mit Blick auf die Versuche bleibt zu beachten, dass es sich um rein orientierende Erkenntnisse handelt. Im Rahmen der Untersuchungen wurden klimatische Einflüsse (z. B. Trockenheit im Winter) auf das Brandverhalten von Begrünungen nicht untersucht.

Weiter wurden alle Versuche mit einer nichtbrennbaren Trägerplatte durchgeführt. Für das Verhalten bei schwerentflammbar, bzw. normalentflammbar Oberflächen lassen sich zwar Vorhersagen tätigen, aber, mit Blick auf den bisherigen Versuchsumfang, keine vollständig belegbaren Aussagen. Auch hier sind weitere Untersuchungen erforderlich.

5 Fazit

Die Begrünung der zahlreichen vorhandenen horizontalen und vertikalen Gebäudeflächen wird in Deutschland mit Blick auf die Lebensqualität, das Stadtklima und die gesetzten Klimaschutzziele zwangsläufig an Bedeutung gewinnen. Die Fassadenbegrünungen bei mehrgeschossigen Gebäuden sollte aber keinen negativen Einfluss auf das Sicherheitsniveau der Gebäude, insbesondere den Brandschutz nehmen. Die vorliegenden Versuchsergebnisse zeigen, dass bei der richtigen Wahl der Pflanzenart und Konstruktionsform brandschutztechnische sichere Lösungen erzielt werden können. Im laufenden Betrieb stellt die regelmäßige Pflege und Wartung eine wichtige Grundlage dar. Das Themenfeld der Fassadenbegrünung gilt insgesamt, sowie bezogen auf brandschutztechnische Gesichtspunkte, als ein umfangreiches Forschungsfeld der Zukunft.

Literatur

- [1] United Nations - Department of Economic and Social Affairs Population Division [Hrsg.] (2019): World Urbanization Prospects The 2018 Revision. New York
- [2] Pfoser, N. (2018) Vertikale Begrünung - Bauweisen und Planungsgrundlagen zur Begrünung von Wänden und Fassaden mit und ohne natürlichen Boden-/ Bodenwasseranschluss, Eugen Ulmer KG., Stuttgart.
- [3] Köhler, M. et al. (2012) Handbuch Bauwerksbegrünung Planung- Konstruktion – Ausführung, Verlagsgesellschaft Rudolf Müller GmbH & Co. KG, Köln.
- [4] Bayerische Staatsregierung (2019) Bayerische Bauordnung (BayBO). In der Fassung der Bekanntmachung vom 14. August 2007, die zuletzt durch § 3 des Gesetzes vom 24. Juli 2019 geändert worden ist. München.
- [5] Molodovsky, P.; Famers, G.; Waldmann, T. (2019) Kommentar Bayerische Bauordnung. 45. Update Oktober 2019: Rehm 2019.
- [6] Engel, T.; Werther, N. (2020) Analyse der zulässigen Brandausbreitung über die Fassade. in: Bautechnik <https://doi.org/10.1002/bate.202000007>.
- [7] DIN 4102-1:1998-05 (1998) Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 1: Baustoffe Begriffe, Anforderungen und Prüfungen. Beuth, Berlin.
- [8] Brandwein, T. (2014) Statistisches über Brände mit Kletterpflanzen und Strategien zu ihrer Vermeidung in: Workshop „Brandschutz und Grün“. Wien, 24. Oktober 2014.
- [9] Noder, J. (2019) Begrünte Fassaden aus brandschutztechnischer Sicht [Master-Thesis]. Technische Universität München.
- [10] Werner, D., G. Pommer, K. (2018) Studie zum Thema "Brandverhalten von Grünfassaden in großmaßstäblichen Versuchen. Magistratsabteilung 39 Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien. 20.12.2018. Wien
- [11] Department for Communities and Local Government [Hrsg.] (2013): Fire Performance of Green Roofs and Walls. August 2013. London.
- [12] Bühn, S. (2017) Prüfung der Entflammbarkeit von Kletterpflanzen am Kriterium des Verhaltens lebender Pflanzenteile bei kritischen Temperaturen [Bakkalaureatsarbeit]. Universität für Bodenkultur Wien.
- [13] Pichlhöfer, S. (2016): Brandverhalten von Kletterpflanzen in Bezug auf Fassadenbegrünungen. [Bachelor-Thesis] Universität für Bodenkultur Wien.
- [14] DIN 4102-20:2017-10 (2017) Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen – Teil 20: Ergänzender Nachweis für die Beurteilung des Brandverhaltens von Außenwandbekleidungen. Beuth, Berlin.

- [15] DIN EN 1363-1:2012-10 (2012) Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Beuth, Berlin.
- [16] Kotthoff, I. (2000) Forschungsbericht B15-8001 96-18: Erarbeitung realer Prüfbedingungen für die Durchführung von Original-Brandprüfungen an B 1-Fassadensystemen und eines Verfahrens zur Berechnung von Brandabläufen an Fassaden Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig e.V. vom 03.10.2000, 1. Ausfertigung.

Hinweis

Dies ist die angenommene Version desfolgenden Artikels: Engel, T.; Noder, J. (2020) Begrünte Fassaden aus brandschutztechnischer Sicht. Bautechnik 97, H. 8, S. 549–557, die in endgültiger Form veröffentlicht wurde unter <https://doi.org/10.1002/bate.202000041>. Dieser Artikel darf für nicht-gewerbliche Zwecke entsprechend der Wiley Selbstarchivierungs-Richtlinie verwendet werden.

PAPER V

Fire Safety for Green Façades

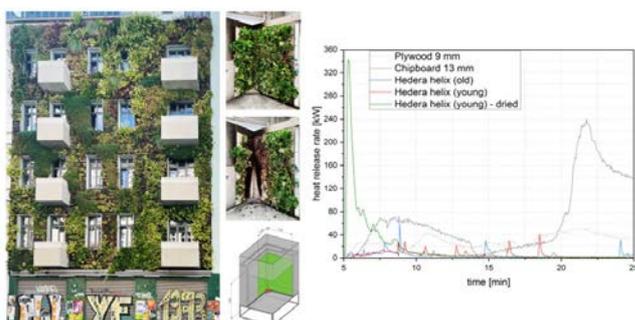
Part 1: Basics, state-of-the-art research and experimental investigation of plant flammability

Thomas Engel, Norman Werther

Abstract

This study is the first part of a larger investigation into the fire behaviour of green façades. In this study, the currently known international research status on this topic is presented and discussed. In addition, the flammability of green façades is investigated through 43 fire tests on a medium scale according to the SBI (Single Burning Item) test method EN 13823. The focus of the investigation was placed on climbing plants. A total of 25 different plant species were investigated. A comparison of the heat release rate of all the investigated vital plants shows similar behaviour. In the course of exposure, there are short peaks in the heat release rate. These peaks are “flare-ups” that occur when parts of the plants dry out due to exposure to the flame and then ignite. The plant species itself had no substantial influence on fire behaviour. Horizontal fire spread occurred to a very limited extent within the investigations of vital plants. They were self-extinguishing. The significant factor in the assessment of flammability is the moisture content of the plants. With dried plants, an abrupt heat release occurs at the beginning. Dried-out plants, as well as unmaintained plants with a high content of deadwood, represent the most critical case.

Keywords fire safety; green façades; fire spread; sustainability; flammability; plants; living wall



1 Introduction

1.1 General

In recent years, green façades (also called vertical greenery systems) have become increasingly important. Although cities occupy only 2% of the global land area, more than half of the world's population lives in cities and urban agglomerations. Three-quarters of Europe's population live in urban areas, and this proportion is forecast to increase sharply [1]. The resulting need for sustainable urban development requires a sufficient amount of green and recreational space. However, the increasing shortage of residential areas often stands in the way of the creation of new public green spaces and thus creates major challenges for the responsible authorities.

One possible solution would be the greening of the numerous existing horizontal and vertical building surfaces. Green façades offer multiple benefits, including improving air quality, minimising the heat island effect (or urban heat island = significantly warmer area in cities than surrounding rural areas), improving the thermal performance of the building, reducing noise through absorption and providing additional oxygen [2]–[8].

However, the fire safety aspects of green façades have not yet been investigated in detail.

1.2 Green façade systems

Figure PV. 1 shows the various types of green façades. In principle, a differentiation can be made between direct greening on the exterior wall using climbing plants, indirect greening controlled by trellises and climbing aids set off from the exterior wall, or greenery wall systems using shrubs and bushes in boxes or substrate systems (living wall). Mixed types are also possible [8].

Greenery wall systems (without ground contact) are characterised by built-in irrigation systems, plants of various sizes and the interchangeability of plants. These enable an extensive greening of the façade from the moment the building is completed through module or shelf systems [8].

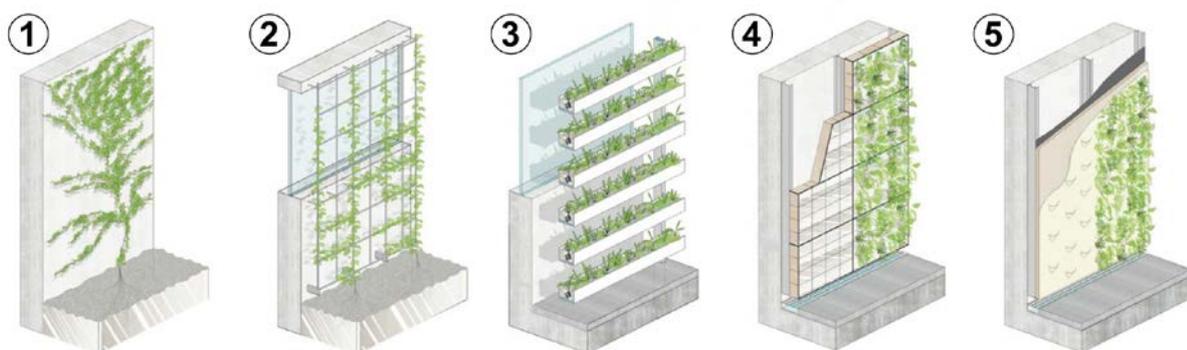


Figure PV. 1 Types of green façade design. 1) Direct growth with self-climbers, ground-based; 2) Growth on climbing aid/trellis, ground-based; 3) Plant boxes, horizontal vegetation surfaces, wall-based; 4) Modular system (living wall), vertical vegetation surfaces, wall-based; 5) Planar system (living wall), vertical vegetation surfaces, wall-based; based on [8]

In a recent study [9], 142 products from 58 manufacturers from Asia (India, Taiwan, Turkey), the Americas (Canada, USA, Chile), Europe (Austria, Czech Republic, France, Germany, Hungary, Italy, Netherlands, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland, United Kingdom) and Australia were analysed. The number shows the increasing interest in these systems. It should be noted, however, that this study looked for manufacturers offering a complete system. Of the 142 products, 24 (approx. 17%) belonged to types 1 and 2 (Figure PV. 1), while the rest belonged to living walls (approx. 83%). Here, a distinction must be made between “indoor” and “outdoor” applications. Since climbing plants on trellises are also regularly supplied by medium-sized nurseries, the number of products in the respective countries increases significantly [9].

An evaluation of 54 fire incidents [10] with green façades (press article collection in an observation period of approx. 5.5 years) shows that in most cases, ivy (*Hedera helix*) was involved. Due to the relatively high accumulation of dead plant parts (deadwood in *Hedera helix*), which is favoured by the plant characteristics “negatively phototropic” and “evergreen”, *Hedera helix* fires have led to a sometimes rapid and extensive fire spread. The real fire events prove that fires on green façades usually proceed in a very similar way. First, the dry foliage ignites, followed by the deadwood and any combustible climbing aid. In most cases, the dry plant parts burn within a few seconds. After the deadwood has burned, the fire often extinguishes on its own. Façade areas with vital and well-maintained plants generally do not contribute to fire spread [10].

1.3 Plant species basics

The use of climbing plants for green façades has many regional peculiarities [8], [11], [12]. The species potential for climbing plants in the central European climate region consists of approx. 150 species and varieties [11].

An evaluation of plant lists for tropical and subtropical regions revealed a potential of more than 1 000 plant species and varieties, of which only a small percentage is currently available in nurseries [13].

The range of possible plant species for wall-based planting systems encounters only a few restrictions and is, therefore, much more extensive. For the central European climate region, approx. 100 species and varieties are listed in [12]. A differentiation is made between perennials, grasses and woody plants [8], [11], [12].

The most important characteristics for the categorisation of plants are deciduous, semi-deciduous, evergreen, and the presence of a negative phototropic (light-fleeing) characteristic [8], [11], [12].

Evergreen and semi-deciduous plants, unlike deciduous plants, have foliage all year round. The difference between evergreen and semi-deciduous plants is that semi-deciduous species retain their foliage, but unlike evergreen plants, they drop their foliage in spring just before the foliage shoots again. A negative phototropic characteristic is the tendency of the shoots to grow away from the light. This characteristic leads to a high amount of hardened and dried material and the occurrence of structural damage if care and maintenance are lacking. An

example of a plant with a negative phototropic (light-fleeing) property is ivy (*Hedera helix*) [8], [11], [12].

1.4 Basics of the flammability and ignitability of plants

Extensive work on flammability of living vegetation has been conducted in the USA. White et al. [17] summarised the results from several studies as follows “[...] *flammability characteristics are affected by several factors which can be classified into two groups: (1) physical structure and components (e.g. branch size, leaf size and shape and retention of dead material); and (2) physiological or cellular elements (e.g. volatile oils and resins, moisture content, mineral content, lignin and waxes) [...]*” [17].

That the moisture content of plants is an important parameter for describing their flammability and heat release has been known for a long time. For example, the increasing flammability of dry Christmas trees [18]–[20].

Research on wildland fires shows that moisture content plays an extremely important role in the ignitability of natural fuels [21], [25]. The moisture content affects flammability both physically (increasing thermal capacity of the material) and chemically (inhibiting the combustion process) [21], [23]. The studies found a highly significant positive correlation between the moisture content of the leaves and the ignition time. The ignition time increases with higher moisture content [24]. This includes leaves, trees, grasses and shrubs. The moisture content also influences the rate of fire spread. Generally, the lower the moisture content, the more intense these phenomena become [26]–[32]. An investigations of shrub fires [33] concluded that: “*A twofold increase in moisture content from 40 to 80% for instance results in a 63% increase in time required for complete burning of the shrub. It is also found that flames begin to extinguish at higher moisture contents even though a considerable amount of unburnt solid fuel is present in the shrub. The cause of these phenomena was found to be that fuel particles undergoing combustion did not generate sufficient energy required to initiate ignition of neighbouring fuel particles resulting in an increase in the amount of unburnt mass.*” [33]

Results from studies show that the moisture content of new and old plant parts can be significantly different within the growing season. New foliage has a higher moisture content compared to old foliage [27], [34]–[39]. The moisture content of new foliage is highest at the time of emergence. A moisture content that is two or three times the organic dry weight is common [40]. “*The moisture content of old foliage changes only slightly during the season, while that of new foliage is very high at emergence and then drops, first rapidly, then more slowly, matching that of the old foliage at the end of the growing season*” [40], as shown in Figure PV. 2.

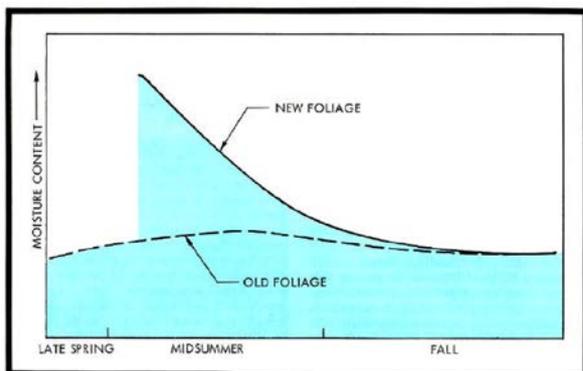


Figure PV. 2 Variation of the moisture content of foliage over a season [40]

Some studies have concluded that the flammability of plants may change with age due to changes in structure (foliage fraction, dead material), maintenance (irrigation, dead material, pruning) and possibly a reduction in the moisture content of mature foliage [21]. [22] shows, for example, that the ignition behaviour of live fuels in different seasons, but at the same moisture content, is different.

The living foliage of evergreen species is usually more flammable than that of deciduous species. There are several reasons for this, but the most important are the differences in moisture regimes. Deciduous foliage is the growth of the current year and has a relatively high moisture content during most of the growing season. Evergreen plants, on the other hand, especially those that retain their foliage for several years, have much lower average foliage moisture during the growing season. Old-growth foliage, with its lower moisture content, can constitute 80 per cent or more of the total evergreen foliage volume. There is also a greater tendency for evergreen species to have a mixture of dead foliage, twigs and branches [40]. The age of the plant, therefore, plays a role in ignitability [41].

The location of a plant and the local conditions can also influence the moisture content [26]. The moisture content of living and dry plants is also relevant to the seasonal occurrence of fires [42]. Depending on the species, the seasonal influence is stronger or weaker. This fact explains the frequency of fires in summer and early autumn after a hot period and in spring after a dry period [36]–[39]. Obviously, the determination of the moisture content of fuels is one of the important but also very complex components of wildfire prevention and management [43], [44].

Moisture content (MC) is typically calculated by dividing the difference between the wet mass (m_{wet}) and the dry mass (m_{dry}) by the dry mass and expressing this as a percentage. This method is used internationally, for example, to express the moisture content of wood [48], [49]. Usually, the material is dried in an oven until there is no more loss of mass. Equation (1) describes this calculation procedure.

$$MC = \left(\frac{m_{wet} - m_{dry}}{m_{dry}} \right) \times 100 \quad (1)$$

As previously described, the moisture content of plants is one of the key factors in wildland fire risk assessment. In research, fuel models are used for this purpose. An important factor for these models is the moisture content of the fuels and the resulting influence on the vitality of the plants. Rothermel [50] established a guideline for estimating moisture content in foliage, as shown in Table PV. 1.

Table PV. 1 Guidelines for estimating foliage moisture content [50]

Stage of vegetative development	Moisture (%)
Fresh foliage, annuals developing, early in the growing cycle	300
Maturing foliage, still developing with full turgor	200
Mature foliage, new growth complete and comparable to older perennial foliage	100
Entering dormancy, colouration starting, some leaves may have dropped from the stem	50
Completely cured, treat as dead fuel	30

Scott et al. [51] later extended these models. The moisture content of vegetation was also defined as an input parameter. Figure PV. 3 shows the influence of moisture content on the vitality of herbaceous plants.

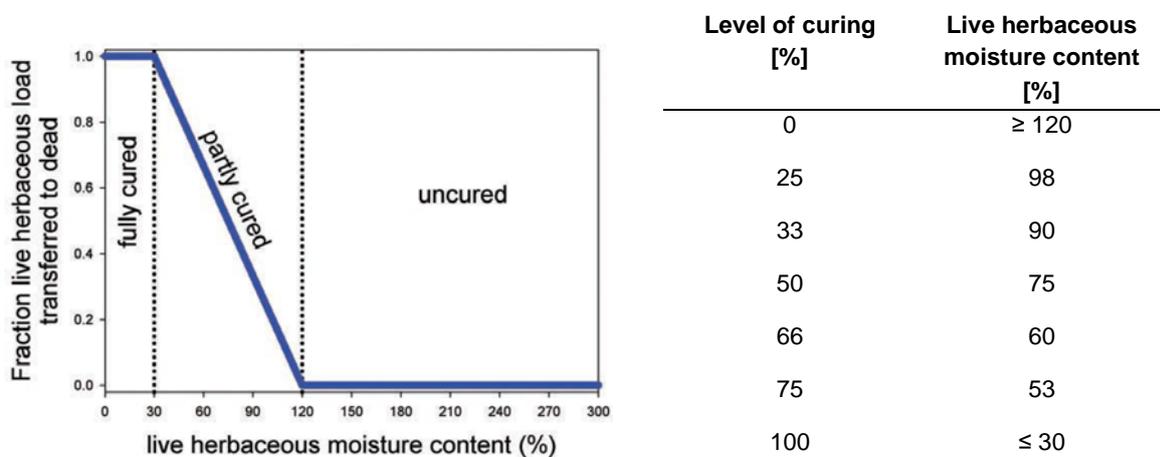


Figure PV. 3 Level of curing (fraction of dead plants) in relation to the herbaceous moisture content [51]

[52] specifies moisture contents of 26% for dead fuels and 100% for live fuels.

Another influence on the flammability of plants is the existence of essential oils and resins. The essential oils and resins result in a lower ignition temperature and a higher calorific value of heat release [28], [45]. The high calorific output will tend to promote further flaming [46]. The gases emitted during the combustion of essential oils can further increase the spread of fire [47].

The arrangement of the leaves can also have an influence on the burning characteristics of the plant. The ignition time was delayed with increasing leaf size. [53]

In addition, weather influences such as wind can have a significant impact on the flammability of plants [54], [55]. In [55], for example, the influence of wind on the flame characteristics of leaves was investigated. In most cases, the wind-burned specimens had longer times for ignition, complete burning as well as burning duration of the specimen at lower temperatures in each case. The wind (parallel to the leaf surface) cooled the specimens by convection, which led to longer ignition times and lower temperatures. [55]

Rahimi Borujerdi et al. identified as a major finding for fire spread in wildland fires that: “*Combustion of the gaseous components of the pyrolysis products is one of the key processes responsible for spread of fire in wildland fuels*” [56]. The effect of heating mode, moisture status (including live vs. dead plants) and plant species on the composition of the plant pyrolysates can additionally be taken from [57], [58], [59], [60], [61], [62], [63], [64], [65]. Based on the pyrolysis product distributions observed in these experiments, differences in fire behaviour of live and dead fuels should be largely due to moisture content [60], [61]. [63] shows that the condition of the plant (live or dead) did not affect the number of pyrolysis peaks of a particular plant species. The results of these studies can help to determine the heat release of the plants, for example for computational fluid dynamics (CFD) modelling [66], [67].

The ignition temperatures of vegetation have been investigated in numerous studies. However, the reported values are very inconsistent. Due to the different chemical compositions of various vegetation types and seasonal changes, there are variations in ignition temperatures. However, most plants of a particular type (e.g. foliage, needles, etc.) can generally be expected to show little variation in ignition temperature [14]. The pilot ignition temperature of foliage is in the range 227–453°C and of small woody shoots in the range 350–675°C [15], [16], [70], [71]. [70] concludes that the ignition temperature, unlike the ignition time, is not directly dependent on the size and shape of the sample. It seems clear that the ignition of the foliage begins at a time when moisture is still present [64], [55], [68], [69]. [72], on the other hand, concludes that almost all the moisture had evaporated from the fuel at the time of ignition. In [64] it was observed that bound water is only released at temperatures close to 200°C.

Furthermore, there is a lack of standardisation of methods for assessing the flammability of vegetation [17], [37]. “*The lack of consensus on fire testing of vegetation also likely reflects a view that ‘flammability’ is a state of ‘quality’ rather than a quantifiable property*” [17]. The most common test methods are listed in [17].

2 Analysis of existing experimental investigations

2.1 General

Overall, scientific knowledge about the fire behaviour of green façades is very limited. For this reason, it seems helpful to use similar models from wildland fire research. For example, studies on transition and fire spread behaviour from surface fuel fires to crown fuel fires can provide knowledge [73], [74]. A surface fire transition to a crown fire when the intensity of surface burning surpasses a critical value determined by the properties of the burning material in the crown [74]. The ignition energy is influenced by the moisture content of the foliage. Other influencing factors are the wind speed, the distance between the crown and the fire and the density of the crown [73], [74].

The studies show that wind increases fire spread, which is reflected in the increase in heat release rate, spread rate and flame height in wind-driven fires compared to non-wind-driven fires [73]. The greater the distance between the crown and the surface, the slower the fire spreads to the crowns [73]. Higher bulk density in crowns results in slower passage of hot fire gases through the crowns, leading to increased heating due to increased convection and higher probability of successful foliage ignition [74].

These findings show that moisture content (see also Section 1.4), plant density and wind can have a decisive influence on the fire spread and must be taken into account in further investigations of green façades.

2.2 Studies on the flammability of plants for green façades

Dahanayake et al. [75] investigated the influence of the moisture content of plants on their ignitability and fire hazard. For this purpose, the three different plants, *Hedera helix*, *Peperomia obtusifolia*, and *Aglaonema commutatum*, were investigated in cone calorimeter experiments [76], taking into account different moisture contents in the drying process. Fresh plant specimens of all three species did not ignite at any heat flux level in the test (from 20 kW/m² to 60 kW/m²). The moisture content of the fresh living plants showed differences; *Hedera helix* had the lowest moisture content of 326 %, while *Peperomia obtusifolia* and *Aglaonema commutatum* had contents of 1371 % and 1150 %, respectively. The specimens started to ignite once their MC had reached a certain value, as shown in Figure PV. 4. The study concludes that healthy and living plants are the most important basis for ensuring a minimal fire risk [75].

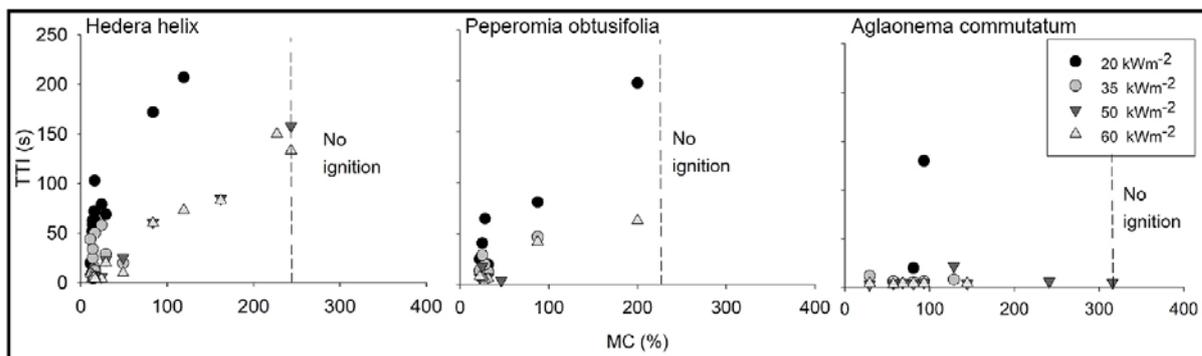


Figure PV. 4 Ignition time (TTI) at different radiant heat fluxes and under different moisture contents (MC) for *Hedera helix*, *Peperomia obtusifolia* and *Aglaonema commutatum* [75]

At the University of Vienna, the fire behaviour of plants for green façades was investigated in a muffle furnace as part of student projects. The chosen plants were thermally exposed in [77] at a constant temperature of approx. 850°C and in [78] at different temperatures in a muffle furnace. The aim was to identify the time and duration of smoke and fire development. Although differences were found, 65% and, therefore, the majority of the tested plant species were categorised as “highly flammable” [77].

The Department for Communities and Local Government [79] in London conducted cone calorimeter tests on specimens of a growing medium for living walls. The growing medium consisted of medium-textured peat and coir with added wood fibre, perlite, lime-based nutrients and controlled-release fertiliser with added wetter and insect control. The material for the three tests was dried in an oven at 40°C before the cone calorimeter tests were carried out at 50 kW/m². No ignition was observed in any of the tests [79].

2.3 Fire tests on green façades

The Department for Communities and Local Government’s publication [79] also refers to five Single Burning Item tests (SBI) [80] on green wall systems. The tests were carried out with living walls. However, no plants were installed in these systems. All tests had to be stopped before reaching the 10th minute. In three of the tests, the heat release reached more than 350 kW, and in two tests, the specimens collapsed onto the burner. Overall, these tests are very manufacturer-specific due to the pure testing of the system without greening and are, therefore, not very meaningful [79].

In addition, a number of manufacturers have conducted SBI fire tests [80] for their green living walls [81]–[86]. A description of the test specimens and the results of the eleven tests are given in the Appendix (Table PV. 5). A total of three different types of living walls from different manufacturers were tested. Some with plants, some without.

Engel et al. [87] investigated the flammability of green façades in four medium-sized experiments as part of a student research project [88]. The façade test stand was a structure 4 m high and 2 m wide, with a fire chamber in the centre of the lower area. Spindle (*Euonymus fortunei*), Japanese wisteria (*Wisteria floribunda*), Virginia creeper (*Parthenocissus quinquefo-*

lia) and a plant mix of herbs and shrubs (typical for wall-based systems) were used as greenery. During the experiments, some plant species burned more, less or not at all. The experiments cannot be directly compared to each other due to the different plant quantities, but they provide initial findings. If a plant was actively burning or limited vertical fire spread took place, this occurred through a brief flare-up of dried-out parts, as shown in Figure PV. 5 (11th min). There was no horizontal fire spread. Self-extinguishing occurred after the primary fire had stopped [87].

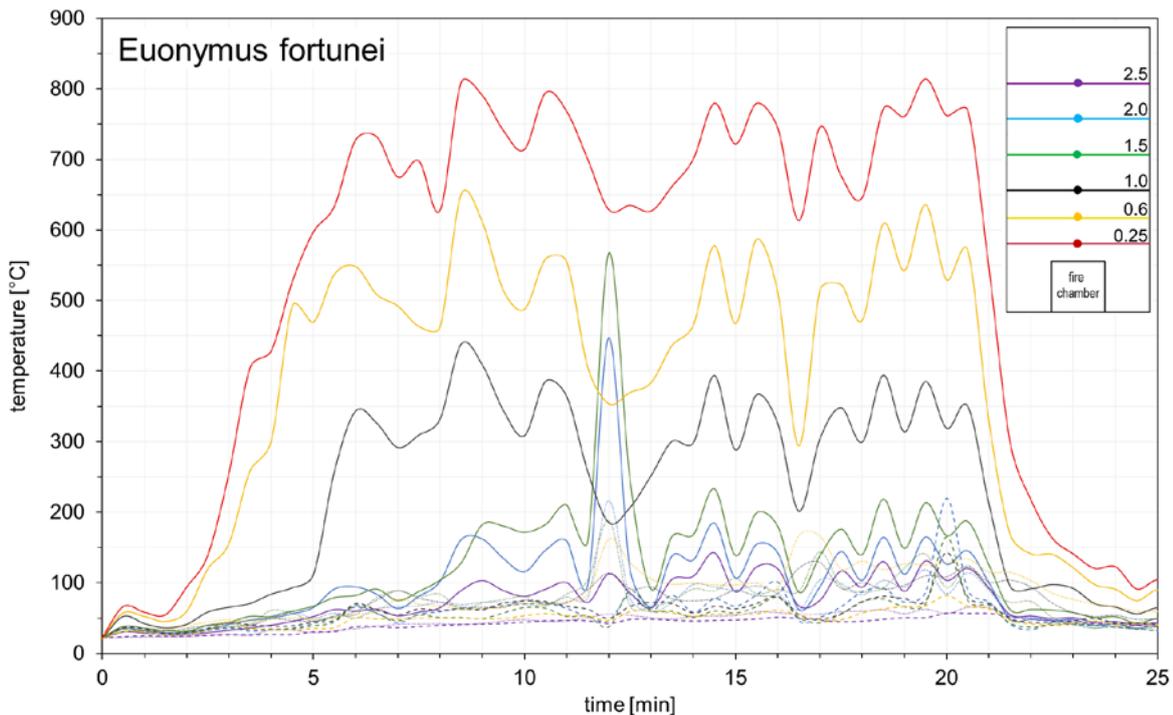


Figure PV. 5 Temperature-time diagram for a medium-scale façade fire experiment with euonymus fortunei, based on [87] (Color figure online)

Werner et al. published a first study [89] with four full-scale façade fire tests in 2018 and a second study [90] with seven full-scale façade fire tests in 2020. These fire tests represent the largest database for this research topic at the present time. Therefore, most of the technical specifications in guidelines, especially in Europe, can be referred back to these results [92]–[95]. The basis for the façade fire tests was the standard ÖNORM B 3800-5 [96]. The test specimen for the façade test stand consisted of a 5 m high inner corner with a long segment of 3 m width and a narrow segment of 1.5 m width. The fire chamber (1 m x 1 m) was located directly in the inner corner of the long segment. Wooden cribs were used as the fire load. The detailed test setups and the results are shown in Table PV. 6 in the Appendix. In the first study [89], ground-based green façades were investigated. The study varied between direct growth with self-climbers and growth on climbing aids/trellises and with regard to the vertical distances between the plants and the fire chamber. In all tests, vertical fire spread occurred in the form of recurrent short-term burning of dried plant parts (several brief flare-ups). According to the authors, the plants participate in burning at temperatures of approx. 500°C and above. Based on the findings in section 1.4, however, these values must be critically questioned. There was no horizontal fire spread. After the end of the experiment, self-extinguishing occurred. In the second study [90], wall-based living walls with plant boxes with and without fire stops were

also investigated. In the case of ground-based green façades climbing aids and trellises, the focus was on the distance between the climbing aid and the test stand wall. If a fire on the green façade was not prevented by technical means (projecting sheet steel fire stop located directly above the fire chamber), the burning of the green façade proceeded as in the first study. The results provide an important basis for the general classification of the flammability of green façades but must also be viewed critically with regard to the measures to be defined for reality. The reason for this is that the façade fire test according to ÖNORM B 3800-5 [96], which largely corresponds to the German DIN 4102-20 [97] test, was originally calibrated explicitly for testing composite external thermal insulation systems made of expanded polystyrene. The fire load in the form of a wooden crib of 25 kg does not correspond to the flame of a typical compartment fire [98] and is only to simulate a flame, which results in a similar temperature in the lintel area of the opening [99], [100]. This means that the façade test used here provides important results but does not represent reality. However, the results were directly transferred to reality (especially with regard to the technical measures), taking into account evaluation criteria that were not designed for green façades. The increase of the fire load from 25 kg to 50 kg for the last three tests does not change this. Furthermore, there are uncertainties regarding the reproducibility of the tests. For example, in test no. 3 of the second study [90], significantly fewer plants were arranged in the inner corner than in test no. 2, but the tests were directly compared in the evaluation. The structural measures derived from the tests, which are currently defined in some of the guidelines [92]–[95], must be taken with care because of the currently missing link and proof of adequacy between ÖNORM B3800-5 [96] and real fire incidents [89], [90].

The company Vertiko conducted a façade fire test [101] in accordance with DIN 4102-20 [97] on its wall-based living wall. The system consists of a vertical wall-based vegetation surface consisting of support profiles, rear-ventilated void cavity incl. fire stops, cladding panels (aluminium composite panel with mineral wool core), fleece (glass fibre fleece, cover fleece with PU-based colour coating), irrigation system, mineral substrate and various plants. The plants directly next to and above the primary flame burned down to the upper edge of the test stand (brief flare-ups). The surface of the composite fleece discoloured mainly due to soot. After the end of the fire test (turning off the burner), two small flames continued to burn at the fire chamber lintel but extinguished on their own within two minutes. The flames in the rear-ventilated void cavity could not pass the first fire stop. The temperatures in this area were too low to melt the aluminium substructure. Considering the temperature measurement in the rear-ventilated void cavity, in addition to the fact that the fire could not pass the first fire stop (0.5 m height), it can be seen that the living wall protected or insulated the rear wall of the test stand from the direct temperature effect of the primary flame, as shown in Figure PV. 6 [101].

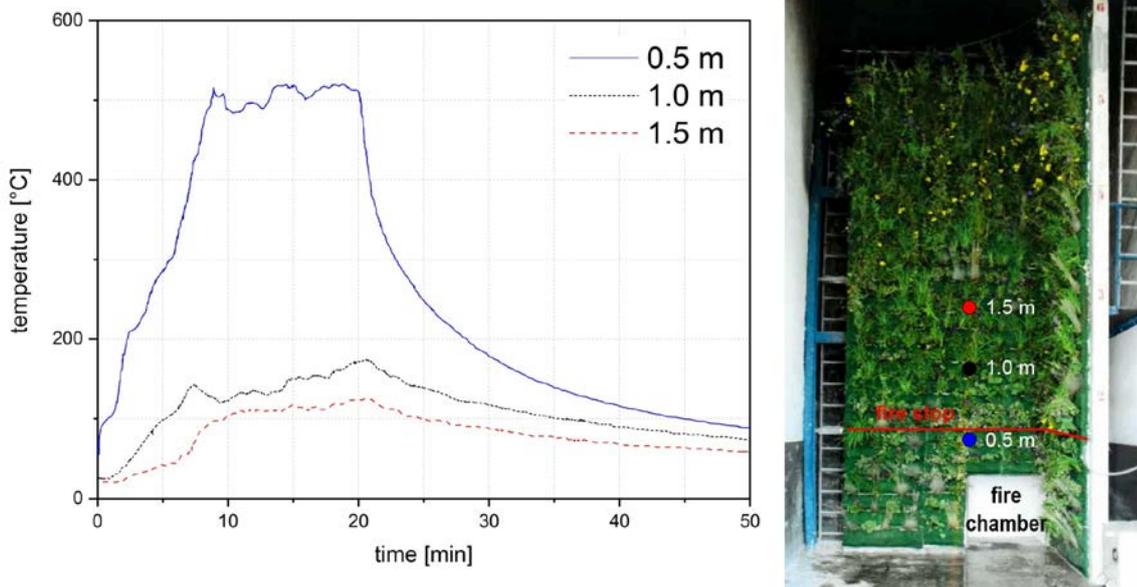


Figure PV. 6 Temperature-time diagram (left) in the rear-ventilated void cavity in different heights (0.5 m above the fire chamber (under fire stop), 1.0 m and 1.5 m above the fire chamber (above fire stop)); photo of the test stand with arrangement of the measuring points in the rear-ventilated void cavity; based on [101]

The company hhpberlin conducted a fire test [102] as part of a master's thesis [103]. The basis of the façade fire tests was the standard DIN 4102-20 [97]. The test specimen consisted of a 6 m high and 2.43 m wide wooden façade with a green façade in front. The wooden façade was a rear-ventilated horizontal tongue-and-groove formwork made of spruce wood. Stainless steel climbing aids were placed in front at a distance of 160 mm. As greenery, *Euonymus fortunei* was arranged on the left half of the climbing aid and *Actinidia arguta* on the right half. The wooden façade was divided by fire stops at heights of 1.75 m and 4.55 m, according to [104]. The green façade ran over the fire stops. The fire chamber on the base of the test stand (1 m x 1 m) was located directly in the middle of the façade. A gas burner with a gas pressure rate of 7.4 g/s and an air supply of 24 m³/h from the rear of the combustion chamber was used in the test. From approx. 1.5 min after the start of the test, the first brief flare-ups of the greening occurred. This phenomenon only occurred in the area directly above the primary flame. By the 8th minute, a large part of the vegetation in the area above the primary flame had been burned by short flare-ups, and the primary flame had reduced significantly. The reduced flame was also due to the occurrence of charring on the wooden façade. Ignition of the wooden formwork outside the primary fire area due to the flare-ups of the greening did not occur, although short-term temperatures of up to 340°C (higher than the ignition temperature of wood 300°C [36]) were measured several times on the wooden cladding outside the primary flame [102], [103].

As already noted for the Vienna fire tests, the test conditions must also be taken into account when directly transferring the results from the two studies (following DIN 4102-20) mentioned before to reality.

For the realisation of a storey-by-storey green façade on a high-rise building, the fire spread over the façade had to be investigated by conducting full-scale fire tests [106]. In this high-rise building, fire spread from storey to storey is prevented by 1.60 m horizontal concrete projections at ceiling level. On these projections, plant boxes with climbing plants are arranged in

each storey. The plants are located directly at the front end of the projection (distance approx. 10–20 cm). For the investigation, a real fire test scenario was designed consisting of a three-storey test structure and a fire load of 140 kg (4 x 35 kg) wooden cribs. The choice of fire load quantity and arrangement was made for realistic exposure [107]. During the fire test, the climbing plants on the two floors above the fire level did not ignite. There was no fire spread above the storey boundary. Figure PV. 7 shows the test setup and the maximum temperatures measured in the axis of the green façade. Unfortunately, the results cannot be presented in more detail due to the confidentiality agreement within the scope of the industrial contract [106].

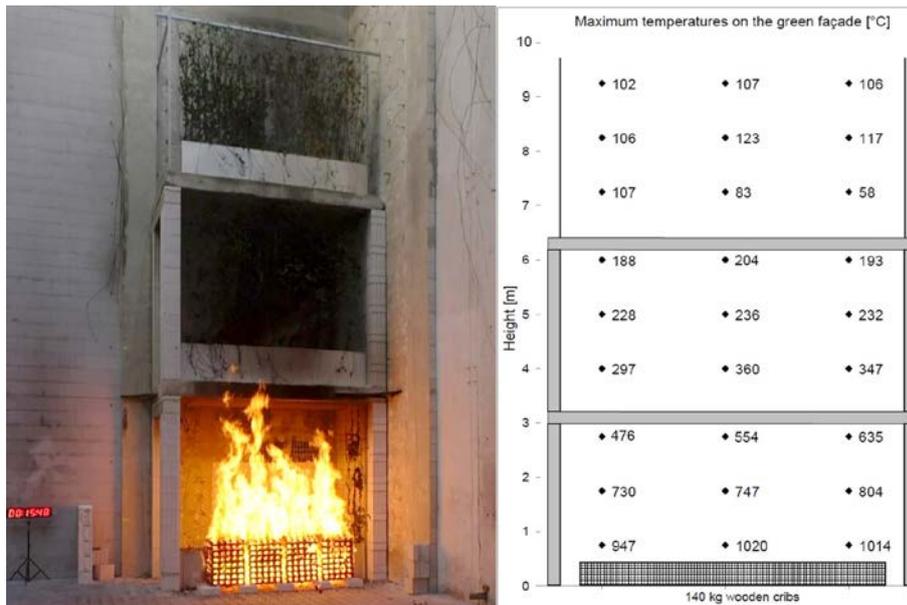


Figure PV. 7 Picture and maximum temperatures in the axis of the green façade during a full-scale fire test with climbing plants and boxes on each floor for a high-rise design

3 FireSafeGreen research project - Single Burning Item (SBI) test series

3.1 Aim of the study

The overall aim of the project FireSafeGreen is to extend the knowledge about the behaviour of green façades when exposed to fire and its influence to flame spread on façades. Further the project aims to identify constructive measures and general principles under which it is possible to use green façades in a product neutral and fire safe manner. The project includes a multi-pronged investigation strategy with tests about the fire behaviour of plants in Single Burning Item (SBI) tests and full-scale façade fire tests. This publication only describes the findings of the SBI fire tests.

With regard to sections 1.2, 2.3 and Table PV. 5 of the Appendix, living walls (types 4 and 5 in Figure PV. 1) are not considered in the following investigation, because living walls represent an integral producer specific system with a rear-ventilated void cavity, supporting structure, cladding panels, substrate, fleece, irrigation system and the plant itself. The systems differ significantly between the manufacturers. The shrubs and herbs (pure plant mass) typically used for such systems only play a minor role with respect to the entire fuel load of the system. A product-neutral analysis is therefore not possible and living walls can therefore only be meaningfully investigated in large-scale tests on the respective complete system.

The focus of the following study is on climbing plants on non combustible trellises and climbing aids (types 1 and 2 in Figure PV. 1).

The first series of tests within the research project FireSafeGreen was to provide information on the fire behaviour of the plants/plant systems used for green façade systems. The following questions were investigated in more detail:

- Do the plants self-extinguish after the primary fire has stopped?
- What heat release occurs through the plants?
- What influence does the plant species have on fire behaviour?
- To what extent does vertical or horizontal fire spread occur?
- What influence does the presence of essential oils have on fire behaviour?
- What role does the age of the plants play in relation to fire behaviour?
- What role does the moisture content of the plant play in relation to the fire behaviour?

Ultimately, the above questions must always be viewed in the context of the large-scale end application. Due to the large number of potentially possible plant species for use as façade greening, a comparison is made with regard to the aforementioned questions using the European SBI test procedure. This is followed by further full-scale fire tests.

As described before, the focus of this study was on climbing plants. The shrubs and herbs commonly used for living walls also represent a comparable plant mass. For this reason, some of these plants were also investigated in this series of tests but were not the primary focus.

It is important to note that in most industrialised countries, such as in the European Union [108], only manufactured products are construction products in the legal sense. This also applies to the building codes of the member states [87]. After taking this classification into account, it can be stated that the trellises and climbing aids of green façades and living walls are considered construction products. The plants of the green façade, as a non-manufactured product, cannot be classified without doubt as a construction product. Standardised fire tests, which are used to classify building products, are therefore only to be valued as an orientation. However, it is clear that the basic protection goal of limiting the fire spread along the façade is also still relevant here.

3.2 Test setup

The test was carried out according to the SBI (Single Burning Item) method and complied with EN 13823 [80]. The test specimen in the form of plants consisted of one side with an area of 1 m x 1.5 m and one side with an area of 0.5 m x 1.5 m (w x h), as shown in Figure PV. 8.

It is known from previous studies [17], [21], [109] that the specimen size has an impact on flammability. It makes a difference whether plant parts or whole plants are used. In small-scale fire tests, it is mainly the flammability of the plant parts that is investigated, and in larger-scale tests, it is more the flammability of the whole plant [17], [21], [109]. In addition, the aim of the study was to investigate influences on the plant's flammability in the context of a large-scale arrangement on a façade. As described in section 3.1, the focus was on comparative analysis of different plants with respect to its heat release and flame spread and quantifying the influence of the plants within the SBI fire test scenario but not on the exact quantification of the flammability for building products. These results will be used in the further progress of the research project to design full-scale façade fire tests with green façades. For this reason, the SBI test [80] was chosen to investigate the flammability of plants for green façades. In this medium-scale test method, whole areas of plants and not just plant parts can be investigated. Therefore, the results can be used to make conclusions about the behaviour of the entire plant and not just parts of it. The arrangement of the test specimen on the test stand with its 1.5 m high vertical surfaces in an inner corner also corresponds to the real situation on a façade. The exposure scenario of the gas burner as a base fire is also similar to the principle of a façade fire.

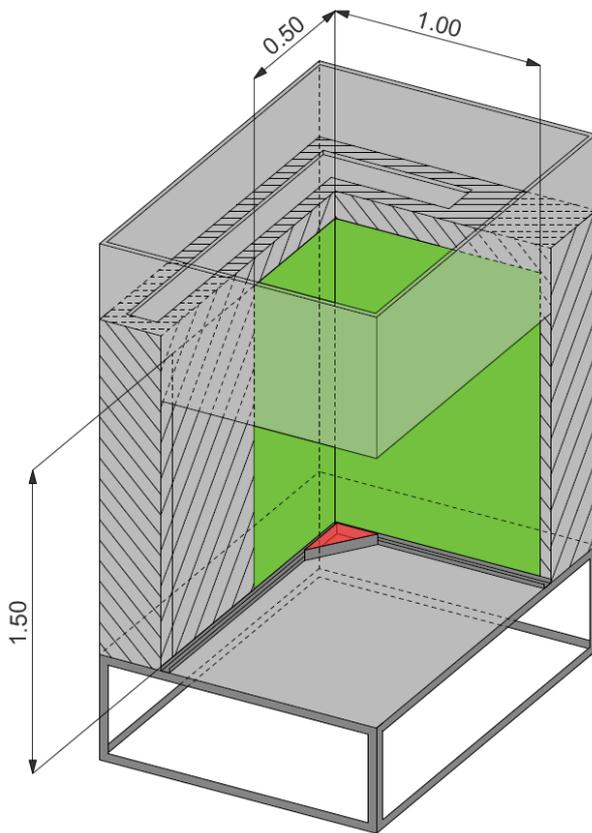


Figure PV. 8 Illustration of the SBI test stand and the plant specimen area (green)

All tests were carried out with fresh plants, which were cut off from their roots directly in advance.

Trellises with a mesh size of 25 cm were used to fix the plants. These relatively large mesh sizes are common in practice for climbing plants and are intended to allow the foliage to fall seasonally. The exact arrangement can be seen in the videos in the supplementary material.

In consultation with research partners from science and practice, twenty climbing plants and five plants for living walls that are frequently used in Central Europe were identified, as shown in Table PV. 3.

All plants listed in Table PV. 3 were at least three years old. Considering the aspects of Section 1.3 and the fact that older plants usually have more woody shoots, it should represent typical realistic boundary conditions. In order to allow a comparison between young and old plants, additional plants (< one year) were used, such as *Hedera helix*. In this case, the descriptions “old” and “young” were added.

The plant mass used in the test specimen is also given in Table PV. 3. Particular care was taken to arrange the plants densely over the entire area. In order to investigate the influence of plant vegetation density, some tests were carried out with a lower plant vegetation density. In this case, the tests are marked with (1) for low and (2) for normal density. “Normal vegetation density” corresponds to the usual arrangement of maintained plants on a façade. Due to the plant species, which goes hand in hand with the mass and size of the woody shoots, leaf size

and density, flowers and fruits, different masses result even with visually equally intensive planting density. The basic growth behaviour taken from the literature is shown in Table PV. 8 in the Appendix.

In order to investigate the influence of a reduction of the moisture content close to reality, two plants were cut off from the roots and stored at ambient temperature for 42 days before the test was carried out. The aim of this test was to show the influence of direct damage to a plant in the root area, including the drying out of the plants.

To investigate the possible seasonal influence on the fire behaviour of the plants, in addition to the tests in summer (fully grown plants), tests were also carried out in winter. These five tests are marked in Table PV. 3 with the note “winter”. It should be noted that the *Hedera helix*, *Euonymus fortunei*, *Jasminum nudiflorum* and *Lonicera henryi* tested in winter were each taken from the same plant. Except for *Actinidia deliciosa*, the tests were conducted with the same plant mass as the previous summer tests. *Jasminum nudiflorum* was flowering in winter at the time. *Actinidia deliciosa* had no foliage in winter. Therefore, according to the photo documentation, the shoots were arranged in the same position and mass as in summer. The total mass, therefore, differed from the values in summer. The focus here was on investigating a plant with foliage shedding.

In total, 43 SBI fire tests with plants as specimens were conducted. An overview of the investigated specimen is given in Table PV. 3.

3.3 Test procedure

The SBI test procedure proceeds in accordance with EN 13823 [80] and corresponds, in principle, to a calorimeter. The test and measurement procedure are described in detail in [80] and also in [110]. The SBI test is a test method for determining the reaction to fire performance of building products exposed to the thermal impact of a sand-box burner (30 kW). The details of the Sand-box-burner are given in Table PV. 2.

Table PV. 2 Details of the Sand-box-burner [80]

Details	Description
Heat release rate	30.7 ± 2,0 kW
Fuel	Propane gas with a purity grade of at least 95 %.
Control range of mass flow controller	0 g/s to 2.3 g/s ^a
<u>Accuracy of mass flow controller</u>	1 % in the range of 0.6 g/s to 2.3 g/s
<u>Case</u>	1.5 mm thick stainless-steel sheet
<u>Dimension</u>	Right-angled isosceles triangle (top view) with a leg length of 250 mm and a height of 80 mm.
<u>Structure</u>	10 mm high cavity at the bottom, above it up to a height of 60 mm a layer of gravel with a grain size of 4 mm to 8 mm and up to a height of 80 mm a top layer of sand with a grain size of 2 mm to 4 mm.

^a The propane gas flow of 2.3 g/s corresponds to a heat release of 107 kW if the lower heating value of propane is used (46 360 kJ/kg)

The test specimen is mounted on a trolley positioned in a frame under an exhaust system. The heat and smoke release rates are measured instrumentally and the physical characteristics are assessed by observation. The ignition of the auxiliary burner at the beginning is used to measure the heat and smoke release of the burner on its own. With the help of this measurement, the heat release of the burner can be subtracted from the total heat release and the results show only the heat release rate of the specimen [80]. The general procedure is briefly illustrated below, as shown in Figure 9.

- I. From $t = 0$, the measurements are recorded.
- II. At $t = 120$ s, the auxiliary burner is ignited. The time period $210 \text{ s} < t < 270 \text{ s}$ is used to measure the baseline for the heat release rate of the burner.
- III. At $t = 300$ s, the gas supply is switched to the main burner, the main burner is ignited, and the auxiliary burner is switched off.
- IV. At $t = 1\,500$ s, the automatic measurement to evaluate the fire behaviour of the specimen is stopped.
- V. At $t = 1\,560$ s, the gas supply to the burner is stopped.

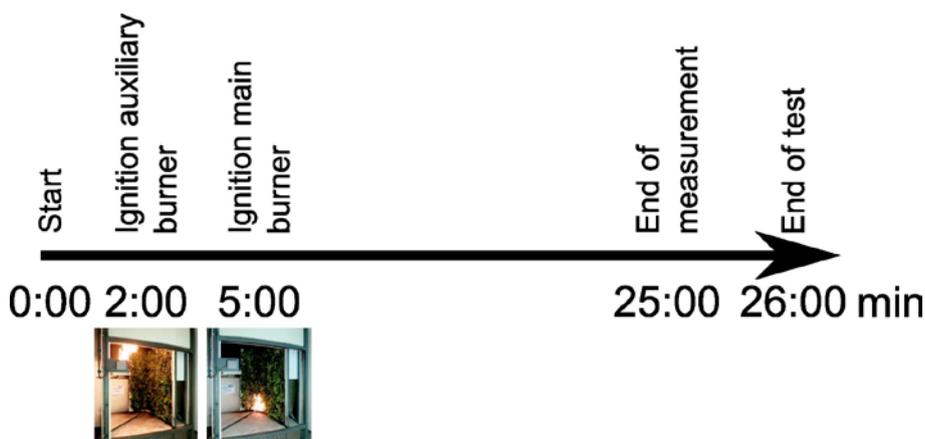


Figure PV. 9 Illustration of the SBI test procedure according to EN 13823 [80]

3.4 Instrumentation

For the SBI test method according to EN 13823 [80], the measurement data is recorded in the exhaust duct. The exhaust hood located directly above the SBI test stand introduces all fire gases into this exhaust duct. The following measuring devices are located in this exhaust duct:

- Hemispherical probe to measure the pressure difference in Pa with a measuring range of at least 0 Pa to 100 Pa and an accuracy of ± 2 Pa. [112]
- Light measurement section for measuring the light transmission in %
- Gas sampling probe for measuring the O_2 mole fraction and the CO_2 mole fraction in the exhaust gas stream in each case in the ratio of volume O_2 or volume CO_2 to volume air in %. The O_2 gas analyser is a paramagnetic type with a measuring range of at least 16 % to 21 % oxygen. The response time of the analyser is less than 12 s.

The noise and drift of the analyser is less than 100 ppm over a period of 30 min. The CO₂ analyser is an infrared type with a measuring range of at least 0 % to 10 % carbon dioxide. The analyser has a linearity of at least 1 % of the measuring range. The response time of the analyser is not more than 12 s. [80]

- Three sheath thermocouples of type K according to EN 60584-1 [111] (diameter 0.5 mm to 1 mm, insulated) on a radius of (87 ± 5) mm around the pipe axis and at a mutual angular distance of 120° for measuring the temperature in K

In addition, the data logging system records the time in s (every 3 s), the propane mass flow through the burner in mg/s and the ambient temperature at the air inlet at the bottom of the specimen carrier in K. [80]

The calibration procedure of the measurement can be taken from Annex C and Annex D of EN 13823 [80]. In the context of an SBI round robin test in 2015 – 2016 [80] with 86 tests on chipboard, a relative standard deviation of 5% for the total heat release of the first 600 s (main burner) was determined for the repeatability.

4 Results of the SBI fire tests

Table PV. 3 shows for each individual test specimen the test time, the basis weight, the moisture content and the total heat release. The heat release rates are shown in Figure PV. 10 to Figure PV. 16 for each test. The total heat release and the specimen mass (plant mass without trellis) for each of the tests are shown in Figure PV. 17.

Based on the SBI test campaign, the typical classification values according to EN 13501-1 [113] were determined for each specimen and listed informatively in Table PV. 7 in the Appendix.

Table PV. 3 Results of the FireSafeGreen SBI tests

No.	Specimen name	Test time	Basis weight [kg/m ²] ^a	Moisture content (total) ^b [%]	Moisture content (woody shoots) ^c [%]	Total heat release [MJ]
1	<i>Actinidia arguta</i>	August 2022	1.56	241	120	4,5
2	<i>Actinidia deliciosa</i>	August 2022	1.68	238	133	4,4
3	<i>Actinidia deliciosa</i> - winter	January 2023	0.82	-	144	3,1
4	<i>Akebia quinata</i>	August 2022	0.50	124	85	4
5	<i>Aristolochia macrophylla</i>	August 2022	0.47	216	135	3,5
6	<i>Campsis radicans</i>	August 2022	1.42	145	79	6,6
7	<i>Celastrus orbiculatus</i>	August 2022	0.46	188	72	3,3
8	<i>Clematis vitalba</i>	August 2022	0.74	238	33	3,2
9	<i>Euonymus fortunei</i>	August 2022	1.34	165	88	6,6
10	<i>Euonymus fortunei</i> - winter	January 2023	1.34	127	70	6
11	<i>Fallopia baldschuanica</i> (1)	August 2022	0.30	98	58	4,8
12	<i>Fallopia baldschuanica</i> (2)	August 2022	1.63	231	117	6,7
13	<i>Hedera helix</i> (old)	August 2022	1.84	220	162	5,4
14	<i>Hedera helix</i> (old) - winter	January 2023	1.84	191	136	6
15	<i>Hedera helix</i> (young)	August 2022	1.84	245	181	6,9
16	<i>Hedera helix</i> (young) - dried	October 2022	1.85/0.75 ^d	39	16	21,2
17	<i>Humulus lupulus</i>	August 2022	2.20	290	286	7,5

Climbing plants

No.	Specimen name	Test time	Basis weight [kg/m ²] ^a	Moisture content (total ^b) [%]	Moisture content (woody shoots ^c) [%]	Total heat release [MJ]
18	<i>Humulus lupulus</i> - dried	October 2022	2.20/0.98 ^d	74	13	10,5
19	<i>Hydrangea anomala</i> (1)	August 2022	0.98	156	85	4,2
20	<i>Hydrangea anomala</i> (2)	August 2022	1.65	156	88	4,8
21	<i>Jasminum nudiflorum</i>	August 2022	0.46	188	60	2,5
22	<i>Jasminum nudiflorum</i> - winter	January 2023	0.46	293	124	2,9
23	<i>Lonicera caprifolium</i>	August 2022	0.51	168	63	3,7
24	<i>Lonicera henryi</i> (1)	August 2022	0.34	228	119	2,6
25	<i>Lonicera henryi</i> - winter	January 2023	0.34	142	141	4,3
26	<i>Lonicera henryi</i> (2)	August 2022	1.42	228	150	6,4
27	<i>Parthenocissus quinquefolia</i> (1)	August 2022	0.64	138	140	3,7
28	<i>Parthenocissus quinquefolia</i> (2)	August 2022	2.00	138	144	4,1
29	<i>Parthenocissus tricuspidata</i> (1)	August 2022	0.90	228	-	4,1
30	<i>Parthenocissus tricuspidata</i> (2)	August 2022	1.69	228	230	6,2
31	<i>Rosa</i> (rambler)	August 2022	0.33	128	113	1,6
32	<i>Vitis coignetiae</i>	August 2022	1.53	247	252	4,2
33	<i>Vitis vinifera</i> (1)	August 2022	0.47	298	171	2,9
34	<i>Vitis vinifera</i> (2)	August 2022	2.41	298	292	3,5
35	<i>Wisteria sinensis</i>	August 2022	2.89	248	108	12,4

Climbing plants

No.	Specimen name	Test time	Basis weight [kg/m ²] ^a	Moisture content (total) ^b [%]	Moisture content (woody shoots ^c) [%]	Total heat release [MJ]
36	<i>Bergenia cordifolia</i>	August 2022	1.52	260	761	4
37	<i>Carex morrowii</i>	August 2022	1.71	256	-	5,5
38	<i>Geranium macrorrhizum</i>	August 2022	1.08	206	176	2,5
39	<i>Lavandula angustifolia</i>	August 2022	1.08	118	145	5,3
40	<i>Lonicera nitida</i>	October 2022	1.03	151	91	4,4

Living wall plants

^a Mean value from basis weight small and large side

^b Foliage and woody shoots, mostly mean value from three specimens²

^c Determination on a cut wood shoot (approx. 15 cm long)

^d 1st value vital, 2nd value dried

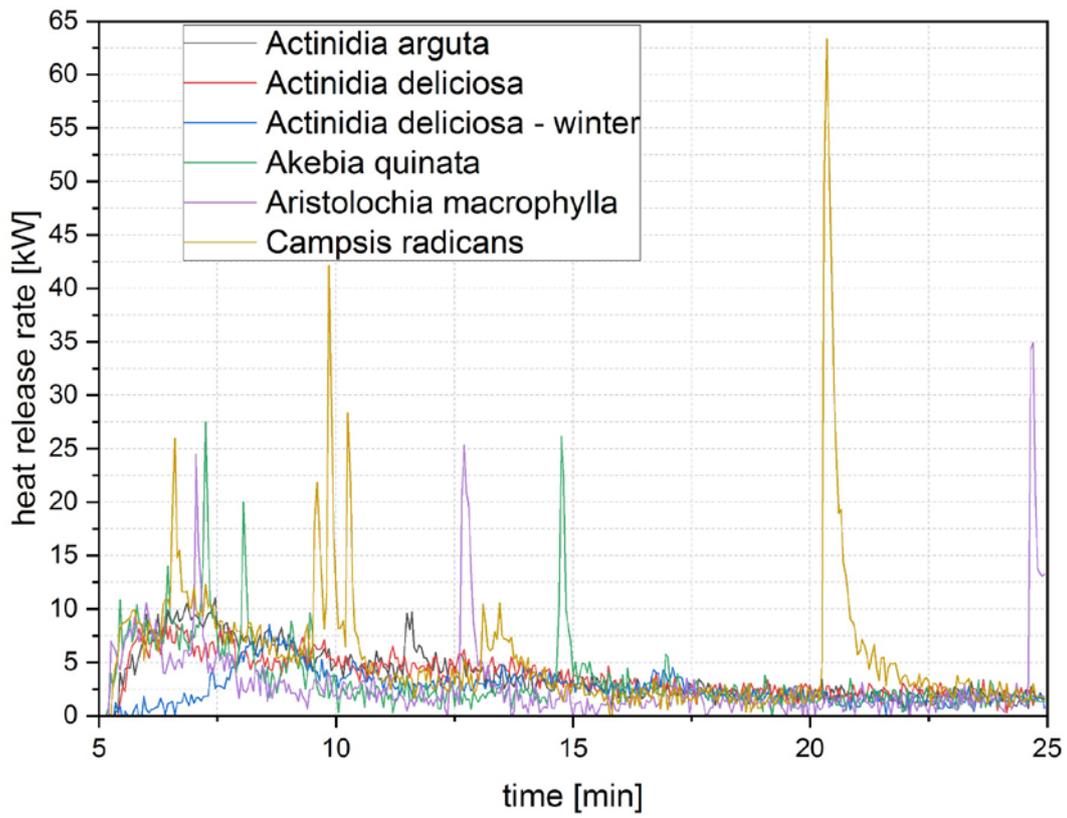


Figure PV. 10 Heat release rate for Actinidia arguta to Campsis radicans (colour figure online)

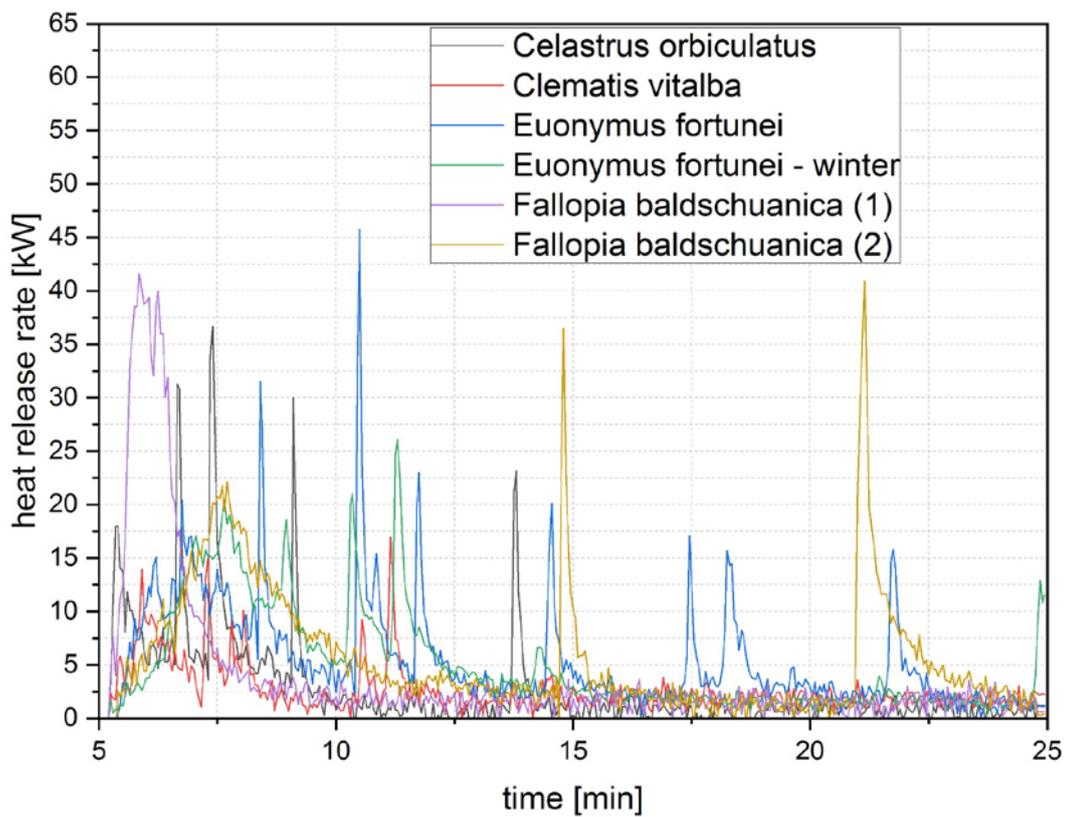


Figure PV. 11 Heat release rate Celastrus orbiculatus to Fallopia baldschuanica (colour figure online)

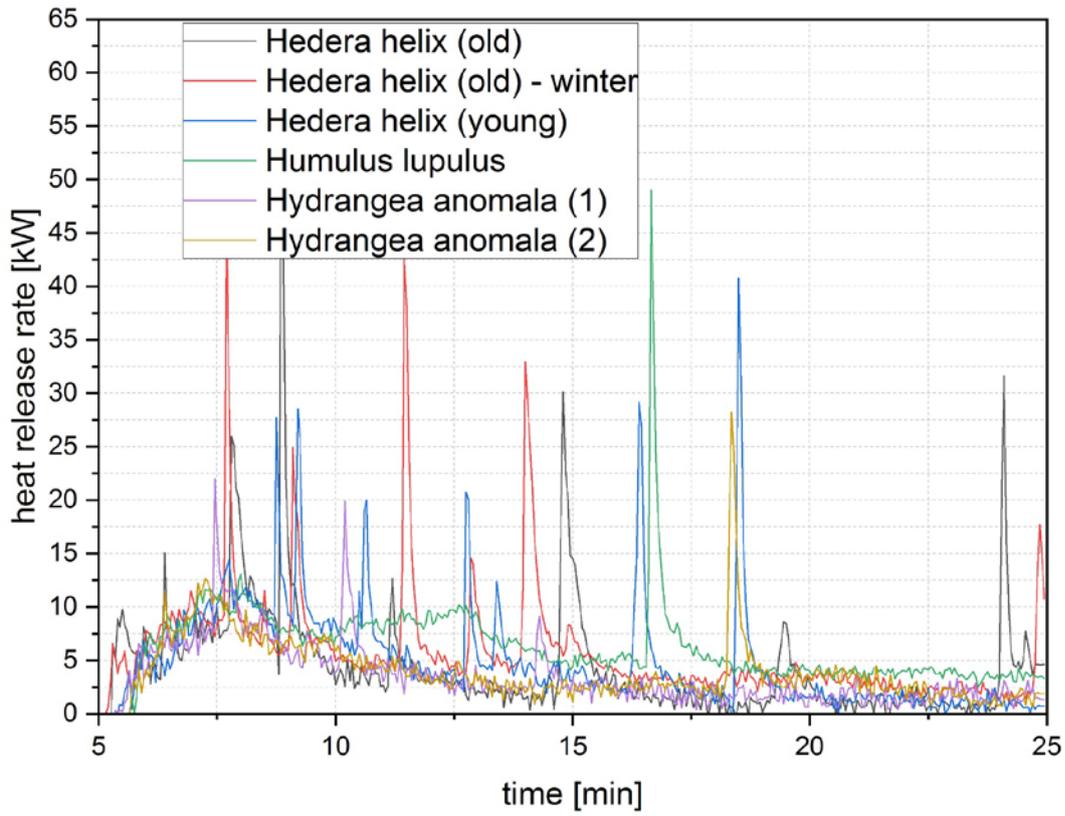


Figure PV. 12 Heat release rate for Hedera helix to Hydrangea anomala (colour figure online)

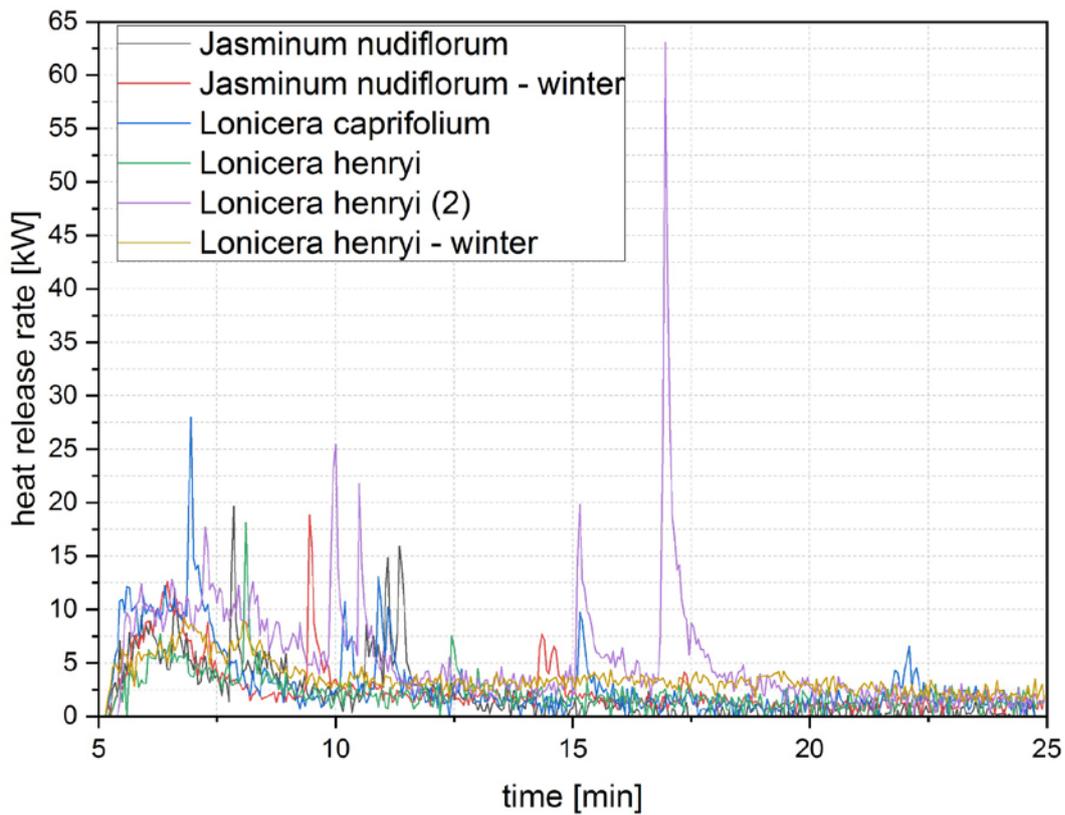


Figure PV. 13 Heat release rate for Jasminum nudiflorum to Lonicera henryi (colour figure online)

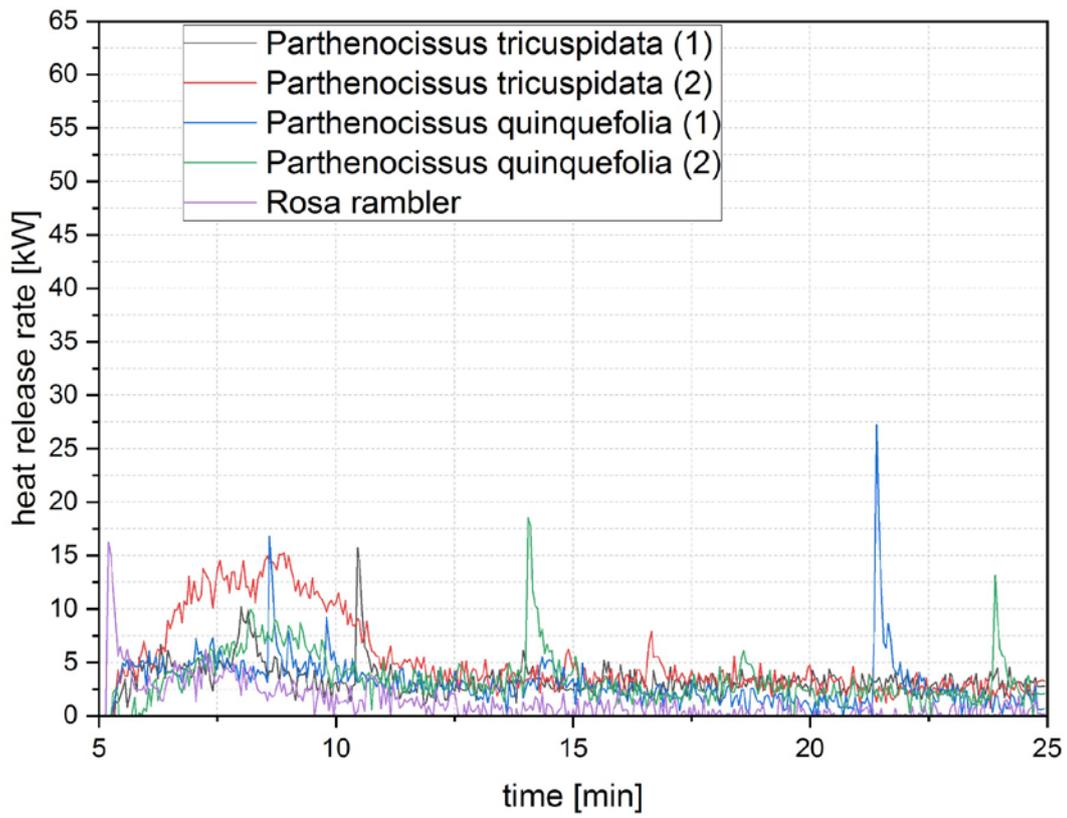


Figure PV. 14 Heat release rate for Parthenocissus tricuspidata to Rosa rambler (colour figure online)

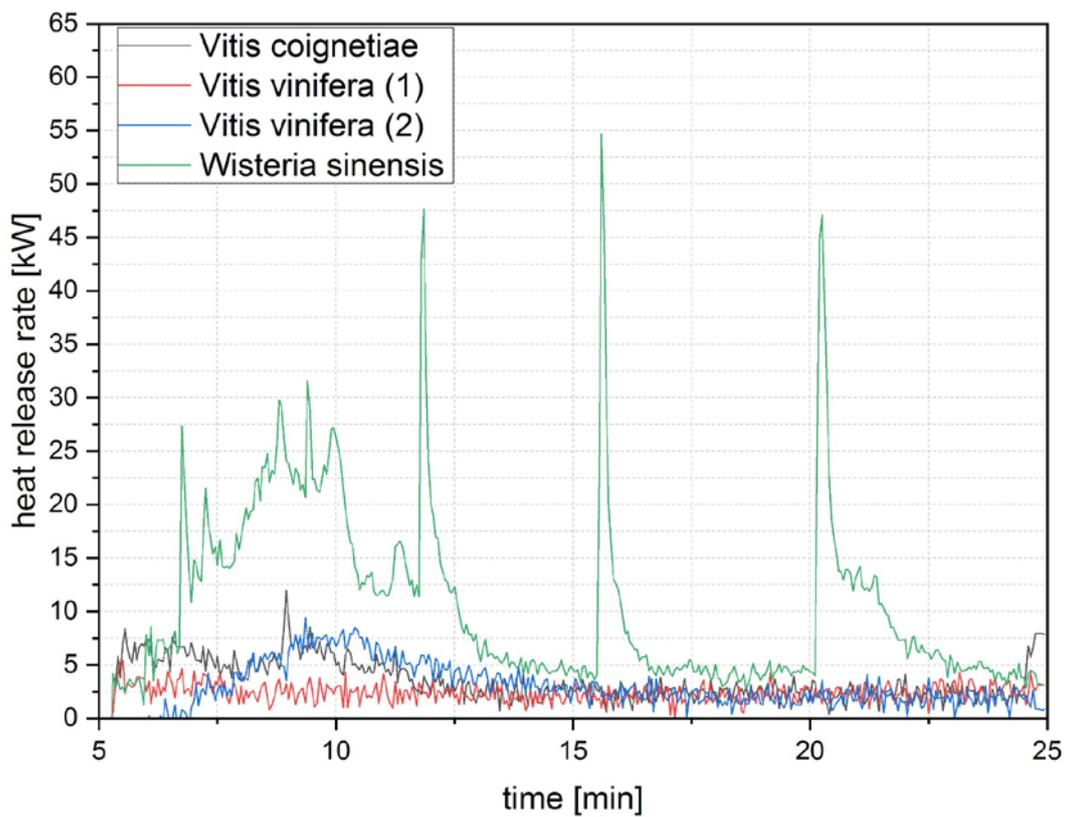


Figure PV. 15 Heat release rate for Vitis coignetiae to Wisteria sinensis (colour figure online)

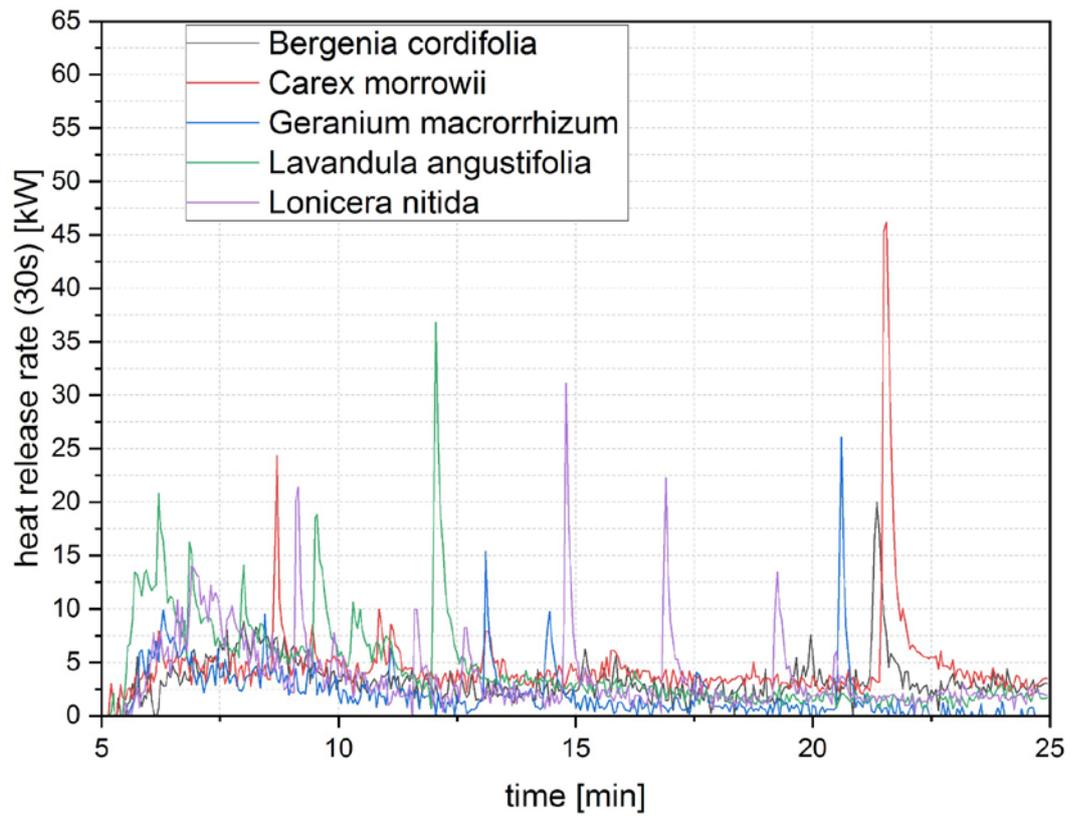


Figure PV. 16 Heat release rate for Bergenia cordifolia to Lonicera nitida (colour figure online)

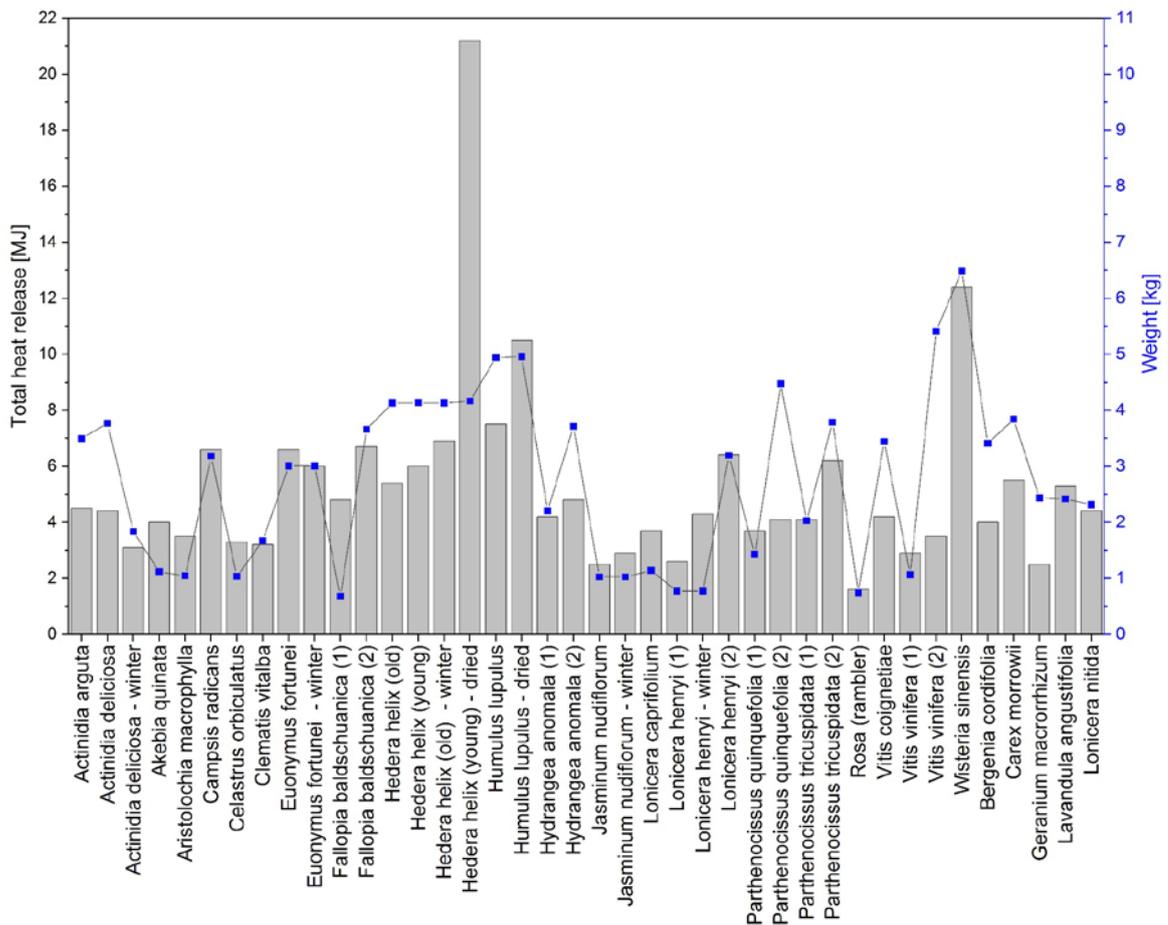


Figure PV. 17 Illustration of total heat release and specimen mass (plant mass without trellis)

Figure PV. 18 shows the burnt, withered and still vital areas of the test specimens after the SBI tests. For this purpose, the condition of the plants was visually recorded and documented on the test stand after each test. Vital or withered plant parts were determined by their appearance and by their behaviour while being touched (moist and elastic). Outside the primary flame, the plants were vital in all tests except *Fallopia baldschuanica* (No. 11 according to Table PV. 3), *Hedera helix* (young) - dried (No. 16) and *Humulus lupulus* - dried (No. 18). In the case of *Fallopia baldschuanica*, as shown in Table PV. 3, the plants already had a low moisture content before the start of the test and were withered. In both dried tests, on the other hand, burning occurred over almost the entire test stand area.

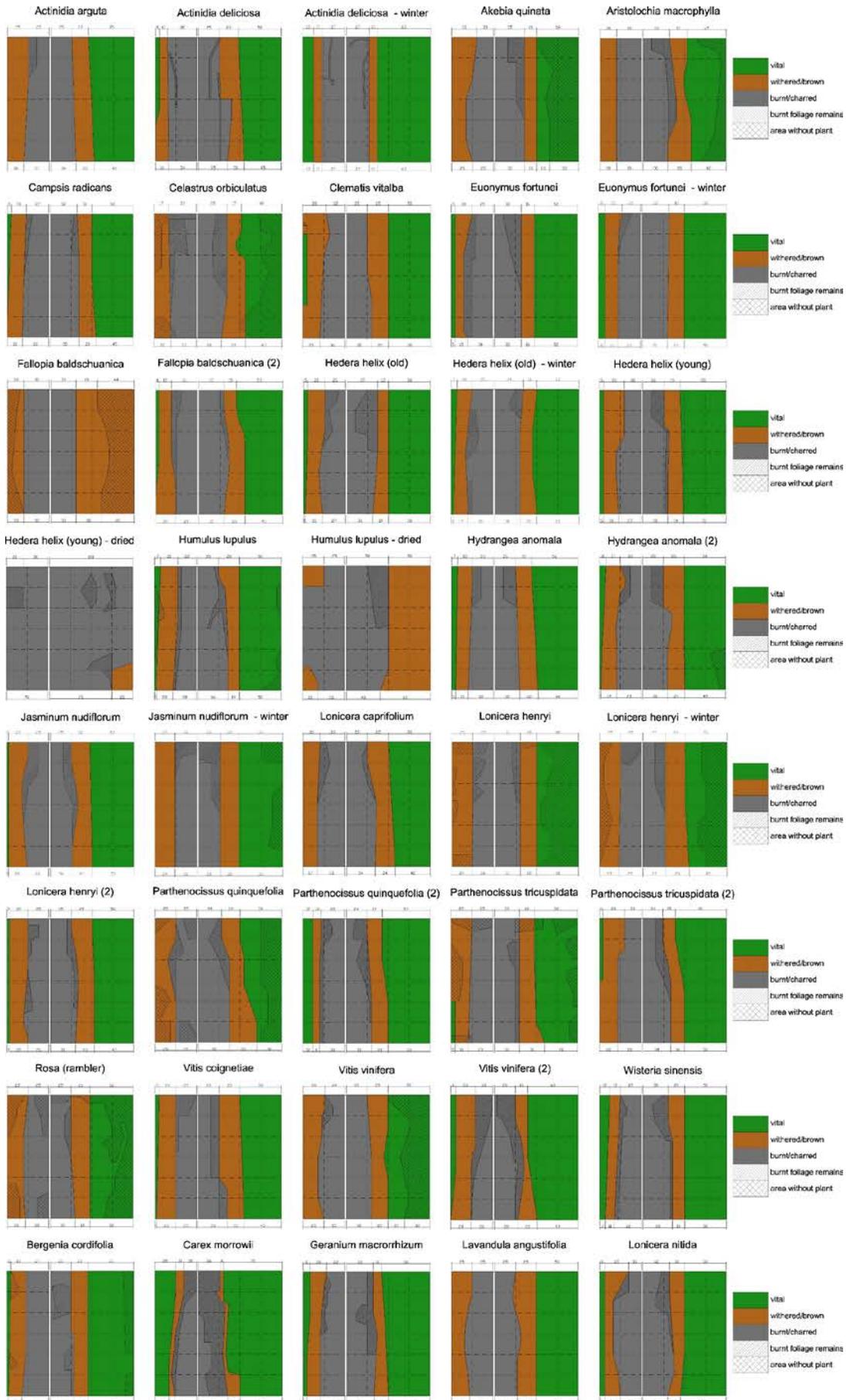


Figure PV. 18 Visualisation of the burnt or dried areas after the SBI tests, based on [114]

5 Discussion

5.1 General

As shown in section 2, other studies followed the approach that the plant is responsible for the fire behaviour on the façade, among other things. The aim of this study was to develop initial tendencies for the influence of the plants on the façade fire.

Due to the number and general parameters of these tests (43 SBI tests with different parameters, e.g. plant species, old vs. young, vital vs. dried and different densities), there is no claim to a completely statistically correct survey for the final assessment of the flammability of plants for green façades. The scope of this study in terms of the number of specimens examined is significantly smaller than some studies on wildland fire research, as shown in Section 1.4. The focus of the project FireSafeGreen is on fire behaviour of large-scale green façades, as shown in section 3.1 and 3.2. For this reason, the larger test specimen (SBI test) was chosen in comparison to the investigations in Section 1.4. The question of whether there are clear tendencies for different fire behaviour of the plants in a façade fire with corresponding high fire exposure (compartment, balcony or waste container fires) is the focus here. The question is not exactly how pronounced these influences are, but rather what influence they might have in the case of a large-scale arrangement on a façade. The results will be used in the further course of the research project for the design of full-scale fire tests with green façades. In the case of component tests, such as for a façade, it is common in fire research to generate results from single tests with regard to costs and effort [115]. The extent to which this procedure also applies to green façades needs to be investigated further.

To analyse the statistical variation, replicate tests were carried out for one plant species. Table PV. 4 shows for the *Hedera helix* (old) replicate specimens the constant basis weight, the moisture content and the total heat release in the SBI tests. The heat release rates are shown in Figure PV. 19 for the replicate tests.

Table PV. 4 Results of the replicate SBI-tests

No.	Specimen name	Basis weight [kg/m ²]	Moisture content (total) [%]	Total heat release [MJ]
13	<i>Hedera helix</i> (old)	1.84	220	5.4
14	<i>Hedera helix</i> (old) - winter	1.84	191	6
41	<i>Hedera helix</i> (old) (2)	1.84	205	6.1
42	<i>Hedera helix</i> (old) (3)	1.84	205	6.6
43	<i>Hedera helix</i> (old) (4)	1.84	205	6

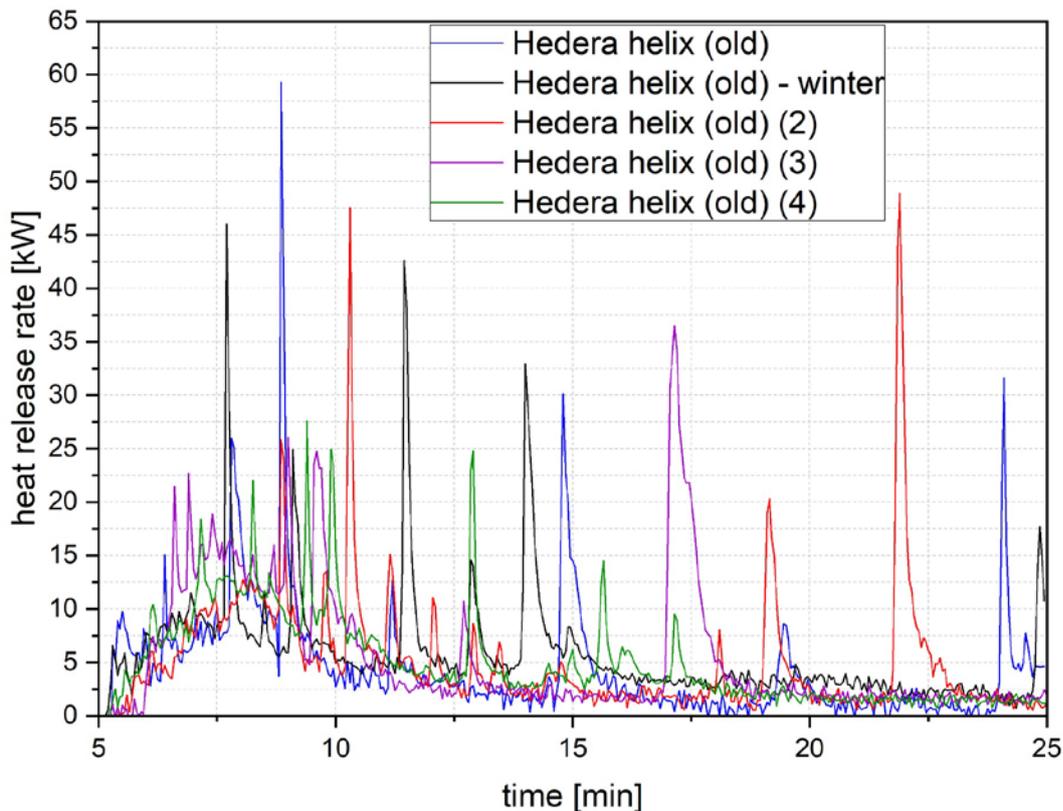


Figure PV. 19 Heat release rate for Hedera helix (old) replicate specimens

The replicate tests show a total heat release of 5.4 to 6.6 MJ with a sample standard deviation of 0.43. The heat release of the specimen over time is similar. The flare-ups of the individual specimens are comparable in terms of quantity and magnitude. Based on this sample of replicate tests, a low variance is predicted for tests of the same type.

A comparison of the heat release rates of Figure PV. 10 to Figure PV. 16 of all tests shows quite similar results for all vital plants (normal moisture content). The short peaks of the heat release rate in each case represent the “flare-ups” already explained in Section 2.3. This always happens when parts of the plants dry out due to the effect of the flame of the main burner, followed by the ignition and burning of these areas. In this test series, the flare-ups ranged from 10 to 60 kW (mean value 20 kW) difference to the heat release rate baseline, for a duration of 10 to 50 s (mean value 20 s) each. The size of these flare-ups and, consequently, the heat release rate that occurs are directly dependent on the plant mass, density and the composition of leaf size and quantity (section 1.4). The more foliage mass exists (size and proportion in relation to wood shoots), the more it will dry out and lead to abrupt flare-ups. This can be seen, for example, in Figure PV. 13. If comparing the two tests on *Lonicera henryi* (No. 24 and 26 according to Table PV. 3), in which the plant mass was increased more than four times between test No. 24 and 26, there is only doubling of the heat release rate, but remarkably more visible flare-ups. The reason for this is that dried foliage, fruits and flowers lead to flare-ups due to their low mass and large surface area, while woody shoots burn off at a relatively constant rate. [116] shows for vegetation fires (in this case: chaparral) that live branches up to 1.3 cm can be burnt in the high-intensity flame front, while fuels with larger diameters normally

do not burn. This underlines the fact that the foliage itself is in the focus of the combustion. The comparison of both tests (No. 11 and 12) with *Fallopia baldschuanica* and (No. 19 and 20) with *Hydrangea anomala* shows that more plant mass does not necessarily lead to a higher heat release rate. As shown in section 1.4, in addition to mass, a number of other factors, such as leaf arrangement and the distance between the leaves, are responsible for fire spread in the living plant fuel.

5.2 Role of plant species

Considering the average course of the heat release rate and most of the flare-ups, it can be seen that for vital plants, the influence of the plant species and other resulting factors such as the existence of essential oils, growth behaviour, foliage size, etc., play a subordinate role.

There are differences for vital plants in terms of the heat release rate in one of the two tests with *Fallopia baldschuanica* at the beginning (Figure PV. 11), with *Campsis radicans* in terms of the relatively large flare-up (Figure PV. 10) and with *Wisteria sinensis* in terms of the overall course compared to the other plants (Figure PV. 15).

The difference for *Fallopia baldschuanica* (No. 11 according to Table PV. 3) can be explained as follows. Since the tests were carried out with plants that were several years old, in the case of test No. 11, according to Table PV. 3, a very woody test specimen was taken from the experimental gardens of the Weihenstephan-Triesdorf University of Applied Sciences. The test specimen consisted almost exclusively of relatively dry woody shoots with only very little foliage. This is also evident when considering the moisture content in Table PV. 3. These relatively dry woody shoots burned quite quickly at the beginning in the area of the flame of the main burner. This explains the increased heat release rate at the beginning. Since this test is not representative of a green façade in this form, another test (No. 12 according to Table PV. 3) was carried out with a plant that is also several years old but with six and a half times as much mass and with full foliage growth. In this representative test, there are no substantial differences compared to the other plants in the context of a large-scale arrangement of plants on a façade.

The particular behaviour of *Campsis radicans* (No. 6 according to Table PV. 3) regarding the relatively large heat release peak at the 20th minute is due to two reasons. *Campsis radicans* usually has 9–11 elliptically arranged leaves (each approx. 3–6 cm) on one stalked leaf [117]. The large number of relatively small leaves and the high plant density in the test favoured the drying out of the foliage. In addition, the plant had flowers at the time of the test. These flowers (approx. 4–12 in clusters), which typically appear in July to September [117], provide further fast-drying material. In the test, a several-centimetre wide strip next to the primary flame on the large side of the test stand burned abruptly as a “flare-up” over the total height at the 20th minute. Due to the above-mentioned points, the heat release rate was proportionally higher here. However, it should be noted that in other tests, several flare-ups occurred at shorter intervals. A comparison of these peaks from Figure PV. 10 to Figure PV. 16 shows that, in total, they corresponded to or even exceeded the peak heat release mentioned here.

The difference for *Wisteria sinensis* (No. 35 according to Table PV. 3) in relation to the overall course in comparison to the other plants can be explained by the higher mass, as shown in

Table PV. 3. The remarkably higher mass can be explained by several circumstances. Since a large amount of material was available, the mass proportion was increased here to investigate the influence on the heat release rate. However, an intensive but realistic plant density was chosen. Due to the small leaf size and the flowering time, a relatively large mass of plant material results in intensive vegetation. *Wisteria sinensis* usually has 7–12 ovate-elliptic arranged leaves (each approx. 5–8 cm) on one stalked leaf [117]. Towards the end of July, about 10 cm long seed pods develop from the 10–30 cm long flowers of *Wisteria sinensis*. Inside the pods are seeds with a high protein content (lectins). The pods usually open in the following spring and distribute the seeds [117]. During the SBI tests, both flowers and seed pods were found on the *Wisteria sinensis*. This is also obvious from the relatively high mass weight. The increased heat release rate can be explained by the burning of the dried flowers and seed pods.

5.3 Vital, maintained plants

In general, it can be stated that in all tests with vital, maintained plants, horizontal fire spread only occurred to a very small extent due to the flaming up of smaller dried-out parts that were directly next to the primary flame, as shown in Figure PV. 18. Consequently, significant horizontal fire spread is not to be expected in the case of vital, well-maintained plants in the context of a large-scale arrangement of plants on a façade.

All vital, maintained plants self-extinguished after the flame of the main burner was stopped. No further burning occurred during the observation period after the test.

5.4 Comparison young vs. old plants

In the direct comparison of young and old plants, the basic findings from Section 1.4 were confirmed. While the older plants, which have a higher content of woody shoots, had a slightly higher heat release rate at the beginning, more flare-ups occurred for young plants in the process of the test. This can be explained by the larger amount of smaller leaves that dries out and burns off during the test, as shown in Figure PV. 20.

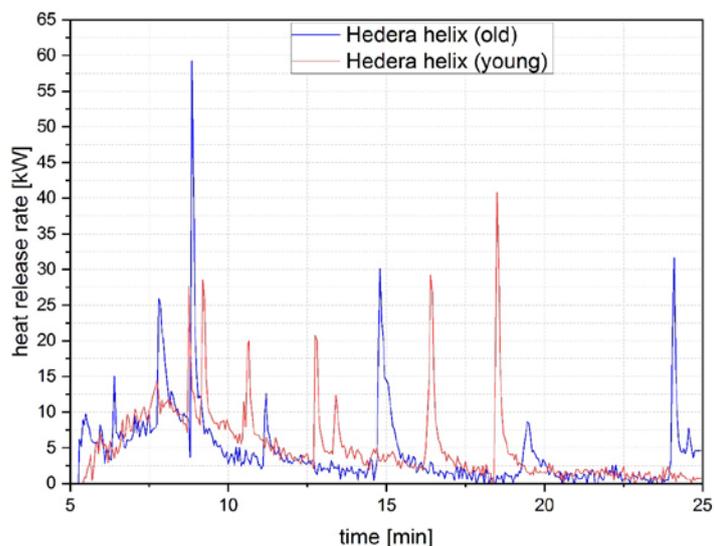


Figure PV. 20 Comparison of the heat release rate of young and old *Hedera helix*

5.5 Role of seasonal influences

Another question was whether the seasonal influence of the plants had an effect on the fire behaviour in the context of a large-scale arrangement of plants on a façade. As shown in Figure PV. 21 and Figure PV. 22, a comparable trend was observed for the heat release rate. The tests carried out in winter with *Euonymus fortunei*, *Hedera helix*, *Jasminum nudiflorum*, and *Lonicera henryi* were slightly higher at the beginning than the values of the specimens from the same plants in summer. For *Actinidia deliciosa*, it must be taken into account that the plant had no foliage in winter, and therefore less material was present in the test. Here, the focus was on investigating the woody shoots. All in all, no substantial difference can be predicted in the context of a large-scale arrangement of plants on a façade with regard to the seasonal influence.

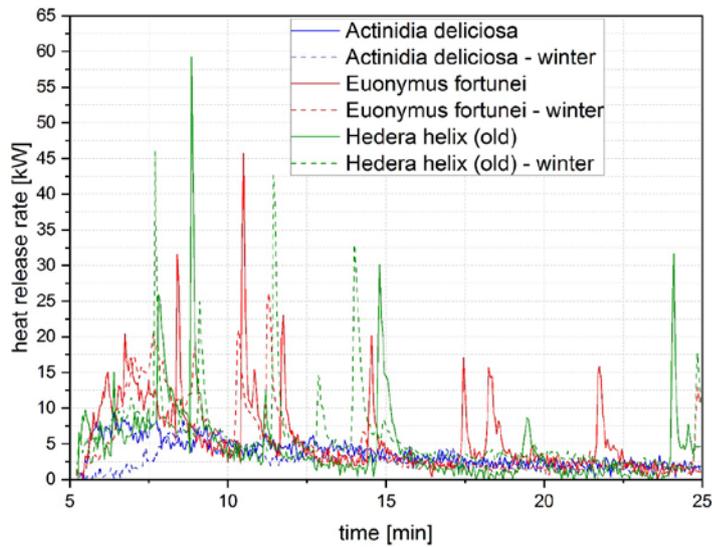


Figure PV. 21 Comparison of the heat release rate of tests in summer and winter for Actinidia deliciosa and Hedera helix

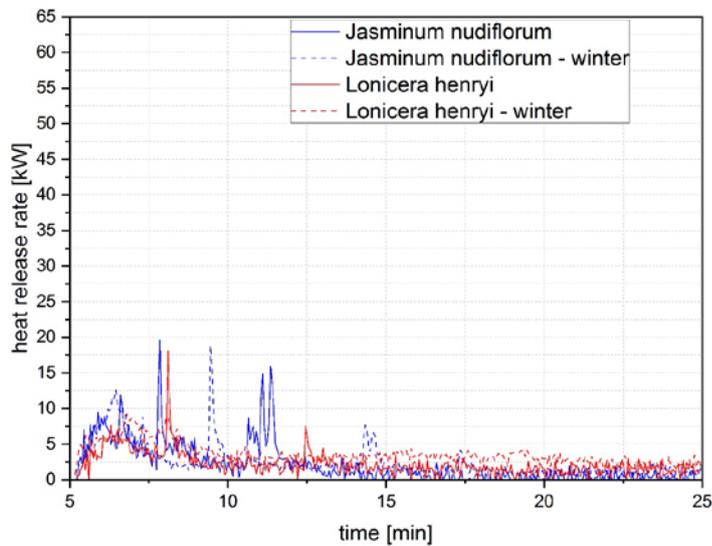


Figure PV. 22 Comparison of the heat release rate of tests in summer and winter for Jasminum nudiflorum and Lonicera henryi

5.6 Dried plants

A meaningful difference was found for the dried specimens. The specimens were dried for 42 days at ambient temperature and had a moisture content of 39 % for young *Hedera helix* and 74 % for *Humulus lupulus*. The difference in moisture content can be explained by the fact that young *Hedera helix* with small leaves dries significantly faster than *Humulus lupulus*, which also had a large number of hop cones. Overall, as shown in Figure PV. 23 and Figure PV. 24, there is a clear difference in the heat release rate. This is also evident from Figure PV. 17 and the total heat release.

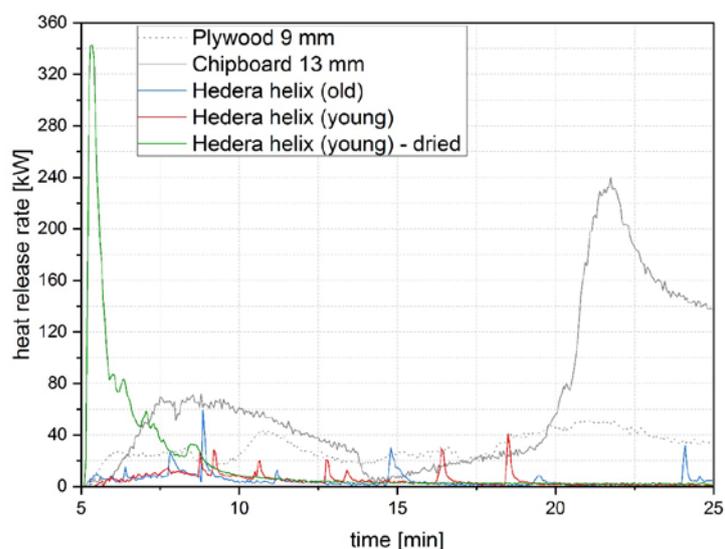


Figure PV. 23 Heat release rate of a 42-day-dried, a vital young and a vital old *Hedera helix* compared to chipboard and plywood

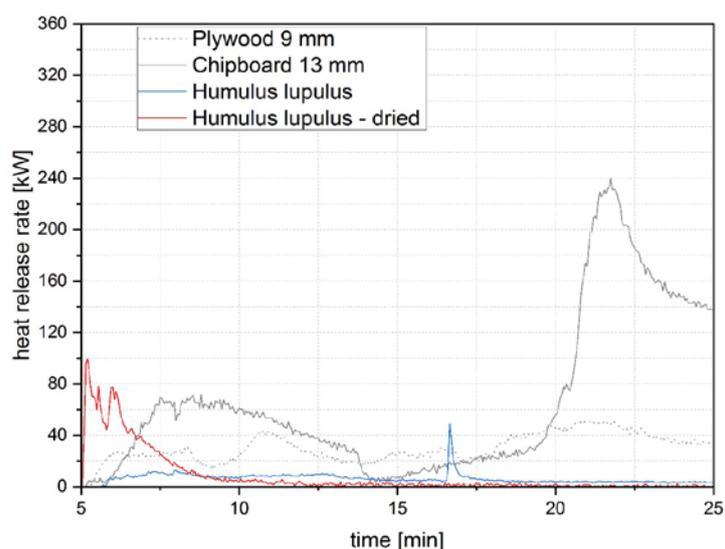


Figure PV. 24 Heat release rate of a 42-day-dried and a vital *Humulus lupulus* compared to chipboard and plywood

The dried specimens, which are supposed to represent both dead plants and unmaintained plants with percentages of deadwood, show an abrupt heat release at the beginning in both cases. In the case of the dried *Hedera helix*, the entire test specimen burned within the first five minutes. In the case of *Humulus lupulus*, a large part burned. In both cases, unlike the vital specimens, there was rapid horizontal fire spread.

Comparing the heat release rate with those of a 13 mm chipboard and a 9 mm plywood board (SBI tests [80]) shows that the heat release peak of *Hedera helix*, in particular, exceeds that of the two above-mentioned construction products. However, it is important to note that the heat release of dry plants occurs abruptly over a few minutes. Consequently, there is no continuous heat release over the test period. This finding is substantial for further investigations in

the context of a large-scale arrangement of plants on a façade, as the duration of a heat flow is critical for a possible ignition.

It is known from investigations that a heat flow five times higher is necessary for the ignition of wood, for example, when the impact occurs over a few minutes and not constant over a longer period of time [118]. It is also known that short-term fire exposure to modern multi-pane glazing does not usually cause all window panes to break [119]. The resulting question that needs to be investigated further is: How critical are short fire impacts from a green façade (including the scenario that a maintained plant with a small amount of deadwood becomes damaged and dried out) for an exterior wall, for the glazing or an open window and what role do they consequently play for fire spread along the exterior wall and into the building? It should be noted that climbing aids and trellises for green façades are usually at a distance of 8–20 cm from the outer wall, and consequently, fire spread does not occur directly along the outer wall [12].

Comparing the heat release rate of vital plants with those of chipboard or plywood, as shown in Figure PV. 23 and Figure PV. 24, it can be seen that vital plants provide a relatively low heat release rate even at high planting intensities.

5.7 Role of essential oils

The presence of essential oils in the respective plants was investigated in a literature search and is shown in Table PV. 8 in the Appendix. It should be noted that this list does not claim to be exhaustive. With regard to the heat release rate, no substantial influence due to essential oils can be identified. This becomes particularly clear when considering the plants *Humulus lupulus* and *Lavandula angustifolia*, which have a pronounced content of essential oils [120] but no substantial differences in heat release. However, when considering the smoke emission (SMOGRA value from Table PV. 7 in the Appendix), it becomes obvious that the plants with essential oils contribute to more intensive smoke emission. With regard to external burning on the façade, this only plays a subordinate role.

6 Conclusion

In summary, only a little research is available internationally on the fire behaviour of green façades. Basically, green façades can be independently growing climbing plants on the outer wall or on climbing aids or trellises, or full wall-based systems, so-called living walls.

Living walls are complex systems with a rear-ventilated void cavity, supporting structure, façade panels, substrate, fleece, irrigation system and the plants themselves. The systems differ significantly from one manufacturer to the next. Various manufacturers currently have initial findings from medium-scale fire tests on their living walls. However, some of these tests were not carried out with the entire system. From the authors' point of view, these manufacturer-specific systems can only be meaningfully investigated for fire-safe use by means of large-scale tests on the entire respective system.

For this reason, the focus of the tests described here to determine the heat release of green façades was on climbing plants with climbing aids or trellises. The aim of the study was to investigate influences on the plant's flammability as basis for a future large-scale arrangement

on a façade. The focus was on quantifying the influence of the plants in relation to the fire spread on a façade and not on the exact quantification of the flammability.

The main factor influencing the fire behaviour of plants is the moisture content. A comparison of the heat release rate of vital plants (normal moisture content) shows similar behaviour with a baseline of about 5 kW for these tests. In the course of the exposure, short peaks of the heat release rate occur. These peaks are “flare-ups” that occur when parts of the plants dry out due to the effect of the flame and then ignite and burn. The plant species itself has no substantial influence on fire behaviour. It was determined that in all tests with vital, maintained plants, horizontal fire spread occurred only to a very small extent and that all vital, maintained plants extinguished after the burner in the SBI tests was stopped. Also, in the direct comparison between young and old plants, as well as in the comparison of a seasonal influence, no substantial difference was determined for vital, maintained plants in the context of a large-scale arrangement of plants on a façade.

A decisive difference was found for dried plants. Here, an abrupt heat release occurred at the beginning. Dead plants, as well as unmaintained plants with a high content of deadwood, represent the most critical case. This leads to the conclusion that the care and maintenance of a green façade is the most important factor in maintaining fire safety. Dead wood in the form of dead foliage, branches or bird nests must be removed regularly. It must be checked at regular intervals whether the plants are still alive and therefore have a normal moisture content. In addition, it is important to ensure that the plants are regularly cut back. Uncontrolled growth can also lead to a lot of deadwood, especially in the case of light-fleeing plants.

7 Outlook

This research showed that the heat released from dry plants occurs suddenly over a few minutes. Consequently, there is no continuous heat release over a longer period of time.

The last two findings raise two important research questions for further investigation. On the one hand, the definition of proper care and maintenance is essential for a fire-safe green façade. What intervals are necessary, and at what point in time are the various maintenance measures required? It is already known from wildland fire research that the evaluation of the flammability of plants is quite complex [28]. It is known that there is no convenient or practical method to measure the moisture of living foliage in the field. An indication can be made by looking closely at the foliage and touching it [40]. Bright green, juicy foliage indicates high moisture levels, while brittle, cured, dry foliage that breaks in the hand is an alarm signal. The removal of deadwood is also a significant factor in forest fire safety [16], [21].

On the other hand, an important question that needs to be investigated further is what influence a very short-term heat flux has on the outer wall, windows and areas behind them, and what risk does this pose? A specific question would be, for example, whether the heat flux of a dead dry green façade (worst case) would be sufficient to ignite exterior wall cladding made of wood at a distance of a few centimetres.

In addition, it is necessary, in a further step, to examine the findings from the medium-scale tests on a full-scale basis and, in particular, to evaluate the vertical fire spread more specifically.

With regard to section 1.4 and 2.1, the influence of wind on the fire behaviour of green façades should also be further investigated.

Overall, more research is needed to investigate the fire safety of green façades further. More information on living walls could be provided, for example, by the yet unpublished findings of the Instytut Techniki Budowlanej in Poland [121]. It is important to build up a solid database at this point in time. There are also already the first attempts to determine the fire spread along a green façade by means of a fire dynamics simulator model [122]. However, these results must be critically questioned at this point in time with regard to the database.

In a further phase of the FireSafeGreen research project, the focus is on the combination of wooden and green façades and the interactions on fire spread as well as fire tests on full-scale green façades. The full-scale fire tests are intended to provide further knowledge on vertical fire spread and its impact on the façade under realistic exposure scenarios. The results presented here are used to design the full-scale fire tests with green façades and to widen the full-scale tests results regarding its applicability. The results of the future full-scale tests should also be used to classify the findings from smaller standard fire tests (e.g. from Section 2.3) and to verify their applicability in practice. The objective is to create comparability of the findings from standardised test methods with real fire conditions on green façades. These results will be presented in part 2.

Acknowledgements

The research was funded by the Federal Institute for Research on Building, Urban Affairs and Spatial Development on behalf of the Federal Ministry for Housing, Urban Development and Building with funds from the Zukunft Bau research grant. For the support in providing the plants and the pre-selection, the research partner and staff of Weihenstephan-Triesdorf University of Applied Sciences are acknowledged. The SBI test laboratory and the staff of the Wood Research Munich at the Technical University of Munich are also acknowledged.

References

- [1] United Nations – Department of Economic and Social Affairs Population Division (2019) World Urbanization Prospects The 2018 Revision. New York
- [2] Dahanayake KWDKC, Chow CL (2017) Studying the Potential of Energy Saving through Vertical Greenery Systems: Using EnergyPlus Simulation Program, Energy and Buildings 138: 47–59. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.002>
- [3] Perini K, Ottelé M, Fraaij ALA, Haas EM, Raiteri R (2011) Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope, Building and Environment 46:2287-2294. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2011.05.009>
- [4] Pacini A, Edelmann HG, Großschedl J, Schlüter K (2022) A Literature Review on Façade Greening: How Research Findings May Be Used to Promote Sustainability and Climate Literacy in School. *Sustainability* 14(8):4596. <https://doi.org/10.3390/su14084596>
- [5] Eleftheria A, Phil J (2008) Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates, Building and Environment 43:480-493. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.055>
- [6] Azkorra Z, Pérez G, Coma J, Cabeza LF, Bures S, Álvaro JE, Erkoreka A, Urrestarazu M (2015) Evaluation of green walls as a passive acoustic insulation system for buildings, Applied Acoustics 89:46-56. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2014.09.010>
- [7] Ottelé M, Perini K, Fraaij ALA, Haas EM, Raiteri R (2011) Comparative life cycle analysis for green façades and living wall systems, Energy and Buildings 43:3419-3429. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.010>
- [8] Pfoser N (2018) Vertikale Begrünung – Bauweisen und Planungsgrundlagen zur Begrünung von Wänden und Fassaden mit und ohne natürlichen Boden-/Bodenwasseranschluss. Eugen Ulmer KG, Stuttgart
- [9] Ogut O, Tzortzi N J, Bertolin C (2022) Vertical Green Structures to Establish Sustainable Built Environment: A Systematic Market Review. *Sustainability* 14:12349. <https://doi.org/10.3390/su141912349>
- [10] Brandwein T (2014) Statistisches über Brände mit Kletterpflanzen und Strategien zu ihrer Vermeidung. Brandschutz und Grün, Wien
- [11] Köhler M, Ansel W, Appl R, Betzler F, Mann G, Ottelé M, Wünschmann S (2012): Handbuch Bauwerksbegrünung Planung- Konstruktion. Rudolf Müller
- [12] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (2018) Fassadenbegrünungsrichtlinien - Richtlinien für die Planung, Bau und Instandhaltung von Fassadenbegrünungen
- [13] Köhler M (1993) Fassaden- und Dachbegrünung. Ulmer Verlag
- [14] Babrauskas V (2003) Ignition Handbook - Principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science. Fire Science Publishers.

- [15] Yamashita K (1986) Measurement of Flaming Ignition Temperature of Forest Materials Heated in Hot Air Stream - Comparison of Coniferous Tree and Broadleaf Tree, *Kasai* 36:12-18
- [16] Gill AM, Moore PHR (1996) Ignitibility of leaves of Australian plant, Centre for Plant Biodiversity Research.
- [17] White R H, Zipperer W C (2010) Testing and classification of individual plants for fire behaviour: plant selection for the wildland–urban interface. *International Journal of Wildland Fire* 19:213-227. <https://doi.org/10.1071/WF07128>
- [18] Babrauskas V, Chastagner G, Stauss E (2001) Flammability of Cut Christmas Trees. 2001 IAAI Annual General Meeting
- [19] Van Wagner CE (1963) Flammability of Christmas Trees. Forest Research Branch, Department of Forestry Publication No 1034, Ottawa
- [20] White RZ, DeMars D, Bishop M (1997) Flammability of Christmas trees and other vegetation. Proceedings of the 24th international conference on fire safety.
- [21] Etlinger M G, Beall F C (2004) Development of a laboratory protocol for fire performance of landscape plants. *International Journal of Wildland Fire* 13:479-488. <https://doi.org/10.1071/WF04039>
- [22] Gallacher J R, Lansinger V, Hansen S, Weise D R, Fletcher T H (2015) Effects of season and heating mode on ignition and burning behavior of ten species of live fuel measured in a flat-flame burner system
- [23] Prince D R, Fletcher T H (2014) Differences in burning behavior of live and dead leaves - part 1: measurements. *Combustion Science and Technology* 186:1844-1857. <https://doi.org/10.1080/00102202.2014.923412>
- [24] Borujerdi P R, Shotorban B, Mahalingam S (2020) A computational study of burning of vertically oriented leaves with various fuel moisture contents by upward convective heating. *Fuel* 276. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.118030>
- [25] Albin, F A (1979) Thermochemical properties of flame gases from fine wildland fuels. Res. Pap. INT-RP-243. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station
- [26] Livingston, AC, Varner JM (2016) Fuel moisture differences in a mixed native and non-native grassland: implications for fire regimes. *Fire Ecol* 12:73-87. <https://doi.org/10.4996/fireecology.1201073>
- [27] Nelson, RM (2001) Chapter 4 - Water Relations of Forest Fuels, *Forest Fires*, Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012386660-8/50006-4>
- [28] Dimitrakopoulos AP, Papaioannou KK (2001) Flammability assessment of Mediterranean forest fuels. *Fire Technol* 37(2): 143-152. <https://doi.org/10.1023/A:1011641601076>
- [29] Viegas DX, Viegas MT, Ferreira AD (1992) Moisture Content of Fine Forest Fuels and Fire Occurrence in Central Portugal *International Journal of Wildland Fire* 2(2):69-86 <https://doi.org/10.1071/WF9920069>

- [30] Renkin R, Despain D (1992). Fuel moisture, forest type, and lightning-caused fire in Yellowstone National Park. *Can. J. For. Res.* 22(1):37-45
<https://doi.org/10.1139/x92-005>
- [31] Morandini F, Santoni P A, Tramoni J B, Mell W E (2019) Experimental investigation of flammability and numerical study of combustion of shrub of rockrose under severe drought conditions, *Fire Safety Journal* 108
<https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2019.102836>
- [32] Anderson HE, Rothermel RC (1965) Influence of moisture and wind upon the characteristics of free-burning fires. *Symposium (International) on Combustion* 10, 1009–1019
- [33] Dahale A, Ferguson S, Shotorban B, Mahalingam S (2013) Effects of distribution of bulk density and moisture content on shrub fires. *International Journal of Wildland Fire* 22:625-641. <https://doi.org/10.1071/WF12040>
- [34] Jolly WM, Hadlow AM, Huguet K (2014). De-coupling seasonal changes in water content and dry matter to predict live conifer foliar moisture content. *International Journal of Wildland Fire*, 23(4):480-489. <https://doi.org/10.1071/wf13127>
- [35] Agee JK, Wright CS, Williamson N, Huff MH (2002) Foliar moisture content of Pacific Northwest vegetation and its relation to wildland fire behavior. *Forest Ecology and Management* 167:57–66. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(01\)00690-9](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(01)00690-9)
- [36] Chrosciewicz Z (1986) Foliar moisture content variations in four coniferous tree species of central Alberta. *Canadian Journal of Forest Research* 16:157–162. <https://doi.org/10.1139/x86-029>
- [37] Weise DR, White RH, Beall FC, Etlinger M (2005) Use of the cone calorimeter to detect seasonal differences in selected combustion characteristics of ornamental vegetation. *International Journal of Wildland Fire* 14:321-338. <https://doi.org/10.1071/WF04035>
- [38] Owens M K, Lin CD, Taylor C A, Whisenant S G (1998) Seasonal Patterns of Plant Flammability and Monoterpenoid Content in *Juniperus ashei*. *J Chem Ecol* 24:2115–2129. <https://doi.org/10.1023/A:1020793811615>
- [39] Pellizzaro G, Duce P, Ventura A, Zara P (2007). Seasonal variations of live moisture content and ignitability in shrubs of the Mediterranean Basin. *International Journal of Wildland Fire* 16:633-641. <https://doi.org/10.1071/WF05088>
- [40] Schroeder MJ, Buck CC (1970) FIRE WEATHER: Agriculture Handbook 360; U.S. Department of Agriculture - Forest Service. <https://www.nwccg.gov/publications/pms425-1>
- [41] Madrigal J, Marino E, Guijarro M, Hernando C, Díez C (2012) Evaluation of the flammability of gorse (*Ulex europaeus* L.) managed by prescribed burning. *Annals of Forest Science* 69:387–397. <https://doi.org/10.1007/s13595-011-0165-0>
- [42] McAllister S, Weise D R (2017) Effects of Season on Ignition of Live Wildland Fuels Using the Forced Ignition and Flame Spread Test Apparatus, *Combustion Science and Technology*, 189:231-247. <https://doi.org/10.1080/00102202.2016.1206086>

- [43] Chuvieco E, Aguado I, Dimitrakopoulos AP (2004) Conversion of fuel moisture content values to ignition potential for integrated fire danger assessment. *Canadian Journal of Forest Research* 34(11):2284–2293. <https://doi.org/10.1139/x04-101>
- [44] Sharples JJ, McRae RHD, Weber RO, Gill AM (2009) A simple index for assessing fuel moisture content, *Environmental Modelling & Software* 24:637-646. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.10.012>
- [45] Nunez-Regueira L, Rodriguez-Anon JA, Proupin J, Mourino B, Artiaga-Diaz R (2005) Energetic study of residual forest biomass using calorimetry and thermal analysis. *J. Therm. Anal. Calorim.* 80:457–464. <https://doi.org/10.1007/s10973-005-0677-7>
- [46] Pompe A, Vines RG (1966) The influence of moisture on the combustion of leaves. *Australian Forestry* 30: 231–241. <https://doi.org/10.1080/00049158.1966.10675417>
- [47] Zhao FJ, Shu LF, Wang MY, Tian XR (2013) Investigation of emissions from heated essential-oil-rich fuels at 200 °C. *Fire Mater.* 37:391-400. <https://doi.org/10.1002/fam.2140>
- [48] European Standard (2002) Moisture content of a piece of sawn timber -Part 1: Determination by oven dry method; German version EN 13183-1:2002
- [49] ASTM International (2020) Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials, ASTM D4442-20 <https://doi.org/10.1520/D4442-20>
- [50] Rothermel RC (1983) How to Predict the Spread and Intensity of Forest and Range Fires. Gen. Tech. Rep. INT-143. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station
- [51] Scott JH, Burgan RE (2005) Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel’s Surface Fire Spread Model. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-153. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-153>
- [52] Borujerdi P R, Shotorban B, Mahalingam S, Weise D R (2019) Modeling of water evaporation from a shrinking moist biomass slab subject to heating: Arrhenius approach versus equilibrium approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 145. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.118672>
- [53] Pickett B M, Isackson C, Wunder R, Fletcher T H, Butler B W, Weise D R (2009) Flame interactions and burning characteristics of two live leaf samples; 1. *International Journal of Wildland Fire* 18:865-874. <https://doi.org/10.1071/WF08143>
- [54] Padhi S, Shotorban B, Mahalingam S (2017) A computational study of the interactions of three adjacent burning shrubs subjected to wind. *Fire Safety Journal* 91:749-757. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.028>
- [55] Cole W J, Dennis M H, Fletcher T H, Weise D R (2011) The effects of wind on the flame characteristics of individual leaves. *International Journal of Wildland Fire* 20:657-667. <https://doi.org/10.1071/WF10019>

- [56] Rahimi Borujerdi P, Shotorban B, Mahalingam S, Weise D R (2022) Influence of pyrolysis gas composition and reaction kinetics on leaf-scale fires. *Combustion Science and Technology* 22:1-24. <https://doi.org/10.1080/00102202.2022.2135995>
- [57] Weise D R, Fletcher T H, Safdari M-S, Amini E, Palarea-Albaladejo J (2022) Application of compositional data analysis to determine the effects of heating mode, moisture status and plant species on pyrolysates. *International Journal of Wildland Fire* 31:24-45. <https://doi.org/10.1071/WF20126>
- [58] Safdari M-S, Amini E, Weise D R, Fletcher T H (2020) Comparison of pyrolysis of live wildland fuels heated by radiation vs. convection. *Fuel* 268:2-12. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117342>
- [59] Safdari M-S, Amini E, Weise D R, Fletcher T H (2019) Heating rate and temperature effects on pyrolysis products from live wildland fuels. *Fuel* 242:295-304. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.01.040>
- [60] Safdari M-S, Rahmati M, Amini E, Howarth J E, Berryhill J P, Diitenberger M, Weise D R, Fletcher T H (2018) Characterization of pyrolysis products from fast pyrolysis of live and dead vegetation native to the Southern United States. *Fuel* 229:151-166. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.166>
- [61] Amini E, Safdari M-S, DeYoung J T, Weise D R, Fletcher (2019) Characterization of pyrolysis products from slow pyrolysis of live and dead vegetation native to the southern Fuel 235:1475-1491 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.08.112>
- [62] Amini E, Safdari M-S, Johnson N, Weise D R, Fletcher (2021) Pyrolysis kinetics of wildland vegetation using model-fitting methods. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 157. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105167>
- [63] Amini E, Safdari M-S, Weise D R, Fletcher (2019) Pyrolysis kinetics of live and dead wildland vegetation from the Southern United States. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 142. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2019.05.002>
- [64] Anand C, Shotorban B, Mahalingam S, McAllister S, Weise D R (2017) Physics-Based Modeling of Live Wildland Fuel Ignition Experiments in the Forced Ignition and Flame Spread Test Apparatus, *Combustion Science and Technology*, 189:1551-1570, <https://doi.org/10.1080/00102202.2017.1308357>
- [65] Yashwanth B L, Shotorban B, Mahalingam S, Weise D R (2015) An Investigation of the Influence of Heating Modes on Ignition and Pyrolysis of Woody Wildland Fuel, *Combustion Science and Technology*, 187: 780-796. <https://doi.org/10.1080/00102202.2014.973948>
- [66] Diitenberger M A; Boardman C R; Shotorban B; Mell W; Weise D R (2020) Thermal degradation modeling of live vegetation for fire dynamic simulator. *Proceedings, 2020 Spring Technical Meeting, Central States Section of the Combustion Institute*
- [67] Matt F J, Diitenberger M A, Weise D R (2020) Summative and Ultimate Analysis of Live Leaves from Southern U.S. Forest Plants for Use in Fire Modeling. *Energy & Fuels* 34:4703-4720. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.9b04107>

- [68] Pickett B M, Isackson C, Wunder R, Fletcher T H, Butler B W, Weise D R. (2010) Experimental measurements during combustion of moist individual foliage samples. *International Journal of Wildland Fire* 19:153-162. <https://doi.org/10.1071/WF07121>
- [69] Ferguson S C, Dahale A, Shotorban B, Mahalingam S, Weise D R (2013) The role of moisture on combustion of pyrolysis gases in wildland fires. *Combustion Science and Technology* 185:435–453 <https://doi.org/10.1080/00102202.2012.726666>
- [70] Engstrom J D, Butler J K , Smith S G, Baxter L L , Fletcher T H, Weise D R (2004) Ignition Behavior of Live California Chaparral Leaves, *Combustion Science and Technology* 176:1577-1591 <https://doi.org/10.1080/00102200490474278>
- [71] Fletcher T H , Pickett B M, Smith S G, Spittle G S, Woodhouse M M, Haake E, Weise D R (2007) Effects of Moisture on Ignition Behavior of Moist California Chaparral and Utah Leaves, *Combustion Science and Technology*, 179:1183-1203 <https://doi.org/10.1080/00102200601015574>
- [72] Shotorban B, Yashwanth B L, Mahalingam S, Haring D J (2018) An investigation of pyrolysis and ignition of moist leaf-like fuel subject to convective heating. *Combustion and Flame* 190:25-35. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2017.11.008>
- [73] Cobian-Iñiguez J, Aminfar A H, Saha S, Awayan K, Weise D R, Princevac M (2022) The Transition and Spread of a Chaparral Crown Fire: Insights from Laboratory Scale Wind Tunnel Experiments. *Journal of Combustion* 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/5630594>
- [74] Weise D R, Cobian-Iñiguez J, Princevac M (2018) Surface to crown transition. S. L. Manzello, ed. *Encyclopedia of Wildfires and Wildland-Urban Interface (WUI) Fires*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51727-8_24-1
- [75] Dahanayake KC, Chow CL (2018) Moisture Content, Ignitability, and Fire Risk of Vegetation in Vertical Greenery Systems. *Fire Ecol* 14:125–142. <https://doi.org/10.4996/fireecology.140112514>
- [76] International Organization for Standardization (2015) ISO 5660-1:2015-03 Reaction-to-fire tests - Heat release, smoke production and mass loss rate - Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method) and smoke production rate (dynamic measurement)
- [77] Pichlhöfer S (2016) Brandverhalten von Kletterpflanzen in Bezug auf Fassadenbegrünungen. Bachelor-Thesis, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna
- [78] Bühn S (2017) Prüfung der Entflammbarkeit von Kletterpflanzen am Kriterium des Verhaltens lebender Pflanzenteile bei kritischen Temperaturen. Bakkalaureat Thesis, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna
- [79] Department for Communities and Local Government (2013) *Fire Performance of Green Roofs and Walls*. London
- [80] European Standard (2020) EN 13823:2020 Reaction to fire tests for building products - Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item

- [81] International Fire Consultants Ltd (2017) IFC Report PAR/16691/01 Engineering Assessment of Biotope Living Wall System With Respect to Reaction to Fire Classification
- [82] Efectis Nederland (2014) 2014-Efectis-R0224c - Classification of reaction to fire performance in accordance with EN 13501-1:2007+A1:2009
- [83] Efectis Nederland (2014) 2014-Efectis-R224-D - Declaration of test results
- [84] Efectis Nederland (2020) 2020-Efectis-R001808-D[Rev.1] - Declaration of test results
- [85] International Fire Consultants Ltd (2020) IFC Report PAR/19533/01 Engineering Assessment of ANS Living Wall System with Respect to Reaction to Fire Classification
- [86] Warringtonfire (2021) Ad-Hoc Classification of Reaction to Fire Performance utilising the Principals of EN 13501-1: 2018, "ANSLWS001" "ANS Living Wall System" - Fully Planted and Watered
- [87] Engel T, Noder J (2020) Begrünte Fassaden aus brandschutztechnischer Sicht. Bautechnik 97:549–557. <https://doi.org/10.1002/bate.202000041>
- [88] Noder J (2019) Fire performance of green facades (Begrünte Fassaden aus brandschutztechnischer Sicht). Master Thesis, Technical University of Munich
- [89] Werner D, Pommer G (2018) Studie zum Thema „Brandverhalten von Grünfassaden in großmaßstäblichen Versuchen“, Magistratsabteilung 39 Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien
- [90] Werner D, Pommer G (2020) Studie zum Thema „Zweite Studie zum Thema „Brandverhalten von Grünfassaden in großmaßstäblichen Versuchen“, Magistratsabteilung 39 Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien
- [91] Werner D (2016) Laborbericht über das Brandverhalten einer direkt an einer Porenbetonwand montierten Grünfassade aus vitalem Efeu (Prüfung 25.06.2015), Magistratsabteilung 39 Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien
- [92] City of Vienna (2019) Leitfaden Fassadenbegrünung
- [93] Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren und des Deutschen Feuerwehrverbandes (2020) Brandschutz großflächig begrünter Fassaden
- [94] Free and Hanseatic City of Hamburg (2022) FAQ Bauordnungsrechtliche Anforderungen an Fassadenbegrünungen
- [95] Noirfalisse E, Dobbels F, Van Herreweghe J, Wastiels L, Detremmerie V, Martin Yves (2022) Façades Végétalisées - Innovation Paper Novembre 2022; Buildwise.
- [96] Austrian Standards Institute (2013) ÖNORM B 3800-5 2013-04 Fire behaviour of building materials and components - Part 5: Fire behaviour of facades - Requirements, tests and evaluations

- [97] German Institute for Standardization (2017) DIN 4102-20:2017-10 Fire behaviour of building materials and building components - Part 20: Complementary verification for the assessment of the fire behaviour of external wall claddings. Berlin
- [98] Engel T, Werther N (2023) Impact of Mass Timber Compartment Fires on Façade Fire Exposure. *Fire Technol* 59:517–558. <https://doi.org/10.1007/s10694-022-01346-8>
- [99] Kotthoff I (2000) Forschungsbericht BI5-8001 96-18: Erarbeitung realer Prüfbedingungen für die Durchführung von Original-Brandprüfungen an B 1-Fassadensystemen und eines Verfahrens zur Berechnung von Brandabläufen an Fassaden. Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig e.V. 1. Ausfertigung, 3. Okt. 2000
- [100] Engel T, Werther N (2020) Analyse der zulässigen Brandausbreitung über die Fassade. *Bautechnik* 97:558–565. <https://doi.org/10.1002/bate.202000007>
- [101] MFPA Leipzig GmbH (2020) Prüfbericht Nr. PB 3.1/20-131-1 Brandversuch nach DIN 4102-20:2017-10 an der "Living Wall", einer vorgehängten, hinterlüfteten Fassadenkonstruktion (vhF) mit Begrünung; 30.06.2020
- [102] MFPA Leipzig GmbH (2022) Untersuchungsbericht Nr. UB 3.1/22-034-1 Originalmaßstäblicher Brandversuch an einer begrünten Holzfassadenkonstruktion in Anlehnung an DIN 4102-20:2017-10
- [103] Zauper L (2022) Greenery in front of exterior wall cladding made of wood - Investigation of the effects in case of fire (Begrünungen vor Außenwandbekleidungen aus Holz - Untersuchung der Auswirkungen im Brandfall). Master Thesis, DIU Dresden International University
- [104] Engel T, Werther N (2021) Structural Means for Fire-Safe Wooden Façade Design. *Fire Technol*. <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01174-2>
- [105] European Standard (2009) Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-2: General – Structural fire design; German version EN 1995-1-2:2004 + AC:2009
- [106] MPA Dresden (2021) Prüfbericht Nr.20211006 Durchführung einer Brandprüfung gemäß Prüfspezifikation des Auftraggebers an einem Fassadenaufbau „Begrünte Fassade im Hochhausbereich“ unter Verwendung eines auskragenden Deckenplattenaufbaus und von Pflanzgefäßen mit Bewuchs; 08.12.2021
- [107] Engel T (2021) Versuchsplanung Nr. 01-09-21 - Konzeption, Planung und Begleitung einer Fassadenbrandprüfung zur Untersuchung der Anwendbarkeit von begrünten Fassaden im Hochhausbereich. Technical University of Munich 26.09.2021
- [108] European Parliament and of the Council (2011) Regulation (EU) No 305/2011 of 9 March 2011 laying down harmonised conditions for the marketing of construction products and repealing Council Directive 89/106/EEC
- [109] Doran JD, Randall CK, LongAJ (2004) Fire in the wildland–urban interface: selecting and maintaining firewise plants for landscaping. University of Florida, Institute of Food and Agricultural Services, Florida Cooperative Extension Service Circular 1445

- [110] Janssens M (2016). Calorimetry. In: Hurley et al. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0_27
- [111] European Standard (2013) Thermocouples – Part 1: EMF specifications and tolerances EN 60584-1:2013
- [112] Sette B J G (2005) Development of a velocity pressure probe. *Fire Mater* 30:397-414
- [113] European Standard (2018) Fire classification of construction products and building elements - Part 1: Classification using data from reaction to fire tests EN 13501-1:2018
- [114] Graw A (2023) Investigation of the flammability of plants for green facades (Untersuchung der Entflammbarkeit von Pflanzen für begrünte Fassaden). Master Thesis, Technical University of Munich
- [115] European Standard (2016) Fire classification of construction products and building elements - Part 2: Classification using data from fire resistance tests, excluding ventilation services EN 13501-2:2016
- [116] Green L R (1981) Burning by prescription in chaparral. Gen. Tech. Rep. PSW-GTR-51. Berkeley, CA: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station. <https://doi.org/10.2737/PSW-GTR-51>
- [117] Roloff A, Bärtels A (2008) *Flora der Gehölze – Bestimmung, Eigenschaften und Verwendung*, 4.Auflage. Ulmer
- [118] Babrauskas V (2002) Ignition of Wood: A Review of the State of the Art. *Journal of Fire Protection Engineering* 12:163-189. <https://doi.org/10.1177/10423910260620482>
- [119] Babrauskas V (2010) Glass breakage in fires https://fireevacuationplan.ru/articles/dataFolder/to139_GlassBreak.pdf Accessed 3 January 2023
- [120] Baser KHC, Buchbauer G (2009) *Handbook of Essential Oils: Science, Technology, and Applications* (1st Ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420063165>
- [121] Bielawski J (2023) Experimental Investigation of Moisture Content Influence on the Fire Behavior of Modular Living Walls; SFPE23 European Conference on Fire Safety Engineering, Berlin
- [122] Karunaratne TLW, Chow CL (2022) Fire spread along vertical greenery systems from window ejected flame: A study based on a fire dynamic simulator model, *Journal of Building Engineering* 62:105359. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105359>
- [123] Wang H, Quan H, Sun T, Wang Z, Yang Y (2022) Chemical composition, antimicrobial, and antioxidant cytotoxic activities of essential oil from *Actinidia arguta*. *Arch Microbiol* 204:239. <https://doi.org/10.1007/s00203-022-02775-3>
- [124] Samadi-Maybodi A, Shariat MR, Zarei M, Rezai MB (2002) Headspace Analysis of the Male and Female Flowers of Kiwifruit Grown in Iran, *Journal of Essential Oil Research*, 14:414-415. <https://doi.org/10.1080/10412905.2002.9699906>

- [125] Kawata J, Kameda M, Miyazawa M (2007). Constituents of essential oil from the dried fruits and stems of *Akebia quinata* (THUNB.) DECNE. *Journal of oleo science* 56:59-63. <https://doi.org/10.5650/jos.56.59>
- [126] Ramtin M, Sharifniya F, Larypoor M, Mirpour M, Zarrabi S (2022) Evaluation of the Active Ingredient of *Campsis radicans* Essential Oils and its Antimicrobial Evaluation Against Pathogenic Bacteria. *Curr Microbiol* 79:338. <https://doi.org/10.1007/s00284-022-03042-w>
- [127] Liang S, Lu S, Wu X, He L, Huang J (2020) GC-MS analysis of chemical constituents of volatile Oil from different area of *Euonymus fortune* in Guangxi. *Hubei Agricultural Sciences* 59:191-195
- [128] Tucker AO, Maciarelo MJ (1994) Essential Oil of English Ivy, *Hedera helix* L. 'Hibernica', *Journal of Essential Oil Research* 6:187-188. <https://doi.org/10.1080/10412905.1994.9698352>
- [129] Gresta F, Calvi A, Santonoceto C, Strano T, Ruberto G (2022) Agronomic traits and essential oil profiles of *Humulus lupulus* L. cultivated in southern Italy, *Journal of Essential Oil Research*. <https://doi.org/10.1080/10412905.2022.2103190>
- [130] Malizia RA, Molli JS, Cardell DA, Grau RJA (1999) Essential Oil of Hop Cones (*Humulus lupulus* L.), *Journal of Essential Oil Research*, 11:13-15. <https://doi.org/10.1080/10412905.1999.9701056>
- [131] Ilie, D. C., Radulescu, V., & Dutu, L. (2014). Volatile constituents from the flowers of two species of honeysuckle (*Lonicera japonica* and *Lonicera caprifolium*). *Farmacia*, 62(1), 194-201.
- [132] Joulain D (1986). Study of the fragrance given off by certain springtime flowers. *Proceedings of the International Symposium on Essential Oils, Holzminden/Neuhaus* Sept. 18–21, 1985 <https://doi.org/10.1515/9783110855449-006>
- [133] Kofidis G, Bosabalidis A, Kokkini S (2004) Seasonal Variation of Essential Oils in a Linalool-Rich Chemotype of *Mentha spicata* Grown Wild in Greece, *Journal of Essential Oil Research* 16:469-472. <https://doi.org/10.1080/10412905.2004.9698773>
- [134] Zhang DY, Yao XH, Duan MH, Wei FY, Wu GH, Li L (2015) Variation of essential oil content and antioxidant activity of *Lonicera* species in different sites of China, *Industrial Crops and Products* 77:772-779. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.09.048>
- [135] Nunes H, Miguel MG (2017) *Rosa damascena* essential oils: a brief review about chemical composition and biological properties. *Trends in Phytochemical Research* 1:111-128.
- [136] Ghazghazi H, Miguel MG, Weslati M, Hasnaoui B, Sebei H, Barroso JG, Pedro LG, Figueiredo AC (2012) Chemical variability of the essential oils from *Rosa canina* L. and *Rosa sempervirens* L. flowers collected at Tunisia, *Journal of Essential Oil Research* 24:475-480. <https://doi.org/10.1080/10412905.2012.703509>
- [137] Buchbauer G, Jirovetz L, Wasicky M, Nikiforov A (1994) Headspace Analysis of *Vitis vinifera* (Vitaceae) Flowers, *Journal of Essential Oil Research* 6:311-314. <https://doi.org/10.1080/10412905.1994.9698383>

- [138] Chalchat JC, Petrovic SD, Maksimovic ZA, Gorunovic MS (2002) A Comparative Study on Essential Oils of *Geranium macrorrhizum* L. and *Geranium phaeum* L., Geraniaceae from Serbia, *Journal of Essential Oil Research* 14:333-335. <https://doi.org/10.1080/10412905.2002.9699873>
- [139] Venskutonis PR, Dapkevicius A, Barauskiene M (1997) Composition of the Essential Oil of Lavender (*Lavandula angustifolia* Mill.) from Lithuania, *Journal of Essential Oil Research* 9:107-110. <https://doi.org/10.1080/10412905.1997.9700727>

Appendix

A number of manufacturers have conducted SBI fire tests [80] for their green living walls [81] - [86]:

- **Biotope Living Wall System:**
The living wall consists of modules with the dimensions (W x H x D) 600 x 450 x 62 mm³. The modules are formed by a polypropylene framework filled with stone mineral fibre core strips (55 mm deep x 100 mm high x 596 mm long with a nominal dry mass of 16.8 kg/m³), a drainage layer (high-density polyethylene core with geotextile filter layer), and an irrigation system (polyethylene drip line with PVC cover).
The moisture content in the stone mineral fibre core was 70% [81].
- **Sempergreen Flexipanel (living wall):**
The living wall has a total thickness of 95 mm. It consists of an aluminium profile construction on which panels with the dimensions (W x H x D) 600 x 500 x 65 mm³ are mounted, a waterproof mounting layer, an irrigation mat with an irrigation system, a substrate layer and a UV-resistant front layer. The total dry weight of the construction was approx. 9 kg/m² [82], [83].
The total moisture content of a module was 6 kg/m².
- **Sempergreen Flexipanel A2:**
The living wall consists of modules with the dimensions (W x H x D) 620 x 520 x 60 mm³. A front layer of 0.8 mm thick glass fibre, an inner layer of 0.9 mm thick fleece (synthetic fibres Klavermat HC100), a 60 mm thick layer of mineral wool, a rear double layer of 3 mm thick glass fibre and filament yarn for the seams, form the modules [84].
- **ANS Living Wall System**
The living wall consists of modules with the dimensions (W x H x D) 250 x 500 x 105 mm³. Each module is made of polypropylene and is fixed to an aluminium frame. One module has 12 plant compartments filled with organic compost (depth 100 mm). Each compartment houses a single plant. A 5 mm wide exposed polypropylene grid on the front separates the compartments. A polyurethane irrigation system made of perforated hose is installed between the modules.
The total moisture content of a module was 45 % [85], [86].

It should be noted that some of the SBI tests were carried out on systems without plants or irrigation systems, and the results are, therefore, only partially comparable and do not represent the final practical solution.

Table PV. 5 Results of the eleven SBI tests for different living walls

No.	Façade type	Description	FIGRA _{0.2 MJ} [W/s]	THR _{600s} [MJ]	SMOGRA [m ² /s ²]	TSP _{600s} [m ²]	Classification
1	Biotope Living Wall System	Untrimmed planted material [97]	64.3	1.72	105.4	320.7	B s3 d2
2	Biotope Living Wall System	Planted material in the inner corner (burner width) cut back to 80 mm [97]	77.1	1.97	42.0	168.1	B s2 d2
3	Biotope Living Wall System	All planted material cut back to 80 mm [97]	57.5	2.24	43.5	110.8	B s2 d0
4 - 6	Biotope Living Wall System	Unplanted [97]	61.7/ 38.6	3.12/ 0.87	7.9/ 9.1	59.0/ 68.7	B s2 d0
7 - 10	Sempergreen Flexipanel	Planted with 7.1 kg/m ² non-lignifying plants (<i>Bergenia cordifolia</i>) [98], [99]	114 (65) ^a	6.5 (4.6) ^a	37.6 (29.5) ^a	183 (-) ^a	B s2 d0
11	Sempergreen Flexipanel A2	Unplanted [100]	-	-	-	-	A2 s2 d0
12	ANS Living Wall System	Untrimmed planted material [101]	95.41	1.48	58.79	105.73	B s2 d0
13	ANS Living Wall System	Planted material in the inner corner (burner width) cut back to 80 mm [101]	79.74	2.87	56.46	113.78	B s2 d0
14 - 16	ANS Living Wall System	All planted material cut back to the organic compost [101]	11.4/ 0.00	2.65/ 0.59/ 0.39	0.00	0.00	B s1 d0
17 - 19	ANS Living Wall System	All planted material cut back to 80 mm [101]	104.44/ 33.97/ 65.223	1.86/ 0.44/ 1.87	62.27/ 14.34/ 22.29	87.26/ 34.58/ 17.39	B s2 d0
20	ANS Living Wall System	Untrimmed planted material [102]	61	1.3	43	43	B s2 d0

^a First value result from three tests (second value result of the fourth test)

Table PV. 6 Results of the 11 fire tests based on [90] and [91]

No.	Plant type and green façade type	Dimension h x w ^c [m]	Fire load [kg]	Results
1. Test series				
1	<i>Hedera helix</i> directly on the wall without climbing aid/trellis [107]	4 x 2.5, 4 x 1.5	25 ^e	The foliage above the fire chamber burned up to the top of the test stand (several brief flare-ups). The woody shoots were still intact (partially charred) from a height of approx. 2 m. Horizontal fire spread outside the primary flame did not occur. Self-extinguishing occurred after the end of the test.
2	<i>Akebia quinata</i> and <i>Parthenocissus tricuspidata</i> with non-combustible trellis (metal)	3 x 1.5, 3 x 1.5	25 ^e	The foliage and woody shoots above the fire chamber burned up to a height of 2.5 m and partly to the top of the test stand (several brief flare-ups). Horizontal fire spread outside the primary flame did not occur. Self-extinguishing occurred after the end of the test.
3	<i>Hydrangea petiolaris</i> and <i>Wisteria floribunda</i> with non-combustible trellis (metal); 1 m vertical distance between fire chamber and greenery	3 x 1.2, 4 x 1.2	25 ^e	The foliage and woody shoots above the fire chamber burned up partly to a height of 2.5 m (several brief flare-ups). Horizontal fire spread outside the primary flame did not occur. Self-extinguishing occurred after the end of the test.
4	<i>Hydrangea petiolaris</i> and <i>Wisteria floribunda</i> with non-combustible trellis (metal); 0.6 m vertical distance between fire chamber and greenery	3.8 x 1.2 ^d	25 ^e	The foliage and woody shoots above the fire chamber burned up partly to a height of 3 m (several brief flare-ups). Horizontal fire spread outside the primary flame did not occur. Self-extinguishing occurred after the end of the test.
1	<i>Hedera helix</i> directly on the wall without climbing aid/trellis; 20 cm depth fire stop ^a	4 x 3 ^d	25 ^e	The fire stop prevented a direct burning of the green façade. Up to a height of 2.5 m, parts of the plants discoloured and dried.
2	Various plants incl. substrate (20 kg/m) in wall-based plant boxes (aluminium); 53 cm depth fire stop ^a ; rear-ventilated void cavity ^b 50 cm	3 x 3 ^d	25 ^e	The fire stop prevented a direct burning of the green façade. Above the fire stops, parts of the plants discoloured and dried.
3	Various plants incl. substrate (20 kg/m) in wall-based plant boxes (aluminium); 33 cm depth fire stop ^a ; rear-ventilated void cavity ^b 50 cm	3 x 3 ^d	25 ^e	The fire stop prevented a direct burning of the green façade. Above the fire stops, parts of the plants discoloured and dried.
4	Various plants incl. substrate (20 kg/m) in wall-based plant boxes (aluminium); without fire stop; rear-ventilated void cavity ^b 50 cm	3 x 3 ^d	25 ^e	Plants above the fire chamber burned to the top of the test stand. In addition, the aluminium boxes directly above the chamber melted. There was no horizontal fire spread outside the primary flame. Self-extinguishing occurred after the end of the test.
5	<i>Parthenocissus quinquefolia</i> with non-combustible trellis (metal); trellis with 70 cm distance to the wall	3 x 3 ^d	2 x 25 ^e	The foliage and woody shoots did not burn. There was discolouration and drying of the plants above the fire chamber.
6	<i>Parthenocissus quinquefolia</i> with non-combustible trellis (metal); trellis with 40 cm distance to the wall	3 x 3 ^d	2 x 25 ^e	The foliage and woody shoots did not burn. There was discolouration and drying of the plants above the fire chamber.
7	<i>Parthenocissus quinquefolia</i> with non-combustible trellis (metal); trellis with 20 cm distance to the wall	3 x 3 ^d	2 x 25 ^e	The foliage and woody shoots above the fire chamber burned almost completely (several brief flare-ups). Self-extinguishing occurred after the end of the test.

^a directly above the fire chamber ^b between wall and boxes ^c 1st value = large wing with fire chamber ^d only on one side, no inside corner ^e wooden crib

Table PV. 7 shows for each individual test specimen the values defined in accordance with EN 13823 [80] for $FIGRA_{0.2 MJ}$, THR_{600s} , $SMOGRA$, TSP_{600s} and the theoretical fire classification of construction products according to EN 13501-1 [113]. The following principles shall be observed:

- $FIGRA_{0.2 MJ}$ (fire growth rate index) is the maximum quotient of the heat release rate of the specimen and the associated time, using a total heat release threshold of 0.2 MJ.
- THR_{600s} (total heat release) is the total energy released in the first 600 s of exposure to the flames of the main burner.
- $SMOGRA$ (smoke growth rate index) is the maximum quotient of the smoke growth rate of the specimen and the associated time point.
- TSP_{600s} (total smoke production) is the total smoke development of the specimen in the first 600 s of exposure to the flames of the main burner.
- The fire classification of the individual test specimens according to the classification specifications of EN 13501-1 [113] as supplementary information. With regard to Section 3.1, plants are not typical construction products. Consequently, the classification according to EN 13501-1 [113] with regard to its scope is only informative in character.

Table PV. 7 Values defined in accordance with EN 13823 [80]

No.	Specimen name	$FIGRA_{0.2 MJ}$ [W/s]	THR_{600s} [MJ]	$SMOGRA$ [m ² /s ²]	TSP_{600s} [m ²]	Classification
1	<i>Actinidia arguta</i>	118.27	3.29	63.53	77.78	B-s2, d0
2	<i>Actinidia deliciosa</i>	109.37	3.02	23.44	37.76	B-s1, d0
3	<i>Actinidia deliciosa</i> - winter	34.42	1.95	0.00	13.58	B-s1, d0
4	<i>Akebia quinata</i>	181.62	2.80	45.78	29.16	C-s2, d0
5	<i>Aristolochia macrophylla</i>	167.02	2.34	31.84	26.40	C-s2, d0
6	<i>Campsis radicans</i>	209.04	4.20	139.19	93.46	C-s2, d0
7	<i>Celastrus orbiculatus</i>	403.43	2.85	0.00	17.79	C-s1, d0
8	<i>Clematis vitalba</i>	157.94	2.07	47.91	31.39	C-s2, d0
9	<i>Euonymus fortunei</i>	179.22	4.59	80.72	94.10	C-s2, d0
10	<i>Euonymus fortunei</i> - winter	124.19	4.80	12.48	46.45	C-s1, d0
11	<i>Fallopia baldschuanica</i> (1)	744.98	3.85	0.00	10.72	D-s1,d1

Climbing plants

No.	Specimen name	FIGRA _{0.2 MJ} [W/s]	THR _{600s} [MJ]	SMOGRA [m ² /s ²]	TSP _{600s} [m ²]	Classification
12	<i>Fallopia baldschuanica</i> (2)	131.63	4.41	36.98	80.75	C-s2, d2
13	<i>Hedera helix</i> (old)	162.32	3.90	73.76	124.67	C-s2, d0
14	<i>Hedera helix</i> (old) - winter	104.40	4.90	107.95	129.65	B-s2, d0
15	<i>Hedera helix</i> (young)	74.44	4.22	59.62	126.65	B-s2, d0
16	<i>Hedera helix</i> (young) - dried	14 116.03	19.91	156.96	130.94	-
17	<i>Humulus lupulus</i>	92.02	4.50	75.27	119.63	B-s2, d0
18	<i>Humulus lupulus</i> - dried	6 495.25	9.96	235.48	122.85	-
19	<i>Hydrangea anomala</i> (1)	83.06	3.14	52.40	31.25	B-s2, d0
20	<i>Hydrangea anomala</i> (2)	85.47	2.93	37.07	43.41	B-s2, d0
21	<i>Jasminum nudiflorum</i>	138.27	2.23	15.22	25.12	C-s1, d0
22	<i>Jasminum nudiflorum</i> - winter	135.06	2.18	17.67	33.65	C-s1, d0
23	<i>Lonicera caprifolium</i>	258.83	2.70	57.14	36.28	C-s2, d0
24	<i>Lonicera henryi</i> (1)	77.82	1.76	0.00	24.39	B-s1, d0
25	<i>Lonicera henryi</i> - winter	98.62	2.57	10.42	30.30	B-s1, d0
26	<i>Lonicera henryi</i> (2)	193.22	3.87	95.17	81.67	C-s2, d0
27	<i>Parthenocissus quinquefolia</i> (1)	72.03	2.34	0.00	20.51	B-s1, d0
28	<i>Parthenocissus quinquefolia</i> (2)	40.26	2.62	23.23	65.96	B-s2, d0
29	<i>Parthenocissus tricuspidata</i> (1)	62.33	2.27	28.03	28.72	B-s1, d0
30	<i>Parthenocissus tricuspidata</i> (2)	98.69	4.37	28.77	51.98	B-s2, d0
31	<i>Rosa</i> (rambler)	222.30	1.35	0.00	11.84	C-s1, d0
32	<i>Vitis coignetiae</i>	119.79	2.66	0.00	28.83	B-s1, d0
33	<i>Vitis vinifera</i> (1)	35.97	1.47	0.00	20.62	B-s1, d0
34	<i>Vitis vinifera</i> (2)	28.41	2.34	8.14	44.64	B-s1, d0
35	<i>Wisteria sinensis</i>	135.74	7.81	89.60	274.57	C-s3, d0

No.	Specimen name	FIGRA _{0,2 MJ} [W/s]	THR _{600s} [MJ]	SMOGRA [m ² /s ²]	TSP _{600s} [m ²]	Classifica- tion	
41	<i>Hedera helix</i> (old) (2)	71,36	3,86	28,84	79,23	B-s2. d0	
42	<i>Hedera helix</i> (old) (3)	113.21	4.89	60.12	98,77	B-s2. d0	
43	<i>Hedera helix</i> (old) (4)	107,30	4,46	56,51	92,96	B-s2. d0	
Living wall plants	36	<i>Bergenia cordifolia</i>	40.40	2.06	23.09	32.56	B-s1, d0
	37	<i>Carex morrowii</i>	67.37	2.71	35.28	41.93	B-s2, d0
	38	<i>Geranium macrorrhizum</i>	91.10	1.83	45.13	28.13	B-s2, d0
	39	<i>Lavandula angustifolia</i>	234.17	4.13	103.21	96.66	C-s2, d0
	40	<i>Lonicera nitida</i>	93.36	2.86	96.33	86.40	B-s2, d0

Table PV. 8

List of the most important plant characteristics based on [8], [11], [12], an unpublished document of the company Vertiko and own research

Plant species	Average height of growth [m]	Weight estimation [kg/m ²]	Growth vigor	Foliage phase	Maintenance requirements	Negative phototropic (light-fleeing)	Essential oils
<i>Actinidia arguta</i>	6–8	15	strong	deciduous & semi-deciduous	medium	no	yes [138]
<i>Actinidia deliciosa</i>	8–10	22	very strong	deciduous & semi-deciduous	high	yes	yes [138], [139]
<i>Akebia quinata</i>	6–8	10	strong	deciduous & semi-deciduous	medium	no	yes [140]
<i>Aristolochia macrophylla</i>	8–10	13	strong	deciduous	medium	no	no
<i>Campsis radicans</i>	8–10	-	strong	deciduous	high	yes	yes [141]
<i>Celastrus orbiculatus</i>	12–14	15	strong	deciduous	medium - high	yes	no
<i>Clematis vitalba</i>	12–14	14	very strong	deciduous	high	no	no
<i>Euonymus fortunei</i>	3–5	-	weak	evergreen	low	yes	yes [142]
<i>Fallopia baldschuanica</i>	8–15	13	very strong	deciduous & semi-deciduous	high	yes	no
<i>Hedera helix</i>	20–25	-	medium	evergreen	medium - high	yes	yes [143]
<i>Humulus lupulus</i>	3–6	7	very strong	deciduous	medium	no	yes [144][145]
<i>Hydrangea anomala</i>	10–15	-	medium	deciduous	medium	yes	no
<i>Jasminum nudiflorum</i>	3–5	7	medium	deciduous & semi-deciduous	low	no	no
<i>Lonicera caprifolium</i>	4–6	8	medium	deciduous	medium	no	yes [147][148]

Climbing plants

Plant species	Average height of growth [m]	Weight estimation [kg/m ²]	Growth vigor	Foliage phase	Maintenance requirements	Negative photo-tropic (light-fleeing)	Essential oils
<i>Lonicera henryi</i>	6–8	11	strong	evergreen	high	yes	yes [149]
<i>Parthenocissus quinquefolia</i>	10–15	-	strong	deciduous	high	yes	no
<i>Parthenocissus tricuspidata</i>	15–20	-	strong	deciduous	medium - high	yes	no
<i>Rosa</i> (rambler)	2–13	14	medium	deciduous & semi-deciduous	medium	no	yes [150][151]
<i>Vitis coignetiae</i>	8–12	21	strong	deciduous	high	no	no
<i>Vitis vinifera</i>	8–10	19	strong	deciduous	high	no	yes [152]
<i>Wisteria sinensis</i>	8–15	30	very strong	deciduous	high	yes	no
<i>Bergenia cordifolia</i>	0.2–0.4	-	medium	deciduous & semi-deciduous	medium	no	no
<i>Carex morrowii</i>	0.3–0.4	-	weak	evergreen		no	no
<i>Geranium macrorrhizum</i>	0.3	-	strong	deciduous & semi-deciduous	low	no	yes [153]
<i>Lavandula angustifolia</i>	0.6	-	weak	evergreen	medium	no	yes [154]
<i>Lonicera nitida</i>	0.5–1	-	weak	evergreen	low	no	no

Literaturverzeichnis von PAPER I bis PAPER V jeweils am Kapitelende

Literaturverzeichnis

Veröffentlichungen

Abu-Zidan, Yousef; Rathnayaka, Shyanaka; Mendis, Priyan; Nguyen, Kate (2022): Effect of wind speed and direction on facade fire spread in an isolated rectangular building. In: *Fire Safety Journal* 129, S. 103570. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103570.

Agarwal, Gaurav; Wang, Yi; Dorofeev, Sergey (2021): Fire performance evaluation of cladding wall assemblies using the 16-ft high parallel panel test method of ANSI / FM 4880. In: *Fire and Materials* 45 (5), S. 609–623. DOI: 10.1002/fam.2852.

Alexandri, Eleftheria; Jones, Phil (2008): Temperature decreases in an urban canyon due to green walls and green roofs in diverse climates. In: *Building and Environment* 43 (4), S. 480–493. DOI: 10.1016/j.build-env.2006.10.055.

Almarzooqi, Amal; Alzubaidi, Arwa; Alkatheeri, Safa (2022): Fire Hazards by Aluminum Composite Cladding in High-Rise Buildings. In: Proceedings of the 5th European International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Rom, Italien, 26. – 28. Juli 2022. Online verfügbar unter <https://ieomsociety.org/proceedings/2022rome/388.pdf>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

Althaus, C.; Kiermeier, P.; Schuppler, E. (1991): Empfehlungen zur Fassadenbegrünung an öffentlichen Bauwerken. Hg. v. MBW Ministerium für Bauen und Wohnen. Düsseldorf.

AMBA (Hg.) (2021): Grenfell Tower, Neo 200, Lacrosse and the fire safety of facades. Australian Modern Building Alliance. Information Sheet 3: Issue 2.

Anderson, Johan; Boström, Lars; Chiva, Roman; Guillaume, Eric; Colwell, Sarah; Hofmann, Anja; Tóth, Péter (2021): European approach to assess the fire performance of façades. In: *Fire and Materials* 45 (5), S. 598–608. DOI: 10.1002/fam.2878.

Babrauskas, V. (2002): Ignition of Wood: A Review of the State of the Art. In: *Journal of Fire Protection Engineering* 12 (3), S. 163–189. DOI: 10.1177/10423910260620482.

Babrauskas, Vytenis (2003): Ignition handbook. Principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science. Issaquah, WA, [Bethesda, Md.]: Fire Science Publishers; Society of Fire Protection Engineers.

Badrock, Greg (2016): Post incident analysis report: Lacrosse Docklands, 25 November 2014. In: *MATEC Web of Conferences* 46, S. 6002. DOI: 10.1051/mateconf/20164606002.

Bart, Beat; Kolthoff, Ingolf; Wiederkehr, Reinhard (2019): Lignum-Dokumentation Brandschutz 7.1 Aussenwände - Konstruktion und Bekleidungen. Hg. v. Holzwirtschaft Schweiz Lignum.

Bartlett, Alastair I.; Hadden, Rory M.; Bisby, Luke A. (2019a): A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction. In: *Fire Technol* 55 (1), S. 1–49. DOI: 10.1007/s10694-018-0787-y.

Bartlett, Alastair; Law, Angus; McNamee, Robert Jansson; Zehfuss, Jochen; Mohaine, Siyimane; Tessier, Christophe; Bisby, Luke (2019b): Heat Fluxes to a Façade Resulting from Compartment Fires with Combustible and Non-combustible Ceilings. In: FSF 2019- 3rd International Symposium on Fire Safety of Façades. Paris, 26. – 27. September 2019, S. 62–69.

Bechtold, Rolf (1977): Zur thermischen Beanspruchung von Außenstützen im Brandfall. Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau (IBMB).

Bechtold, Rolf; Ehlert, Klaus Peter; Wesche, Jürgen (1978): Brandversuche Lehrte: Brandversuche an einem zum Abbruch bestimmten, viergeschossigen modernen Wohnhaus in Lehrte. Unter Mitarbeit von Universitätsbibliothek Braunschweig und Deutschland. Bundesminister für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau. DOI: 10.24355/dbbs.084-201608021250-0.

Beitel, Jesse; Fay, Terry; Parker, Arthur (2008): Report Concerning the Exterior Wall Claddings Involved in the Monte Carlo Hotel Fire. HAI Project No.: 1JJB05264.

Bergius, Mikael (2023): Comparison of two test methodologies for fire testing of façade system. RISE RAPPORT 2023:29. RISE Research Institutes of Sweden AB (Project number: 130011-05B). Online verfügbar unter <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn%3Anbn%3Ase%3Ari%3Adiva-64056>.

Bonner, Matthew; Rein, Guillermo (2018): Flammability and Multi-objective Performance of Building Façades: Towards Optimum Design. In: *International Journal of High-Rise Buildings* 7 (4), S. 363–374. DOI: 10.21022/IJHRB.2018.7.4.363.

Brandon, Daniel; Just, Alar; Andersson, Petra; Östman, Birgit (2018): Mitigation of fire damages in multi-storey timber buildings : Statistical analysis and guidelines for design (RISE Rapport, 978-91-88695-82-6 (ISBN)). Online verfügbar unter <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:ri:diva-35110>.

Brandon, Daniel; Sjöström, Johan; Temple, Alastair; Hallberg, Emil; Kahl, Fredrik (2022): Fire Safe implementation of visible mass timber in tall buildings – compartment fire testing. Online verfügbar unter <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1627246&dswid=6513>.

Broemme, Albrecht (2005): Berlin: Verheerender Fassadenbrand. In: BRANDSchutz Deutsche Feuerwehr-Zeitung, Ausgabe 06/2005, S. 438–441.

Čolić, Antonela; Pečur, Ivana Banjad (2020): Influence of Horizontal and Vertical Barriers on Fire Development for Ventilated Façades. In: *Fire Technol* 56 (4), S. 1725–1754. DOI: 10.1007/s10694-020-00950-w.

Dréan, Virginie; Schillinger, Renaud; Auguin, Gildas (2016): Fire exposed facades: Numerical modelling of the LEPIR2 testing facility. In: 2nd International Seminar for Fire Safety of Facades, Bd. 46. Lund, 11. – 13. Mai 2016, S. 3001.

Dréan, Virginie; Schillinger, Renaud; Leborgne, Hervé; Auguin, Gildas; Guillaume, Eric (2018): Numerical Simulation of Fire Exposed Façades Using LEPIR II Testing Facility. In: *Fire Technol* 54 (4), S. 943–966. DOI: 10.1007/s10694-018-0718-y.

Dundar, Ugur; Selamet, Serdar (2023): Fire load and fire growth characteristics in modern high-rise buildings. In: *Fire Safety Journal* 135, S. 103710. DOI: 10.1016/j.firesaf.2022.103710.

Duval, Bob (2008): Monte Carlo Hotel Casino Fire. In: *NFPA Journal* (May/June), S. 67–70.

- Empis, Cecilia Abecassis (2010): Analysis of the compartment fire parameters influencing the heat flux incident on the structural façade. Dissertation. The University of Edinburgh. Online verfügbar unter <https://era.ed.ac.uk/handle/1842/4188>.
- Engel, Thomas (2023a): Gutachterliche Stellungnahme - Brandschutztechnische Bewertung einer Holzfassade. 22P5 Bauvorhaben „Neubau Bildungshaus Norderstedt für Stadtbücherei, Volkshochschule und Stadtarchiv“. 02.02.2023 Version 2. Hg. v. Brandschutz-Engel GmbH.
- Engel, Thomas; Brunkhorst, Sven; Steeger, Felix; Butscher, Daniel; Kurzer, Christoph; Werther, Norman et al. (2022): Schlussbericht zum Verbundvorhaben TIMpuls - Brandschutztechnische Grundlagenuntersuchung zur Fortschreibung bauaufsichtlicher Regelungen im Hinblick auf eine erweiterte Anwendung des Holzbaus. DOI: 10.14459/2022md1661419.
- European Commission (Hg.) (2021): Commission Staff Working Document. Scenarios for a transition pathway for a resilient, greener and more digital construction ecosystem. Brüssel (Ares(2021)7679109)final).
- Fettig, Ina; Seeger, Stefan; Werrel, Martin; Deubel, Jan; Raspe, Tina; Piechotta, Christian; Krüger, Simone (2013): Raumbbrände - Teil 2: Versuchsaufbau und Brandspurenanalytik. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM). Berlin (BAM Innovationsoffensive - Projekt Brandspurenanalytik, 978-3-9815944-8-5). Online verfügbar unter <https://opus4.kobv.de/opus4-bam/frontdoor/index/index/docId/30125>.
- Fischer, Marten (2022): Prüfbericht Nr. 20220390. 1. Ausgabe vom 21.12.2022. Hg. v. MPA Dresden GmbH.
- Fletcher, Ian; Borg, Audun; Hitchen, Neil; Welch, Stephen (2006): Performance of concrete in fire: a review of the state of the art, with a case study of the windsor tower fire. In: SiF'06 proceedings of the 4th International Workshop Structures in Fire. Volume 1. Aveiro, Portugal.
- Foley, Jim (2010): Modern Building Materials are Factors in Atlantic City Fires - Lessons learned from two fires include the dangers of plastic building ... In: *Fire Engineering* (163(5)), S. 65.
- Foley, M.; Drysdale, D. D. (1995): Heat transfer from flames between vertical parallel walls. In: *Fire Safety Journal* 24 (1), S. 53–73. DOI: 10.1016/0379-7112(94)00033-C.
- Frangi, Andrea (2014): Decken- und Rahmensysteme aus Laubholz - ETH House of Natural Resources. In: forum-holzbau (Hg.): Forum Holz-Bau Garmisch 14: 20. Internationales Holzbau-Forum (IHF 2014). 20. Internationales Holzbau-Forum IHF 2014. Garmisch-Partenkirchen, 3 - 5.12.2014: Forum-Holzbau. Online verfügbar unter <http://hdl.handle.net/20.500.11850/95430>.
- Friquin, Kathinka Leikanger; Reitan, Nina Kristine; Mikalsen, Ragni Fjellgaard (2019): Fire Exposure on Facades of Cross-Laminated Timber Buildings - A Review. In: FSF 2019- 3rd International Symposium on Fire Safety of Façades. Paris, 26. – 27. September 2019, S. 78–85.
- Genco, Giuseppe (2015): Lacrosse Building Fire. 673 La Trobe Street, Docklands on 25 November 2014. Hg. v. City of Melbourne.
- Glew, Adam; O'Loughlin, Eoin; Kotsovinos, Panagiotis; Barber, David; Schulz, Judith (2022): Application of the Law and O'Brien correlation for external flames to mass timber compartments. In: The Hong Kong Polytechnics University (Hg.): Proceedings of the 12th International Conference on Structures in Fire. Hong Kong, 1121 -1132.
- Hajpál, Mónika (2012): Analysis of a tragic fire case in panel building of Miskolc. Hg. v. Non-profit Ltd. for Quality Control and Innovation in Building, Fire Protection Division. Malta.
- Haksever, A.; Hagen, E. (1988): Natürlicher Brand, seine Einflußparameter in kleinen und großen Brandräumen. Schlußbericht Teilprojekt C3, Sonderforschungsbereich 148 Brandverhalten von Bauteilen. Braunschweig: Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz / Sonderforschungsbereich.
- Harmathy, T. Z. (1974): Flame deflectors. 7 p. In: *Building Research Note* BRN-96. DOI: 10.4224/40000612.

Harmathy, T. Z. (1976): Design of buildings for fire safety. In: *Paper (National Research Council of Canada. Division of Building Research)* DBR-P-698. DOI: 10.4224/40001761.

Harrison, Roger; Spearpoint, Michael (2010): The horizontal flow of gases below the spill edge of a balcony and an adhered thermal spill plume. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 53 (25-26), S. 5792–5805. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.08.004.

Heidari, Mohammad (2021): Travelling fires methodology and probabilistic design of structures. Unter Mitarbeit von Guillermo Rein, Adam Sadowski und CERIB. DOI: 10.25560/999999.

Heinzmann, Andreas; Karatza, Niki P. (2022): Die Holzbauvorfertigung. In: Andreas Heinzmann und Niki P. Karatza (Hg.): *Automatisierung und Digitalisierung im Holzbau*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 3–4.

Hennenberg, Klaus; Böttcher, Hannes; Wiegmann, Kirsten; Reise, Judith; Fehrenbach, Horst (2019): Kohlenstoffspeicherung in Wald und Holzprodukten. In: *AFZ-DerWald* (17/2019), S. 40–43.

Hofmann, Anja; Kaudelka, Sven; Hauswaldt, Sebastian (2018): Fire safety of FAÇADES with polystyrene foam insulation. In: *Fire and Materials* 42 (5), S. 466–474. DOI: 10.1002/fam.2662.

Hofmann-Böllinghaus, Anja; Boström, Lars; Chiva, Roman; Tóth, Péter; Anderson, Johan; Sjöström, Johan et al. (2018): Development of a European approach to assess the fire performance of facades. Hg. v. European Union. DOI: 10.2873/954759.

Hofmann-Böllinghaus, Anja; Kaudelka, Sven; Gnutzmann, Tanja; Rabe, Frederik; Klippel, A. (2017): Influence of modern furniture on the fire development in fires in homes. Large Scale Fire Test in Living Rooms. In: *Fire and Materials Conference*. San Francisco, USA, 06. – 08. Februar 2017. San Francisco, USA, S. 280–294. Online verfügbar unter <https://opus4.kobv.de/opus4-bam/frontdoor/index/index/docId/42925>.

Holzbau Deutschland - Institut (2020): *Fachregeln des Zimmererhandwerks - Außenwandbekleidungen aus Holz. FACHREGELN | 01*. Hg. v. INFORMATIONSDIENST HOLZ.

Hu, Longhua; Hu, Kaizhi; Ren, Fei; Sun, Xiepeng (2017): Facade flame height ejected from an opening of fire compartment under external wind. In: *Fire Safety Journal* 92, S. 151–158. DOI: 10.1016/j.firesaf.2017.06.008.

Huß, Wolfgang (2021): 4 Vorfertigung. In: Hermann Kaufmann, Stefan Krötsch und Stefan Winter (Hg.): *Atlas Mehrgeschossiger Holzbau: Detail*, S. 162–171.

Ingason, H. (1994): Two Dimensional Rack Storage Fires. In: *Fire Saf. Sci.* 4, S. 1209–1220. DOI: 10.3801/IAFSS.FSS.4-1209.

Ingason, Haukur; Ris, John de (1998): Flame heat transfer in storage geometries. In: *Fire Safety Journal* 31 (1), S. 39–60. DOI: 10.1016/S0379-7112(97)00062-3.

International Fire Consultants: Sun Valley Fire -Revisited. Hg. v. The British Plastics Federation / EPS Construction Group. Online verfügbar unter https://www.ife.org.uk/write/MediaUploads/Incident%20directory/Sun%20Valley%20-%201993/Sun_Valley_Fire_-_Revisited.pdf, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

Jaskółowski, Waldemar; Ogrodnik, Pawel; Łukaszek-Chmielewska, Aneta (2014): The study of time to ignition of woods under external heat flux by piloted ignition and autoignition. In: *Annals of Warsaw University of Life Sciences SGGW Forestry and Wood Technology* (86), S. 133–137.

Karlsson, Björn; Thomas, Philip H.; Holmstedt, Göran (1995): Flame Sizes in a Small Scale Stack: Pilot Experiments. Online verfügbar unter <https://portal.research.lu.se/en/publications/flame-sizes-in-a-small-scale-stack-pilot-experiments>.

- Kaudelka, Sven; Hauswaldt, Sebastian (2017): Untersuchungen zum Brandverhalten EPS basierter Wärmedämmverbundsysteme bei Brandbeanspruchungen im Sockelbereich (Teil 1). In: *Bauphysik* 39 (1), S. 10–22. DOI: 10.1002/bapi.201710007.
- Kaudelka, Sven; Hofmann-Böllinghaus, Anja; Hauswaldt, Sebastian; Krause, Ulrich (2015): Auswirkung von Zündquellen und Systembeschaffenheit auf das Brandverhalten EPS-basierter Wärmedämm-Verbundsysteme. In: *Bauphysik* 37 (4), S. 205–212. DOI: 10.1002/bapi.201510023.
- Kaufmann, Hermann; Krötsch, Stefan; Winter, Stefan (Hg.) (2021): Atlas Mehrgeschossiger Holzbau: Detail.
- Kehl, Daniel; Weber, Heinz; Hauswirth, Severin (2010): Ist die Hinterlüftung von Holzfassaden ein Muss? In: *Bauphysik* 32 (3), S. 144–148. DOI: 10.1002/bapi.201010017.
- Kim, A. K.; Onno, R. (1992): Evaluating the fire hazard of lining materials using the OSU, cone calorimeter and full-scale fire test methods. In: *Internal Report (National Research Council of Canada. Institute for Research in Construction) IRC-IR-625*. DOI: 10.4224/20358499.
- Kim, Young-sun; Mizuno, Masayuki; Ohmiya, Yoshifumi (2011): Fire Examination of Superhigh-Rise Apartment Building "Wooshin Golden Suites" in Busan, Korea. In: *Fire Science and Technology* 30 (3), S. 81–90. DOI: 10.3210/fst.30.81.
- Köhler, Manfred (1993): Fassaden- Und Dachbegrünung: Eugen Ulmer.
- Köhler, Manfred; Ansel, Wolfgang (2012): Handbuch Bauwerksbegrünung. Planung - Konstruktion - Ausführung. Köln: Rudolf Müller.
- Korhonen, Timo; Hietaniemi, Jukka (2005): Fire Safety of Wooden Façades in Residential Suburb Multi-Storey Buildings. Online verfügbar unter <https://cris.vtt.fi/en/publications/fire-safety-of-wooden-fa%C3%A7ades-in-residential-suburb-multi-storey->.
- Kotsovinos, Panagiotis; Christensen, Eirik G.; Glew, Adam; O'Loughlin, Eoin; Mitchell, Harry; Amin, Rikesh et al. (2023): Impact of partial encapsulation on the fire dynamics of an open-plan compartment with exposed timber ceiling and columns: CodeRed #04. In: *Fire and Materials*, Artikel fam.3112. DOI: 10.1002/fam.3112.
- Kotthoff, Ingolf (2000): Forschungsbericht BI5-8001 96-18: Erarbeitung realer Prüfbedingungen für die Durchführung von Original-Brandprüfungen an B 1-Fassadensystemen und eines Verfahrens zur Berechnung von Brandabläufen an Fassaden. 1. Ausfertigung, 3. Okt. 2000. Hg. v. Materialforschung und Prüfungsanstalt für das Bauwesen Leipzig e.V.
- Krötsch, Stefan; Müller, Lutz (2021): Entwicklung des mehrgeschossigen Holzbaus. In: Hermann Kaufmann, Stefan Krötsch und Stefan Winter (Hg.): Atlas Mehrgeschossiger Holzbau: Detail, S. 8–13.
- Kumar, S.; Cox, G.; Thomas, P. H. (2010): Air entrainment into balcony spill plumes. In: *Fire Safety Journal* 45 (3), S. 159–167. DOI: 10.1016/j.firesaf.2010.02.001.
- Law, Margaret (1978): Fire Safety Of External Building Elements--The Design Approach. In: *Engineering Journal, American Institute of Steel Construction* (15), S. 59–74.
- Law, Margaret; O'Brien, Turlogh (1989): Fire safety of bare external structural steel. Berkshire: The Steel Construction Institute (SCI publication, 009).
- Lawson, D. I.; Simms, D. L. (1952): The ignition of wood by radiation. In: *Br. J. Appl. Phys.* 3 (9), S. 288–292. DOI: 10.1088/0508-3443/3/9/305.
- Lechner, Markus (2021): Holzbewehrtes Holz. Dissertation. Technische Universität München. Online verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/1614846>.

- Leichenko, Robin; Silva, Julie A. (2014): Climate change and poverty: vulnerability, impacts, and alleviation strategies. In: *WIREs Clim Change* 5 (4), S. 539–556. DOI: 10.1002/wcc.287.
- Li, Dayan; Zhu, Guoqing; Zhu, Hui; Yu, Zhichao; Gao, Yunji; Jiang, Xiaohui (2017): Flame spread and smoke temperature of full-scale fire test of car fire. In: *Case Studies in Thermal Engineering* 10, S. 315–324. DOI: 10.1016/j.csite.2017.08.001.
- Li, Yizhou; Wang, Zilong; Huang, Xinyan (2022): An exploration of equivalent scenarios for building facade fire standard tests. In: *Journal of Building Engineering* 52, S. 104399. DOI: 10.1016/j.jobbe.2022.104399.
- Lin, Shaorun; Qin, Yunzhu; Huang, Xinyan; Gollner, Michael (2023): Use of pre-charred surfaces to improve fire performance of wood. In: *Fire Safety Journal* 136, S. 103745. DOI: 10.1016/j.firesaf.2023.103745.
- Livkiss, Karlis; Svensson, Stefan; Husted, Bjarne; van Hees, Patrick (2018): Flame Heights and Heat Transfer in Façade System Ventilation Cavities. In: *Fire Technol* 54 (3), S. 689–713. DOI: 10.1007/s10694-018-0706-2.
- Lum, Conory (Hg.) (2015): Use of Computer Fire Modelling to Support Alternative Solutions - Wood In-fill Wall and Cladding Materials.
- Mahabadi, Mehdi; Althaus, Christoph; Bartel, Yvonne-Christin; Bott, Peter et al. (2018): Fassadenbegrünungsrichtlinien - Richtlinien für die Planung, Bau und Instandhaltung von Fassadenbegrünungen. Hg. v. Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e.V. - FLL.
- Maiworm, Björn; Göldner, Moritz (2021): Einsatzstellenbegehungen – Fokus: Hat das Gebäude funktioniert? In: Jochen Zehfuß (Hg.): Braunschweiger Brandschutz-Tage 2021. 35. Fachtagung Brandschutz bei Sonderbauten. Heft 241, 15. - 16. 09.2021. Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB), 63-82.
- Mao, Shaohua; Liu, Shishan; Hu, Yangyang; Xu, Huasheng; Xiang, Yanqing; Lu, Kaihua (2022): Experimental Investigation on the Vertical Temperature Profile of Spilled Plume from a Compartment-Facade Fire with a Horizontal Projection. In: *Fire Technol*. DOI: 10.1007/s10694-022-01355-7.
- Mayer, E.; Künzel, H. (1984): Notwendige Hinterlüftung an Außenwandbekleidungen aus großformatigen Bauteilen. IBP-Mitteilung 11 (1984) Nr. 92. Hg. v. Fraunhofer-Institut für Bauphysik.
- Merkewitsch, Thomas (2019): Ein Prüfverfahren zur Begrenzung der Brandausbreitung von Außenwandbekleidungen. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (Berichte des Instituts für Bauphysik der Leibniz-Universität Hannover, Heft 8 (August 2019)).
- Mikkola, Esko (1989): Puupinnan syttyminen. Espoo, Hki: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Palotekniikan laboratorio; Valtion painatuskeskus [jakaja] (Tiedotteita / Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1057).
- Móder, István; Varga, Ádám; Geier, Péter; Vágó, Bálint; Rajna, Edit (2016): Brief summary of the Hungarian test method (MSZ 14800-6:2009) of fire propagation on building façades. In: 2nd International Seminar for Fire Safety of Facades, Bd. 46. Lund, 11. – 13. Mai 2016, S. 1002.
- Moghtaderi, B.; Novozhilov, V.; Fletcher, D. F.; Kent, J. H. (1997): A new correlation for bench-scale piloted ignition data of wood. In: *Fire Safety Journal* 29 (1), S. 41–59. DOI: 10.1016/s0379-7112(97)00004-0.
- Moore-Bick, Martin (2019a): Grenfell Tower Inquiry: Phase 1 Report;. Report of the Public Inquiry into the Fire at Grenfell Tower on 14 JUNE 2017. Volume 1.
- Moore-Bick, Martin (2019b): Grenfell Tower Inquiry: Phase 1 Report;. Report of the Public Inquiry into the Fire at Grenfell Tower on 14 JUNE 2017. Volume 2.
- Moore-Bick, Martin (2019c): Grenfell Tower Inquiry: Phase 1 Report;. Report of the Public Inquiry into the Fire at Grenfell Tower on 14 JUNE 2017. Volume 3.

- Moore-Bick, Martin (2019d): Grenfell Tower Inquiry: Phase 1 Report;. Report of the Public Inquiry into the Fire at Grenfell Tower on 14 JUNE 2017. Volume 4.
- Morgado, Humberto J. L.; Rodrigues, João P. C. (2015): Balcony Effect on the External Fire Spread into Upper Floors. In: *Journal of Structural Fire Engineering* 6 (4), S. 255–274. DOI: 10.1260/2040-2317.6.4.255.
- Morgan, Penny; Jones, Derek; Clinch, Sharon (1992): Summary of fires investigated April 1991 to March 1992. CBF/001/07 - Investigation of real fires. Hg. v. Building Research Establishment.
- Nishio, Yuhei; Yoshioka, Hideki; Noguchi, Takafumi; Kanematsu, Manabu; Ando, Tatsuo; Tamura, Masamichi; Hase, Yoshihiro (2016): Fire propagation over combustible exterior facades exposed to intensified flame in Japan. In: 2nd International Seminar for Fire Safety of Facades, Bd. 46. Lund, 11. – 13. Mai 2016, S. 2002.
- NSW Fire Brigades (2002): Tip Top Bakery Fire, Fairfield. In: *FIRE Australia* (November), S. 2–4.
- Ogut, Ozge; Tzortzi, Nerantzia Julia; Bertolin, Chiara (2022): Vertical Green Structures to Establish Sustainable Built Environment: A Systematic Market Review. In: *Sustainability* 14 (19), S. 12349. DOI: 10.3390/su141912349.
- Oleszkiewicz, Igor (1990a): Fire exposure to exterior walls and flame spread on combustible cladding. In: *Fire Technol* 26 (4), S. 357–375. DOI: 10.1007/BF01293079.
- Oleszkiewicz, Igor (1990b): Fire performance of external insulation system: observations made after the fire at 393 Kennedy Street, Winnipeg, Manitoba, January 10, 1990. In: *Internal Report (National Research Council of Canada. Institute for Research in Construction) IRC-IR-596*. DOI: 10.4224/20375074.
- Oleszkiewicz, Igor (1991): Vertical separation of windows using spandrel walls and horizontal projections. In: *Fire Technol* 27 (4), S. 334–340. DOI: 10.1007/BF01039884.
- Park; Ryu; Ryou (2019): Experimental Study on the Fire-Spreading Characteristics and Heat Release Rates of Burning Vehicles Using a Large-Scale Calorimeter. In: *Energies* 12 (8), S. 1465. DOI: 10.3390/en12081465.
- Parker, David E. (2010): Urban heat island effects on estimates of observed climate change. In: *WIREs Clim Change* 1 (1), S. 123–133. DOI: 10.1002/wcc.21.
- Peacock, Frances Maria (2021a): REPORT ON THE FIRE WHICH OCCURRED AT MARINA DIAMOND 2, DUBAI, UAE ON 23 OCTOBER 2021. Online verfügbar unter <https://www.intelliclad.co.uk/downloads>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.
- Peacock, Frances Maria (2021b): REPORT ON THE FIRE WHICH OCCURRED AT TORRE DEL MORO, MILAN, ITALY ON 29 AUGUST 2021. Online verfügbar unter <https://www.intelliclad.co.uk/downloads>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.
- Peacock, Frances Maria (2022a): REPORT ON THE FIRE WHICH OCCURRED AT CHINA TELECOM TOWER, CHANGSHA, CHINA ON 16 SEPTEMBER 2022. Online verfügbar unter <https://www.intelliclad.co.uk/downloads>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.
- Peacock, Frances Maria (2022b): REPORT ON THE FIRE WHICH OCCURRED AT MERIDIAN POINT, DEPT-FORD, LONDON, UK ON 26 APRIL 2022. Online verfügbar unter <https://www.intelliclad.co.uk/downloads>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.
- Peacock, Frances Maria (2022c): REPORT ON THE FIRE WHICH OCCURRED AT THE RELAY BUILDING, LONDON, UK ON 7 MARCH 2022. Online verfügbar unter <https://www.intelliclad.co.uk/downloads>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.
- Peng, Lei; Ni, Zhaopeng; Huang, Xin (2013): Review on the Fire Safety of Exterior Wall Claddings in High-rise Buildings in China. In: *Procedia Engineering* 62, S. 663–670. DOI: 10.1016/j.proeng.2013.08.112.

Perini, Katia; Ottelé, Marc; Fraaij, A.L.A.; Haas, E. M.; Raiteri, Rossana (2011): Vertical greening systems and the effect on air flow and temperature on the building envelope. In: *Building and Environment* 46 (11), S. 2287–2294. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.05.009.

Pfoser, Nicole (2018): Vertikale Begrünung. Bauweisen und Planungsgrundlagen zur Begrünung von Wänden und Fassaden mit oder ohne natürlichen Boden-/Bodenwasseranschluss. Stuttgart (Hohenheim): Ulmer (Fachbibliothek gr n).

Poreh, Michael; Garrad, Gordon (2000): A study of wall and corner fire plumes. In: *Fire Safety Journal* 34 (1), S. 81–98. DOI: 10.1016/S0379-7112(99)00040-5.

Rackauskaite, Egle; Bonner, Matthew; Restuccia, Francesco; Fernandez Anez, Nieves; Christensen, Eirik G.; Roenner, Nils et al. (2022): Fire Experiment Inside a Very Large and Open-Plan Compartment: x-ONE. In: *Fire Technol* 58 (2), S. 905–939. DOI: 10.1007/s10694-021-01162-6.

Reitan, Nina Kristine; Friquin, Kathinka Leikanger; Mikalsen, Ragni Fjellgaard (2019): Brannsikkerhet ved bruk av krysslaminert massivtre i bygninger. en litteraturstudie. Rep. 2019:09. Hg. v. RISE Research Institutes of Sweden. Trondheim.

Scheer, Claus (Hg.) (2009): Holz-Brandschutz-Handbuch. 3. Aufl. Berlin: Ernst (Informationsdienst Holz).

Shi, Long; Chew, Michael Yit Lin (2013): Experimental study of woods under external heat flux by autoignition. In: *J Therm Anal Calorim* 111 (2), S. 1399–1407. DOI: 10.1007/s10973-012-2489-x.

Shields, T. J.; Silcock, G. W.; Murray, J. J. (1993): The effects of geometry and ignition mode on ignition times obtained using a cone calorimeter and ISO ignitability apparatus. In: *Fire and Materials* 17 (1), S. 25–32. DOI: 10.1002/fam.810170105.

Simms, D. L. (1961): Experiments on the ignition on cellulosic materials by thermal radiation. In: *Combustion and Flame* 5, S. 369–375. DOI: 10.1016/0010-2180(61)90118-3.

Simms, D. L. (1963): On the pilot ignition of wood by radiation. In: *Combustion and Flame* 7, S. 253–261. DOI: 10.1016/0010-2180(63)90190-1.

Simms, D. L.; Hird, D. (1958): On the Pilot Ignition of Materials by Radiation. In: *Fire Safety Science* 365. Online verfügbar unter <https://publications.iafss.org/publications/frn/365/-1>.

Simms, D. L.; Law, Margaret (1967): The ignition of wet and dry wood by radiation. In: *Combustion and Flame* 11 (5), S. 377–388. DOI: 10.1016/0010-2180(67)90058-2.

Sjöström, Johan; Brandon, Daniel; Temple, Alastair; Anderson, Johan; McNamee, Robert (2023): External fire plumes from mass timber compartment fires—Comparison to test methods for regulatory compliance of façades. In: *Fire and Materials*, Artikel fam.3129. DOI: 10.1002/fam.3129.

Smolka, Miroslav; Anselmi, Eleonora; Crimi, Tony; Le Madec, Bruce; M der, István Ferenc; Park, Kye Won et al. (2016): Semi-natural test methods to evaluate fire safety of wall claddings: Update. In: 2nd International Seminar for Fire Safety of Facades, Bd. 46. Lund, 11. – 13. Mai 2016, S. 1003.

Spearpoint, Michael; Frank, Kevin; Fu, Ian (2019a): Façade fire incidents in tall buildings. In: *CTBUH Journal*, S. 34–39.

Spearpoint, Michael; Fu, Ian; Frank, Kevin (2019b): Development of façade fire incident database for a machine learning environment. Project Number: MA17068. Hg. v. OFR Consultants Ltd.

Stein, Jochen (2015): Qualitätskriterien für die Bedarfsplanung von Feuerwehren in Städten. Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren für. vom 16. September 1998, Fortschreibung vom 19. November 2015. Hg. v. AGBF bund im Deutschen Städtetag.

- Stierli, Silvan; Burgherr, Andreas (2017): Naturbrandversuch Schindelfassade - MFH Wolf Andermatt. Hg. v. Timberatec Holzbauingenieure Schweiz AG.
- Stratmann, Maria (1969): Schmelzpunkte der Polyester- und Polycarbonatfasern. In: Maria Stratmann (Hg.): Verfahren zur Erkennung und Unterscheidung von Chemiefaserstoffen. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 7.
- Szikra, Csaba; Takács, Lajos Gábor (2018): Validation of CFD Simulation Model of French Balcony Façade Fire Test with Parapet Glass. In: Fire and Evacuation Modeling Technical Conference (FEMTC) 2018. Gaithersburg, Maryland, 1. – 3. Oktober 2018.
- The Irvine Fire. Friday 11 Jun 1999 - An internal Briefing (1999). Online verfügbar unter https://assets.grenfellto-wereinquiry.org.uk/BRE00035379_DETR%27s%20file%20in%20relation%20to%20the%20fire%20at%20Garnock%20Court%20in%20Irvine%2C%20Scotland%20%28part%201%20of%202%29.pdf, zuletzt geprüft am 08.01.2023.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs (Hg.) (2019): World Urbanization Prospects. The 2018 Revision. New York.
- United Nations Environment Programme (Hg.) (2021): 2021 Global Status Report for Buildings and Construction. Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector.
- United Nations Environment Programme (Hg.) (2022): 2022 Global Status Report for Buildings and Construction. Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector.
- United Nations General Assembly (Hg.) (2012): Resolution adopted by the General Assembly on 27 July 2012 The Future We Want. A/RES/66/288. 66th Session.
- Vollenbroek, Frans A. (2002): Sustainable development and the challenge of innovation. In: *Journal of Cleaner Production* 10 (3), S. 215–223. DOI: 10.1016/S0959-6526(01)00048-8.
- Wade, C. A.; Clampett, J. C. (2000): Fire Performance of Exterior Claddings. BRANZ Report FCR 1. Judgeford, New.
- Werther, Norman (2016): Einflussgrößen auf das Abbrandverhalten von Holzbauteilen und deren Berücksichtigung in empirischen und numerischen Beurteilungsverfahren. Dissertation. Technische Universität München. Online verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/1307126>.
- White, Nathan; Delichatsios, Michael (2015): Fire Hazards of Exterior Wall Assemblies Containing Combustible Components. Aufl. 2015. New York, NY: Springer New York (SpringerBriefs in Fire). DOI: 10.1007/978-1-4939-2898-9.
- White, R. H.; Dietenberger, M. A. (2001): Wood Products: Thermal Degradation and Fire. In: *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*: Elsevier, S. 9712–9716.
- Winter, Stefan; Peter, Mandy (2021): Mehrgeschossiger Holzbau. In: Stefan Winter und Mandy Peter (Hg.): *Holzbau–Taschenbuch*: Wiley, S. 503–538.
- Yamaguchi, Jun-ichi; Tanaka, Takeyoshi (2005): Temperature Profiles of Window Jet Plume. In: *Fire Science and Technology* 24 (1), S. 17–38. DOI: 10.3210/fst.24.17.
- Yuen, Anthony Chun Yin; Chen, Timothy Bo Yuan; Li, Ao; Cachinho Cordeiro, Ivan Miguel de; Liu, Luzhe; Liu, Hengrui et al. (2021): Evaluating the fire risk associated with cladding panels: An overview of fire incidents, policies, and future perspective in fire standards. In: *Fire and Materials* 45 (5), S. 663–689. DOI: 10.1002/fam.2973.

Yung, D. T.; Oleszkiewicz, I. (1988): Fire spread via exterior walls of buildings. National Research Council of Canada. Institute for Research in Construction. In: *Paper (National Research Council of Canada. Institute for Research in Construction) IRC-P-1532*. DOI: 10.4224/40001415.

Zehfuß, Jochen; Küppers, Judith; Sobiegalla, Linda (2016): Experimentelle und numerische Untersuchungen von Brandszenarien vor Fassaden unter Berücksichtigung verschiedener Abstände. In: *Bautechnik* 93 (8), S. 555–566. DOI: 10.1002/bate.201600048.

Zhao, Cong; Yang, Dong; Tang, Fei; Jiang, Yaqiang (2019): Buoyant opening spill flame behaviors beneath a horizontal projection induced by a compartment fire. In: *Experimental Heat Transfer* 32 (3), S. 284–301. DOI: 10.1080/08916152.2018.1505788.

Zhou, Biao; Yoshioka, Hideki; Noguchi, Takafumi; Ando, Tatsuo (2018): Effects of opening edge treatment and EPS thickness on EPS external thermal insulation composite systems (ETICS) façade reaction-to-fire performance based on JIS A1310 standard façade fire test method. In: *Fire and Materials* 42 (5), S. 537–548. DOI: 10.1002/fam.2486.

Normen, Richtlinien und Gesetze

ANSI FM 4880-2017, Approved 03.01.2017: American National Standard for Evaluating the Fire Performance of Insulated Building Panel Assemblies and Interior Finish Materials.

AS 5113:2016, 23.03.2016: Classification of external walls of buildings based on reaction-to-fire performance.

Assessment of Fire Performance of Facades - Large, 18.11.2022: Assessment of Fire Performance of Facades using Large Fire Exposure - Draft revision 6.

Assessment of Fire Performance of Facades - Medium, 18.11.2022: Assessment of Fire Performance of Facades using Medium Fire Exposure - Draft revision 6.

BS 8414-1:2020, 29.04.2020: Fire performance of external cladding systems - Part 1: Test method for non-load-bearing external cladding systems fixed to, and supported by, a masonry substrate.

BS 8414-2:2020, 29.04.2020: Fire performance of external cladding systems - Part 2: Fire performance of external cladding systems. Test method for non-loadbearing external cladding systems fixed to, and supported by, a structural steel frame.

CAN/ULC-S134-13, 01.08.2013: Standard Method of Fire Test of Exterior Wall Assemblies.

DIN 14462:2012-09, September 2012: Löschwassereinrichtungen - Planung, Einbau, Betrieb und Instandhaltung von Wandhydrantenanlagen sowie Anlagen mit Über- und Unterflurhydranten.

DIN 18516-1:2010-06, Juni 2010: Außenwandbekleidungen, hinterlüftet – Teil 1: Anforderungen, Prüfgrundsätze.

DIN 4070-1:1958-01, Januar 1958: Nadelholz; Querschnittsmaße und statische Werte für Schnittholz, Vorratskantholz und Dachlatten.

DIN 4074-1:2012-06, Juni 2012: Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit – Teil 1: Nadelschnittholz.

DIN 4102-20:2017-10, Oktober 2017: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 20: Ergänzender Nachweis für die Beurteilung des Brandverhaltens von Außenwandbekleidungen.

DIN 4102-24:2022-12, Dezember 2022: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 24: Prüfung des Brandverhaltens von Außenwandbekleidungen unter Berücksichtigung des Sockelbrandszenarios.

DIN 68800-2:2022-02, Februar 2022: Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau.

DIN EN 13501-2:2016-12, Dezember 2016: Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten – Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen.

DIN EN 13823:2020-09, September 2020: Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten – Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen.

DIN EN 1991-1-2:2010-12, Dezember 2010: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Brandeinwirkungen auf Tragwerke.

DIN EN 1993-1-2:2010-12, Dezember 2010: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall;

DIN EN 1995-1-2:2010-12, Dezember 2010: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten – Teil 1-2: Allgemeine Regeln – Tragwerksbemessung für den Brandfall; Deutsche Fassung EN 1995-1-2:2004 + AC:2009.

DIN EN 60584-1:2014-07, Juli 2014: Thermoelemente – Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen.

DSTU B V.1.1-21-2009, 2009: ДСТУ Б В.1.1-21-2009 - Захист від пожежі КОНСТРУКЦІЇ ЗОВНІШНІХ СТИН ІЗ ФАСАДНОЮ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЄЮ Метод великомасштабних вогневих випробувань (ISO 13785-2:2002, MOD) (Fire Protection of Exterior Wall Constructions with Facade Insulation Large-scale fire test method).

DSTU B V.1.1-22-2009, 2009: ДСТУ Б В.1.1-22-2009- Захист від пожежі КОНСТРУКЦІЇ ЗОВНІШНІХ СТИН ІЗ ФАСАДНОЮ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЄЮ Метод середньомасштабних вогневих випробувань (ISO 13785-1:2002, MOD) (Fire Protection of Exterior Wall Constructions with Facade Insulation Medium-scale fire test method).

European Commission (1994): Communication of the Commission with regard to the interpretative documents of Council Directive 89/106/EEC (94/C 62/01). In: Official Journal of the European Communities. Online verfügbar unter https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=OJ:JOC_1994_062_R_0001_01&from=EN.

GB/T 29416-2012, 31.12.2012: 建筑外墙外保温系统的防火性能试验方法 (Test method for fire-resistant performance of external wall insulation systems applied to building facades).

GOST 31251-2008, 01.03.2010: СТЕНЫ НАРУЖНЫЕ С ВНЕШНЕЙ СТОРОНЫ - Метод испытаний на пожарную опасность (Facades of buildings. Fire hazard test method).

ISO 13785-1:2002, 15.12.2002: Reaction-to-fire tests for façades - Part 1: Intermediate-scale test.

ISO 13785-2:2002, 15.12.2002: Reaction-to-fire tests for façades - Part 2: Large-scale test.

ISO 14934-1:2010, 15.06.2010: Fire tests - Calibration and use of heat flux meters - Part 1: General principles.

ISO 14934-4:2014, 15.08.2014: Fire tests - Calibration and use of heat flux meters - Part 4: Guidance on the use of heat flux meters in fire tests.

JIS A 1310:2019, 25.02.2019: 建築ファサードの燃えひろがり試験方法 (Test method for fire propagation over building façades).

LEPIR 2, 10.09.1970: Arrêté du 10 septembre 1970 relatif à la classification des façades vitrées par rapport au danger d'incendie. Online verfügbar unter <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000277105>, zuletzt geprüft am 22.01.2023.

MBO, vom November 2002 (zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 25.09.2020): Musterbauordnung.

MHHR, vom April 2008 (zuletzt geändert durch Beschluss der Fachkommission Bauaufsicht vom Februar 2012): Muster-Richtlinie über den Bau und Betrieb von Hochhäusern (Muster-Hochhaus-Richtlinie).

MHolzBauRL, vom Oktober 2020 (21.06.2021): Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an Bauteile und Außenwandbekleidungen in Holzbauweise.

MSZ 14800-6:2020, 01.12.2020: Tűzállósági vizsgálatok. 6. rész: Tűzterjedés vizsgálat a épülethomlokzaton (Fire resistance tests. Part 6: Fire propagation test for building facades).

NFPA 14 (2016): NFPA 14 - Standard for the Installation of Standpipe and Hose Systems. Hg. v. National Fire Protection Association.

NFPA 285, Edition: 2023: Standard Fire Test Method for Evaluation of Fire Propagation Characteristics of Exterior Wall Assemblies Containing Combustible Components.

ÖNORM B 3800-5:2013, 15.01.2013: Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 5: Brandverhalten von Fassaden - Anforderungen, Prüfungen und Beurteilungen.

PN-B-02867:2013, 10.06.2013: Ochrona przeciwpożarowa budynków -- Metoda badania stopnia rozprzestrzeniania ognia przez ściany zewnętrzne od strony zewnętrznej oraz zasady klasyfikacji.

Prüfbestimmung für Aussenwandbekleidungssysteme, 02.12.2016: Vereinigung Kantonaler Feuerversicherungen.

SP FIRE 105, 09.09.1994: External wall assemblies and facade claddings - Reaction to fire.

Vom Verfasser betreute Bachelor- und Masterarbeiten

Ahrens, Johanna (2021): Einfluss der immobilen Brandlast auf die Brandeinwirkung auf der Fassade. Master Thesis. Technische Universität München.

Berger, Hubert (2021): Untersuchung der Skalierungseffekte bei Brandversuchen. Master Thesis. Technische Universität München.

Berger, Hubert Korbinian (2018): Untersuchung von statistischen Brandlastdichten und Wärmefreisetzungsraten. Bachelor Thesis. Technische Universität München.

Eisl, Katharina (2017): Brandstatistiken und ihre Aussagekraft. Master Thesis. Technische Universität München.

Göldner, Moritz (2021): Evaluierung der Maßnahmen des vorbeugenden Brand- und Gefahrenschutzes - Teil 4: Ermittlung und Bewertung quantifizierter Ausbreitungsfaktoren. Master Thesis. Technische Universität München.

Graw, Alexander (2023): Untersuchung der Entflammbarkeit von Pflanzen für begrünte Fassaden. Master Thesis. Technische Universität München.

Grimm, Wilhelm (2020): Holzfassaden aus brandschutztechnischer Sicht. Master Thesis. Technische Universität München.

Mannl, Kilian (2022): Evaluierung der Maßnahmen des VB/G Teil 6: Analyse der FRIMMAB-Methode anhand realer Einsatzdaten. Master Thesis. Technische Universität München.

Noder, Julia (2019): Begrünte Fassaden aus brandschutztechnischer Sicht. Master Thesis. Technische Universität München.

Porer, Kathrin (2019): Vergleichsstudie weltweiter Feuerwehrtaktiken und Gegebenheiten des abwehrenden Brandschutzes bei Gebäudebränden mit Ausarbeitung eines Bewertungssystems. Master Thesis. Technische Universität München.

Schoofs, Nils (2023): Untersuchung des Einflusses von Fassadenbegrünung auf Holzaußenwandbekleidungen im Brandfall. Master Thesis. Technische Universität München.

Schwaighofer, Lisbeth (2020): Gegenüberstellung der in Deutschland / Österreich / Schweiz vorhandenen brandschutztechnischen Anforderungen an Hochhäuser. Bachelor Thesis. Technische Universität München.

Steinbauer, Kristina (2019): Die europäischen Bauordnungen im Vergleich. Bachelor Thesis. Technische Universität München.

Wohlschläger, Jaro (2019): Vergleichsstudie weltweiter brandschutztechnischer Anlagentechnik und Gegebenheiten des anlagentechnischen Brandschutzes mit Ausarbeitung eines Bewertungssystems. Master Thesis. Technische Universität München.

Internetquellen

Barling, Kurt: Investigation of Lakanal House Fire. Hg. v. Middlesex University London. Online verfügbar unter <http://lakanalhousefire.co.uk/>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

BBC (2004): Blaze consumes Caracas skyscraper. In: *BBC News*, 18.10.2004. Online verfügbar unter <http://news.bbc.co.uk/2/hi/americas/3751790.stm>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

BBC (2017): Dubai's Torch Tower catches fire for second time in two years. In: *BBC News*, 04.08.2017. Online verfügbar unter <https://www.bbc.com/news/world-middle-east-40822269>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

BBC (2019): Bolton fire: Crews tackle huge blaze at student flats. In: *BBC News*, 15.11.2019. Online verfügbar unter <https://www.bbc.com/news/uk-england-manchester-50438177>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

BBC (2020): Abbco Tower: Fire engulfs skyscraper in UAE city of Sharjah. In: *BBC News*, 05.05.2020. Online verfügbar unter <https://www.bbc.com/news/world-middle-east-52553429>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

Bonner, Matthew; Rein, Guillermo (2020): List of Facade Fires 1990 - 2020. DOI: 10.5281/zenodo.3743863.

China Daily (Hg.) (2009): CCTV hotel fire caused by fireworks: official. Online verfügbar unter http://www.chinadaily.com.cn/china/2009-02/10/content_7461514.htm, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

Engel, Thomas (2023b): Fire-Safe Green - Untersuchung der brandschutztechnischen Anwendbarkeit von begrünten Fassaden an mehrgeschossigen Gebäuden. Hg. v. Technische Universität München. Online verfügbar unter www.firesafegreen.de, zuletzt geprüft am 11.07.2023.

Feuerwehr Frankfurt am Main (Hg.) (2022): Zusammenstellung von Brandereignissen in Verbindung mit brennbaren Außenfassaden im Auftrag von AGBF-Hessen, AGBF-Bund, Deutscher Feuerwehrverband e.V. Online verfügbar unter <https://www.feuerwehr-frankfurt.de/service/vorbeugender-brandschutz/waermedaemmverbundsysteme>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

Hukseflux Thermal Sensors (Hg.) (2023): USER MANUAL SBG01- Water cooled heat flux sensor. Online verfügbar unter <https://www.hukseflux.com/products/heat-flux-sensors/heat-flux-sensors/sbg01-heat-flux-meter>, zuletzt geprüft am 17.03.2023.

Kálmán, Attila (2022): Europe strains under rising prices as renters bear brunt of housing crisis. Online verfügbar unter <https://www.investigate-europe.eu/en/2022/house-prices-and-rents-rising-across-europe/>, zuletzt aktualisiert am 12.12.2022, zuletzt geprüft am 19.01.2023.

Kidd, Chris (2020): High Rise devastated by fire in Madrid. In: *Euro Weekly News*, 30.08.2020. Online verfügbar unter <https://euroweeklynews.com/2020/08/30/high-rise-on-fire-in-madrid/>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

Koob, Simone Fox (2019): How hundreds of lives were thrown into chaos when Neo 200 caught fire. In: *The Age*, 03.05.2019. Online verfügbar unter <https://www.theage.com.au/national/victoria/how-hundreds-of-lives-were-thrown-into-chaos-when-neo-200-caught-fire-20190429-p51i62.html>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

Maier, Sigurd (2022): Forschungsprojekt LaNaSys will hybrides Brettsperrholz entwickeln - Konstruktiver Holzbau. Hg. v. www.konstruktiver-holzbau.de. Online verfügbar unter <https://www.konstruktiver-holzbau.de/2022/12/27/forschungsprojekt-lanasys-will-hybrides-brettsperrholz-entwickeln/>, zuletzt aktualisiert am 09.02.2023, zuletzt geprüft am 09.02.2023.

Moukhallati, Dana (2016): Electrical fault caused The Address Downtown Dubai hotel fire. In: *The National*, 20.01.2016. Online verfügbar unter <https://www.thenationalnews.com/uae/electrical-fault-caused-the-address-downtown-dubai-hotel-fire-1.201694>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

Reuters (2018a): Fire at Istanbul hospital under control, no casualties: governor. In: *Reuters Media*, 05.04.2018. Online verfügbar unter <https://www.reuters.com/article/us-turkey-fire-idUSKCN1HC1YY>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

Reuters (2018b): No casualties found after blaze rages through China office building. In: *Reuters Media*, 01.02.2018. Online verfügbar unter <https://www.reuters.com/article/us-china-fire-idUSKBN1FL4CP>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

Reynolds, Rory; Gautam, Shuchita; Webster, Nick (2022): Dubai fire: crews tackle major blaze at Downtown high-rise. In: *The National*, 07.11.2022. Online verfügbar unter <https://www.thenationalnews.com/uae/2022/11/07/fire-fighters-tackle-major-blaze-in-downtown-dubai-high-rise/>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

Sabah, Daily (2020): Fire breaks out in business center in Turkish capital Ankara. In: *Daily Sabah*, 27.07.2020. Online verfügbar unter <https://www.dailysabah.com/turkey/fire-breaks-out-in-business-center-in-turkish-capital-ankara/news>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

Stambaugh, Alex (2022): Major fire breaks out at 42-story skyscraper in Changsha, China. In: *CNN*, 16.09.2022. Online verfügbar unter <https://edition.cnn.com/2022/09/16/china/changsha-skyscraper-fire-intl-scli/index.html>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

The Institution of Fire Engineers (Hg.) (2023): 2015 - Baku, Azerbaijan (15 deaths). Online verfügbar unter <https://www.ife.org.uk/Incidents-of-Interest-1/2015-baku-azerbaijan-15-deaths/37306>, zuletzt aktualisiert am 09.01.2023, zuletzt geprüft am 09.01.2023.

TVN (2019): Spalona elewacja, zniszczone okna. "Od parteru aż po sam dach". In: *TVN Warszawa*, 14.08.2019. Online verfügbar unter <https://tvn24.pl/tvnwarszawa/najnowsze/spalona-elewacja-zniszczone-okna-od-parteru-az-po-sam-dach-652130>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

Yeung, Jessie; Kwon, Jake; Bae, Gawon (2020): Dozens hospitalized after fire engulfs 33-story apartment building in South Korea. In: *CNN*, 09.10.2020. Online verfügbar unter <https://edition.cnn.com/2020/10/09/asia/ulsan-korea-building-fire-intl-hnk/index.html>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

Youde, Kate (2017): Grenfell: the French connection. Hg. v. *Inside Housing*. Online verfügbar unter <https://www.insidehousing.co.uk/insight/insight/grenfell-the-french-connection-53571>, zuletzt geprüft am 08.01.2023.

Abbildungsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Abbildung 1.1	Prozentuale Änderung des Baubetriebes (auf Basis der Bauinvestitionen und der bebauten Fläche) gegenüber 2015 basierend auf (United Nations Environment Programme 2022) 2
Abbildung 1.2	Brand Grenfell Tower 2017 links (<i>Quelle: Natalie Oxford</i>) und Torre dei Moro in Mailand nach Brand 2021 rechts (<i>Quelle: Cesare Ferrari</i>) 3
Abbildung 1.3	Anzahl von Fassadenbränden weltweit, die mediale Aufmerksamkeit erfuhren; basierend auf den Daten von (Bonner und Rein 2020) 4
Abbildung 1.4	Verteilung der Fassadenbrände auf die Länder basierend auf (Spearpoint et al. 2019b) 4
Abbildung 1.5	Darstellung der drei Forschungsgebiete und der sich daraus ergebenden Kombination 6
Abbildung 2.1	Brandursache und Geschoss, in dem das Feuer vermutlich ausgebrochen ist, im Verhältnis zur Anzahl der Geschosse des Gebäudes. Die maximal mögliche Geschossanzahl, die halbe Geschossanzahl und das erste Geschoss des Gebäudes sind durch die gestrichelten Linien gekennzeichnet. Basierend auf (Spearpoint et al. 2019a; Spearpoint et al. 2019b) 9
Abbildung 2.2	Brandszenarien a) Einwirkung von außen (z. B. Feuerwerk, Brand eines benachbarten Gebäudes) b) Brand am Gebäude c) Brand im Gebäude 10
Abbildung 2.3	Flammenlängen bei Versuch V0 (nichtbrennbar) der TIMpuls-Versuchsreihe 10
Abbildung 2.4	Isothermenbilder des Temperaturfeldes ohne und mit Windeinfluss (der Umriss der Flammen entspricht etwa den 500°C – Isothermen) (Bechtold et al. 1978) 11
Abbildung 2.5	Konstruktiver Aufbau der Holztafelbau- und Massivholzbauweise, Zeichnungen basierend auf (Kaufmann et al. 2021) 19
Abbildung 2.6	Beispiele für mehrgeschossigen Holzbau, links RIO – Riem Ost München (Massivholzbauweise) (<i>Quelle: Lukas Reumschüssel</i>), rechts WA 14 Ost Prinz-Eugen-Park München (Kombination Holztafelbau- & Massivholzbauweise) 20
Abbildung 2.7	Übersicht der verschiedenen konstruktiven Ausführungen von Holzfassaden 21
Abbildung 2.8	Beispiele für Holzfassaden, links horizontale Lärchen-Stülpschalung (WA13 Prinz-Eugen-Park München), rechts vertikale Deckleistenschalung (WA15 Ost Prinz-Eugen-Park München) 22

Abbildung 2.9	Ausbildungsformen von Fassadenbegrünungen. 1) Direktbewuchs mit Selbstklimmern, bodengebunden, 2) leitbarer Bewuchs an Kletterhilfen, bodengebunden, 3) Pflanzgefäße, horizontale Vegetationsflächen, wandgebunden, 4) modulares System (Living Wall), vertikale Vegetationsflächen, wandgebunden, 5) flächiges System (Living Wall), vertikale Vegetationsflächen, wandgebunden; basierend auf (Pfoser 2018).....	23
Abbildung 2.10	Beispielhafter Aufbau eines wandgebundenen Fassadenbegrünungssystems (Living Wall) (<i>Quelle: Fa. Vertiko</i>) für ein realisiertes Projekt (Wohnhaus Glogauer Straße Berlin)	24
Abbildung 2.11	Beispiele für begrünte Fassaden, links bodengebundener Bewuchs an Kletterhilfen (Swiss Re Bürogebäude München), rechts wandgebundenes Begrünungssystem (Stadtverwaltung Venlo Niederlande); (<i>Quelle: Bundesverband GebäudeGrün</i>).....	25
Abbildung 3.1	Einfluss von Kragplatten mit oder ohne Brüstung auf das Temperaturfeld vor der Fassade (Bechtold 1977)	28
Abbildung 3.2	Darstellung der verschiedenen Brandszenarien an der Fassade und der jeweiligen relevanten Brandsperrung	29
Abbildung 3.3	Vergleich der Temperaturen der Mantelthermoelemente (TC) und der Plattenthermoelemente (PT) der vier Tests (farbig) aus (Brandon et al. 2022) mit denen der Prüfverfahren (LEPIR 2; CAN/ULC-S134-13; Assessment of Fire Performance of Facades - Large; NFPA 285; SP FIRE 105); basierend auf (Sjöström et al. 2023)	31
Abbildung 3.4	Darstellung der durchschnittlichen Flammenlängen in Abhängigkeit der Größe des Hinterlüftungsspalt und der Brennerleistung, links mit den Ereignissen aus (Karlsson et al. 1995) und rechts mit der linearen Korrelation nach (Ingason 1994); (Livkiss et al. 2018); (L) Flammenlänge, (W) Größe des Hinterlüftungsspalt und (Q') Leistung des Gasbrenners.....	34
Abbildung 3.5	Links: Fassadenprüfkörper der belüfteten Fassade (Lüftungsspaltverschluss grün gestrichelt) mit Brandlast (Holzkrippen) und Darstellung der hinterlüfteten Bereiche (rot); rechts: Vertikalschnitt des Fassadenaufbaus mit Lüftungsspaltverschluss im Geschosswechsel [Angaben in mm].....	36
Abbildung 3.6	Temperaturen zur 5., 10., 15., 20., 25. und 30. Prüfminute im Lüftungsspalt der belüfteten Fassade als Konturgrafik	37
Abbildung 3.7	Fassade (link) direkt nach Brandversuch, (rechts) nach Rückbau der Holzschalung	38
Abbildung 3.8	Grundriss und Schnitte des Brandraums „CodeRed #04“ mit Einheiten in Metern. Die gelbe Fläche zeigt die mobile Brandlast in Form von Holzkrippe und die blaue Fläche den Teil der Decke, der brandschutztechnisch wirksam bekleidet ist (Kotsovinos et al. 2023)	40
Abbildung 3.9	Temperaturentwicklung an der Fassade oberhalb der Öffnungen D1 (Door) und W1 (Window) während CodeRed #01 und CodeRed #04. Die grauen Dreiecke stellen die Positionen der Thermoelemente dar (Temperaturen dazwischen linear interpoliert) (Kotsovinos et al. 2023).....	41
Abbildung 3.10	Ansicht Fassadenprüfstand mit zugehörigen Abmessungen und Messstellen (Schoofs 2023)	46
Abbildung 3.11	Schnitt Fassadenprüfstand mit zugehörigen Abmessungen und Messstellen (Schoofs 2023)	47
Abbildung 3.12	Fotodokumentation der angeordneten Begrünung bei Test 2 (links) und Test 3 (rechts)	48
Abbildung 3.13	Fotodokumentation der Seitenansicht mit Anordnung der Begrünung und Brandsperrung	49
Abbildung 3.14	Brandeinwirkung durch drei 15 kg Holzkrippen für den Referenzversuch Test 1 (8. Prüfminute).....	49

Abbildung 3.15	QR-Code mit Links zu den Videodateien des digitalen Anhangs für Test 1, Test 2 und Test 3	50
Abbildung 3.16	Temperatur-Zeit-Diagramm für die Messstelle 250 mm unterhalb der Brandsperre für Test 1, Test 2 und Test 3	50
Abbildung 3.17	Temperatur-Zeit-Diagramm für die Messstellen in der Mittelachse des Prüfstandes oberhalb der Brandsperre für Test 1 mit Verlauf der Wärmestromdichte in Grau; Messstellenbezeichnung nach Abbildung 3.10 und Abbildung 3.11.....	51
Abbildung 3.18	Temperatur-Zeit-Diagramm für die Messstellen in der Mittelachse des Prüfstandes oberhalb der Brandsperre für Test 2 mit Verlauf der Wärmestromdichte in Grau; Messstellenbezeichnung nach Abbildung 3.10 und Abbildung 3.11.....	52
Abbildung 3.19	Temperatur-Zeit-Diagramm für die Messstellen in der Mittelachse des Prüfstandes oberhalb der Brandsperre für Test 3 mit Verlauf der Wärmestromdichte in Grau; Messstellenbezeichnung nach Abbildung 3.10 und Abbildung 3.11.....	52
Abbildung 3.20	Gegenüberstellung der Wärmestromdichte für alle drei Versuche	53
Abbildung 3.21	Fotodokumentation der Holzschalung oberhalb der Brandsperre nach Beendigung des Versuches und der Beobachtungszeit für Test 2 (links) und Test 3 (rechts)	55
Abbildung PI. 1	Brandszenarien a) Brand eines benachbarten Gebäudes b) Brand außerhalb des Gebäudes c) Brand innerhalb eines Gebäudes; Fire scenarios a) Fire of a neighboring building b) Fire outside the building c) Fire inside a building.....	64
Abbildung PI. 2	Darstellung des Schutzziel für Fassaden für Österreich – „zwei Geschosse“; Fire safety objective for facades in Austria - "two storeys"	66
Abbildung PI. 3	Darstellung des Schutzziel für Fassaden für die Schweiz - "drei Geschosse"; Fire safety objective for facades in Switzerland - "three storeys"	67
Abbildung PI. 4	Darstellung des Prüfstandes und der Bewertungskriterien der Fassadenbrandprüfung nach DIN 4102-20:2010-03 [Angaben in m]; Test bench and evaluation criteria of the facade fire test according to DIN 4102-20: 2010-03 [units in m].....	69
Abbildung PI. 5	Temperaturverteilung an der Fassade für 25±1 kg Holzkrippe [DIN 4102-20] [2]; Temperature distribution on the facade for 25 ± 1 kg wooden crib [DIN 4102-20] [2]	70
Abbildung PI. 6	Temperaturverteilung an der Fassade für 500 kg Realbrandlast Möbel [2]; Temperature distribution on the facade for 500 kg fuel load furniture [2].....	70
Abbildung PI. 7	Temperaturverteilung an der Fassade für 475 kg Holzkrippe [2]; Temperature distribution on the facade for 475 kg wooden crib [2]	70
Figure PII. 1	Overview of structural designs of wooden façades	78
Figure PII. 2	Schematic illustration of typical horizontal fire stops (projections).....	80
Figure PII. 3	Diagram showing the test duration in minute at which the façade fire tests were extinguished	82
Figure PII. 4	Various fire scenarios at the façade and representation of the relevant fire stop for a wooden façades	84
Figure PII. 5	Façade test stand with dimensions and measuring points; unit of dimensions [m]	85
Figure PII. 6	Description of the temperature measuring points [in mm]	86

Figure PII. 7	Vertical section and photo of the façade structure with visualized fire stop in Test 1 [in mm]	88
Figure PII. 8	Vertical section and photo of the façade structure in Test 2 [in mm]	88
Figure PII. 9	Vertical section and photo of the façade structure in Test 3 [in mm]	89
Figure PII. 10	Vertical section and photo of the façade structure in Test 4 [in mm]	89
Figure PII. 11	Vertical section and photo of the façade structure in Test 5 [in mm]	90
Figure PII. 12	Temperature-time diagram for measuring points [mp] 3, 4, 10, and 11 and a photo of Test 1 at minute 47.....	91
Figure PII. 13	Temperature-time diagram for measuring points [mp] 3, 4, 10, and 11 and a photo of Test 2 at minute 46.....	92
Figure PII. 14	Temperature-time diagram for measuring points [mp] 3, 4, 10, and 11 and a photo of Test 3 at minute 30.....	92
Figure PII. 15	Temperature-time diagram for measuring points [mp] 3, 4, 10, and 11 and a photo of Test 4 at minute 50.....	93
Figure PII. 16	Temperature-time diagram for measuring points [mp] 3, 4, 10, and 11 and a photo of Test 5 at minute 42.....	94
Figure PII. 17	Typical structure of a ventilated wooden façade.....	95
Figure PII. 18	Temperature-time curve measured in the rear-ventilated cavity for combustible and a non-combustible linings of the outer wall behind the façade cladding	95
Figure PII. 19	Representation of doubling up the cross lathing to avoid uncontrolled horizontal fire spread in the void cavity	97
Figure PII. 20	Design principle for blocking the lateral ends of the façade.....	98
Figure PII. 21	View of the fire stop from above with gap caused by thermal expansion	101
Figure PII. 22	Representation of the fire stops in the inner corner with jointless mechanical or welded connection (hatching).	101
Figure PII. 23	Façade as vertical cover strip cladding.....	107
Figure PII. 24	Façade as vertical tongue and groove cladding	107
Figure PII. 25	Dimensions of the wooden boards used for the tongue and groove cladding [in mm].....	107
Figure PII. 26	Photo of Test 5 at minute 28	108
Figure PII. 27	Substructure as a) vertical or b) cross-lathing	108
Figure PII. 28	Reveal lining and rain deflector site.....	108
Figure PII. 29	Anchorage depth of the screw for fixing the fire stops [in mm]	109
Figure PII. 30	Onset of charring on the substructure in Test 2.....	109
Figure PIII. 1	Heat flux measurements on the façade 2.2 m above the opening from the four tests [2] based on [13].....	114

Figure PIII. 2	Temperatures at the centerline of the mock-up façade for Scenarios 2 (left) and 3 (right) [18].....	115
Figure PIII. 3	Flame heights determined by data obtained by image analysis or visual observations [25].....	116
Figure PIII. 4	Incident heat fluxes to the façade measured at various heights above the opening soffit (CodeRed #01) [26].....	117
Figure PIII. 5	Incident heat fluxes to the façade measured at various heights above the opening soffit (CodeRed #02) [29].....	117
Figure PIII. 6	Perspective V0,V1,V2	119
Figure PIII. 7	Perspective V3 & V4	119
Figure PIII. 8	Floor plan with arrangement of the 9 wooden cribs and the four thermocouple trees (circle) for tests V0, V1, V2 [in cm].....	119
Figure PIII. 9	Floor plan with arrangement of the 18 wooden cribs and the six thermocouple trees (circle) for test V3 [in cm].....	119
Figure PIII. 10	3D-model of test V4	120
Figure PIII. 11	Floor plan with arrangement of the 18 wooden cribs and the six thermocouple trees (circle) for test V4 [in cm].....	120
Figure PIII. 12	Façade shield V0-V2 with dimensions and measuring points; unit of dimensions [m] (red ● = sheathed thermocouples, blue ■ = plate thermocouple, green ▲ = bidirectional probes).....	123
Figure PIII. 13	Façade shield V3 and V4 with dimensions and measuring points; unit of dimensions [m] (red ● = sheathed thermocouples, blue ■ = plate thermocouple, green ▲ = bidirectional probes).....	124
Figure PIII. 14	Gas temperatures for V0 in the compartment at different heights	125
Figure PIII. 15	Gas temperatures for V1 in the compartment at different heights	125
Figure PIII. 16	Gas temperatures for V2 in the compartment at different heights	125
Figure PIII. 17	Gas temperatures for V3 in the compartment at different heights	125
Figure PIII. 18	Gas temperatures for V4 in the compartment at different heights	125
Figure PIII. 19	Comparison of heat release rates V0-V4 for the floor (movable fire load).....	127
Figure PIII. 20	Comparison of heat release rates V0-V4 for the structural components (structural fire load).....	127
Figure PIII. 21	Comparison of heat release rates V0-V4 for the structural fire load derived from measured char depth at the end of the test.....	128
Figure PIII. 22	Temperature–time diagram of V0 façade for measuring points located centrally above the opening at different heights	128
Figure PIII. 23	Temperature–time diagram of V1 façade for measuring points located centrally above the opening at different heights	128
Figure PIII. 24	Temperature–time diagram of V2 façade for measuring points located centrally above the opening at different heights	129

Figure PIII. 25	Temperature–time diagram of V3 façade for measuring points located centrally above the opening at different heights	129
Figure PIII. 26	Temperature–time diagram of V4 façade for measuring points located centrally above the opening at different heights	129
Figure PIII. 27	External gas temperature development throughout the first 60 minutes of V0, V1 and V2 for the measuring points located centrally above the opening at different heights	129
Figure PIII. 28	External gas temperature development throughout the first 60 minutes of V3 and V4 for the measuring points located centrally above the opening at different heights.....	130
Figure PIII. 29	Flame heights above the opening for V0, V1 and V2	130
Figure PIII. 30	Flame heights above the opening for V3 & V4	131
Figure PIII. 31	Heat flux measured centrally above the opening at a height of 1 and 2 m for V0, V1 and V2.....	132
Figure PIII. 32	Heat flux measured centrally above the opening at a height of 1 and 2 m for V3 & V4.....	132
Figure PIII. 33	Comparison of the gas flow velocities on the façade at 1 m height of V0, V1 and V2.....	133
Figure PIII. 34	Comparison of the gas flow velocities on the façade at 2 m height of V0, V1 and V2.....	133
Figure PIII. 35	Comparison of the gas temperatures in the compartment at the plate thermocouple at a height of 230 cm.....	134
Figure PIII. 36	Comparison of the temperature-time diagrams of the plate thermocouples centered above the opening at a height of 1 and 2 m on the façade for V0, V1, V2	138
Figure PIII. 37	Comparison of the temperature-time diagrams of the thermocouples centered above the opening at a height of 3 m on the façade for V0, V1, V2	138
Figure PIII. 38	Comparison of the temperature-time diagrams of the plate thermocouples centered above the opening at a height of 1 and 2 m on the façade for V3 & V4	138
Figure PIII. 39	Comparison of the temperature-time diagrams of the thermocouples centered above the opening at a height of 3 m on the façade for V3 & V4	138
Figure PIII. 40	Results of the two methods for determining the heat release rate (mass loss vs. charring rate) for V1.....	150
Figure PIII. 41	Results of the two methods for determining the heat release rate (mass loss vs. charring rate) for V2.....	150
Figure PIII. 42	Results of the two methods for determining the heat release rate (mass loss vs. charring rate) for V3.....	150
Figure PIII. 43	Results of the two methods for determining the heat release rate (mass loss vs. charring rate) for V4.....	150
Abbildung PIV. 1	Ausbildungsformen der Fassadenbegrünung a) mit Selbstklimmer b) mit Gerüstkletterpflanzen c) wandgebundenes lineares System d) wandgebundenes modulares System; Types of facade greening a) climbing plant without frame b) climbing plants with frame c) in-line living wall d) modular living wall [2].....	153
Abbildung PIV. 2	In Anlehnung an DIN 4102-20 hergestellter Prüfstand mit 16 Temperaturmessstellen; Test stand manufactured according to DIN 4102-20 with 16 temperature measuring points.....	158
Abbildung PIV. 3	Holzkippe (20±1 kg); wooden crib (20±1 kg)	158

Abbildung PIV. 4	Versuch BV_Kriechspindel, vorher- und nachher; Fire test BV_Kriechspindel, before and after[9].....	160
Abbildung PIV. 5	Versuch BV_Blauregen, vorher- und nachher. Fire test BV_Blauregen, before and after [9].....	160
Abbildung PIV. 6	Versuch BV_Wilder Wein, vorher und nachher inkl. brennender Fackel; Fire test BV_Wilder Wein before and after incl. burning torch [9].....	161
Abbildung PIV. 7	Versuch BV_Kiwi. Stauden und Kräuter, vorher- und nachher; Fire test BV_Kiwi. Stauden und Kräuter before and after [9].....	161
Abbildung PIV. 8	Temperatur-Zeit-Diagramm Brandversuch BV_Kriechspindel; Temperature-time-diagram of fire test BV_Kriechspindel [9]	162
Figure PV. 1	Types of green façade design. 1) Direct growth with self-climbers, ground-based; 2) Growth on climbing aid/trellis, ground-based; 3) Plant boxes, horizontal vegetation surfaces, wall-based; 4) Modular system (living wall), vertical vegetation surfaces, wall-based; 5) Planar system (living wall), vertical vegetation surfaces, wall-based; based on [8].....	168
Figure PV. 2	Variation of the moisture content of foliage over a season [40].....	171
Figure PV. 3	Level of curing (fraction of dead plants) in relation to the herbaceous moisture content [51].....	172
Figure PV. 4	Ignition time (TTI) at different radiant heat fluxes and under different moisture contents (MC) for Hedera helix, Peperomia obtusifolia and Aglaonema commutatum [75].....	175
Figure PV. 5	Temperature-time diagram for a medium-scale façade fire experiment with euonymus fortune, based on [87] (Color figure online).....	176
Figure PV. 6	Temperature-time diagram (left) in the rear-ventilated void cavity in different heights (0.5 m above the fire chamber (under fire stop), 1.0 m and 1.5 m above the fire chamber (above fire stop)); photo of the test stand with arrangement of the measuring points in the rear-ventilated void cavity; based on [101].....	178
Figure PV. 7	Picture and maximum temperatures in the axis of the green façade during a full-scale fire test with climbing plants and boxes on each floor for a high-rise design.....	179
Figure PV. 8	Illustration of the SBI test stand and the plant specimen area (green)	182
Figure PV. 9	Illustration of the SBI test procedure according to EN 13823 [80].....	184
Figure PV. 10	Heat release rate for Actinidia arguta to Campsis radicans (colour figure online).....	189
Figure PV. 11	Heat release rate Celastrus orbiculatus to Fallopia baldschuanica (colour figure online) ..	189
Figure PV. 12	Heat release rate for Hedera helix to Hydrangea anomala (colour figure online).....	190
Figure PV. 13	Heat release rate for Jasminum nudiflorum to Lonicera henryi (colour figure online)	190
Figure PV. 14	Heat release rate for Parthenocissus tricuspidata to Rosa rambler (colour figure online)..	191
Figure PV. 15	Heat release rate for Vitis coignetiae to Wisteria sinensis (colour figure online).....	191
Figure PV. 16	Heat release rate for Bergenia cordifolia to Lonicera nitida (colour figure online)	192
Figure PV. 17	Illustration of total heat release and specimen mass (plant mass without trellis)	193
Figure PV. 18	Visualisation of the burnt or dried areas after the SBI tests, based on [114].....	194

Figure PV. 19	Heat release rate for Hedera helix (old) replicate specimens	196
Figure PV. 20	Comparison of the heat release rate of young and old Hedera helix.....	199
Figure PV. 21	Comparison of the heat release rate of tests in summer and winter for Actinidia deliciosa and Hedera helix	200
Figure PV. 22	Comparison of the heat release rate of tests in summer and winter for Jasminum nudiflorum and Lonicera henryi	200
Figure PV. 23	Heat release rate of a 42-day-dried, a vital young and a vital old Hedera helix compared to chipboard and plywood.....	201
Figure PV. 24	Heat release rate of a 42-day-dried and a vital Humulus lupulus compared to chipboard and plywood	201

Bildnachweis

- Abbildung 1.2 Bild Grenfell Tower: Diese Datei ist lizenziert unter der Creative Commons Attribution 4.0 International Lizenz. Quelle: Natalie Oxford https://twitter.com/nat_vampicca/status/875001457476608001
- Bild Torre dei Moro: Erworbene Lizenz zur redaktionellen Nutzung. Quelle: iStock.com/ Cesare Ferrari
- Abbildung 1.5 Bild begrünte Fassade: Quelle Susanne Schlönvogt
- Bild Holzbau, Holz-, begrünte Fassade: Quelle Bundesverband GebäudeGrün
- Abbildung 2.6 Bild RIO - Riem Ost: Quelle Lukas Reumschüssel
- Abbildung 2.10 Schnitt: Quelle: Fa. Vertiko
- Bild Ansicht: Quelle Susanne Schlönvogt
- Abbildung 2.11 Bild links und rechts: Quelle Bundesverband GebäudeGrün
- Abbildung 3.5 Bild rechts: Auf Basis Zeichnung RICHTER MUSIKOWSKI Architekten PartGmbB

Tabellenverzeichnis

	<u>Seite</u>
Tabelle 1.1	Liste bekannter Fassadenbrände der letzten drei Jahrzehnte mit Quelle und Personenschäden 5
Tabelle 2.1	Übersicht der internationalen Prüfverfahren zur Beurteilung des Brandverhaltens von Fassaden 17
Tabelle 2.2	Darstellung der Schalungsarten für Holzfassaden 22
Tabelle 3.1	Beschreibung der einzelnen Versuchsaufbauten 48
Tabelle 3.2	Ermittelte Entzündungszeiten durch Strahlung in Abhängigkeit der Wärmestromdichte unterschiedlicher Versuchsreihen für Holz 56
Tabelle 3.3	Einfluss der Dicke auf die Entzündung von Fichtenholzpaneelen; basierend auf (Babrauskas 2003) 56
Figure PIII. 11	Floor plan with arrangement of the 18 wooden cribs and the six thermocouple trees (circle) for test V4 [in cm] 120
Table PIII. 1	Description of the individual experimental set-ups 122
Table PIII. 2	Summary of the test results 135
Table PIII. 3	Comparison of the fire load densities of the tests cited in Sect.0 136
Table PIII. 4	Overview of the timber constructions 147
Table PIII. 5	Comparison of statistical fire load densities for dwellings in Europe 148
Table PIII. 6	Weather data from the weather station located directly next to the test area, shown as mean values of the minute measurements over the test period for different heights 148
Table PIII. 7	Parameters for determining the heat release rate via the charring rate 149
Tabelle PIV. 1	Liste bisher durchgeführter Brandversuche an begrünten Fassaden; List of fire tests on green facades 156
Tabelle PIV. 2	Entflammbarkeit von Kletterpflanzen untersucht im Muffelofen; Flammability of climbing plants tested in muffle furnace [13] 156
Tabelle PIV. 3	Übersicht der Versuchsergebnisse aus; Overview of the test results from [10] 157
Tabelle PIV. 4	Übersicht der durchgeführten Brandversuche; Overview of the conducted fire tests 157

Tabelle PIV. 5	Übersicht der Versuchsergebnisse; Overview of test results.....	162
Table PV. 1	Guidelines for estimating foliage moisture content [50].....	172
Table PV. 2	Details of the Sand-box-burner [80].....	183
Table PV. 3	Results of the FireSafeGreen SBI tests.....	186
Table PV. 4	Results of the replicate SBI-tests	195
Table PV. 5	Results of the eleven SBI tests for different living walls.....	217
Table PV. 6	Results of the 11 fire tests based on [90] and [91]	218
Table PV. 8	List of the most important plant characteristics based on [8], [11], [12], an unpublished document of the company Vertiko and own research.....	222
Table PII. 1	Minimum projection of horizontal fire stops depending on the type of cladding [13].....	81
Table PII. 2	Dimensions of the overhang/projection for fire stops depending on the type of cladding [14]	82
Table PII. 3	Dimensions of the overhang of fire stops according to the type of cladding and the material of the external wall behind the wooden façade [19].....	83
Table PII. 4	Description of the individual experimental set-ups	87
Table PII. 5	List of experimental observations over time	91
Table PII. 6	Overhang x depending on the various types of cladding for wooden façades.....	100
Table PII. 7	Weather data of the individual fire tests.....	109
Table PIII. 1	Description of the individual experimental set-ups	122
Table PIII. 2	Summary of the test results.....	135
Table PIII. 3	Comparison of the fire load densities of the tests cited in Sect.0	136
Table PIII. 4	Overview of the timber constructions.....	147
Table PIII. 5	Comparison of statistical fire load densities for dwellings in Europe	148
Table PIII. 6	Weather data from the weather station located directly next to the test area, shown as mean values of the minute measurements over the test period for different heights.....	148
Table PIII. 7	Parameters for determining the heat release rate via the charring rate.....	149
Tabelle PIV. 1	Liste bisher durchgeführter Brandversuche an begrünten Fassaden; List of fire tests on green facades.....	156
Tabelle PIV. 2	Entflammbarkeit von Kletterpflanzen untersucht im Muffelofen; Flammability of climbing plants tested in muffle furnace [13].....	156
Tabelle PIV. 3	Übersicht der Versuchsergebnisse aus; Overview of the test results from [10].....	157
Tabelle PIV. 4	Übersicht der durchgeführten Brandversuche; Overview of the conducted fire tests	157

Tabelle PIV. 5	Übersicht der Versuchsergebnisse; Overview of test results	162
Table PV. 1	Guidelines for estimating foliage moisture content [50].....	172
Table PV. 2	Details of the Sand-box-burner [80]	183
Table PV. 3	Results of the FireSafeGreen SBI tests	186
Table PV. 4	Results of the replicate SBI-tests	195
Table PV. 5	Results of the eleven SBI tests for different living walls	217
Table PV. 6	Results of the 11 fire tests based on [90] and [91]	218
Table PV. 7	Values defined in accordance with EN 13823 [80].....	219
Table PV. 8	List of the most important plant characteristics based on [8], [11], [12], an unpublished document of the company Vertiko and own research	222