



Schlussbericht FireSafeGreen

Untersuchung der brandschutztechnischen Anwendbarkeit von
begrüntem Fassaden an mehrgeschossigen Gebäuden

von
Dr. Thomas Engel
Johannes Kahler
Prof. Dr. Swantje Duthweiler
Prof. Dr. Stefan Winter

Impressum

Autorinnen und Autoren

Dr.-Ing. Thomas Engel¹ (Projektleiter)

Johannes Kahler M.Sc.¹

Prof. Dr.-Ing. Swantje Duthweiler²

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter¹

¹ Technische Universität München; TUM School of Engineering and Design; Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion; ✉ engel@tum.de

² Hochschule Weihenstephan-Triesdorf; Fakultät Landschaftsarchitektur; Pflanzenverwendung und wissenschaftliche Leiterin der Weihenstephaner Gärten

Unterstützung durch Abschlussarbeiten und studentische Hilfskräfte

Alexander Graw M.Sc.

Nils Schoofs M.Sc.

Max Thiele

Stand

Januar 2025

Zitierweise

Engel, Thomas; Kahler, Johannes; Duthweiler, Swantje; Winter, Stefan (2025) Schlussbericht FireSafeGreen - Untersuchung der brandschutztechnischen Anwendbarkeit von begrünten Fassaden an mehrgeschossigen Gebäuden; Technische Universität München; <https://doi.org/10.14459/2024md1759976>

Weitere Veröffentlichungen

Weiterführende Informationen und Zusammenfassungen können auch [1] bis [16] entnommen werden.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUKUNFT BAU
FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Dieses Projekt wurde gefördert vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Auftrag des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMWSB) aus Mitteln des Innovationsprogramms Zukunft Bau.

Aktenzeichen: 10.08.18.7-21.46

Kurzfassung

Das Projekt "FireSafeGreen" untersuchte die brandschutztechnische Eignung von begrünten Fassaden an mehrgeschossigen Gebäuden. Die Begrünung von Fassaden trägt zur nachhaltigen Stadtentwicklung bei. Gleichzeitig birgt sie Risiken durch die potenzielle Brandausbreitung entlang der Fassaden. Brände im Fassadenbereich sind die häufigste Ursache für sich rasch ausbreitende Gebäudebrände und verantwortlich für bedeutende Schäden und Verluste. Ziel des Projekts war es, die Wechselwirkungen zwischen Vegetation, Gebäudestrukturen und Brandschutz zu analysieren und praxisnahe Empfehlungen für die sichere Planung und Pflege begrünter Fassaden abzuleiten. Im Fokus standen experimentelle Untersuchungen in Form von klein- und mittelmaßstäblichen Tests zur Bewertung des Brandverhaltens und der Brandausbreitung sowie großmaßstäbliche Fassadenbrandversuche. Wesentliche Parameter wie Pflanzenart, Pflegezustand und Feuchtigkeitsgehalt wurden detailliert untersucht. Der Schwerpunkt der Untersuchung lag auf Kletterpflanzen an Rankhilfen. Ein Vergleich der Wärmefreisetzungsrate aller untersuchten Pflanzen zeigt ein ähnliches Verhalten. Im Verlauf der Brandeinwirkung kommt es zu kurzen Spitzen in der Wärmefreisetzung. Diese Spitzen sind „Strohfeuer“, die auftreten, wenn Teile der Pflanzen aufgrund der Flammeneinwirkung austrocknen und sich dann entzünden. Die Pflanzenart selbst hatte keinen wesentlichen Einfluss auf das Brandverhalten. Es wurden acht Brandversuche in Originalgröße unter realistischen Bedingungen durchgeführt. Die vertikale Brandausbreitung entlang der Fassade wurde quantifiziert und die Auswirkungen des Wärmeflusses auf umliegende Gebäudekomponenten wie Wände, Fenster, Balkone und Dachüberstände wurden bewertet. Eine horizontale Brandausbreitung trat bei den Untersuchungen der vitalen Pflanzen nur in sehr begrenztem Umfang auf. Sie waren selbstverlöschend. Der entscheidende Faktor bei der Beurteilung der Entzündbarkeit ist der Feuchtigkeitsgehalt der Pflanzen. Bei getrockneten Pflanzen kommt es zu Beginn zu einer abrupten Wärmefreisetzung. Ausgetrocknete Pflanzen sowie ungepflegte Pflanzen mit einem hohen Anteil an Totholz stellen folglich den kritischsten Fall dar. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass gut gepflegte Grünfassaden unabhängig von der Vitalität der Pflanzen ein geringeres Risiko darstellen. Die Pflege bleibt der Schlüssel für brandsichere Grünfassaden. Zu den Empfehlungen gehören die Einhaltung bestimmter Abstände zu brennbaren Materialien, die Gewährleistung einer ordnungsgemäßen Pflege und die Verwendung nicht brennbarer Kletterhilfen.

Abstract

The 'FireSafeGreen' project investigated the fire safety of green facades on multi-storey buildings. The greening of facades contributes to sustainable urban development. At the same time, it carries risks due to the potential fire spread along the facades. Fires in the facade area are the most common cause of rapidly spreading building fires and are responsible for significant damage and loss. The project aimed to analyse the interactions between vegetation, building structures and fire protection, and to develop practical recommendations for the safe planning and maintenance of green facades. The focus was on experimental investigations in the form of small- and medium-scale tests to evaluate fire behaviour and propagation, as well as large-scale facade fire tests. Key parameters such as plant species, maintenance and moisture content were examined in detail. The focus of the study was on climbing plants on trellises. A comparison of the heat release rate of all the plants examined shows similar behaviour. During the fire, there are short peaks in heat release. These peaks are 'flare-ups' that occur when parts of the plants dry out due to the effects of the flames and then ignite. The plant species itself had no significant influence on the fire behaviour. Eight full-scale fire tests were carried out under realistic conditions. The vertical spread of fire along the façade was quantified, and the effects of heat flow on surrounding building components such as walls, windows, balconies and roof overhangs were assessed. In the investigations of vital plants, horizontal fire spread occurred only to a minimal extent. They were self-extinguishing. The decisive factor in determining ignitability is the moisture content of the plants. In dried plants, heat is abruptly released at the beginning. Dried-out plants and unkempt plants with a high proportion of dead wood represent the most critical case. The study concludes that well-maintained green facades pose a lower risk regardless of the vitality of the plants. Maintenance remains the key to fire-safe green walls. Recommendations include maintaining certain distances from combustible materials, ensuring proper maintenance and using non-flammable climbing aids.

Inhaltsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Kurzfassung.....	III
Abstract.....	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Problemstellung	1
1.3 Zielsetzung	2
1.4 Aufbau	4
2 Grundlagen.....	5
2.1 Begrünte Fassaden.....	5
2.2 Stand der Technik.....	8
2.2.1 Allgemein	8
2.2.2 Untersuchungen zur Entflammbarkeit von Pflanzen für begrünte Fassaden	8
2.2.3 Brandversuche an begrünten Fassaden	9
2.3 Pflanzenkunde und Pflanzenauswahl für die Brandversuche	16
2.3.1 Allgemein	16
2.3.2 Bodengebundene und wandgebundene Begrünungsformen	16
2.3.3 Kategorisierung in Wuchsgrößen und Ausdauer der Belaubung von Kletterpflanzen	18
2.3.4 Auswahl der Kletterpflanzenarten für die Brandversuche.....	19
3 Grundlagen und experimentelle Untersuchung zur Entzündbarkeit von Pflanzen für Grünfassaden.....	21
3.1 Grundlagen Entflammbarkeit und Entzündbarkeit von Pflanzen.....	21
3.2 Ziel der Untersuchung.....	26
3.3 Versuchsaufbau.....	27
3.4 Versuchsdurchführung.....	29
3.5 Messtechnik.....	30

3.6	Ergebnisse der SBI Test	31
3.7	Diskussion	41
3.7.1	Allgemein.....	41
3.7.2	Die Rolle der Pflanzenart.....	43
3.7.3	Vitale, gepflegte Pflanzen	44
3.7.4	Vergleich junge vs. alte Pflanzen	44
3.7.5	Die Rolle der saisonalen Einflüsse.....	45
3.7.6	Trockene Pflanzen.....	46
3.7.7	Die Rolle der ätherischen Öle	48
3.8	Fazit.....	48
3.9	Anhang	51
4	Begrünte Fassaden in Kombination mit Holzfassaden	59
4.1	Ziel der Untersuchung.....	59
4.2	Prüfstand und Brandlast.....	59
4.3	Messtechnik.....	61
4.4	Prüfkörper	61
4.5	Versuchsdurchführung.....	63
4.6	Ergebnisse.....	64
4.7	Diskussion	68
4.8	Fazit.....	72
5	Großmaßstäbliche Fassadenbrandversuche und Maßnahmen zur brandschutztechnisch sicheren Gestaltung von grünen Fassaden mit Kletterpflanzen an Rankhilfen	73
5.1	Ziel der Studie.....	73
5.2	Versuchsaufbau	75
5.2.1	Allgemein.....	75
5.2.2	Prüfstand und Versuchsaufbau.....	76
5.2.3	Brandlast	84
5.3	Versuchsdurchführung.....	86

5.4	Messtechnik.....	86
5.5	Ergebnisse der großmaßstäblichen Brandversuche.....	92
5.5.1	Temperatur.....	92
5.5.2	Wärmestromdichte	104
5.5.3	Brandweiterleitung.....	109
5.5.4	Flammenhöhen	113
5.5.5	Versuchsbeobachtungen.....	114
5.6	Diskussion	115
5.6.1	Allgemein	115
5.6.2	Brandweiterleitung.....	116
5.6.3	Einfluss der Pflanzenarten.....	117
5.6.4	Einfluss der toten, getrockneten Pflanzen.....	117
5.6.5	Auswirkung von Temperatur und Wärmestrom auf angrenzende Gebäudekomponenten	118
5.6.6	Die Rolle der Pflege und Wartung von Pflanzen	126
5.7	Fazit.....	127
5.8	Anhang	129
6	Zusammenfassung und Ausblick	135
	Literaturverzeichnis.....	139
	Abbildungsverzeichnis.....	157
	Tabellenverzeichnis.....	163
	Anlage	165
	Anlage 1: Pflanzensteckbriefe.....	166
	Anlage 2: Temperatur-Zeit-Diagramme der Großversuche.....	188
	Anlage 3: Wärmestromdichte-Zeit-Diagramme der Großversuche - ungeglättet.....	230

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Umgang mit der Urbanisierung spielt 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 [17]. Der daraus resultierende Bedarf an einer nachhaltigen Stadtentwicklung erfordert ein ausreichendes Angebot an Grün- und Erholungsflächen. Der zunehmende Mangel an bezahlbarem Wohnraum [18] und die damit einhergehende Nachverdichtung stehen jedoch der Schaffung neuer öffentlicher Grünflächen oft entgegen und fordern die Stadtplanung entsprechend heraus.

Der Wärmeinsel-Effekt (engl. Urban Heat Island) erschwert eine nachhaltige Urbanisierung weiter: Die Speicherung von Sonnenwärme in der Bausubstanz und Bodenoberfläche, die Behinderung und Wiederabsorption der nächtlichen langwelligeren 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. [19]

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. [20], [21]

1.2 Problemstellung

Eine signifikante Brandausbreitung erfolgt am häufigsten über die Fassade [3], [22], [23]. Auch die Statistiken der deutschen Feuerwehren belegen dies [24], [25]. 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. Die auf Vorschriften und Tests basierende Methodik für die Bewertung des Brandverhaltens von Fassaden variiert von Land zu Land erheblich [3]. [27]

und [28] 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.

Fassadenbrandschutz ist folglich ein Schlüsselthema für die Brandsicherheit von Gebäuden weltweit [3]. Umso wichtiger ist es, zu untersuchen, welchen Einfluss begrünte Fassaden auf die Brandweiterleitung entlang der Fassade haben.

1.3 Zielsetzung

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

Die übergeordneten Forschungsfragen sind:

- 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 Selbstverlöschten 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?
- Welche Wechselwirkungen treten bei Gebäuden auf, bei denen mindestens zwei der drei Punkte – Holzfassade, begrünte Fassade und mehrgeschossiger Holzbau – in Kombination vorliegen?
- Reicht der Wärmestrom einer brennenden begrünten Fassade aus, um eine dahinterliegende Holzfassadenverkleidung zu entzünden?
- Beeinflusst eine brennende begrünte Fassade die Wirksamkeit von Brandsperren bei Holzfassaden negativ?
- Führt eine begrünte Fassade im Bereich von Brandsperren zu einem Zündschnurreffekt?
- Welche konstruktiven Prinzipien sind bei einer Kombination aus brandschutztechnischer Sicht notwendig?
- Wie beeinflusst die Wärmeabgabe von trockenen Pflanzenteilen die Außenwand, Fenster und dahinterliegende Bereiche?
- Reicht der Wärmestrom einer trockenen grünen Fassade (Worst Case) aus, um bei geöffneten Fenstern Einrichtungsgegenstände direkt an der Öffnung innerhalb des Gebäudes zu entzünden?
- Welche Auswirkungen hat der Wärmestrom der brennenden grünen Fassade auf umliegende Bauteile wie Außenwände, Fenster, Balkone und Dachüberstände und welches Risiko ist damit verbunden?

- Wie unterscheiden sich vitale und trockene (abgestorbene) Pflanzen hinsichtlich des Brandverhaltens, und welches Risiko stellen die kurzzeitigen Strohfeuer trockener Pflanzenteile für die Entzündung angrenzender Gebäudeteile dar?

1.4 Aufbau

KAPITEL 1 beschreibt den steigenden Bedarf an nachhaltigem und ökologischem Bauen im Zusammenhang mit einer städtischen Entwicklung. Zusätzlich werden die brandschutztechnischen Schwierigkeiten bei Fassadenbränden beleuchtet.

KAPITEL 2 bietet eine umfassende Einführung in die Grundlagen begrünter Fassaden, einschließlich ihrer Typen und Bauweisen. Es beleuchtet den aktuellen Stand der Technik und Forschung im Bereich Brandschutz für begrünte Fassaden. Zudem werden pflanzliche Grundlagen wie Artenvielfalt und spezifische Anwendungsbereiche erläutert, um die wesentlichen Grundlagen für das Forschungsvorhaben bereitzustellen.

KAPITEL 3 beschreibt eine experimentelle Versuchsreihe zur Untersuchung des Brandverhaltens der Pflanzen für begrünte Fassaden. Es liefert eine Übersicht über den Stand der Forschung, erläutert die Methodik und Versuchsabläufe und präsentiert die Ergebnisse. Abschließend werden die Ergebnisse diskutiert und in einem Fazit zusammengefasst.

KAPITEL 4 stellt eine weitere experimentelle Versuchsreihe vor, die mittelmaßstäbliche Brandversuche umfasst. Der Fokus liegt auf der Analyse und Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen Holz- und begrünten Fassaden im Brandfall. Das Kapitel erläutert den Versuchsaufbau und die Methodik, präsentiert die Ergebnisse und schließt mit einer Diskussion und einem Fazit zu diesem Themenfeld.

KAPITEL 5 präsentiert die abschließenden großmaßstäblichen Brandversuche, die auf den Erkenntnissen der klein- und mittelmaßstäblichen Untersuchungen aufbauen. In acht realitätsnahen Versuchen werden die zuvor gewonnenen Ergebnisse unter praxisnahen Bedingungen überprüft. Das Kapitel beschreibt den vollständigen Versuchsablauf, analysiert die Ergebnisse und diskutiert konkrete Maßnahmen und Schlussfolgerungen. Abschließend wird das Forschungsthema zusammengefasst und der Umgang mit Kletterpflanzen an Rankhilfen für die praktische Anwendung abschließend bewertet.

KAPITEL 6 fasst die zentralen Ergebnisse des Forschungsberichts zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Forschungsschwerpunkte. Es reflektiert die gewonnenen Erkenntnisse und zeigt potenzielle Anwendungen sowie offene Fragestellungen im Bereich Brandschutz und begrünte Fassaden auf.

2 Grundlagen

2.1 Begrünte Fassaden

Begrünte Fassaden werden zunehmend populärer [35]. Der Begriff begrünte Fassaden ist, wie in [113] und [130] ausgeführt, ein Überbegriff für sehr unterschiedliche konstruktive Ausführungen von Fassadenbegrünungen. Abbildung 2.1 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. [34], [37], [38], [39]

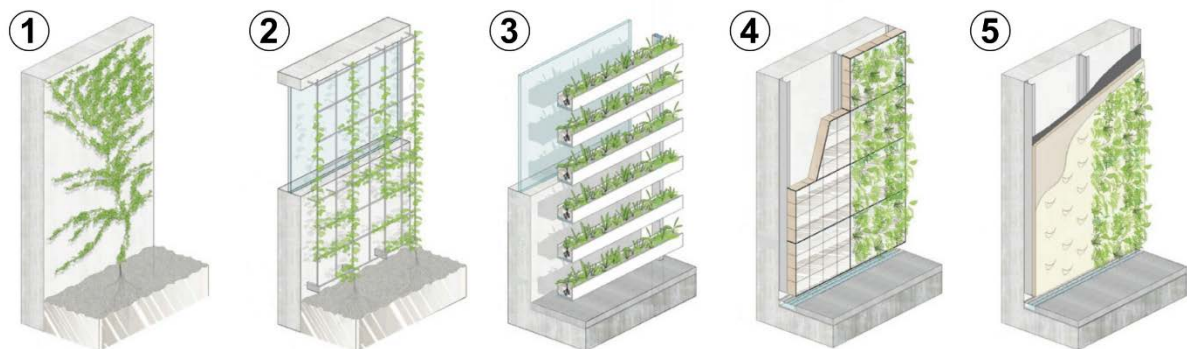


Abbildung 2.1 Ausbildungsformen von Fassadenbegrünungen. 1) Direktbewuchs mit Selbstklimmern, bodengebunden, 2) leitbarer Bewuchs an Kletterhilfen, bodengebunden, 3) Pflanzgefäße, horizontale Vegetationsflächen, wandgebunden, 4) modulares System (Living Wall), vertikale Vegetationsflächen, wandgebunden, 5) flächiges System (Living Wall), vertikale Vegetationsflächen, wandgebunden; basierend auf [34]

Für bodengebundene Begrünungen an Kletterhilfen haben sich je nach Dickenwuchs (Wüchsigkeit) Wandabstände von 50 bis 200 mm zur Kletterhilfe etabliert [34], [38]. Ein ausreichender Abstand ist neben der Wüchsigkeit der Pflanze auch aufgrund der sonst möglichen Überhitzung der Gerüstkletterpflanze durch die Außenwand notwendig [34]. Auch das Rastermaß der Kletterhilfe muss der Kletterstrategie und Haltetechnik der Pflanze angepasst sein [223]. 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 [34], [38]. 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 [34], [37]. 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 2.2 zeigt beispielhaft den Aufbau eines wandgebundenen Fassadenbegrünungssystems (Living Wall).

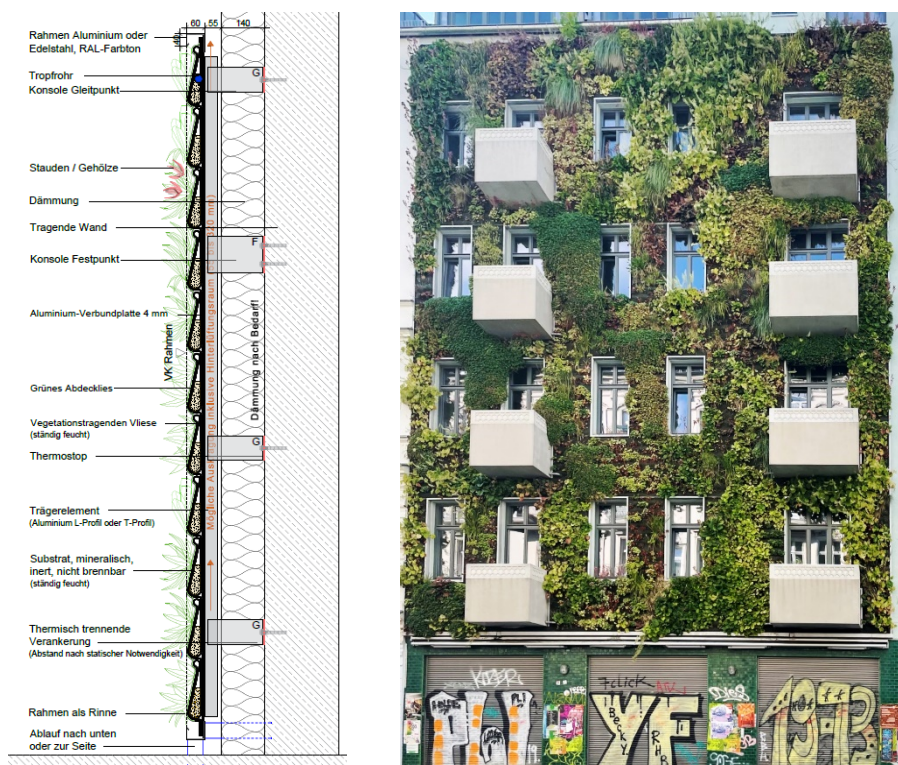


Abbildung 2.2 Beispielhafter Aufbau eines wandgebundenen Fassadenbegrünungssystems (Living Wall) (Quelle: Fa. Vertiko) für ein realisiertes Projekt (Wohnhaus Glogauer Straße Berlin)

Die Verwendung von Kletterpflanzen zur Fassadenbegrünung weist viele regionale Besonderheiten auf [34], [37], [38], [39]. Das Artenpotenzial für Kletterpflanzen in der "DACH-Region" (Deutschland (D), Österreich (A) und Schweiz (CH)) umfasst ca. 150 Arten und Sorten [39]. 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 [39].

Das Spektrum der möglichen Pflanzenarten für wandgebundene Begrünungssysteme ist wesentlich umfangreicher. Für die DACH-Region werden in [38] ca. 100 Arten und Sorten aufgeführt. Zu unterscheiden sind Stauden, Gräser und Klettergehölze [34], [37], [38], [39].

Die wichtigsten Merkmale für die Kategorisierung der Pflanzen sind, wie in [1] beschrieben, sommergrün, wintergrün, immergrün und das Vorhandensein einer negativen phototropen (lichtfliehenden) Eigenschaft [34], [37], [38], [39].

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 Eigenschaft ist Efeu (*Hedera helix*) [34], [37], [38], [39].

Abbildung 2.3 zeigt ein Beispiel für ein realisiertes wandgebundenes Begrünungssystem (rechts) und eine begrünte Fassade in Form eines bodengebundenen Bewuchses an Kletterhilfen (links).



Abbildung 2.3 Beispiele für begrünte Fassaden, links bodengebundener Bewuchs an Kletterhilfen (Swiss Re Bürogebäude München), rechts wandgebundenes Begrünungssystem (Stadtverwaltung Venlo Niederlande); (Quelle: Bundesverband GebäudeGrün)

2.2 Stand der Technik

2.2.1 Allgemein

Insgesamt sind die wissenschaftlichen Erkenntnisse über das Brandverhalten von begrünten Fassaden sehr begrenzt. Aus diesem Grund erscheint es hilfreich, ähnliche Modelle aus der Waldbrandforschung heranzuziehen. So können beispielsweise Studien das Brandausbreitungsverhalten von Baumkronenbränden erste Erkenntnisse liefern [99], [100]. Ein Oberflächenbrand geht in einen Kronenbrand über, wenn die Intensität des Oberflächenbrandes einen kritischen Wert überschreitet, der durch die Eigenschaften des brennenden Materials in der Krone bestimmt wird [100]. Die Zündenergie wird durch den Feuchtigkeitsgehalt des Laubes beeinflusst. Weitere Einflussfaktoren sind die Windgeschwindigkeit, der Abstand zwischen der Krone und dem Feuer sowie die Dichte der Krone [99], [100].

Die Studien zeigen, dass Wind die Brandausbreitung erhöht, was sich in der Zunahme der Wärmefreisetzungsrate, der Ausbreitungsgeschwindigkeit und der Flammenhöhe bei windgetriebenen Bränden im Vergleich zu nicht windgetriebenen Bränden widerspiegelt [99]. Je größer der Abstand zwischen der Krone und der Oberfläche ist, desto langsamer breitet sich das Feuer auf die Kronen aus [99]. Eine höhere Kronendichte (Vegetationsmasse) führt zu einem langsameren Durchgang der heißen Brandgase durch die Kronen, was zu einer stärkeren Erwärmung aufgrund erhöhter Konvektion und einer höheren Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Laubentzündung beiträgt [100].

Diese Ergebnisse zeigen, dass der Feuchtigkeitsgehalt, die Pflanzendichte und der Wind einen entscheidenden Einfluss auf die Brandausbreitung haben können und bei weiteren Untersuchungen von begrünten Fassaden berücksichtigt werden müssen.

2.2.2 Untersuchungen zur Entflammbarkeit von Pflanzen für begrünte Fassaden

Dahanayake et al. [101] untersuchten den Einfluss des Feuchtigkeitsgehalts von Pflanzen auf ihre Entzündbarkeit und Brandgefahr. Zu diesem Zweck wurden die drei verschiedenen Pflanzen *Hedera helix*, *Peperomia obtusifolia* und *Aglaonema commutatum* in Cone-Kalorimeter [102] untersucht, wobei unterschiedliche Feuchtigkeitsgehalte beim Trocknungsprozess berücksichtigt wurden. Frische Pflanzenexemplare aller drei Arten entzündeten sich bei den im Test verwendeten Wärmestromdichten (von 20 kW/m² bis 60 kW/m²) nicht. Der Feuchtigkeitsgehalt der frischen lebenden Pflanzen wies Unterschiede auf; *Hedera helix* hatte den niedrigsten Feuchtigkeitsgehalt von 326 %, während *Peperomia obtusifolia* und *Aglaonema commutatum* einen Gehalt von 1 371 % bzw. 1 150 % aufwiesen. Die Pflanzenteile begannen sich zu entzünden, sobald ihr Feuchtigkeitsgehalt einen bestimmten Wert erreicht hatte, wie in Abbildung 2.4 zu sehen ist. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass gesunde und lebendige Pflanzen die wichtigste Grundlage für die Gewährleistung eines minimalen Brandrisikos sind [101].

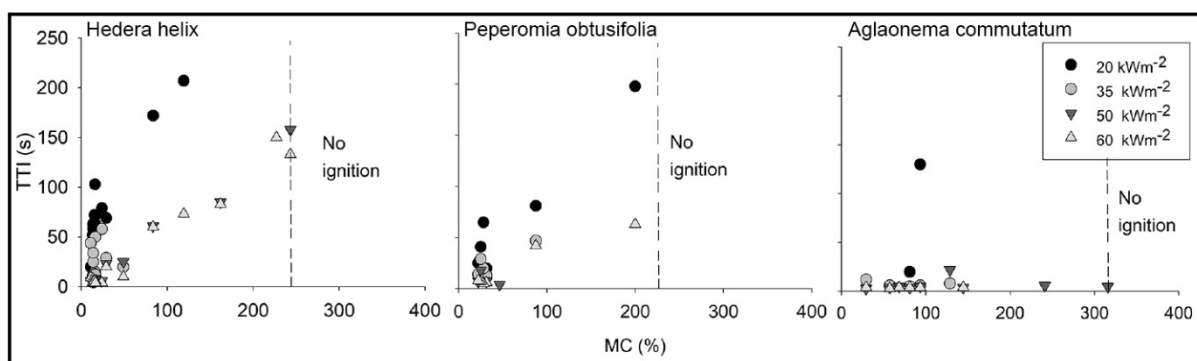


Abbildung 2.4 Entzündungszeit (TTI) bei verschiedenen Wärmestrahlungsflüssen und unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalten (MC) für *Hedera helix*, *Peperomia obtusifolia* und *Aglaonema* [101]

An der Universität Wien wurde im Rahmen von Studentenprojekten das Brandverhalten von Pflanzen für begrünte Fassaden in einem Muffelofen untersucht. Die ausgewählten Pflanzen wurden in [103] bei einer konstanten Temperatur von ca. 850 °C und in [104] bei unterschiedlichen Temperaturen in einem Muffelofen thermisch beaufschlagt. Ziel war es, Zeitpunkt und Dauer der Rauch- und Brandentwicklung zu ermitteln. Obwohl Unterschiede festgestellt wurden, wurden 65 % und damit die Mehrheit der getesteten Pflanzenarten als "leicht entflammbar" [103] eingestuft.

Das Department for Communities and Local Government [105] in London führte Cone-Kalorimeter-Tests an Proben einer wandgebundenen Begrünung (Living Wall) durch. Die Substratunterkonstruktion bestand aus Torf mittlerer Konsistenz, Kokosfasern mit Zusatz von Holzfasern, Perlit, Nährstoffen auf Kalkbasis und kontrolliert freigesetztem Dünger mit Zusatz von Feuchtwasser und Insektenbekämpfungsmittel. Das Material für die drei Tests wurde in einem Ofen bei 40 °C getrocknet, bevor Cone-Kalorimeter-Versuche bei 50 kW/m² durchgeführt wurden. Bei keinem der Tests wurde eine Entzündung beobachtet [105].

2.2.3 Brandversuche an begrünten Fassaden

Das Department for Communities and Local Government [105] bezieht sich auch auf fünf Single Burning Item Tests (SBI) [106] an wandgebundenen Systemen. Die Tests wurden mit Living Walls durchgeführt. Allerdings wurden in diesen Systemen keine Pflanzen angeordnet. Alle Tests mussten vor Erreichen der 10-Minute abgebrochen werden. In drei der Tests erreichte die Wärmeabgabe mehr als 350 kW, und in zwei Tests kollabierten die Probekörper auf den Brenner. Insgesamt sind diese Tests aufgrund der reinen Prüfung des einen herstellereigenen Living Wall-Systems ohne Begrünung sehr herstellereigen und daher nicht sehr aussagekräftig [105].

Darüber hinaus haben einige Hersteller SBI-Brandversuche [106] für ihre Living Walls [107] - [112]. durchgeführt. Eine Beschreibung der Probekörper und die Ergebnisse der elf Tests finden sich im Anhang in Abschnitt 3.9. Insgesamt wurden drei verschiedene Arten von Living Walls von unterschiedlichen Herstellern getestet. Einige mit Pflanzen, einige ohne.

Engel et al. [113] untersuchten die Entflammbarkeit begrünter Fassaden in vier mittelmaßstäblichen Brandversuchen im Rahmen eines studentischen Forschungsprojekts [114]. Der Fassadenprüfstand bestand aus einer 4 m hohen und 2 m breiten Konstruktion mit einer Brandkammer in der Mitte des unteren Bereichs. Als Begrünung wurden Kriechspindel (*Euonymus fortunei*), Blauregen (*Wisteria floribunda*), Wilder Wein (*Parthenocissus quinquefolia*) und eine Pflanzenmischung aus Kräutern und Sträuchern (typisch für wandgebundene Systeme) verwendet. Bei den Versuchen brannten einige Pflanzenarten mehr, weniger oder gar nicht. Die Versuche sind aufgrund der unterschiedlichen Pflanzenmengen nicht direkt miteinander vergleichbar, liefern aber erste Erkenntnisse. Wenn eine Pflanze aktiv brannte oder eine begrenzte vertikale Brandausbreitung stattfand, geschah dies durch ein kurzes Aufflammen ausgetrockneter Teile, wie in Abbildung 2.5 (11. Min) dargestellt. Eine horizontale Brandausbreitung fand nicht statt. Die Pflanzen erloschen von selbst, nachdem das Primärfeuer beendet wurde [113].

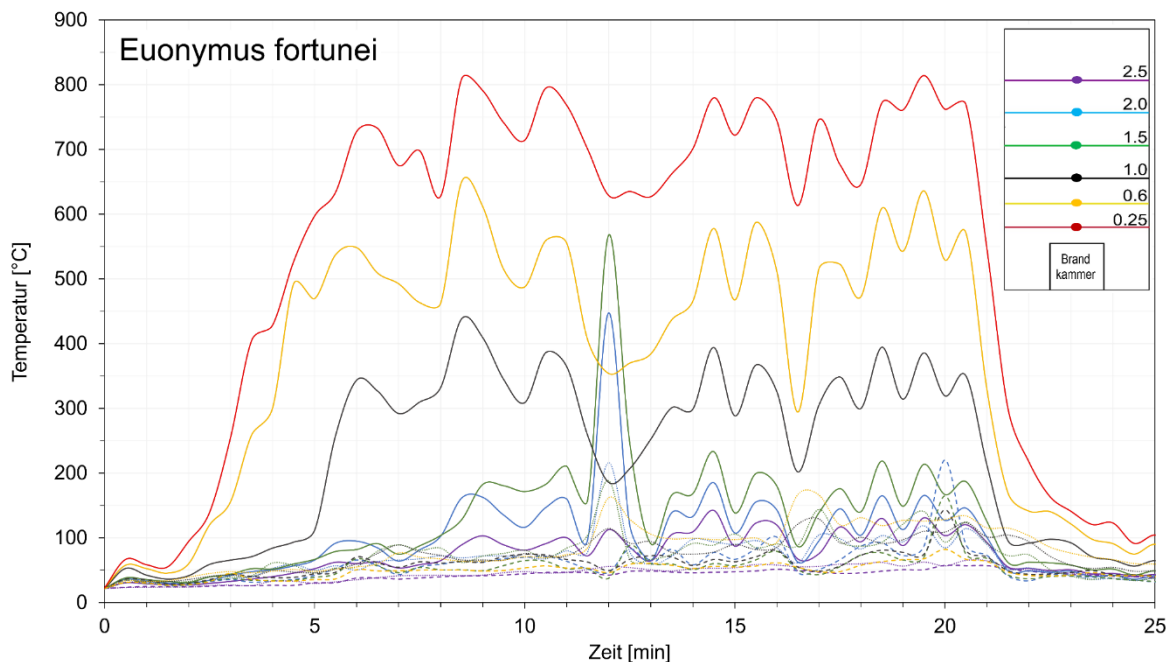


Abbildung 2.5 Temperatur-Zeit-Diagramm für einen mittelmaßstäblichen Fassadenbrandversuch mit *Euonymus fortunei*, basierend auf [113]

Werner et al. veröffentlichten 2018 eine erste Studie [115] mit vier großmaßstäblichen Fassadenbrandversuchen und 2020 eine zweite Studie [116] mit sieben großmaßstäblichen Fassadenbrandversuchen. Diese Brandversuche stellen derzeit die größte Datenbasis für dieses Forschungsthema dar. Daher können die meisten technischen Spezifikationen in Richtlinien, insbesondere in Europa, auf diese Ergebnisse [118] -[121] zurückgeführt werden. Als Grundlage für die Fassadenbrandversuche wurde die ÖNORM B 3800-5 [122] herangezogen. Der Probekörper für den Fassadenprüfstand bestand aus einer 5 m hohen Innenecke mit einem Fassadenschenkel von 3 m Breite und einem schmaleren Fassadenschenkel von 1,5 m Breite. Die Brandkammer (1 m x 1 m) befand sich direkt in der inneren Ecke des längeren Fassadenschenkels. Als Brandlast wurden Holzkrippen verwendet. Die detaillierten Versuchsaufbauten und die Ergebnisse sind in Tabelle 2.1 und [1] aufgeführt. In der ersten Studie [115] wurden bodengebundene Grünfassaden untersucht. Die Studie variierte zwischen direktem Bewuchs

mit Selbstklimmern und Bewuchs an Kletterhilfen/Rankgittern und hinsichtlich der vertikalen Abstände zwischen den Pflanzen und dem Brandraum. Bei allen Versuchen erfolgte die vertikale Brandausbreitung in Form eines wiederkehrenden kurzzeitigen Abbrennens von getrockneten Pflanzenteilen (mehrfach kurzes Aufflammen). Nach Angaben der Autoren beginnt der Abbrand der Pflanzen bei Temperaturen von ca. 500°C und mehr. Aufgrund der Erkenntnisse in Abschnitt 3.1 müssen diese Werte jedoch kritisch hinterfragt werden. Eine horizontale Brandausbreitung fand nicht statt. Nach Versuchsende erfolgte eine Selbstverlöschung. In der zweiten Studie [116] wurden auch wandgebundene Living Walls bzw. wandgebundene Systeme mit Pflanzkästen jeweils mit und ohne Brandriegel untersucht. Bei den bodengebundenen Fassadenbegrünungen mit Kletterhilfen und Spalieren stand der Abstand zwischen Kletterhilfe und Prüfstandwand im Vordergrund. Wurde ein Brand an der begrünten Fassade nicht durch technische Maßnahmen (überstehendes Stahlblech direkt über dem Brandraum) verhindert, verlief der Brand der begrünten Fassade wie in der ersten Studie. Die Ergebnisse liefern eine wichtige Grundlage für die allgemeine Einstufung begrünter Fassaden bezogen auf den Brandschutz, sind aber auch im Hinblick auf die in der Realität anzutreffenden Rahmenbedingungen kritisch zu sehen. Der Grund dafür ist, dass der Fassadenbrandversuch nach ÖNORM B 3800-5 [122], der weitgehend der deutschen DIN 4102-20 [123] entspricht, ursprünglich explizit für die Prüfung von Wärmedämmverbundsystemen aus expandiertem Polystyrol kalibriert wurde. Die Brandlast in Form einer Holzkrippe von 25 kg entspricht nicht der Flamme eines typischen Raumbrandes [124] und soll lediglich eine Flamme simulieren, die im Sturzbereich der Öffnung [125], [126] zu einer ähnlichen Temperatur führt. Das bedeutet, dass der hier verwendete Fassadenversuch zwar wichtige Ergebnisse liefert, aber nicht die Realität abbildet. Die Ergebnisse wurden jedoch direkt auf die Realität übertragen (insbesondere im Hinblick auf die technischen Maßnahmen), wobei Bewertungskriterien berücksichtigt wurden, die nicht für Grünfassaden ausgelegt sind. Daran ändert auch die Erhöhung der Brandlast von 25 kg auf 50 kg bei den letzten drei Versuchen nichts. Darüber hinaus gibt es Unsicherheiten hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Tests. So wurden z.B. im Versuch 3 der zweiten Studie [116] deutlich weniger Pflanzen in der Innenecke angeordnet als im Versuch 2, aber die Versuche wurden in der Auswertung direkt miteinander verglichen. Die aus den Versuchen [115], [116] abgeleiteten bautechnischen Maßnahmen, die derzeit in einigen Richtlinien [118] - [121] definiert sind, müssen wegen des derzeit fehlenden Zusammenhangs und Nachweises der Anwendbarkeit zwischen ÖNORM B3800-5 [122] und realen Brandereignissen, mit Vorsicht betrachtet werden.

Tabelle 2.1 Ergebnisse der 11 Brandversuche der Versuchsreihen [116] und [117]

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 [117]	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.
2. Test series				
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

Die Firma Vertiko hat einen Fassadenbrandversuch [127] nach DIN 4102-20 [123] mit ihrer wandgebundenen Living Wall durchgeführt. Das System besteht aus einer vertikalen Wandbegrünungsfläche, bestehend aus Tragprofilen, Hinterlüftungsspalt inkl. Brandsperren, Bekleidungsplatten (Aluminiumverbundplatte mit Mineralwollkern), Vlies (Glasfaservlies, Abdeckvlies mit Farbbeschichtung auf PU-Basis), Bewässerungsanlage, mineralischem Substrat und verschiedenen Pflanzen. Die Pflanzen direkt neben und über der Primärflamme brannten bis zur Oberkante des Prüfstandes ab (kurzes Aufflammen). Die Oberfläche des Verbundvlieses verfärbte sich hauptsächlich durch Ruß. Nach Beendigung des Brandversuchs (Abschalten des Gasbrenners) brannten zwei kleine Flammen am Brandkammersturz weiter, die jedoch innerhalb von zwei Minuten von selbst erloschen. Die Flammen im Hinterlüftungsspalt konnten die erste Brandsperre nicht überwinden. Die Temperaturen in diesem Bereich waren zu gering, um die Aluminiumkonstruktion zu schmelzen. Betrachtet man die Temperaturmessung im Hinterlüftungsspalt sowie die Tatsache, dass das Feuer die erste Brandsperre (bei 0,5 m Höhe) nicht überwinden konnte, so zeigt sich, dass die Living Wall die Rückwand des Prüfstands vor der direkten Temperatureinwirkung der Primärflamme schützte bzw. isolierte, wie in Abbildung 2.6 [127] dargestellt.

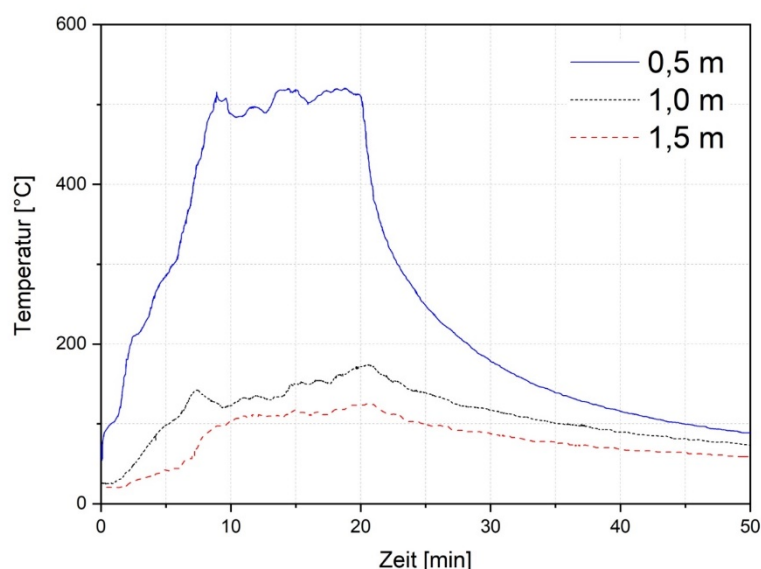


Abbildung 2.6 Temperatur-Zeit-Diagramm (links) im Hinterlüftungsspalt in verschiedenen Höhen (0,5 m über dem Brandraum (unter der Brandsperre), 1,0 m und 1,5 m über dem Brandraum (über der Brandsperre)); Foto des Prüfstands mit Anordnung der Messstellen im Hinterlüftungsspalt; basierend auf [127]

Die Firma hhpberlin führte einen Brandversuch [128] im Rahmen einer Masterarbeit [129] durch. Der Fassadenbrandversuche wurde auf Basis der DIN 4102-20 [123] durchgeführt. Der Versuchskörper bestand aus einer 6 m hohen und 2,43 m breiten Holzfassade mit einer vorgelagerten begrünten Fassade. Bei der Holzfassade handelte es sich um eine hinterlüftete horizontale Nut-und-Feder-Schalung aus Fichtenholz. Davor waren im Abstand von 160 mm Kletterhilfen aus Edelstahl angebracht. Als Begrünung wurde auf der linken Hälfte des Versuchskörpers *Euonymus fortunei* und auf der rechten Hälfte *Actinidia arguta* angeordnet. Die Holzfassade wurde durch Brandsperren in 1,75 m und 4,55 m Höhe unterteilt, gemäß [130]. Die Grünfassade verlief über die Brandsperren. Die Brandkammer unten am Prüfstand

(1 m x 1 m) befand sich direkt in der Mitte der Fassade. Für den Versuch wurde ein Gasbrenner mit einer Gasdruckrate von 7,4 g/s und ein Lüfter mit einer Luftzufuhr von 24 m³/h von der Rückseite der Brandkammer verwendet. Ab ca. 1,5 min nach Versuchsbeginn trat das erste kurze Aufflammen der Begrünung auf. Dieses Phänomen trat nur in dem Bereich direkt über der Primärflamme auf. Bis zur 8. Minute war ein großer Teil der Vegetation im Bereich oberhalb der Primärflamme durch kurzes Aufflammen abgebrannt, und die Primärflamme hatte sich wieder deutlich reduziert. Die kurzzeitig hohe Flamme war auch auf das Auftreten von Verkohlungen an der Holzfassade zurückzuführen. Eine Entzündung der Holzschalung außerhalb des Primärbrandbereichs durch das Aufflammen der Begrünung trat nicht auf, obwohl an der Holzbekleidung außerhalb der Primärflamme mehrfach kurzzeitige Temperaturen von bis zu 340 °C (höher als die Entzündungstemperatur von Holz 300 °C [131]) gemessen wurden. [128], [129]

Wie bereits bei den Wiener Brandversuchen festgestellt, müssen auch bei der direkten Übertragung der Ergebnisse aus den beiden zuvor beschriebenen Studien (in Anlehnung an DIN 4102-20 [123]) auf die Realität die Versuchsbedingungen berücksichtigt werden.

Für die Realisierung einer geschossweise begrünten Fassade an einem Hochhaus musste die Brandausbreitung über die Fassade durch die Durchführung von Brandversuchen in Realmaßstab untersucht werden [132]. Bei dem geplanten Hochhaus wurde die Brandausbreitung von Stockwerk zu Stockwerk durch 1,60 m hohe horizontale Betonplatten (Auskragungen) in Deckenebene verhindert. Auf diesen Vorsprüngen waren in jedem Geschoss Pflanzkästen mit Kletterpflanzen angeordnet. Die Pflanzen befanden sich direkt am vorderen Ende der Auskragung der Betonplatten (Abstand ca. 10-20 cm). Für die Untersuchung wurde ein realitätsnahes Brandversuchsszenario entworfen, bestehend aus einem dreigeschossigen Versuchsaufbau und einer Brandlast von 140 kg (4 x 35 kg) Holzkrippen. Die Wahl der Brandlastmenge und -anordnung erfolgte auf Basis einer realistischen und praxisnahen Brandbeanspruchung [133]. Während des Brandversuchs entzündeten sich die Kletterpflanzen in den beiden Stockwerken oberhalb des Brandgeschosses nicht. Es kam zu keiner Brandausbreitung über die Geschossgrenze hinaus. Abbildung 2.7 zeigt den Versuchsaufbau und die gemessenen Höchsttemperaturen in der Achse der begrünten Fassade. Leider können die Ergebnisse aufgrund der Vertraulichkeitsvereinbarung im Rahmen des Industrievertrages [132] nicht detaillierter dargestellt werden.

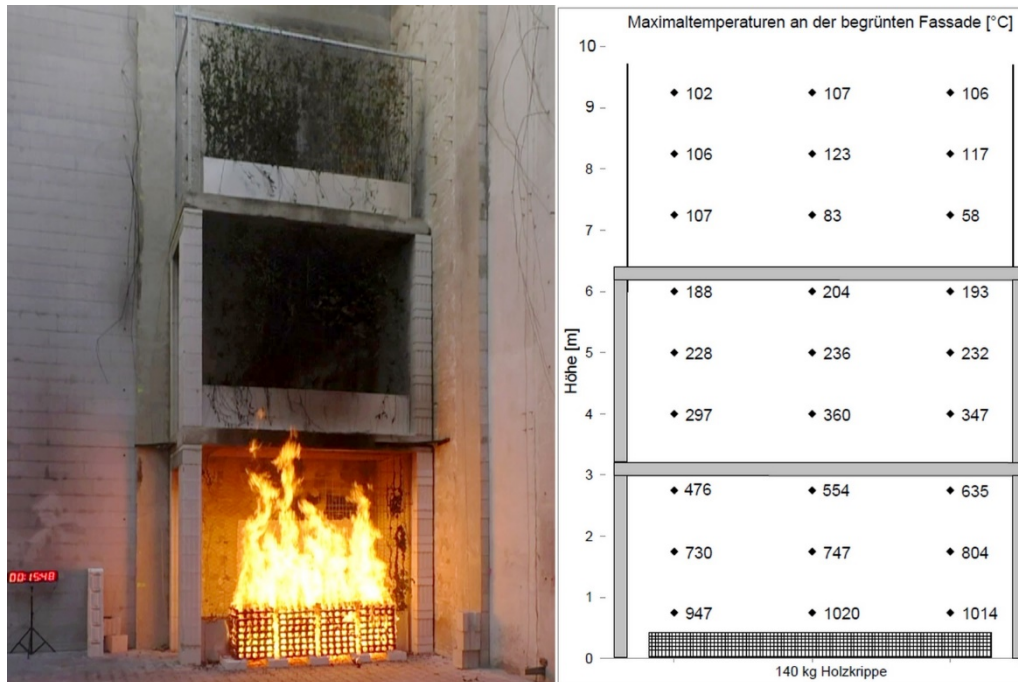


Abbildung 2.7 Foto (links) und Höchsttemperaturen (rechts) in der Achse der begrünten Fassade während eines Brandversuchs mit Kletterpflanzen in Pflanzkästen in jedem Stockwerk für ein Hochhaus

Bielawski et al. [166], [167] untersuchten das Brandverhalten von Living Walls sowohl mit lebenden als auch mit toten (trockenen) Pflanzen. Für diese Studie wurde ein einzelnes Living Wall-System berücksichtigt. Zur Bestimmung des Brandverhaltens wurden kleinmaßstäbliche Versuche mittels Cone-Kalorimeter, mittelmaßstäbliche Versuche mit der SBI-Methode sowie großmaßstäbliche Versuche (PN-B 02867 [168], DIN 4102-20 [169]) zur Beurteilung der Flammenausbreitung unter unterschiedlichen Windbedingungen durchgeführt. Vitale (feuchte) Pflanzen führten zu einer verlangsamten Brandausbreitung. Dennoch konnte auch in diesen Fällen ein Übergreifen des Feuers auf die Kunststoffteile der Living Wall-Konstruktion nicht verhindert werden, was letztlich zum Versagen des Systems führte. Bei trockenen Pflanzen und Windstille betrug die vertikale Flammenausbreitungsgeschwindigkeit bis zu 90 cm/s, während die horizontale Geschwindigkeit bis zu 2,7 cm/s erreichte. Die Windbedingungen beeinflussten das Brandverhalten der Living Wall erheblich und erhöhten die Brandausbreitung auf die Pflanzen sowie auf die Kunststoffkomponenten. Bei vitalen (feuchten) Pflanzen war die Expositionszeit bis zum Versagen, sowohl bei Wind als auch ohne Wind, etwa doppelt so lang. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Living Walls potenziell zu einer kritischen Brandausbreitung entlang der Fassade führen können, was weitere Forschungsanstrengungen und großmaßstäbliche Brandversuche erforderlich macht [166]. Auch [1] kam zu dieser Schlussfolgerung.

Schliebe et al. [171] führten eine umfassende Untersuchung der Möglichkeiten und Parameter zur Prognose des Brandverhaltens von begrünten Fassaden durch, wobei der Fokus insbesondere auf *Hedera helix*, die an Rankhilfen kultiviert wird, lag. Mithilfe numerischer Brandsimulationen wurden die Ergebnisse aus Brandversuchen im Mikro- und Labormaßstab analysiert. Durch den Einsatz inverser Modellierung konnten erste relevante Parameter für ein Pyrolysemodell im Fire Dynamics Simulator (FDS) identifiziert werden.

2.3 Pflanzenkunde und Pflanzenauswahl für die Brandversuche

2.3.1 Allgemein

In der Landschaftsarchitektur und Stadtplanung gewinnt die Verwendung von Kletterpflanzen als Fassadenbegrünung zunehmend an Bedeutung. Aktuell führen zahlreiche Städte Diskussionen über die mögliche Einführung einer Verpflichtung zur Integration von Fassadenbegrünung in ihre Freiflächengestaltungssatzungen. Dabei ist es wichtig zu beachten, dass Kletterpflanzen nicht nur ästhetische und mikroklimatische Vorteile bieten, sondern auch maßgeblichen Einfluss auf bautechnische Aspekte, insbesondere den Brandschutz, haben.

Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass die Forschung zu Kletterpflanzen bereits umfangreiche Erkenntnisse hervorgebracht hat. Dennoch existiert bislang weder eine einheitliche Systematik für die Klassifizierung von Kletterpflanzenarten noch eine eingehende Untersuchung der brandschutztechnischen Aspekte dieser Pflanzen. Hierbei besteht eine signifikante fachliche Lücke, die es zu schließen gilt. Im Folgenden erfolgt eine systematische Klassifikation der Kletterpflanzen hinsichtlich ihrer Einsatzmöglichkeiten. Dabei werden relevante Arten für die Brandversuche ausgewählt und deren spezifische Eigenschaften detailliert erläutert. Die Basisarten, die für die Brandversuche herangezogen werden, werden durch präzise Pflanzensteckbriefe vorgestellt und auf ihre pflanzenphysiologischen Unterschiede hin analysiert.

2.3.2 Bodengebundene und wandgebundene Begrünungsformen

Zu Beginn ist es erforderlich, zwischen bodengebundener und wandgebundener Fassadenbegrünung zu differenzieren. Bodengebundene Begrünung bezieht sich auf den direkten Bewuchs von Fassaden durch Kletterpflanzen, die im anstehenden Boden oder in einem eingesetzten Pflanzsubstrat verwurzelt sind. Dabei ist es entscheidend, einen ausreichend dimensionierten Wurzelraum zu gewährleisten; ein strukturstabiles und nährstoffreiches Substrat, vergleichbar mit dem für Baumpflanzungen, spielt eine zentrale Rolle für das Gedeihen der Pflanzen. Die Auswahl an Kletterpflanzenarten ist umfangreich und umfasst laut Köhler et al. in der DACH-Region etwa 150 verschiedene Arten und Sorten [37]. Bei der Selektion der Pflanzen ist zu berücksichtigen, dass Kletterpflanzen nicht nur unterschiedliche Kletterstrategien aufweisen, sondern auch spezifische Anforderungen hinsichtlich ihrer Exposition und regionalen Gegebenheiten haben. Während die Mehrheit der Arten an Ost- oder Westwänden optimale Wachstumsbedingungen findet, erfordern südexponierte Fassaden sowie schattige Nordwände Pflanzenspezialisten, um den jeweiligen Standortanforderungen gerecht zu werden.

Zu den bodengebundenen Begrünungsformen zählen sowohl Gerüstkletterpflanzen als auch Rankpflanzen, die auf entsprechende Draht- oder Holzkletterhilfen angewiesen sind. Es ist erforderlich, dass Drahtseile regelmäßig nachgespannt werden, da die Kletterpflanzen mit zunehmendem Wachstum an Gewicht zunehmen, was zu einer Dehnung und zum Durchhang der Seile führen kann.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Begrünungsform liegt in der Tatsache, dass keine Bewässerungsanlagen erforderlich sind, wodurch der Energieverbrauch minimiert wird. Dennoch ist zu beachten, dass das Nährstoffangebot erschöpft werden kann. Eine artgerechte Düngung ist

notwendig, um das Nährstoffreservoir kontinuierlich aufzufrischen. Zudem erweist sich eine Notbewässerung in besonderen Trockenzeiten als entscheidend, um die Vitalität der Pflanzen zu gewährleisten und eine nachhaltige Begrünung zu sichern.

Wandgebundene Begrünungsformen zeichnen sich durch ihre direkte Anbindung an die Fassade aus, sei es in Form von vorgehängten Living Walls oder gestapelten Pflanzkübeln. Im Gegensatz zu bodengebundenen Varianten, die auf Kletterpflanzen angewiesen sind, ermöglichen wandgebundene Systeme den Einsatz einer breiten Palette von Pflanzentypen. Hierzu zählen einjährige Pflanzen, Stauden, Sträucher sowie kleine Bäume und aber auch Kletterpflanzen. Das Spektrum der möglichen Pflanzenarten für wandgebundene Fassadenbegrünungen ist dadurch erheblich erweitert. Dank integrierter Bewässerungssysteme können auch weniger trockenheitsverträgliche Arten kultiviert werden. Für die DACH-Region werden in [38] ca. 100 robuste Kernarten und -sorten aufgeführt, jedoch ist die tatsächliche Vielfalt noch deutlich größer. Diese Vielzahl an Optionen eröffnet ein signifikantes gestalterisches Potenzial für wandgebundene Begrünungen. Es wird jedoch empfohlen, bei der Auswahl der Pflanzen auf regionale Vegetationsräume Rücksicht zu nehmen und gegebenenfalls typische heimische Charakterarten zu integrieren.

Bei der wandgebundenen Pflanzweise ist es nicht erforderlich, Wurzelraum vor dem Gebäude bereitzustellen. Diese Methode bringt jedoch den Nachteil mit sich, dass eine kontinuierlich betriebene Bewässerungsanlage erforderlich ist, die im Winter mit automatisch leerlaufenden Ventilen betrieben werden muss. Dies führt zu einem erhöhten Verbrauch von Wasser und Energie. Für eine umfassende ökologische Bewertung ist es daher entscheidend, ob eine Regenwasserzisterne zum Einsatz kommt oder man auf Grundwasser oder gar Trinkwasser angewiesen ist.

Sowohl bodengebundene als auch fassadengebundene Begrünungssysteme erfordern eine regelmäßige Düngung. Ein signifikantes Problem bei fassadengebundenen Begrünungsformen ist die mangelnde Winterhärte von Arten, die bei einer Pflanzung im Boden normalerweise winterfest sind. Es zeigt sich, dass Stauden und Kleinsträucher in den begrenzten Pflanztaschen der fassadengebundenen Bauweise häufig erhebliche Frostschäden erleiden. Der regelmäßige Austausch von etwa einem Drittel der Pflanzen nach jedem Winter stellt ein ökologisches Defizit dar, dennoch hat dieses Konzept seine Daseinsberechtigung in repräsentativen Bauprojekten.

Im Rahmen des Forschungsprojekts zur Untersuchung des Brandverhaltens von Fassadenbegrünungen wurde beschlossen, sich aufgrund des zweijährigen Zeitrahmens auf einen spezifischen Forschungsschwerpunkt zu konzentrieren. In Abstimmung mit dem Fachbeirat wurde als primäres Ziel festgelegt, die Brandgefährdung von ausgewählten bodengebundenen Kletterpflanzen eingehend zu untersuchen. Um Staudenarten für zukünftige wandgebundene Begrünungen zu evaluieren, werden in den Brandversuchen einige Exemplare integriert.

2.3.3 Kategorisierung in Wuchsgrößen und Ausdauer der Belaubung von Kletterpflanzen

Ein zentrales Kriterium für die grundlegende Kategorisierung von Kletterpflanzen ist, analog zu Bäumen, die Größe des Gehölzes. Die Höhe von Gebäuden und die Wuchshöhe der Kletterpflanzen müssen sorgfältig aufeinander abgestimmt werden, um zu vermeiden, dass übermäßige Pflegeaufwände erforderlich sind oder Enttäuschungen bezüglich unzureichender Wuchshöhen auftreten.

In der Baumpflege sind bereits allgemein verwendete und in Fachkreisen anerkannte Einteilungen in „Größenklassen“ etabliert. Es wäre daher sinnvoll, auch Kletterpflanzen in diese Größenklassen zu integrieren:

- Bäume (Großbäume) / Kletterpflanzen I. Ordnung: 20 – 40 m hoch
- Bäume (mittelgroße Bäume) / Kletterpflanzen II. Ordnung: (13)15 – 20 m hoch
- Bäume (Kleinbäume) / Kletterpflanzen III. Ordnung: 5 – 12 m hoch

Die Übertragung dieser Größenklassen auf Kletterpflanzen erleichtert die Pflanzplanung, da sofort ersichtlich ist, welche Größenklasse mit welcher Baumgröße korrespondiert. Darüber hinaus wäre es sinnvoll, eine weitere kleinere Größenklasse einzuführen, die der Dimension von Großsträuchern entspricht. Angesichts der Notwendigkeit, den Brandüberschlag bei Hochhäusern zu vermeiden und eine Begrünung über ein Stockwerk hinweg zu verhindern, wäre die Einführung einer Größenklasse „Kletterpflanzen IV. Ordnung: 3-5 m hoch“ von Bedeutung.

Zusätzlich könnte die Ausdauer der Belaubung für die Brandgefährdung von Relevanz sein. Immergrüne oder wintergrüne Kletterpflanzen besitzen ganzjährig einen hohen Anteil an frisch-feuchtem Laub, während sommergrüne Pflanzenarten im Winterhalbjahr ein trockenes Astgerüst entwickeln können, das ein höheres Brandgefährdungspotenzial aufweisen könnte. Diese Aspekte sollten in den Brandversuchen systematisch überprüft werden, indem dieselben Arten sowohl im Sommer- als auch im Winterzustand getestet werden.

Ein weiteres entscheidendes Kriterium für die Auswahl geeigneter Kletterpflanzenarten für Brandversuche ist deren systematische Einordnung. Hierbei wird zwischen Schlingpflanzen, Rankpflanzen, Haftwurzelkletterern und Spreizklimmern differenziert. Diese Systematik ermöglicht eine spezifischere Klassifizierung der gängigen Kletterpflanzenarten hinsichtlich ihrer Form, Größe und charakteristischen Merkmale, die für die Brandversuche von Bedeutung sein könnten, wie etwa den Grad ihrer Verholzung.

Für Planer kann es von erheblichem Nutzen sein, den Kletterpflanzen nicht nur ihre potenzielle Wuchshöhe zuzuordnen, sondern auch eine Abkürzung für ihre individuelle Kletterstrategie hinzuzufügen. Hierbei kann zwischen „S = Selbstklimmer“ und „G = Gerüstkletterpflanze“ unterschieden werden. Durch die Kombination von Größe und Klettermodus wird in einem ersten Schritt bereits eine effektive planungsrelevante Einteilung geschaffen, welche folgendermaßen aussehen kann:

- Kletterpflanzen I. Ordnung (I s): Selbstklimmer mit Wuchshöhen von 20-30 (40) m
- Kletterpflanzen I. Ordnung (I g): Gerüstkletterpflanzen mit Wuchshöhen von 20-30 (40) m

- Kletterpflanzen II. Ordnung (II s): Selbstklimmer mit Wuchshöhen von (13)15-20 m
- Kletterpflanzen II. Ordnung (II g): Gerüstkletterpflanzen mit Wuchshöhen (13)15-20 m
- Kletterpflanzen III. Ordnung (III s): Selbstklimmer mit Wuchshöhen von 5-15 m
- Kletterpflanzen III. Ordnung (III g): Gerüstkletterpflanzen mit Wuchshöhen von 5-15 m
- Kletterpflanzen IV. Ordnung (IV s): Selbstklimmer mit Wuchshöhen von 3 - 5 m
- Kletterpflanzen IV. Ordnung (IV g): Gerüstkletterpflanzen mit Wuchshöhen von 3-5 m

2.3.4 Auswahl der Kletterpflanzenarten für die Brandversuche

Bei der Auswahl der Kletterpflanzen für die Brandversuche wurden mehrere entscheidende Faktoren berücksichtigt, darunter die Häufigkeit der Verwendung, die Verfügbarkeit sowie die Robustheit der Pflanzenarten. Die Diversität in Bezug auf Kletterfähigkeiten, Wuchshöhe und Wuchsform stellte ebenfalls ein zentrales Kriterium dar. Es war von wesentlicher Bedeutung, dass die Auswahl eine repräsentative Bandbreite an Arten umfasst. Dies ermöglicht eine differenzierte Verallgemeinerung der ausgewählten Arten auf die gesamte Pflanzenfamilie, was wiederum zu einer präziseren Klassifizierung und Zuordnung vergleichbarer Arten hinsichtlich ihres Brandverhaltens führt.

Neben der bestehenden Taxonomie für die Kletterpflanzenarten wird in der nachfolgenden Tabelle 2.2 eine erweiterte Einteilung vorgenommen, die zusätzliche Eigenschaften berücksichtigt. Besonders Augenmerk wird auf die Wachstumsparameter der Pflanzenarten gelegt. Darüber hinaus fließen auch Faktoren wie Wüchsigkeit, Belaubungsphase sowie Lichtbedürfnis (Schatten, Halbschatten, Sonne) und Blattform in die Analyse ein. Diese umfassende Klassifizierung bietet einen detaillierten Überblick über einige der wichtigsten Eigenschaften der ausgewählten Kletterpflanzenarten und dient als botanische Grundlage der Forschung zum Brandverhalten von grünen Fassaden.

Tabelle 2.2 Auswahl der Kletterpflanzenarten für die Brandversuche

Gattung	Art	Sorte	Einteilung in maximale Wuchshöhen (bis 3m, bis 7m, bis 13m, über 13m)	Wüchsigkeit (schwach, mittel, stark, sehr stark)	Belaubungsphase (sommergrün immergrün, wintergrün)	Blattform einfach (Blattgröße im Durchmesser <5cm, 5-15cm, >15cm) oder zusammengesetzt (gefingert/gefiedert)	Lichtbedürfnis (Schatten, Halbschatten, Sonne)
Euonymus	fortunei	Vegetus'	IV. Ordnung bis 3m	schwach	immergrün	einfach (<5cm)	●●
Jasminum	nudiflorum		IV. Ordnung bis 3m	schwach bis mittel	sommergrün bis wintergrün	zusammengesetzt	○●
Actinidia	arguta	Weiki'	III. Ordnung bis 7m	stark	sommergrün bis wintergrün	einfach (5-15cm)	○●
Akebia	quinata		III. Ordnung bis 7m	mittel	sommergrün bis wintergrün	zusammengesetzt	○●
Humulus	lupulus		III. Ordnung bis 7m	stark bis sehr stark	sommergrün	einfach (>15cm)	○●
Lonicera	henryi		III. Ordnung bis 7m	stark	immergrün	einfach (5-15cm) schmalblättrig	●●
Lonicera	periclymenum		III. Ordnung bis 7m	schwach bis mittel	sommergrün	einfach (5-15cm)	●●
Actinidia	deliciosa		II. Ordnung bis 13m	stark	sommergrün bis wintergrün	einfach (5-15cm)	○●
Aristolochia	macrophylla		II. Ordnung bis 13m	stark	sommergrün	einfach (>15cm)	○●●
Campsis	radicans	i. S.	II. Ordnung bis 13m	stark	sommergrün	zusammengesetzt	○●
Clematis	montana	var. rubens	II. Ordnung bis 13m	stark	sommergrün	zusammengesetzt	○●
Fallopia	baldschuanica		II. Ordnung bis 13m	sehr stark	sommergrün bis wintergrün	einfach (<5cm)	○●
Vitis	coignetiae		II. Ordnung bis 13m	stark	sommergrün	einfach (>15cm)	○●
Vitis	vinifera		II. Ordnung bis 13m	stark	sommergrün	einfach (5-15cm)	○●
Hedera	helix		II. Ordnung bis 13m	stark	immergrün	einfach (5-15cm)	○●●
Hydrangea	anomala	subsp. petiolaris	II. Ordnung bis 13m	mittel bis stark	sommergrün	einfach (5-15cm)	●●
Parthenocissus	quinquefolia		II. Ordnung bis 13m	stark	sommergrün	zusammengesetzt	○●●
Parthenocissus	tricuspidata		II. Ordnung bis 13m	stark	sommergrün	einfach (>15cm)	○●
Rosa	(Rambler)	i. S.	II. Ordnung bis 13m	stark bis sehr stark (sortenabhängig)	sommergrün bis wintergrün	zusammengesetzt	○●
Wisteria	sinensis		II. Ordnung bis 13m	sehr stark	sommergrün	zusammengesetzt	○●

3 Grundlagen und experimentelle Untersuchung zur Entzündbarkeit von Pflanzen für Grünfassaden

3.1 Grundlagen Entflammbarkeit und Entzündbarkeit von Pflanzen

In den USA wurden umfangreiche Arbeiten zur Entflammbarkeit lebender Vegetation durchgeführt. White et al. [43] fassten die Ergebnisse mehrerer Studien wie folgt zusammen: "[...] die Entflammbarkeitsmerkmale werden von mehreren Faktoren beeinflusst, die in zwei Gruppen eingeteilt werden können: (1) physikalische Struktur und Komponenten (z. B. Zweiggröße, Blattgröße und -form und Rückhaltung von abgestorbenem Material); und (2) physiologische oder zelluläre Elemente (z. B. flüchtige Öle und Harze, Feuchtigkeitsgehalt, Mineralgehalt, Lignin und Wachse) [...]" [übersetzt aus dem Englischen] [43].

Dass der Feuchtigkeitsgehalt von Pflanzen ein wichtiger Parameter für die Beschreibung ihrer Entflammbarkeit und Wärmefreisetzung ist, ist seit langem bekannt. Zum Beispiel die zunehmende Entflammbarkeit von trockenen Weihnachtsbäumen [44] - [46].

Die Waldbrandforschung zeigt, dass der Feuchtigkeitsgehalt eine äußerst wichtige Rolle für die Entzündbarkeit natürlicher Brennstoffe spielt [47], [51]. Der Feuchtigkeitsgehalt beeinflusst die Entflammbarkeit sowohl physikalisch (Erhöhung der Wärmekapazität des Materials) als auch chemisch (Hemmung des Verbrennungsprozesses) [47], [49]. Die Studien ergaben eine hochsignifikante positive Korrelation zwischen dem Feuchtigkeitsgehalt der Blätter und der Entzündungszeit. Die Entzündungszeit nimmt mit höherem Feuchtigkeitsgehalt zu [50]. Dies gilt für Blätter, Bäume, Gräser und Sträucher. Der Feuchtigkeitsgehalt beeinflusst auch die Geschwindigkeit der Brandausbreitung. Generell gilt: Je niedriger der Feuchtigkeitsgehalt, desto intensiver sind diese Phänomene [52] - [58]. Eine Untersuchung von Strauchbränden [59] kam zu dem Schluss: "*Eine Verdoppelung des Feuchtigkeitsgehalts von 40 auf 80% führt beispielsweise zu einer Verlängerung der für das vollständige Abbrennen des Strauchs erforderlichen Zeit um 63%. Es wurde auch festgestellt, dass die Flammen bei höheren Feuchtigkeitsgehalten zu erlöschen beginnen, obwohl eine beträchtliche Menge an unverbranntem festem Brennstoff im Strauch vorhanden ist. Als Ursache für diese Phänomene wurde festgestellt, dass die verbrennenden Brennstoffteilchen nicht genügend Energie erzeugen, um die Zündung der benachbarten Brennstoffteilchen einzuleiten, was zu einer Zunahme der unverbrannten Masse führt.*" [übersetzt aus dem Englischen] [59]

Forschungsergebnisse zeigen, dass der Feuchtigkeitsgehalt von neuen und alten Pflanzenteilen innerhalb der Vegetationsperiode deutlich unterschiedlich sein kann. Neues Laub hat im Vergleich zu altem Laub einen höheren Feuchtigkeitsgehalt [53], [60] -[65]. Der Feuchtigkeitsgehalt des neuen Laubes ist zum Zeitpunkt des Austriebs am höchsten. Ein Feuchtigkeitsgehalt, der das Zwei- bis Dreifache des organischen Trockengewichts beträgt, ist üblich [66]. *"Der Feuchtigkeitsgehalt des alten Laubes ändert sich im Laufe der Saison nur geringfügig, während der Feuchtigkeitsgehalt des neuen Laubes zum Zeitpunkt des Auflaufens sehr hoch ist und dann zunächst schnell, dann langsamer abfällt und sich dem Feuchtigkeitsgehalt des alten Laubes am Ende der Vegetationsperiode anpasst"* [übersetzt aus dem Englischen] [66], wie in Abbildung 3.1 dargestellt.

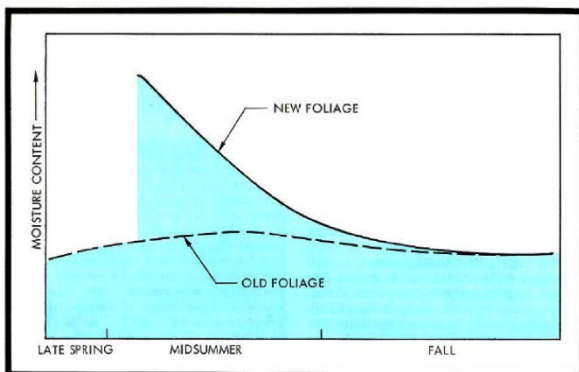


Abbildung 3.1 Veränderung des Feuchtigkeitsgehalts des Laubes im Laufe eines Jahres [66]

Einige Studien kamen zu dem Schluss, dass sich die Entflammbarkeit von Pflanzen mit zunehmendem Alter aufgrund von Veränderungen in der Struktur (Laubanteil, abgestorbenes Material), der Pflege (Bewässerung, abgestorbenes Material, Beschneidung) und möglicherweise einer Verringerung des Feuchtigkeitsgehalts des reifen Laubes ändern kann [47]. [48] zeigte beispielsweise, dass das Entzündungsverhalten von lebenden Pflanzenbrennstoffen in verschiedenen Jahreszeiten, aber bei gleichem Feuchtigkeitsgehalt, unterschiedlich ist.

Das lebende Laub von immergrünen Arten ist in der Regel leichter entflammbar als das von laubabwerfenden Arten. Dafür gibt es mehrere Gründe, aber der wichtigste sind die Unterschiede im Feuchtigkeitsregime. Laub von laubabwerfenden Pflanzen ist das Jahrestriebwachstum und hat während des größten Teils der Vegetationsperiode einen relativ hohen Feuchtigkeitsgehalt. Immergrüne Pflanzen hingegen, insbesondere solche, die ihr Laub mehrere Jahre lang behalten, haben während der Vegetationsperiode eine viel geringere durchschnittliche Laubfeuchte. Altgewachsenes Laub mit seinem geringeren Feuchtigkeitsgehalt kann 80 Prozent oder mehr des gesamten Laubvolumens von immergrünen Pflanzen ausmachen. Außerdem neigen immergrüne Arten eher dazu, eine Mischung aus abgestorbenem Laub, Zweigen und Ästen zu haben [66]. Das Alter der Pflanze spielt also eine Rolle für die Entflammbarkeit [67].

Auch der Standort einer Pflanze und die örtlichen Bedingungen können den Feuchtigkeitsgehalt beeinflussen [52]. Der Feuchtigkeitsgehalt von lebenden und trockenen Pflanzen ist auch für das jahreszeitliche Auftreten von Bränden relevant [68]. Je nach Art ist der saisonale Einfluss stärker oder schwächer. Diese Tatsache erklärt die Häufigkeit von Bränden im Sommer und Frühherbst nach einer Hitzeperiode und im Frühjahr nach einer Trockenperiode [62] - [65].

Es liegt auf der Hand, dass die Bestimmung des Feuchtigkeitsgehalts von Brennstoffen eine der wichtigsten, aber auch sehr komplexen Komponenten der Verhütung und Bekämpfung von Waldbränden ist [69], [70].

Der Feuchtigkeitsgehalt (MC) wird in der Regel berechnet, indem die Differenz zwischen der feuchten Masse (m_{wet}) und der trockenen Masse (m_{dry}) durch die trockene Masse dividiert und in Prozent ausgedrückt wird. Diese Methode wird international z. B. zur Angabe des Feuchtigkeitsgehalts von Holz [74], [75] verwendet. Normalerweise wird das Material in einem Ofen getrocknet, bis es keine Masse mehr verliert. Gleichung (1) beschreibt dieses Berechnungsverfahren.

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

Wie bereits beschrieben, ist der Feuchtigkeitsgehalt von Pflanzen einer der Schlüsselfaktoren bei der Bewertung des Brandrisikos in der freien Natur. In der Forschung werden zu diesem Zweck Brennstoffmodelle verwendet. Ein wichtiger Faktor für diese Modelle ist der Feuchtigkeitsgehalt der Brennstoffe und der daraus resultierende Einfluss auf die Vitalität der Pflanzen. Rothermel [76] hat einen Leitfaden für die Schätzung des Feuchtigkeitsgehalts im Laub erstellt, der in der Tabelle 3.1 dargestellt ist.

Tabelle 3.1 Richtwerte für die Schätzung des Feuchtigkeitsgehalts des Laubes [76]

Stadium der vegetativen Entwicklung	Feuchtigkeitsgehalt (%)
Frisches Laub, einjährige Pflanzen in der Entwicklung, früh in der Vegetationsperiode	300
Reifendes Laub, noch in der Entwicklung mit vollem Turgor	200
Ausgereiftes Laub, neues Wachstum vollständig und vergleichbar mit älterem mehrjährigem Laub	100
Beginn der Vegetationsruhe, beginnende Färbung, einige Blätter können vom Stiel abgefallen sein	50
Vollständig ausgehärtet, als toten Brennstoff behandeln	30

Scott et al. [77] haben diese Modelle später erweitert. Der Feuchtigkeitsgehalt der Vegetation wurde ebenfalls als Eingangsparameter definiert. Abbildung 3.1 zeigt den Einfluss des Feuchtigkeitsgehalts auf die Vitalität von krautigen Pflanzen.

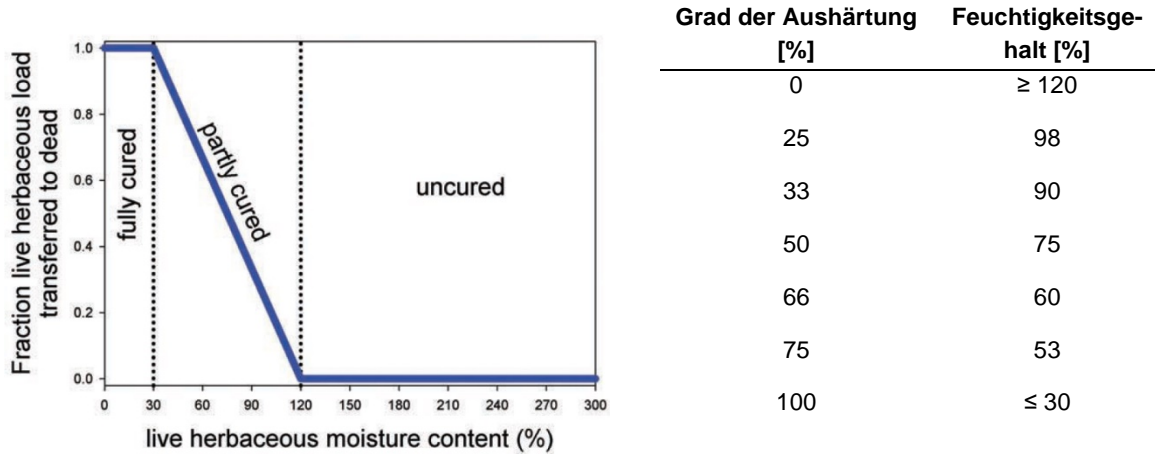


Abbildung 3.2 Aushärtungsgrad (Anteil der abgestorbenen Pflanzen) im Verhältnis zum Feuchtigkeitsgehalt der Pflanzen [77]

[78] gibt einen Feuchtigkeitsgehalt von 26% für tote Brennstoffe und 100% für lebende Brennstoffe an.

Ein weiterer Einfluss auf die Entflammbarkeit von Pflanzen ist das Vorhandensein von ätherischen Ölen und Harzen. Die ätherischen Öle und Harze führen zu einer niedrigeren Entzündungstemperatur und einem höheren Heizwert der Wärmeabgabe [54], [71]. Die hohe Wärmeabgabe begünstigt tendenziell eine weitere Entzündung [72]. Die bei der Verbrennung von ätherischen Ölen freigesetzten Gase können die Ausbreitung des Feuers weiter fördern [73].

Auch die Anordnung der Blätter kann einen Einfluss auf das Brennverhalten der Pflanze haben. Die Entzündungszeit verzögerte sich mit zunehmender Blattgröße. [79]

Darüber hinaus können Witterungseinflüsse wie Wind einen erheblichen Einfluss auf die Entflammbarkeit von Pflanzen haben [80], [81]. In [81] wurde zum Beispiel der Einfluss von Wind auf das Brandverhalten von Blättern untersucht. In den meisten Fällen wiesen die windverbrannten Proben längere Zeiten für die Zündung, den vollständigen Abbrand sowie die Brenndauer der Probe bei jeweils niedrigeren Temperaturen auf. Der Wind (parallel zur Blattoberfläche) kühlte die Probekörper durch Konvektion ab, was zu längeren Zündzeiten und niedrigeren Temperaturen führte [81].

Rahimi Borujerdi et al. stellten als eine wichtige Erkenntnis für die Brandausbreitung bei Waldbränden fest, dass: "*Die Verbrennung der gasförmigen Bestandteile der Pyrolyseprodukte ist einer der Schlüsselprozesse, die für die Ausbreitung von Feuer in Waldbränden verantwortlich sind*" [übersetzt aus dem Englischen] [82]. Die Auswirkung von Erhitzungsmodus, Feuchtigkeitsstatus (einschließlich lebender vs. toter Pflanzen) und Pflanzenart auf die Zusammensetzung der Pflanzenpyrolysate kann zusätzlich aus [83] - [91] entnommen werden. Ausgehend von den in diesen Experimenten beobachteten Verteilungen der Pyrolyseprodukte dürften die Unterschiede im Brandverhalten von lebenden und toten Brennstoffen weitgehend auf den Feuchtigkeitsgehalt [86], [87] zurückzuführen sein. [89] zeigt, dass der Zustand der Pflanze (lebend oder tot) keinen Einfluss auf die Anzahl der Pyrolysespitzen einer bestimmten Pflanzenart

hatte. Die Ergebnisse dieser Studien können dazu beitragen, die Wärmefreisetzung der Pflanzen zu bestimmen, z. B. für die Modellierung mit Hilfe von Computational Fluid Dynamics (CFD) [92], [93].

Die Zündtemperaturen von Vegetation wurden in zahlreichen Studien untersucht. Die berichteten Werte sind jedoch sehr uneinheitlich. Aufgrund der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzung der verschiedenen Vegetationstypen und der jahreszeitlichen Veränderungen gibt es Schwankungen bei den Entzündungstemperaturen. Bei den meisten Pflanzen eines bestimmten Typs (z. B. Laub, Nadeln usw.) kann jedoch im Allgemeinen davon ausgegangen werden, dass die Zündtemperaturen kaum variieren [40]. Die Zündtemperatur von Laub liegt im Bereich von 227 - 453 °C und von kleinen verholzten Trieben im Bereich von 350 - 675 °C [41], [42], [96], [97]. [96] kommt zu dem Schluss, dass die Zündtemperatur, im Gegensatz zur Zeit bis zur Entzündung, nicht direkt von der Größe und Form der Probe abhängt. Es scheint klar, dass die Entzündung des Laubes zu einem Zeitpunkt beginnt, zu dem noch Feuchtigkeit vorhanden ist [90], [81], [94], [95]. Die Ergebnisse der Untersuchungen [98] lassen hingegen den Schluss zu, dass zum Zeitpunkt der Entzündung fast die gesamte Feuchtigkeit aus dem Brennstoff verdunstet war. In [90] wurde beobachtet, dass gebundenes Wasser erst bei Temperaturen nahe 200°C freigesetzt wird.

Darüber hinaus mangelt es an einer Standardisierung der Methoden zur Bewertung der Entflammbarkeit von Vegetation [43], [63]. *"Der fehlende Konsens über die Brandprüfung von Vegetation spiegelt wahrscheinlich auch die Ansicht wider, dass 'Entflammbarkeit' eher ein Zustand der 'Qualität' als eine quantifizierbare Eigenschaft ist"* [übersetzt aus dem Englischen] [43]. Die gebräuchlichsten Prüfverfahren sind in [43] aufgeführt.

3.2 Ziel der Untersuchung

Das übergeordnete Ziel dieser Versuchsreihe ist die Untersuchung des Brandverhaltens der Pflanzen in Single Burning Item (SBI) Tests.

Im Hinblick auf die Abschnitte 2.1, 2.2.3 und Tabelle 3.5 im Anhang 3.9 werden Living Walls (Typen 4 und 5 in Abbildung 2.1) in der folgenden Untersuchung nicht berücksichtigt, da lebende Wände ein integrales herstellerspezifisches System mit hinterlüftetem Hohlraum, Tragkonstruktion, Verkleidungsplatten, Substrat, Vlies, Bewässerungssystem und der Pflanze selbst darstellen. Die Systeme unterscheiden sich von Hersteller zu Hersteller erheblich. Die für solche Systeme typischerweise verwendeten Sträucher und Kräuter (reine Pflanzenmasse) spielen in Bezug auf die gesamte Brennstofflast des Systems nur eine untergeordnete Rolle. Eine produktneutrale Analyse ist daher nicht möglich und lebende Wände können daher nur in groß angelegten Tests am jeweiligen Gesamtsystem sinnvoll untersucht werden.

Der Schwerpunkt der folgenden Studie liegt auf Kletterpflanzen an nicht brennbaren Spalieren und Kletterhilfen (Typen 1 und 2 in Abbildung 2.1).

Die erste Versuchsreihe im Rahmen des Forschungsprojekts FireSafeGreen sollte Aufschluss über das Brandverhalten der für begrünte Fassadensysteme verwendeten Pflanzen/Pflanzensysteme geben. Folgende Fragen wurden näher untersucht:

- Erlöschen die Pflanzen von selbst, nachdem das Primärfeuer erloschen ist?
- Welche Wärmefreisetzung erfolgt durch die Pflanzen?
- Welchen Einfluss hat die Pflanzenart auf das Brandverhalten?
- Inwieweit kommt es zu einer vertikalen oder horizontalen Brandausbreitung?
- Welchen Einfluss hat das Vorhandensein von ätherischen Ölen auf das Brandverhalten?
- Welche Rolle spielt das Alter der Pflanzen in Bezug auf das Brandverhalten?
- Welche Rolle spielt der Feuchtigkeitsgehalt der Pflanze in Bezug auf das Brandverhalten?

Letztlich müssen die oben genannten Fragen immer im Kontext der großflächigen Fassadenanwendung betrachtet werden. Aufgrund der Vielzahl der potenziell möglichen Pflanzenarten für die Fassadenbegrünung wird ein Vergleich hinsichtlich der oben genannten Fragestellungen anhand des europäischen SBI-Testverfahrens durchgeführt. Daran schließen sich weitere großmaßstäbliche Brandversuche an.

Wie bereits beschrieben, lag der Schwerpunkt dieser Studie auf Kletterpflanzen. Die üblicherweise für lebende Wände verwendeten Sträucher und Kräuter stellen ebenfalls eine vergleichbare Pflanzenmasse dar. Aus diesem Grund wurden einige Pflanzen in dieser Versuchsreihe ebenfalls untersucht, standen aber nicht im Vordergrund.

Es ist wichtig zu beachten, dass in den meisten Industrieländern, wie z. B. in der Europäischen Union [134], nur künstlich hergestellte Produkte Bauprodukte im rechtlichen Sinne sind. Dies

gilt auch für die Bauordnungen der Mitgliedsstaaten [113]. Unter Berücksichtigung dieser Einstufung kann festgestellt werden, dass die Kletterhilfen und Rankgitter von Fassadenbegrünungen als Bauprodukte gelten. Die Pflanzen der begrünten Fassade können als nicht künstlich hergestelltes Produkt nicht zweifelsfrei als Bauprodukt eingestuft werden. Standardisierte Brandversuche, die zur Klassifizierung von Bauprodukten herangezogen werden, sind daher nur als Orientierung zu werten. Es ist jedoch klar, dass das grundsätzliche Schutzziel, die Brandausbreitung entlang der Fassade wirksam zu begrenzen, auch hier noch relevant ist.

3.3 Versuchsaufbau

Der Test wurde nach der SBI-Prüfmethode (Single Burning Item) durchgeführt und entsprach der EN 13823 [106]. Der Probekörper in Form von Pflanzen bestand aus einer Seite mit einer Fläche von 1 m x 1,5 m und einer Seite mit einer Fläche von 0,5 m x 1,5 m (B x H), wie in Abbildung 3.3 dargestellt.

Aus früheren Studien [43], [47], [135] ist bekannt, dass die Größe der Prüfkörper einen Einfluss auf die Entflammbarkeit hat. Es macht einen Unterschied, ob Pflanzenteile oder ganze Pflanzen verwendet werden. Bei Brandversuchen in kleinem Maßstab wird hauptsächlich die Entflammbarkeit der Pflanzenteile untersucht, bei Versuchen in größerem Maßstab eher die Entflammbarkeit der ganzen Pflanze [43], [47], [135]. Darüber hinaus war es das Ziel der Studie, Einflüsse auf die Entflammbarkeit der Pflanze im Rahmen einer großflächigen Anordnung an einer Fassade zu untersuchen. Wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, lag der Schwerpunkt auf der vergleichenden Analyse verschiedener Pflanzen hinsichtlich ihrer Wärmefreisetzung und Brandausbreitung und der Quantifizierung des Einflusses der Pflanzen innerhalb des SBI-Brandversuchsszenarios, nicht aber auf der genauen Quantifizierung der Entflammbarkeit für Bauprodukte. Diese Ergebnisse werden im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts genutzt, um Fassadenbrandversuche mit begrünten Fassaden im Realmaßstab zu konzipieren. Aus diesem Grund wurde der SBI-Test [106] gewählt, um die Entflammbarkeit von Pflanzen für begrünte Fassaden zu untersuchen. Bei dieser mittelgroßen Testmethode können Flächen mit ganzen Pflanzen und nicht nur Pflanzenteile untersucht werden. Daher lassen die Ergebnisse Rückschlüsse auf das Verhalten der gesamten Pflanze und nicht nur auf Teile davon zu. Auch die Anordnung des Probekörpers auf dem Prüfstand mit seinen 1,5 m hohen vertikalen Flächen in einer Innenecke entspricht der realen Situation an einer Fassade. Auch das Einwirkungsszenario des Gasbrenners ist dem Prinzip eines Fassadenbrandes ähnlich.

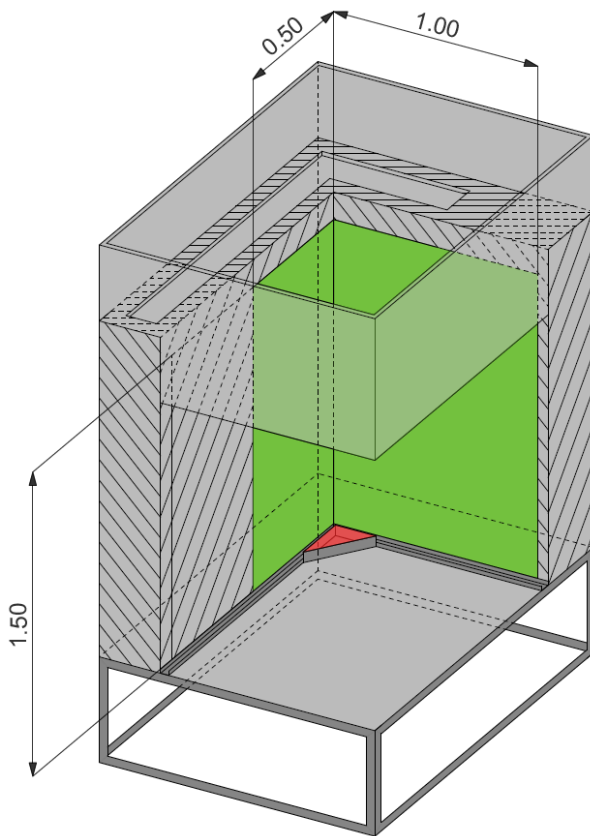


Abbildung 3.3 Illustration des SBI-Prüfstands und des Bereichs für die Pflanzenproben (grün)

Alle Tests wurden mit frischen Pflanzen durchgeführt, die direkt im Vorfeld von den Wurzeln abgeschnitten wurden.

Zur Befestigung der Pflanzen wurden Rankgitter mit einer Maschenweite von 25 cm verwendet. Diese relativ großen Maschenweiten sind in der Praxis für Kletterpflanzen üblich und sollen ein saisonales Abfallen des Laubes ermöglichen. Die genaue Anordnung ist in den Videos in [1] zu sehen.

In Absprache mit Forschungspartnern aus Wissenschaft und Praxis wurden zwanzig Kletterpflanzen und fünf Pflanzen für Living Walls identifiziert, die in Mitteleuropa häufig verwendet werden, wie in Tabelle 3.3 dargestellt.

Alle in Tabelle 3.3 aufgeführten Pflanzen waren mindestens drei Jahre alt. In Anbetracht der Aspekte von Abschnitt 3.1 und der Tatsache, dass ältere Pflanzen in der Regel mehr verholzte Triebe haben, sollte dies typische realistische Randbedingungen darstellen. Um einen Vergleich zwischen jungen und alten Pflanzen zu ermöglichen, wurden weitere Pflanzen (< ein Jahr) herangezogen, wie z. B. *Hedera helix*. In diesem Fall wurden die Bezeichnungen "alt" und "jung" hinzugefügt.

Die für den Probekörper verwendete Pflanzenmasse ist auch in Tabelle 3.3 angegeben. Es wurde besonders darauf geachtet, die Pflanzen dicht über die gesamte Fläche anzuordnen. Um den Einfluss der Bepflanzungsdichte zu untersuchen, wurden einige Versuche mit einer

geringeren Bepflanzungsdichte durchgeführt. In diesem Fall sind die Versuche mit (1) für geringe und (2) für normale Dichte gekennzeichnet. "Normale Vegetationsdichte" entspricht der üblichen Anordnung von gepflegten Pflanzen an einer Fassade. Aufgrund der Pflanzenart, die mit der Masse und Größe der verholzten Triebe, Blattgröße und -dichte, Blüten und Früchte einhergeht, ergeben sich selbst bei optisch gleich intensiver Bepflanzungsdichte unterschiedliche Massen. Das aus der Literatur entnommene grundsätzliche Wuchsverhalten ist in Tabelle 3.7 im Anhang in Abschnitt 3.9 dargestellt.

Um den Einfluss einer realitätsnahen Verringerung des Feuchtigkeitsgehalts zu untersuchen, wurden zwei Pflanzen an den Wurzeln abgeschnitten und 42 Tage bei Raumtemperatur gelagert, bevor der Test durchgeführt wurde. Ziel dieses Tests war es, den Einfluss einer direkten Schädigung einer Pflanze im Wurzelbereich, einschließlich des Austrocknens der Pflanzen, aufzuzeigen.

Um den möglichen jahreszeitlichen Einfluss auf das Brandverhalten der Pflanzen zu untersuchen, wurden zusätzlich zu den Versuchen im Sommer auch Versuche im Winter durchgeführt. Diese fünf Versuche sind in Tabelle 3.3 mit dem Vermerk "Winter" gekennzeichnet. Es ist zu beachten, dass die im Winter getesteten *Hedera helix*, *Euonymus fortunei*, *Jasminum nudiflorum* und *Lonicera henryi* jeweils von derselben Pflanze stammen. Mit Ausnahme von *Actinidia deliciosa* wurden die Tests mit der gleichen Pflanzenmasse durchgeführt wie die vorangegangenen Sommertests. *Jasminum nudiflorum* blühte zu diesem Zeitpunkt im Winter. *Actinidia deliciosa* hatte im Winter kein Laub. Daher waren die Triebe laut Fotodokumentation in der gleichen Position und Masse wie im Sommer angeordnet. Die Gesamtmasse wich daher von den Werten im Sommer ab. Der Schwerpunkt lag hier auf der Untersuchung einer Pflanze, die ihr Laub abwirft.

Insgesamt wurden 43 SBI-Brandversuche mit Pflanzen als Probekörper durchgeführt. Eine Übersicht über die untersuchten Probekörper findet sich in Tabelle 3.3

3.4 Versuchsdurchführung

Das SBI-Prüfverfahren läuft nach EN 13823 [106] ab und entspricht im Prinzip einem Kalorimeter. Das Prüf- und Messverfahren ist in [106] und auch in [136] ausführlich beschrieben. Der SBI-Test ist ein Prüfverfahren zur Bestimmung des Brandverhaltens von Bauprodukten, die der thermischen Einwirkung eines Sandbett-Brenners (30 kW) ausgesetzt sind. Die Einzelheiten zum verwendeten Sandbett-Brenner sind in Tabelle 3.2 aufgeführt.

Tabelle 3.2 Details zum Sandbett-Brenner [106]

Bezeichnung	Description
Wärmefreisetzungsrate	30,7 ± 2,0 kW
Brennstoff	Propangas mit einem Reinheitsgrad von mindestens 95 %.
Regelbereich des Massendurchflussreglers	0 g/s bis 2,3 g/s ^a
Genauigkeit des Massendurchflussreglers	1 % im Bereich von 0,6 g/s bis 2,3 g/s
Gehäuse	1,5 mm dickes Edelstahlblech
Abmessung	Rechtwinkliges gleichschenkliges Dreieck (Draufsicht) mit einer Schenkellänge von 250 mm und einer Höhe von 80 mm.

Bezeichnung	Description
Konstruktion	10 mm hoher Hohlraum am Boden, darüber bis zu einer Höhe von 60 mm eine Schicht aus Kies mit einer Korngröße von 4 mm bis 8 mm und bis zu einer Höhe von 80 mm eine Deckschicht aus Sand mit einer Korngröße von 2 mm bis 4 mm.

^a Der Propangasstrom von 2,3 g/s entspricht einer Wärmefreisetzung von 107 kW, wenn der niedrigere Heizwert von Propan verwendet wird (46 360 kJ/kg)

Der Probekörper ist auf einem Wagen montiert, der in einem Gestell unter einer Abzugsanlage positioniert ist. Die Wärme- und Rauchfreisetzungsrates werden instrumentell gemessen und die physikalischen Eigenschaften werden durch Beobachtung beurteilt. Die Zündung des Nebenbrenners zu Beginn wird zur Messung der Wärme- und Rauchfreisetzung des Brenners selbst verwendet. Mit Hilfe dieser Messung kann die Wärmefreisetzung des Brenners von der Gesamtwärmefreisetzung abgezogen werden, und die Ergebnisse zeigen nur die Wärmefreisetzungsrates der Probe [106]. Das allgemeine Verfahren wird im Folgenden kurz erläutert (siehe Abbildung 3.4).

- I. Ab $t = 0$ werden die Messungen aufgezeichnet.
- II. Bei $t = 120$ s wird der Nebenbrenner gezündet. Der Zeitraum $210 \text{ s} < t < 270 \text{ s}$ wird zur Messung der Basislinie für die Wärmefreisetzung des Brenners verwendet.
- III. Bei $t = 300$ s wird die Gaszufuhr zum Hauptbrenner umgeschaltet, der Hauptbrenner wird gezündet und der Nebenbrenner wird abgeschaltet.
- IV. Bei $t = 1\,500$ s wird die automatische Messung zur Bewertung des Brandverhaltens des Probekörpers beendet.
- V. Bei $t = 1\,560$ s wird die Gaszufuhr zum Brenner unterbrochen.

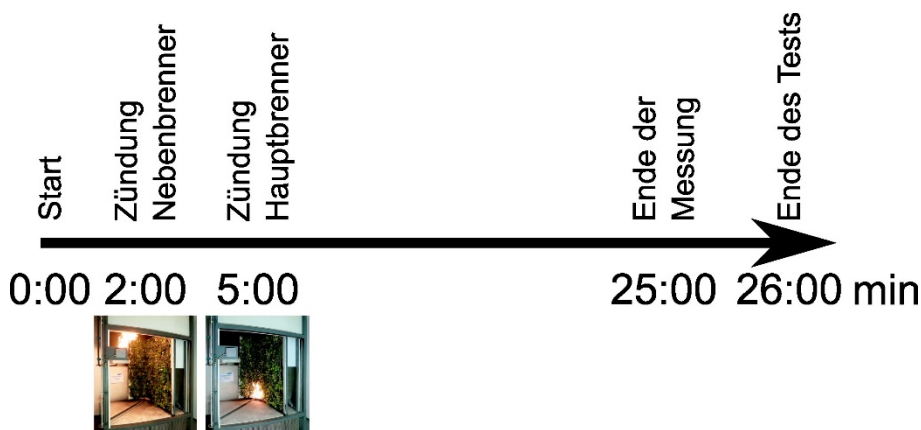


Abbildung 3.4 Ablauf des SBI-Prüfverfahrens nach EN 13823 [106]

3.5 Messtechnik

Bei der SBI-Prüfmethode nach EN 13823 [106] werden die Messdaten im Abluftkanal erfasst. Die direkt über dem SBI-Prüfstand befindliche Abzugshaube leitet alle Brandgase in diesen Abluftkanal ein. In diesem Abluftkanal befinden sich die folgenden Messgeräte:

- Hemisphärische Sonde zur Messung der Druckdifferenz in Pa mit einem Messbereich von mindestens 0 Pa bis 100 Pa und einer Genauigkeit von ± 2 Pa [138]
- Lichtmessstrecke zur Messung der Lichtdurchlässigkeit in %
- Gasentnahmesonde zur Messung des O₂-Molanteils und des CO₂-Molanteils im Abgasstrom jeweils im Verhältnis von Volumen O₂ oder Volumen CO₂ zu Volumen Luft in %. Das O₂-Gasanalysegerät ist ein paramagnetischer Typ mit einem Messbereich von mindestens 16 % bis 21 % Sauerstoff. Die Ansprechzeit des Analysegeräts beträgt weniger als 12 s. Das Rauschen und die Drift des Analysegeräts betragen weniger als 100 ppm über einen Zeitraum von 30 Minuten. Das CO₂-Analysegerät ist ein Infrarottyp mit einem Messbereich von mindestens 0 % bis 10 % Kohlendioxid. Das Analysegerät weist eine Linearität von mindestens 1 % des Messbereichs auf. Die Ansprechzeit des Analysegeräts beträgt höchstens 12 s [106]
- Drei Mantelthermoelemente vom Typ K nach EN 60584-1 [137] (Durchmesser 0,5 mm bis 1 mm, isoliert) auf einem Radius von (87 ± 5) mm um die Rohrachse und in einem gegenseitigen Winkelabstand von 120° zur Messung der Temperatur in K

Zusätzlich zeichnet das Datenaufzeichnungssystem die Zeit in s (alle 3 s), den Propanmassenstrom durch den Brenner in mg/s und die Umgebungstemperatur am Lufteinlass am Boden des Probenträgers in K auf. [106]

Das Kalibrierverfahren der Messung kann dem Anhang C und Anhang D der EN 13823 [106] entnommen werden. Im Rahmen eines SBI-Ringversuchs 2015 – 2016 [106] mit 86 Versuchen an Spanplatten wurde für die Wiederholbarkeit eine relative Standardabweichung von 5 % für die gesamte Wärmefreisetzung der ersten 600 s (Hauptbrenner) ermittelt.

3.6 Ergebnisse der SBI Test

In Tabelle 3.3 sind für jeden einzelnen Probekörper der Prüfzeitpunkt, das Flächengewicht, der Feuchtigkeitsgehalt und die Gesamtwärmefreisetzung angegeben. Die Wärmefreisetzungsraten sind für jeden Test in Abbildung 3.5 bis Abbildung 3.11 dargestellt. Die Gesamtwärmefreisetzung und die Probenmasse (Pflanzenmasse ohne Spalier) für jeden der Tests sind in Abbildung 3.12 dargestellt.

Auf der Grundlage der SBI-Prüfkampagne wurden für jeden Probekörper die typischen Klassifizierungswerte nach EN 13501-1 [139] ermittelt und in Tabelle 3.6 im Anhang in Abschnitt 3.9 informativ aufgelistet.

Tabelle 3.3 Ergebnisse der FireSafeGreen SBI-Tests

Nr.	Name des Prüfkörpers	Testzeitpunkt	Flächengewicht [kg/m ²] ^a	Feuchtigkeitsgehalt (total) ^b [%]	Feuchtigkeitsgehalt (Holz / Triebe) ^c [%]	Gesamtwärmefreisetzung [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	Januar 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	Januar 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> (alt)	August 2022	1,84	220	162	5,4
14	<i>Hedera helix</i> (alt) - Winter	Januar 2023	1,84	191	136	6
15	<i>Hedera helix</i> (jung)	August 2022	1,84	245	181	6,9
16	<i>Hedera helix</i> (jung) - trocken	Oktober 2022	1,85/ 0,75 ^d	39	16	21,2
17	<i>Humulus lupulus</i>	August 2022	2,20	290	286	7,5

Kletterpflanzen

Nr.	Name des Prüfkörpers	Testzeitpunkt	Flächengewicht [kg/m ²] ^a	Feuchtigkeitsgehalt (total ^b) [%]	Feuchtigkeitsgehalt (woody shoots ^c) [%]	Gesamtwärmefrei- setzung [MJ]
18	<i>Humulus lupulus</i> - trocken	Oktober 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	Januar 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	Januar 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

Kletterpflanzen

Nr.	Name des Prüfkörpers	Testzeitpunkt	Flächengewicht [kg/m ²] ^a	Feuchtigkeitsgehalt (total) ^b [%]	Feuchtigkeitsgehalt (Holz / Triebe) ^c [%]	Gesamtwärmeleistung [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>	Oktober 2022	1,03	151	91	4,4

Living wall Pflanzen

^a Mittelwert aus Flächengewicht kleine und große Seite

^b Laub und verholzte Triebe, meist Mittelwert aus drei Exemplaren

^c Bestimmung an einem geschnittenen Trieb (ca. 15 cm lang)

^d 1. Wert vital, 2. Wert getrocknet

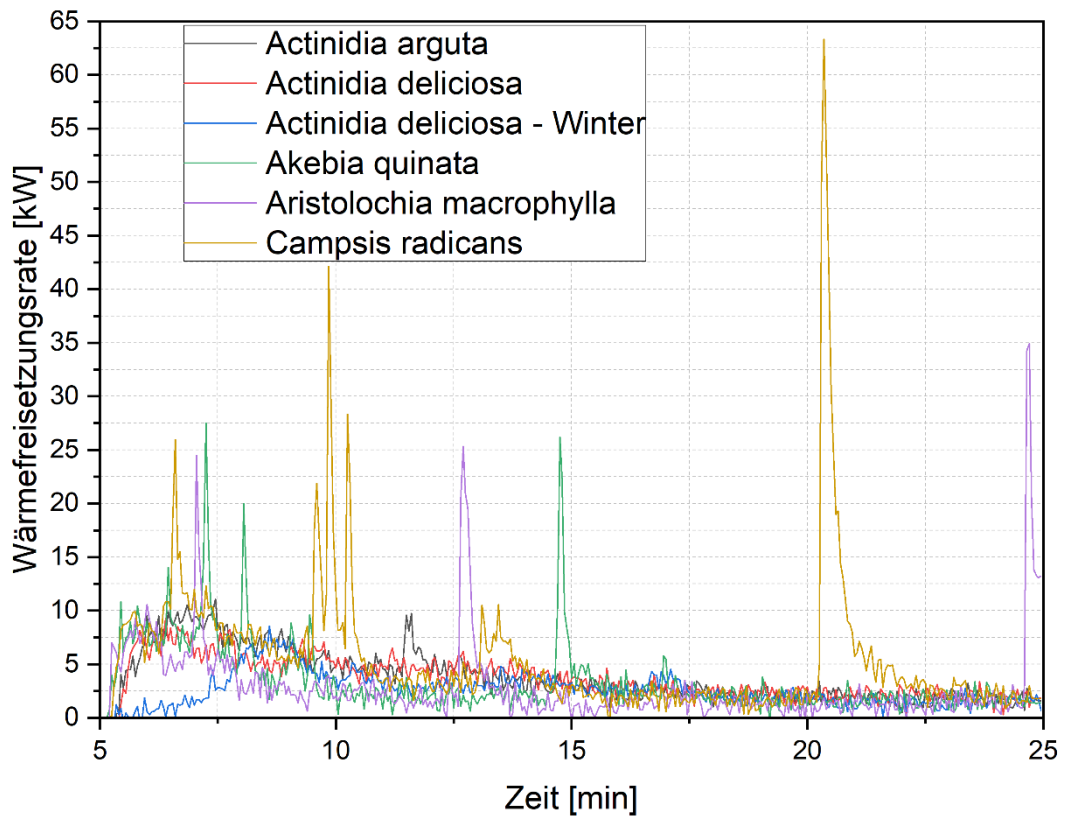


Abbildung 3.5 Wärmefreisetzungsrate für Actinidia arguta bis Campsis radicans

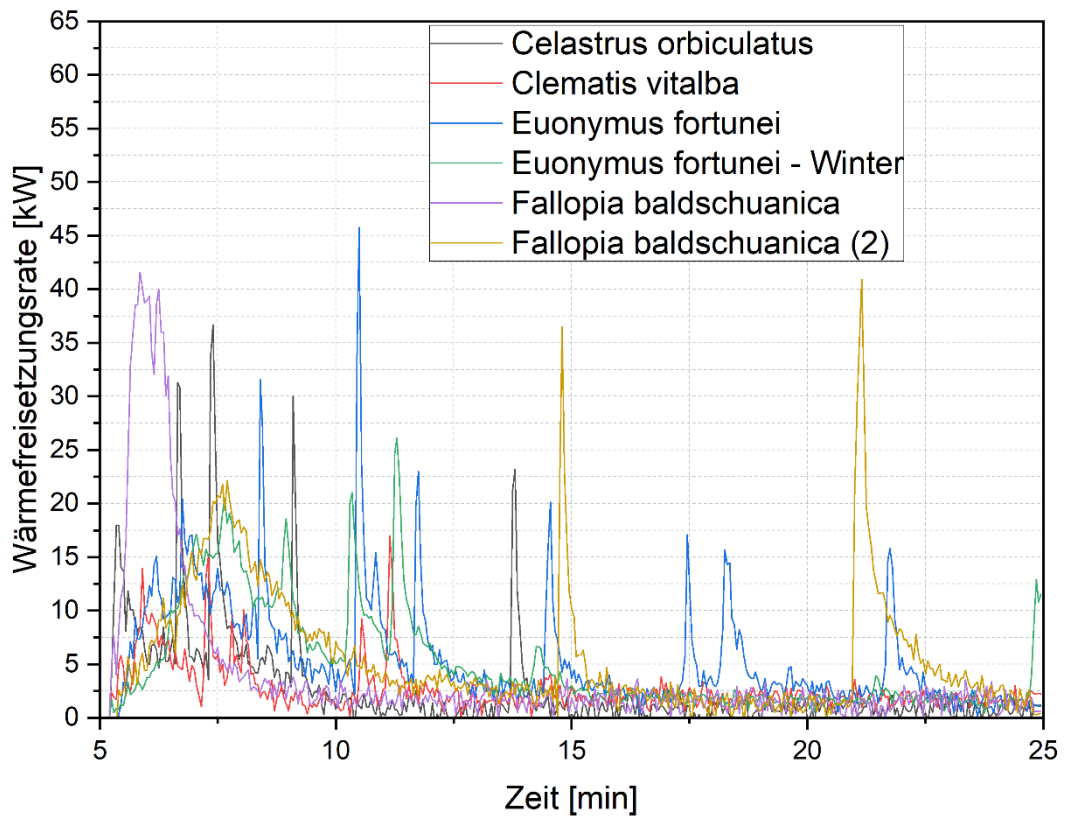


Abbildung 3.6 Wärmefreisetzungsrate für Celastrus orbiculatus bis Fallopia baldschuanica

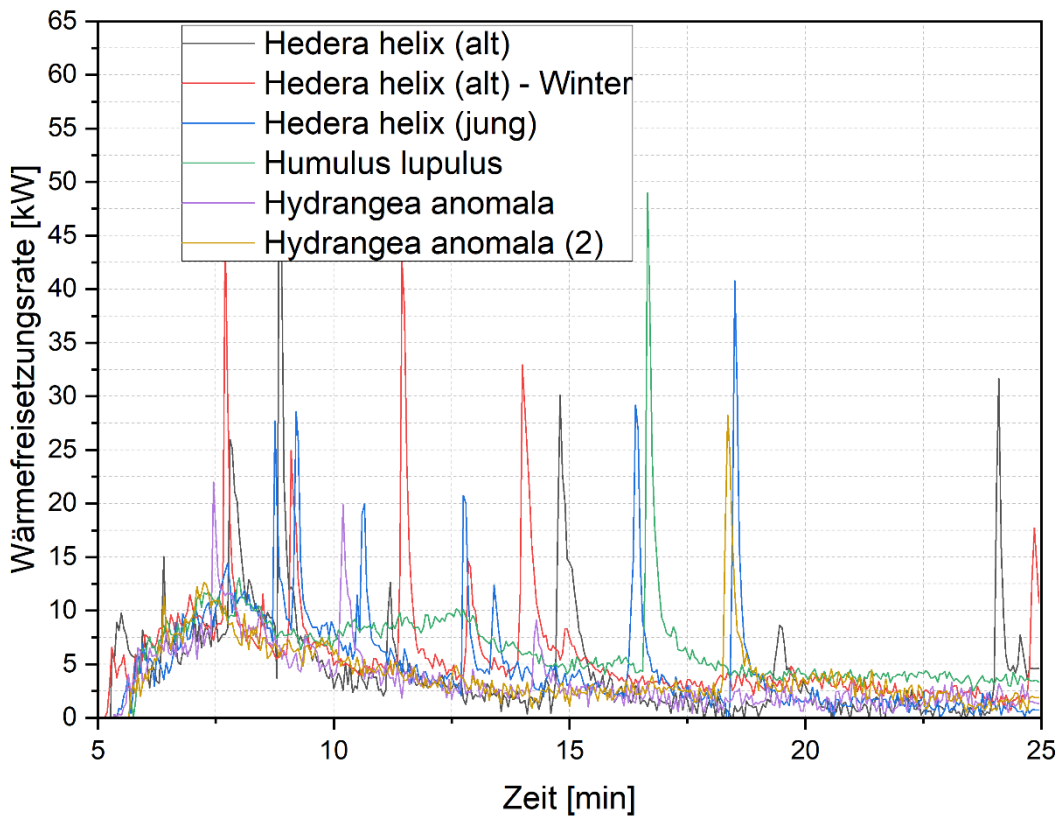


Abbildung 3.7 Wärmefreisetzungsrate für Hedera helix bis Hydrangea anomala

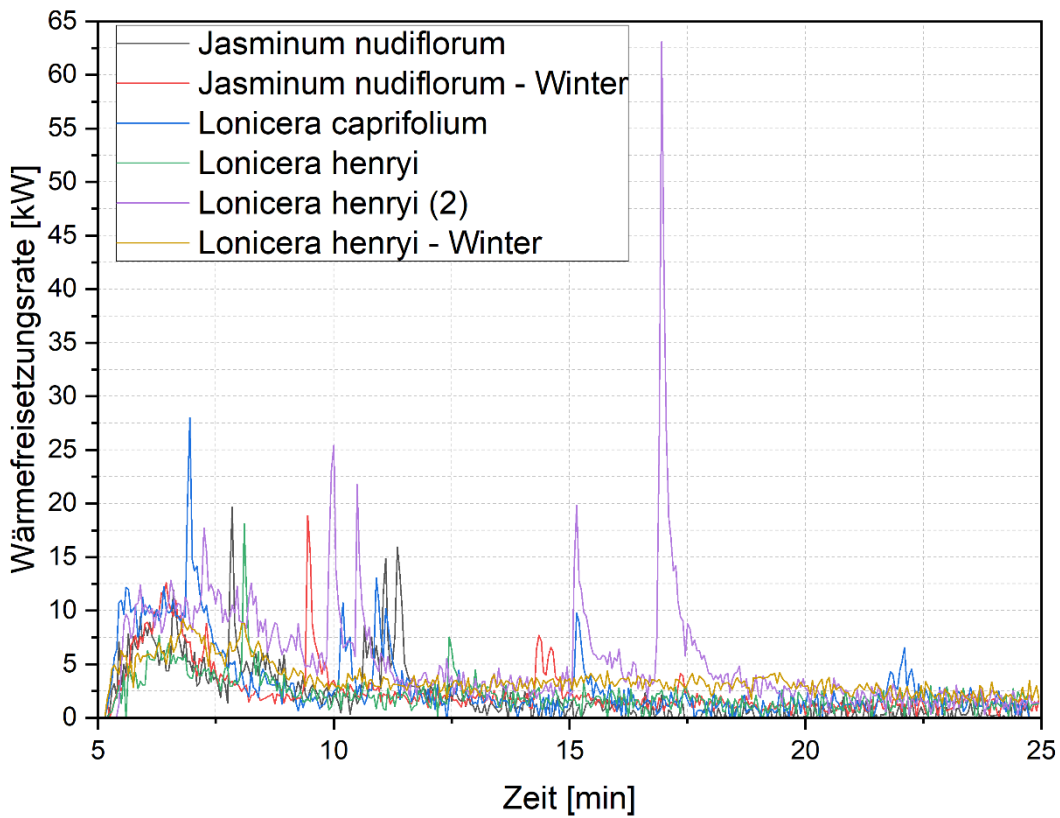


Abbildung 3.8 Wärmefreisetzungsrate für Jasminum nudiflorum bis Lonicera henryi

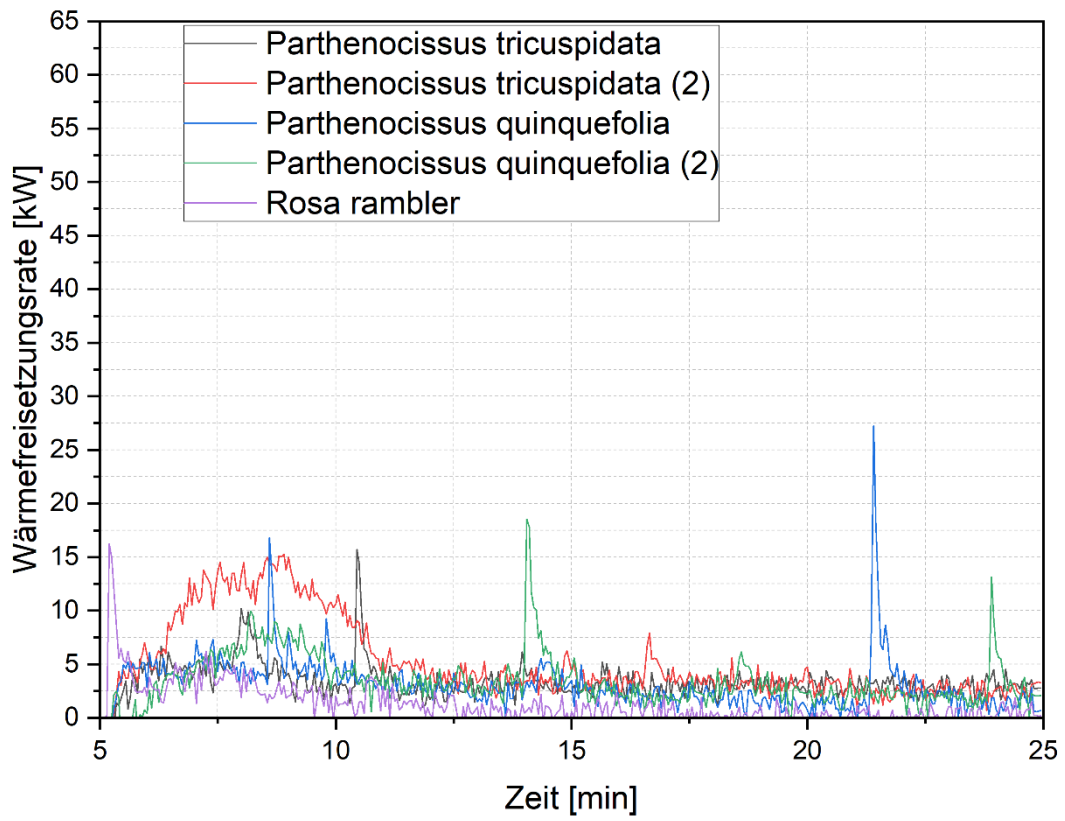


Abbildung 3.9 Wärmefreisetzungsrate für Parthenocissus tricuspidata bis Rosa rambler

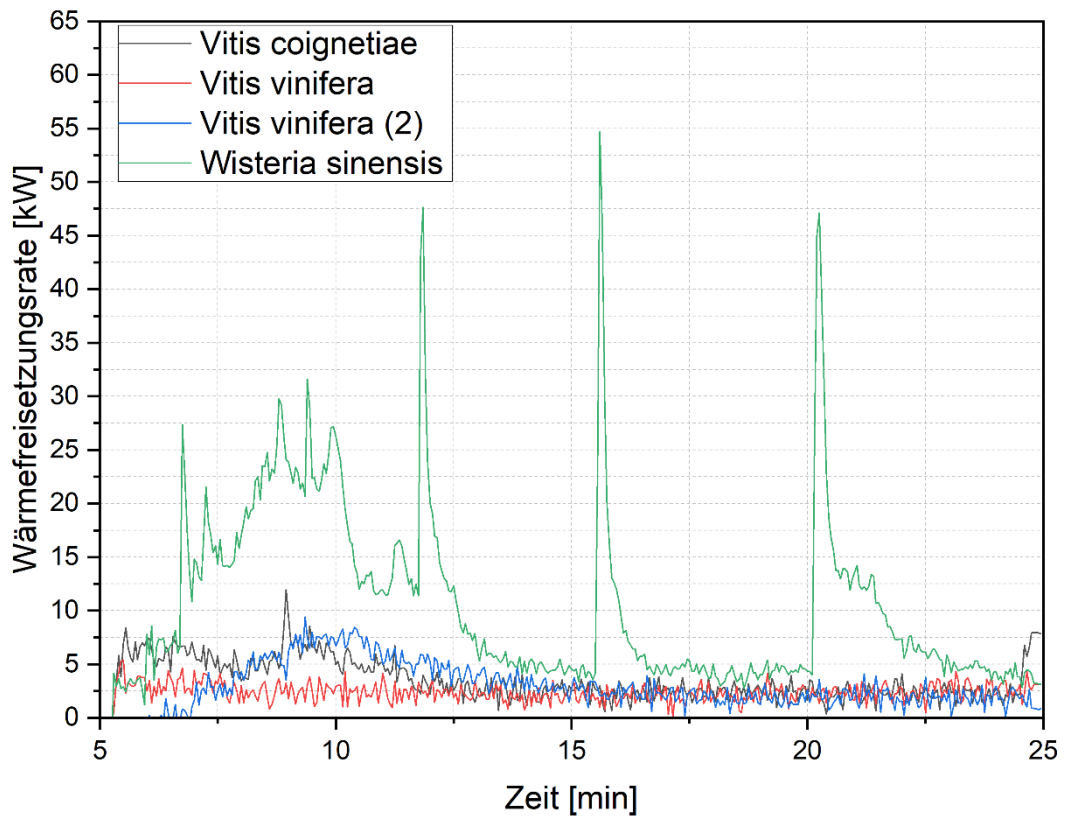


Abbildung 3.10 Wärmefreisetzungsrate für Vitis coignetiae bis Wisteria sinensis

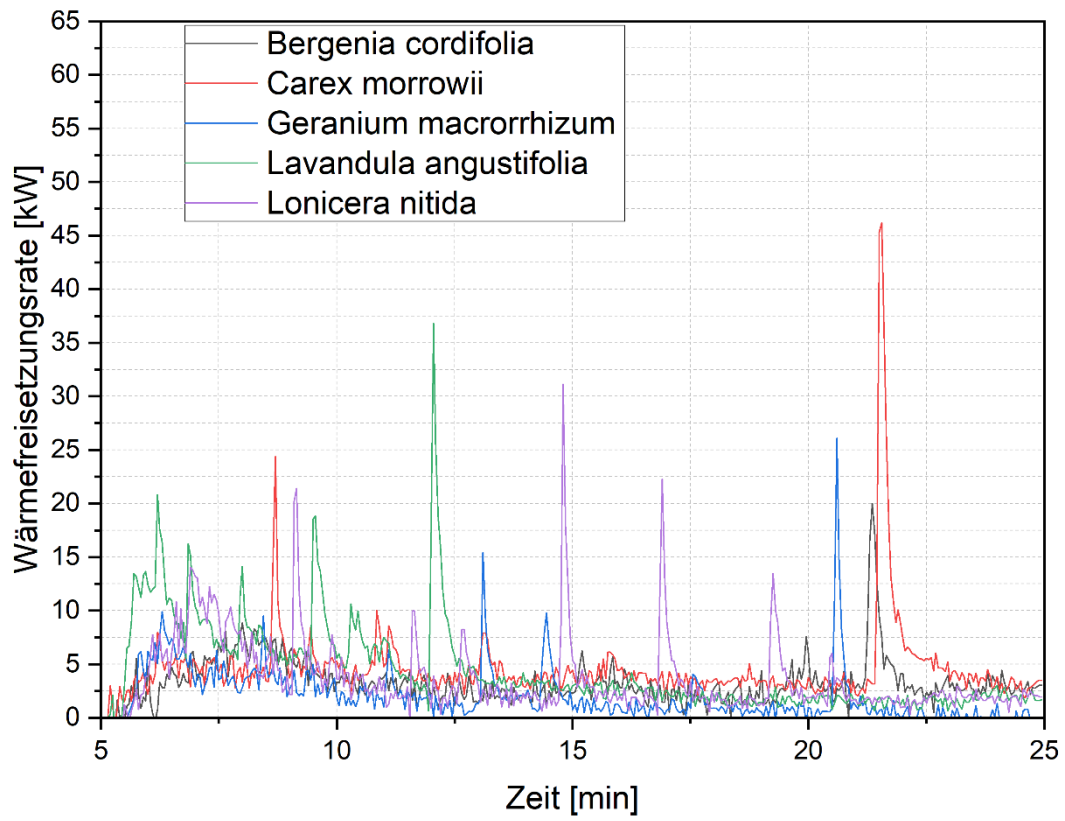


Abbildung 3.11 Wärmefreisetzungsrate für Bergenia cordifolia bis Lonicera nitida

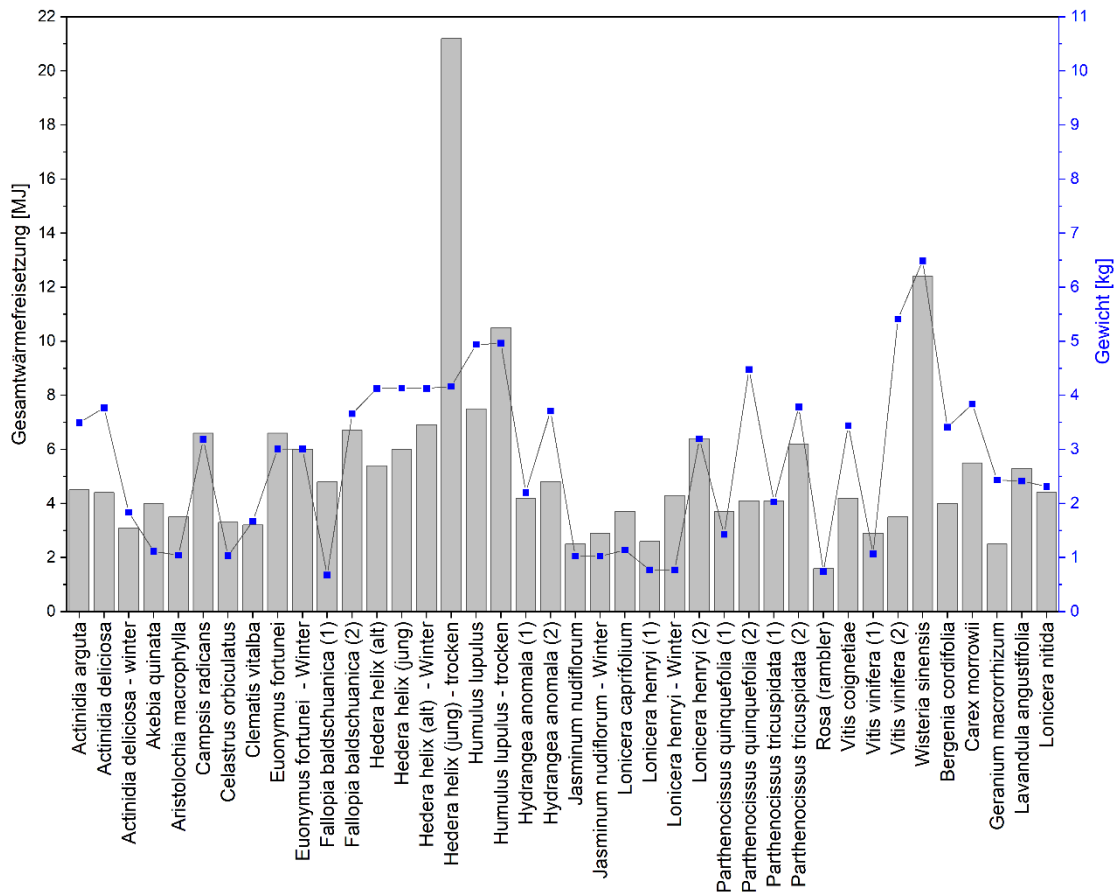


Abbildung 3.12 Darstellung der Gesamtwärmeabfuhr und der Probenmasse (Pflanzenmasse ohne Rankgitter)

Abbildung 3.13 zeigt die verbrannten, vertrockneten und noch vitalen Bereiche der Prüfkörper nach den SBI-Tests. Dazu wurde der Zustand der Pflanzen nach jeder Prüfung visuell erfasst und auf dem Prüfstand dokumentiert. Vitale oder getrocknete Pflanzenteile wurden anhand ihres Aussehens und ihres Verhaltens bei Berührung (feucht und elastisch) bestimmt. Außerhalb der Primärlamme waren die Pflanzen in allen Prüfungen vital, außer *Fallopia baldschuanica* (Nr. 11 gemäß Tabelle 3.3), *Hedera helix* (jung) - getrocknet (Nr. 16) und *Humulus lupulus* - getrocknet (Nr. 18). Im Falle von *Fallopia baldschuanica* hatten die Pflanzen, wie in Tabelle 3.3 dargestellt, bereits vor Versuchsbeginn einen niedrigen Feuchtigkeitsgehalt und waren verwelkt. Bei beiden Trockenversuchen hingegen kam es zu einer Abbrand auf fast der gesamten Fläche des Versuchsstandes.

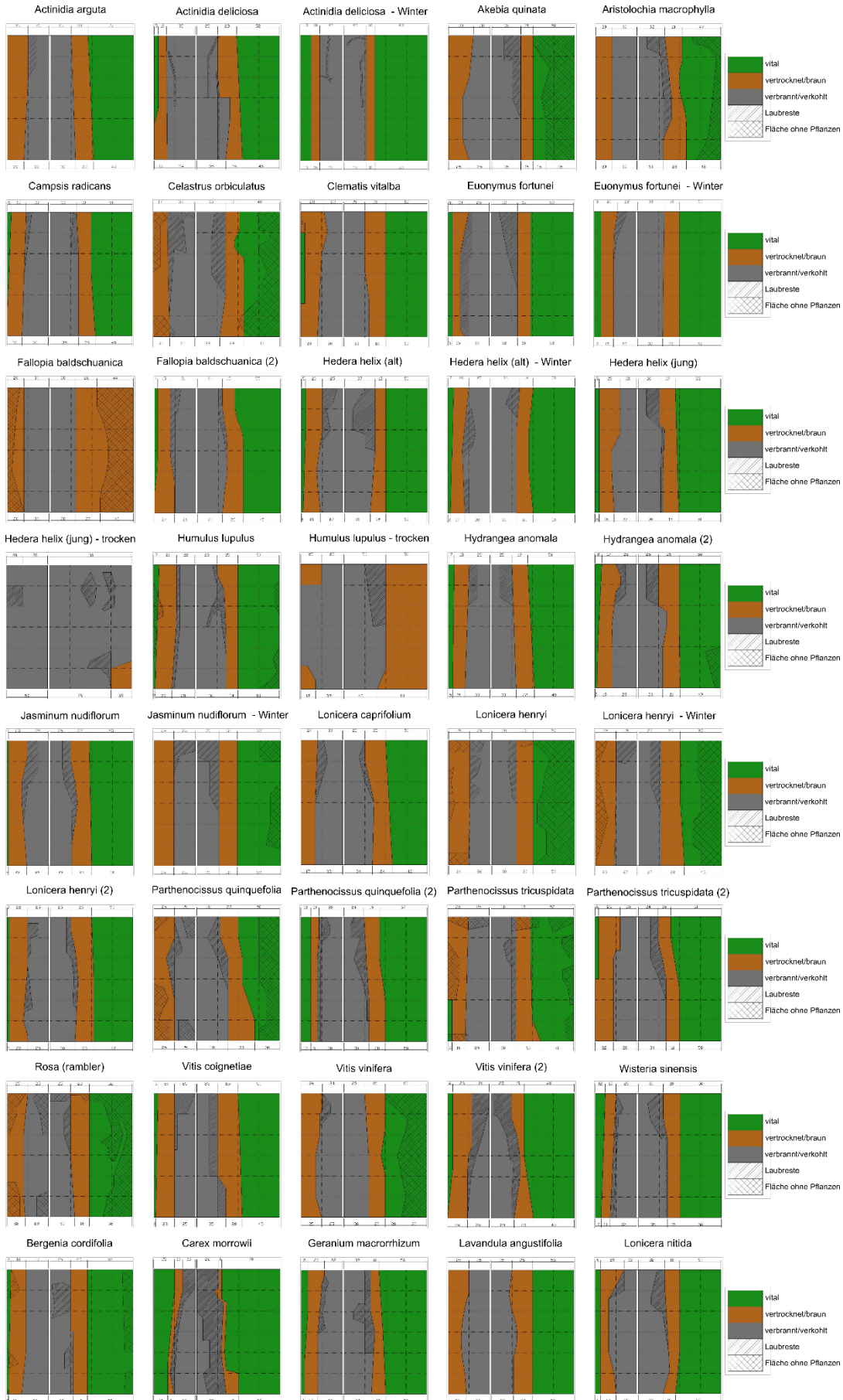


Abbildung 3.13 Visualisierung der verbrannten und vertrockneten Bereiche nach den Tests, basierend auf [140]

3.7 Diskussion

3.7.1 Allgemein

Wie in Abschnitt 2.2 dargestellt, verfolgten andere Studien den Ansatz, dass die Pflanze u.a. für das Brandverhalten an der Fassade verantwortlich ist. Das Ziel dieser Studie war es, erste Tendenzen für den Einfluss der Pflanzen auf den Fassadenbrand zu entwickeln.

Aufgrund der Anzahl und der Rahmenbedingungen dieser Tests (43 SBI-Tests mit unterschiedlichen Parametern, z.B. Pflanzenarten, alt vs. jung, vital vs. getrocknet und unterschiedliche Dichten) besteht kein Anspruch auf eine vollständig statistisch korrekte Erhebung zur abschließenden Beurteilung der Entflammbarkeit von Pflanzen für begrünte Fassaden. Der Umfang dieser Studie in Bezug auf die Anzahl der untersuchten Proben ist deutlich geringer als bei einigen Studien zur Waldbrandforschung, wie in Abschnitt 3.1 dargestellt. Der Schwerpunkt des Projekts FireSafeGreen liegt auf dem Brandverhalten von großflächig begrünten Fassaden, wie in Abschnitt 3.2 und 3.3 beschrieben wird. Aus diesem Grund wurde im Vergleich zu den Untersuchungen in Abschnitt 3.1 ein möglichst großer Probekörper (SBI-Test) gewählt. Die Frage, ob es deutliche Tendenzen für ein unterschiedliches Brandverhalten der Pflanzen bei einem Fassadenbrand mit entsprechend hoher Brandbeanspruchung (Raum-, Balkon- oder Müllcontainerbrände) gibt, steht hier im Vordergrund. Dabei geht es nicht darum, wie ausgeprägt diese Einflüsse sind, sondern vielmehr darum, welchen Einfluss sie bei einer großflächigen Anordnung an einer Fassade haben könnten. Die Ergebnisse werden im weiteren Verlauf des Forschungsprojekts für die Konzeption von großmaßstäblichen Brandversuchen mit begrünten Fassaden genutzt. Bei Bauteilversuchen, wie z.B. an einer Fassade, ist es in der Brandforschung üblich, mit Blick auf Kosten und Aufwand Ergebnisse aus Einzelversuchen zu generieren [141]. Inwieweit diese Vorgehensweise auch für begrünte Fassaden gilt, muss weiter untersucht werden.

Um die statistische Variation zu analysieren, wurden Wiederholungstests für eine Pflanzenart durchgeführt. Tabelle 3.4 zeigt für die Wiederholungsproben von *Hedera helix* (alt) das konstante Flächengewicht, den Feuchtigkeitsgehalt und die Gesamtwärmefreisetzung bei den SBI-Tests. Die Wärmefreisetzungsraten sind in Abbildung 3.14 für die Wiederholungstests dargestellt.

Tabelle 3.4 Ergebnisse der SBI-Wiederholungstests

Nr.	Bezeichnung	Flächengewicht [kg/m ²]	Feuchtigkeitsgehalt (insgesamt) [%]	Gesamtwärmefreisetzung [MJ]
13	<i>Hedera helix</i> (alt)	1,84	220	5,4
14	<i>Hedera helix</i> (alt) - Winter	1,84	191	6
41	<i>Hedera helix</i> (alt) (2)	1,84	205	6,1
42	<i>Hedera helix</i> (alt) (3)	1,84	205	6,6
43	<i>Hedera helix</i> (alt) (4)	1,84	205	6

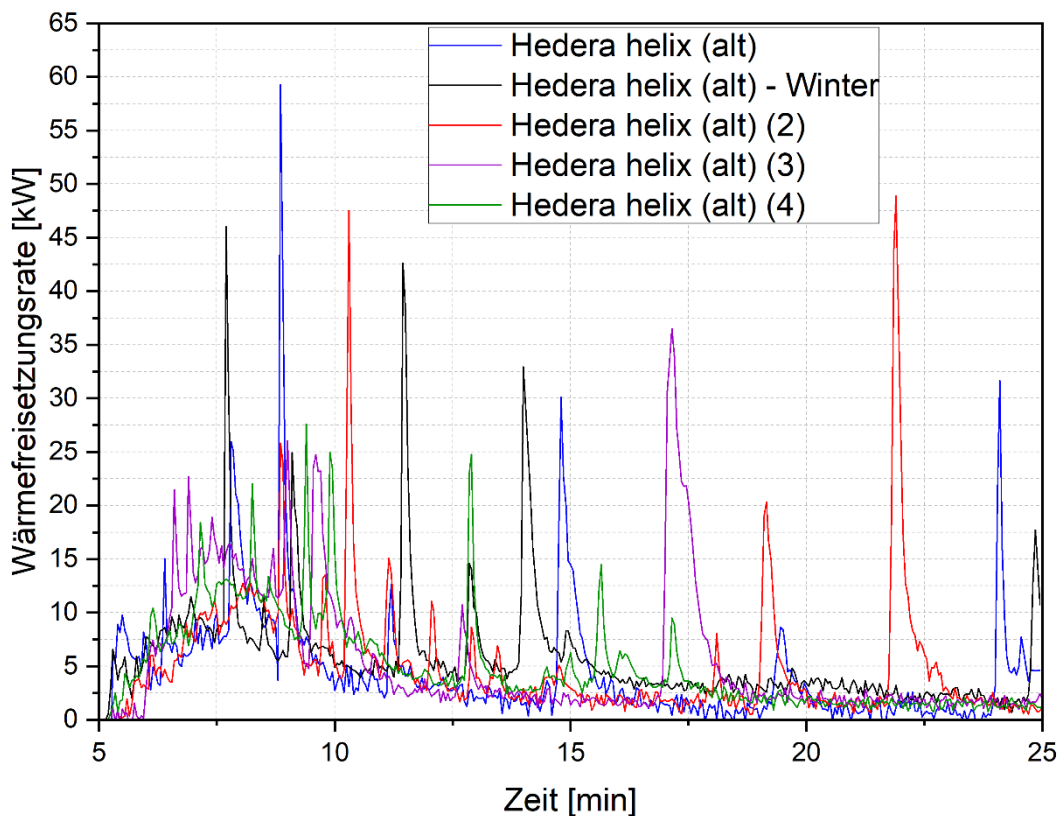


Abbildung 3.14 Wärmefreisetzungsrate für die *Hedera helix* (alt) Wiederholungsproben

Die Wiederholungstests zeigen eine Gesamtwärmefreisetzung von 5,4 bis 6,6 MJ mit einer Standardabweichung von 0,43. Die Wärmefreisetzung der Proben über die Zeit ist ähnlich. Das Aufflammen der einzelnen Proben ist in Bezug auf Menge und Ausprägung vergleichbar. Auf der Grundlage dieser Stichprobe von Wiederholungstests wird eine geringe Varianz für Tests desselben Typs vorhergesagt.

Ein Vergleich der Wärmefreisetzungsraten von Abbildung 3.5 bis Abbildung 3.11 aller Tests zeigt recht ähnliche Ergebnisse für alle vitalen Pflanzen (normaler Feuchtigkeitsgehalt). Die kurzen Spitzen der Wärmefreisetzungsrate stellen jeweils die bereits in Abschnitt 2.2.3 erläuterten "Strohfeuer" dar. Dies geschieht immer dann, wenn Teile der Pflanzen durch die Einwirkung der Flamme des Hauptbrenners austrocknen und diese Bereiche anschließend entzündet und verbrannt werden. In dieser Versuchsreihe lagen die Strohfeuer (Aufflammen) zwischen 10 und 60 kW (Mittelwert 20 kW) Differenz zur Wärmefreisetzungsrate, bei einer Dauer von jeweils 10 bis 50 s (Mittelwert 20 s). Die Größe dieser Strohfeuer und damit die auftretende Wärmefreisetzungsrate sind direkt abhängig von der Pflanzenmasse, der Dichte und der Zusammensetzung der Blattgröße und -menge (Abschnitt 3.1). Je mehr Blattmasse vorhanden ist (Größe und Anteil im Verhältnis zu den Holztrieben), desto mehr trocknet sie aus und führt zu abrupten Strohfeuer. Dies ist z. B. in Abbildung 3.8 zu sehen. Vergleicht man die beiden Versuche an *Lonicera henryi* (Nr. 24 und 26 gemäß Tabelle 3.3), bei denen die Pflanzenmasse zwischen Versuch Nr. 24 und 26 um mehr als das Vierfache erhöht wurde, so ergibt sich zwar nur eine Verdoppelung der Wärmefreisetzungsrate, aber deutlich mehr sichtbare Strohfeuer. Der Grund dafür ist, dass getrocknetes Laub, Früchte und Blüten aufgrund ihrer geringen

Masse und großen Oberfläche zum Aufflammen der Strohfeuer führen, während holzige Triebe mit einer relativ konstanten Rate abbrennen. [142] zeigt für Vegetationsbrände (in diesem Fall: Chaparral), dass lebende Äste bis zu 1,3 cm in der hochintensiven Flammenfront verbrannt werden können, während Brennstoffe mit größeren Durchmessern normalerweise nicht brennen. Dies unterstreicht die Tatsache, dass das Laub selbst im Fokus der Verbrennung steht. Der Vergleich der beiden Versuche (Nr. 11 und 12) mit *Fallopia baldschuanica* und (Nr. 19 und 20) mit *Hydrangea anomala* zeigt, dass mehr Pflanzenmasse nicht unbedingt zu einer höheren Wärmefreisetzungsrate führt. Wie in Abschnitt 3.1 gezeigt wird, sind neben der Masse auch eine Reihe anderer Faktoren, wie die Anordnung der Blätter und der Abstand zwischen den Blättern, für die Brandausbreitung im lebenden Pflanzenbrennstoff verantwortlich.

3.7.2 Die Rolle der Pflanzenart

Betrachtet man den durchschnittlichen Verlauf der Wärmefreisetzungsrate und die Spitzenwerte, so zeigt sich, dass bei vitalen Pflanzen der Einfluss der Pflanzenart und andere daraus resultierende Faktoren wie das Vorhandensein von ätherischen Ölen, das Wachstumsverhalten, die Blattgröße etc. eine untergeordnete Rolle spielen.

Unterschiede gibt es bei vitalen Pflanzen hinsichtlich der Wärmefreisetzungsrate in einem der beiden Tests mit *Fallopia baldschuanica* zu Beginn (Abbildung 3.6), mit *Campsis radicans* hinsichtlich der relativ stark ausgeprägten Strohfeuer (Abbildung 3.5) und mit *Wisteria sinensis* hinsichtlich des Gesamtverlaufs im Vergleich zu den anderen Pflanzen (Abbildung 3.10).

Der Unterschied bei *Fallopia baldschuanica* (Nr. 11 gemäß Tabelle 3.3) lässt sich wie folgt erklären. Da die Versuche mit mehrjährigen Pflanzen durchgeführt wurden, wurde im Falle des Versuchs Nr. 11 gemäß Tabelle 3.3 ein sehr verholztes Versuchsexemplar aus dem Versuchsgarten der Fachhochschule Weihenstephan-Triesdorf entnommen. Der Probekörper bestand fast ausschließlich aus relativ trockenen verholzten Trieben mit nur sehr wenig Laub. Dies zeigt sich auch bei der Betrachtung des Feuchtigkeitsgehaltes in Tabelle 3.3. Diese relativ trockenen holzigen Triebe verbrannten anfangs recht schnell im Bereich der Flamme des Hauptbrenners. Dies erklärt die erhöhte Wärmefreisetzungsrate zu Beginn. Da dieser Test nicht repräsentativ für eine begrünte Fassade in dieser Form ist, wurde ein weiterer Test (Nr. 12 nach Tabelle 3.3) mit einer ebenfalls mehrjährigen Pflanze, aber mit 6,5-facher Masse und vollem Blattwachstum durchgeführt. Bei diesem repräsentativen Versuch zeigen sich keine wesentlichen Unterschiede zu den anderen Pflanzen im Rahmen einer großflächigen Begrünung einer Fassade.

Das besondere Verhalten von *Campsis radicans* (Nr. 6 nach Tabelle 3.3) hinsichtlich der relativ großen Wärmefreisetzungsrate in der 20. Minute hat zwei Gründe. *Campsis radicans* hat normalerweise 9 - 11 elliptisch angeordnete Blätter (jedes ca. 3 - 6 cm) an einem gestielten Blatt [143]. Die große Anzahl von relativ kleinen Blättern und die hohe Pflanzendichte im Versuch begünstigten das Austrocknen des Laubes. Außerdem trug die Pflanze zum Zeitpunkt der Prüfung Blüten. Diese Blüten (ca. 4 - 12 in Büscheln), die typischerweise im Juli bis September auftreten [143], liefern weiteres schnell trocknendes Material. Im Versuch brannte ein mehrere Zentimeter breiter Streifen neben der Primärflamme auf dem größeren Schenkel des Prüfstandes als "Strohfeuer" über die gesamte Höhe in der 20. Minute ab. Aufgrund der oben

genannten Punkte war die Wärmefreisetzungsrate hier verhältnismäßig höher. Es ist jedoch anzumerken, dass bei anderen Tests mehrere Strohfeuer in kürzeren Abständen auftraten. Ein Vergleich dieser Spitzenwerte von Abbildung 3.5 bis Abbildung 3.11 zeigt, dass sie insgesamt der hier genannten Spitzenwärmefreisetzung entsprachen oder sie sogar übertrafen.

Der Unterschied für *Wisteria sinensis* (Nr. 35 nach Tabelle 3.3) in Bezug auf den Gesamtverlauf im Vergleich zu den anderen Pflanzen lässt sich durch die höhere Masse erklären, wie in Tabelle 3.3 dargestellt. Die auffallend höhere Masse kann durch mehrere Umstände erklärt werden. Da eine große Menge an Material zur Verfügung stand, wurde hier der Massenanteil erhöht, um den Einfluss auf die Wärmefreisetzungsrate zu untersuchen. Es wurde jedoch eine intensive, aber realistische Pflanzendichte gewählt. Aufgrund der geringen Blattgröße und der Blütezeit führt eine relativ große Masse an Pflanzenmaterial zu einer intensiven Vegetation. *Wisteria sinensis* hat normalerweise 7 - 12 eiförmig-elliptisch angeordnete Blätter (jedes ca. 5 - 8 cm) an einem gestielten Blatt [143]. Gegen Ende Juli entwickeln sich aus den 10 - 30 cm langen Blüten von *Wisteria sinensis* etwa 10 cm lange Samenschoten. Im Inneren der Schoten befinden sich Samen mit einem hohen Proteingehalt (Lektine). Die Schoten öffnen sich normalerweise im folgenden Frühjahr und verteilen die Samen [143]. Bei den SBI-Tests wurden an der *Wisteria sinensis* sowohl Blüten als auch Samenschoten festgestellt. Dies ist auch an dem relativ hohen Massengewicht zu erkennen. Die erhöhte Wärmefreisetzungsrate kann durch die Verbrennung der getrockneten Blüten und Samenschoten erklärt werden.

3.7.3 Vitale, gepflegte Pflanzen

Generell kann festgestellt werden, dass bei allen Versuchen mit vitalen, gepflegten Pflanzen eine horizontale Brandausbreitung nur in sehr geringem Umfang durch das Aufflammen kleinerer ausgetrockneter Pflanzenteile, die sich direkt neben der Primärf Flamme befanden, erfolgte, wie in Abbildung 3.13 zu sehen ist. Eine signifikante horizontale Brandausbreitung ist daher bei vitalen, gut gepflegten Pflanzen im Rahmen einer großflächigen Anordnung von Pflanzen an einer Fassade nicht zu erwarten.

Alle vitalen, gepflegten Pflanzen erloschen von selbst, nachdem die Flamme des Hauptbrenners abgeschaltet worden war. Während des Beobachtungszeitraums nach dem Test kam es zu keinem weiteren oder erneuten Brand.

3.7.4 Vergleich junge vs. alte Pflanzen

Im direkten Vergleich von jungen und alten Pflanzen wurden die grundlegenden Erkenntnisse aus Abschnitt 3.1 bestätigt. Während die älteren Pflanzen, die einen höheren Anteil an verholzten Trieben aufweisen, zu Beginn eine etwas höhere Wärmefreisetzungsrate besitzen, kam es bei den jungen Pflanzen im Verlauf des Tests zu mehr Strohfeuern. Dies lässt sich durch die größere Menge kleinerer Blätter erklären, die während des Tests austrocknen und abbrennen, wie in Abbildung 3.15 zu sehen ist.

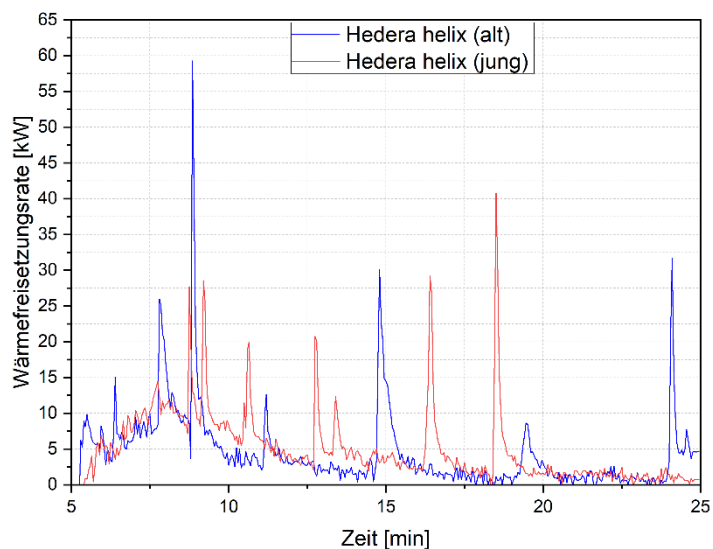


Abbildung 3.15 Vergleich der Wärmefreisetzungsrate von junger und alter *Hedera helix*

3.7.5 Die Rolle der saisonalen Einflüsse

Eine weitere Frage war, ob der jahreszeitliche Einfluss der Pflanzen einen Einfluss auf das Brandverhalten im Rahmen einer großflächigen Anordnung von Pflanzen an einer Fassade hat. Wie in Abbildung 3.16 und Abbildung 3.17 dargestellt, wurde ein vergleichbarer Trend für die Wärmefreisetzungsrate beobachtet. Die im Winter durchgeführten Tests mit *Euonymus fortunei*, *Hedera helix*, *Jasminum nudiflorum* und *Lonicera henryi* wiesen zu Beginn eine etwas höhere Wärmefreisetzung als die Werte der Proben derselben Pflanzen im Sommer, auf. Bei *Actinidia deliciosa* muss berücksichtigt werden, dass die Pflanze im Winter kein Laub trug und daher weniger Material im Test vorhanden war. Hier lag der Schwerpunkt auf der Untersuchung der verholzten Triebe. Insgesamt lässt sich bei einer großflächigen Anordnung von Pflanzen an einer Fassade kein wesentlicher Unterschied im Hinblick auf den jahreszeitlichen Einfluss identifizieren.

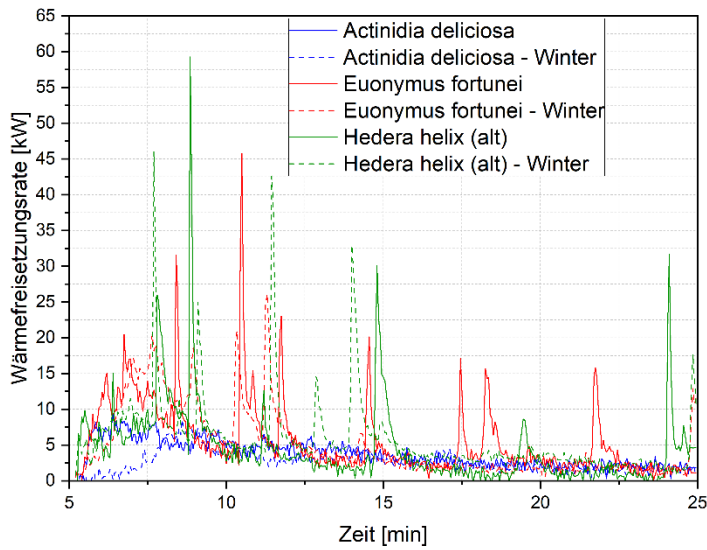


Abbildung 3.16 Vergleich der Wärmefreisetzungsrate bei Tests im Sommer und im Winter für *Actinidia deliciosa* und *Hedera helix*

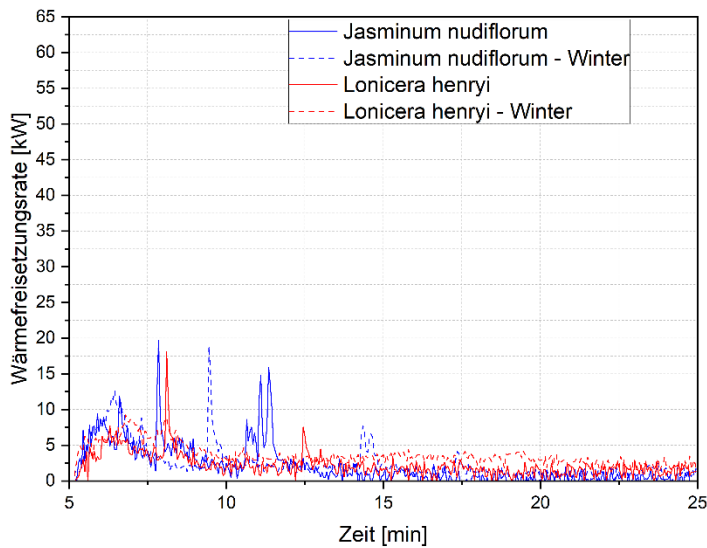


Abbildung 3.17 Vergleich der Wärmefreisetzungsrate bei Tests im Sommer und im Winter für *Jasminum nudiflorum* und *Lonicera henryi*

3.7.6 Trockene Pflanzen

Ein signifikanter Unterschied wurde bei den getrockneten Exemplaren festgestellt. Die Exemplare wurden 42 Tage lang bei Raumtemperatur getrocknet und hatten einen Feuchtigkeitsgehalt von 39% für junge *Hedera helix* und 74% für *Humulus lupulus*. Der Unterschied im Feuchtigkeitsgehalt lässt sich dadurch erklären, dass die junge *Hedera helix* mit ihren kleinen Blättern deutlich schneller trocknet als *Humulus lupulus*, die zudem eine große Anzahl von Hopfendolden aufwies. Wie aus Abbildung 3.18 und Abbildung 3.19 hervorgeht, gibt es insgesamt einen deutlichen Unterschied in der Wärmefreisetzungsrate. Dies ist auch aus Abbildung 3.12 und der gesamten Wärmefreisetzungsrate ersichtlich.

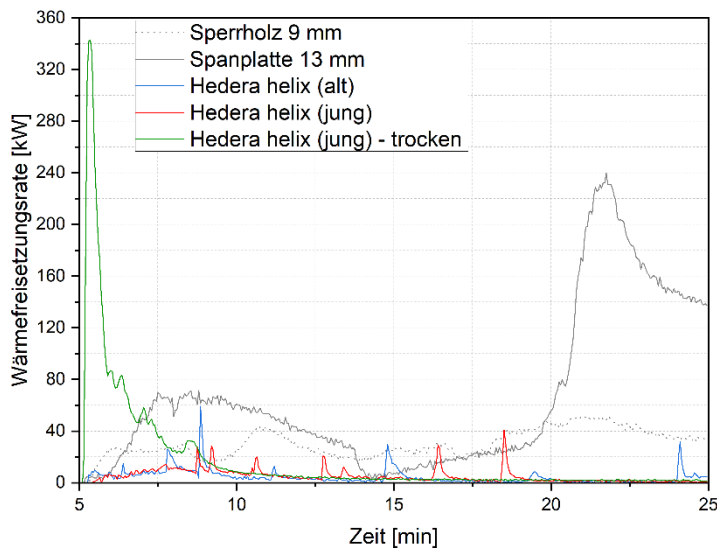


Abbildung 3.18 Wärmeabgaberate einer 42 Tage getrockneten, einer vitalen jungen und einer vitalen alten *Hedera helix* im Vergleich zu Spanplatte und Sperrholzplatte

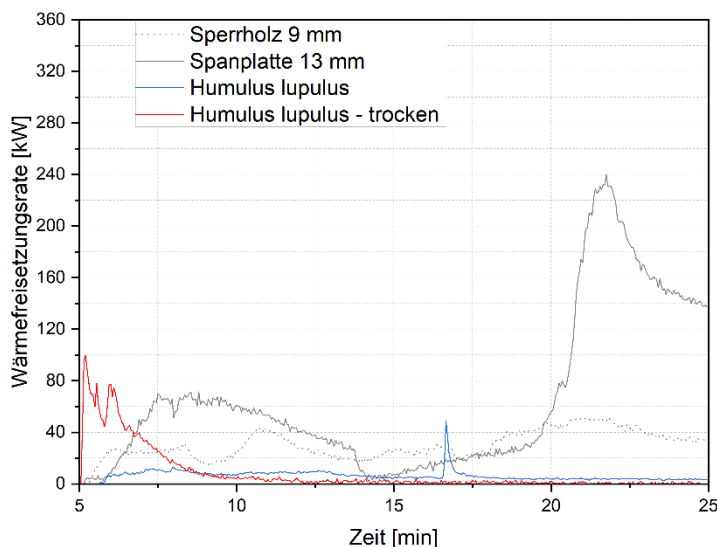


Abbildung 3.19 Wärmefreisetzungsrates eines 42 Tage getrockneten und eines vitalen *Humulus lupulus* im Vergleich zu Spanplatte und Sperrholzplatte

Die getrockneten Proben, die sowohl abgestorbene trockene Pflanzenteile und Totholzanteile aufwiesen, zeigen in beiden Fällen eine abrupte Wärmefreisetzung zu Beginn. Im Falle der getrockneten *Hedera helix* verbrannte der gesamte Prüfkörper innerhalb der ersten fünf Minuten. Bei *Humulus lupulus* verbrannte ein großer Teil des Prüfkörpers. In beiden Fällen kam es, anders als bei den vitalen Proben, zu einer schnellen horizontalen Brandausbreitung.

Ein Vergleich der Wärmefreisetzungsrates mit der einer 13 mm dicken Spanplatte und einer 9 mm starken Sperrholzplatte (SBI-Tests [106]) zeigt, dass insbesondere die Wärmefreisetzungsspitze von *Hedera helix* die der beiden oben genannten Bauprodukte übertrifft. Es ist jedoch zu beachten, dass die Wärmefreisetzung von trockenen Pflanzen abrupt über ein kurze Zeitspanne erfolgt. Es findet also keine kontinuierliche Wärmefreisetzung über den gesamten

Testzeitraum statt. Dieser Fakt ist wesentlich für weitere Untersuchungen im Rahmen einer großflächigen Anordnung von Pflanzen an einer Fassade, da die Dauer eines Wärmestroms für eine mögliche Entzündung eine entscheidende Rolle spielt.

Aus Untersuchungen ist bekannt, dass für die Entzündung von z. B. Holz ein fünfmal höherer Wärmestrom notwendig ist, wenn die Einwirkung über einige Minuten erfolgt und nicht konstant über einen längeren Zeitraum [144]. Bekannt ist auch, dass eine kurzfristige Brandeinwirkung auf moderne Mehrscheibenverglasungen in der Regel nicht zum Bruch aller Scheiben führt [145]. Daraus ergibt sich die weiter zu untersuchende Frage: Wie kritisch sind kurzzeitige Brandeinwirkungen durch eine begrünte Fassade (einschließlich des Szenarios, dass eine gepflegte Pflanze mit geringem Totholzanteil abstirbt und austrocknet) für eine Außenwand, für die Verglasung oder ein offenes Fenster und welche Rolle spielen sie folglich für die Brandausbreitung entlang der Außenwand und in das Gebäude? Es ist zu beachten, dass sich Kletterhilfen und Rankgitter für begrünte Fassaden in der Regel in einem Abstand von 8 - 20 cm zur Außenwand befinden und folglich eine Brandausbreitung nicht direkt entlang der Außenwand erfolgt [38].

Vergleicht man die Wärmefreisetzungsrate von vitalen Pflanzen mit der von Span- oder Sperrholzplatten, wie in Abbildung 3.18 und Abbildung 3.19 dargestellt, so ist zu erkennen, dass vitale Pflanzen selbst bei hohen Pflanzintensitäten eine relativ geringe Wärmefreisetzungsrate aufweisen.

3.7.7 Die Rolle der ätherischen Öle

Das Vorhandensein von ätherischen Ölen in den jeweiligen Pflanzen wurde in einer Literaturrecherche untersucht und ist in der Tabelle 3.7 im Anhang in Abschnitt 3.9 aufgeführt. Es ist zu beachten, dass diese Liste keinen Anspruch auf Vollständigkeit erhebt. Im Hinblick auf die Wärmefreisetzungsrate kann kein wesentlicher Einfluss durch ätherische Öle festgestellt werden. Dies wird besonders deutlich, wenn man die beiden Pflanzen *Humulus lupulus* und *Lavandula angustifolia* betrachtet, die zwar beide einen ausgeprägten Gehalt an ätherischen Ölen [146] aufweisen, aber keine wesentlichen Unterschiede in der Wärmefreisetzung. Betrachtet man jedoch die Raumentwicklung (SMOGRA-Wert aus Tabelle 3.6 im Anhang in Abschnitt 3.9), so wird deutlich, dass die Pflanzen mit ätherischen Ölen zu einer stärkeren Raumentwicklung beitragen. Im Hinblick auf den Brand außen an der Fassade spielt diese nur eine untergeordnete Rolle.

3.8 Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass international nur wenig Forschung zum Brandverhalten von begrünten Fassaden vorhanden ist. Grundsätzlich kann es sich bei begrünten Fassaden um eigenständig wachsende Kletterpflanzen an der Außenwand oder an Kletterhilfen bzw. Rankgittern oder um vollflächige Systeme, sogenannte Living Walls, handeln.

Living Walls sind komplexe Systeme mit einem hinterlüfteten Hohlraum, einer Tragkonstruktion, Verkleidungsplatten, Substrat, Vlies, Bewässerungssystem und den Pflanzen selbst. Die Systeme unterscheiden sich von Hersteller zu Hersteller erheblich. Verschiedene Hersteller verfügen derzeit über erste Ergebnisse aus mittelgroßen Brandversuchen an ihren Living

Walls. Allerdings wurden diese Tests zum Teil nicht mit dem gesamten System durchgeführt. Aus Sicht der Autoren können diese herstellereinspezifischen Systeme nur durch großmaßstäbliche Brandversuche am jeweiligen Gesamtsystem sinnvoll aus brandschutztechnischer Sicht untersucht werden.

Aus diesem Grund lag der Schwerpunkt der hier beschriebenen Versuche zur Ermittlung der Wärmefreisetzung von Fassadenbegrünungen auf Kletterpflanzen an Kletterhilfen oder Rankgittern. Ziel der Studie war die Untersuchung von Einflüssen auf die Entflammbarkeit der Pflanzen als Grundlage für eine zukünftige großflächige Anordnung an einer Fassade. Der Schwerpunkt lag auf der Quantifizierung des Einflusses der Pflanzen in Bezug auf die Brandausbreitung an einer Fassade und nicht auf der exakten Quantifizierung der Entflammbarkeit einzelner Pflanzenteile.

Der Hauptfaktor, der das Brandverhalten von Pflanzen beeinflusst, ist der Feuchtigkeitsgehalt. Ein Vergleich der Wärmefreisetzungsraten von vitalen Pflanzen (normaler Feuchtigkeitsgehalt) zeigt ein ähnliches Verhalten mit einer Basislinie von etwa 5 kW für diese Tests. Im Verlauf der Brandbeanspruchung kommt es zu kurzen Spitzen der Wärmefreisetzungsraten. Diese Spitzen sind "Strohfeuer", die auftreten, wenn Teile der Pflanzen durch die Einwirkung der Flamme austrocknen und sich dann entzünden und verbrennen. Die Pflanzenart selbst hat keinen wesentlichen Einfluss auf das Brandverhalten. Es wurde festgestellt, dass bei allen Versuchen mit vitalen, gepflegten Pflanzen eine horizontale Brandausbreitung nur in sehr geringem Umfang auftrat und dass alle vitalen, gepflegten Pflanzen nach Abschalten des Brenners in den SBI-Versuchen erloschen. Auch im direkten Vergleich zwischen jungen und alten Pflanzen sowie im Vergleich eines jahreszeitlichen Einflusses wurde kein wesentlicher Unterschied für vitale, gepflegte Pflanzen im Rahmen einer großflächigen Bepflanzung an einer Fassade festgestellt.

Ein entscheidender Unterschied wurde bei trockenen (toten) Pflanzen festgestellt. Hier kam es am Anfang zu einer abrupten Wärmefreisetzung. Abgestorbene Pflanzen sowie ungepflegte Pflanzen mit einem hohen Anteil an Totholz stellen den kritischsten Fall dar. Dies lässt den Schluss zu, dass die Pflege, Wartung und Instandhaltung einer begrünten Fassade der wichtigste Faktor für die Aufrechterhaltung der Brandsicherheit ist. Totholz in Form von abgestorbenem Laub, Ästen oder auch Vogelnestern muss regelmäßig entfernt werden. In regelmäßigen Abständen muss überprüft werden, ob die Pflanzen noch leben und somit einen normalen Feuchtigkeitsgehalt aufweisen. Darüber hinaus ist es wichtig, dass die Pflanzen regelmäßig zurückgeschnitten werden. Unkontrolliertes Wachstum kann auch zu viel Totholz führen, besonders bei lichtfliehenden Pflanzen.

Die Ergebnisse haben gezeigt, dass die von trockenen Pflanzen freigesetzte Wärme plötzlich innerhalb weniger Minuten auftritt. Es findet also keine kontinuierliche Wärmefreisetzung über einen längeren Zeitraum statt.

Die letzten beiden Ergebnisse werfen zwei wichtige Forschungsfragen für weitere Untersuchungen auf. Zum einen ist die Definition einer ordnungsgemäßen Pflege und Wartung für eine brandsichere grüne Fassade wesentlich. Welche Intervalle sind notwendig, und zu welchem Zeitpunkt sind die verschiedenen Pflegemaßnahmen erforderlich? Aus der Waldbrandforschung ist bereits bekannt, dass die Beurteilung der Entflammbarkeit von Pflanzen recht

komplex ist [54]. Es ist bekannt, dass es keine einfache pragmatische Methode gibt, um die Feuchtigkeit von lebendem Laub vor Ort ohne technische Hilfsmittel zu messen. Ein Eindruck kann durch genaues Betrachten und Berühren des Laubes gewonnen werden [66]. Hellgrünes, saftiges Laub deutet auf einen hohen Feuchtigkeitsgehalt hin, während sprödes, vertrocknetes, trockenes Laub, das in der Hand bricht, ein Alarmsignal ist. Die Entfernung von Totholz ist ebenfalls ein wichtiger Faktor für die Sicherheit bei Waldbränden [42], [47].

Eine wichtige Frage, die weiter untersucht werden muss, ist darüber hinaus, welchen Einfluss ein sehr kurzfristiger Wärmestrom auf die Außenwand, die Fenster und die dahinter liegenden Bereiche hat und welches Risiko damit verbunden ist. Eine konkrete Frage wäre zum Beispiel, ob der Wärmestrom einer trockenen Grünfassade (Worst Case) ausreicht, um eine Außenwandbekleidung aus Holz im Abstand von wenigen Zentimetern zu entzünden.

Darüber hinaus ist es notwendig, in einem weiteren Schritt die Erkenntnisse aus den mittelmaßstäblichen Versuchen im Realmaßstab zu überprüfen und insbesondere die vertikale Brandausbreitung genauer zu bewerten.

3.9 Anhang

Eine Reihe von Herstellern haben SBI-Brandtests [106] für ihre Living Walls [107] - [112] durchgeführt:

- **Biotope Living Wall System:**
Die Living Wall besteht aus Modulen mit den Abmessungen (B x H x T) 600 x 450 x 62 mm³. Die Module bestehen aus einem Polypropylengerüst, das mit Mineralfaserkernstreifen (55 mm tief x 100 mm hoch x 596 mm lang mit einer Nennrockenmasse von 16,8 kg/m³) gefüllt ist, einer Drainageschicht (hochdichter Polyethenkern mit getextiler Filterschicht) und einem Bewässerungssystem (Polyethen-Tropfleitung mit PVC-Abdeckung).
Der Feuchtigkeitsgehalt im Mineralfaserkern betrug 70% [107].
- **Sempergreen Flexipanel (Living Wall):**
Die Living Wall hat eine Gesamtdicke von 95 mm. Sie besteht aus einer Aluminiumprofilkonstruktion, auf der Paneele mit den Maßen (B x H x T) 600 x 500 x 65 mm³ montiert sind, einer wasserdichten Befestigungsschicht, einer Bewässerungsmatte mit Bewässerungssystem, einer Substratschicht und einer UV-beständigen Frontschicht. Das Gesamttrockengewicht der Konstruktion betrug ca. 9 kg/m² [108], [109].
Der Gesamtfeuchtigkeitsgehalt eines Moduls betrug 6 kg/m².
- **Sempergreen Flexipanel A2:**
Die Living Wall besteht aus Modulen mit den Abmessungen (B x H x T) 620 x 520 x 60 mm³. Eine vordere Schicht aus 0,8 mm dicker Glasfaser, eine innere Schicht aus 0,9 mm dickem Vlies (synthetische Fasern Klavermat HC100), eine 60 mm dicke Schicht aus Mineralwolle, eine hintere Doppellage aus 3 mm dicker Glasfaser und Filamentgarn für die Nähte, bilden die Module [110].
- **ANS Living Wall System**
Die Living Wall besteht aus Modulen mit den Maßen (B x H x T) 250 x 500 x 105 mm³. Jedes Modul besteht aus Polypropylen und ist an einem Aluminiumrahmen befestigt. Ein Modul hat 12 Pflanzenfächer, die mit organischem Kompost gefüllt sind (Tiefe 100 mm). Jedes Fach beherbergt eine einzelne Pflanze. Ein 5 mm breites, freiliegendes Polypropylengitter an der Vorderseite trennt die Fächer voneinander. Zwischen den Modulen ist ein Polyurethan-Bewässerungssystem aus perforiertem Schlauch installiert.
Der Gesamtfeuchtigkeitsgehalt eines Moduls betrug 45 % [111], [112].

Es ist anzumerken, dass einige der SBI-Tests an Systemen ohne Pflanzen oder Bewässerungssysteme durchgeführt wurden, so dass die Ergebnisse nur bedingt vergleichbar sind und nicht das endgültig fertig ausgeführte Bauteil repräsentieren.

Tabelle 3.5 Ergebnisse der elf SBI-Tests für verschiedene Living Walls

Nr.	Typ	Beschreibung	FIGRA _{0,2 MJ} [W/s]	THR _{600s} [MJ]	SMOGRA [m ² /s ²]	TSP _{600s} [m ²]	Klassifi- zierung
1	Biotope Living Wall System	Untrimmed planted material [107]	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 [107]	77,1	1,97	42,0	168,1	B s2 d2
3	Biotope Living Wall System	All planted material cut back to 80 mm [107]	57,5	2,24	43,5	110,8	B s2 d0
4 - 6	Biotope Living Wall System	Unplanted [107]	61,7/ 38,6	3,12/ 0,87/ 2,59	7,9/ 9,1	10,5/ 59,0/ 68,7/ 72,3	B s2 d0
7 - 10	Sempergreen Flexipanel	Planted with 7,1 kg/m ² non-lignifying plants (<i>Bergenia cordifolia</i>) [108], [109]	114 (65) ^a	6,5 (4,6) ^a	37,6 (29,5) ^a	183 (-) ^a	B s2 d0
11	Sempergreen Flexipanel A2	Unplanted [110]	-	-	-	-	A2 s2 d0
12	ANS Living Wall System	Untrimmed planted material [111]	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 [111]	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 [111]	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 [111]	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 [112]	61	1,3	43	43	B s2 d0

^a Erster Wert resultiert aus drei Tests (zweiter Wert resultiert aus dem vierten Test)

Die Tabelle 3.6 stellt für jeden einzelnen Probekörper die nach EN 13823 [106] definierten und ermittelten Werte für $FIGRA_{0,2 MJ}$, THR_{600s} , $SMOGRA$, TSP_{600s} und die theoretische Brandklassifizierung von Bauprodukten nach EN 13501-1 [139] dar. Dabei sind die folgenden Grundsätze zu beachten:

- $FIGRA_{0,2 MJ}$ (fire growth rate index) ist der maximale Quotient aus der Wärmefreisetzungsrate des Probekörpers und der zugehörigen Zeit, wobei ein Schwellenwert für die gesamte Wärmefreisetzung von 0,2 MJ zugrunde gelegt wird.
- THR_{600s} (total heat release) ist die Gesamtenergie, die in den ersten 600 Sekunden der Einwirkung der Flammen des Hauptbrenners freigesetzt wird.
- $SMOGRA$ (smoke growth rate index) ist der maximale Quotient aus der Rauchwachstumsrate der Probe und dem zugehörigen Zeitpunkt.
- TSP_{600s} (total smoke production) ist die gesamte Rauchentwicklung der Probe in den ersten 600 Sekunden der Einwirkung der Flammen des Hauptbrenners.
- Die Brandklassifizierung der einzelnen Probekörper nach den Klassifizierungsnorm [139] als ergänzende Information. Wie bereits in Abschnitt 3.2 handelt es sich bei Pflanzen nicht um typische Bauprodukte. Folglich hat die Klassifizierung nach EN 13501-1 [139] in Bezug auf ihren Anwendungsbereich nur informativen Charakter

Tabelle 3.6 Ermittelten Versuchswerte nach EN 13823 [106]

Nr.	Probekörper	$FIGRA_{0,2 MJ}$ [W/s]	THR_{600s} [MJ]	$SMOGRA$ [m ² /s ²]	TSP_{600s} [m ²]	Klassifikation
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

Kletterpflanzen

Nr.	Probekörper	FIGRA _{0,2 MJ} [W/s]	THR _{600s} [MJ]	SMOGRA [m ² /s ²]	TSP _{600s} [m ²]	Klassifikation
12	<i>Fallopia baldschuanica</i> (2)	131,63	4,41	36,98	80,75	C-s2, d2
13	<i>Hedera helix</i> (alt)	162,32	3,90	73,76	124,67	C-s2, d0
14	<i>Hedera helix</i> (alt) - Winter	104,40	4,90	107,95	129,65	B-s2, d0
15	<i>Hedera helix</i> (jung)	74,44	4,22	59,62	126,65	B-s2, d0
16	<i>Hedera helix</i> (jung) - trocken	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> - trocken	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

Nr.	Probekörper	FIGRA _{0,2 MJ} [W/s]	THR _{600s} [MJ]	SMOGRA [m ² /s ²]	TSP _{600s} [m ²]	Klassifikation	
	41	<i>Hedera helix</i> (alt) (2)	71,36	3,86	28,84	79,23	B-s2, d0
	42	<i>Hedera helix</i> (alt) (3)	113,21	4,89	60,12	98,77	B-s2, d0
	43	<i>Hedera helix</i> (alt) (4)	107,30	4,46	56,51	92,96	B-s2, d0
Living wall Pflanzen	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

Tabelle 3.7

Liste der wichtigsten Pflanzenmerkmale basierend auf [34], [37], [38], einem unveröffentlichten Dokument der Firma Vertiko und eigenen Recherchen

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 [148]
<i>Actinidia deliciosa</i>	8–10	22	very strong	deciduous & semi-deciduous	high	yes	yes [148], [149]
<i>Akebia quinata</i>	6–8	10	strong	deciduous & semi-deciduous	medium	no	yes [150]
<i>Aristolochia macrophylla</i>	8–10	13	strong	deciduous	medium	no	no
<i>Campsis radicans</i>	8–10	-	strong	deciduous	high	yes	yes [151]
<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 [152]
<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 [153]
<i>Humulus lupulus</i>	3–6	7	very strong	deciduous	medium	no	yes [154][155]
<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 [157][158]

Climbing plants

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>Lonicera henryi</i>	6–8	11	strong	evergreen	high	yes	yes [159]
<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 [160][161]
<i>Vitis coignetiae</i>	8–12	21	strong	deciduous	high	no	no
<i>Vitis vinifera</i>	8–10	19	strong	deciduous	high	no	yes [162]
<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 [163]
<i>Lavandula angustifolia</i>	0.6	-	weak	evergreen	medium	no	yes [164]
<i>Lonicera nitida</i>	0.5–1	-	weak	evergreen	low	no	no

Climbing plants

Living Wall plants

4 Begrünte Fassaden in Kombination mit Holzfassaden

4.1 Ziel der Untersuchung

Eine zentrale Frage aus Abschnitt 3.8 bezieht sich auf die Wechselwirkungen von Holz- und begrünten Fassaden im Brandfall. Nach den Ergebnissen aus KAPITEL 3, [113] und [1] 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 [130] beschreibt, negativ beeinflusst. Konkret: Führt eine begrünte Fassade im Bereich von Brandsperrern zu einem Zündschnurreffekt und kann sie Teile der Holzfassade oberhalb der Brandsperrern entzünden?

4.2 Prüfstand und Brandlast

Der Versuchsstand wies eine Abmessung von 2,5 m × 4,0 m (B × H) auf, siehe Abbildung 4.1. 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 Brandsperrere aus Stahlblech angeordnet – gemäß den Vorgaben aus [130] zur Trennung der Holzfassade, siehe Abschnitt 4.4. [3]

Als Brandlast dienten drei 15 ± 1 kg Holzkrippen, die vor der Fassade für ein Sockelbrandszenario angeordnet wurden, siehe Abbildung 4.1. 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. [3]

Den Hintergrund für die Dimensionierung der Holzkippen bezogen auf das Sockelbrandszenario stellten Kalibrierungsversuche mit unterschiedlichen Holzkippen (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 Holzkippen gewählt, die eine kontinuierliche Primärflamme von ca. 2,0 m erzeugen, wobei Flammenspitzen bis zu 2,5 m hoch reichen. [3]

Die Versuche wurden im Februar 2023 in München durchgeführt.

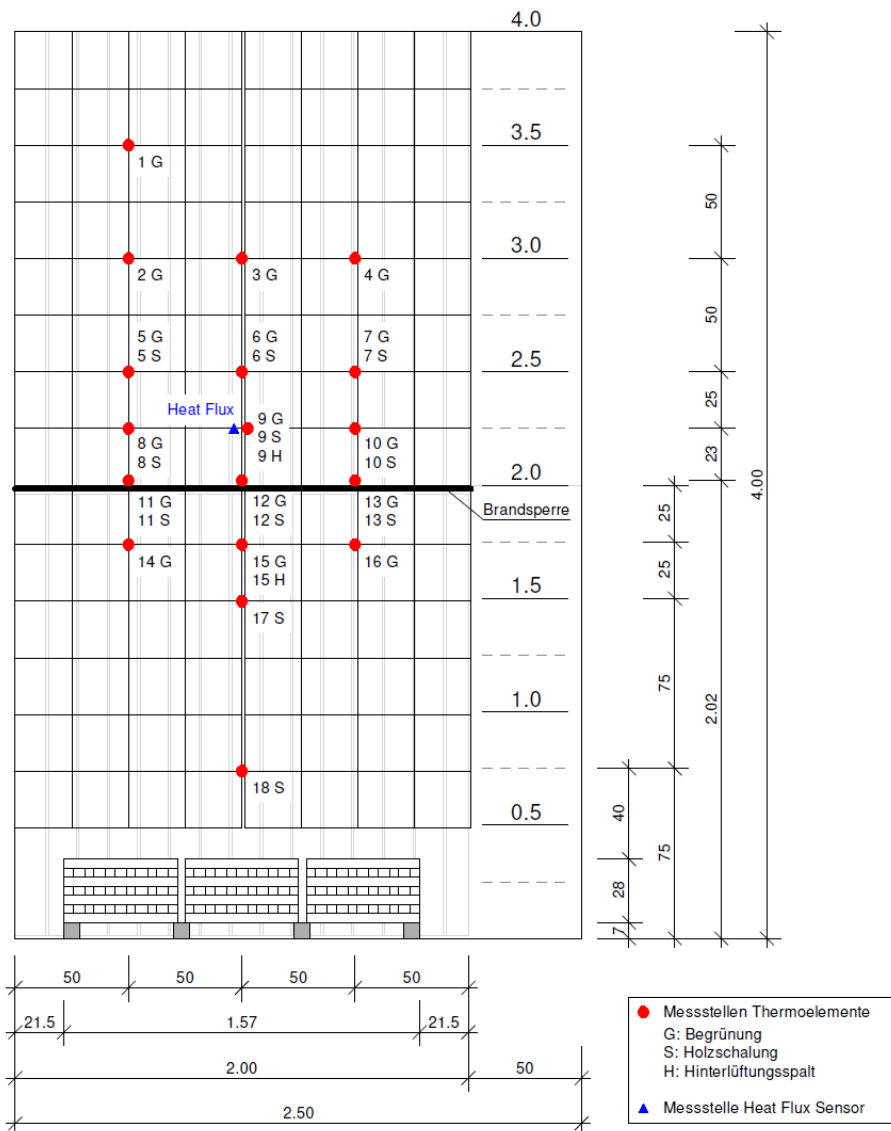


Abbildung 4.1 Ansicht Fassadenprüfstand mit zugehörigen Abmessungen und Messstellen [170]

4.3 Messtechnik

Zur Temperaturmessung wurden 29 Mantelthermoelemente vom Typ K nach [174] 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“ [176] vom Typ SBG01 des Herstellers Hukseflux [177]. 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 [177]. Der Total Heat Flux Meter SBG01 verwendet den Thermopile-Sensor des Schmidt-Boelter-Modells und die Folientechnologie des Gardon-Modells nach [178].

Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 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).

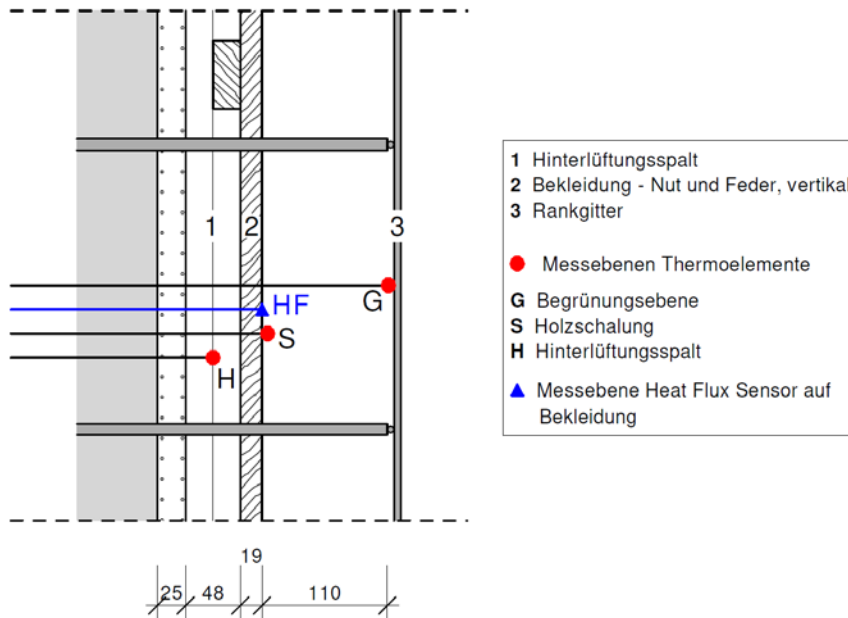


Abbildung 4.2 Schnitt Fassadeprüfstand mit zugehörigen Abmessungen und Messstellen [170]

Alle Versuche wurden mit einer Videokamera aufgezeichnet.

4.4 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 [130], 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 krachte 100 mm vor die Holzschalung aus und wurde gemäß Abschnitt 4.2 in 2,0 m Höhe angeordnet. Die Brandsperrre reichte bis zur Ebene der Gipsfaserplatte. Die Verschraubung der Brandsperrre erfolgte gemäß [130] 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 4.1 zu entnehmen. Die Pflanzen waren mehr als 15 Jahre alt und wiesen eine entsprechende Verholzung auf. Die Anordnung der Begrünung zeigt Abbildung 4.3. 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 4.4.

Tabelle 4.1 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 Abschnitt 3.1



Abbildung 4.3 Fotodokumentation der angeordneten Begrünung bei Test 2 (links) und Test 3 (rechts)



Abbildung 4.4 Fotodokumentation der Seitenansicht mit Anordnung der Begrünung und Brandsperre



Abbildung 4.5 Brandeinwirkung durch drei 15 kg Holzkippen für den Referenzversuch Test 1 (8. Prüfminute)

4.5 Versuchsdurchführung

Die Entzündung der Holzkippen erfolgte jeweils durch 150 ml Isopropanol in Blechwannen. Wie in Abschnitt 4.2 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 Holzkrippen für den Referenzversuch Test 1 ohne Begrünung zeigt Abbildung 4.5. 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. Abgelöscht wurde nur die Holzkrippen und der Fassadenbereich unterhalb der Brandsperre. Der Versuchsverlauf ist den Videodateien des digitalen Anhangs aus Abbildung 4.6 zu entnehmen. Nach Versuchsende knüpfte eine 60-minütige Beobachtungszeit der oberen Holzschalung an.

Wie in KAPITEL 3, [113] und [1] 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 4.6.

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 [3], [170] entnommen werden.

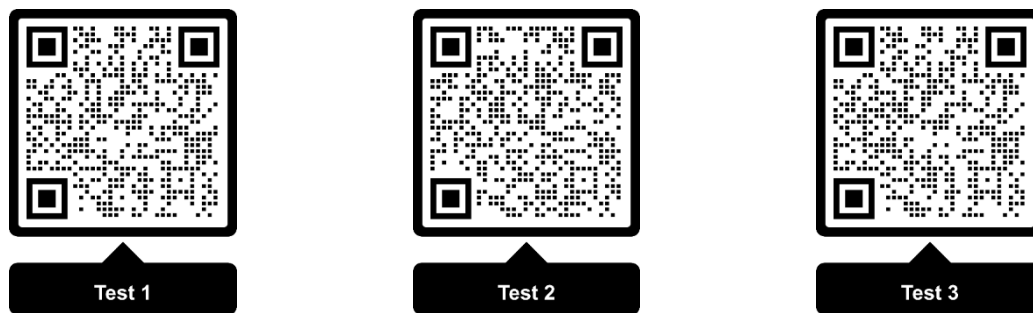


Abbildung 4.6 QR-Code mit Links zu den Videodateien des digitalen Anhangs für Test 1, Test 2 und Test 3 [3]

4.6 Ergebnisse

Abbildung 4.7 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. [3]

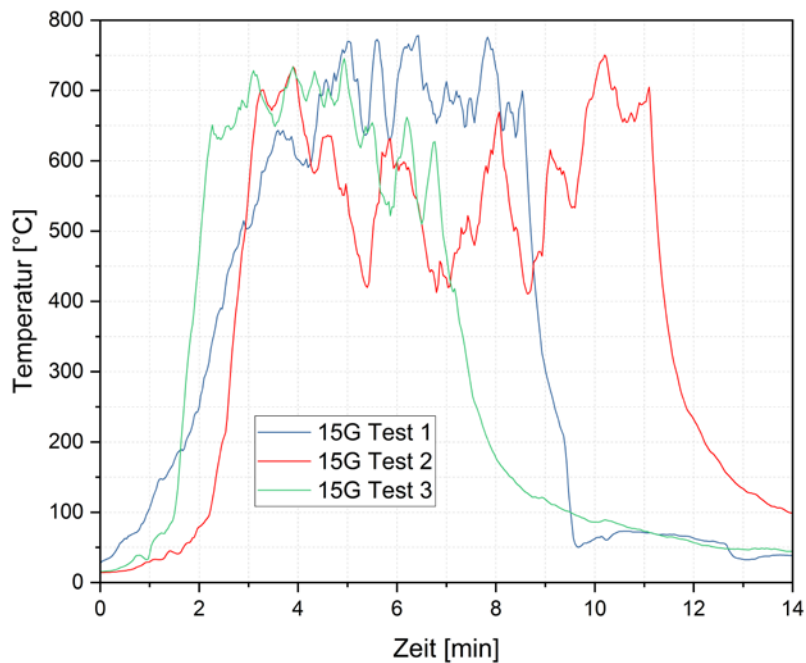


Abbildung 4.7 Temperatur-Zeit-Diagramm für die Messstelle 250 mm unterhalb der Brandsperre für Test 1, Test 2 und Test 3

Abbildung 4.8 bis Abbildung 4.10 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 4.11 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 (4-1) berechnet. Die Empfindlichkeit des Sensors ist im zugehörigen Produktzertifikat angegeben.

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

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

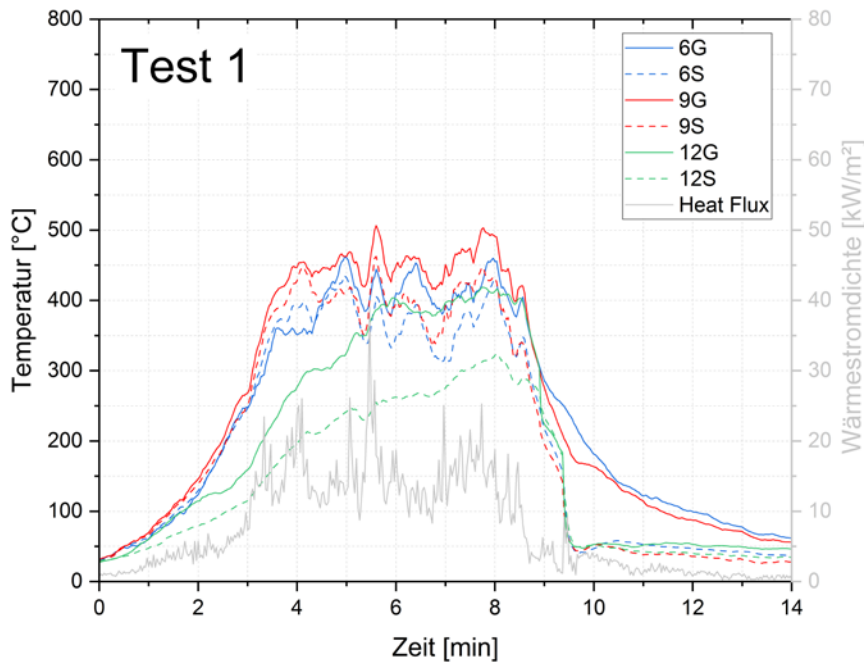


Abbildung 4.8 Temperatur-Zeit-Diagramm für die Messstellen in der Mittelachse des Prüfstandes oberhalb der Brandsperrre für Test 1 mit Verlauf der Wärmestromdichte in Grau; Messstellenbezeichnung nach Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2

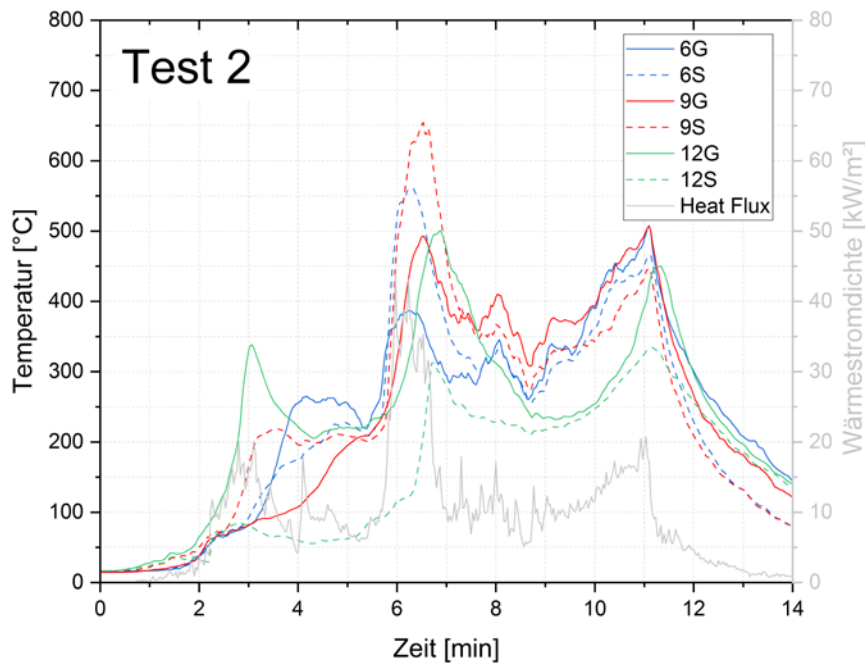


Abbildung 4.9 Temperatur-Zeit-Diagramm für die Messstellen in der Mittelachse des Prüfstandes oberhalb der Brandsperre für Test 2 mit Verlauf der Wärmestromdichte in Grau; Messstellenbezeichnung nach Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2

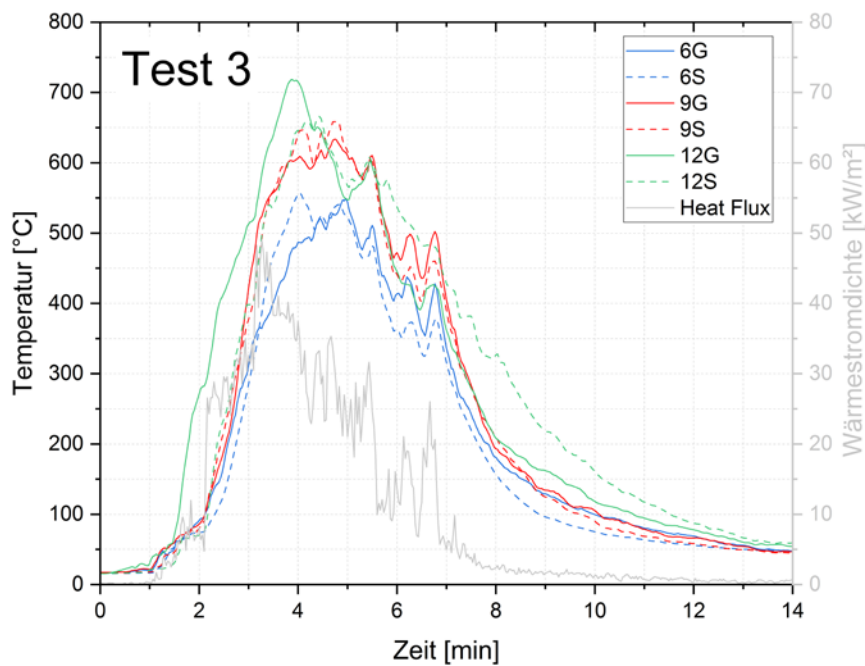


Abbildung 4.10 Temperatur-Zeit-Diagramm für die Messstellen in der Mittelachse des Prüfstandes oberhalb der Brandsperre für Test 3 mit Verlauf der Wärmestromdichte in Grau; Messstellenbezeichnung nach Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2

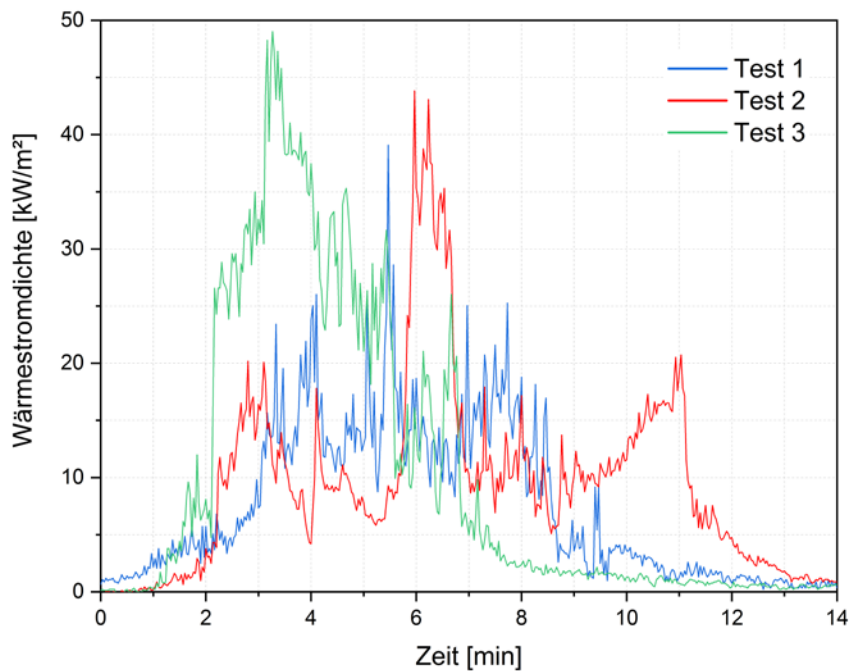


Abbildung 4.11 Gegenüberstellung der Wärmestromdichte für alle drei Versuche

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.

4.7 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 2.1 ist bekannt, dass Wandabstände für bodengebundene Begrünungen von 50 mm bis 200 mm zur Kletterhilfe üblich sind [34], [38]. 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 [34]. Aufbauend auf diesen Erkenntnissen aus der Literatur erfolgte im Rahmen von [170] 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 auskragende Brandsperren aus Stahlblech nach [130] 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 Brandsperrre 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 Auskragung 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 Auskragung 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 auskragenden Brandsperrre vorbeigeführt. Weiter wurde, wie in Abschnitt 4.4 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 4.4 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 verholzte 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 Versuchstandes 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 4.12. Eine Verfärbung und Verkohlung trat in Teilbereichen der Holzschalung aufgrund der Brandeinwirkung aus der Begrünung auf. 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 4.6) 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 Brandsperrre 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 Brandsperrren von 200 mm bis 250 mm ist jedoch bei offenen Schalungen nicht mit einer Brandeinwirkung direkt an der Holzschalung zu rechnen.



Abbildung 4.12 Fotodokumentation der Holzschalung oberhalb der Brandsperrre nach Beendigung des Versuches und der Beobachtungszeit für Test 2 (links) und Test 3 (rechts) [3]

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 4.8.

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 [210], [215].

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 [224], [225]. 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 [215]. Tabelle 4.2 zeigt einige ermittelte Entzündungszeiten durch Strahlungswärme in Abhängigkeit der Wärmestromdichte unterschiedlicher Studien.

Tabelle 4.2 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]
[226]	Horizontal	9,2-9,6	100 × 100	509-865 59-194 20-46	20 30 50
[227]	Vertikal	0	50 × 50	10 70	52-63 33-36
[224]	Vertikal	0	50 × 50	abh. Abstand	25
[228]	Vertikal	0	k. A.	8 16	105-140 80-100
[229]	Vertikal	0	76 × 76 150 × 150	45-93 79-130	46-79 42-46
[230]	Horizontal	10,2-12,1	100 × 100	23-119 10-27	50 75
[231]	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 [229], Einfluss auf die Entzündungszeit [210]. Dies verdeutlichen beispielhaft die nachfolgenden Studien.

[232] 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.

[233] 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 4.3 zu entnehmen.

Tabelle 4.3 Einfluss der Dicke auf die Entzündung von Fichtenholzpaneelen; basierend auf [210]

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. [215] 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. [234] verglich ebenfalls die vorhandenen Untersuchungen und stellte fest, dass die Studien ihm vorliegenden einigermäßen 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 [235] 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 4.2 aufgeführten Werten. Die Holzschalung verkohlte im Rahmen der Versuche zwar in Teilbereichen (Beginn der Pyrolyse), siehe Abbildung 4.12; 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 [236], [237], 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 [215], und die Unterschiede, die durch die Prüfanordnung und das Prüfgerät selbst entstehen können [215], [234]. 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 4.8.

4.8 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.

5 Großmaßstäbliche Fassadenbrandversuche und Maßnahmen zur brandschutztechnisch sicheren Gestaltung von grünen Fassaden mit Kletterpflanzen an Rankhilfen

5.1 Ziel der Studie

Das Projekt FireSafeGreen verfolgt das Ziel, das Verständnis für das Verhalten von begrünten Fassaden im Brandfall sowie deren Einfluss auf die Brandweiterleitung zu vertiefen. Wie in KAPITEL 3, [1] und [3] dargelegt, stellen Living Walls komplexe Fassadensysteme dar, die sich signifikant zwischen den verschiedenen Herstellern unterscheiden. Diese herstellereinspezifischen Systeme können nur durch umfassende Brandversuche am Gesamtsystem produktspezifisch sinnvoll analysiert werden. In [167] wird das kritische Brandverhalten einer speziellen Living Wall anhand entsprechender Brandversuche detailliert dargestellt.

Im Gegensatz dazu können Kletterpflanzen, die an Rankgittern wachsen (Nr. 2 in Abbildung 5.1), allgemein unter dem Aspekt des Brandschutzes untersucht und bewertet werden. Diese Untersuchungen führen zu grundlegenden Prinzipien für eine brandschutztechnisch ausreichend sichere Anwendung. Daher konzentrierte sich die vorliegende Studie auf Kletterpflanzen, die an entsprechenden Kletterhilfen angebracht sind (Nr. 2 in Abbildung 5.1).

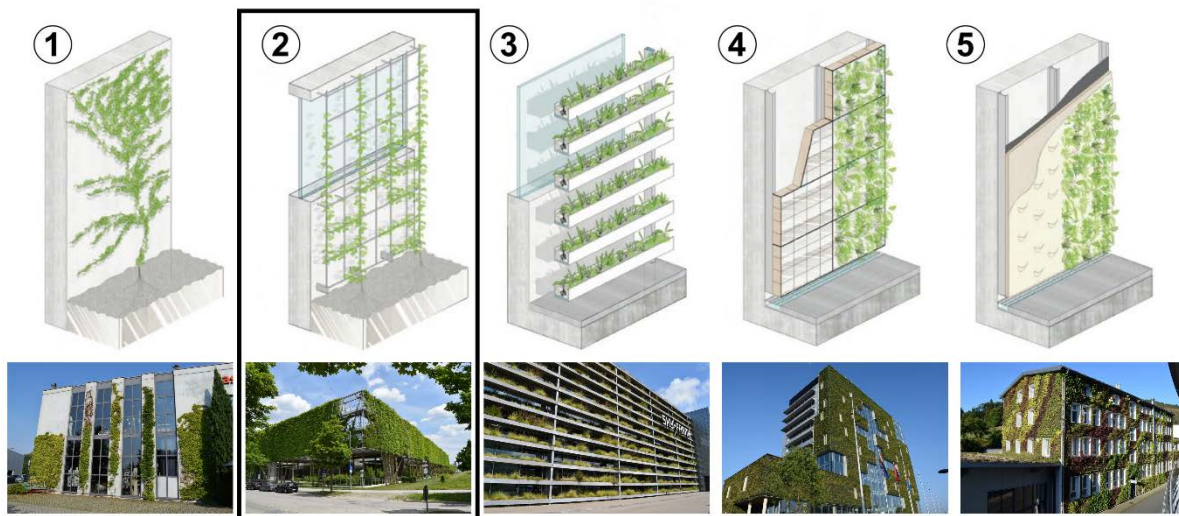


Abbildung 5.1 Ausbildungsformen von Fassadenbegrünungen. 1) Direktbewuchs mit Selbstklimmern, bodengebunden, 2) leitbarer Bewuchs an Kletterhilfen, bodengebunden, 3) Pflanzgefäße, horizontale Vegetationsflächen, wandgebunden, 4) modulares System (Living Wall), vertikale Vegetationsflächen, wandgebunden, 5) flächiges System (Living Wall), vertikale Vegetationsflächen, wandgebunden (Abbildung oben basiert auf [170]; Bilder unten Bundesverband GebäudeGrün)

Im ersten Teil des Forschungsvorhabens wurden zunächst mittelmaßstäbliche Brandversuche durchgeführt, um potenziell relevante Faktoren für das Brandverhalten zu identifizieren. Hierzu zählen unter anderem die Pflanzenart, der Feuchtigkeitsgehalt, jahreszeitliche Schwankungen und das Alter der Pflanzen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in KAPITEL 3 und [1] dokumentiert.

In einem weiteren Schritt wurden erneut mittelmaßstäbliche Brandversuche durchgeführt, um den Einfluss von begrünten Fassaden auf Holzfassaden zu analysieren und die Praktikabilität solcher Fassadenkombinationen zu bewerten. Die entsprechenden Ergebnisse sind in KAPITEL 4 und [3] aufgeführt.

Basierend auf den zuvor genannten Tests wurden abschließende Brandversuche unter realistischen Bedingungen und mit einer repräsentativen Brandlast durchgeführt. Diese großmaßstäblichen Fassadenbrandversuche dienten der Validierung der bisherigen Forschungsergebnisse sowie der Untersuchung der Einflüsse begrünter Fassaden auf das Brandverhalten unter realen Bedingungen. Der Fokus der großmaßstäblichen Versuche lag auf der Quantifizierung der vertikalen Brandausbreitung entlang der grünen Fassade. Besonderes Augenmerk galt dem Wärmestrom, der von einer brennenden grünen Fassade ausgeht, und dessen Auswirkungen auf angrenzende Gebäudekomponenten wie Außenwände, Fenster, Balkone und Dachüberstände sowie dem damit verbundenen Risiko.

Ein weiterer zentraler Punkt war die Analyse der Unterschiede im Brandverhalten zwischen vitalen und trockenen (abgestorbenen) Pflanzen. Dies geschah insbesondere im Hinblick auf die vertikale Brandausbreitung und das Risiko einer Brandweiterleitung auf benachbarte Gebäudeteile.

Exemplarische Forschungsfragen umfassen:

- Erlöschen die Pflanzen selbstständig, nachdem das Primärfeuer erloschen ist?
- Inwieweit kommt es zu einer vertikalen oder horizontalen Brandausbreitung?
- Wie groß ist der Wärmestrom, der durch brennende Pflanzen erzeugt wird?
- Reicht der Wärmestrom einer trockenen grünen Fassade (Worst Case) aus, um bei geöffneten Fenstern Einrichtungsgegenstände direkt an der Öffnung innerhalb des Gebäudes zu entzünden?
- Welche Auswirkungen hat der Wärmestrom der brennenden grünen Fassade auf umliegende Bauteile wie Außenwände, Fenster, Balkone und Dachüberstände und welches Risiko ist damit verbunden?
- Wie unterscheiden sich vitale und trockene (abgestorbene) Pflanzen hinsichtlich des Brandverhaltens, und welches Risiko stellen die kurzzeitigen Strohfeuer [1] trockener Pflanzenteile für die Entzündung angrenzender Gebäudeteile dar?

5.2 Versuchsaufbau

5.2.1 Allgemein

Zur Beantwortung der Forschungsfragen aus Abschnitt 5.1 wurden mehrere Brandversuche am Fassadenprüfstand der Kiwa MPA Dresden GmbH durchgeführt. Auf die Durchführung standardisierter Fassadenbrandversuche wurde bewusst verzichtet, da diese in der Regel für nichtbrennbare Konstruktionen kalibriert sind [3]. Diese Versuche bieten entweder aufgrund einer geringen Brandlast keine repräsentative Brandbeanspruchung, da sie spezifisch für Produktanwendungen wie Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) mit expandiertem Polystyrol konzipiert sind [126], oder sie sind mit einer hohen Brandlast verbunden [3], was zu einer intensiven Brandbeanspruchung und einer ausgeprägten Primärflamme führt. Dies erschwert eine aussagekräftige Bewertung der unabhängigen Brandausbreitung eines brennbaren Fassadenmaterials außerhalb der Primärflamme, insbesondere aufgrund der beschränkten Höhe des genormten Prüfstandes [3]. Es ist evident, dass eine brennbare Holz- oder Grünfassade in jedem Fall im Bereich der Primärflamme entzündet wird [130]. Eine umfassende Übersicht über weltweit durchgeführte genormte Fassadenbrandversuche und deren Hintergründe ist in [3] dokumentiert.

Um die Brandausbreitung an begrünten Fassaden zu untersuchen, wurde ein Versuchskonzept entwickelt, das eine repräsentative Brandbeanspruchung sowie eine Primärflamme mit einer Höhe von etwa 3,5 m vorsieht, ergänzt durch einen entsprechend hohen Versuchsstand.

Insgesamt wurden acht Brandversuche in zwei unterschiedlichen Szenarien durchgeführt: *Brand vor der Außenwand* und *Brand um Balkone*.

Die beiden Testszenarien reflektieren typische Anwendungen von Fassadenbegrünungen mit Kletterpflanzen an Rankhilfen. Zum einen werden diese großflächig vor Außenwänden angeordnet und teilweise über Fenstern sowie anderen Gebäudeöffnungen platziert, zum anderen

finden sie Anwendung vor Balkonen, häufig auch als geschossübergreifende Beschattungselemente. Insbesondere das zweite Szenario, die Begrünung von Balkonen, hat in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen (siehe Abschnitt 5.6.5.3).

Diese acht Versuche gliedern sich zudem in drei Versuchsreihen, wie in Tabelle 5.1 dargestellt. Die Versuchsreihen umfassen den *Wandversuch*, den *Balkonversuch mit zentraler Brandbeanspruchung* sowie den *Balkonversuch mit Brandbeanspruchung in der Ecke*.

Für jede der drei Versuchsreihen wurde ein Referenzversuch ohne Pflanzen durchgeführt, um die Auswirkungen der Pflanzen quantitativ zu erfassen und zu validieren. Darüber hinaus wurden die Versuchsreihen *Wandversuch* und *Balkonversuch mit zentraler Brandbeanspruchung* sowohl mit vitalen als auch mit getrockneten Pflanzen durchgeführt. Der *Balkonversuch mit Brandbeanspruchung in der Ecke* wurde ausschließlich mit vitalen Pflanzen realisiert (siehe Tabelle 5.1)

Tabelle 5.1 Übersicht über die acht Fassadenbrandversuche

Versuch	Beschreibung des Versuchs
V0	Wandversuch ohne Pflanzen (Referenzversuch)
V1	Wandversuch mit vitalen Pflanzen
V2	Wandversuch mit getrockneten (toten) Pflanzen
V3	Balkonversuch mit zentraler Brandbeanspruchung ohne Pflanzen (Referenzversuch)
V4	Balkonversuch mit Brandbeanspruchung in der Ecke ohne Pflanzen (Referenzversuch)
V5	Balkonversuch mit zentraler Brandbeanspruchung mit vitalen Pflanzen
V6	Balkonversuch mit Brandbeanspruchung in der Ecke mit vitalen Pflanzen
V7	Balkonversuch mit zentraler Brandbeanspruchung mit getrockneten (toten) Pflanzen

5.2.2 Prüfstand und Versuchsaufbau

Die einzelnen Versuchsaufbauten sind in Tabelle 5.1 dargestellt und werden im Folgenden näher beschrieben.

Tabelle 5.2 : Beschreibung der einzelnen Versuchsaufbauten

Versuch	V0		V1		V2		V3	V4	V5		V6	V7		
			Hedera helix	Euonymus fortunei	Hedera helix	Euonymus fortunei		-	Hedera helix	Euonymus fortunei	Hedera helix	Euonymus fortunei	Hedera helix	Euonymus fortunei
Pflanzenarten	-	-					-	-						
Pflanzendichte (Mittelwert)	-	-	1,85 kg/m ²	2,55 kg/m ²	(1,85) 0,58 ^a kg/m ²	(2,55) 0,99 ^a kg/m ²	-	-	1,55 kg/m ²	1,88 kg/m ²	1,55 kg/m ²	1,55 kg/m ²	(1,55) 0,47 ^a kg/m ²	(1,88) 0,72 ^a kg/m ²
Feuchtigkeitsgehalt der Pflanzen (Mittelwert)	-	-	312 %	278 %	30 %	48 %	-	-	245 %	180 %	245 %	245 %	4%	7 %
Abstand zwischen Außenwand und Tragsstruktur	50 mm (175 mm) ^b													
Abstand zwischen Außenwand und Rankgitter	100 mm (225 mm) ^c													
Minimaler Abstand zwischen Außenwand und Pflanze	70 mm													
Brandlast	-		4 x 35 kg (140 kg)		-		3 x 35 kg (105 kg)		3 x 35 kg (105 kg)		1 x 35 kg		3 x 35 kg (105 kg)	
Holzrippe - Typ Holz	Gehobelltes Kiefernholz													
Holzrippe - Dichte / Feuchtigkeitsgehalt	524 kg/m ³ / 11,5%													
Tragstruktur - Material	Stahl													
Rankgitter - Material und Maschenweite	Verzinkte Stahlmatte (5 mm dick) mit einer Maschenweite von 100 mm x 250 mm													
OSB-Plattenstärke / Feuchtigkeitsgehalt	-		15 mm / 12%		-		-		-		-		-	
Abbildung	Abbildung 5.2		Abbildung 5.5		Abbildung 5.3		Abbildung 5.6		Abbildung 5.7		Abbildung 5.6		Abbildung 5.6	

^a Masse nach dem Trocknen

^b Am linken Rand des Prüfstandes, aufgrund der rückspringenden Wand, auf einer Länge von 550 mm

^c Am linken Rand des Prüfstandes, aufgrund der rückspringenden Wand, auf einer Länge von 830 mm

Die Versuche wurden auf einem Fassadenprüfstand in einer Testhalle durchgeführt, deren Grundriss in Abbildung 5.64 des Anhangs in Abschnitt 5.8 veranschaulicht wird.

Wie bereits in Abschnitt 5.1 dargelegt, war eine der zentralen Forschungsfragen der großmaßstäblichen Brandversuche die Quantifizierung der vertikalen Brandausbreitung entlang der begrünten Fassade, da diese in den mittelmaßstäblichen Brandversuchen aufgrund der geringen Höhe des Versuchsstands nicht realisiert werden konnte [1], [3]. Daher wurde in dieser Studie ein entsprechend hoher Versuchstand konzipiert.

Die Wand des Prüfstands bestand aus nichtbrennbarem Kalksandstein. Die Fassadenbrandversuche wurden in der Innenecke des Prüfstandes durchgeführt, in der eine weitere Kalksandsteinwand mit einer Breite von 4,03 m vor der eigentlichen tragenden Wand des Prüfstands angeordnet war.

Für den *Wandversuch* wurde am Prüfstand eine Tragkonstruktion aus Stahlrohren und Bewehrungsmatten errichtet, die eine Breite von 4,53 m und eine Höhe von 12,00 m aufwies. Diese Stützkonstruktion diente als Unterkonstruktion, an der später die Rankgitter mit den vorkultivierten Pflanzen befestigt wurden.

Die Tragkonstruktion setzte sich aus 6,00 m langen Stahlrundrohren zusammen, die mithilfe von Rohrverbindern auf die erforderliche Höhe von 12,00 m verlängert wurden. Die Rundrohre wurden mit Bodenankern am Untergrund fixiert sowie alle 2,00 m mit Messingdübel mit einem Abstand von 50 mm zur Prüfwand rückverankert. Insgesamt wurden fünf Stützrohre in Abständen von 1,05 m bzw. 1,20 m zueinander aufgestellt, das äußerst rechte Stützrohr wurde in einem Abstand von 50 mm zur Innenecke angeordnet (siehe Abbildung 5.2). Das äußerst linke Stützrohr wurde an der Rückwand des Prüfstands befestigt, etwa 550 mm links von der vorgebauten Kalksandsteinwand. Der Abstand zwischen der Rückwand und diesem Stützrohr betrug somit nicht 50 mm wie bei den anderen Stützrohren, sondern 175 mm.

Zur Stabilisierung des Traggerüsts wurden vier Baustahlmatten vom Typ Q188 mit den Abmessungen 2,30 m × 6,00 m mittels Schellen an den Tragrohren fixiert (siehe Abbildung 5.2). Am mittleren Tragrohr wurden die Baustahlmatten auf ca. 50 mm gestoßen.

In einer Höhe von 12,00 m wurden über der Versuchsanordnung zwei OSB-Platten mit den Maßen 2 050 mm × 625 mm × 15 mm angebracht (siehe Abbildung 5.2), um auskragende Dachteile aus brennbarem Material zu simulieren.

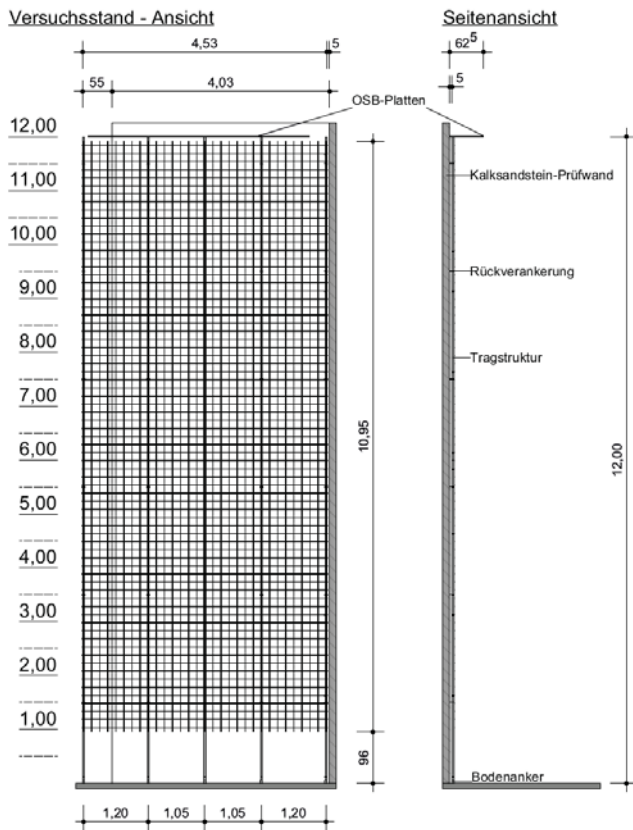


Abbildung 5.2 Ansicht und Seitenansicht der Tragstruktur und des Versuchsaufbaus für V0

Für die *Balkonversuche* wurde eine Balkonkonstruktion in einem Abstand von 880 mm zur Innenecke des Prüfstandes errichtet. Die Höhe des Versuchsaufbaus betrug 10,00 m bei einer Gesamtbreite von 3,75 m. Die Balkonplatten aus Stahlbeton hatten eine Breite von 2,40 m, eine Tiefe von 1,20 m und eine Dicke von 300 mm und wurden jeweils in einer Höhe von 4,00 m und 7,30 m angeordnet. Die Lastabtragung dieser Platten erfolgte über vier Mauerwerkssäulen aus Kalksandstein.

Die Anordnung der Stützkonstruktion (Rundrohre und Bewehrungsmatten) am Balkon sowie an der Prüfwand erfolgte nach dem gleichen Prinzip wie beim bereits beschriebenen *Wandversuch*.

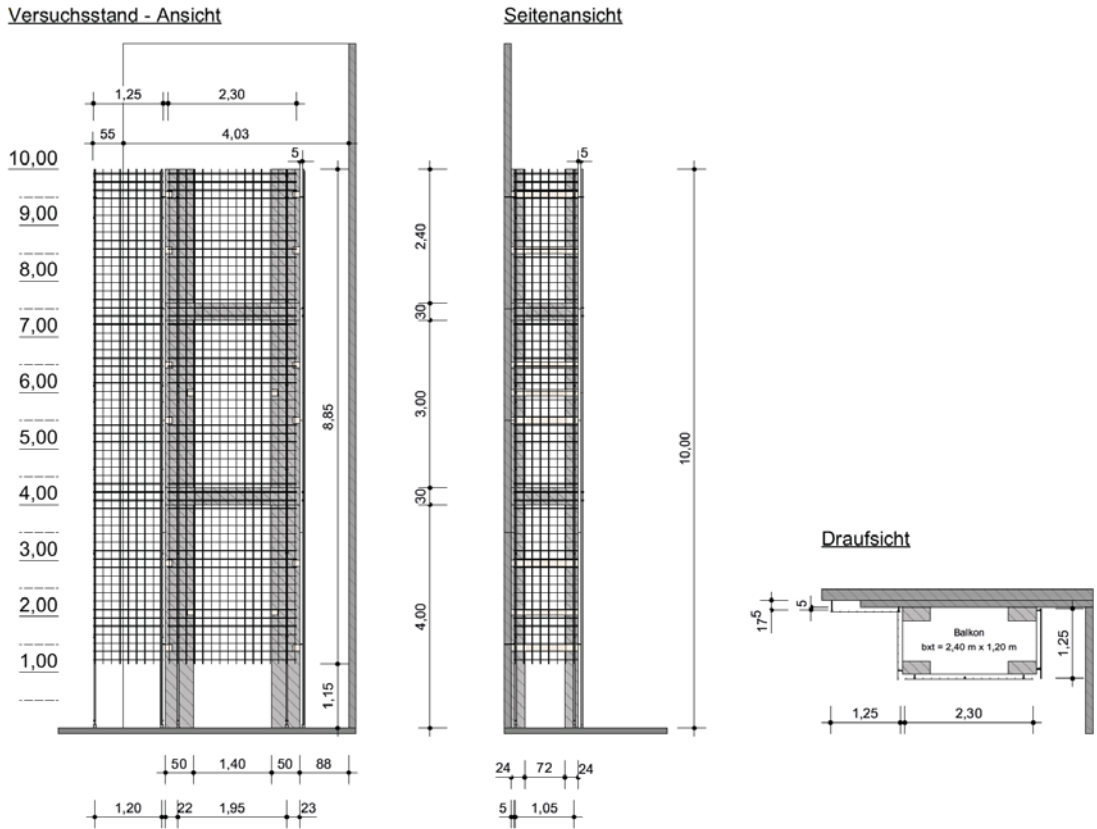


Abbildung 5.3 Ansicht, Seitenansicht und Draufsicht des Balkons mit Tragwerk und Versuchsaufbau für V3 und V4

Für die Begrünung der Fassade kamen zwei immergrüne Pflanzenarten zum Einsatz (vgl. Tabelle 5.2). *Hedera helix* (dunkelgrün) wurde stets auf der linken Seite des Versuchsaufbaus platziert, während *Euonymus fortunei* (hellgrün) sich auf der rechten Seite befand (vgl. Abbildung 5.5 bis Abbildung 5.7).

Die Pflanzen für die begrünte Fassade wurden als vorkultivierte Heckenelemente mit einer Höhe von 1,80 m und einer Breite von 1,20 m geliefert. Diese Pflanzen waren etwa ein Jahr alt und wurden in Pflanztrögen bereitgestellt, um die Pflege bis zur Verwendung sicherzustellen (siehe Abbildung 5.4). Die Rankgitter bestanden aus einem 5 mm dicken verzinktem Stahlgitter mit einer Maschenweite von 100 mm x 250 mm.



Abbildung 5.4 Vorkultivierte Heckenelemente mit zwei Pflanzenarten: a) *Hedera helix* und b) *Euonymus fortunei*

Für die Versuche mit Pflanzen wurden die benötigten Heckenelemente knapp oberhalb der Substratschicht von den Pflanztrögen abgetrennt und zusammen mit den Rankgittern mittels Wickeldraht an der Tragkonstruktion befestigt. Die Übergangsbereiche zwischen den Heckenelementen wurden nach Bedarf mit Einzelpflanzen aufgefüllt.

Der Abstand zwischen dem Rankgitter und der Wand des Prüfstands betrug stets 100 mm (siehe Abbildung 5.5 bis Abbildung 5.7). Aufgrund der zuvor beschriebenen rückspringenden Rückwand betrug der Abstand beim äußersten linken Heckenelement auf einer Breite von 830 mm beim *Wandversuch* und 550 mm bei den *Balkonversuchen* etwa 225 mm. Pflanzenteile ragten in den Hinterlüftungsspalt zwischen Rankhilfe und Prüfwand hinein. Somit betrug der Mindestabstand zwischen den Pflanzen und der Wand lediglich 70 mm (vgl. Abbildung 5.65 im Anhang in Abschnitt 5.8).

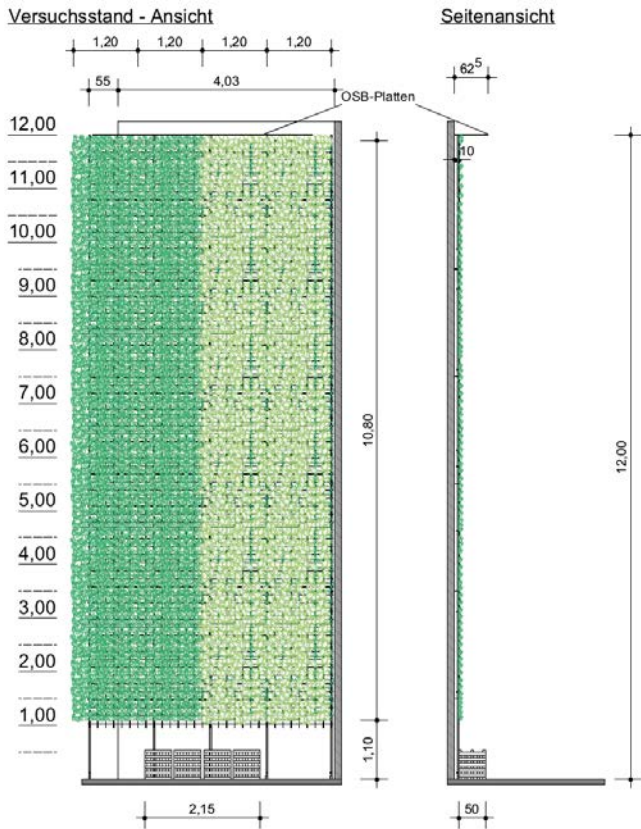


Abbildung 5.5 Ansicht und Seitenansicht des Wandversuchs mit begrünter Fassade für V1 und V2

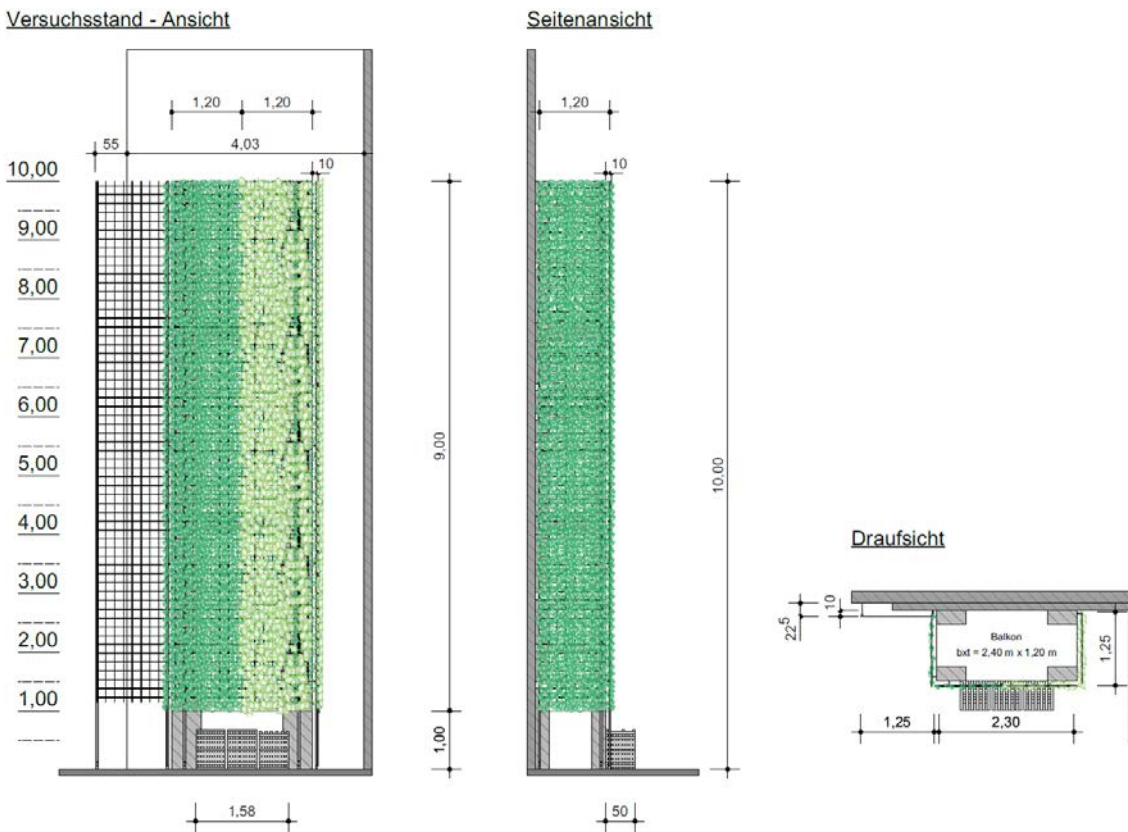


Abbildung 5.6 Ansicht, Seitenansicht und Draufsicht des Balkonversuchs mit begrünter Fassade und zentraler Brandbeanspruchung für V5 und V7

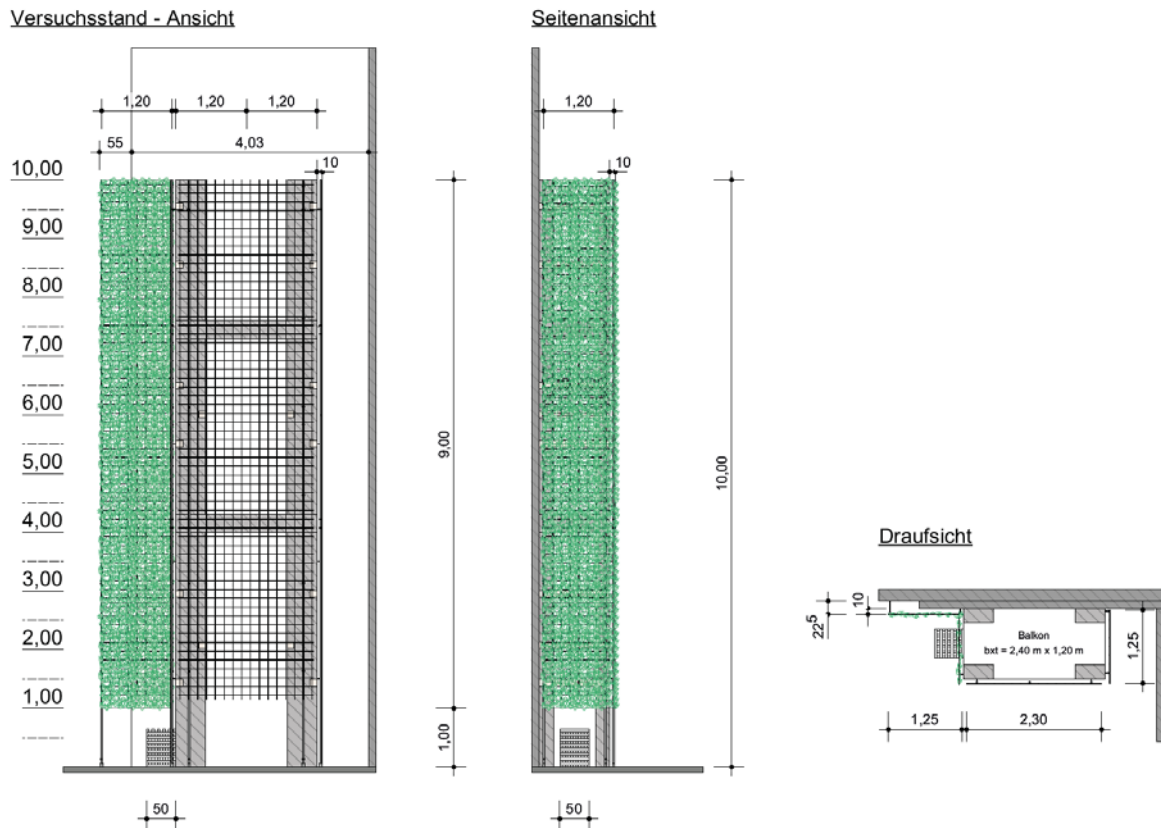


Abbildung 5.7 Ansicht, Seitenansicht und Draufsicht des Balkonversuchs mit begrünter Fassade und zentraler Brandbeanspruchung für V6

Um den Einfluss abgestorbener Pflanzenteile zu analysieren, wurde für jedes Testszenario ein Versuch (V2 - Wand und V7 - Balkon) mit getrockneten Pflanzen durchgeführt. Die vitalen Pflanzen mussten daher vor Beginn der Prüfung getrocknet werden. Im Fall des *Wandversuchs* wurde dazu der Prüfstand einschließlich der bereits angebrachten Pflanzenteile mit einer Plane abgedeckt und über zwei Tage hinweg mit einem Bautrocknungsgerät mit einer Heizleistung von 18 kW und Temperaturen von bis zu 120 °C getrocknet (siehe Abbildung 5.8). Im Bereich oberhalb der Holzrippen konnten Feuchtegehalte von 30 % für *Hedera helix* und 48 % für *Euonymus fortunei* erreicht werden (vgl. Tabelle 5.2). An den äußeren Rändern war es insbesondere im linken Bereich mit größerem Abstand zwischen Rankgitter und Prüfwand jedoch nicht möglich, diese niedrigen Werte zu erzielen.

Beim Versuch V7 kam aus diesem Grund ein alternatives Verfahren zur Anwendung, um eine gleichmäßigere und effizientere Trocknung sicherzustellen. Die Heckenenelemente wurden gesammelt unter einer Plane getrocknet, bevor sie am Prüfstand montiert wurden (siehe Abbildung 5.8). Mit diesem Verfahren konnte ein einheitlicher Feuchtegehalt von lediglich 4 % bei *Hedera helix* und von nur 7 % bei *Euonymus fortunei* erzielt werden.



Abbildung 5.8 Varianten der Pflanzentrocknung mit Bautrockner und Plane a) direkt an der Fassade und b) vor der Montage an die Fassade

Zur visuellen Veranschaulichung sowie zur Untersuchung des Einflusses der Brandeinwirkung auf typische Einrichtungsgegenstände wurden die beiden Balkone zusätzlich mit Mobiliar ausgestattet: Jeder Balkon erhielt einen Wäscheständer bestückt mit vier T-Shirts sowie einem Handtuch aus Baumwolle sowie je einen Kunststoff-Klappstuhl (siehe Abbildung 5.9).



Abbildung 5.9 Mobiliar auf den Balkonen

5.2.3 Brandlast

Als Brandlast für das Primärfeuer wurden Holzkrippen verwendet. Die Krippen wurden aus Holzstäben mit den Maßen 40 mm x 40 mm x 500 mm gefertigt, welche in versetzten Lagen mit einer Queranordnung (90°) bei einem Holz-Luft-Verhältnis von 1:1 platziert wurden. Die

Grundfläche einer Holzkrippe betrug jeweils 500 mm × 500 mm. Detaillierte Informationen zu Holzart, Dichte und Feuchtigkeitsgehalt sind in Tabelle 5.2 aufgeführt.

Die standardisierten Prüfverfahren erweisen sich als ungeeignet zur aussagekräftigen Untersuchung brennbarer Fassadenkonstruktionen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass entweder unzureichende Brandlasten verwendet werden (vgl. Abschnitt 5.2.1) oder die Höhe des Prüfstandes nicht ausreichend ist, um die Brandlast adäquat zu simulieren. Um die vertikale Brandausbreitung entlang der begrünten Fassade präziser zu quantifizieren, war deshalb ein entsprechend hoher Prüfstand erforderlich (vgl. Abschnitt 5.2.1). Ziel war es, eine repräsentative Primärflamme mit begrenzter Flammenhöhe zu erzeugen, die in der Lage ist, die begrünte Fassade zu entzünden und selbstständig weiter brennen zu lassen. Diese Begrenzung der Flammenhöhe war notwendig, um das autonome Feuer der grünen Fassade, insbesondere in ausgetrockneten Bereichen (Strohfeuer), genauer zu analysieren.

Für das Experiment wurde ein Bodenfeuer gewählt. Die Primärflamme simuliert sowohl den oberen Bereich einer Flamme, die aus einer simulierten Fensteröffnung (unterhalb des Bodens des Prüfstands) austritt, als auch den Bodenbrand selbst.

Basierend auf den Erkenntnissen diverser Kalibrierungstests [133] mit verschiedenen Holzkrippen unterschiedlicher Masse wurde eine 35 kg schwere Holzkrippe ausgewählt. Eine einzelne 35 kg Holzkrippe mit den zuvor genannten Abmessungen erreicht, bei einer Anordnung direkt vor einer Wand, eine Flammenhöhe von etwa 3,0 m mit maximalen Flammenspitzen bis zu 3,5 m, eine Branddauer von ca. 20 bis 25 Minuten und Temperaturen in einem Meter Höhe von etwa 1 000 °C [133].

Dieser Effekt stellt in Verbindung mit der Flammenlänge ein typisches reales Brandszenario dar, das ausreicht, um die begrünte Fassade zu entzünden und genügend Energie freisetzt, um die darüber liegenden grünen Fassaden ausreichend zu beaufschlagen und folglich zu trocknen. Unter Betracht der erwartbaren Flammenlängen und der gewählten Versuchshöhe wird so eine Analyse der vertikalen Brandausbreitung möglich. Das Prüffeuer wird daher als repräsentativ für die Untersuchung der Fälle "Brand im Gebäude" und "Brand am Gebäude" bewertet.

Die Brandeinwirkungszeit von etwa 20 Minuten spiegelt eine realistische Einwirkungsdauer wider, da nach einem zwanzigminütigen Brand aus einer Gebäudeöffnung (voll entwickelter Brand) oder einem Sockelbrand in Industrieländern üblicherweise mit ersten Löschmaßnahmen durch die Feuerwehr im Gebäude (nicht an der Fassade) gerechnet werden kann [172], [173]. Zudem ist aus [1] bekannt, dass die Brandeinwirkung insbesondere bei der kritischen Variante mit trockenen (abgestorbenen) Pflanzen schnell innerhalb weniger Sekunden bis Minuten erfolgt.

Die Anzahl der für einen einzelnen Versuch verwendeten Holzkrippen variiert je nach Versuchsreihe. Der Versuchsstand sollte über die Hälfte seiner Breite dem Feuer ausgesetzt sein, daher wurden die Holzkrippen nebeneinander angeordnet.

Für die *Wandversuchsreihe* kamen je Versuch vier nebeneinander angeordnete Holzkrippen zum Einsatz. Diese wurden von der Mitte ausgehend vor dem Versuchsstand platziert (siehe Abbildung 5.5). Der Abstand zwischen der Holzkrippe und der Kalksandsteinwand betrug 90 mm; zwischen den Krippen wurde ein Abstand von 50 mm gewählt. Die resultierende Fläche der Brandlast betrug somit 2 015 mm × 500 mm.

In der *Balkonversuchsreihe mit zentraler Brandbelastung* wurden je Versuch drei Holzkrippen nebeneinander aufgereiht und bündig gegen die Außenkante der Tragkonstruktion des Balkons geschoben. Hierbei wurde ein Abstand von 40 mm zwischen den Krippen eingehalten, was eine Gesamtfläche von 1 580 mm × 500 mm ergab (siehe Abbildung 5.6).

Für die *Balkonversuchsreihe mit Brandbelastung in der Ecke* kam lediglich eine Holzkrippe pro Versuch in der Innenecke zum Einsatz (siehe Abbildung 5.7).

5.3 Versuchsdurchführung

Zu Beginn jeder Versuchsreihe wurde ein Referenzversuch ohne Pflanzen (V0, V3, V4) durchgeführt (vgl. Tabelle 5.1 und Tabelle 5.2).

Die Zündung der Holzkrippen erfolgte mittels in Heptan getränkter Weichholzfaserstäbchen, die zuvor seitlich in die Holzkrippen eingeführt wurden. Jeder Weichholzfaserstab wies die Maße von 1 000 mm × 35 mm × 35 mm auf und absorbierte vor der Zündung etwa 750 ml Heptan. Für jeden Versuch der Versuchsreihe *Wandversuch* und *Balkonversuch mit zentraler Brandbeanspruchung* wurden jeweils vier Weichholzfaserstäbchen eingesetzt; für den *Balkonversuch mit Brandbelastung in der Ecke* kam jeweils ein einzelnes Weichholzfaserstäbchen zum Einsatz.

Der Versuch begann jeweils mit dem Anzünden der Weichholzfaserstäbchen und endete mit dem jeweiligen Zusammenbruch der Holzkrippen, gefolgt von einer einstündigen Beobachtungsphase.

Vor jedem Versuch wurde das Dach der Prüfhalle geöffnet, während die Seitenwände geschlossen blieben. Die spezifischen Belüftungsbedingungen sind in Tabelle 5.6 und Abbildung 5.64 im Anhang in Abschnitt 5.8 dokumentiert.

Die Versuchsdaten sowie die allgemeinen Wetterdaten für die jeweiligen Tests sind in Tabelle 5.7 im Anhang in Abschnitt 5.8 aufgeführt.

Sämtliche Beobachtungen wurden während der Testzeit erfasst.

5.4 Messtechnik

Die gesamte Fassade wurde sowohl an der Wand des Prüfstandes als auch in der Begrünungsebene mit Messpunkten ausgestattet, welche die auftretenden Temperaturen erfassten. Neben der Temperaturmessung lag ein zusätzlicher Fokus auf der Messung der Wärmestromdichte, um den Einfluss der brennenden grünen Fassade auf die Außenwand, Fensteröffnungen und andere Bauteile quantitativ zu erfassen.

Für die Datenerfassung kamen Mantelthermoelemente vom Typ K nach EN 60584-1 [174] mit einem Außendurchmesser von 3 mm, Platten-Thermometer nach EN 1363-1 [175] und wassergekühlte Wärmestromdichtesensoren [176] zum Einsatz.

Der Wärmestrom wurde mithilfe der Wärmestromdichtesensoren [176] vom Typ SBG01 des Herstellers Hukseflux [177] gemessen. Diese wassergekühlten Sensoren erfassen sowohl die Strahlungswärme als auch den konvektiven Wärmetransport, die auf einer ebenen, schwarzen Oberfläche unter einem Einfallswinkel von 180° wirken. Die schwarze Beschichtung absorbiert sämtliche Strahlung und wandelt diese in Wärme um. Diese Wärme wird über den internen Thermopile-Sensor an den Metallkörper geleitet, welcher als Wärmesenke fungiert [177]. Der Thermopile-Sensor erzeugt ein Ausgangsspannungssignal, das proportional zur Bestrahlungsstärke ist und vom Datenlogger aufgezeichnet wird. Der Wärmestromdichtesensor vom Typ SBG01 nutzt den Thermopile-Sensor des Modells Schmidt-Boelter sowie die Folientechnologie des Modells Gardon [178]. Die Installation der Wärmestromdichtesensoren erfolgte in Bohrlöchern innerhalb der Prüfwand, was eine präzise Messung direkt in der Wandebene ermöglichte.

Die SBG01-Sensoren sind abhängig von ihrer Typbezeichnung auf einen Nennmessbereich zwischen $5 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ und $200 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ kalibriert. Es kann daher eine als Nichtlinearität bezeichnete Abweichung auftreten, wenn Messungen außerhalb des Nennmessbereichs vorgenommen werden. Diese Nichtlinearität wird als Prozentsatz des Nennmessbereichs angegeben und beträgt $\pm 2 \%$ [177]. Die Unsicherheit, die mit dieser Nichtlinearität verbunden ist, kann je nach Nennmessbereich erheblich variieren. Beispiel: *„Die Nichtlinearitätsspezifikation beträgt $\pm 2 \%$ des Nennmessbereichs. Für das Modell SBG01-200 mit einem Nennmessbereich von $200 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ tragen die $\pm 2 \%$ mit $4 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ zum Unsicherheitsbudget bei. Bei einer Messung mit demselben Sensor bei $20 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ ist dies ein Unsicherheitsbeitrag von $\pm 20 \%$, was im Vergleich zur Kalibrierungsunsicherheit von $6,5 \%$ recht hoch ist. Das Modell SBG01-20 hat einen Unsicherheitsbeitrag von nur $0,4 \times 10^3 \text{ W/m}^2$ oder $\pm 2 \%$ aufgrund von Nichtlinearität bei demselben Wärmestrom von $20 \times 10^3 \text{ W/m}^2$.“* [übersetzt aus dem Englischen] [177]

Daher sollte darauf geachtet werden, Sensoren möglichst nahe an ihrem Nennmessbereich zu verwenden. Da die exakte Bestimmung des korrekten Nennmessbereichs der einzelnen Messpunkte während der Fassadenbrandversuche nicht sicher vorhergesagt werden konnte, wurden für jeden Messpunkt zwei Sensoren mit unterschiedlichen Nennmessbereichen installiert. Ziel war es, eine möglichst umfassende Flächenabdeckung zu gewährleisten. Es wurde erwartet, dass die Einwirkung in der Nähe der Holzkippen intensiver sein würde als weiter oben am Prüfstand.

Die jeweiligen Nennmessbereiche der vier Wärmestromdichtesensoren sowie deren Messstelle sind in Tabelle 5.3 aufgeführt.

Tabelle 5.3 Übersicht über die eingesetzten Wärmestromdichtesensoren inkl. deren Nennmessbereichen

Messstelle	Produkttyp	Nennmessbereich
Wandversuch		
H4,5ml	SBG01-50	50 kW/m ²
H4,5mr	SBG01-20	20 kW/m ²
H6ml	SBG01-50	50 kW/m ²
H6mr	SBG01-5	5 kW/m ²
Balkonversuch		
H4,3ml	SBG01-50	50 kW/m ²
H4,3mr	SBG01-20	20 kW/m ²
H7,6ml	SBG01-50	50 kW/m ²
H7,6mr	SBG01-5	5 kW/m ²

Abbildung 5.10 bis Abbildung 5.15 veranschaulichen die Positionen der Thermoelemente, Plattenthermometer und Wärmestromdichtesensoren abhängig von der jeweiligen Versuchsreihe.

Alle durchgeführten Tests wurden mittels Video- und Wärmebildkamera aufgezeichnet.

Seitenansicht

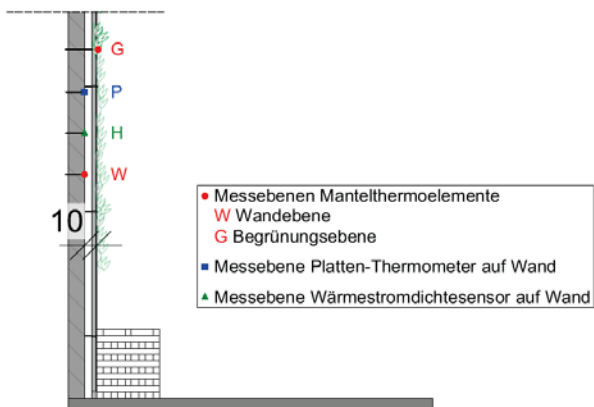


Abbildung 5.10 Seitenansicht der Wandversuche mit der Position der Messpunkte

Ansicht - Wandebene

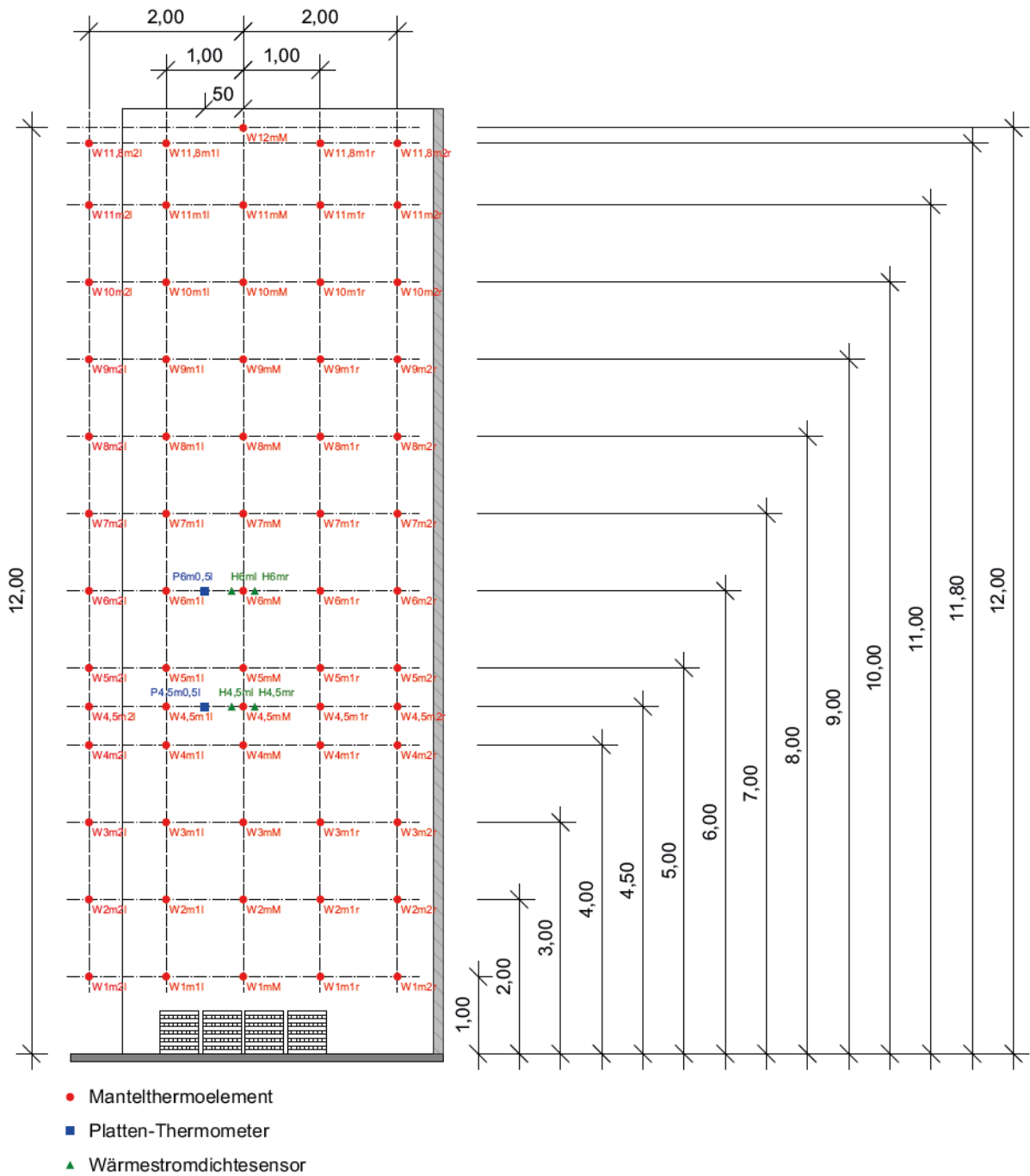


Abbildung 5.11 Ansicht der Wandversuche mit der Position der Messpunkte in der Wandebene

Ansicht - Begrünungsebene

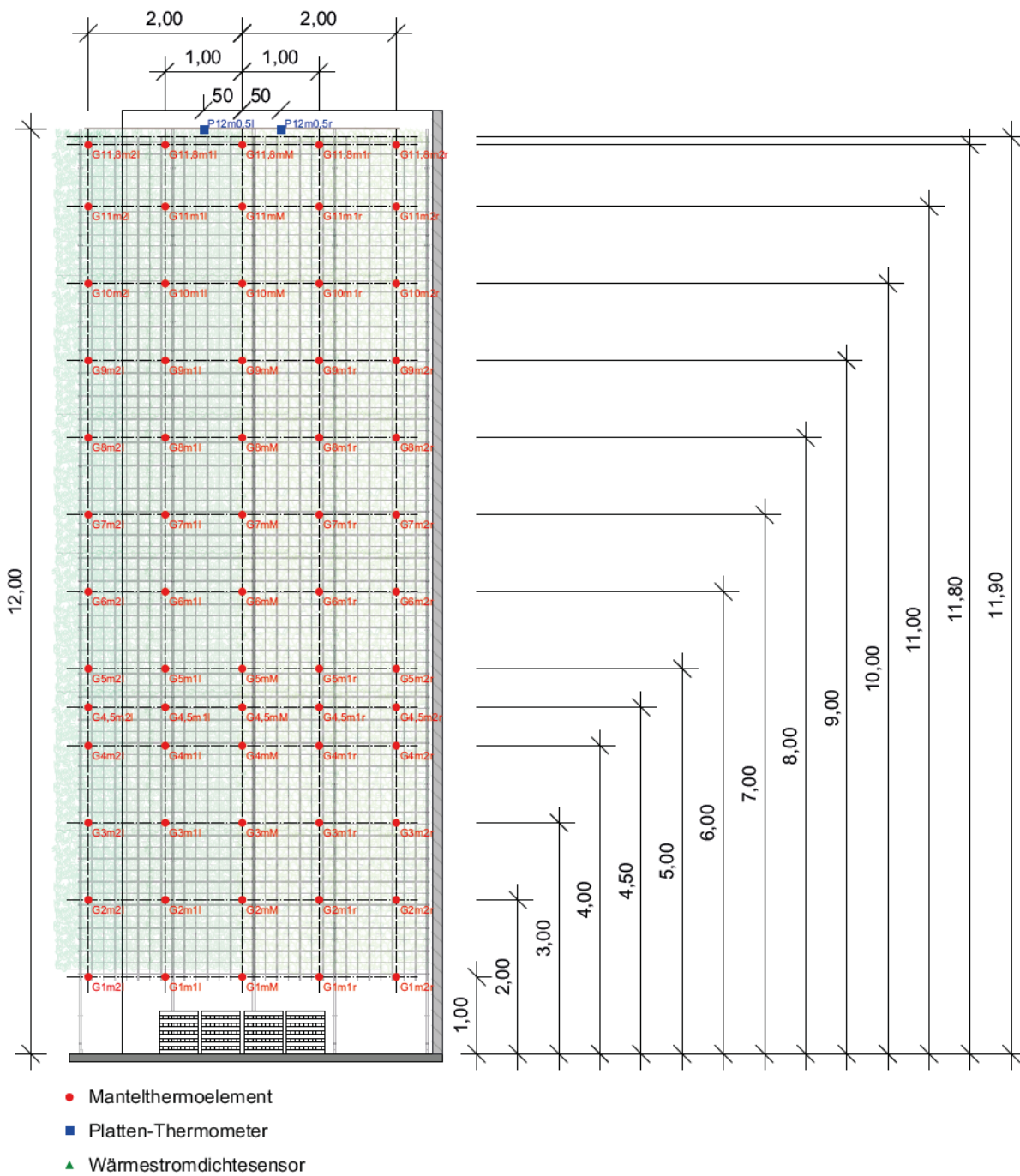


Abbildung 5.12 Ansicht der Wandversuche mit der Position der Messpunkte in der Begrünungsebene

Draufsicht - Messebene Balkon

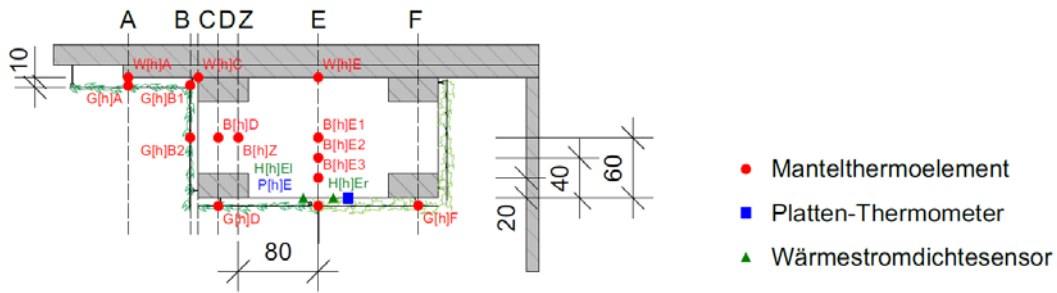


Abbildung 5.13 Draufsicht der Balkonversuche mit der Position der Messpunkte

Ansicht - Wandebene

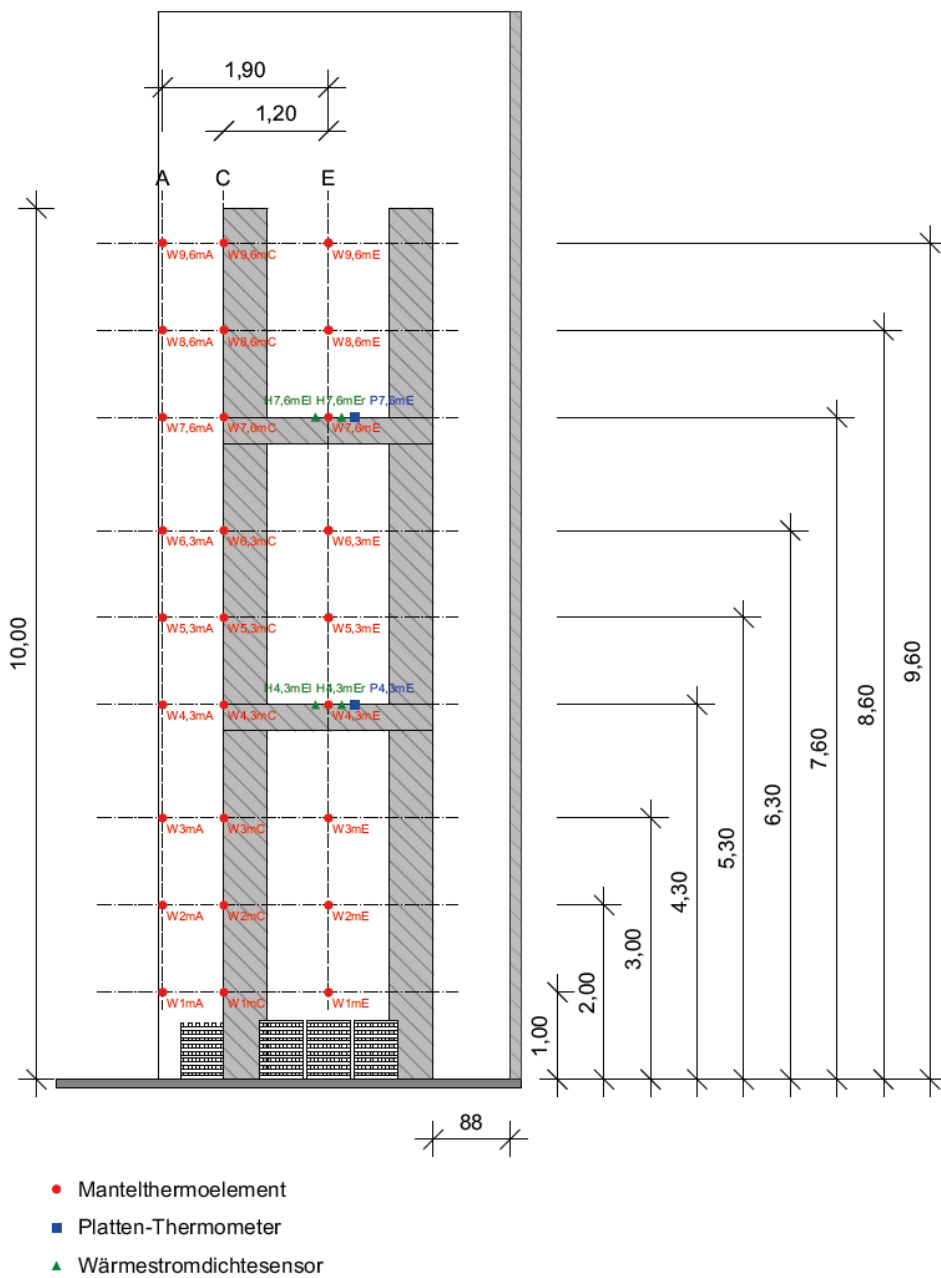
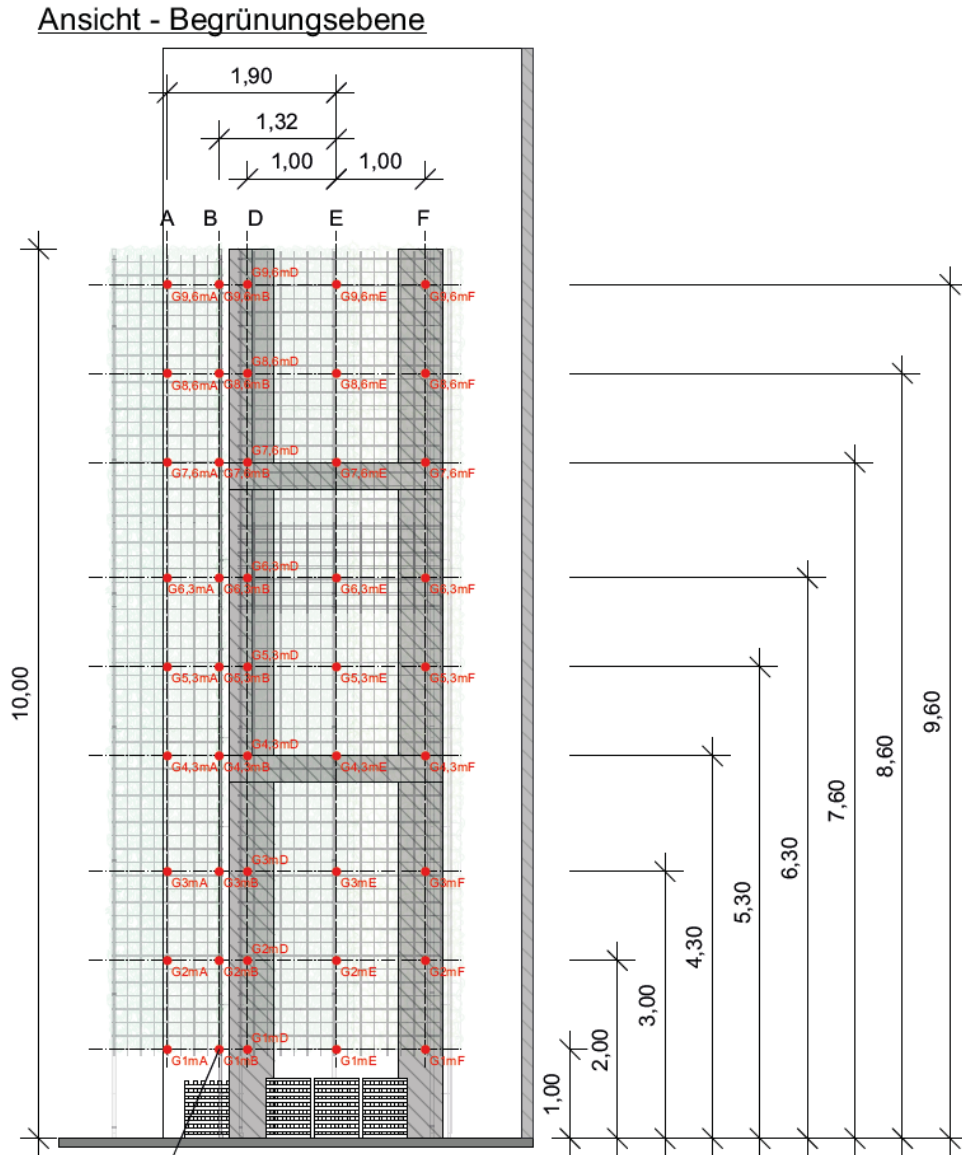


Abbildung 5.14 Ansicht der Balkonversuche mit der Position der Messpunkte in der Wandebene



In Achse B zwei Messstellen hintereinander (siehe Draufsicht)

- Mantelthermoelement
- Platten-Thermometer
- ▲ Wärmestromdichtesensor

Abbildung 5.15 Ansicht der Balkonversuche mit der Position der Messpunkte in der Begrünungsebene

5.5 Ergebnisse der großmaßstäblichen Brandversuche

5.5.1 Temperatur

Abbildung 5.16 bis Abbildung 5.38 zeigen die Temperaturverläufe, die in unterschiedlichen Höhen entlang der Fassaden- und Balkonflächen erfasst wurden. Um die Übersichtlichkeit zu gewährleisten, werden lediglich die Messpunkte dargestellt, die sich mittig über den Holzrippen sowohl in der Wand- als auch in der Begrünungsebene befanden. Für die *Balkonversuche*

sind zusätzlich die Temperaturen der Messpunkte auf den Balkonen in verschiedenen Höhen abgebildet. Die Datenerhebung erfolgte in einem Zeitintervall von 10 Sekunden, da aus technischen Gründen eine andere Frequenz nicht realisierbar war. Wie aus [1] hervorgeht, können trockene Pflanzen zeitweise sehr kurz aufbrennen. Die gewählte Messfrequenz von 10 Sekunden ist ausreichend, um diese Phänomene zu berücksichtigen; dennoch besteht die Möglichkeit, dass einzelne kurzzeitige Temperaturspitzen nicht erfasst wurden.

Der Temperaturverlauf der durchgeführten Versuche über den gesamten Versuchszeitraum für die Messpunkte, die sich mittig über den Holzrippen in unterschiedlichen Höhen sowohl in der Wand- als auch in der Begrünungsebene befinden, wird in Abbildung 5.22, Abbildung 5.35 und Abbildung 5.38 als Konturdiagramm veranschaulicht.

Die Temperatur-Zeit-Diagramme aller Messstellen sind in Anlage 2 enthalten.

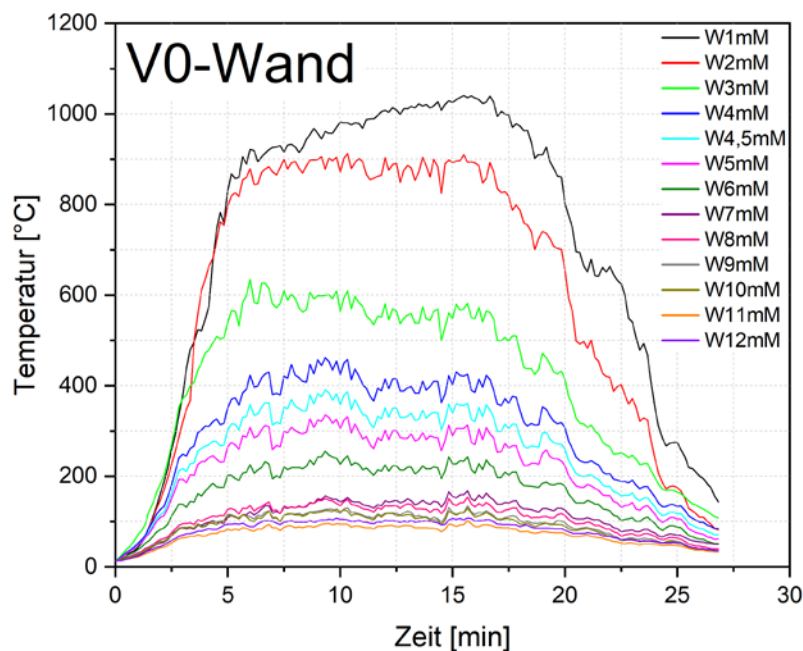


Abbildung 5.16 Temperatur-Zeit-Diagramm zu V0 in der Wandebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzrippen befinden

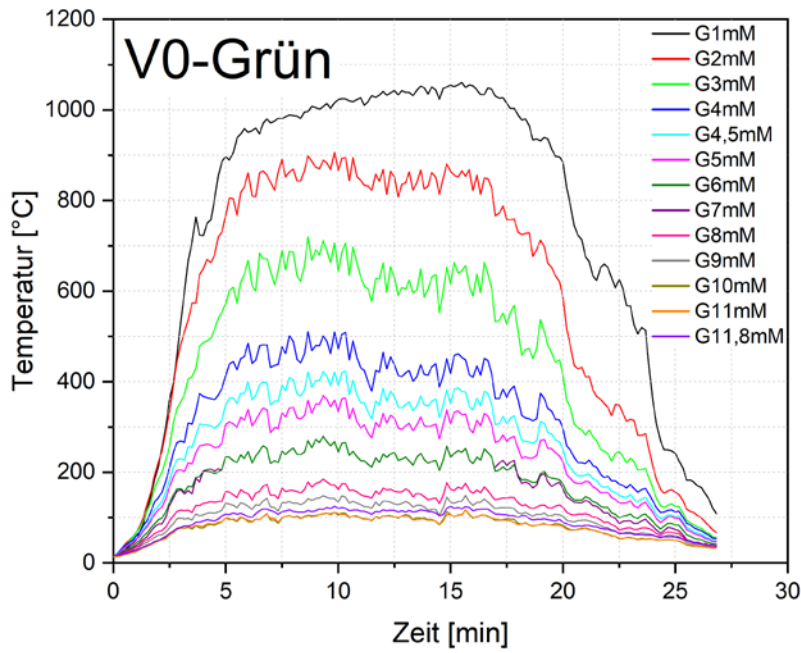


Abbildung 5.17 Temperatur-Zeit-Diagramm zu V0 in der Begrünungsebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzkippen befinden

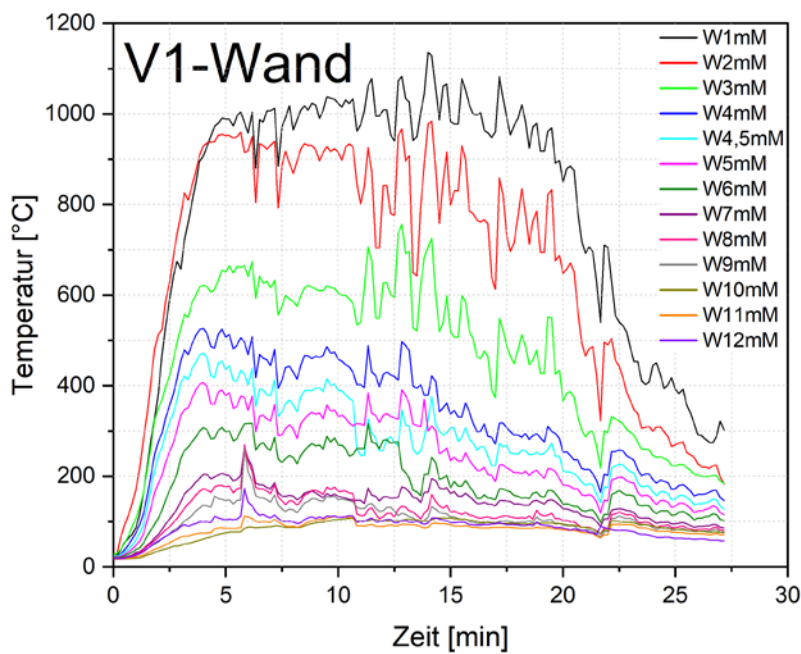


Abbildung 5.18 Temperatur-Zeit-Diagramm zu V1 in der Wandebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzkippen befinden

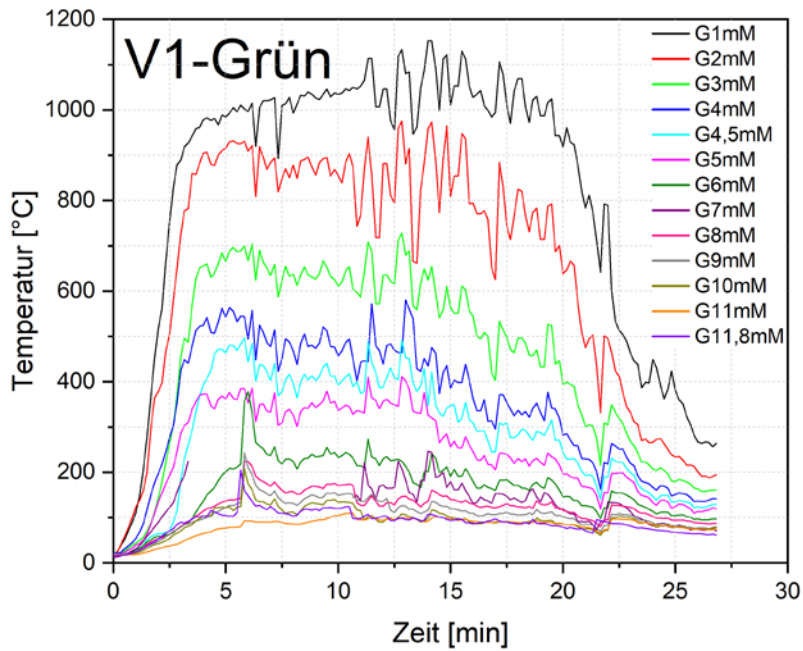


Abbildung 5.19 Temperatur-Zeit-Diagramm zu V1 in der Begrünungsebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzrippen befinden

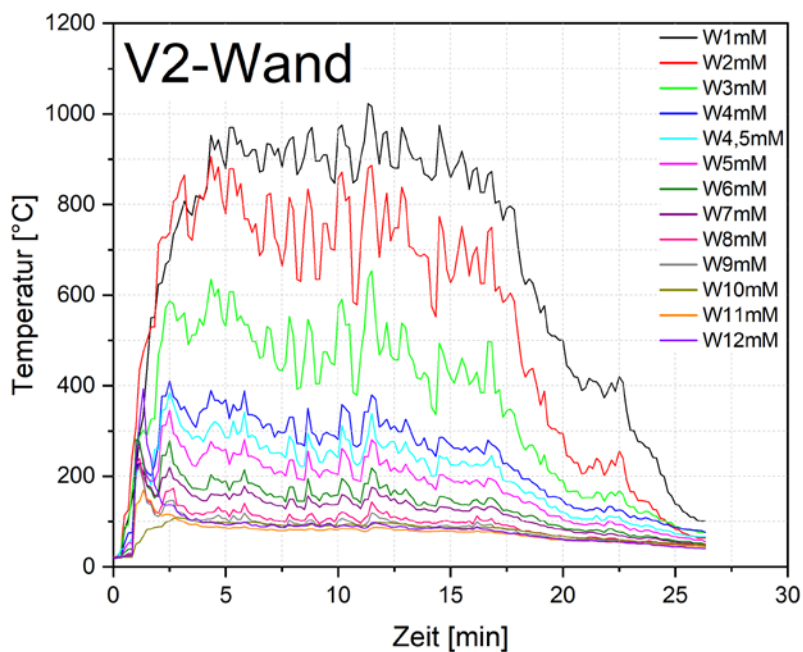


Abbildung 5.20 Temperatur-Zeit-Diagramm zu V2 in der Wandebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzrippen befinden

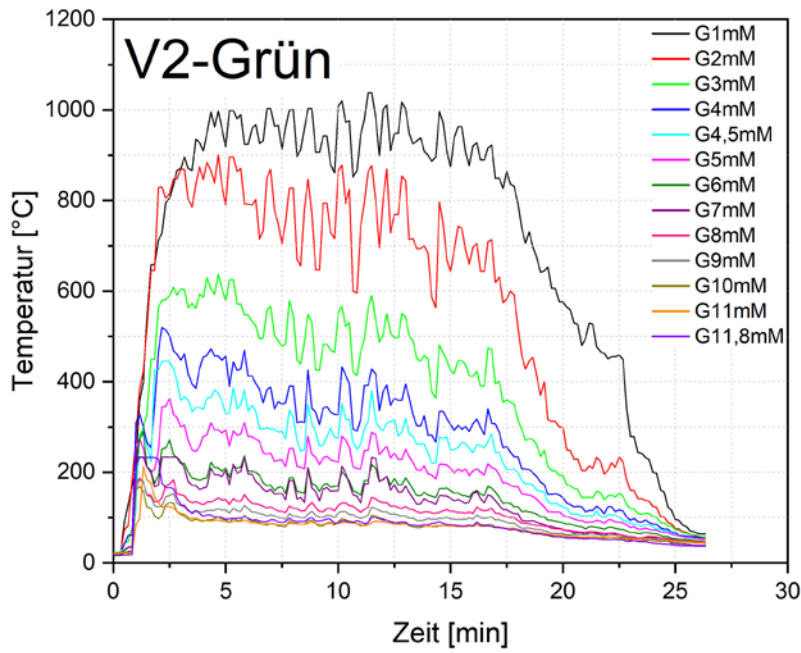


Abbildung 5.21 Temperatur-Zeit-Diagramm zu V2 in der Begrünungsebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzkrippen befinden

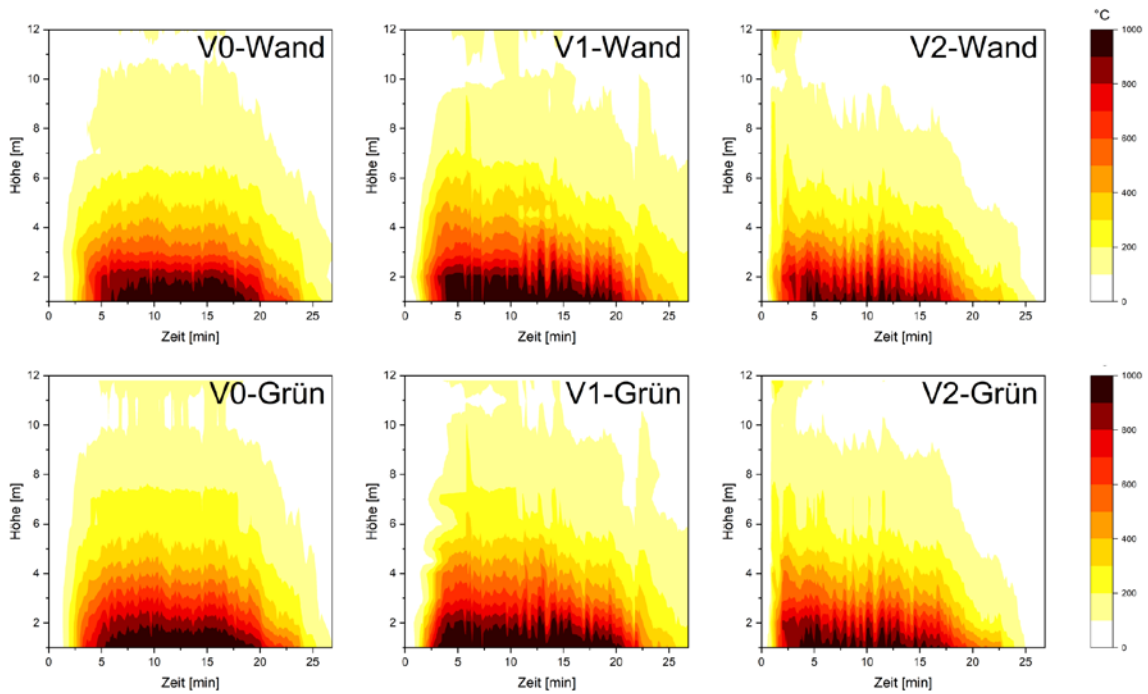


Abbildung 5.22 Temperaturentwicklung über die Versuchsdauer von V0, V1 und V2 für die Messpunkte mittig über den Holzkrippen in der Wand- und Begrünungsebene

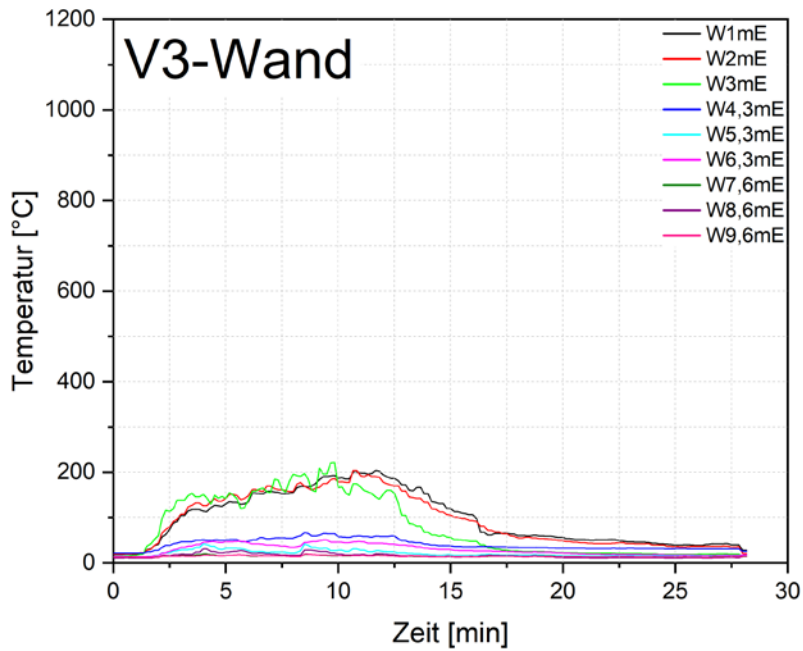


Abbildung 5.23 Temperatur-Zeit-Diagramm zu V3 in der Wandebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzrippen befinden

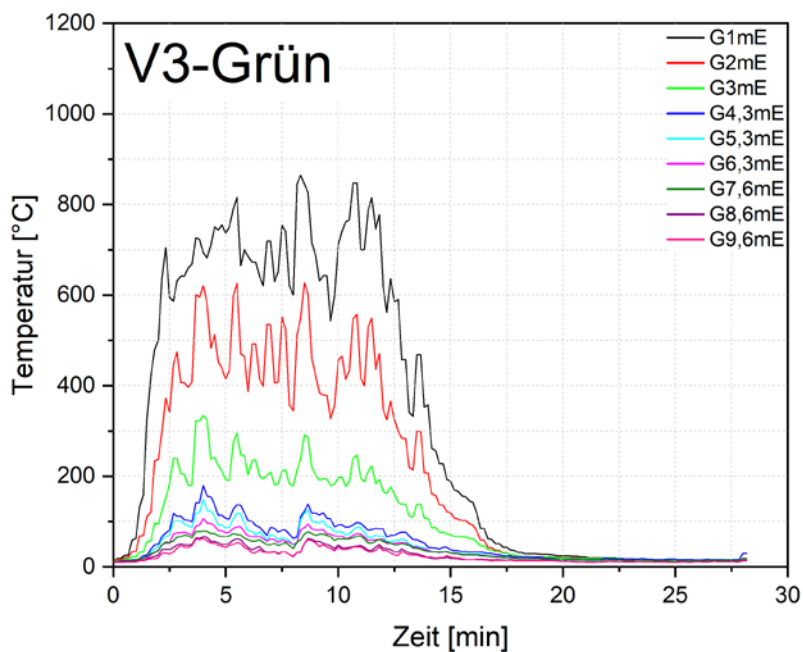


Abbildung 5.24 Temperatur-Zeit-Diagramm zu V3 in der Begrünungsebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzrippen befinden

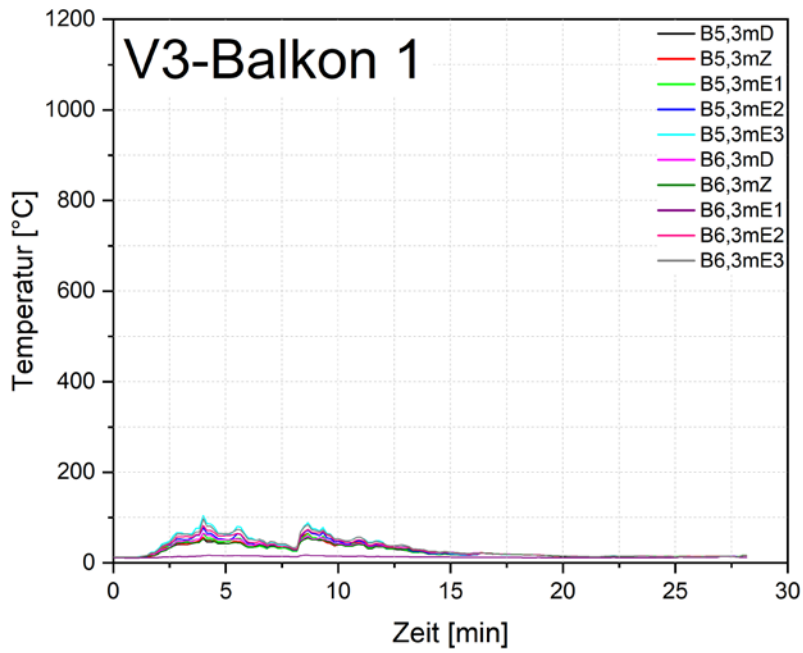


Abbildung 5.25 Temperatur-Zeit-Diagramm zu V3 für Messpunkte im Bereich des Balkon 1 in verschiedenen Höhen

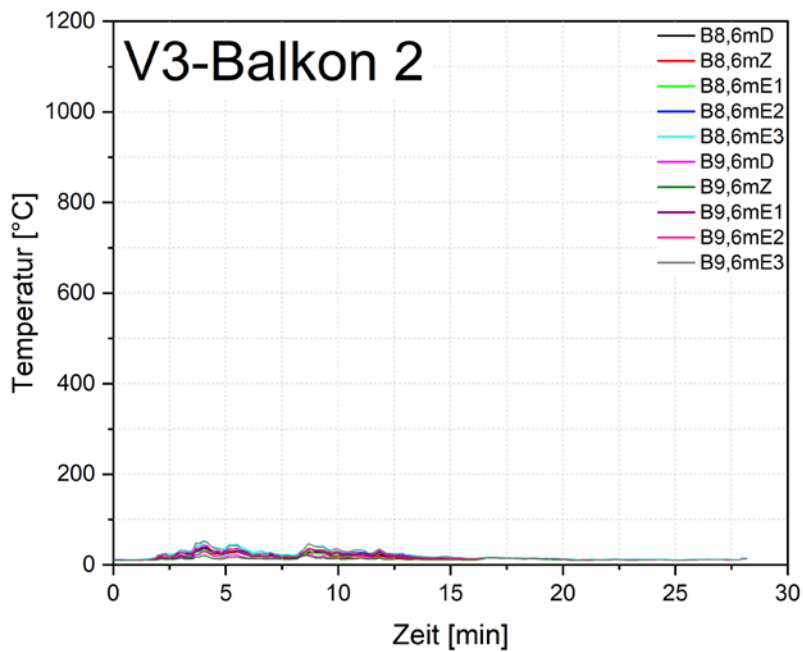


Abbildung 5.26 Temperatur-Zeit-Diagramm zu V3 für Messpunkte im Bereich des Balkon 2 in verschiedenen Höhen

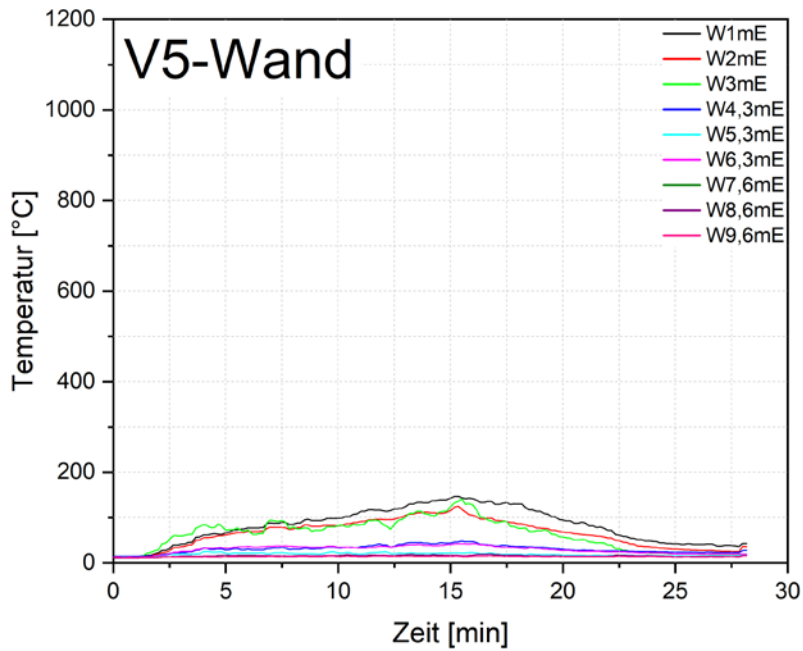


Abbildung 5.27 Temperatur-Zeit-Diagramm zu V5 in der Wandebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzrippen befinden

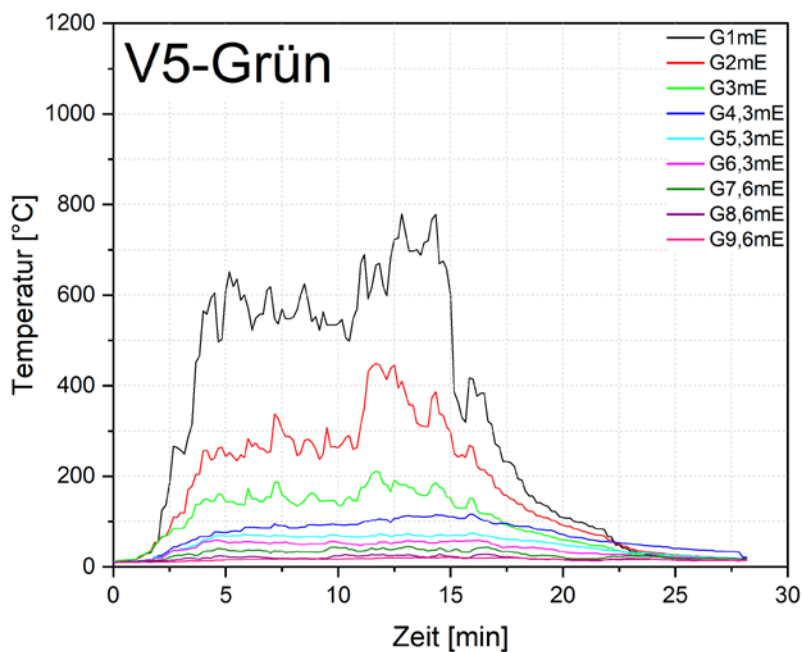


Abbildung 5.28 Temperatur-Zeit-Diagramm zu V5 in der Begrünungsebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzrippen befinden

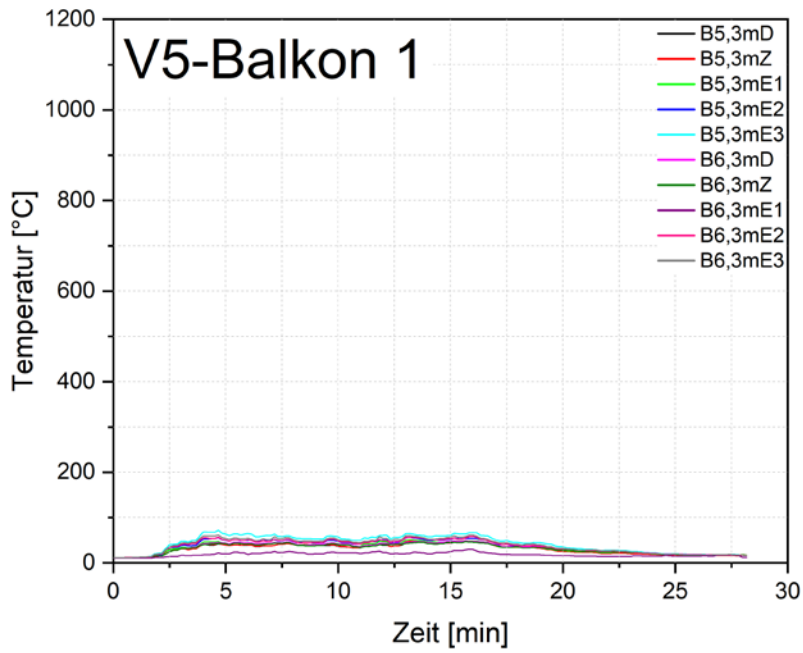


Abbildung 5.29 Temperatur-Zeit-Diagramm zu V5 für Messpunkte im Bereich des Balkon 1 in verschiedenen Höhen

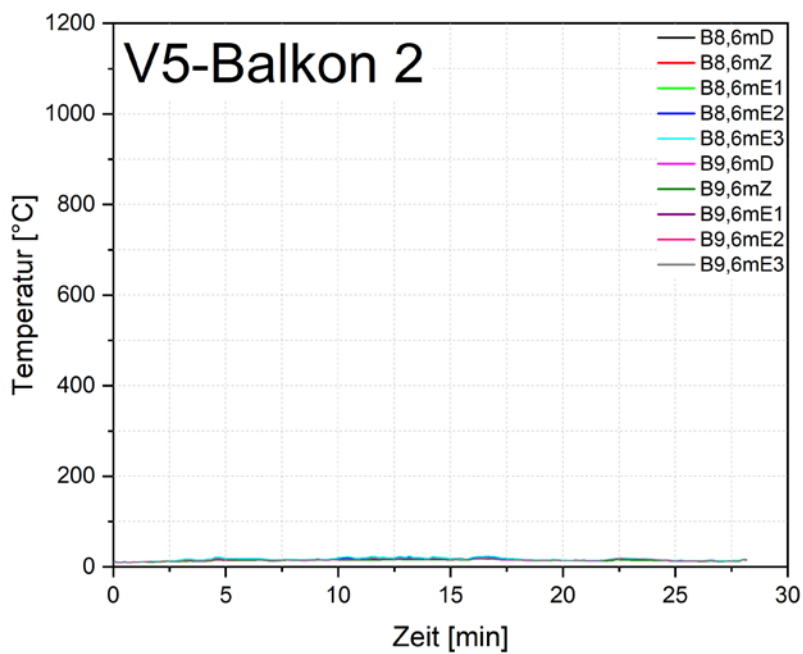


Abbildung 5.30 Temperatur-Zeit-Diagramm zu V5 für Messpunkte im Bereich des Balkon 2 in verschiedenen Höhen

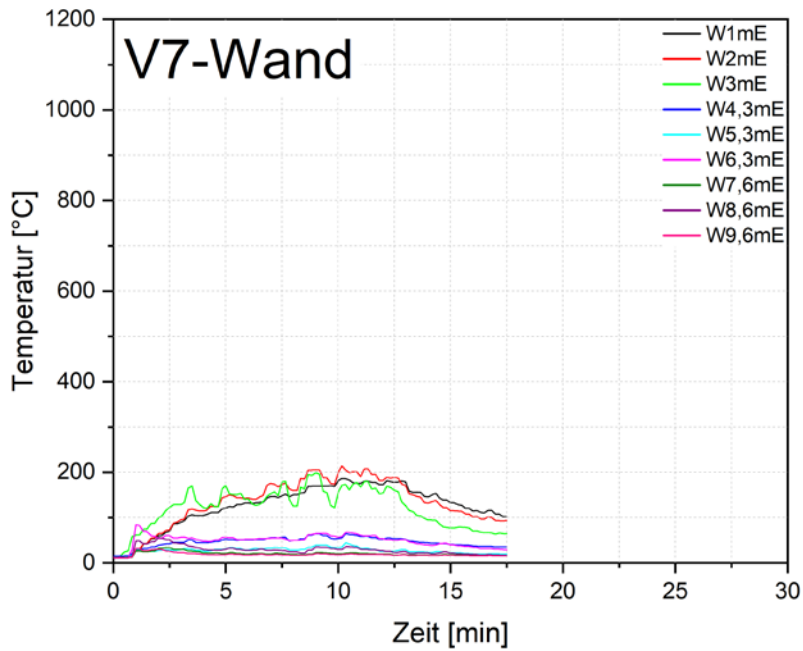


Abbildung 5.31 Temperatur-Zeit-Diagramm zu V7 in der Wandebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzrippen befinden

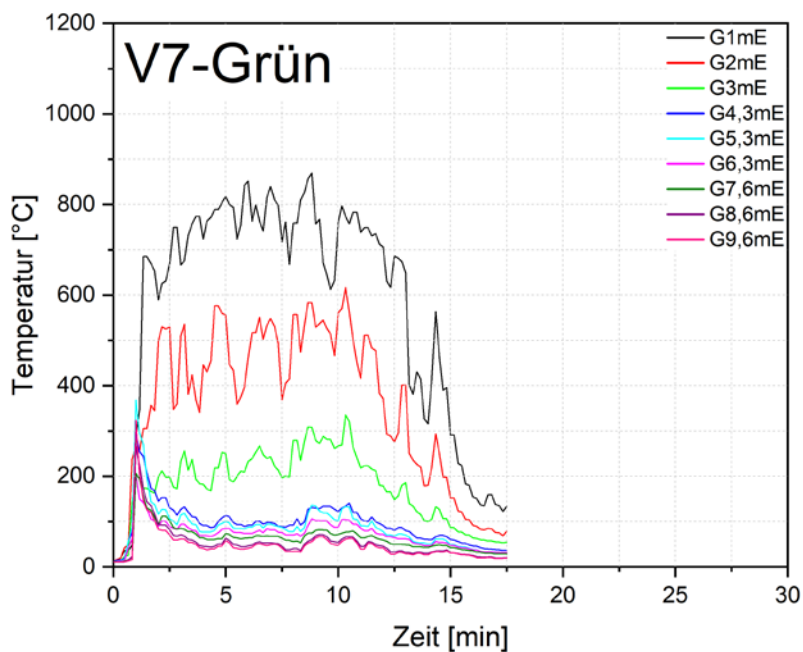


Abbildung 5.32 Temperatur-Zeit-Diagramm zu V7 in der Begrünungsebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzrippen befinden

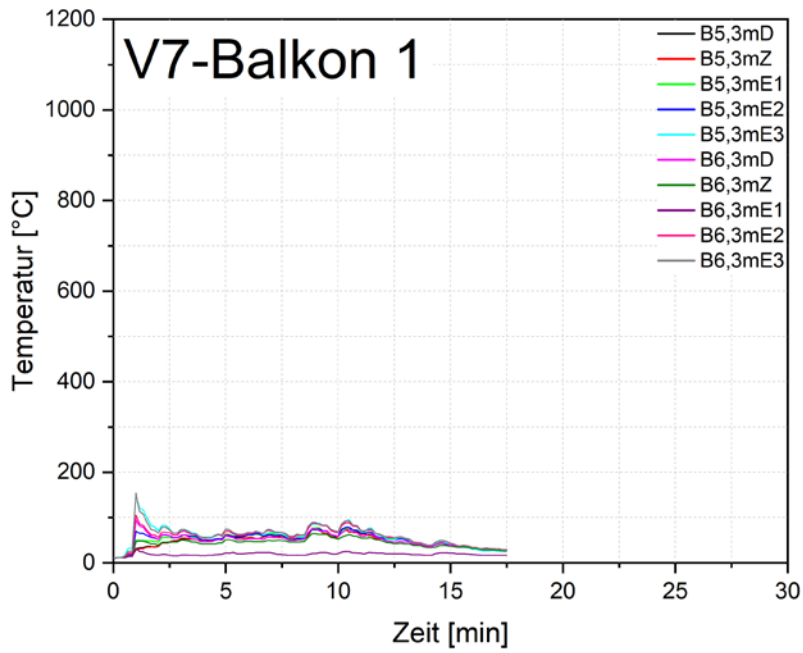


Abbildung 5.33 Temperatur-Zeit-Diagramm zu V7 für Messpunkte im Bereich des Balkon 1 in verschiedenen Höhen

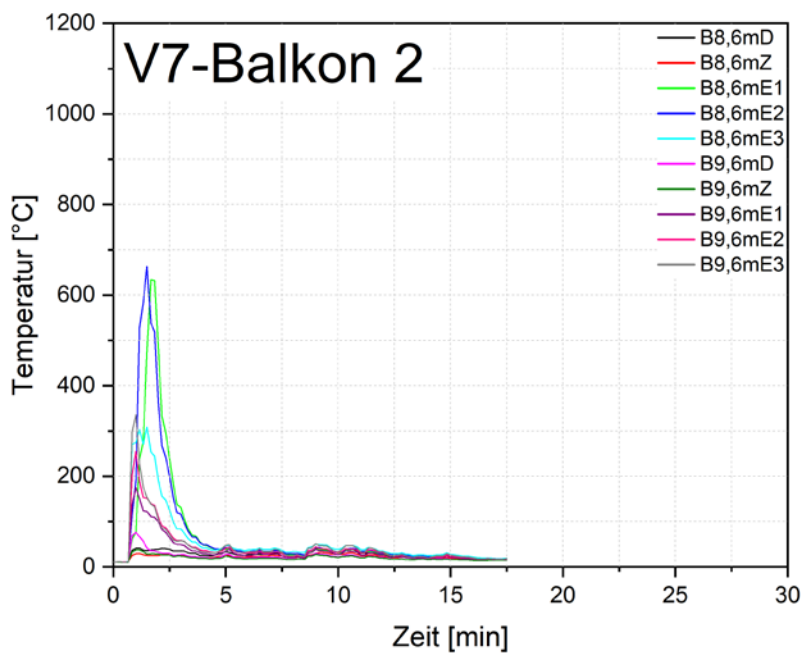


Abbildung 5.34 Temperatur-Zeit-Diagramm zu V7 für Messpunkte im Bereich des Balkon 2 in verschiedenen Höhen

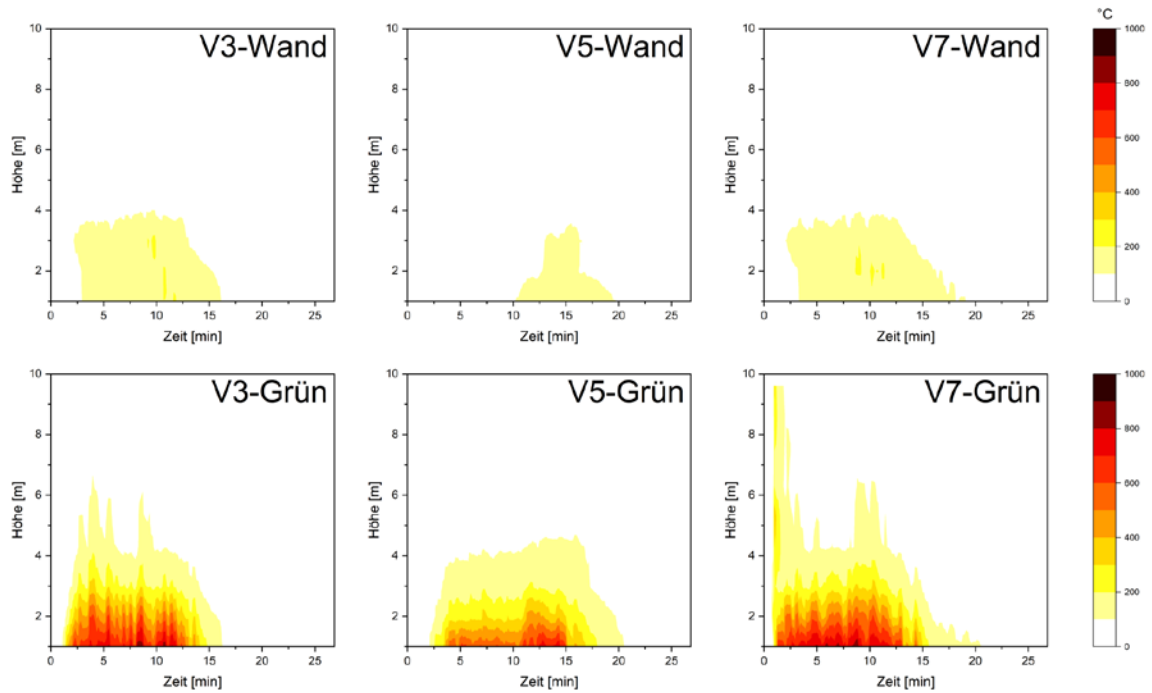


Abbildung 5.35 Temperaturentwicklung über die Versuchsdauer von V3, V5 und V7 für die Messpunkte mittig über den Holzrippen in der Wand- und Begrünungsebene

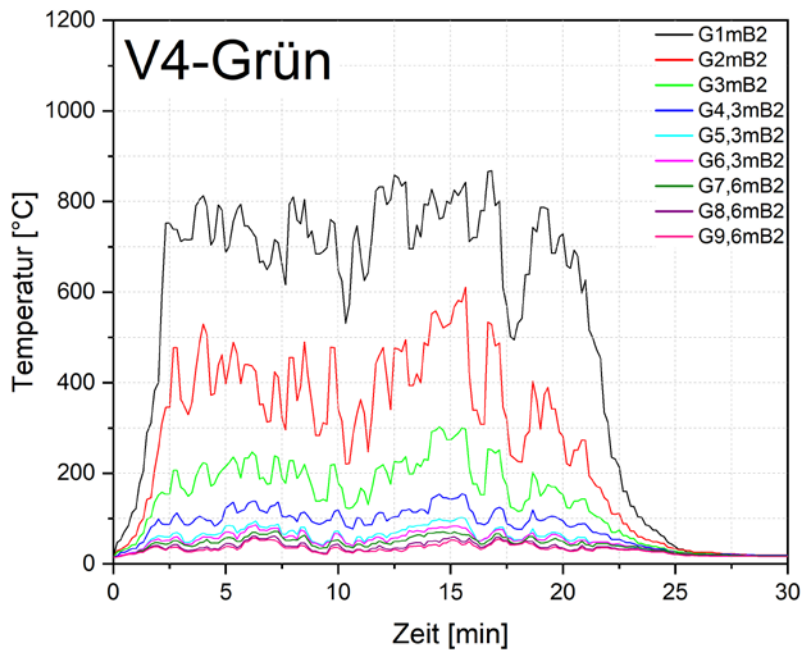


Abbildung 5.36 Temperatur-Zeit-Diagramm zu V4 in der Begrünungsebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzrippen befinden

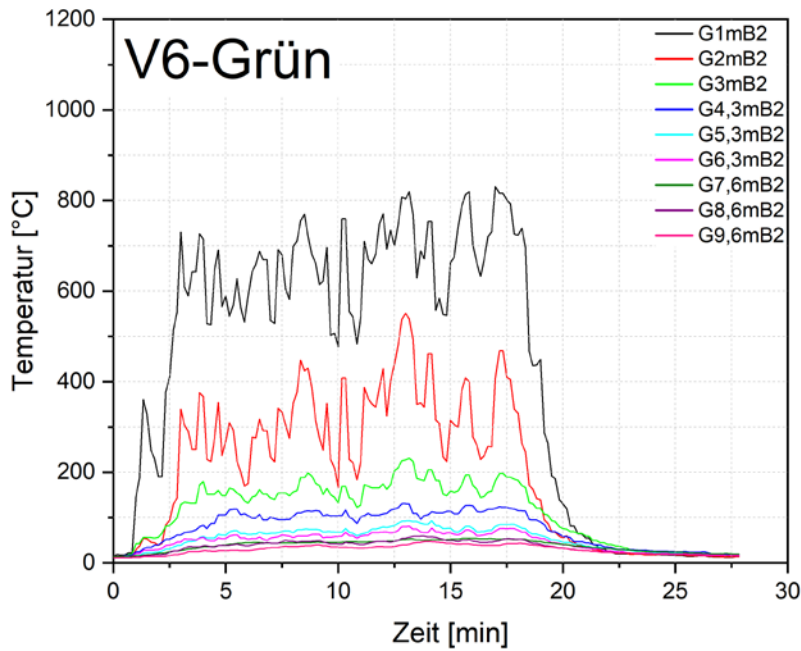


Abbildung 5.37 Temperatur-Zeit-Diagramm zu V6 in der Begrünungsebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzkrippen befinden

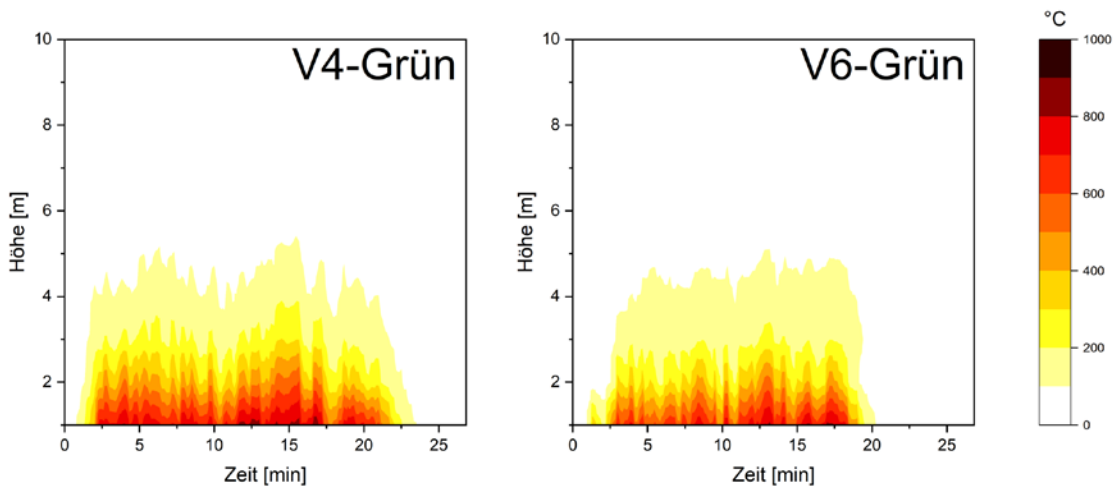


Abbildung 5.38 Temperaturentwicklung über die Versuchsdauer von V4 und V6 für die Messpunkte mittig über den Holzkrippen in der Begrünungsebene

5.5.2 Wärmestromdichte

Im Unterschied zur im vorhergehenden Abschnitt erläuterten Temperaturmessung wurde die Erfassung der Wärmestromdichtemessung in einem Messintervall von 1 s durchgeführt. Diese Frequenz wurde gezielt ausgewählt, um auch die kurzfristigen Spitzen der Strohfeuer präzise zu erfassen. Das kurze Aufzeichnungsintervall von 1 s führt zwar zu exakten, jedoch auch zu unübersichtlichen Diagrammen. Um die Verständlichkeit der Messdaten der Wärmestromdich-

tesensoren zu verbessern, wurden diese mithilfe des Savitzky-Golay-Filters über einen Zeitraum von 30 Sekunden geglättet. Der Unterschied zwischen den tatsächlichen Messdaten, die durch kurzzeitige Spitzen gekennzeichnet sind, und der geglätteten Kurve wird in Abbildung 5.39 veranschaulicht. Die ursprünglichen Messdaten können den ergänzenden Informationen zu [2] entnommen werden.

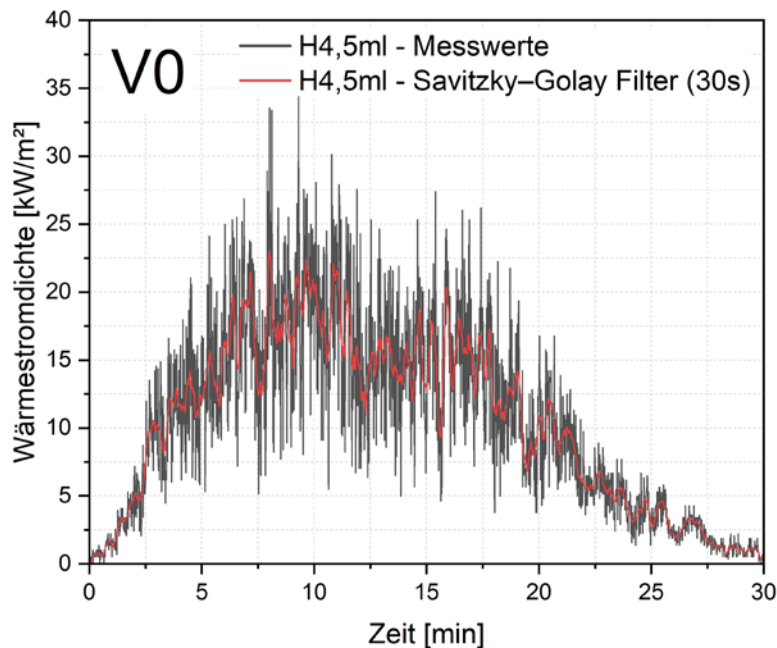


Abbildung 5.39 Vergleich der ungeglätteten und geglätteten Messdaten am Beispiel der Messstelle H4,5ml in V0

Die geglättete Wärmestromdichte der durchgeführten Versuche kann den Diagrammen in Abbildung 5.40 bis Abbildung 5.45 entnommen werden. Bei der Analyse der Ergebnisse ist besonders auf den Nennmessbereich des jeweiligen Wärmestromdichtesensors zu achten, wie in Abschnitt 5.4 beschrieben.

Die ungeglätteten Wärmestromdichten sind in Anlage 3 enthalten

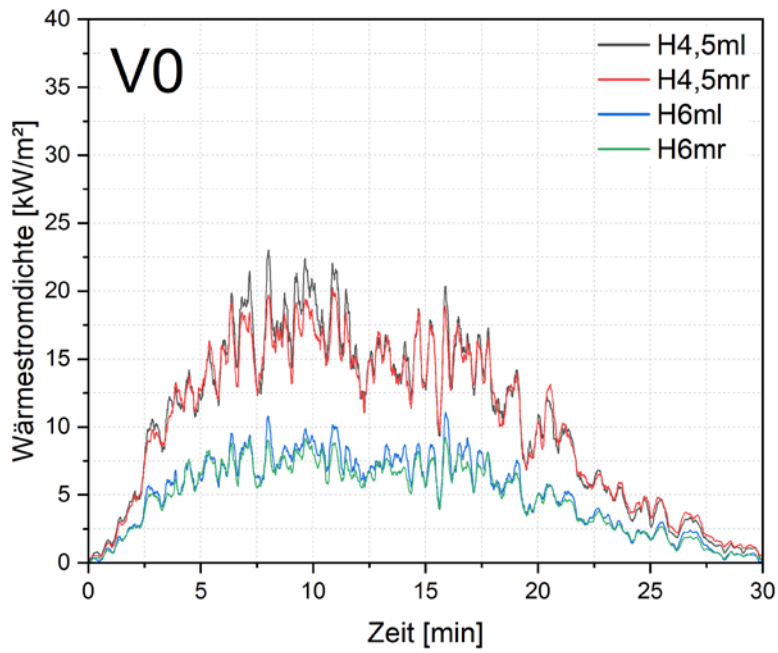


Abbildung 5.40 Wärmestromdichte für V0, gemessen mittig über den Holzkruppen in einer Höhe von 4,5 m und 6 m

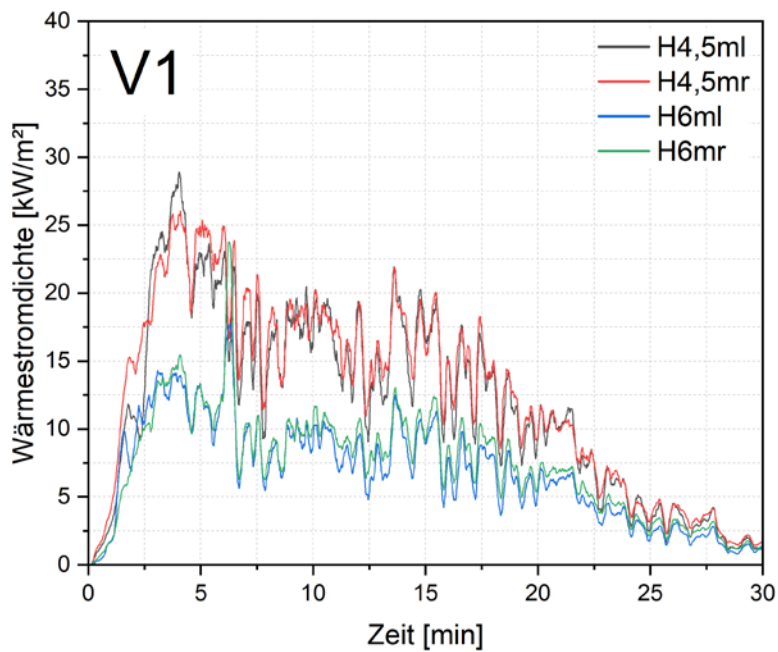


Abbildung 5.41 Wärmestromdichte für V1, gemessen mittig über den Holzkruppen in einer Höhe von 4,5 m und 6 m

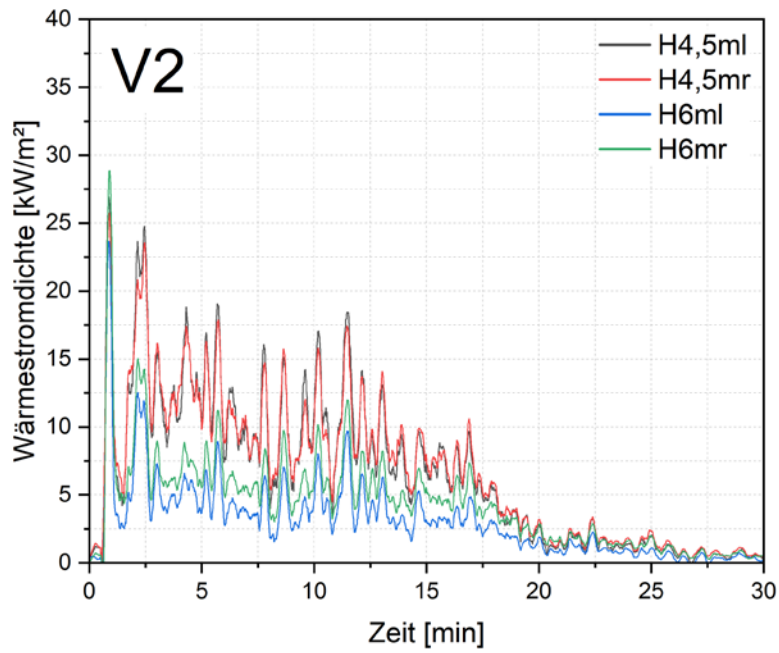


Abbildung 5.42 Wärmestromdichte für V2, gemessen mittig über den Holzkrippen in einer Höhe von 4,5 m und 6 m

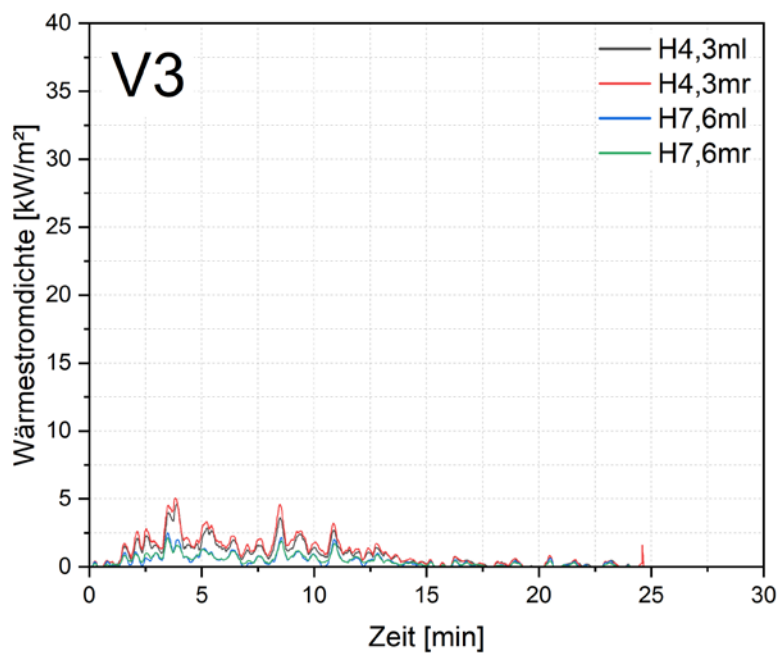


Abbildung 5.43 Wärmestromdichte für V3, gemessen mittig über den Holzkrippen in einer Höhe von 4,3 m (Balkon 1) und 7,6 m (Balkon 2)

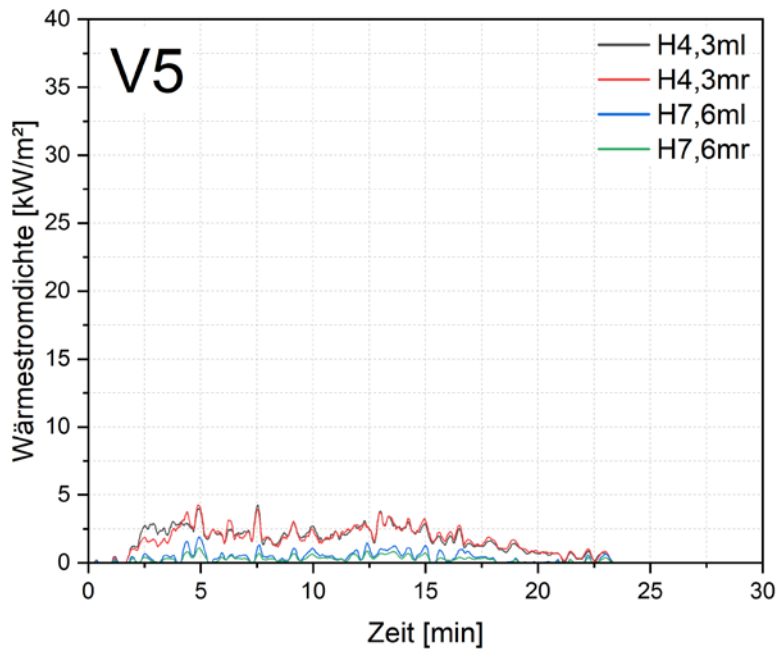


Abbildung 5.44 Wärmestromdichte für V5, gemessen mittig über den Holzkrippen in einer Höhe von 4,3 m (Balkon 1) und 7,6 m (Balkon 2)

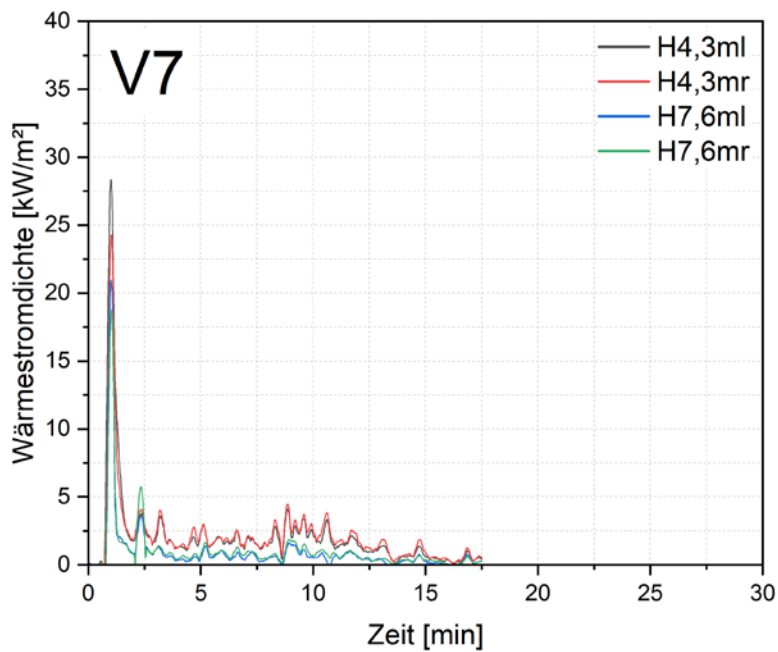


Abbildung 5.45 Wärmestromdichte für V7, gemessen mittig über den Holzkrippen in einer Höhe von 4,3 m (Balkon 1) und 7,6 m (Balkon 2)

5.5.3 Brandweiterleitung

Abbildung 5.46 bis Abbildung 5.53 zeigen die Versuche V1, V2, V5, V6 und V7 jeweils vor und nach der Prüfung sowie die durch die Brandweiterleitung entstandenen Schäden.

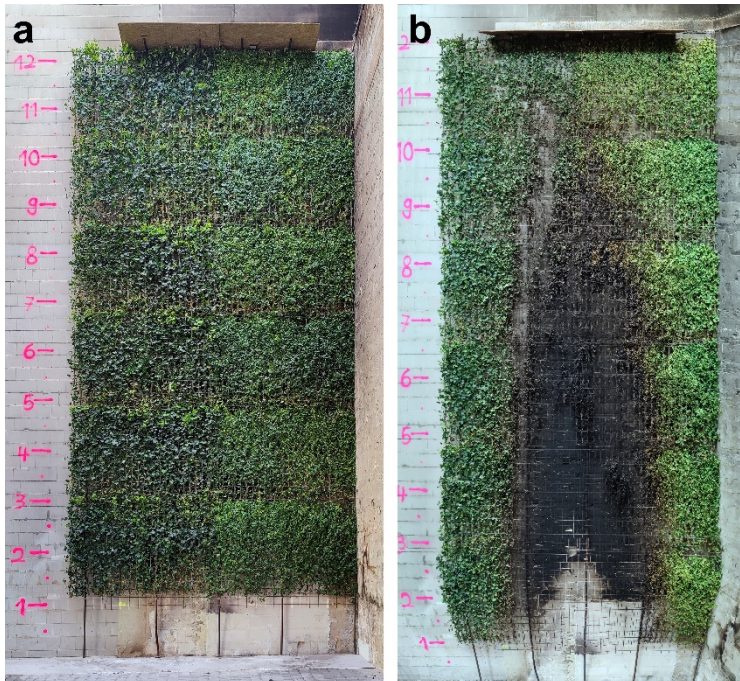


Abbildung 5.46 Versuch V1 a) vor der Prüfung und b) nach der Prüfung

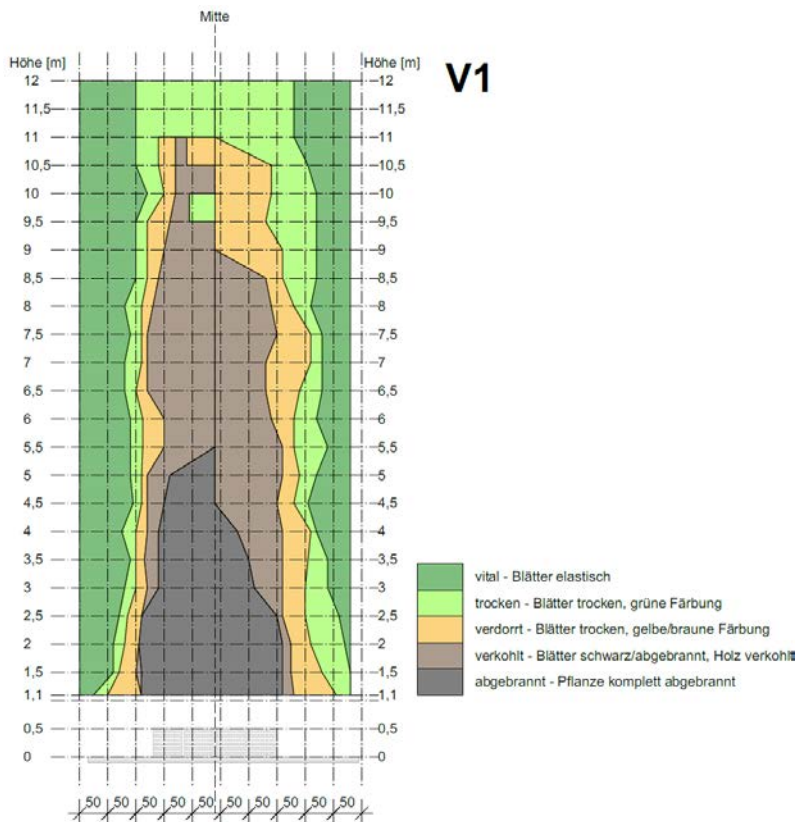


Abbildung 5.47 Veranschaulichung der durch die Brandweiterleitung entstandenen Schäden am Versuch V1

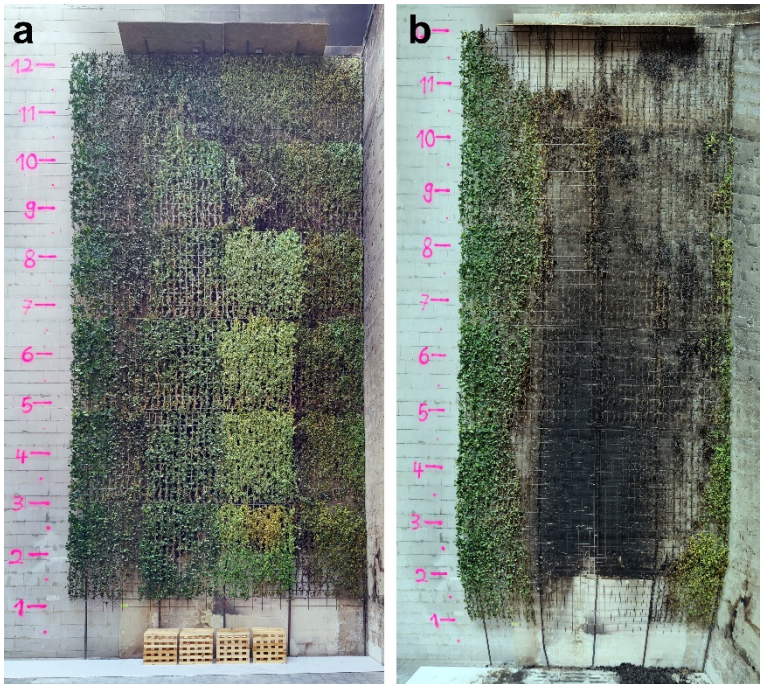


Abbildung 5.48 Versuch V2 a) vor der Prüfung und b) nach der Prüfung

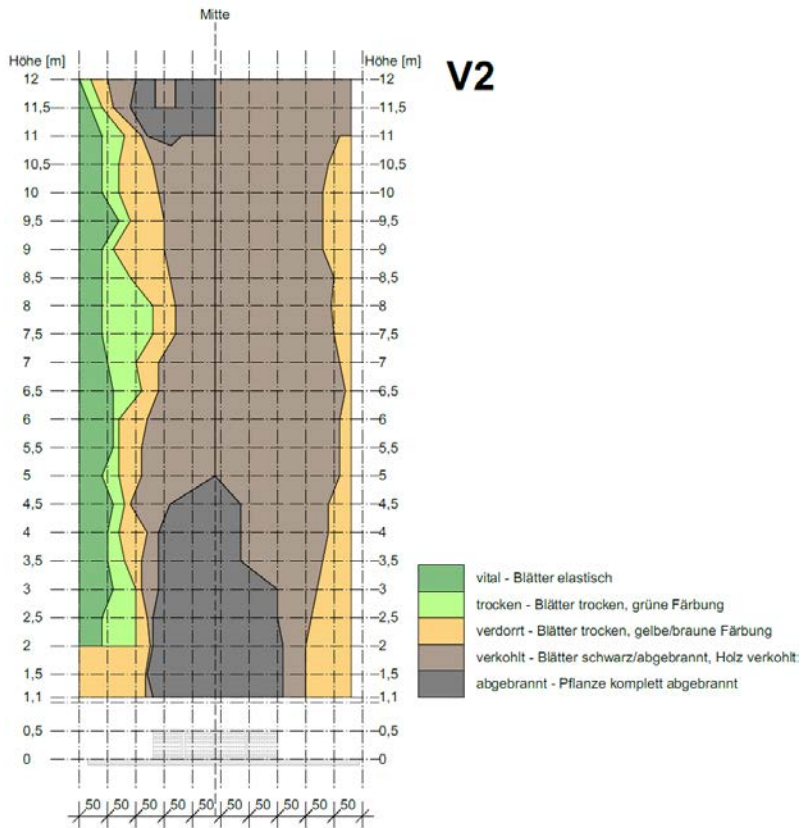


Abbildung 5.49 Veranschaulichung der durch die Brandweiterleitung entstandenen Schäden am Versuch V2

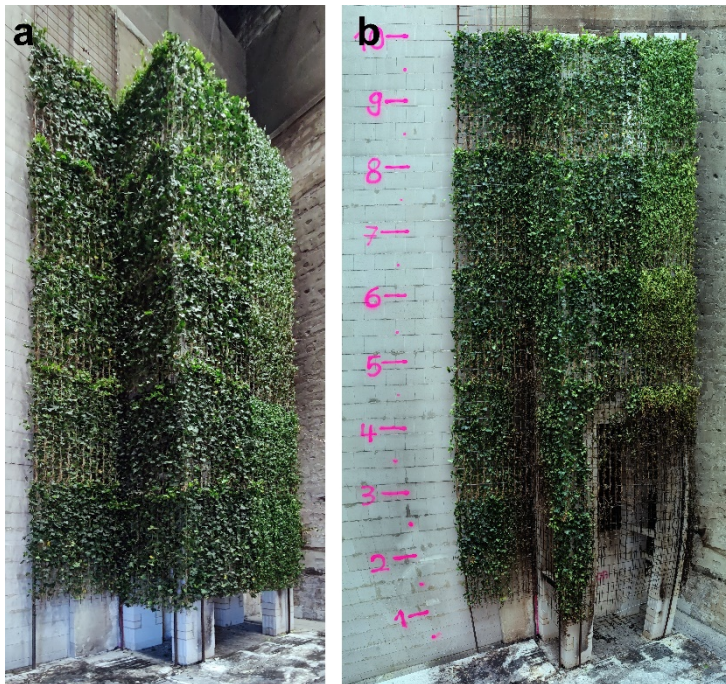


Abbildung 5.50 Versuche V5 und V6 a) vor der Prüfung und b) nach der Prüfung

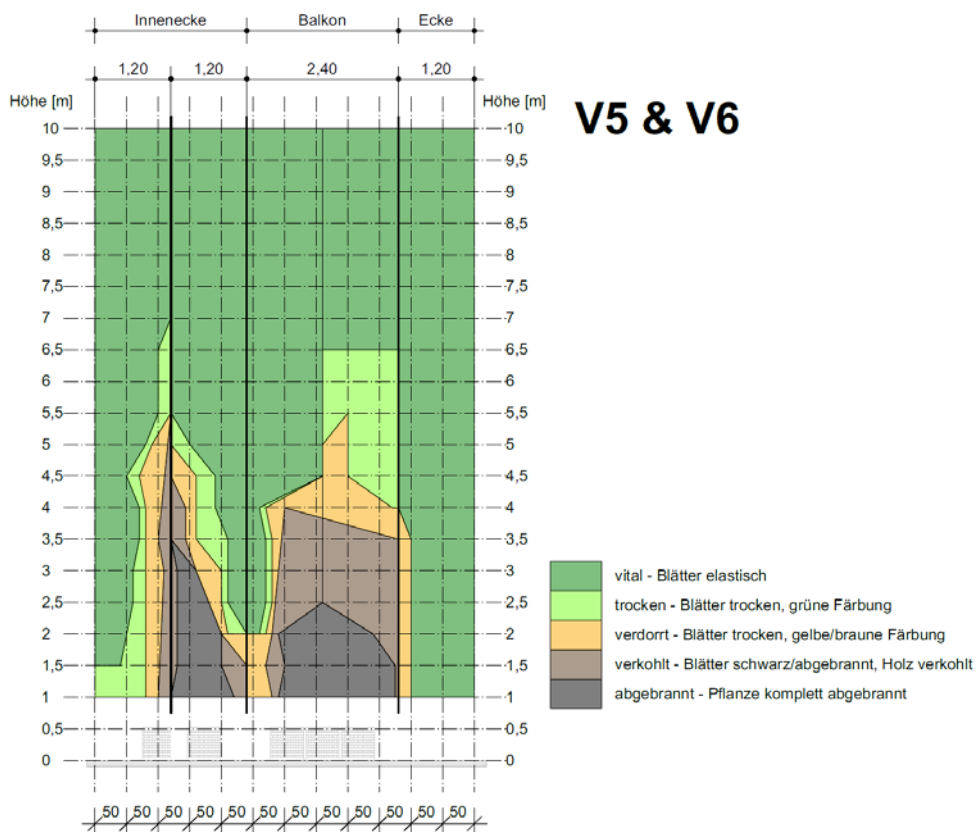


Abbildung 5.51 Veranschaulichung der durch die Brandweiterleitung entstandenen Schäden an den Versuchen V5 & V6



Abbildung 5.52 Versuch V7 a) vor der Prüfung und b) nach der Prüfung

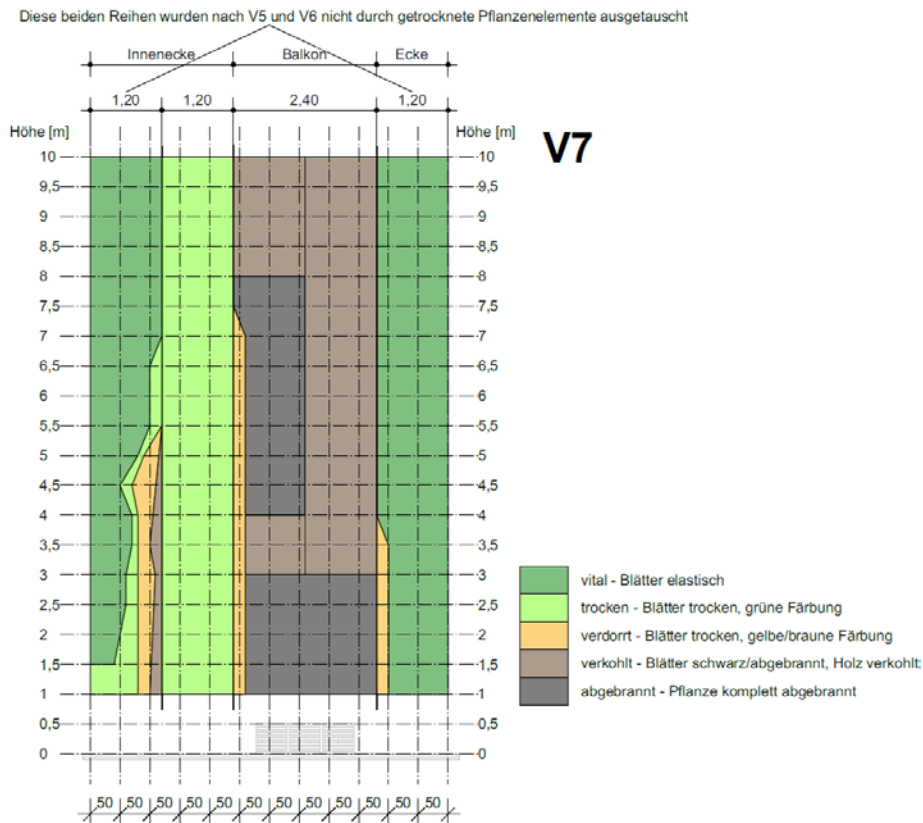


Abbildung 5.53 Veranschaulichung der durch die Brandweiterleitung entstandenen Schäden am Versuch V7

5.5.4 Flammenhöhen

Abbildung 5.54 bis Abbildung 5.56 veranschaulichen die während der Brandversuche aufgetretenen Flammenhöhen. Bei den Versuchen mit Pflanzen (V1, V2, V5, V6 und V7) wurden die Primärflammen sowie die Flammen, die aus Strohfeuern resultierten, getrennt erfasst. Die Primärflammen wurden definiert als die maximalen kontinuierlichen Flammenhöhen über dem Boden, die ausschließlich aus den brennenden Holzkrippen hervorgingen. Im Gegensatz dazu wurde die Höhe der Flammen aus Strohfeuern als die maximale Höhe über dem Boden definiert, bei der sichtbare Flammen infolge brennender Pflanzen auftraten. Es ist hervorzuheben, dass diese Flammen nicht zwangsläufig bis zur maximal gemessenen Höhe durchgängig sein müssen.

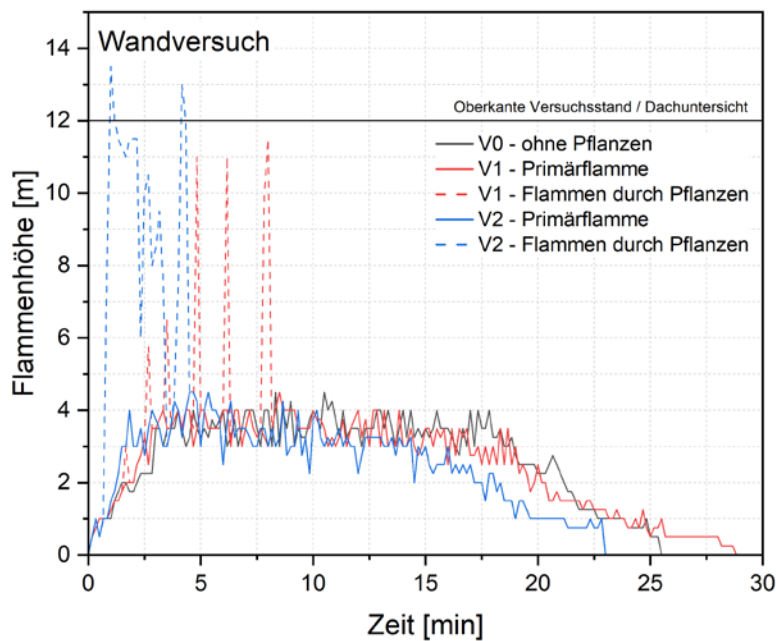


Abbildung 5.54 Flammenhöhen der Versuche V0, V1 und V2

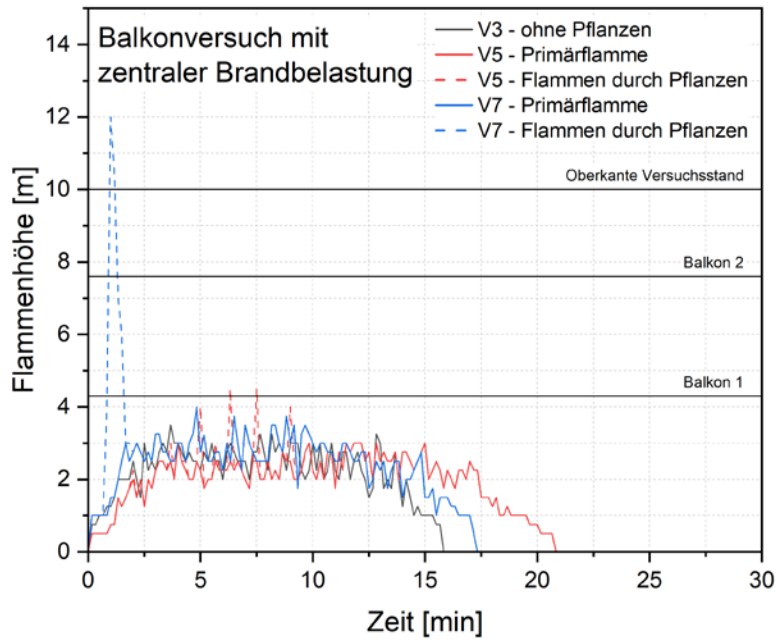


Abbildung 5.55 Flammenhöhen der Versuche V3, V5 und V7

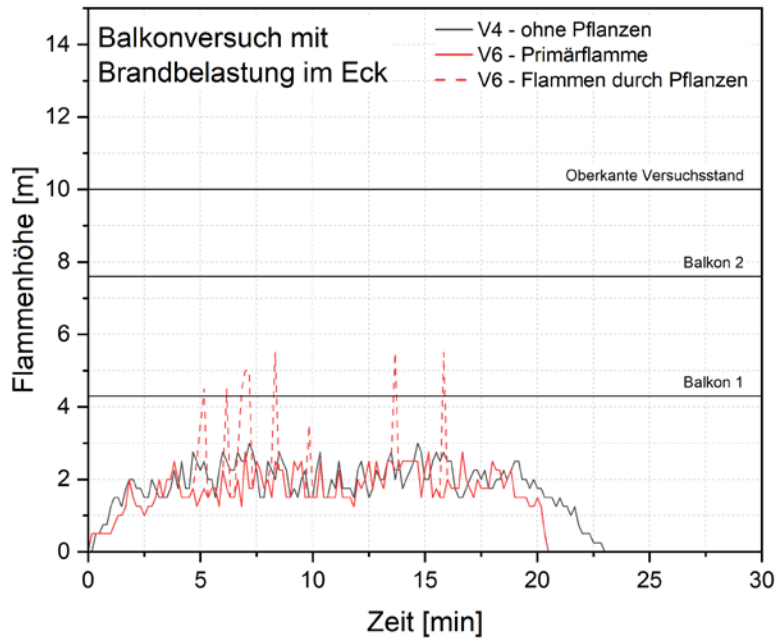


Abbildung 5.56 Flammenhöhen der Versuche V4 und V6

5.5.5 Versuchsbeobachtungen

Die Versuchsbeobachtungen können den Videos in den ergänzenden Informationen zu [2] entnommen werden.

5.6 Diskussion

5.6.1 Allgemein

Das übergeordnete Ziel der durchgeführten Testreihen bestand darin, den kritischsten und damit extremen Fall zu simulieren, auch wenn dieser in der Baupraxis als unwahrscheinlich gilt. Der zugrunde liegende Gedanke war, dass, sollte die Fassadenbegrünung auch im Worst-Case-Szenario funktionieren, die getestete Lösung auch in weniger extremen Situationen funktionieren wird.

Ein Beispiel hierfür ist der Abstand zwischen dem Rankgitter und der Außenwand. In den durchgeführten Versuchen wurde ein Abstand von 100 mm gewählt, um eine kritische Brandbelastung der begrüneten Fassade zu erzeugen. Für die bodengebundene Begrünung an Kletterhilfen wird basierend auf der Wuchsstärke ein Abstand zwischen 80 mm und 200 mm empfohlen [34], [37], [38], [39], [180]. Ein ausreichender Abstand ist erforderlich, um das Pflanzenwachstum zu gewährleisten und eine Überhitzung der Kletterpflanze durch die Außenwand sowie eine unzureichende Hinterlüftung zu vermeiden [34], [180]. Insbesondere Pflanzen mit dichtem Blattwerk sind anfällig für Hitzestau. Daher muss die Luftzirkulation an der Fassade ungehindert möglich sein, was bedeutet, dass die Rankhilfe ausreichend von der Außenwand entfernt sein muss [34], [180]. Weitere Aspekte, die einen größeren Abstand rechtfertigen, sind die Erleichterung der Wartung (vgl. Abschnitt 5.6.6), die Vermeidung mechanischer Schäden und das Ansammeln von Blättern (vgl. Abschnitt 5.6.6) sowie die Minimierung von Verschmutzungen an der Fassade.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden Planer und Hersteller von Fassadenbegrünungen befragt [170]. Die Umfrage ergab, dass bei bereits realisierten Projekten ein üblicher Abstand von durchschnittlich 180 mm zu Außenwänden eingehalten wird [170]. Der in den Versuchen gewählte Abstand von 100 mm liegt somit im minimal möglichen und dennoch sinnvollen Bereich.

Ein weiteres Beispiel für ein Worst-Case-Szenario ist die Trocknung der Pflanzen, wie in Abschnitt 5.2.2 beschrieben.

Betrachtet man die Versuche mit vitalen Pflanzen, so zeigen sich signifikante Unterschiede im Feuchtigkeitsgehalt: Im Vergleich zum V1 weicht dieser bei *Hedera helix* um 67 % und bei *Euonymus fortunei* um 98 % von den Werten der Versuche V5 und V6 ab (vgl. Tabelle 5.2). Diese Abweichungen sind auf die üblichen Schwankungen bei den Pflanzen sowie auf Lagerung und Transport zurückzuführen. In beiden Fällen bleiben die Pflanzen jedoch unabhängig von den unterschiedlichen Werten vital. Eine signifikante Veränderung des Brennverhaltens tritt erst bei Feuchtegehalten unterhalb von 100 % auf [1], [186], [187].

Die Dichte der Pflanzen an den Rankgittern (Tabelle 5.2) war abhängig von den vorkultivierten Heckenelementen der Baumschule. Im Gegensatz zum Feuchtigkeitsgehalt und dem Abstand zur Außenwand konnte hier nicht der ungünstigste Fall gewählt werden. Es ist jedoch bereits bekannt, dass Pflege und Wartung für eine brandschutztechnisch ausreichend sichere Fassadenbegrünung unerlässlich sind [1]. Eine ungepflegte grüne Fassade mit Kletterpflanzen, die

viel Totholz und lichtflüchtige Pflanzen enthält, erfüllt nicht mehr die hier untersuchten Brandszenarien einer grünen Fassade, sondern ähnelt eher Heckenbränden, welche zu deutlich höheren Brandexpositionen führen können [179]. Darüber hinaus ist dies nicht nur aus brandschutztechnischer Sicht problematisch, sondern auch aus bautechnischer Perspektive, da gängige Spaliere und Rankhilfen nicht für solche Belastungen ausgelegt sind.

Die Gewichte (Dichten) der im Versuch verwendeten Pflanzen gemäß Tabelle 5.2 entsprachen nicht vollständig den in der einschlägigen Literatur angegebenen Werten [34], [37], [38], [39], [180]. Dies liegt zum einen daran, dass die Gewichtsschätzungen in der Literatur im tropfnassen Zustand vorgenommen wurden und zum anderen daran, dass die Spaliere bzw. Kletterhilfen eingerechnet sind. Zudem nimmt das Gewicht der Pflanzen sowie der Durchmesser der verholzten Triebe mit steigendem Alter zu. Dennoch hat [1] gezeigt, dass mehr verholzte Triebe bei älteren Pflanzen keinen signifikanten Einfluss auf das Brandverhalten unter starker Brandbeanspruchung haben, wie beispielsweise bei einem Fassadenbrand. Dies resultiert daraus, dass im Rahmen von Strohfeuern außerhalb der Primärflamme vor allem Blätter und junge Triebe brennen, während dickere Triebe lediglich verkohlen und nicht brennen (vgl. Abschnitt 5.5.3).

Die in den Versuchen verwendeten Pflanzendichten waren typisch, wie aus der Fotodokumentation in Abschnitt 5.2.2 hervorgeht. Sie sind daher repräsentativ für die Beurteilung von gepflegten begrünter Fassaden, die einem Brand ausgesetzt sind. Für die Bewertung ungepflegter Grünfassaden, die strukturell eher einer Hecke entsprechen, sind diese Ergebnisse jedoch ungeeignet.

5.6.2 Brandweiterleitung

Der Feuchtigkeitsgehalt der Pflanzen hat einen signifikanten Einfluss auf die Brandausbreitung. Trockene, abgestorbene Elemente der grünen Fassade brennen zu Beginn der Brandeinwirkung vollständig und abrupt ab (vgl. Abschnitt 5.6.4).

In den durchgeführten Brandversuchen mit vitalen Pflanzen, unabhängig von der Art (*Hedera helix* oder *Euonymus fortunei*), wurde eine vertikale Brandausbreitung in Form von Strohfeuern beobachtet. Die Ergebnisse von [1] fanden somit Bestätigung in den großmaßstäblichen Brandversuchen. Strohfeuer entstehen, wenn Pflanzenteile durch die Hitzeeinwirkung austrocknen und sich dann schlagartig entzünden.

Das primäre Ziel dieser Untersuchung war die präzisere Quantifizierung dieser vertikalen Brandausbreitung. Bei den Tests mit vitalen Pflanzen, die sich unmittelbar vor einer Außenwand befanden, wurde ein Abbrand der grünen Fassade im Verhältnis zum etwa 2,5-fachen der Primärflamme (Holzkrippen) festgestellt (vgl. Abschnitt 5.5.3). Bei einer offenen Anordnung vor einem Balkon lag dieser Faktor bei etwa 1,5. Der Grund für diese Differenz liegt in der Konzentration der Hitze, die bei einer Brandeinwirkung direkt vor einer Außenwand nach oben strahlt, wodurch eine größere Fläche der Begrünung austrocknet und abbrennt. Im Gegensatz dazu kann sich die Wärme bei den *Balkonversuchen* frei in alle Richtungen ausbreiten. Dieser Effekt wird besonders im *Balkonversuch mit Brandbelastung in der Ecke* (V6) deutlich sichtbar, wo die verbrannte Fläche der Pflanzen an der Wand des Prüfstands größer ist als beim *Balkonversuch mit zentraler Brandbelastung* (V5) (vgl. Abschnitt 5.5.3).

Allgemein wurde ein Selbstverlöschten der Fassadenbegrünung beobachtet. Der Abbrand der trockenen Teile der grünen Fassade durch das Feuer ereignete sich innerhalb der ersten 10 Minuten (vgl. Abschnitt 5.5.4). In der praktischen Anwendung würde dies in der Regel vor dem Eintreffen der Feuerwehr geschehen. Zudem waren an den grünen Fassaden keine Löscharbeiten erforderlich; während des anschließenden Beobachtungszeitraums wurden keine glühenden oder schwelenden Stellen festgestellt.

5.6.3 Einfluss der Pflanzenarten

Wie aus [1] hervorgeht, hat die Pflanzenart selbst bei optimal gepflegten und vitalen Exemplaren im Rahmen großflächiger Fassadenbegrünung keinen signifikanten Einfluss auf das Brandverhalten. Dieses Ergebnis wurde durch die großmaßstäblichen Brandversuche validiert. In diesen Experimenten kamen zwei spezifische Pflanzenarten zum Einsatz: *Hedera helix* und *Euonymus fortunei* (siehe Abschnitt 5.2.2). Wie in Abschnitt 5.5.3 dargestellt, wurde kein wesentlicher Unterschied in der Brandausbreitung entlang der begrüneten Fassaden zwischen den beiden untersuchten Pflanzenarten festgestellt.

5.6.4 Einfluss der toten, getrockneten Pflanzen

Wie aus [1] bekannt ist, führen trockene, abgestorbene Pflanzen zu einer raschen Ausbreitung von Bränden über die gesamte trockene Fläche. Die Dauer dieser Ausbreitung ist abhängig von der Größe der betroffenen Fläche und kann zwischen wenigen Sekunden und mehreren Minuten variieren. Es ist zudem bekannt, dass signifikante Veränderungen im Brandverhalten der Pflanzen erst bei Feuchtegehalten von weniger als 100 % auftreten [1], [186], [187].

In den beiden Testszenarien (*Wand- und Balkonversuche*), die in Abschnitt 5.2.2 behandelt wurden, wurden zwei unterschiedliche Verfahren zur Trocknung der Pflanzen eingesetzt. Hierbei kam ein Bautrocknungsgerät mit einer Heizleistung von 18 kW zum Einsatz. Die Feuchtegehalte von 30 % und 48 % (Mittelwert) im *Wandversuch* wurden durch eine Trocknung mittels Einhausung direkt an der Fassade bei 120 °C (Temperatur am Gebläseausgang) über einen Zeitraum von 48 Stunden erreicht. Aufgrund des Wärmeverlustes an den Rändern der Einhausung und aufgrund der Höhe des Prüfstandes wurde das Verfahren für die *Balkonversuchsreihe* angepasst; die Pflanzen wurden vor dem Versuch in einer Art Heizzelt getrocknet. Die erreichten Feuchtegehalte von 4 % und 7 % (Mittelwerte) stellen den absoluten Worst Case dar. In der Praxis dürfte es äußerst schwierig sein, derart niedrige Werte zu erzielen [1], [181], [182]. Dies wird dadurch verdeutlicht, dass die Heckenelemente für den Versuch V7 12 Stunden vor Versuchsbeginn aus dem Heizzelt entnommen wurden und über Nacht in der geschlossenen Prüfhalle so viel Feuchtigkeit aus der Luft aufnahmen, dass der Versuch um 24 Stunden verschoben werden musste, um die Pflanzen erneut zu trocknen. Daher repräsentiert das im Test V7 untersuchte Szenario den absoluten Worst Case.

Die Auswirkungen der Verbrennung trockener, abgestorbener Pflanzen auf die umliegenden Komponenten werden in den nachfolgenden Abschnitten detaillierter erörtert.

Bei den Versuchen V2 und V7 mit trockenen, abgestorbenen Pflanzen stellte der Funkenflug, verursacht durch aufsteigende brennende Blatteile, eine kritische Beobachtung dar. Die trockenen Blätter lösten sich während des Abbrennens von den Trieben und stiegen aufgrund ihrer Form zusammen mit den heißen Gasen auf. Nach ihrem Abbrennen fielen glühende oder schwelende Teile auf den Boden oder auf die Balkone. Im Versuch V7 war Papier auf den Balkonen ausgelegt; die Hitze der glühenden Teile führte zu kleinen Brandlöchern im Papier sowie zu leichten Verformungen an den Kunststoffstühlen auf den Balkonen (siehe Abbildung 5.57). In keinem Fall jedoch entzündete sich das Papier selbständig.

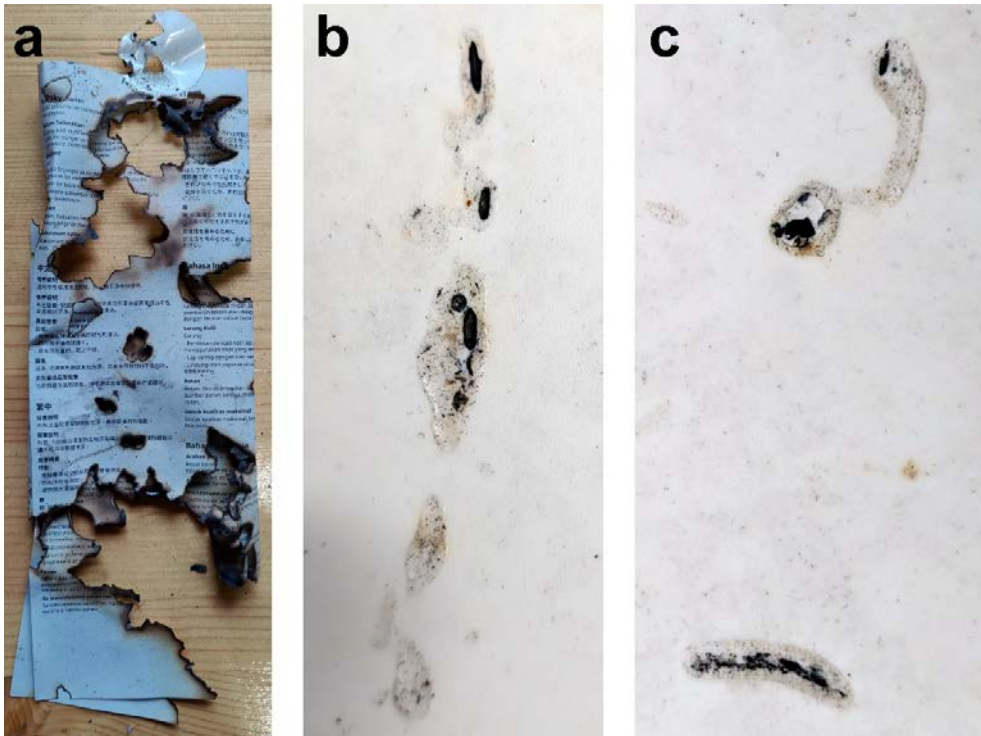


Abbildung 5.57 Fotodokumentation des Versuchs V7 mit a) Papier auf dem Balkon mit Brandlöchern; b) und c) Verformungen an der Sitzfläche der Kunststoffstühle auf den Balkonen

5.6.5 Auswirkung von Temperatur und Wärmestrom auf angrenzende Gebäudekomponenten

5.6.5.1 Öffnungen und Verglasungen

Der Abstand zwischen den Rankgittern, die mit Pflanzen besetzt sind, und den Wärmestromdichtesensoren betrug 100 mm. In Anlehnung an Abschnitt 5.6.1 kann dieser Abstand als der ungünstigste Fall im Kontext der gängigen Baupraxis betrachtet werden. Die Wärmestromdichtesensoren des *Wandversuchs* (siehe Abbildung 5.11) wurden an strategischen Messpunkten positioniert, die Wandöffnungen simulieren sollten. Die flächendeckende Anordnung von Pflanzen vor diesen "Öffnungen" stellt ebenfalls den ungünstigsten Fall dar, ist jedoch als Verschattungselement für Teile der Öffnungen (Fenster) nicht unüblich.

Gemäß Abschnitt 5.5.2 und Tabelle 5.4 wurden im Versuch V1 mit vitalen Pflanzen maximale geglättete Wärmestromdichten von 29 kW/m² in einer Höhe von 4,5 m und 23,5 kW/m² in 6,0 m Höhe registriert. Die Dauer dieser Spitzenbelastungen durch die brennenden Pflanzen (Strohfeuer) variierte zwischen 10 Sekunden und etwas über einer Minute (vgl. Abbildung 5.41).

Ohne Glättung wurden für kurze Zeiträume Maximalwerte von 36 kW/m² in 4,5 m Höhe und 24,5 kW/m² in 6,0 m Höhe erreicht. Die Spitzenwerte für V2 lagen bei 26 kW/m² (geglättet) und 41 kW/m² (Maximalwert für einige Sekunden). Die Gesamtdauer der Strohfeuer bei der trockenen (toten) grünen Fassade betrug etwas weniger als 30 Sekunden (vgl. Abbildung 5.42).

Tabelle 5.4 Maximalwerte der Wärmestromdichte für die Wandversuchsreihe

Messstelle	V0 (max.)	V0 (max.)	V1 (max)	V1 (max)	V2 (max)	V2 (max)
	geglättet [kW/m ²]	[kW/m ²]	geglättet [kW/m ²]	[kW/m ²]	geglättet [kW/m ²]	[kW/m ²]
4,5m	20 (23 ^a)	36	29	36	26 (27 ^a)	41
6m	9 (11 ^b)	15	23,5	24,5 (30 ^c)	24 (29 ^c)	35 (45 ^c)

^a Messwert H4,5ml außerhalb des Nennmessbereichs des Wärmestromdichtesensors (vgl. Abschnitt 5.4).

^b Messwert H6ml außerhalb des Nennmessbereichs des Wärmestromdichtesensors, (vgl. Abschnitt 5.4).

^c Messwert H6mr außerhalb des Nennmessbereichs des Wärmestromdichtesensors, (vgl. Abschnitt 5.4).

Wenn die Wärmestromdichte der Holzrippen (Versuch V0) aus den Ergebnissen für V1 und V2 herausgerechnet wird, ergibt sich eine maximale Belastung allein durch die brennende Fassadenbegrünung von etwa 15 - 17 kW/m² für V1 und 23 - 24 kW/m² für V2.

Die Frage ist, wie diese Wärmestromdichten im Bereich der Fensteröffnungen zu bewerten sind. Um diese zu beantworten, werden die Werte mit experimentell ermittelten kritischen Wärmestromdichten verglichen, die zum Bruch einer Glasscheibe führen können. Tabelle 5.8 im Anhang in Abschnitt 5.8 bietet einen Überblick über Versuche mit verschiedenen Glasscheiben unter Brandeinwirkung, einschließlich der Temperaturen, Wärmestromdichten und Einwirkungszeiten, die zum Glasbruch führten. Nach [198] und [199] kann ein unterer Grenzwert von 3 kW/m² identifiziert werden, unterhalb dessen keine Rissbildung und somit kein Versagen der Verglasung aufgrund von Integritätsverlusten auftritt. Die experimentell ermittelte mittlere Wärmestromdichte beim Versagen ("Herausfallen") betrug 35 kW/m² oder 447 °C.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Werte in Tabelle 5.8 im Anhang in Abschnitt 5.8 erhebliche Abweichungen aufweisen. Diese Unterschiede sind teilweise auf verschiedene Prüfverfahren, Glastypeen und Materialstreuungen bei gleichartigen Scheiben zurückzuführen. Die in den Versuchen V1 und V2 gemessenen Wärmestromdichten liegen gemäß Tabelle 5.4 über den kritischen Wärmestromdichten für Einscheibenverglasungen; allerdings sind die Expositionsdauern signifikant kürzer.

Aufgrund bauphysikalischer Überlegungen wird heutzutage keine Einfachverglasung mehr verwendet; Doppel- und Dreifachverglasungen sind zum Standard geworden. Mehrere Studien zu Mehrscheibenverglasungen zeigen, dass die dem Feuer am nächsten liegenden Scheiben sich ähnlich wie eine Einfachverglasung verhalten. Die nachfolgenden Scheiben brechen jedoch später und weisen möglicherweise kleinere oder gar keine Versagensbereiche auf [184], [185]. Es ist anzumerken, dass die zentralen Parameter moderner Fensterkonstruktionen bislang wenig erforscht sind [185]. Berücksichtigt man die in Tabelle 5.8 im Anhang in Abschnitt 5.8 aufgeführten kritischen Wärmestromdichten für Doppelverglasungen, lässt sich schlussfolgern, dass die in den Versuchen gemessenen Wärmestromdichten in Kombination

mit der kurzen Expositionszeit von etwas mehr als einer Minute nicht zum Versagen der Doppelverglasung führen.

Ein großmaßstäblicher Brandversuch an einer doppelschaligen Glasfassade zeigte, dass Doppelverglasungen mit 6 mm dickem gehärtetem Glas bei Temperaturen von etwa 600 °C bis 800 °C brechen können. Die Bruchzeit des Glases hängt von der Wärmefreisetzung des Feuers sowie dem Abstand zum Feuer ab [183]. Unter Berücksichtigung der gemessenen Temperaturen in den Versuchen V1 und V2 (vgl. Abschnitt 5.5.1) im Bereich der simulierten Fensteröffnungen lässt sich feststellen, dass die oben genannten kritischen Werte nicht erreicht wurden.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass ein Versagen der Doppelverglasung aufgrund von Brandeinwirkung durch eine gut gepflegte begrünte Fassade – unabhängig davon, ob diese vital oder trocken ist – als unwahrscheinlich einzustufen ist.

Es besteht jedoch auch die Möglichkeit, dass das Fenster geöffnet ist. In diesem Fall kann eine Glasscheibe nicht als Trennung zwischen der brennenden grünen Fassade und dem Inneren des Gebäudes betrachtet werden. Einerseits stellt der Funkenflug von trockenen (abgestorbenen) Pflanzen (Abschnitt 5.6.4) ein potenzielles kritisches Szenario dar. Andererseits tritt Funkenflug jedoch auch unabhängig davon auf, ob sich eine grüne Fassade direkt vor der Öffnung befindet. Darüber hinaus wurde im Abschnitt 5.6.4 gezeigt, dass diese kleinen glühenden Pflanzenteile zumindest im Rahmen der durchgeführten Versuche nicht zu einem eigenständigen Brand von Papier oder Kunststoff geführt haben.

Ein weiteres Szenario betrifft die Wärmestromdichten und Temperaturen einer brennenden grünen Fassade vor einem offenen Fenster. Hierbei muss der Abstand zwischen der grünen Fassade und dem Fenster berücksichtigt werden; in den Versuchen wurde ein Abstand von 100 mm gewählt. Wie in Abschnitt 5.6.1 dargelegt, sind in der Praxis meist größere Abstände zwischen Außenwand und grüner Fassade üblich. In Anbetracht dessen, dass sich ein Fenster in der Regel hinter der Außenkante einer Außenwand befindet, könnte ein Abstand von bis zu 500 mm zwischen Fensterscheibe und begrünter Fassade durchaus realistisch sein.

Betrachtet man die gemessenen Temperaturen auf den Balkonen im Rahmen der Versuche V5 und V7 (mit Ausnahme des Brandes auf Balkon 2 bei V7), wie sie in Abbildung 5.29, Abbildung 5.30 und Abbildung 5.33 dargestellt sind, so fällt auf, dass in einem Abstand von 500 mm zur begrünten Fassade Temperaturen von unter 60 °C bei vitalen Pflanzen (V5) und 95 °C bei trockenen Pflanzen (V7) registriert wurden. Diese Temperaturen liegen deutlich unter den Entzündungstemperaturen für Baumwoll- oder Polyesterstoffe [204] - [210]. Unter diesen Bedingungen scheint eine Entzündung von Stoffvorhängen direkt am Fenster ausgeschlossen.

Es wird daher empfohlen, einen Abstand von mindestens 500 mm zwischen den Glasscheiben einer Fensteröffnung und den Pflanzen auf den Rankhilfen der begrünten Fassade einzuhalten (siehe Abbildung 5.58). Angesichts der bei den Versuchen in einem Abstand von 100 mm gemessenen Wärmestromdichten erscheint selbst eine Einfachverglasung in einem Abstand von 500 mm nicht gefährdet zu sein. Solange das Fenster geöffnet ist, lassen die bei den *Balkon-*

versuchen ermittelten Temperaturen es unwahrscheinlich erscheinen, dass sich beispielsweise Gardinen direkt an der Glasscheibe entzünden würden. Allerdings muss angemerkt werden, dass bei einem offenen Fenster und einer nach außen hängenden Gardine ein Brand im Inneren des Gebäudes nicht gänzlich ausgeschlossen werden kann. In Anbetracht der Ergebnisse und des damit verbundenen Risikos erscheint dies jedoch vergleichbar mit typischen Bränden an Außenfassaden ohne Begrünung und ist somit als ausreichend sicher einzustufen.

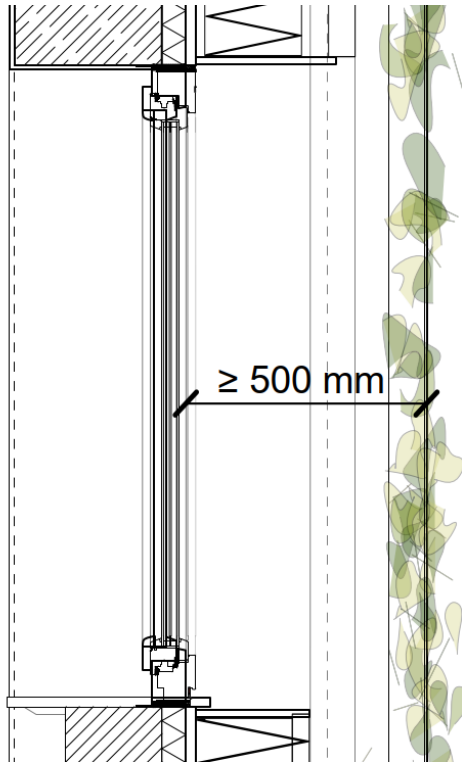


Abbildung 5.58 Abstand zwischen der Fensterscheibe und den Kletterpflanzen an Rankgittern (grüne Fassade) [nach einem Entwurf von kimmelarchitekten]

5.6.5.2 Brennbare Gebäudekomponenten (Dachstuhl, Fassade)

Ein zentraler Aspekt der Untersuchung war die Analyse der Brandweiterleitung von begrüneten Fassaden auf benachbarte brennbare Bauteile. Ein prägnantes Beispiel hierfür stellt der Brand des historischen Schlosses Ebenzweier in Österreich dar. Brennende Zigaretten entzündeten den ungepflegten, heckenartig wachsenden Efeu (*Hedera helix*) mit viel Totholzanteil an einer Säule am Haupteingang. In der Folge breitete sich das Feuer durch den Efeu auf den Dachstuhl aus, was zu erheblichen Schäden am historischen Gebäude führte, wobei laut Feuerwehr 90 % des Dachstuhls zerstört wurden [211], [212].

Im Rahmen dieser Untersuchung war es daher essenziell, den Einfluss der brennenden grünen Fassade auf angrenzende brennbare Materialien zu analysieren. Zu diesem Zweck wurden bei den *Wandversuchen* 15 mm dicke OSB-Platten oberhalb des Prüfstandes platziert, um eine auskragende brennbare Dachuntersicht zu simulieren. Die Wahl der OSB-Platten erfolgte aufgrund ihrer Dicke, da diese neben weiteren Faktoren wie Dichte oder Holzart die Entzündungszeit maßgeblich beeinflusst [210], [213]. Aus [1] ist bekannt, dass die Branddauer

von brennenden Grünfassaden (Strohfeuer) sehr kurz ist. Somit stellen die 15 mm dünnen OSB-Platten den kritischsten zu untersuchenden Fall dar (vgl. Abschnitt 5.6.1).

In Übereinstimmung mit Abbildung 5.11 und Abbildung 5.12 wurden zwei Plattenthermometer sowie ein Mantelthermoelement an der Unterseite der OSB-Platten angebracht. Die Plattenthermometer ermöglichten die Berechnung der Wärmestromdichte, die auf das Holz einwirkte. Angesichts der kurzen Branddauer und des Messintervalls von 10 Sekunden, sowie der teilweise verdeckten Plattenthermometer, erscheint es sinnvoll, das Mantelthermoelement W12mM in Betracht zu ziehen. Es sei jedoch erwähnt, dass die Messfrequenz von 10 Sekunden dazu führen könnte, dass einzelne kurze Temperaturspitzen in den Messdaten nicht erfasst wurden.

Der *Wandversuch V2* mit trockenen (toten) Pflanzen ist maßgebend. Abbildung 5.59 zeigt den Temperaturverlauf am Messpunkt W12mM.

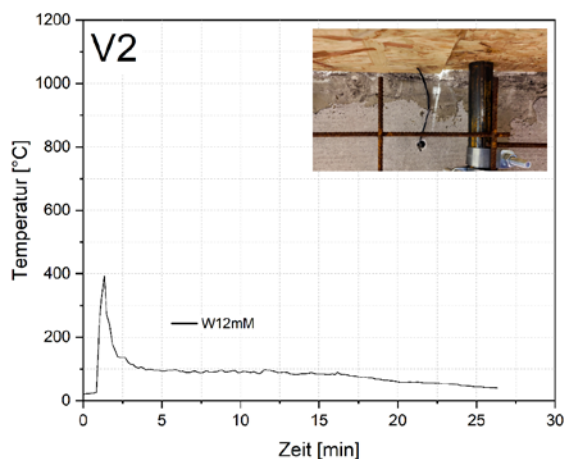


Abbildung 5.59 Temperaturverlauf am Messpunkt W12mM

Der Temperaturverlauf am Messpunkt W12mM zeigt, dass die gemessene Temperatur den kritischen Wert von 300 °C überschreitet, bei dem die Holzverkohlungs einsetzt [214]. Es ist bekannt, dass die Entzündung eines Materials unter anderem von der Dauer der Einwirkung abhängt [210], [215]. Die genaue Bestimmung der Kombination von Temperatur und Einwirkungsdauer, bei der eine Entzündung eintritt, gestaltet sich als relativ komplex, da die Literatur hierzu teils erhebliche Abweichungen aufweist und nicht genügend Daten vorliegen, um die Entzündungszeit in Abhängigkeit von der Temperatur für Holz abschließend zu bewerten [210], [215].

Daher ist es am sinnvollsten, die Prüfergebnisse aus V2 direkt am Prüfobjekt zu bewerten. Nach der Prüfung sind an den beiden 15 mm dicken OSB-Platten keine Verfärbungen, Verkohlungen oder Entzündungen festzustellen. Lediglich eine leichte Rußablagerung ist zu erkennen, wenn man die Stellen am unteren Bildrand von Abbildung 5.60, die während des Versuchs von den Plattenthermometern verdeckt waren, mit der übrigen Holzoberfläche vergleicht. Die kurze Verbrennungsdauer von trockenen Pflanzen ist der Hauptgrund dafür, dass keine Entzündung des Holzes auftrat [1].



Abbildung 5.60 Foto der dem Feuer ausgesetzten Seite der 15 mm dicken OSB-Platten nach dem Test V2

Die Pflege und Instandhaltung der grünen Fassade spielt auch hier eine entscheidende Rolle. Das Beispiel des oben erwähnten Dachstuhlbrandes am Schloss Ebenzweier verdeutlicht, dass vernachlässigte Grünfassaden eine Holzkonstruktion in Brand setzen können. Die Ergebnisse aus [3] mit höheren Pflanzenmassen zeigen ebenfalls kritische Ergebnisse; in diesen Fällen kam es jedoch lediglich zu einer Verkohlung und nicht zu einem eigenständigen Mitbrand. Da eine wuchernde Fassadenbegrünung auch aus bautechnischen Gründen (Beschädigung von Dichtungen, Folien etc.) verhindert werden muss, ist es sinnvoll, diese Anforderungen miteinander zu kombinieren. Im Gegensatz zur direkten Begrünung an der Außenwand bieten vorgesetzte Rankhilfen zusätzlichen Schutz, da die Pflanzen zunächst den Spalt zwischen Rankhilfe und angrenzendem Bauteil überwinden müssen. Unter Berücksichtigung einer ordnungsgemäßen Pflege und Instandhaltung (Intervall von maximal einem Jahr, siehe Abschnitt 5.6.6) der begrünten Fassade wird empfohlen, einen Abstand von 500 mm zwischen dem oberen Ende des Rankgitters und brennbaren Bauteilen wie auskragenden Holzdachstühlen einzuhalten (siehe Abbildung 5.61). Diese Anforderung kann auch als synergetisch mit den Anforderungen an die Gebäudekonstruktion betrachtet werden.

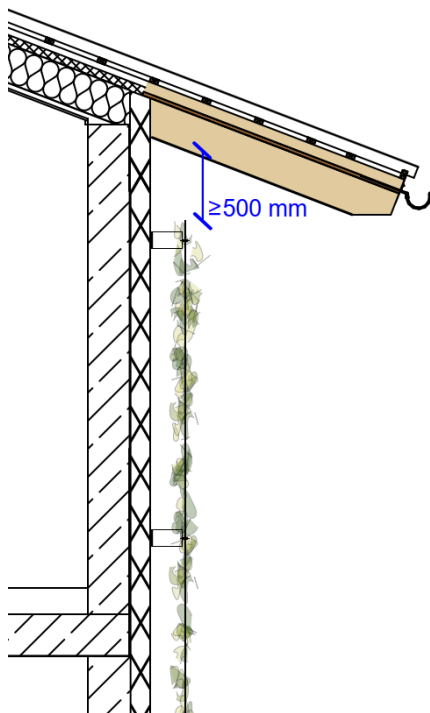


Abbildung 5.61 Darstellung des Abstands (blau) zwischen dem Rankgitter mit Kletterpflanzen und der brennbaren Dachkonstruktion (braun)

Eine weitere Fragestellung beschäftigte sich mit dem Verhalten von Wärmedämmverbundsystemen aus expandiertem Polystyrol (EPS) in Kombination mit begrünten Fassaden bei Löchern im Putz, wie sie beispielsweise durch Spechte verursacht werden können.

In [216] wurde die Entzündung von EPS durch heiße Metallpartikel untersucht. Ein kugelförmiges Stahlteilchen wurde auf Temperaturen zwischen 900 °C und 1 000 °C erhitzt und anschließend auf die Oberfläche eines ungeschützten Schaumstoffblocks aus expandiertem Polystyrol fallen gelassen. Die Entzündungswahrscheinlichkeit wurde in Abhängigkeit von der Anfangstemperatur und dem Radius des Partikels ermittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.62 dargestellt.

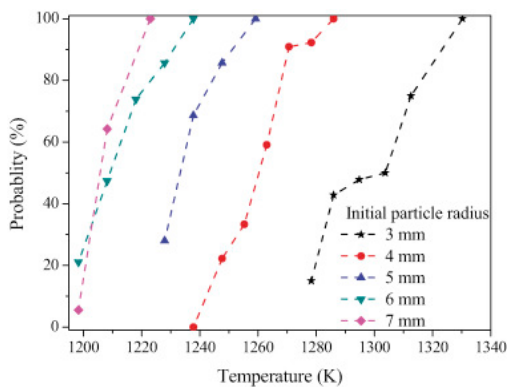


Abbildung 5.62 Entzündungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Anfangstemperatur und dem Radius der Partikel [216]

[217] untersuchte kugelförmige Stahlpartikel mit Durchmessern von 6, 8, 10, 12 und 14 mm auf EPS-Schaum bei Temperaturen zwischen 900 °C und 1 100 °C, um mögliche Entzündungen zu prüfen. Eine erfolgreiche Entzündung wurde definiert als das Auftreten einer sichtbaren Flamme, die länger als eine Sekunde anhält. Die beobachtete Verteilung der Zündwahrscheinlichkeit ist in Abhängigkeit von Partikelgröße und Anfangstemperatur für EPS-Schaumstoffproben mit Dichten von 18 und 27 kg/m³ in Abbildung 5.63 dokumentiert.

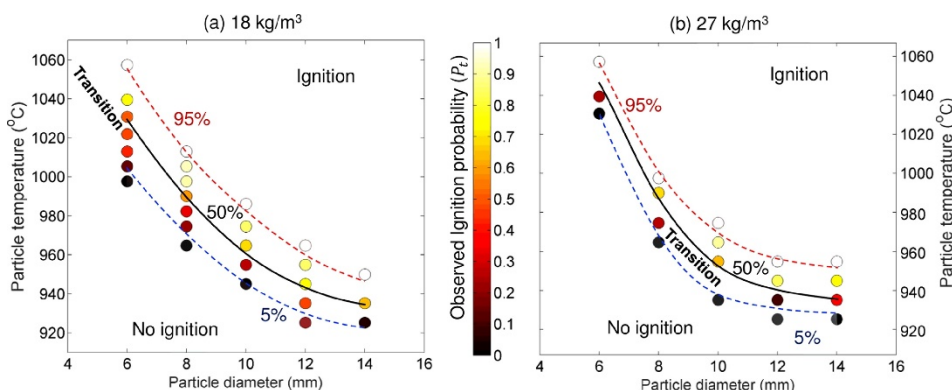


Abbildung 5.63 Zündwahrscheinlichkeit als Funktion der Anfangstemperatur und des Durchmessers der heißen Partikel für die EPS-Schaumdichten von (a) 18 kg/m³ und (b) 27 kg/m³ [217]

In [218] wurden hohle heiße Metallpartikel in nahezu identischen Experimenten untersucht; in [217] kamen dagegen massive Partikel zum Einsatz. Die Ergebnisse zeigen, dass kleine hohle Teilchen eine signifikant höhere Zündtemperatur aufweisen. Bei hohlen Partikeln ist für die

Zündung eine wesentlich höhere Partikeltemperatur erforderlich, um die schnelle Abkühlung zu überwinden.

Aufgrund dieser Erkenntnisse erscheint es äußerst unwahrscheinlich, dass eine brennende grüne Fassade oder Glut von Pflanzenblättern – unter Berücksichtigung der Werte für Temperatur und Wärmestromdichte aus Abschnitt 5.5 – im Bereich kleinerer Fehlstellen im Putz des Wärmedämmverbundsystems eine Entzündung von expandiertem Polystyrol hervorrufen könnte.

5.6.5.3 Balkone

Balkone werden von den Bewohnern auf vielfältige Weise genutzt. Sie dienen als Abstellfläche für Möbel, Pflanzen, Aufbewahrungsboxen, Fahrräder, Wäsche, Reinigungsmittel, Haustierbedarf sowie Dekorationen [219]. In Anbetracht dieser Nutzung sind Brandlasten auf Balkonen häufig anzutreffen [220]. Dieses Phänomen zeigt sich besonders stark in urbanen Gebieten, wo hohe Mieten und begrenzte Wohnflächen vorherrschen [219]. Eine Studie [220] hat beispielsweise ergeben, dass die Brandlast auf Balkonen in London nahezu doppelt so hoch ist wie in ländlichen Regionen. In städtischen Gebieten fungieren Balkone daher oft als zusätzliche Lagerräume [219], [220]. Auch während der COVID-19-Pandemie, als die Bevölkerung gesetzlich zum Verweilen in den eigenen vier Wänden aufgefordert wurde, nahm die Nutzung von Dekorationen und Möbeln zur Steigerung des Wohlbefindens auf Balkonen zu [221], [222].

Im Allgemeinen finden begrünte Fassaden an mehrstöckigen Gebäuden überwiegend in urbanen Räumen Anwendung. Dies wirft die kritische Frage auf, inwieweit brennende Grünfassaden die Brandausbreitung auf Balkonen beeinflussen können. Um diese Thematik zu beleuchten, wurden in den Versuchsreihen V3 bis V7 die gesamten Flächen, die dem Feuer ausgesetzt waren, begrünt (dies stellt den kritischsten Fall dar). Zudem wurde auf die Ausbildung einer Brüstung im Balkonbereich vollständig verzichtet. In der praktischen Anwendung ist jedoch zu erwarten, dass zumindest Teile der Balkone regelmäßig mit Pflanzen versehen sind, die an geschossübergreifenden Rankgittern als Beschattungselemente angebracht werden. Dies gilt es zu überprüfen.

Wie bereits in Abschnitt 5.6.2 ausgeführt, zeigen die Ergebnisse aus Abschnitt 5.5.3, dass bei offenen Balkonen ein Abbrand der grünen Fassade im Verhältnis zum etwa 1,5-fachen der Primärflamme (Holzkrippen) stattfand. Zwar brannten die Pflanzen im Einflussbereich der Primärflammen ab, jedoch erreichte das Feuer bei vitalen Pflanzen (V5, V6) nicht den darüberliegenden Balkon und hatte somit im Vergleich zum Referenzversuch ohne Pflanzen (V3) keinen signifikanten Einfluss auf die Temperaturverteilung und Wärmestromdichten auf den Balkonen.

Anders verhält es sich jedoch bei trockenen (abgestorbenen) Pflanzen. Im Versuch V7 breitete sich das Feuer innerhalb von etwa 10 Sekunden abrupt über die gesamte Höhe des Versuchsaufbaus aus. Die Gesamtdauer der Brandeinwirkung betrug ca. 30 Sekunden. Die maximalen Wärmestromdichten können Tabelle 5.5 entnommen werden.

Tabelle 5.5 Maximalwerte der Wärmestromdichte auf den Balkonen im Versuch V7

Messstelle	V7 (max.) geglättet [kW/m ²]	V7 (max.) [kW/m ²]
Balkon 1	28	36
Balkon 2	21	39

Im Bereich des Balkon 1 sind aufgrund der brennenden grünen Fassade trotz fehlender Brüstung nur geringe Temperaturerhöhungen festzustellen (vgl. Abbildung 5.33). Im Gegensatz dazu ist der Einfluss im Bereich des Balkon 2 zu Beginn des Versuchs (bevor sich die Wäsche entzündete) wesentlich stärker ausgeprägt (vgl. Abbildung 5.34). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Flamme der brennenden Pflanzen in den Balkon eindrang (siehe Video zu V7 in den ergänzenden Informationen zu [2]). Begünstigt wurde dies dadurch, dass oberhalb des Balkon 2 keine weitere Betonplatte vorhanden war, das Hallendach geöffnet war (siehe Tabelle 5.6 im Anhang in Abschnitt 5.8) und sich die Flamme somit aufgrund der Ventilationsbedingungen an die Rückwand des Versuchstandes orientierten und folglich in den Balkon eindringen. Die eindringenden Flammen entzündeten schließlich die Wäsche auf dem Wäscheständer (vgl. Abschnitt 5.2.2). Der Kunststoffstuhl hat sich dagegen nicht entzündet.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass brennende Fassadenbegrünung in Form von Strohfeuern mit kurzer Einwirkungszeit nicht zu kritischen Temperaturen auf dem Balkon führen, solange die Flamme nicht in den Balkon eindringt. Es erscheint daher notwendig, bei der Anwendung von Fassadenbegrünung an mehrgeschossigen Gebäuden Balkone mit geschlossenen Brüstungen aus nichtbrennbaren Baustoffen und typischen Brüstungshöhen von 0,90 m bis 1,20 m auszubilden. Diese geschlossenen Brüstungen verhindern das Eindringen der Flammen und schützen die Einrichtungsgegenstände auf dem Balkon vor einem Brandereignis an der brennenden Grünfassade. Darüber hinaus sollten Brüstungen aus nichtbrennbaren Materialien den typischen Einwirkungen einer brennenden begrüneten Fassade standhalten (vgl. Tabelle 5.5) und ausreichend robust sein (z.B. Verbundglas [197] oder Metallblech). Obwohl diese geschlossenen Brüstungen die Brandschutzsituation verbessern, bieten sie keine vollständige Sicherheit. Das Lagern brennbarer Einrichtungsgegenstände oberhalb der Brüstungshöhe und direkt an der grünen Fassade birgt weiterhin das Risiko einer Entzündung.

5.6.6 Die Rolle der Pflege und Wartung von Pflanzen

Pflege und Wartung stellen essenzielle Faktoren für die Gewährleistung einer aus Brandschutzsicht ausreichend sicheren begrüneten Fassade dar. Die zuvor genannten Kriterien und Anforderungen sind ausschließlich auf eine grüne Fassade anwendbar, die einen minimalen Anteil an Totholz sowie eine moderate Wuchsstärke aufweist. Eine vernachlässigte grüne Fassade mit einem hohen Anteil an Totholz und einer heckenartigen Wuchsform repräsentiert nicht mehr das in dieser Studie untersuchte Brandszenario, sondern könnte vielmehr als potenzielle Quelle für einen Heckenbrand betrachtet werden. Übermäßiges Totholz und übermäßige Wuchsvolumina stellen nicht nur aus brandschutztechnischer, sondern auch aus statischer Sicht ein erhebliches Risiko dar, da herkömmliche Spaliere und Rankhilfen nicht für derartige Belastungen konzipiert sind.

Die Zugänglichkeit sämtlicher Bereiche der begrünter Fassade muss jederzeit sichergestellt sein. Es ist unerlässlich, dass die bepflanzten Flächen für Pflege- und Wartungsarbeiten jederzeit erreichbar sind. Sollte der Einsatz von Leitern nicht ausreichend sein, sind geeignete Einrichtungen erforderlich, wie beispielsweise Anschlagpunkte für Seilklettertechniken oder Aufstellflächen für Hubsteiger oder Gerüste [180].

Das Rastermaß der Kletterhilfen spielt eine entscheidende Rolle für die korrekte Pflege, Wartung und Nutzung. Es muss an die spezifische Kletterstrategie und Stütztechnik der jeweiligen Pflanze angepasst sein [223]. In der Praxis sind Rankgitter mit Maschenweiten von 150 mm × 150 mm bis 450 mm × 450 mm gängig. Für vertikale Kletterhilfen in Form von Stäben oder Seilen sind horizontale Abstände von 200 mm bis 800 mm üblich [34], [38]. Diese Dimensionen sind unter anderem erforderlich, um einen saisonalen Laubfall zu ermöglichen, bei dem das Laub nicht in großem Umfang in den Kletterhilfen hängen bleibt. So kann einer Brandlast in Form von übermäßigem Totholz vorgebeugt werden.

Des Weiteren ist ein ausreichend breiter Hinterlüftungsspalt zwischen der Außenwand und der Kletterhilfe notwendig, um eine erleichterte Wartung zu gewährleisten und um mechanische Beschädigungen (z.B. durch Reibung), Überhitzung sowie Ansammlungen von Blättern zu vermeiden [38], [180].

Es ist allgemein bekannt, dass Pflanzen mit zunehmendem Alter an Masse zunehmen, was sich durch dickere Triebe äußert. [1] zeigte, dass ein höherer Anteil verholzter Triebe bei älteren Pflanzen keinen signifikanten Einfluss auf das Brandverhalten während eines Großbrandes, wie etwa einem Fassadenbrand, hat. Dies ist darauf zurückzuführen, dass bei Strohfeuern außerhalb der Primärflamme vorwiegend Blätter und junge Triebe brennen, während dickere Triebe lediglich verkohlen (vgl. Abschnitt 5.5.3).

Bei bodengebundenen Pflanzen sollte mindestens einmal jährlich eine Pflegemaßnahme durchgeführt werden. Diese Pflege sollte von Fachbetrieben übernommen werden, die über das erforderliche Fachwissen verfügen [180].

Zur Instandhaltung gehören Maßnahmen wie Gießen, Düngen, Jäten, Auflockern des Bodens, Entfernen von Totholz sowie Rückschnitt. Zudem ist es wichtig, die Sicherheit der Kletterhilfen regelmäßig zu überprüfen. Bei immergrünen und wintergrünen Pflanzen sollten verwelkte oder schlaffe Blätter und Triebe aus dem Vorjahr entfernt werden [180]. Der Rückschnitt ist nicht nur aus brandschutztechnischen und gestalterischen Gründen notwendig; er schützt auch empfindliche Bauteile wie Türen, Fenster und Dachanschlüsse sowie die Kletterhilfen vor Beschädigung und Überlastung [180].

Es wäre wünschenswert, wenn die Baubehörden künftig regulierend eingreifen könnten, um eine angemessene Pflege und Wartung sicherzustellen.

5.7 Fazit

Insgesamt wurden acht großmaßstäbliche Brandversuche unter realistischen Bedingungen mit repräsentativen Brandlasten in zwei Testszenarien durchgeführt. Diese Versuche wurden

in drei Versuchsreihen unterteilt: den *Wandversuch*, den *Balkonversuch mit zentraler Brandbelastung* sowie den *Balkonversuch mit Brandbelastung in der Ecke*. Der Fokus der Experimente lag auf der Quantifizierung der vertikalen Brandausbreitung entlang der grünen Fassade. Besonderes Augenmerk wurde auch auf den Wärmestrom der brennenden Fassadenbegrünung und dessen Auswirkungen auf angrenzende Bauteile wie Außenwände, Fenster, Balkone und Dachüberstände sowie das damit verbundene Risiko gelegt. Ein weiterer Schwerpunkt war das Verständnis der Unterschiede im Brandverhalten zwischen vitalen und trockenen (abgestorbenen) Pflanzen, insbesondere in Bezug auf die vertikale Brandausbreitung und das Risiko der Entzündung benachbarter Gebäudeteile.

Der Feuchtigkeitsgehalt erwies sich als entscheidender Faktor für die Brandausbreitung. Neben der rasanten Ausbreitung des Feuers über die trockene begrünte Fläche kam es auch zu Funkenflug durch in die Luft aufsteigende glimmende Blatteile.

Bei vitalen Pflanzen, die sich direkt vor einer Außenwand befanden, wurde ein Abbrand der grünen Fassade im Verhältnis zum etwa 2,5-fachen der Primärflammen (Holzkrippen) beobachtet. In einer offenen Anordnung vor einem Balkon (mit größerem Abstand zur Außenwand) lag dieser Faktor bei ca. 1,5.

Generell wurde ein Selbstverlöschten der grünen Fassaden festgestellt. Der Abbrand der durch Feuer getrockneten Teile der grünen Fassade erfolgte in sehr kurzen Zeiträumen innerhalb der ersten zehn Minuten nach Beginn der Brandeinwirkung.

Die Ergebnisse dieser Versuche ließen darauf schließen, dass ein Versagen von Zweifachverglasungen durch die Einwirkung einer brennenden, gut gepflegten grünen Fassade – unabhängig davon, ob diese vital oder trocken ist – als unwahrscheinlich einzustufen ist.

Die Pflege und Wartung stellen somit den Schlüssel zu einer brandsicheren grünen Fassade dar. Eine unzureichend gepflegte grüne Fassade mit Kletterpflanzen und viel Totholz entspricht nicht dem im Rahmen dieser Untersuchungen betrachteten Brandszenario.

Die Voraussetzungen für eine brandschutztechnisch ausreichend sichere Begrünung von Fassaden mit Kletterpflanzen an Rankhilfen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Der entscheidende Faktor für eine brandschutztechnisch ausreichend sichere begrünte Fassade ist die regelmäßige Pflege und Wartung. Standardgrünfassaden erfordern in der Regel einen Wartungszyklus pro Jahr.
- Zwischen den Glasscheiben einer Fensteröffnung und den Pflanzen an Rankhilfen sollte ein Abstand von mindestens 500 mm eingehalten werden.
- Zu Bauteilen aus brennbaren Baustoffen, wie horizontal auskragende Holzdachstühle, ist ein Abstand von 500 mm einzuhalten.
- Werden Kletterpflanzen über mehrere Geschosse hinweg an nichtbrennbaren Rankhilfen vor Balkonen angeordnet, sollten geschlossene Brüstungen aus nichtbrennbaren Baustoffen vorgesehen werden.

5.8 Anhang

Tabelle 5.6 und Abbildung 5.64 zeigen die Abmessungen der Prüfhalle und deren Lüftungsbedingungen.

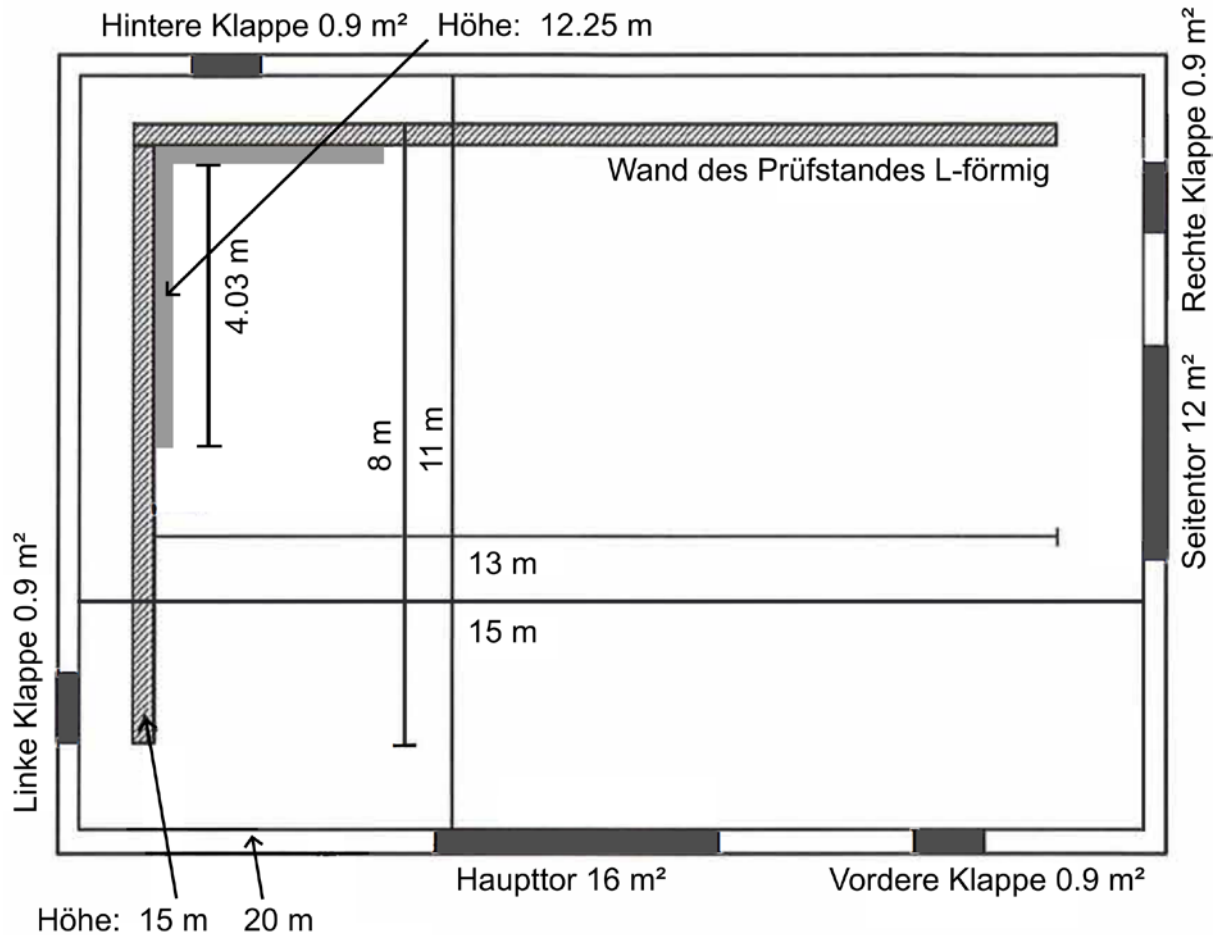


Abbildung 5.64 Grundriss der Prüfhalle mit Prüfstand der Kiwa MPA Dresden GmbH

Tabelle 5.6 Übersicht über die Lüftungsöffnungen in der Prüfhalle und deren Öffnungsstatus

Beschreibung	Größe	Öffnungsstatus
Haupttor	16 m ²	geschlossen
Seitentor	12 m ²	geschlossen
Vordere Klappe	0,9 m ²	geschlossen
Linke Klappe	0,9 m ²	geschlossen
Hintere Klappe	0,9 m ²	geschlossen
Rechte Klappe	0,9 m ²	geschlossen
Dach	165 m ²	offen

Abbildung 5.65 zeigt den Abstand zwischen dem Rankgitter inklusive der angebrachten Pflanzenteile und der Wand des Prüfstands.



Abbildung 5.65 Abstand zwischen dem Rankgitter und der Wand des Prüfstandes

Tabelle 5.7 zeigt die Versuchsdaten und die Mittelwerte der Wetterdaten während der Versuche

Tabelle 5.7 Testdaten und Wetterdaten

Versuch	Datum der Prüfung	Beginn der Prüfung	Temperatur [°C]	Relative Luftfeuchtigkeit [%]	Luftdruck [hPa]	Windgeschwindigkeit [km/h]
V0	10.10.2023	08:32 Uhr	12,2	72	965	12,6
V1	10.10.2023	14:07 Uhr	12,2	72	965	15,5
V2	13.10.2023	10:04 Uhr	14,5	68	985	19,1
V3	27.10.2023	11:11 Uhr	10,5	82	972	17,3
V4	25.10.2023	14:23 Uhr	9,7	78	970	9,0
V5	26.10.2023	09:03 Uhr	9,5	77	970	20,9
V6	26.10.2023	09:40 Uhr	9,5	77	970	21,6
V7	27.10.2023	09:05 Uhr	10,5	82	972	11,2

^a Gemessen außerhalb der Halle auf dem Dach

Tabelle 5.8 bietet eine detaillierte Übersicht über die experimentellen Untersuchungen, die mit unterschiedlichen Glasscheiben unter dem Einfluss von Feuer durchgeführt wurden. In dieser Tabelle sind die spezifischen Temperaturen, die Wärmestromdichten sowie die Dauer der Einwirkung aufgeführt, die jeweils zum Bruch des Glases führten.

Tabelle 5.8 Liste der Versuche und Ergebnisse zum Bruch von Glas unter Brandeinwirkung

Quelle	Art der Verglasung	Temperatur (Riss) [°C]	Wärme- stromdichte (Riss) [kW/m²]	Expositi- onszeit (Riss) [s]	Zeit bis zum Her- ausfallen [s]	Kommentar
Chen [188] Choen [189]	Floatglas 6 mm	171 – 188	-	507 – 728	-	
	Glas 4,8 mm	-	9,3 – 17,7	300°	-	
Harada et al. [190]	Einscheibenglas	-	9,3 – 17,7	300°		¾ Tests
	Zweischeibenglas	-	nein (9,3)	nein (300°)		¾ Tests
	beanspruchte Seite	-	13,6	300°		
	unbeanspruchte Seite	-	17,7	300°		
	unbeanspruchte Seite	-	keine Risse	keine Risse		9,3; 13,6; 17,7 KW/m² für 300 s
	Gehärtetes Glas 4,8 mm	-	"	"		9,3; 13,6; 17,7 KW/m² für 300 s
	Einscheibenglas	-	"	"		9,3; 13,6; 17,7 KW/m² für 300 s
	Zweischeibenglas	-	≈ 85	5,5	≈ 214	mit seitlicher Arretierung
	beanspruchte Seite	-	≈ 88	6,7	≈ 150	
	unbeanspruchte Seite	-	≈ 90	9,0	≈ 90	ohne seitlicher Arretierung
Jørgensen et al. [191]	Floatglas 3 mm	≈ 95	5,5	≈ 250	≈ 234	
	"	≈ 90	7,8	≈ 140	≈ 170	
	Floatglas 3 mm	≈ 90	9,0	≈ 75	≈ 100	
	"	≈ 90	2,8	≈ 300	≈ 250	
	Drahtglas 6,8 mm	≈ 45	5,5	≈ 100	≈ 160	
	"	≈ 45	9,0	≈ 50	≈ 100	
	"	≈ 45	2,8	≈ 290	≈ 160	
	Drahtglas 6,8 mm	≈ 45	5,5	≈ 120	≈ 100	
	"	≈ 45	9,5	≈ 60	-	mit seitlicher Arretierung
	Floatglas 4 mm	-	≈ 5	294 – nein	-	ohne seitlicher Arretierung
Kim [192], [193] Klassen et al. [194]	Floatglas 4 mm	-	≈ 10	90 – 161	-	400 mm x 400 mm
	Gehärtetes Glas 3 mm	260 – 380	≈ 15	46 – 73	-	
	Zweischeibenglas 6,35 mm	-	-	300 – 390	-	
	"	-	≈ 10	712 – nein	-	
	"	-	≈ 22	296 – 456	-	
	"	-	≈ 32	140 – 218	-	
Klassen et al. [194]	Dreischeibenglas 6,35 mm	-	≈ 42	100 – 178	-	
	"	-	≈ 10	214 – nein	-	
	"	-	≈ 22	92 – 192	-	
	"	-	≈ 32	86 – 156	-	
"	-	≈ 42	60 – 109	-		

Quelle	Art der Verglasung	Temperatur (Riss) [°C]	Wärme- stromdichte (Riss) [kW/m ²]	Expositi- onszeit (Riss) [s]	Zeit bis zum Her- ausfallen [s]	Kommentar
Klassen et al. [194]	Zweischeibenglas 6,35 mm	-	≈ 20	535 – nein	-	609 mm x 1 219 mm; verschie- dene Fenstertypen
	"	-	≈ 28	220 – 591	-	
	"	-	≈ 45	142 – 243	-	
	"	-	≈ 54	129 – 175	-	
	Dreischeibenglas 6,35 mm	-	≈ 20	110 – nein	-	
	"	-	≈ 28	67 – 380	-	
Manzello [195] Mowrer [196]	"	-	≈ 45	73 – 150	-	
	"	-	≈ 54	63 – 114	-	
	Einscheibenglas gehärtet 6,35 mm	400 ^b	50 ^b	185	185	-
	Gewöhnliches Fensterglas	-	4 – 5	40 – 115	- ^a	Holzrahmen schneiden deutlich besser ab als Vinylrahmen 400 mm x 400 mm
	Gehärtetes Glas	-	4 – 7	> 900	- ^a	
	Keramikglas	-	7	> 600	- ^a	
Einscheibenglas	123 – 157	7 – 15	36 – 95	- ^a		
Zweischeibenglas	93 – 174	11 – 18	10 – 90	- ^a		
Zweischeiben-Floatglas	-	20	91 ± 33,94	-		
Peng et al. [197]	1. 3 mm (beanspruchte Seite)	-	20	125 ± 6,36	-	
	2. 3 mm (unbeanspruchte Seite)	-	20	83 ± 21,80	-	
	1. 4 mm (beanspruchte Seite)	-	20	171 ± 52,94	-	
	2. 4 mm (unbeanspruchte Seite)	-	20	77 ± 5,57	-	
	1. 6 mm (beanspruchte Seite)	-	20	302 ± 29,00	-	
	2. 6 mm (unbeanspruchte Seite)	-	20	242 – 347	575 (1%) – nein	
	Floatglas 6 mm	153 – 208	2 – 12	150 – 312	525 (3%) – nein	
	"	195 – 218	2 – 15	124 – 173	124 – 890 (4%)	
	"	252 – 298	5 – 34	102 – 138	136 – 133 (5%)	
	"	308 – 345	5 – 35	64 – 72	252 – 980 (90%)	
	"	315 – 355	10 – 82	437 – 682	nein	
	"	58 – 66	2 – 12	462 – 545	nein	
Shields [198]	"	232 – 252	2 – 15	234 – 300	568 (2%) – nein	
	"	290 – 350	5 – 34	179 – 202	261 (1%) – nein	
	"	64 – 380	5 – 35	118 – 145	≈ 368 (5%)	
	"	95 – 435	10 – 82	273 – 335	769 – 860 (2%)	
	"	90 – 123	2 – 12	306 – 344	300 – 404 (2%)	
	"	95 – 104	2 – 15	136 – 201	195 – 484 (4%)	
	"	116 – 147	5 – 34	96 – 174	≈ 780 (50%)	
	"	105 – 310	5 – 35	82 – 88	377 – 524 (60%)	
	"	235 – 250	10 – 82			
	"					
	"					

Quelle	Art der Verglasung	Temperatur (Riss) [°C]	Wärme- stromdichte (Riss) [kW/m ²]	Expositi- onszeit (Riss) [s]	Zeit bis zum Her- ausfallen [s]	Kommentar
Shields [199]	Floatglas 6 mm	170 – 202	2 – 10	405 – 612	nein	844 mm x 844 mm
	"	65 – 76	5 – 24	267 – 322	999 (2%) – nein	844 mm x 844 mm
	"	180 – 190	5 – 25	114 – 206	335 – 398 (87%)	844 mm x 844 mm
	"	225 – 240	10 – 50	105 – 126	108 – 650 (67%)	844 mm x 844 mm
	"	72 – 80	2 – 10	512 – 675	675 (0,5%) – nein	844 mm x 844 mm
	"	195 – 210	5 – 24	348 – 423	nein	844 mm x 844 mm
	"	210 – 290	5 – 25	141 – 309	470 (20%) – nein	844 mm x 844 mm
	"	80 – 113	10 – 50	126 – 156	-	844 mm x 844 mm
	"	191 – 245	2 – 10	393 – 857	665 – 857 (12%)	1 895 mm x 844 mm
	"	310 – 362	5 – 24	263 – 321	321 – 1 080 (7%)	1 895 mm x 844 mm
	"	139 – 141	5 – 25	101 – 203	275 – 726 (95%)	1 895 mm x 844 mm
	"	265 – 278	10 – 50	102 – 118	139 – 450 (95%)	1 895 mm x 844 mm
	Shields [200]	Zweischeibenglas				
1. Floatglas 6 mm (beanspruchte Seite)		-	8 – 17	170 – 210	755 (1%) – nein	844 mm x 844 mm
"		-	12 – 27	130 – 160	953 – 1079 (3%)	844 mm x 844 mm
"		-	22 – 47	90 – 100	308 – 312 (>5%)	844 mm x 844 mm
"		-	37 – 110	74 – 92	170 – 290 (2-95%)	844 mm x 844 mm
"		-	58 – 169	63 – 84	234 – 357 (30%)	844 mm x 844 mm
"		-	5 – 13	257 – 303	nein	844 mm x 844 mm
"		-	8 – 19	198 – 290	nein	844 mm x 844 mm
"		-	14 – 31	150 – 199	nein	844 mm x 844 mm
"		-	30 – 82	110 – 140	nein	844 mm x 844 mm
"		-	48 – 118	110 – 140	nein	844 mm x 844 mm
"		-	4 – 11	159 – 197	nein	844 mm x 844 mm
"		-	7 – 21	146 – 175	546 – 1 198 (92%)	1 895 mm x 844 mm
"	-	14 – 31	119 – 126	456 – nein (30 %)	1 895 mm x 844 mm	
"	-	28 – 71	88 – 112	140 – 720 (30%)	1 895 mm x 844 mm	
"	-	40 – 94	82 – 95	250 – 771 (45%)	1 895 mm x 844 mm	
2. Floatglas 6 mm (unbeanspruchte Seite)	"	-	8 – 17	623 – 877	nein	844 mm x 844 mm
	"	-	12 – 27	499 – 570	835 (5%) – nein	844 mm x 844 mm
	"	-	22 – 47	329 – 387	428 (1%) – nein	844 mm x 844 mm
	"	-	37 – 110	246 – 277	335 (5%) – nein	844 mm x 844 mm
	"	-	58 – 169	120 – 279	268 – 726 (85%)	844 mm x 844 mm
	"	-	5 – 13	1 232 -1 388	nein	844 mm x 844 mm
	"	-	8 – 19	725 – 953	nein	844 mm x 844 mm
"	-	14 – 31	548 – 562	nein	844 mm x 844 mm	

Quelle	Art der Verglasung	Temperatur (Riss) [°C]	Wärme- stromdichte (Riss) [kW/m²]	Expositi- onszeit (Riss) [s]	Zeit bis zum Her- ausfallen [s]	Kommentar
Shields [200]	"	-	30 – 82	140 – 421	nein	844 mm x 844 mm
	"	-	48 – 118	150 – 406	nein	844 mm x 844 mm
	"	-	4 – 11	821 – 997	nein	1 895 mm x 844 mm
	"	-	7 – 21	510 – 644	540 (5%) – nein	1 895 mm x 844 mm
	"	-	14 – 31	359 – 411	nein	1 895 mm x 844 mm
	"	-	28 – 71	114 – 210	305 – 1 151 (15%)	1 895 mm x 844 mm
	"	-	40 – 94	120 – 269	254 – 855 (55%)	1 895 mm x 844 mm
	"	≈ 123	-	48 – 350	-	Kante geschützt
Skelly [201], [202]	Glas 2.4 mm	≈ 197	-	70 – 200	-	Kante ungeschützt
	Wang et al. [203]	Geglühtes Glas 6 mm	-	50	40	-
- 10 mm		-	50	51	-	
- 12 mm		-	50	54	-	
- 15 mm		-	50	61	-	
- 19 mm		-	50	68	-	
Gehärtetes Glas 6 mm		-	50	118	-	
- 10 mm	-	50	178	-		
- 12 mm	-	50	300	-		
- 15 mm	-	50	351	-		
- 19 mm	-	50	474	-		

6 Zusammenfassung und Ausblick

Das Forschungsvorhaben FireSafeGreen verfolgte das Ziel, das Verständnis für das Brandverhalten von begrünten Fassaden zu vertiefen und deren Einfluss auf die Brandweiterleitung zu analysieren.

Living Walls stellen komplexe Fassadensysteme dar, die sich signifikant von Hersteller zu Hersteller unterscheiden. Diese herstellereinspezifischen Systeme können nur durch groß angelegte Brandversuche am Gesamtsystem produktspezifisch sinnvoll untersucht werden.

Im Gegensatz dazu können Kletterpflanzen, die an Rankhilfen wachsen, aus brandschutztechnischer Sicht allgemeiner untersucht und bewertet werden. Diese Untersuchungen ermöglichen die Entwicklung von Richtlinien für eine brandschutztechnisch ausreichend sichere Anwendung. Daher konzentrierte sich die vorliegende Studie auf Kletterpflanzen an Rankhilfen. 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.

Insgesamt wurden acht großmaßstäbliche Brandversuche unter realistischen Bedingungen mit repräsentativen Brandlasten in zwei Testszenarien durchgeführt. Diese Versuche wurden in drei Versuchsreihen unterteilt: den *Wandversuch*, den *Balkonversuch mit zentraler Brandbelastung* sowie den *Balkonversuch mit Brandbelastung in der Ecke*. Der Fokus der Experimente lag auf der Quantifizierung der vertikalen Brandausbreitung entlang der grünen Fassade. Besonderes Augenmerk wurde auch auf den Wärmestrom der brennenden Fassadenbegrünung und dessen Auswirkungen auf angrenzende Bauteile wie Außenwände, Fenster,

Balkone und Dachüberstände sowie das damit verbundene Risiko gelegt. Ein weiterer Schwerpunkt war das Verständnis der Unterschiede im Brandverhalten zwischen vitalen und trockenen (abgestorbenen) Pflanzen, insbesondere in Bezug auf die vertikale Brandausbreitung und das Risiko der Entzündung benachbarter Gebäudeteile.

Der Feuchtigkeitsgehalt erwies sich als entscheidender Faktor für die Brandausbreitung. Neben der rasanten Ausbreitung des Feuers über die trockene begrünte Fläche kam es auch zu Funkenflug durch in die Luft aufsteigende glimmende Blatteile.

Bei vitalen Pflanzen, die sich direkt vor einer Außenwand befanden, wurde ein Abbrand der grünen Fassade im Verhältnis zum etwa 2,5-fachen der Primärflammen (Holzkrippen) beobachtet. In einer offenen Anordnung vor einem Balkon (mit größerem Abstand zur Außenwand) lag dieser Faktor bei ca. 1,5.

Generell wurde ein Selbstverlöschen der grünen Fassaden festgestellt. Der Abbrand der durch Feuer getrockneten Teile der grünen Fassade erfolgte in sehr kurzen Zeiträumen innerhalb der ersten zehn Minuten nach Beginn der Brandeinwirkung.

Die Ergebnisse dieser Versuche ließen darauf schließen, dass ein Versagen von Zweifachverglasungen durch die Einwirkung einer brennenden, gut gepflegten grünen Fassade – unabhängig davon, ob diese vital oder trocken ist – als unwahrscheinlich einzustufen ist.

Die Pflege und Wartung stellen somit den Schlüssel zu einer brandsicheren grünen Fassade dar. Eine unzureichend gepflegte grüne Fassade mit Kletterpflanzen und viel Totholz entspricht nicht dem im Rahmen dieser Untersuchungen betrachteten Brandszenario.

Die Voraussetzungen für eine brandschutztechnisch ausreichend sichere Begrünung von Fassaden mit Kletterpflanzen an Rankhilfen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Living Walls oder wandbasierte Systeme können aus Sicht des Brandschutzes kritisch sein. Hier sind mittelfristig umfassende Brandversuche und entsprechende Verwendbarkeitsnachweise erforderlich. Derzeit ist es unerlässlich, sorgfältig zu prüfen, welche Materialien verwendet werden.
- Kletterpflanzen an nichtbrennbaren Kletterhilfen sind allgemein bewertbar und stellen ein geringeres Risiko aus brandschutztechnischer Sicht dar.
- Der entscheidende Faktor für eine brandschutztechnisch ausreichend sichere begrünte Fassade ist die regelmäßige Pflege und Wartung. Standardgrünfassaden erfordern in der Regel einen Wartungszyklus pro Jahr.
- Zwischen den Glasscheiben einer Fensteröffnung und den Pflanzen an Rankhilfen sollte ein Abstand von mindestens 500 mm eingehalten werden.
- Zu Bauteilen aus brennbaren Baustoffen, wie horizontal auskragende Holzdachstühle, ist ein Abstand von 500 mm einzuhalten.

- Werden Kletterpflanzen über mehrere Geschosse hinweg an nichtbrennbaren Rankhilfen vor Balkonen angeordnet, sollten geschlossene Brüstungen aus nichtbrennbaren Baustoffen vorgesehen werden.
- Zwischen einer Holzfassade und einer grünen Fassade sollte ein Abstand von mindestens 150 mm gewahrt werden [3] oder mindestens 50 mm zusätzlich zur Tiefe der auskragenden Brandsperre [130].

Zukünftig sind weitere Untersuchungen notwendig, um die hier formulierten Grundsätze weiter zu validieren.

Living Walls bergen ein erhebliches Risiko für Planer und Gebäude, da es an präzisen Klassifizierungs- und Bewertungsmöglichkeiten mangelt. Die zuständigen Behörden müssen klare Vorgaben zur Erlangung von Verwendbarkeitsnachweisen bereitstellen und sicherstellen, dass Hersteller so früh wie möglich umfassende Brandversuche mit ihren Systemen durchführen.

Eine weitere wichtige Aufgabe besteht darin, die Pflege und Instandhaltung von begrünten Fassaden klarer zu standardisieren und detaillierter zu beschreiben.

Literaturverzeichnis

- [1] Engel T, Werther N (2024) Fire Safety for Green Façades: Part 1: Basics, State-of-the-Art Research and Experimental Investigation of Plant Flammability. *Fire Technology* 60:2177–2230 <https://doi.org/10.1007/s10694-024-01566-0>
- [2] Engel T; Kahler J (2025) Fire Safety for Green Façades: Part 2: Full-Scale Façade Fire Tests and Means for Fire-Safe Green Façade Design for Climbing Plants on Trellises. *Fire Technology* [Manuscript under review]
- [3] Engel T (2023) Brandschutz für biogene Fassaden - Experimentelle Untersuchungen als Grundlage brandschutztechnischer Prinzipien. Dissertation, München. <https://mediatum.ub.tum.de/?id=1715368>
- [4] Engel T (2024) Brandschutz für Fassadenbegrünungen - Ergebnisse des Forschungsvorhabens FireSafeGreen zu begrünten Fassaden. *Bauen+ (5 | 2024)*, 2024, 17-22
- [5] Engel T, Winter S (2024) Grundlagen zur brandschutztechnischen Anwendbarkeit von begrünten Fassaden an mehrgeschossigen Gebäuden. *Proceedings Bauphysiktag in Weimar 2024*. <https://doi.org/10.25643/dbt.59995>
- [6] Engel T, Winter S (2024) Grundlagen zur brandschutztechnischen Anwendbarkeit von begrünten Fassaden an mehrgeschossigen Gebäuden. *Bauphysik*, 46: 119-126. <https://doi.org/10.1002/bapi.202400014>
- [7] Engel T, Winter S (2024) Structural Means for Fire-Safe Green Façade Design on Multi-Storey Buildings. 11th INTER - International Network on Timber Engineering Research Meeting 2024, Timber Scientific Publishing, KIT Holzbau und Baukonstruktionen, 2024
- [8] Engel T (2024) Prinzipien für brandschutztechnisch sichere Grünfassaden. *Braunschweiger Brandschutz-Tage 2024*, 263-276
- [9] Engel T (2024) Begrünte Fassaden auf dem Prüfstand. *FeuerTrutz Brandschutzkongress 2024*, 297-310
- [10] Engel T (2024) Fassadenbegrünung an mehrgeschossigen Gebäuden aus brandschutztechnischer Sicht. 7. Internationale Fachtagung Bauphysik & Gebäudetechnik (BGT)

- [11] Engel T (2024) Fassadenbegrünung aus brandschutztechnischer Sicht. 17. Stuttgarter Brandschutztag, 2024
- [12] Engel T (2024) Brandschutz für Grünfassaden. Moderne Gebäudetechnik Sonderheft Vorbeugender Brandschutz
- [13] Engel T (2024) Brandschutz für Grünfassaden - FireSafeGreen. QUARTIER Fachmagazin für urbanen Wohnungsbau (5.2024), 6-13
- [14] Engel T (2024) Begrünte Fassaden aus brandschutztechnischer Sicht. FeuerTrutz Magazin (4.2024), 34-39
- [15] Engel T (2025) Fassaden begrünt; In: Brandschutz im Bild - Praxis-Guide zum vorbeugenden baulichen Brandschutz; Hrsg. Wiederer & Kircher. WEKA Media GmbH & Co. KG
- [16] Engel T (2025) Begrünte Fassaden; In: Brandschutzatlas; Hrsg. Mayr J, Battran L. RM Rudolf Müller Medien GmbH & Co. KG
- [17] United Nations – Department of Economic and Social Affairs Population Division (2019) World Urbanization Prospects The 2018 Revision. New York
- [18] 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.
- [19] Parker, David E. (2010): Urban heat island effects on estimates of observed climate change. In: WIREs Clim Change 1 (1), S. 123–133. <https://doi.org/10.1002/wcc.21>
- [20] 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. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.055>
- [21] 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>
- [22] 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>.
- [23] Eisl, Katharina (2017): Brandstatistiken und ihre Aussagekraft. Master Thesis. Technische Universität München
- [24] Göldner, Moritz (2021): Evaluierung der Maßnahmen des vorbeugenden Brand- und Gefahrenschutzes - Teil 4: Ermittlung und Bewertung quantifizierter Ausbreitungsfaktoren. Master Thesis. Technische Universität München
- [25] Maiworm, B.; Göldner, M.; Engel, T. (2023) Einsatzstellenbewertungen der deutschen Feuerwehren – Brandversuche in situ. Bautechnik 100, H. 1, S. 3–13. <https://doi.org/10.1002/bate.202100030>

- [26] 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). <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2898-9>
- [27] Bonner, Matthew; Rein, Guillermo (2018): Flammability and Multi-objective Performance of Building Façades: To-wards Optimum Design. In: International Journal of High-Rise Buildings 7 (4), S. 363–374. <https://doi.org/10.21022/IJHRB.2018.7.4.363>
- [28] Yuen, Anthony Chun Yin; Chen, Timothy Bo Yuan; Li, Ao; Cachinho Cordeiro, Ivan Miguel de; Liu, Luzhe; Liu, Hen-grui 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. <https://doi.org/10.1002/fam.2973>
- [29] 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>
- [30] 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>
- [31] 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>
- [32] 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>
- [33] Ottel  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>
- [34] Pfoser N (2018) Vertikale Begrünung – Bauweisen und Planungsgrundlagen zur Begrünung von Wänden und Fassaden mit und ohne natürlichen Boden-/Bodenwasseranschluss. Eugen Ulmer KG, Stuttgart
- [35] 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>
- [36] Brandwein T (2014) Statistisches über Brände mit Kletterpflanzen und Strategien zu ihrer Vermeidung. Brandschutz und Grün, Wien
- [37] K hler M, Ansel W, Appl R, Betzler F, Mann G, Ottel  M, W nschmann S (2012): Handbuch Bauwerksbegr nung Planung- Konstruktion. Rudolf Müller
- [38] Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (2018) Fassadenbegr nungsrichtlinien - Richtlinien für die Planung, Bau und Instandhaltung von Fassadenbegrünungen

- [39] Köhler M (1993) Fassaden- und Dachbegrünung. Ulmer Verlag
- [40] Babrauskas V (2003) Ignition Handbook - Principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science. Fire Science Publishers.
- [41] 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
- [42] Gill AM, Moore PHR (1996) Ignitibility of leaves of Australian plant, Centre for Plant Biodiversity Research.
- [43] 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>
- [44] Babrauskas V, Chastagner G, Stauss E (2001) Flammability of Cut Christmas Trees. 2001 IAAI Annual General Meeting
- [45] Van Wagner CE (1963) Flammability of Christmas Trees. Forest Research Branch, Department of Forestry Publication No 1034, Ottawa
- [46] White RZ, DeMars D, Bishop M (1997) Flammability of Christmas trees and other vegetation. Proceedings of the 24th international conference on fire safety.
- [47] 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>
- [48] 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
- [49] 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>
- [50] 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>
- [51] 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
- [52] 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>
- [53] Nelson, RM (2001) Chapter 4 - Water Relations of Forest Fuels, *Forest Fires*, Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-012386660-8/50006-4>
- [54] Dimitrakopoulos AP, Papaioannou KK (2001) Flammability assessment of Mediterranean forest fuels. *Fire Technol* 37(2): 143-152. <https://doi.org/10.1023/A:1011641601076>

- [55] 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>
- [56] 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>
- [57] 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>
- [58] Anderson HE, Rothermel RC (1965) Influence of moisture and wind upon the characteristics of free-burning fires. *Symposium (International) on Combustion* 10, 1009–1019
- [59] 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>
- [60] 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>
- [61] 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)
- [62] Chrosiewicz 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>
- [63] 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>
- [64] 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>
- [65] 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>
- [66] Schroeder MJ, Buck CC (1970) FIRE WEATHER: Agriculture Handbook 360; U.S. Department of Agriculture - Forest Service. <https://www.nwccg.gov/publications/pms425-1>
- [67] 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>

- [68] 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>
- [69] 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>
- [70] 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>
- [71] 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>
- [72] 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>
- [73] 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>
- [74] European Standard (2002) Moisture content of a piece of sawn timber -Part 1: Determination by oven dry method; German version EN 13183-1:2002
- [75] 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>
- [76] 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
- [77] 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>
- [78] 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>
- [79] 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>
- [80] 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>

- [81] 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>
- [82] 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>
- [83] 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>
- [84] 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>
- [85] 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>
- [86] 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>
- [87] 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>
- [88] 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>
- [89] 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>
- [90] 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>
- [91] 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>
- [92] 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*

- [93] Matt F J, Dietenberger 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>
- [94] 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>
- [95] 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>
- [96] 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>
- [97] 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>
- [98] 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>
- [99] 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>
- [100] 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
- [101] 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>
- [102] 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)
- [103] Pichlhöfer S (2016) Brandverhalten von Kletterpflanzen in Bezug auf Fassadenbegrünungen. Bachelor-Thesis, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna
- [104] 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
- [105] Department for Communities and Local Government (2013) *Fire Performance of Green Roofs and Walls*. London

- [106] 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
- [107] International Fire Consultants Ltd (2017) IFC Report PAR/16691/01 Engineering Assessment of Biotope Living Wall System With Respect to Reaction to Fire Classification
- [108] Efectis Nederland (2014) 2014-Efectis-R0224c - Classification of reaction to fire performance in accordance with EN 13501-1:2007+A1:2009
- [109] Efectis Nederland (2014) 2014-Efectis-R224-D - Declaration of test results
- [110] Efectis Nederland (2020) 2020-Efectis-R001808-D[Rev.1] - Declaration of test results
- [111] International Fire Consultants Ltd (2020) IFC Report PAR/19533/01 Engineering Assessment of ANS Living Wall System with Respect to Reaction to Fire Classification
- [112] 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
- [113] Engel T, Noder J (2020) Begrünte Fassaden aus brandschutztechnischer Sicht. Bautechnik 97:549–557. <https://doi.org/10.1002/bate.202000041>
- [114] Noder J (2019) Fire performance of green facades (Begrünte Fassaden aus brandschutztechnischer Sicht). Master Thesis, Technical University of Munich
- [115] Werner D, Pommer G (2018) Studie zum Thema „Brandverhalten von Grünfassaden in großmaßstäblichen Versuchen“, Magistratsabteilung 39 Prüf-, Überwachungs- und Zertifizierungsstelle der Stadt Wien
- [116] 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
- [117] 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
- [118] City of Vienna (2019) Leitfaden Fassadenbegrünung
- [119] Arbeitsgemeinschaft der Leiter der Berufsfeuerwehren und des Deutschen Feuerwehrverbandes (2020) Brandschutz großflächig begrünter Fassaden
- [120] Free and Hanseatic City of Hamburg (2022) FAQ Bauordnungsrechtliche Anforderungen an Fassadenbegrünungen
- [121] Noirfalisse E, Dobbels F, Van Herreweghe J, Wastiels L, Detremmerie V, Martin Yves (2022) Façades Végétalisées - Innovation Paper Novembre 2022; Buildwise.

- [122] 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
- [123] 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
- [124] 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>
- [125] 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
- [126] Engel T, Werther N (2020) Analyse der zulässigen Brandausbreitung über die Fassade. *Bautechnik* 97:558–565. <https://doi.org/10.1002/bate.202000007>
- [127] 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
- [128] 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
- [129] 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
- [130] Engel T, Werther N (2021) Structural Means for Fire-Safe Wooden Façade Design. *Fire Technol.* <https://doi.org/10.1007/s10694-021-01174-2>
- [131] 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
- [132] 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
- [133] 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
- [134] 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

- [135] 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
- [136] 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
- [137] European Standard (2013) Thermocouples – Part 1: EMF specifications and tolerances EN 60584-1:2013
- [138] Sette B J G (2005) Development of a velocity pressure probe. *Fire Mater* 30:397-414
- [139] 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
- [140] 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
- [141] 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
- [142] 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>
- [143] Roloff A, Bärtels A (2008) Flora der Gehölze – Bestimmung, Eigenschaften und Verwendung, 4.Auflage. Ulmer
- [144] 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>
- [145] Babrauskas V (2010) Glass breakage in fires https://fireevacuationplan.ru/articles/dataFolder/to139_GlassBreak.pdf Accessed 3 January 2023
- [146] Baser KHC, Buchbauer G (2009) Handbook of Essential Oils: Science, Technology, and Applications (1st Ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420063165>
- [147] 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>
- [148] 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>

- [149] 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>
- [150] 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>
- [151] 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>
- [152] 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 fortunei* in Guangxi. *Hubei Agricultural Sciences* 59:191-195
- [153] Tucker AO, Maciarello MJ (1994) Essential Oil of English Ivy, *Hedera helix* L. 'Hibernica', *Journal of Essential Oil Research* 6:187-188. <https://doi.org/10.1007/10.1080/10412905.1994.9698352>
- [154] 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>
- [155] 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>
- [156] 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.
- [157] 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>
- [158] 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>
- [159] 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.ind-crop.2015.09.048>
- [160] 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.
- [161] 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>

- [162] 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>
- [163] 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>
- [164] Venskutonis PR, Dapkevicius A, Baranauskiene 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>
- [165] Europäische Norm (2020) EN 13823:2020 Prüfungen zum Brandverhalten von Bauprodukten - Thermische Beanspruchung durch einen einzelnen brennenden Gegenstand für Bauprodukte mit Ausnahme von Bodenbelägen
- [166] Bielawski J, Papis B K, Krajewski G, Węgrzyński W (2024) An exploratory investigation into moisture content and wind impact on the fire behaviour of modular living walls. *Fire Safety Journal* 142. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.104024>
- [167] Bielawski J, Węgrzyński W (2023) Fire Safety considerations for vertical greenery systems on building façades. *Fire Protection Engineering* 100
- [168] PN-B-02867:2013-06 Ochrona Przeciwpożarowa Budynków -- Metoda Badania Stopnia Rozprzestrzeniania Ognia Przez Ściany Zewnętrzne Od Strony Zewnętrznej Oraz Zasady Klasyfikacji
- [169] DIN 4102-20:2017-10 Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - Teil 20: Ergänzender Nachweis für die Beurteilung des Brandverhaltens von Außenwandbekleidungen
- [170] Schoofs N (2023) Untersuchung des Einflusses von Fassadenbegrünung auf Holzaußenwandbekleidungen im Brandfall. Master Thesis. Technische Universität München.
- [171] Schliebe J, Osburg M, De Lannoye K (2024) Fire tests with "*Hedera helix*" on different scales to enable fire simulation on green facades. In: *Proceedings of FSF 2024. The 4th International Symposium on Fire Safety of Facades 2024: 10-12 June 2024, Lund*
- [172] Eisl K (2017) Brandstatistiken und ihre Aussagekraft. Master Thesis, Technische Universität München
- [173] Porer K (2019) Vergleichsstudie weltweiter Feuerwehrtaktiken und Gegebenheiten des abwehrenden Brandschutzes bei Gebäudebränden mit Ausarbeitung eines Bewertungssystems. Master Thesis, Technische Universität München
- [174] Europäische Norm (2013) EN 60584-1 Thermoelemente - Teil 1: Thermospannungen und Grenzabweichungen (IEC 60584-1:2013). Europäisches Komitee für Normung, Brüssel
- [175] Europäische Norm (2020) EN 1363-1:2020-05 Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen. Europäisches Komitee für Normung, Brüssel

- [176] ISO 14934-1:2010-06, 15.06.2010: Brandprüfungen - Kalibrierung und Einsatz von Radiometer und Wärmestrommessgerät - Teil 1: Allgemeine Grundlagen
- [177] Hukseflux Thermal Sensors (Hg.) (2023): USER MANUAL SBG SERIES Water-cooled heat flux sensors <https://www.hukseflux.com/products/heat-flux-sensors/heat-flux-sensors/sbg01-heat-flux-meter>. Zugriff am 10. Dezember 2024
- [178] ISO 14934-4:2014-08, 15.08.2014: Brandprüfungen - Kalibrierung und Verwendung von Wärmestrommessgeräten - Teil 4: Anleitung zur Verwendung von Wärmestrommessgeräten in Brandprüfungen
- [179] Meerpoel-Pietri K, Tihay-Felicelli V, Graziani A, Santoni P A, Morandini F, Perez-Ramirez Y, Bosseur F, Barboni T, Sánchez-Monroy X, Mell, W. (2022) Modelling with WFDS Combustion Dynamics of Ornamental Vegetation Structures at WUI: Focus on the Burning of a Hedge at Laboratory Scale. *Combustion Science and Technology*:195:3181-3211. <https://doi.org/10.1080/00102202.2021.2019235>
- [180] Pfoser N (2024) Green Façades. DETAIL. <https://doi.org/10.11129/9783955536213>
- [181] Rothermel RC (1983) How to predict the spread and intensity of forest and range fires. General Technical Report INT-143. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station
- [182] Scott JH, Burgan RE (2005) Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model. General Technical Report RMRS-GTR-153. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. <https://doi.org/10.2737/RMRS-GTR-153>
- [183] Ni Z, Lu S, Peng L (2012) Experimental study on fire performance of double-skin glass façades. *Journal of Fire Sciences* 30:457-472. <https://doi.org/10.1177/0734904112447179>
- [184] Wang Y, Li K, Su Y, Lu W, Wang Q, Sun J, He L, Liew K M (2017) Determination of critical breakage conditions for double glazing in fire. *Applied Thermal Eng* 111:20-29. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.079>
- [185] Bengtsson H, Giuliani L, Sørensen L S (2024) Fire-induced glass breakage in windows: review of knowledge and planning ahead. Applications of Structural Fire Engineering, 25-27 February 2024, Nanning, China
- [186] Etlinger MG, Beall FC (2004) Development of a laboratory protocol for fire performance of landscape plants. *Int J Wildland Fire* 13:479–488. <https://doi.org/10.1071/WF04039>
- [187] 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. *Int J Wildland Fire* 14:321-338. <https://doi.org/10.1071/WF04035>
- [188] Chen H, Wang Q, Wang Y et al. (2017) Experimental and Numerical Study of Window Glass Breakage with Varying Shaded Widths under Thermal Loading. *Fire Technol* 53:43-64. <https://doi.org/10.1007/s10694-016-0596-0>
- [189] Cohen J D (1995) Structure ignition assessment model (SIAM). The Biswell symposium: fire issues and solutions in urban interface and wildland ecosystems; 15. bis 17. Februar 1994

- [190] Harada K, Enomoto A, Uede K, Wakamatsu T (2000) An Experimental Study On Glass Cracking And Fallout By Radiant Heat Exposure. *Fire Safety Science* 6:1063-1074.
- [191] Jørgensen J D, Nielsen J H, Giuliani L (2022) Thermal resistance of framed windows: Experimental study on the influence of frame shading width. *Safety Science* 149. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2022.105683>
- [192] Richardson J K, Oleszkiewicz I (1987) Fire tests on window assemblies protected by automatic sprinklers. *Fire Technol* 23:115-132. <https://doi.org/10.1007/BF01040427>
- [193] Kim A K (1988) Fire exposure of glazing. Proc. 4th Conf. on Building Science and Technology, Toronto. <https://doi.org/10.4224/40001416>
- [194] Klassen M S, Sutula J A, Holton M M et al. (2006) Transmission Through and Breakage of Multi-Pane Glazing Due to Radiant Exposure. *Fire Technol* 42:79-107. <https://doi.org/10.1007/s10694-006-7254-x>
- [195] Manzello S L, Gann R G, Kukuck S R et al. (2007) An Experimental Determination of a Real Fire Performance of a Non-Load Bearing Glass Wall Assembly. *Fire Technol* 43:77-89. <https://doi.org/10.1007/s10694-006-0001-5>
- [196] Mowrer F W (1998) window breakage induced by exterior fires. NIST-GCR-98-751, Gaithersburg
- [197] Peng M, Hvidberg J, Bengtsson H, Giuliani L (2024) Fire-Induced Cracking of Modern Window Glazing: An Experimental Study. *Applications of Structural Fire Engineering*, 25-27 Februar 2024, Nanning, China
- [198] Shields T J, Silcock G W H, Flood M F (2001) Performance of a single glazing assembly exposed to enclosure corner fires of increasing severity. *Fire Mater* 25:123-152. <https://doi.org/10.1002/fam.764>
- [199] Shields T J, Silcock G W H, Flood M (2002) Performance of a single glazing assembly exposed to a fire in the centre of an enclosure. *Fire Mater* 26:51-75. <https://doi.org/10.1002/fam.783>
- [200] Shields J, Silcock G, Flood F (2005) Behaviour of Double Glazing in Corner Fires. *Fire Technol* 41:37-65. <https://doi.org/10.1007/s10694-005-4629-3>
- [201] Skelly M J, Roby R J, Beyler C L (1991) An Experimental Investigation of Glass Breakage in Compartment Fires. *Journal of Fire Protection Engineering* 3:25-34. <https://doi.org/10.1177/104239159100300103>
- [202] Skelly M J (1990) An experimental investigation of glass breakage in compartment fires. Master Thesis. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [203] Wang Y, Li X, Bisby L (2023) Comparative study of thermal breakage of annealed and tempered glazing with different thicknesses under uniform radiation conditions. *Fire Safety Journal* 140. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103867>

- [204] Wulff W, Zuber N, Alkidis A, Hess R W (1973) Ignition of Fabrics Under Radiative Heating. *Combustion Science and Technology* 6:321-334.
<https://doi.org/10.1080/00102207308952334>
- [205] Einsele U (1972) Über das Brennverhalten und den Brennmechanismus von Synthesefasern, *Melliand Textilberichte* 53:1395-1402.
- [206] Rieber M (1969) Über die Brennbarkeit von synthetischen Textilien. *Chemiefasern* 5:375-378.
- [207] Khattab M A (1996) Spontaneous Ignition Behavior of Cotton Fabric Having Different Amounts of Polyester, *J. Applied Polymer Science* 62:1503-1507.
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4628\(19961205\)62:10%3C1503::AID-APP2%3E3.0.CO;2-S](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4628(19961205)62:10%3C1503::AID-APP2%3E3.0.CO;2-S)
- [208] Horrocks A R, Gawande S, Kandola B, Dunn K W (2000) The Burning Hazard of Clothing – The Effect of Textile Structures and Burn Severity, 11th Annual BCC Conf. on Flame Retardancy: Recent Advances in Flame Retardancy of Polymeric Materials, Norwalk CT.
- [209] Mórotz-Cepei K, Beda L (1987) Comparative Testing of the Flammability of Upholstery Textiles, *J. Thermal Analysis* 32:901-908.
<https://doi.org/10.1007/BF01913776>
- [210] Babrauskas V (2003) *Ignition Handbook – principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science*. Fire Science Publishers, Issaquah
- [211] Lauber M (2016) Großbrand im Schloss Ebenzweier in Altmünster. laumat.at [Video- und Fotoarchiv]. <https://www.laumat.at/medienbericht,grossbrand-im-schloss-ebenzweier-in-altmuenster,5830.html>. Zugriff am 10. Dezember 2024
- [212] KURIER (2016) Großbrand im Schloss Ebenzweier in Altmünster unter Kontrolle. <https://kurier.at/chronik/oberoesterreich/grossbrand-in-schloss-ebenzweier-in-altmuenster-unter-kontrolle/197.884.508>. Zugriff am 10. Dezember 2024
- [213] Simms D L, Law Margaret (1967) The ignition of wet and dry wood by radiation. *Verbrennung und Flamme* 11:377-388. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(67\)90058-2](https://doi.org/10.1016/0010-2180(67)90058-2)
- [214] Europäische Norm (2009) Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall; EN 1995-1-2:2004 + AC:2009. Europäisches Komitee für Normung, Brüssel
- [215] 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>
- [216] Wang S, Chen H, Liu N (2015) Ignition of expandable polystyrene foam by a hot particle: An experimental and numerical study. *Journal of Hazardous Materials* 283:536-543 <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.09.033>
- [217] Wang S, Huang X, Chen H, Liu N, Rein G (2015) Ignition of low-density expandable polystyrene foam by a hot particle. *Combustion and Flame* 162:4112-4118
<https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2015.08.017>

- [218] Wang S, Zhang Y, Huang X (2021) Ignition of EPS foam by a hot moving hollow particle: Schwellenwert, Selbstentzündung und Brennpunkt. *Combustion and Flame* 232. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2021.111524>
- [219] Smektała M; Baborska-Narożny M (2022) The use of apartment balconies: context, design and social norms. *Buildings and Cities*, 3:134-152. <https://doi.org/10.5334/bc.193>
- [220] Bryant S, Rickard I, Spearpoint M (2023) A Survey of Fire Loads on Private Residential Balconies in England. *Fire Technol* 59:3415-3443. <https://doi.org/10.1007/s10694-023-01467-8>
- [221] Aydin D, Sayar G (2021) Questioning the use of the balcony in apartments during the COVID-19 pandemic process. *Archnet-IJAR* 15:51-63. <https://doi.org/10.1108/ARCH-09-2020-0202>
- [222] Grigoriadou E T (2021) The urban balcony as the new public space for well-being in times of social distancing. *Cities & Health*, 5:208-211. <https://doi.org/10.1080/23748834.2020.1795405>
- [223] Althaus C, Kiermeier P, Schuppler E (1991) Empfehlungen zur Fassadenbegrünung an öffentlichen Bauwerken. MBW Ministerium für Bauen und Wohnen. Düsseldorf.
- [224] 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>.
- [225] Simms, D. L. (1963): On the pilot ignition of wood by radiation. In: *Combustion and Flame* 7, S. 253–261. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(63\)90190-1](https://doi.org/10.1016/0010-2180(63)90190-1)
- [226] Jaskółowski, Waldemar; Ogródnik, Paweł; 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.
- [227] Lawson, D. I.; Simms, D. L. (1952): The ignition of wood by radiation. In: *Br. J. Appl. Phys.* 3 (9), S. 288–292. <https://doi.org/10.1088/0508-3443/3/9/305>
- [228] Simms, D. L. (1961): Experiments on the ignition on cellulosic materials by thermal radiation. In: *Combustion and Flame* 5, S. 369–375. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(61\)90118-3](https://doi.org/10.1016/0010-2180(61)90118-3)
- [229] Simms, D. L.; Law, Margaret (1967): The ignition of wet and dry wood by radiation. In: *Combustion and Flame* 11 (5), S. 377–388. [https://doi.org/10.1016/0010-2180\(67\)90058-2](https://doi.org/10.1016/0010-2180(67)90058-2)
- [230] 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. <https://doi.org/10.1007/s10973-012-2489-x>

- [231] 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. <https://doi.org/10.1002/fam.810170105>
- [232] 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. <https://doi.org/10.4224/20358499>
- [233] Mikkola, Esko (1989): Puupinnan syttyminen. Espoo, Hki: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. Palotekniikan laboratorio; Valtion painatuskeskus [jakaja] (Tiedotteita / Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 1057).
- [234] Bartlett, Alastair I.; Hadden, Rory M.; Bisby, Luke A. (2019): A Review of Factors Affecting the Burning Behaviour of Wood for Application to Tall Timber Construction. In: *Fire Technol* 55 (1), S. 1–49. <https://doi.org/10.1007/s10694-018-0787-y>
- [235] White, R. H.; Dietenberger, M. A. (2001): Wood Products: Thermal Degradation and Fire. In: *Encyclopedia of Materials: Science and Technology*: Elsevier, S. 9712–9716.
- [236] 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. [https://doi.org/10.1016/s0379-7112\(97\)00004-0](https://doi.org/10.1016/s0379-7112(97)00004-0)
- [237] Werther, Norman (2016): Einflussgrößen auf das Abbrandverhalten von Holzbau-teilen und deren Berücksichtigung in empirischen und numerischen Beurteilungs-verfahren. Dissertation. Technische Universität München. Online verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/1307126>
- [238] Duthweiler, S. (2020) Pflanzensteckbriefe: Kletterpflanzen. Hochschule Wei-henstephan-Triesdorf.

Abbildungsverzeichnis

	<u>Seite</u>
Abbildung 2.1	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 [34] 5
Abbildung 2.2	Beispielhafter Aufbau eines wandgebundenen Fassadenbegrünungssystems (Living Wall) (<i>Quelle: Fa. Vertiko</i>) für ein realisiertes Projekt (Wohnhaus Glogauer Straße Berlin)..... 6
Abbildung 2.3	Beispiele für begrünte Fassaden, links bodengebundener Bewuchs an Kletterhilfen (Swiss Re Bürogebäude München), rechts wandgebundenes Begrünungssystem (Stadtverwaltung Venlo Niederlande); (<i>Quelle: Bundesverband GebäudeGrün</i>) 7
Abbildung 2.4	Entzündungszeit (TTI) bei verschiedenen Wärmestrahlungsflüssen und unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalten (MC) für <i>Hedera helix</i> , <i>Peperomia obtusifolia</i> und <i>Aglaonema</i> [101]..... 9
Abbildung 2.5	Temperatur-Zeit-Diagramm für einen mittelmaßstäblichen Fassadenbrandversuch mit <i>Euonymus fortunei</i> , basierend auf [113]..... 10
Abbildung 2.6	Temperatur-Zeit-Diagramm (links) im Hinterlüftungsspalt in verschiedenen Höhen (0,5 m über dem Brandraum (unter der Brandsperre), 1,0 m und 1,5 m über dem Brandraum (über der Brandsperre)); Foto des Prüfstands mit Anordnung der Messstellen im Hinterlüftungsspalt; basierend auf [127] 13
Abbildung 2.7	Foto (links) und Höchsttemperaturen (rechts) in der Achse der begrünten Fassade während eines Brandversuchs mit Kletterpflanzen in Pflanzkästen in jedem Stockwerk für ein Hochhaus 15
Abbildung 3.1	Veränderung des Feuchtigkeitsgehalts des Laubes im Laufe eines Jahres [66]..... 22
Abbildung 3.2	Aushärtungsgrad (Anteil der abgestorbenen Pflanzen) im Verhältnis zum Feuchtigkeitsgehalt der Pflanzen [77] 24
Abbildung 3.3	Illustration des SBI-Prüfstands und des Bereichs für die Pflanzenproben (grün)..... 28
Abbildung 3.4	Ablauf des SBI-Prüfverfahrens nach EN 13823 [106] 30
Abbildung 3.5	Wärmefreisetzungsrate für <i>Actinidia arguta</i> bis <i>Campsis radicans</i> 35
Abbildung 3.6	Wärmefreisetzungsrate für <i>Celastrus orbiculatus</i> bis <i>Fallopia baldschuanica</i> 35

Abbildung 3.7	Wärmefreisetzungsrate für <i>Hedera helix</i> bis <i>Hydrangea anomala</i>	36
Abbildung 3.8	Wärmefreisetzungsrate für <i>Jasminum nudiflorum</i> bis <i>Lonicera henryi</i>	36
Abbildung 3.9	Wärmefreisetzungsrate für <i>Parthenocissus tricuspidata</i> bis <i>Rosa rambler</i>	37
Abbildung 3.10	Wärmefreisetzungsrate für <i>Vitis coignetiae</i> bis <i>Wisteria sinensis</i>	37
Abbildung 3.11	Wärmefreisetzungsrate für <i>Bergenia cordifolia</i> bis <i>Lonicera nitida</i>	38
Abbildung 3.12	Darstellung der Gesamtwärmefreisetzung und der Probenmasse (Pflanzenmasse ohne Rankgitter).....	39
Abbildung 3.13	Visualisierung der verbrannten und vertrockneten Bereiche nach den Tests, basierend auf [140]	40
Abbildung 3.14	Wärmefreisetzungsrate für die <i>Hedera helix</i> (alt) Wiederholungsproben	42
Abbildung 3.15	Vergleich der Wärmefreisetzungsrate von junger und alter <i>Hedera helix</i>	45
Abbildung 3.16	Vergleich der Wärmefreisetzungsrate bei Tests im Sommer und im Winter für <i>Actinidia deliciosa</i> und <i>Hedera helix</i>	46
Abbildung 3.17	Vergleich der Wärmefreisetzungsrate bei Tests im Sommer und im Winter für <i>Jasminum nudiflorum</i> und <i>Lonicera henryi</i>	46
Abbildung 3.18	Wärmeabgaberate einer 42 Tage getrockneten, einer vitalen jungen und einer vitalen alten <i>Hedera helix</i> im Vergleich zu Spanplatte und Sperrholzplatte	47
Abbildung 3.19	Wärmefreisetzungsrate eines 42 Tage getrockneten und eines vitalen <i>Humulus lupulus</i> im Vergleich zu Spanplatte und Sperrholzplatte	47
Abbildung 4.1	Ansicht Fassadenprüfstand mit zugehörigen Abmessungen und Messstellen [170].....	60
Abbildung 4.2	Schnitt Fassadenprüfstand mit zugehörigen Abmessungen und Messstellen [170].....	61
Abbildung 4.3	Fotodokumentation der angeordneten Begrünung bei Test 2 (links) und Test 3 (rechts).....	63
Abbildung 4.4	Fotodokumentation der Seitenansicht mit Anordnung der Begrünung und Brandsperre.....	63
Abbildung 4.5	Brandeinwirkung durch drei 15 kg Holzkrippen für den Referenzversuch Test 1 (8. Prüfminute).....	63
Abbildung 4.6	QR-Code mit Links zu den Videodateien des digitalen Anhangs für Test 1, Test 2 und Test 3 [3]	64
Abbildung 4.7	Temperatur-Zeit-Diagramm für die Messstelle 250 mm unterhalb der Brandsperre für Test 1, Test 2 und Test 3.....	65
Abbildung 4.8	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 4.1 und Abbildung 4.2.....	66
Abbildung 4.9	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 4.1 und Abbildung 4.2.....	67
Abbildung 4.10	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 4.1 und Abbildung 4.2.....	67
Abbildung 4.11	Gegenüberstellung der Wärmestromdichte für alle drei Versuche	68

Abbildung 4.12	Fotodokumentation der Holzschalung oberhalb der Brandsperrschicht nach Beendigung des Versuches und der Beobachtungszeit für Test 2 (links) und Test 3 (rechts) [3]	70
Abbildung 5.1	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 (Abbildung oben basiert auf [170]; Bilder unten Bundesverband GebäudeGrün)	74
Abbildung 5.2	Ansicht und Seitenansicht der Tragstruktur und des Versuchsaufbaus für V0.....	79
Abbildung 5.3	Ansicht, Seitenansicht und Draufsicht des Balkons mit Tragwerk und Versuchsaufbau für V3 und V4	80
Abbildung 5.4	Vorkultivierte Heckenelemente mit zwei Pflanzenarten: a) <i>Hedera helix</i> und b) <i>Euonymus fortunei</i>	81
Abbildung 5.5	Ansicht und Seitenansicht des Wandversuchs mit begrünter Fassade für V1 und V2.....	82
Abbildung 5.6	Ansicht, Seitenansicht und Draufsicht des Balkonversuchs mit begrünter Fassade und zentraler Brandbeanspruchung für V5 und V7	82
Abbildung 5.7	Ansicht, Seitenansicht und Draufsicht des Balkonversuchs mit begrünter Fassade und zentraler Brandbeanspruchung für V6	83
Abbildung 5.8	Varianten der Pflanzentrocknung mit Bautrockner und Plane a) direkt an der Fassade und b) vor der Montage an die Fassade	84
Abbildung 5.9	Möbiliar auf den Balkonen.....	84
Abbildung 5.10	Seitenansicht der Wandversuche mit der Position der Messpunkte.....	88
Abbildung 5.11	Ansicht der Wandversuche mit der Position der Messpunkte in der Wandebene	89
Abbildung 5.12	Ansicht der Wandversuche mit der Position der Messpunkte in der Begrünungsebene	90
Abbildung 5.13	Draufsicht der Balkonversuche mit der Position der Messpunkte	91
Abbildung 5.14	Ansicht der Balkonversuche mit der Position der Messpunkte in der Wandebene.....	92
Abbildung 5.15	Ansicht der Balkonversuche mit der Position der Messpunkte in der Begrünungsebene.....	92
Abbildung 5.16	Temperatur-Zeit-Diagramm zu V0 in der Wandebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzkrippen befinden	93
Abbildung 5.17	Temperatur-Zeit-Diagramm zu V0 in der Begrünungsebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzkrippen befinden	94
Abbildung 5.18	Temperatur-Zeit-Diagramm zu V1 in der Wandebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzkrippen befinden	94
Abbildung 5.19	Temperatur-Zeit-Diagramm zu V1 in der Begrünungsebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzkrippen befinden	95
Abbildung 5.20	Temperatur-Zeit-Diagramm zu V2 in der Wandebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzkrippen befinden	95
Abbildung 5.21	Temperatur-Zeit-Diagramm zu V2 in der Begrünungsebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzkrippen befinden	96

Abbildung 5.22	Temperaturentwicklung über die Versuchsdauer von V0, V1 und V2 für die Messpunkte mittig über den Holzkrippen in der Wand- und Begrünungsebene.....	96
Abbildung 5.23	Temperatur-Zeit-Diagramm zu V3 in der Wandebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzkrippen befinden.....	97
Abbildung 5.24	Temperatur-Zeit-Diagramm zu V3 in der Begrünungsebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzkrippen befinden	97
Abbildung 5.25	Temperatur-Zeit-Diagramm zu V3 für Messpunkte im Bereich des Balkon 1 in verschiedenen Höhen.....	98
Abbildung 5.26	Temperatur-Zeit-Diagramm zu V3 für Messpunkte im Bereich des Balkon 2 in verschiedenen Höhen.....	98
Abbildung 5.27	Temperatur-Zeit-Diagramm zu V5 in der Wandebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzkrippen befinden.....	99
Abbildung 5.28	Temperatur-Zeit-Diagramm zu V5 in der Begrünungsebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzkrippen befinden	99
Abbildung 5.29	Temperatur-Zeit-Diagramm zu V5 für Messpunkte im Bereich des Balkon 1 in verschiedenen Höhen.....	100
Abbildung 5.30	Temperatur-Zeit-Diagramm zu V5 für Messpunkte im Bereich des Balkon 2 in verschiedenen Höhen.....	100
Abbildung 5.31	Temperatur-Zeit-Diagramm zu V7 in der Wandebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzkrippen befinden.....	101
Abbildung 5.32	Temperatur-Zeit-Diagramm zu V7 in der Begrünungsebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzkrippen befinden	101
Abbildung 5.33	Temperatur-Zeit-Diagramm zu V7 für Messpunkte im Bereich des Balkon 1 in verschiedenen Höhen.....	102
Abbildung 5.34	Temperatur-Zeit-Diagramm zu V7 für Messpunkte im Bereich des Balkon 2 in verschiedenen Höhen.....	102
Abbildung 5.35	Temperaturentwicklung über die Versuchsdauer von V3, V5 und V7 für die Messpunkte mittig über den Holzkrippen in der Wand- und Begrünungsebene.....	103
Abbildung 5.36	Temperatur-Zeit-Diagramm zu V4 in der Begrünungsebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzkrippen befinden	103
Abbildung 5.37	Temperatur-Zeit-Diagramm zu V6 in der Begrünungsebene für Messpunkte in verschiedenen Höhen, die sich mittig über den Holzkrippen befinden	104
Abbildung 5.38	Temperaturentwicklung über die Versuchsdauer von V4 und V6 für die Messpunkte mittig über den Holzkrippen in der Begrünungsebene.....	104
Abbildung 5.39	Vergleich der ungeglätteten und geglätteten Messdaten am Beispiel der Messstelle H4,5ml in V0.....	105
Abbildung 5.40	Wärmestromdichte für V0, gemessen mittig über den Holzkrippen in einer Höhe von 4,5 m und 6 m	106
Abbildung 5.41	Wärmestromdichte für V1, gemessen mittig über den Holzkrippen in einer Höhe von 4,5 m und 6 m	106
Abbildung 5.42	Wärmestromdichte für V2, gemessen mittig über den Holzkrippen in einer Höhe von 4,5 m und 6 m	107

Abbildung 5.43	Wärmestromdichte für V3, gemessen mittig über den Holzkruppen in einer Höhe von 4,3 m (Balkon 1) und 7,6 m (Balkon 2).....	107
Abbildung 5.44	Wärmestromdichte für V5, gemessen mittig über den Holzkruppen in einer Höhe von 4,3 m (Balkon 1) und 7,6 m (Balkon 2).....	108
Abbildung 5.45	Wärmestromdichte für V7, gemessen mittig über den Holzkruppen in einer Höhe von 4,3 m (Balkon 1) und 7,6 m (Balkon 2).....	108
Abbildung 5.46	Versuch V1 a) vor der Prüfung und b) nach der Prüfung	109
Abbildung 5.47	Veranschaulichung der durch die Brandweiterleitung entstandenen Schäden am Versuch V1.....	110
Abbildung 5.48	Versuch V2 a) vor der Prüfung und b) nach der Prüfung	110
Abbildung 5.49	Veranschaulichung der durch die Brandweiterleitung entstandenen Schäden am Versuch V2.....	110
Abbildung 5.50	Versuche V5 und V6 a) vor der Prüfung und b) nach der Prüfung.....	111
Abbildung 5.51	Veranschaulichung der durch die Brandweiterleitung entstandenen Schäden an den Versuchen V5 & V6.....	111
Abbildung 5.52	Versuch V7 a) vor der Prüfung und b) nach der Prüfung	112
Abbildung 5.53	Veranschaulichung der durch die Brandweiterleitung entstandenen Schäden am Versuch V7.....	112
Abbildung 5.54	Flammenhöhen der Versuche V0, V1 und V2.....	113
Abbildung 5.55	Flammenhöhen der Versuche V3, V5 und V7	114
Abbildung 5.56	Flammenhöhen der Versuche V4 und V6	114
Abbildung 5.57	Fotodokumentation des Versuchs V7 mit a) Papier auf dem Balkon mit Brandlöchern; b) und c) Verformungen an der Sitzfläche der Kunststoffstühle auf den Balkonen	118
Abbildung 5.58	Abstand zwischen der Fensterscheibe und den Kletterpflanzen an Rankgittern (grüne Fassade) [nach einem Entwurf von Krimmelarchitekten].....	121
Abbildung 5.59	Temperaturverlauf am Messpunkt W12mM	122
Abbildung 5.60	Foto der dem Feuer ausgesetzten Seite der 15 mm dicken OSB-Platten nach dem Test V2.....	123
Abbildung 5.61	Darstellung des Abstands (blau) zwischen dem Rankgitter mit Kletterpflanzen und der brennbaren Dachkonstruktion (braun).....	123
Abbildung 5.62	Entzündungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Anfangstemperatur und dem Radius der Partikel [216].....	124
Abbildung 5.63	Zündwahrscheinlichkeit als Funktion der Anfangstemperatur und des Durchmessers der heißen Partikel für die EPS-Schaumdichten von (a) 18 kg/m ³ und (b) 27 kg/m ³ [217].....	124
Abbildung 5.64	Grundriss der Prüfhalle mit Prüfstand der Kiwa MPA Dresden GmbH.....	129
Abbildung 5.65	Abstand zwischen dem Rankgitter und der Wand des Prüfstandes.....	130

Tabellenverzeichnis

	<u>Seite</u>
Tabelle 2.1	Ergebnisse der 11 Brandversuche der Versuchsreihen [116] und [117] 12
Tabelle 3.1	Richtwerte für die Schätzung des Feuchtigkeitsgehalts des Laubes [76]..... 23
Tabelle 3.2	Details zum Sandbett-Brenner [106] 29
Tabelle 3.3	Ergebnisse der FireSafeGreen SBI-Tests 32
Tabelle 3.4	Ergebnisse der SBI-Wiederholungstests..... 41
Tabelle 3.5	Ergebnisse der elf SBI-Tests für verschiedene Living Walls 52
Tabelle 3.6	Ermittelten Versuchswerte nach EN 13823 [106]..... 53
Tabelle 3.7	Liste der wichtigsten Pflanzenmerkmale basierend auf [34], [37], [38], einem unveröffentlichten Dokument der Firma Vertiko und eigenen Recherchen 56
Tabelle 4.1	Beschreibung der einzelnen Versuchsaufbauten 62
Tabelle 4.2	Ermittelte Entzündungszeiten durch Strahlung in Abhängigkeit der Wärmestromdichte unterschiedlicher Versuchsreihen für Holz 71
Tabelle 4.3	Einfluss der Dicke auf die Entzündung von Fichtenholzpaneelen; basierend auf [210] 71
Tabelle 5.1	Übersicht über die acht Fassadenbrandversuche 76
Tabelle 5.2	: Beschreibung der einzelnen Versuchsaufbauten 77
Tabelle 5.3	Übersicht über die eingesetzten Wärmestromdichtesensoren inkl. deren Nennmessbereichen 88
Tabelle 5.4	Maximalwerte der Wärmestromdichte für die Wandversuchsreihe 119
Tabelle 5.5	Maximalwerte der Wärmestromdichte auf den Balkonen im Versuch V7 126
Tabelle 5.6	Übersicht über die Lüftungsöffnungen in der Prüfhalle und deren Öffnungsstatus 129
Tabelle 5.7	Testdaten und Wetterdaten..... 130
Tabelle 5.8	Liste der Versuche und Ergebnisse zum Bruch von Glas unter Brandeinwirkung..... 131

Anlage

Anlage 1: Pflanzensteckbriefe

Die Überblickstabelle der diversen Floraspezies soll eine prägnante Perspektive eröffnen und eine rasche Analyse der getätigten Auswahl an Botanika ermöglichen. Dennoch ist es unerlässlich, präzisere und weiterführende Daten zu jeder untersuchten Pflanzenart zu erlangen, um potentielle Verhaltensmuster im Brandfall adäquat zu kontextualisieren. Neben dem Schnellüberblick soll zudem einen tieferen Einblick in die verschiedenen Pflanzenarten gegeben werden, um ein möglichst großes Verständnis über die Pflanzenverwendung der Arten zu bekommen. Um dies zu erreichen werden einzelne Steckbriefe der jeweiligen Arten angefügt. Diese Steckbriefe beinhalten neben der Bebilderung und Nomenklatur auch Informationen zu Herkunft der Pflanzen, Erkennungsmerkmalen, Verwendung und teilweise auch Sortenempfehlung. In den Steckbriefen werden zudem Aspekte wie Blüte, Blattform, Bodenart und Standortpräferenz gründlich untersucht, was die zukünftige Anwendung bei der Fassadenbegrünung vereinfacht und effektiver gestaltet. Die Arten sind nach Alphabet geordnet und sollen speziell in diesem Kontext als Vertiefung in die derzeitige Pflanzenverwendung der Kletterpflanzenarten angesehen werden. [238]



Botanischer Name: *Actinidia arguta* (lateinisch *argutus* = spitzig)
Deutscher Name: Gelber Strahlengriffel (strahlig aufgespaltene Narbe)
Familie: Actinidiaceae (Strahlengriffelgewächse)

HERKUNFT:

Japan, China, Korea, Amurregion, in Auenwäldern, bis in Baumwipfel wachsend

ERKENNUNGSMERKMALE:

Höhe/Wuchs: 5-7 m hoch, Schlinger (rechstwindend), starkwüchsig, charakteristisch für *A. arguta* sind senkrecht nach oben sprießende Zweige („Wasserreiser“), Rankhilfe

Borke: glatte, purpurbraune Rinde, ist mit hellen Korkwarzen besetzt

Wurzel: Flachwurzler, auch tiefwurzelnd, stark verzweigt

Blatt: sommergrün, wechselständig, 8-10 cm lang, breit eirund mit lang ausgezogener Spitze, sehr dicht, dachziegelartig angeordnet, Blätter beiderseits glatt, glänzend dunkelgrün, derb, an weinroten Stielen, Herbstfärbung gelb, haftet lange

Blüte: Juni-Juli, zweihäusig, achselständige Scheindolden, am einjährigen Holz blühend, männliche Blüten zu mehreren, weibliche Blüten einzeln, weiß, etwa 2 cm groß, versteckt, leicht duftend
Früchte: September - Oktober, stachelbeerähnliche Früchte mit glatter essbarer Schale, länglich bis nahezu kugelig, 2 – 2,5 cm lang, gelbgrün, kahl, meist von üppigem Laub verdeckt, süßsauer, sehr hoher Vitamin C-Gehalt, erste Ernte aber erst nach 2-3 Jahren

VERWENDUNG:

Standort: **LB Artenreiche Wälder und Gehölzgruppen**, vollsonnig bis halbschattig, warme Lagen, windschattig, Wasserbedarf in der Wachstumsphase hoch, aber keine feuchten Standorte

Boden: nährstoffreiche, durchlässige und frische Böden, in der Regel trockenheitsempfindlich und Flachwurzler – vorteilhaft den Boden unter den Pflanzen zu mulchen oder zu unterpflanzen

Hinweise zur Verwendung: robust, ausgesprochen stadtklimafest, sehr frosthart, aber Winterschutz für Jungpflanzen im ersten Winter. Schnellwüchsige Kletterpflanze für Pergolen, stabile Zäune, Wände und starkwüchsige Bäume, alte Pflanzen verkahlen oft von unten (gelegentlich zurückschneiden). Obstgehölz (für Fruchtansatz männliche und weibliche Pflanzen erforderlich). Im Allgemeinen wird 1 männlicher Befruchter für 6-8 weibliche Pflanzen empfohlen. Der Mindestabstand zwischen einzelnen Pflanzen sollte 2,5 m nicht unterschreiten. Männliche Pflanzen wachsen in der Regel stärker und können die weiblichen

überwachsen, weshalb man sie in etwas größerer Entfernung pflanzen oder stärker schneiden sollte. Erntezeit im Herbst vor dem Frost. Die Ernte sollte von Hand erfolgen. Der Reifeprozess verläuft ungleichmäßig und erfolgt interessanterweise

schneller bei im Schatten hängenden Früchten. Man kann auch nicht völlig ausgereifte Früchte ernten (bester Zeitpunkt, wenn ungefähr 10 % der Früchte am Strauch weich sind) und sie bei Zimmertemperatur nachreifen lassen. Strahlengriffel sind langlebige Pflanzen, die über 100 Jahren werden können. Deshalb haben sie auch eine etwas längere Jugendphase. Die ersten Früchte kann man im 3-4 Standjahr erwarten. In den darauffolgenden Jahren wird der Ertrag stetig ansteigen. Es sind ideale Pflanzen für ökologischen Anbau, da bei richtiger Pflege fast keine Schädlinge und Krankheiten auftreten.

Hinweise zum Schnitt: Anfangs formender Schnitt, in späteren Jahren auf Früchten ausgelegt. Schnitt erhöht den Fruchtertrag. Blüten an diesjährigen Seitentrieben (entwickeln sich schon im Vorjahr). Sommerschnitt: Hauptgerüsttriebe jährlich um 1,5 – 2 m verlängern, fruchtende Seitentriebe auf 1 m einkürzen. Zudem Frühjahrsschnitt (vor Austrieb): abgetragene Seitentriebe auf 5 cm einkürzen.



Botanischer Name: *Actinidia deliciosa*, syn. *A. chinensis* (lateinisch *deliciosus* = köstlich)

Deutscher Name: Kiwi, Chinesischer Strahlengriffel (strahlig aufgespaltene Narbe)

Familie: Actinidiaceae (Strahlengriffelgewächse)

HERKUNFT:

Südchina, dort schon seit 1200 Jahren als Fruchtgehölz in Kultur, in China in Flusstälern angebaut

ERKENNUNGSMERKMALE:

Höhe/Wuchs: 6-8 m hoch, Schlinger mit strauchigem Wuchs (rechtswindend), auf guten Standorten starkwüchsig, braucht Rankhilfe

Borke: braun, Jungtriebe auffällig rotbraun behaart

Wurzel: Flachwurzler, auch tiefwurzelnd, stark verzweigt

Blatt: sommergrün, wechselständig, Blätter eiförmig oder rundlich, mehr oder weniger zugespitzt, oberseits dunkelgrün und kahl, unterseits dicht graufilzig behaart, Blatt langstielig, Blattstiel braunrot-filzig behaart

Blüte: Juni, zweihäusig, achselständige Scheindolden, am einjährigen Holz blühend, männliche Blüten zu mehreren, weibliche Blüten einzeln, gelblich weiß, im Verblühen cremefarben bis gelbbraun, 3-5 cm breit (bei Kultursorten größer)

Früchte: eiförmig, 3-5 cm lang (bei Kultursorten oft viel größer), braungrün, dicht mit bräunlichen Haaren bedeckt, angenehm süß, sehr hoher Vitamin C-Gehalt

VERWENDUNG:

Standort: **LB Steppengehölze und Trockenwälder**, geschützter Standort, reine Art nicht immer ausreichend frosthart, an geschützten Stellen aber problemlos verwendbar

Boden: nährstoffreiche, durchlässige und frische Böden, gegen Trockenheit empfindlich

Hinweise zur Verwendung: schnellwüchsige Kletterpflanze mit besonderer Blattschmuckwirkung für Südfassaden in geschützten Lagen (z.B. Wohnhöfe), für Pergolen, stabile Zäune, Wände und starkwüchsige Bäume, alte Pflanzen verkahlen oft von unten, Obstgehölz (für Fruchtansatz männliche und weibliche Pflanzen erforderlich, Schnitt erhöht Fruchtertrag, Früchte müssen vor dem ersten Frost geerntet werden)

Hinweise zum Schnitt: Blüten an diesjährigen Seitentrieben (entwickeln sich schon im Vorjahr) – Schnitt im Sommer und im Frühjahr vor dem Austrieb.

Sommerschnitt: Hauptgerüsttriebe jährlich um 1,5 – 2 m verlängern, fruchtende Seitentriebe auf 1 m einkürzen.

Frühjahrsschnitt: abgetragene Seitentriebe auf 5 cm einkürzen



Botanischer Name: *Akebia quinata* (lateinisch *quinatus* = fünfzählig)

Deutscher Name: Fingerblättrige Akebie, Fünfblättrige Akebie, Klettergurke

Familie: Lardizabalaceae (Lardizabalagewächse¹ / Fingerfruchtgewächse)

HERKUNFT:

China, Japan, Korea

ERKENNUNGSMERKMALE:

Höhe/Wuchs: 6-8 m hoch, Schlinger (rechtswindend), jung langsam wachsend, später raschwachsend, dicht verzweigt, mit dünnen zierlichen, anfangs violett überlaufenden Trieben

Wurzel: grobfaserig

Blatt: sommergrün, im Weinbauklima halbimmergrün, fünffingerig geteilt, lang gestielt, oberseits dunkelgrün, unterseits blaugrün, im Frühjahr früh austreibend, im Herbst lange anhaftend, spätfrostgefährdet

Blüte: April – Mai, erste Blüte nach 5-10 Jahren, einhäusig, weibliche Blüten purpurn, männliche Blüten hellpurpur bis rosa, duftend, Bienenweide

Früchte: September – Oktober, nierenförmige Balgfrüchte, gurkenähnlich, 10-15 cm lang, braunrot bis hellviolett, bereift, bei Vollreife aufplatzend, innen wie Wackelpudding, essbar, schmecken leicht süßlich, Vogelnährgehölz

VERWENDUNG:

Standort: sonnig bis halbschattig, geschützt, warm

Boden: sandig-humos, gut durchlässig (Boden vor der Pflanzung gut drainieren)

Hinweise zur Verwendung: **LB Gehölze kühl-feuchter Wälder**, Kletterpflanze für Spaliere und Zäune, Pergolen und

Lauben, bei Fassadenbegrünung Triebe leiten, auch in Sträuchern und Bäumen, Pflanzung im Frühjahr (frostgefährdet), junge Triebe anbinden, im Alter leicht unten verkahlend, Schnitt wird gut vertragen und fördert Wuchsdichte (am besten nach der Blüte), in rauen Lagen Winterschutz

Hinweise zum Schnitt: Systematischer Schnitt nicht notwendig, eingetrocknete Triebe vor dem Austrieb auslichten

¹ Lardizabala biternata = Schokoladenwein (Ranker aus Südafrika, mehrjährig, immergrün, 10 m hoch, bräunlich-schwarze Blüten)



Botanischer Name: *Aristolochia macrophylla* (lateinisch *macrophyllus* = großblättrig)

Deutscher Name: Große Pfeifenwinde

Familie: Aristolochiaceae (Osterluzeigewächse)

HERKUNFT:

Nordamerika, von Pennsylvania bis Georgia, in Bergwäldern

ERKENNUNGSMERKMALE:

Höhe/Wuchs: 6 – 10 m hoch, Schlinger (linkswindend), in Anwuchsphase erst zögernd wachsend, dann rasch- und starkwüchsig (1 m/Jahr und mehr), Triebe derb und zäh, verträgt starken Rückschnitt, etwas windempfindlich, sehr frosthart

Borke: Rinde grün, mit aromatischem Duft

Wurzel: dicke und fleischige Hauptwurzel, wenig verzweigt

Blatt: sommergrün, wechselständig, herzförmig bis nierenförmig, 10-30 cm lang, oberseits dunkelgrün, unterseits heller, papierartig glatt, dicht dachziegelartig angeordnet, bildet dichten Pflanzenvorhang, Blätter im Herbst lange anhaftend

Blüte: Juni-Juli, tabakspfeifenartig, 3-4 cm lang, außen gelbgrün, innen purpurbraun, lang gestielt

Früchte: gurkenartige Kapseln, unscheinbar, giftig, 10-20 cm lang, werden selten reif

VERWENDUNG:

Standort: **LB Auen- und Ufergehölze, LB Artenreiche Wälder und Gehölzgruppen**, halbschattig bis schattig (Westseite am besten), wenn reichlich Feuchtigkeit auch sonnig, empfindlich gegen Trockenheit und Hitze, sonst aber anpassungsfähig, braucht eine Rankhilfe

Boden: nährstoffreiche, frisch bis feuchte Böden, nicht zu trocken

Hinweise zur Verwendung: besonderes Blattschmuckgehölz, für Pergolen, an Drähten und stabilen Rankgerüsten, bei Lauben sehr stark schattend

Hinweise zum Schnitt: *Aristolochia* wächst bevorzugt senkrecht und verkahlt unten. Möchte man sie waagrecht ziehen, muss man sie durch Schnitt leiten.

Blattschmuckgehölz, Blüten bei der Verwendung weniger bedeutend – Schnitt im Frühjahr vor dem Austrieb (fördert starken Austrieb und die Ausbildung großer Blätter).

Erziehungsschnitt: im Frühjahr nach der Pflanzung alle Triebe auf ein bis zwei Knospenpaare einkürzen (fördert bodennahe Verzweigung).

Erhaltungsschnitt: kein jährlicher Schnitt mehr notwendig, nur wenn konkreter Anlass zu einer unten dicht belaubten großblättrigen Pflanze (Sichtschutz, Laubengang bewachsen lassen o.ä.). Dann ganze Pflanze jährlich auf 20 cm einkürzen.

Verjüngungsschnitt: im Frühjahr direkt vor Austrieb ganze Pflanze auf 20-40 cm einkürzen.



Botanischer Name: *Campsis radicans* (lateinisch *radicans* = wurzelbildend)

Deutscher Name: Trompetenblume

Familie: Bignoniaceae (Trompetenbaumgewächse)

HERKUNFT:

Südliche USA, Auengehölz entlang des Mississippi

ERKENNUNGSMERKMALE:

Höhe/Wuchs: 8-12 m, kräftiger Wurzelkletterer mit üppigem breitem Wuchs, Knotenwurzler (Haftwurzeln werden nur punktwise an den Knoten ausgebildet), Art ist Selbstklimmer (Sorten nicht immer selbstklimmend), Triebe hellbraun und etwas bruchgefährdet, entwickeln sich im Laufe der Jahre zu dicken Stämmen, im Alter Stämme längs abfasernd

Wurzel: Flachwurzler, nicht weitstreifend, fleischige Wurzeln

Blatt: sommergrün, gegenständig (Wisteria ist im Gegensatz dazu wechselständig), unpaarig gefiedert, bis 25 cm lang, hellgrün, Einzelblättchen elliptisch, deutlich gezähnt

Blüte: Juli – September, Trugdolden, Einzelblüten orange-rot, röhrig-trichterförmig, trompetenartig, 6-9 cm lang, erste Blüte nach 2-3 Jahren, in kalten und nassen Sommern keine Blüte

Früchte: ledrige Kapseln, 8-10 cm lang

VERWENDUNG:

Standort: **LB Auen- und Ufergehölze, LB Steppengehölze und Trockenwälder**, vollsonnig, warm und windgeschützt

Boden: anspruchslos, liebt warme, tiefgründige und sandig-humose Lehmböden, kalkliebend, bei Trockenheit gut wässern

Hinweise zur Verwendung: Kletterpflanze für Südfassaden und heiße Lagen, wichtiger Spätsommerblüher, Rückschnitt im Spätwinter fördert Verzweigung und Blütenfülle, regeneriert sich gut nach gelegentlichem Rückfrieren in strengen Wintern

Hinweise zum Schnitt: blüht an diesjährigen Seitentrieben, Blüten nur am jungen Holz – Schnitt im Frühjahr vor dem Austrieb.

Erhaltungsschnitt: im zeitigen Frühjahr die vorjährigen Triebe zurückschneiden und alles schwache Holz entfernen, Aufbau mit langlebigem Gerüsttrieb (jährlich um etwa 1 m verlängern) und Seitentrieben (auf ein bis zwei Knospenpaare einkürzen)

Besondere Sorten: *C. radicans* 'Flava' (gelborange), *C. radicans* 'Flamenco' (rosaorange), *C. x tagliabuana* 'Mme. Galen' (Hybride aus *C. radicans* x *C. grandiflora*, wächst etwas schwächer, blüht besonders großblütig orange, Winterhärtezone 6a)



Botanischer Name: *Clematis montana* var. *rubens* (lateinisch *montanus* = Berg-, *rubens* = rot)

Deutscher Name: Berg-Waldrebe, Anemonen-Waldrebe

Familie: Ranunculaceae (Hahnenfußgewächse)

HERKUNFT:

Kultivar aus Zentralchina, Himalayagebiet

ERKENNUNGSMERKMALE:

Höhe/Wuchs: 5 – 8 (-10) m hoch, Kletterpflanze, **Blattstielranker**, starkwachsend (kann jährlich 2-3 m² Spalierfläche bewachsen), lockerverzweigt

Wurzel: Flachwurzler, fleischige Wurzeln

Blatt: sommergrün, gegenständig, einfach bis doppelt gefiedert, meist 3-zählig, selten gefiedert, Einzelblättchen eilanzettlich, auffällig rötlich-brauner Austrieb, später dunkelgrün, rote Herbstfärbung, Blattstiel im mittleren Bereich krümmungsfähig

Blüte: Mai – Juni, reine Art blüht weiß, var. *rubens* blüht zartrosa, leicht duftend, erste Blüte nach 3-5 Jahren

Früchte: fruchtet nicht

VERWENDUNG:

Standort: **LB Gehölze kühl-feuchter Wälder, LB Gehölze der Hecken und Strauchflächen**, sonnig bis halbschattig, aber nicht vollsonnig, Wurzelfuß unbedingt beschatten

Boden: durchlässige, kalkhaltige, feuchte, aber keine nassen Böden, versagt auf trockenen Böden

Hinweise zur Verwendung: Kletterpflanze, in lichtschtigen Innenhöfen, Fassadenbegrünung an schmalen Stegen, an Ost- und Westfassaden, nicht an Nord- oder Südfassaden, an Spalieren, regeneriert sich gut nach gelegentlichem Rückfrieren in strengen Wintern

Hinweise zum Schnitt: gehört zu den frühblühenden Clematis-Arten, blüht an einjährigen Lang- und Seitentrieben (bildet seine Blütenknospen im Vorjahr) – Schnitt nach der Blüte. Erhaltungsschnitt:

Erhaltungsschnitt: Frühblühende Clematis bleiben über Jahre vital, ein jährlicher Schnitt ist nicht notwendig.

Verjüngungsschnitt: Wird Clematis montana var. *rubens* zu groß, nach der Blüte auf 30 - 60 cm zurückschneiden.



Botanischer Name: *Euonymus fortunei* (lateinsich *radicans* = wurzelbildend, *vegetus* = lebendig)

Deutscher Name: Kletterndes Pfaffenhütchen

Familie: Celastraceae (Spindelbaumgewächse)

HERKUNFT:

Himalaya und Ostasien (China, Japan, Korea), seit 1862 in Europa

ERKENNUNGSMERKMALE:

Höhe/Wuchs: 3-4 m hoch, Wurzelkletterer, in der Jugend bodenauffliegend und langsam wachsend; im Alter buschig aufrecht, dicht verzweigt und mittelstark wachsend

Borke: braungrau, Jungtriebe grün

Wurzel: Flachwurzler, dicht verzweigt

Blatt: immergrün, gegenständig, Heterophyllie (siehe unten)

Blüte: Juni – August, unscheinbar

Früchte: auffällig, Käppchen weiß/grün, Samen orange, giftig für Menschen, Vogelnährgehölz

VERWENDUNG:

Standort: **LB Artenreiche Wälder und Gehölzgruppen**, Jugendform sonnenunverträglich, halbschattig bis schattig (Ost-, Nordfassade); Altersform sonnig

Boden: leichte durchlässige nicht zu trockene Böden

Hinweise zur Verwendung: für Wände und Mauern, auch in Bäume kletternd

Hinweise zum Schnitt: Schnitt im Frühjahr vor dem Austrieb.

Erhaltungsschnitt: von Frost geschädigte Triebe auslichten, zu lange Triebe einkürzen.

Verjüngungsschnitt: verkahlte oder vergreiste Pflanzen bodennah einkürzen.

Wichtige Sorten:

E. fortunei var. *radicans* / *E. fortunei* 'Radicans' (Teppich-Spindelstrauch): Jugendform daumennagelgroß und dunkelgrün mit weißen Adern

E. fortunei var. *vegetus* / *E. fortunei* 'Vegetus' (Kletter-Spindelstrauch): Altersform mit breiteren, größeren, lederigen, hellgrünen Blättern

Form	Triebe	Sommerlaub	Winterlaub
var. <i>radicans</i>	elastisch	dunkel- bis schwarzgrün	rot gefärbt
var. <i>vegetus</i>	brüchig	hellgrün, breitere, größere Blätter	keine Färbung



Botanischer Name: *Fallopia baldschuanica*, syn. *Fallopia aubertii*, *Polygonum aubertii* (lateinisch *baldschuanicus* = Baldschuan- / Ortschaft in Tadschikistan)

Deutscher Name: Schling-Knöterich

Familie: Polygonaceae (Knöterichgewächse)

HERKUNFT:

Westchina, Himalaya-Gebiet, in Gebirgswäldern, eingebürgert in Mitteleuropa seit 19. Jahrhundert, teilweise verwildert

ERKENNUNGSMERKMALE:

Höhe/Wuchs: 10 – 15 m, Schlinger, sehr stark und dicht wachsend (bis 6 m/Jahr, schon in der ersten Vegetationsperiode 3-4 m/Jahr), vorhangähnlicher Wuchs, lange und dünne Triebe, oft auch lang überhängend

Borke: Triebe graubraun, zäh, verholzt, Jungtriebe karminrot, dünn, kahl

Wurzel: Flachwurzler, weitstreichend, fleischige Wurzeln

Blatt: sommergrün, wechselständig, eiförmig, Basis herzförmig, 4-9 cm lang, im Frühjahr rötlicher Austrieb, Herbstfärbung gelblich, lang haftend

Blüte: Juni – Oktober, weiße Rispen, leicht duftend, Blüte bereits ab dem 2. Standjahr, Dauerblüher, Bienenweide

Früchte: geflügelte Nüsschen, weißlich, fruchtet in Mitteleuropa selten, oft nicht ausreifend (Weinbauklima)

VERWENDUNG:

Standort: **LB Gehölze kühl-feuchter Wälder**, sonnig bis halbschattig, wind-, salz-, trockenheitsempfindlich

Boden: sehr anspruchslos an den Boden, bevorzugt feuchte, nährstoffreiche, lehmige Böden (Starkzehrer)

Hinweise zur Verwendung: robuster und schnellstwachsende Kletterpflanze nur für große Flächen, an Pergolen, Zäunen, großen Wandflächen/Lärmschutzwänden, lässt sich sowohl senkrecht, als auch horizontal ziehen, sollte von Anfang an geschnitten werden, verkahlt sonst stark von unten

Hinweise zum Schnitt: *Fallopia baldschuanica* blüht an diesjährigen Trieben – Schnitt immer im Frühjahr vor dem Austrieb.

Erhaltungsschnitt: jährlicher Schnitt nicht notwendig. Wenn Pflanze zu groß, im Frühjahr die gesamte Pflanze auf 20 cm einkürzen.

Verjüngungsschnitt: verkahlt im Alter immer mehr, im Frühjahr vor dem Austrieb die gesamte Pflanze auf 40-60 cm einkürzen (alte Triebe trockenen ein, doch Bildung von Jungtrieben, die auch schon im ersten Jahr blühen).



Botanischer Name: *Hedera helix* (lateinisch *helix* = windend)

Deutscher Name: Gewöhnlicher Efeu

Familie: Araliaceae (Araliengewächse)

HERKUNFT:

Westeuropa bis Südkandinavien, entlang von Flussläufen

ERKENNUNGSMERKMALE:

Höhe/Wuchs: 20 – 30 m, langsam wachsend, klettert mit Haftwurzeln, gleichmäßig dicht wachsend, im Alter raumbildend, je kälter das regionale Klima, umso eher bleibt er am Boden, Frosthärte durchschnittlich, je nach Sorte verschieden

Borke: Triebe grünlich-braun, später graubraun, Stamm im Alter mit Durchmesser bis 10 cm

Wurzel: oberflächennah wurzelnd, in Stammnähe bleibend, großer Anteil an Feinwurzeln, dicht verzweigt

Blatt: immergrün, wechselständig, je nach Alter verschiedenblättrig (Heterophyllie), Jugendform tief gelappt und kletternd, dunkelgrün mit oft weißlichen Blattnerve(n) (siehe Foto links), Altersform ungelappt und nicht mehr kletternd, rhombisch, heller grün, im Winter rotbraun, blühend und fruchtend (siehe Foto rechts)

Blüte: September-Oktober, gelb-grün, nur bei Altersform, kugelförmige Dolden

Früchte: Dezember, schwarz bereift, erbsengroß, lang haftend, giftig

VERWENDUNG:

Standort: **LB Artenreiche Wälder und Gehölzgruppen, LB Auen- und Ufergehölze**, sonnig bis halbschattig

Boden: nährstoffreiche, humose Böden, sauer - stark alkalisch, mäßig trocken - feucht

Hinweise zur Verwendung: großflächige Fassadenbegrünung an unbeschädigten Fassaden, Bienenweide und wichtiges Insektennährgehölz (sehr späte Blüte), für den Menschen giftig, aber im Winter wichtiges Vogelnährgehölz, robust, stadtklimaverträglich

Hinweise zum Schnitt: Schnitt nur zum Freihalten von Fenster, Türen und Regenrinnen notwendig. Bei einem Sommerschnitt sind die Haftwurzeln noch weich und lassen sich leichter vom Untergrund lösen. Brüten Vögel im Efeu, eher im zeitigen Frühjahr schneiden. Efeu lässt sich bei Bedarf im Frühjahr massiv verjüngen. Doch bleiben Teile der Haftwurzeln zurück und lassen sich nur mühsam abbürsten.

Wichtige Sorte: *H. helix* 'Arborescens' (die veredelte Altersform, blüht und fruchtet, wird ohne Gerüst ein 1,5 m hoher, immergrüner und robuster Strauch)



Botanischer Name: *Humulus lupulus* (lateinisch *lupulus* = Hopfen)

Deutscher Name: Gewöhnlicher Hopfen

Familie: Cannabaceae (Hanfgewächse)

HERKUNFT:

Wildform in Mitteleuropa nahezu überall verbreitet, etwas weniger im Alpenvorland, aber auch in den Allgäuer Alpen, in Auwäldern, aber auch an Waldrändern und in Gebüsch auf trockeneren Flächen

ERKENNUNGSMERKMALE:

Höhe/Wuchs: 4-6 m hoch, üppiger Schlinger (rechtswindend), eigentlich sommergrüne Staude, treibt jährlich aus tiefgehenden Wurzeln aus, langsames Anwachsen, später sehr raschwachsend (4-6 m pro Jahr), braucht Rankhilfe

Borke: Sprosssteile nicht verholzend, jung brüchig

Wurzel: Tiefwurzler, fleischiges Wurzelsystem, auch Ausläufer bildend

Blatt: sommergrün, herzförmig, 3- bis 5-lappig, bis 15 cm groß, rau behaart bis borstig

Blüte: Juli – August, zweihäusig, weibliche in grünlichen zapfenartigen Ähren, männliche in unscheinbaren Rispen

Früchte: grüne, zapfenartige, hängende Schließfrüchte, nur an weiblichen Pflanzen; Grundstoff zur Bierherstellung

VERWENDUNG:

Standort: **LB Auen- und Ufergehölze**, sonnig - schattig, zeitweise Überschwemmungen

Boden: sehr anspruchslos, auf fast jedem Boden, bevorzugt an stickstoffreichen Standorten mit höherer Bodenfeuchte

Hinweise zur Verwendung: Kultursorten für die Bierherstellung angebaut (in Hopfenkulturen werden nur weibliche Pflanzen angebaut, sind männliche Pflanzen aus Gründen des Sortenerhalts verboten. Zudem verringert eine Befruchtung durch den Pollen männlicher Pflanzen den Ertrag an Bierwürze, verkürzt das Erntezeitfenster (überreife Hopfenblüten schmecken unangenehm) und erschwert die Verarbeitung in der Brauerei. In Garten und Park ist Hopfen ein guter Schnellbegrüner von Wänden, Masten oder Baumstämmen, kann mit seinen borstigen Trieben auch ohne Hilfe an Holzmasten hochklettern. Hierbei kann die mehrjährige Schlingpflanze aber andere, teilweise schon recht große Pflanzen abwürgen. Wegen seines weitverzweigten Wurzelwerkes ist es schwierig Hopfen zu beseitigen. Er kann im Garten durch seine Ausläuferbildung lästig werden. Früchte hängen noch im Winter.

Hinweise zum Schnitt: Sprosse frieren jährlich bis auf den Grund zurück (Staudencharakter), im Frühjahr vor dem Austrieb ganz zurückschneiden.

Sorte: *Humulus lupulus* 'Aureus' (schwächer, 3-4 m hoch, gelblichgrüne Blätter)



Botanischer Name: *Hydrangea anomala* ssp. *petiolaris*, syn. *Hydrangea petiolaris* (lateinisch *petiolatus* = mit gestielten Blättern, *petiolaris* = blattstielständig)

Deutscher Name: Kletter-Hortensie

Familie: Hydrangeaceae (Hortensiengewächse)

HERKUNFT:

Japan, Südkorea, Taiwan, in Wäldern, subalpinen Hochmooren, Gewässernähe

ERKENNUNGSMERKMALE:

Höhe/Wuchs: 8 - 10 m, Wurzelkletterer, baut ein starkes Gerüst auf, das auch nach Jahren nicht vergeist. Haftet mit Luftpfeilern, zusätzlich leicht windend, in den ersten Jahren zögernd wachsend, später starkwüchsig, (bis 1 m/Jahr), auf der lichtabgewandten Seite der Triebe Haftwurzeln. Haben Probleme mit selbständigem Klettern an sehr weißen oder sehr glatten Wänden oder an Wandfarben mit Anti-Algen-Zusatz.

Borke: Triebe rötlichbraun, leicht glänzend

Wurzel: Herzwurzler, dicht verzweigt und mitteltief wurzelnd, viele oberflächennahe Feinwurzeln, oft oberflächennah verfilzend

Blatt: sommergrün, gegenständig, herzförmig zugespitzt, besonders langer Blattstiel (bis 15 cm lang), grob gezähnt, früh austreibend, frischgrün, gelbe Herbstfärbung

Blüte: Juni-Juli, flache Doldenrispen mit großen, weißen, sterilen Randblüten, innen kleine grünliche fruchtbare Blüten, duftend, erste Blüte erst nach ein paar Jahren

Früchte: klein unscheinbar, braune Kapsel

VERWENDUNG:

Standort: **LB Gehölze kühl-feuchter Wälder**, sonnig bis schattig, kühle, luftfeuchte Lagen, extrem frosthart, zählt zu den härtesten Kletterpflanzen Nord- und Ostfassaden

Boden: frisch, humos, locker und gut durchlässig, bevorzugt sauer bis neutrale Böden, empfindlich gegen Oberflächenverdichtung

Hinweise zur Verwendung: Bodendecker und Kletterstrauch an rauen Wänden, Zäunen, Pergolen, an reinweißen Wänden schlecht haftend (Spalier)

Hinweise zum Schnitt: Die Haftwurzeln sind nur einige Wochen lebensfähig und verholzen anschließend. Einmal gelöste Triebe können sich deshalb nur durch Neuzuwachs mit der Rankhilfe verbinden. *Hydrangea anomala* ssp. *petiolaris* blüht an einjährigen Seitentrieben – Schnitt immer direkt nach der Blüte im Sommer.

Erhaltungsschnitt: eine systematische Erziehung ist nicht nötig.

Verjüngungsschnitt: *Hydrangea anomala* ssp. *petiolaris* verjüngt man im Frühjahr vor dem Austrieb. Überlange Seitentriebe einkürzen, evtl. auch Gerüsttriebe um die Hälfte bis zwei Drittel einkürzen (regt Wachstum stark an).



Botanischer Name: *Jasminum nudiflorum* (lateinisch *nudiflorus* = nacktblütig)

Deutscher Name: Winter-Jasmin

Familie: Oleaceae (Ölbaumgewächse)

HERKUNFT:

Nordchina, Ostasien

ERKENNUNGSMERKMALE:

Höhe/Wuchs: 2-4 m hoch und breit, Kletterpflanze, Spreizklimmer, mit langen, rutenförmigen Trieben, entweder aufrecht an Bäumen, Mauern und Gerüsten oder kriechend, in den ersten Jahren langsam wachsend, später mittelstark wachsend, Bodentrieben können wurzeln und Kolonien bilden

Borke: Triebe schlank, kantig, jung grün, später grau

Wurzel: Flachwurzler

Blatt: sommergrün bis halbbimmergrün (Blätter fallen oft erst im Frühling ab), gegenständig, dreizählig gefiedert, Einzelblättchen lanzettlich, etwa 3 cm groß, oberseits glänzend

Blüte: ab November/Dezember mit Unterbrechung bis März/April (je nach Klima und Witterung), leuchtendgelb, duftend, an den vorjährigen Trieben, erste Blüte etwa ab 5. Standjahr, Blüten forsythienähnlich, aber 5-6 Blütenblätter (Forsythien haben 4 Blütenblätter)

Früchte: schwärzliche, unscheinbare Beeren

VERWENDUNG:

Standort: **LB Steppengehölze und Trockenwälder**, sonnig bis halbschattig, warme und geschützte Lagen (möglichst Süd- oder Westseite), stadtklimafest, hitzefest, windfest

Boden: nährstoffreiche, frische Böden, in mageren oder trockenen Böden sind Wachstum und Blütenbildung etwas eingeschränkt, sandig-humose und gut drainierte Böden, sehr empfindlich gegen auch nur vorübergehende Staunässe

Hinweise zur Verwendung: wertvoller Winterblüher, Insektennährgehölz, an Spalieren oder Drähten (muss regelmäßig angebunden werden), auch über Mauerkronen hängend oder an steilen Böschungen, gut für Dachgärten und in Höfen, möglichst Frühjahrspflanzung, im Frühh Herbst gründlich wässern, Verjüngungsschnitt nach der Blüte fördert die Blühwilligkeit

Hinweise zum Schnitt: blüht an einjährigen Trieben - Schnitt nach der Blüte, jährlicher oder zweijähriger Schnittrhythmus, überhängende Seitentriebe auf ein Knospenpaar einkürzen.



Botanischer Name: *Lonicera henryi*
Deutscher Name: Immergrünes Geißblatt
Familie: Caprifoliaceae (Geißblattgewächse)

HERKUNFT:

Westchina

ERKENNUNGSMERKMALE:

Höhe/Wuchs: 3-4 (-6) m hoch, schwachwindend (rechtswindend), in den ersten Jahren schwachwüchsig, später starkwüchsig

Borke: Zweige kahl, glänzend braun, Triebe dicht behaart

Wurzel: Flachwurzler, stark verzweigt, oberflächennah und auch tiefgehend

Blatt: immergrün (in strengen Wintern auch Laubfall), gegenständig, lang-lanzettlich, 4-9 cm lang, zugespitzt, üppig

Blüte: Juni-August, rötlich bis gelblich rot, unauffällig, am einjährigen Holz blühend, duftlos, erste Blüte nach 5-8 Jahren

Früchte: ab August, schwarze, blau bereifte Beeren, leicht giftig

VERWENDUNG:

Standort: **LB Steppengehölze und Trockenwälder**, halbschattig bis schattig, etwas geschützt, stadtklima-, wind-, hitzeverträglich,

aber keine Trockenheit vertragend, mäßig frosthart (guter Durchtrieb nach Schädigungen)

Boden: anspruchslos, bevorzugt nährstoffreiche Böden, frisch bis feucht, an trockenen Standorten Läuse, keine Staunässe vertragend

Hinweise zur Verwendung: an Pergolen, Mauern und Zäunen, in Innenhöfen, gut für Fassadenbegrünung (Süd-/Westfassaden, auch an Nordseiten), Dachgärten, Kletterhilfe notwendig

Hinweise zum Schnitt: Lonicera blühen vorwiegend an einjährigen Trieben – Schnitt im Frühjahr vor dem Austrieb (verblühte Triebe aus dem Vorjahr entfernen).

Erhaltungsschnitt: Eine gezielte Erziehung ist bei Lonicera nicht notwendig. Bei starkwüchsigen Arten ineinander geschlungene Triebknäule auslichten.

Verjüngungsschnitt: Wenn Lonicera unten verkahlt oder zu groß wird, die ganze Pflanze kurz vor dem Austrieb auf 50 cm einkürzen und düngen/wässern.



Botanischer Name: *Lonicera periclymenum* (lateinisch *periclymenus* = herumrankend)

Deutscher Name: Wald-Geißblatt

Familie: Caprifoliaceae (Geißblattgewächse)

HERKUNFT:

Mitteleuropa bis Nordafrika, in Deutschland vor allem in Westdeutschland und Norddeutschland, als Unterwuchs in Eichen-Buchenwäldern, aber auch in EichenHainbuchenwäldern und in Auwäldern

ERKENNUNGSMERKMALE:

Höhe/Wuchs: 3-6 (-10) m hoch, Schlinger (rechtswindend), mittelstark- bis starkwachsend, Triebe bis 5 m lang

Borke: Triebe rötlich überlaufend

Wurzel: Flachwurzler, stark verzweigt, oberflächennah und auch tiefgehend

Blatt: sommergrün, eiförmig bis elliptisch, 4-6 cm lang, oberseits dunkelgrün, unterseits blaugrün, an kurzen Stielen und am Stiel etwas stengelumfassend, im Gegensatz zur ebenfalls heimischen *L. caprifolium* Endblätter an den Zweigenden nicht verwachsen !

Blüte: Mai – Juni/Juli, gelblich-weiß, außen rötlich, am einjährigen Holz blühend, sehr stark duftend, vor allem in der Dämmerung und bei Nacht, Nachtfalterblume, starke Nektarproduktion, Bestäubung durch Nachtfalter und Eulen

Früchte: dunkelrote, kugelige Beeren, schwach giftig

VERWENDUNG:

Standort: **LB Artenreiche Wälder und Gehölzgruppen**, halbschattig bis schattig, windgeschützt, Frosthärte mäßig (empfindlicher)

Boden: anspruchslos, aber frische bis feuchte Böden, kalkmeidend, bevorzugt lehmighumose Böden

Hinweise zur Verwendung: an Pergolen, Mauern und Zäunen, in Innenhöfen, gut für Fassadenbegrünung (nicht an Südfassaden, sondern Ost-/Nordseiten), Kletterhilfe notwendig

Hinweise zum Schnitt: *Lonicera* blühen vorwiegend an einjährigen Trieben – Schnitt im Frühjahr vor dem Austrieb (verblühte Triebe aus dem Vorjahr entfernen).

Erhaltungsschnitt: eine gezielte Erziehung ist bei *Lonicera* nicht notwendig Bei starkwüchsigen Arten ineinander geschlungene Triebknäule auslichten.

Verjüngungsschnitt: Wenn *Lonicera* unten verkahlt oder zu groß wird, die ganze Pflanze kurz vor dem Austrieb auf 50 cm einkürzen und düngen/wässern.



Botanischer Name: *Parthenocissus quinquefolia* (lateinisch *quinquefolius* = fünfblättrig)

Deutscher Name: Amerikanischer Wilder Wein

Familie: Vitaceae (Weinrebengewächse)

HERKUNFT:

Östliches Nordamerika, an Waldrändern, überzieht andere Gehölze

ERKENNUNGSMERKMALE:

Höhe/Wuchs: 10-15 (-20) m hoch, Kletterpflanze, **Haftscheibenranker**, in der Jugendphase raschwüchsig (1-2 m/Jahr), klettert aber weniger gut, locker flächendeckend, einzelne Triebe rund, locker abstehend und überhängend

Borke: junge Triebe rötlich, später hellbraun

Wurzel: Tiefwurzler und weitstreichend, fleischige Wurzeln

Blatt: sommergrün, wechselständig, 5-zählig, handförmig gefiedert, Einzelblättchen 6-12 cm Durchmesser, im Frühjahr Austrieb rötlich, Herbstfärbung leuchtend rot bis karmin, früh (ab September), intensiv und kurz, nur eine Woche lang

Blüte: Juni – August, weiß-grünliche, unscheinbare Rispen, schwach duftend, unter dem Laub

Früchte: blauschwarze, kaum bereifte Beeren, ungenießbar, mit rotem Stiel, erst nach Laubfall sichtbar

VERWENDUNG:

Standort: **LB Auen- und Ufergehölze**, sonnig bis halbschattig (je sonniger, um so intensiver die Herbstfärbung)

Boden: anspruchslos, auf jedem nicht zu trockenen Boden, sogar auf salzhaltigem Dünen sand, kalktolerant

Hinweise zur Verwendung: Begrünung von Fassaden, Mauern, Zäunen, Lärmschutzwänden, Bienenweide und Vogelnährgehölz

Hinweise zum Schnitt: ein gezielter Erziehungsschnitt ist bei *P. quinquefolia* nicht notwendig.

Verjüngungsschnitt: *P. quinquefolia* lässt sich im Frühjahr vor dem Austrieb verjüngen (fast die ganze Pflanze einkürzen).

Wichtige Sorte: *P. quinquefolia* '*Engelmannii*' (Engelmanns-Wein, wie Art, ebenso wüchsig, aber wesentlich besser anhaftend, echter Selbstklimmer, auch an glatten Wänden, mit etwas kleineren Blättern, Einzelblättchen länger und schmaler als bei der Art, Blattrand sehr scharf und regelmäßig gesägt, Blattstiele länger)



Botanischer Name: *Parthenocissus tricuspidata* (lateinisch *tricuspidatus* = dreispitzig)

Deutscher Name: Dreilappiger Wein

Familie: Vitaceae (Weinrebengewächse)

HERKUNFT:

Japan, China und Korea

ERKENNUNGSMERKMALE:

Höhe/Wuchs: 10-15 m, Kletterpflanze, **Haftscheibenranker**, langsames Anwachsen, dann raschwüchsig (1-2 m/Jahr), wächst flächig, gleichmäßig dichter grüner Teppich, dünntriebig und fächerartig verzweigt, Luftwurzeln und lichtfliehende Triebe

Borke: junge Triebe braunrot, später braungrau

Wurzel: Tiefwurzler und weitstreichend, fleischige Wurzeln

Blatt: sommergrün, wechselständig, Heterophyllie: Jugendform ungelappt, Altersform dreilappig mit zugespitzten Lappen (ahornartig), langgestielt, glänzend, im Frühjahr Austrieb bronzefarben, Herbstfärbung orange gelb bis scharlachrot, Laub fällt früher als bei *P. quinquefolia*

Blüte: Juni – Juli, gelbgrüne, endständige Rispen unter dem Laub, unauffällig

Früchte: kugelige, blauschwarze, bereifte Beeren, erbsengroß, mit rotem Stiel, erst nach dem Laubfall sichtbar werdend

VERWENDUNG:

Standort: **LB Gehölze kühl-feuchter Wälder**, sonnig bis halbschattig, wärmeliebend, stadtklimafest, windfest, kann in sehr strengen Wintern leiden, überwächst sich aber schnell wieder

Boden: sehr anspruchslos, verträgt auch vorübergehende Trockenheit, kalktolerant

Hinweise zur Verwendung: Begrünung von Fassaden, Mauern, Zäunen, Lärmschutzwänden, auch an vollkommen glatten Wänden, Bienenweide und Vogelnährgehölz

Hinweise zum Schnitt: ein gezielter Erziehungsschnitt ist nicht notwendig.

Verjüngungsschnitt: *P. quinquefolia* lässt sich im Frühjahr vor dem Austrieb verjüngen (fast die ganze Pflanze einkürzen).

Wichtige Sorte: *P. tricuspidata* 'Veitchii' (Veitchii-Wein, ist eine Jugendform von *Parthenocissus tricuspidata*, sehr häufig, Blätter 7-10 cm groß, eiförmig bis dreilappig, am Außenrand schwach gezähnt)



Botanischer Name: Rosa (Rambler Rose) (Englisch to ramble = umherschweifen)

Deutscher Name: Ramblerrose

Familie: Rosaceae (Rosengewächse)

HERKUNFT:

Europa, China

ERKENNUNGSMERKMALE:

Höhe/Wuchs: bis zu 10 m, Kletterpflanze, **Spreizklimmer (Gerüstkletterpflanze)**, lange, weiche und biegsame Triebe, die an Lianen erinnern und geeignet sind für Pergolen und Klettergerüste; von buschig bis kriechend wachsend

Borke: junge Triebe frisch grün, später braun verholzt

Wurzel: Tiefwurzler und weitstreichend, fleischige Wurzeln

Blatt: sommergrün, grau-grüne Farbe mit eiförmiger Blattform und gesägtem Blattrand

Blüte: Mai – Juni, viele kleine Blütenbüschel in verschiedenen Farben

VERWENDUNG:

Standort: **LB Gehölze kühl-feuchter Wälder**, sonnig bis halbschattig, wärmeliebend, stadtklimafest, windfest, kann in sehr luftigen Standorten wachsen, damit die Blätter von der Feuchtigkeit schnell abtrocknen (Mehltaubefall)

Boden: nährstoffreich, durchlässig bis humos und frischer Gartenboden aber auch Frosthart

Hinweise zur Verwendung: Begrünung von Fassaden, Mauern, Zäunen, Lärmschutzwänden

Hinweise zum Schnitt: ein gezielter Erziehungschnitt ist nicht notwendig.

Verjüngungsschnitt: lässt sich im Frühjahr vor dem Austrieb verjüngen (fast die ganze Pflanze einkürzen).

Wichtige Sorte: ‚Lykkefund‘, ‚Bobbie James‘, ‚Flammentanz‘, ‚Guirlande Rose‘/Guirland d'Amour‘, ‚Paul's Himalayan Musk‘, ‚Rambling Rector‘



Botanischer Name: *Vitis vinifera subsp. vinifera* (lateinisch *vinifera* = weintragend)

Deutscher Name: Kultur-Weinrebe

Familie: Vitaceae (Weinrebengewächse)

HERKUNFT:

nur aus Kultur bekannt

ERKENNUNGSMERKMALE:

Höhe/Wuchs: je nach Rebsorte bis 15 m, **Sprossranker**, Wüchsigkeit je nach Rebsorte mittel bis stark (1-2 m pro Jahr), frosthärteempfindlich je nach Rebsorte, im Gegensatz zu *Parthenocissus* ist bei *Vitis* das Mark ausgereifter Triebe braun, Ranken immer ohne Haftscheiben

Borke: graubraun, im Gegensatz zu *Parthenocissus* fasert bei *Vitis* die Rindenborke in Streifen lang ab

Wurzel: Tiefwurzler, intensives Wurzelsystem

Blatt: sommergrün, wechselständig, gelappt, langgestielt, stärker behaarte Blätter als Wildrebe, dickere Zweige, Herbstfärbung gelb

Blüte: Juni, **im Gegensatz zu *Vitis sylvestris* insektenblütig und einhäusig**, in 5 – 8 cm langen Rispen, duftend, meist von Blättern verdeckt

Früchte: essbare 2-4-samige Beeren in Trauben, je nach Rebsorte weiß oder rot

VERWENDUNG:

Standort: **LB Auen- und Ufergehölze**, sonnig, gut gießen (sonst Mehltau)

Boden: lehmig-humose, frische Böden

Hinweise zur Verwendung: alte Kulturpflanze, viele Sorten, vor allem in Weinbaugebieten und klimatisch begünstigten Gebieten, doch auch in rauerer Lagen kleinfrüchtige Sorten, die einen besonders geschützten Standort verlangen, an Spanndrähnen, Stäben, stabilen Rankgerüsten, Fassadenbegrünung ausschließlich Südfassaden, Triebe festbinden, regelmäßiger Schnitt erhöht den Ertrag. Klassische Sorten sind gegenüber Pilzkrankheiten empfindlich, doch gibt es auch resistente Sorten (z.B. '*Bianca*', '*Muscat Bleu*', '*Phoenix*').

Hinweise zum Schnitt: Weinreben bilden ihre Blütenanlagen bereits im Vorjahr, obwohl die Blüten im Bereich diesjähriger Triebe sitzen. Reben werden in waagerechten Gerüsttrieben gezogen. **Sommerschnitt:** Mitte oder Ende Juli hat der Trieb 10-15 Blätter entwickelt. Trieb einkürzen auf 2-4 Blätter über der letzten Traube, damit im Sommer die Energie nicht in übermäßiges Triebwachstum, sondern in die Früchte fließt. Neutriebe regelmäßig ausbrechen. **Frühjahrsschnitt:** Gerüsttriebe waagrecht länger belassen, Seitentriebe auf zwei Knospen zurückschneiden (Entwicklung von Fruchttrieben).



Botanischer Name: *Vitis coignetiae*
Deutscher Name: Scharlach-Wein, Rostrote Rebe
Familie: Vitaceae (Weinrebengewächse)

HERKUNFT:
Japan, Korea

ERKENNUNGSMERKMALE:

Höhe/Wuchs: 6 - 8 m hoch, starkwüchsig (2-4 m pro Jahr), mit starken Trieben, die rostrot behaart sind, **Sprossranker**, winterhart, im Gegensatz zu Parthenocissus das Mark ausgereifter Triebe braun, Ranken immer ohne Haftscheiben
Borke: graubraun, im Gegensatz zu Parthenocissus fasert bei Vitis die Rindenborke in Streifen lang ab
Wurzel: Tiefwurzler, intensives Wurzelsystem
Blatt: sommergrün, wechselständig, riesige Blätter, 20-30 cm lang, schwach gelappt, Blattbasis herzförmig, Blatt oberseits grün, unterseits rostbraun-filzig, wie Dachschildeln angeordnet, Herbstfärbung auffallend scharlach- bis karminrot
Blüte: Juni-Juli, grün, zweihäusig, in 5-8 cm langen, schmalen Rispen, duftend, meist von Blättern verdeckt
Früchte: schwarz-purpurn bereifte, etwa 1 cm dicke Beeren in Trauben, nicht essbar

VERWENDUNG:

Standort: **LB Gehölze kühl-feuchter Wälder**, auch sonnig, bevorzugt aber halbschattig bis schattige Standorte, Südwände, nährstoffbedürftig, windempfindlich, braucht eine Rankhilfe
Boden: lehmig-humose, frische Böden, tiefgründig
Hinweise zur Verwendung: für Pergolen, Wände und Mauern, dichte Blattvorhänge, verkahlt nicht, Blattschmuckgehölz
Hinweise zum Schnitt: gehört zu den Blattschmuckgehölzen (Blüte und Frucht eher unerheblich), ein regelmäßiger Schnitt fördert die Vitalität – Schnitt im Frühjahr vor dem Austrieb mit langem Gerüsttrieb und kurzen Seitentrieben.
Erhaltungsschnitt: Gerüsttriebe Jahr für Jahr länger lassen, Seitentriebe jährlich auf 10 cm einkürzen.



Botanischer Name: *Wisteria sinensis* (lateinisch *sinensis* = chinesisch)
Deutscher Name: Chinesischer Blauregen, Chinesische Glyzine
Familie: Fabaceae / Leguminosae (Schmetterlingsblütler, Hülsenfrüchtler)

HERKUNFT:

China, Schwemmsandböden

ERKENNUNGSMERKMALE:

Höhe/Wuchs: 8-10 (-15) m hoch, langsames Anwachsen, nach 3-4 Jahren stark wachsend, strauchig wachsender Schlinger (linkswindend), mit langen, dünnen, biegsamen, grauen Trieben, im Alter hart, zäh, knorrig, kann Fallrohre abdrücken

Borke: graubraun

Wurzel: Tiefwurzler, fleischige Wurzeln sehr weit ausgebreitet

Blatt: sommergrün, wechselständig, unpaarig gefiedert, etwas kleiner als bei *W. floribunda*, 7-13 Einzelblättchen am Blattgrund keilförmig, eckiger Blattstiel, späte Herbstfärbung graugelb bis gelb, Laub haftet lange

Blüte: April - Mai, Blüte vor der vollen Entfaltung der Blätter (!), in 15 bis 25 cm langen, hängenden Trauben an Kurztrieben, violettblau, duftend, Blüten einer Traube fast gleichzeitig blühend, Rückschnitt fördert Blüte

Früchte: 10-15 cm lange, grüne Hülsen, samtig behaart, nach dem Aufspringen sich oft spiralig verdrehend

VERWENDUNG:

Standort: **LB Auen- und Ufergehölze**, sonnig bis halbschattig, warme, geschützte Lage (ist durch die frühe Blüte etwas spätfrostgefährdeter als *W. floribunda*)

Boden: sandig-lehmiger Boden, bevorzugen sauer bis neutrale Böden, frisch bis feucht, genügend Feuchtigkeit, aber durchlässig, keine Staunässe und keine Bodenverdichtung (!), nährstoffreiche Böden (Starkzehrer)

Hinweise zur Verwendung: sehr starkwüchsig, daher für Spaliere und Zäune weniger geeignet, eher für Pergolen und Laubengänge, Fassaden und Wände, auch an älteren Bäumen, als Kletterhilfen Spanndrähte oder Metallgerüste, kein Holz (kann vom sekundären Dickenwachstum zerdrückt werden), Insektennährgehölz, ganze Pflanze für den Menschen giftig, Sämlingspflanzen oft blühfaul, veredelte Formen verwenden

Hinweise zum Schnitt: blüht an ein- bis mehrjährigen Kurztrieben – Schnitt nach der Blüte.
Erhaltungsschnitt: Aufbau mit langlebigem Gerüsttrieb (jährlich um höchstens 1 m verlängern) und Seitentrieben (auf 30 cm einkürzen). Zusätzlich zum Sommerschnitt ein Frühjahrschnitt möglich: direkt vor dem Austrieb die 30 cm langen Seitentriebe auf 10 cm einkürzen (Entwicklung von Köpfen mit vielen Kurztrieben)

Anlage 2: Temperatur-Zeit-Diagramme der Großversuche

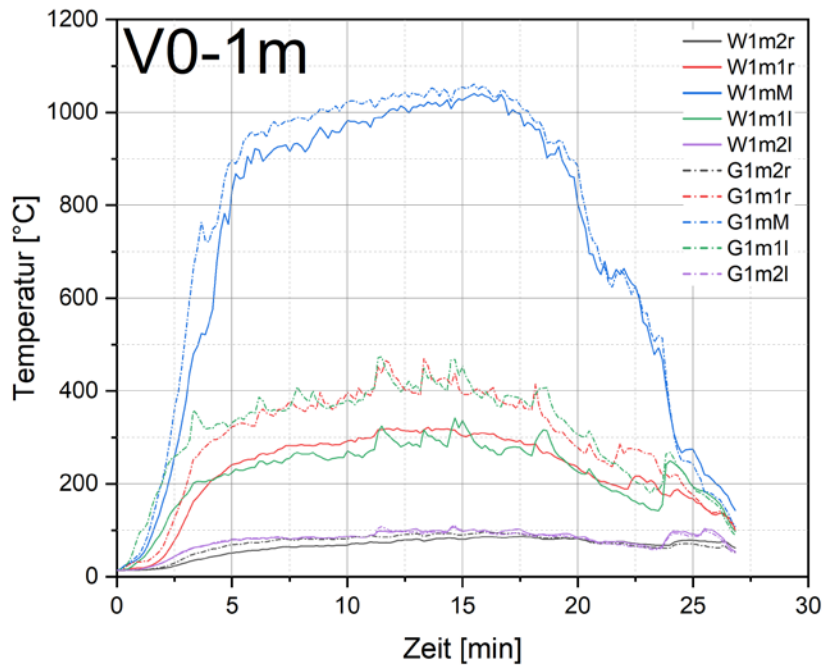


Abbildung A2.1: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 1,0 m für V0

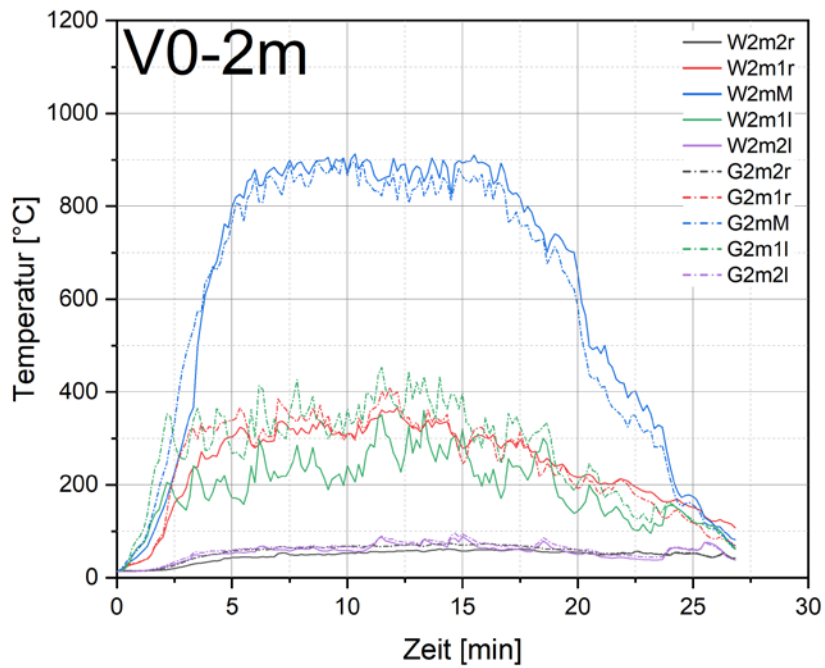


Abbildung A2.2: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 2,0 m für V0

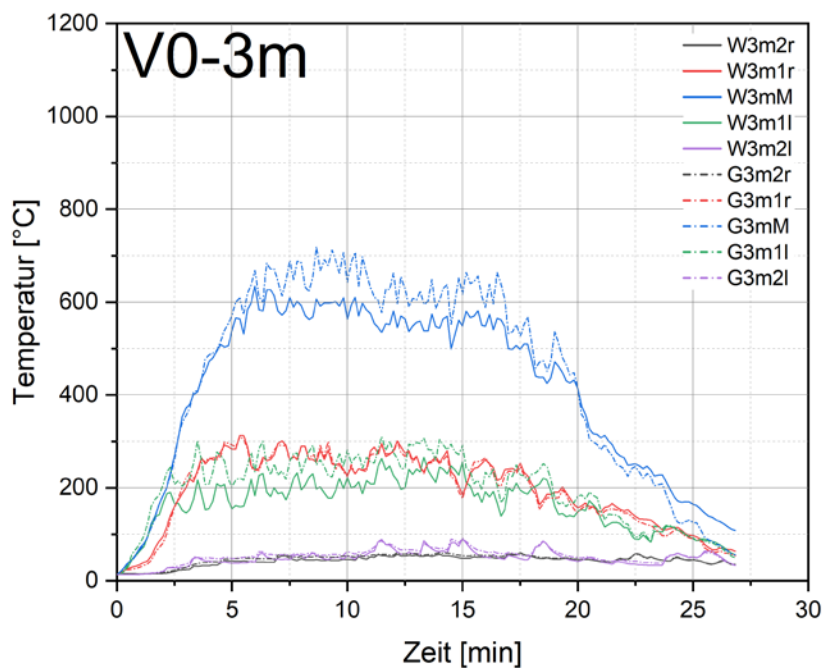


Abbildung A2.3: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 3,0 m für V0

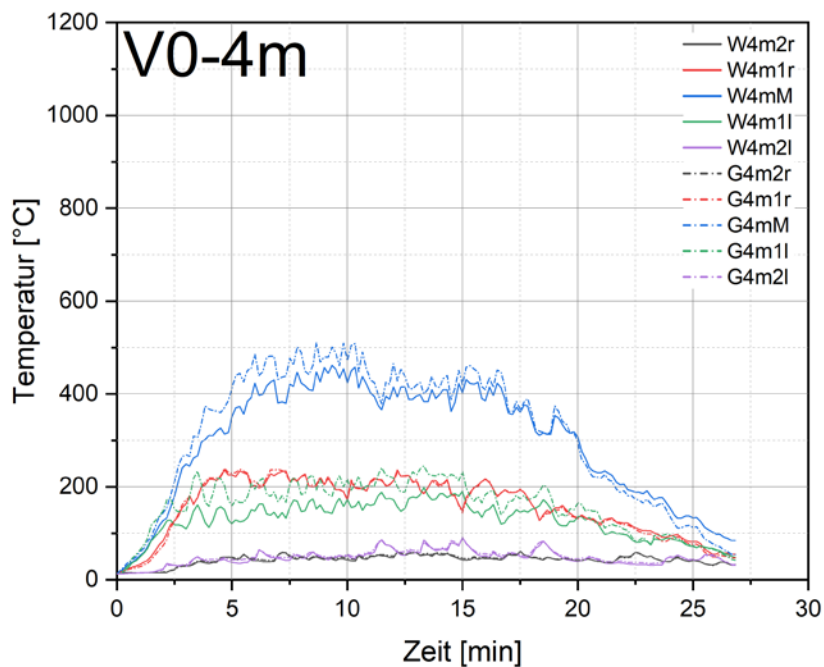


Abbildung A2.4: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 4,0 m für V0

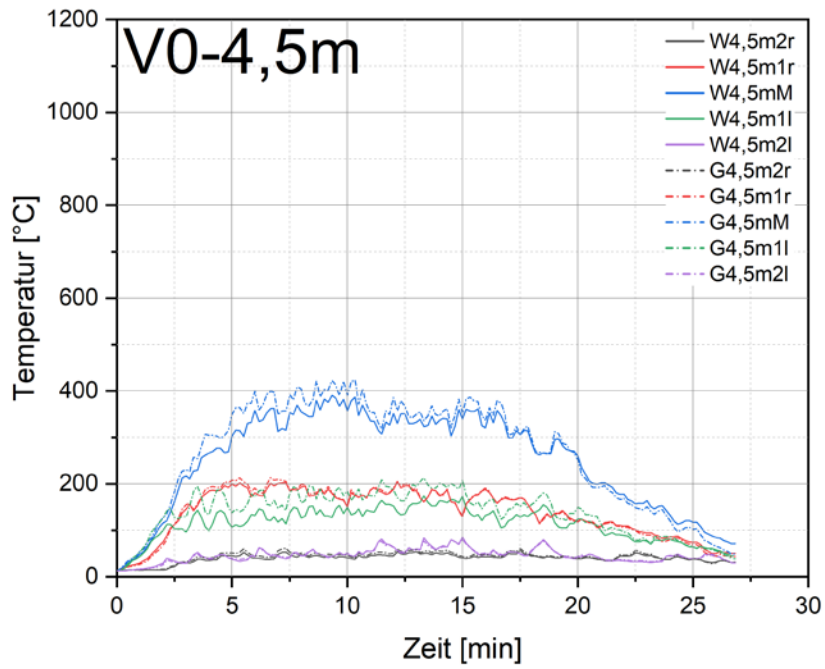


Abbildung A2.5: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 4,5 m für V0

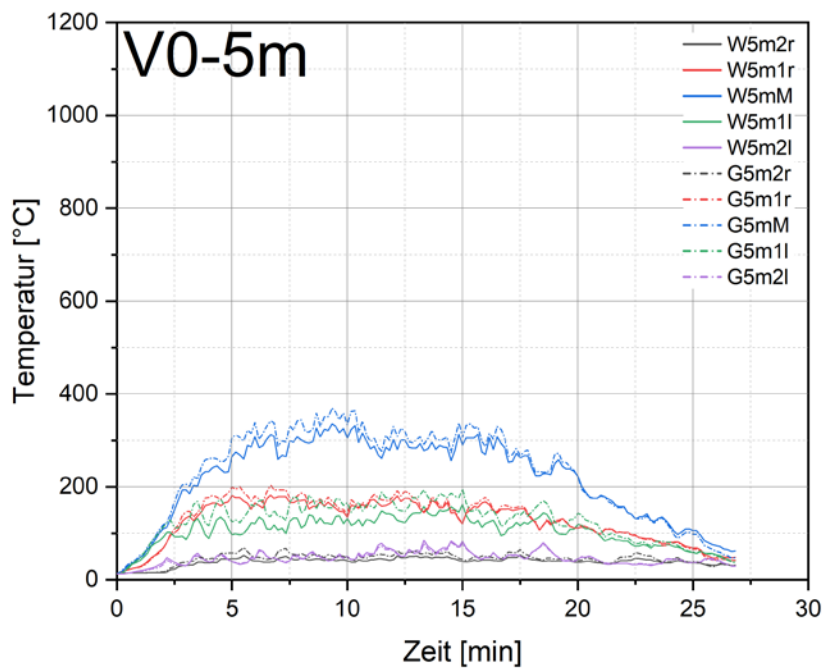


Abbildung A2.6: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 5,0 m für V0

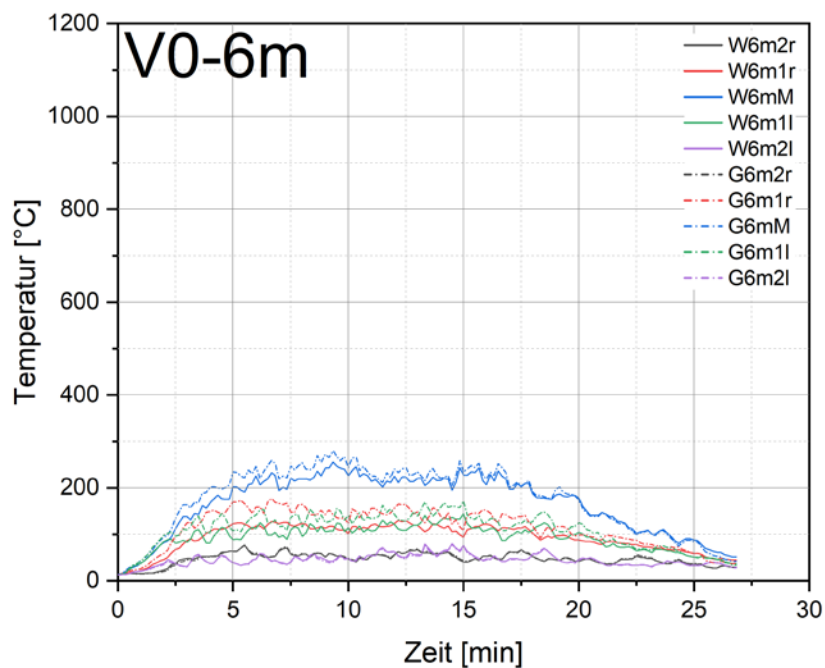


Abbildung A2.7: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 6,0 m für V0

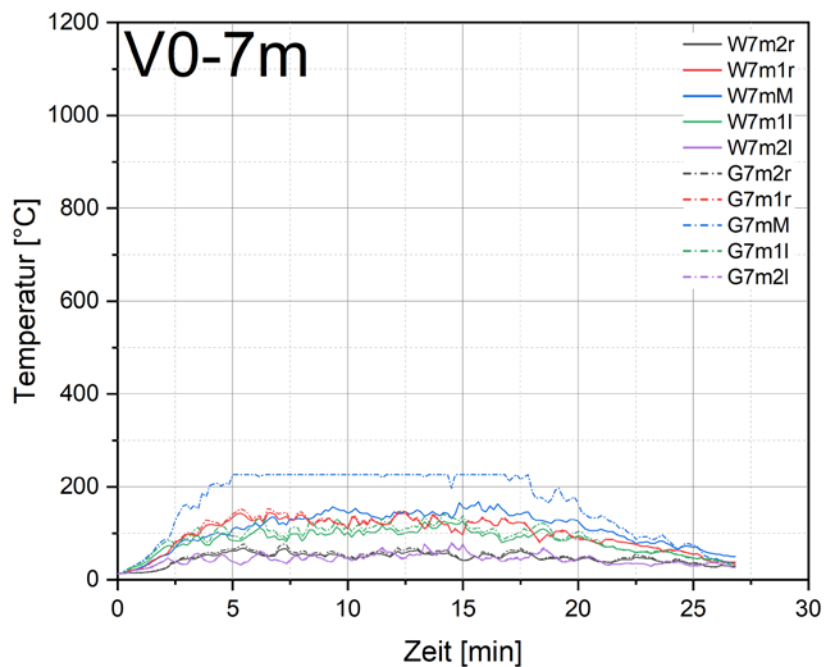


Abbildung A2.8: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 7,0 m für V0

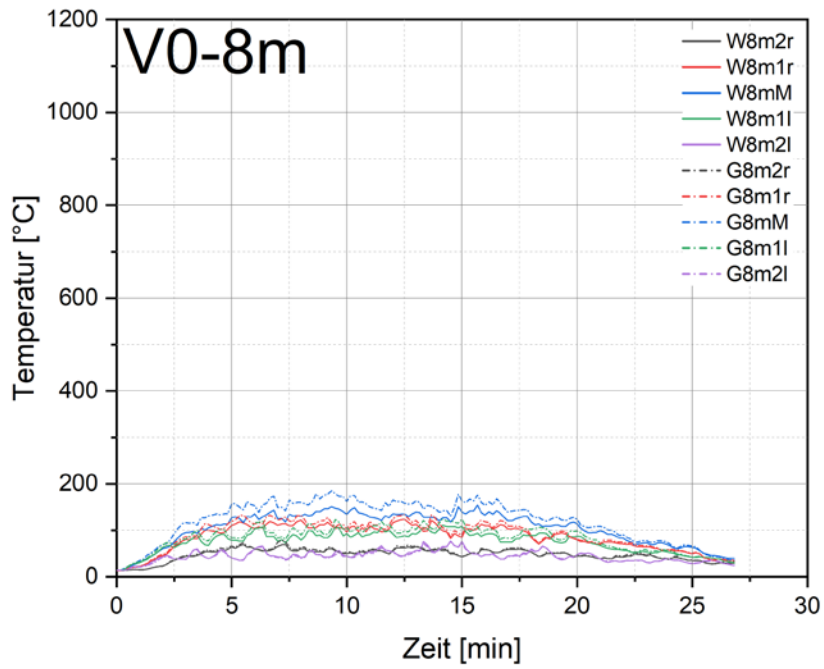


Abbildung A2.9: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 8,0 m für V0

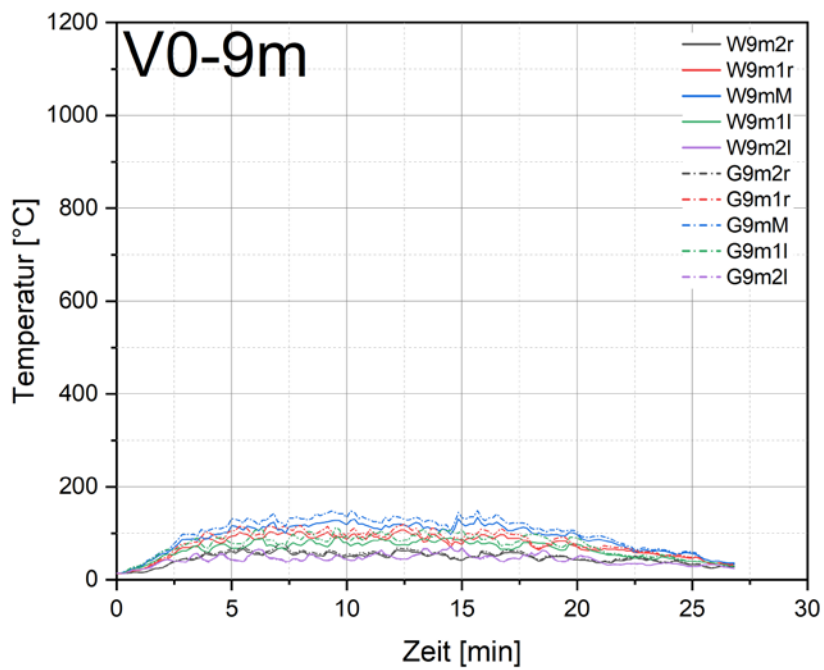


Abbildung A2.10: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 9,0 m für V0

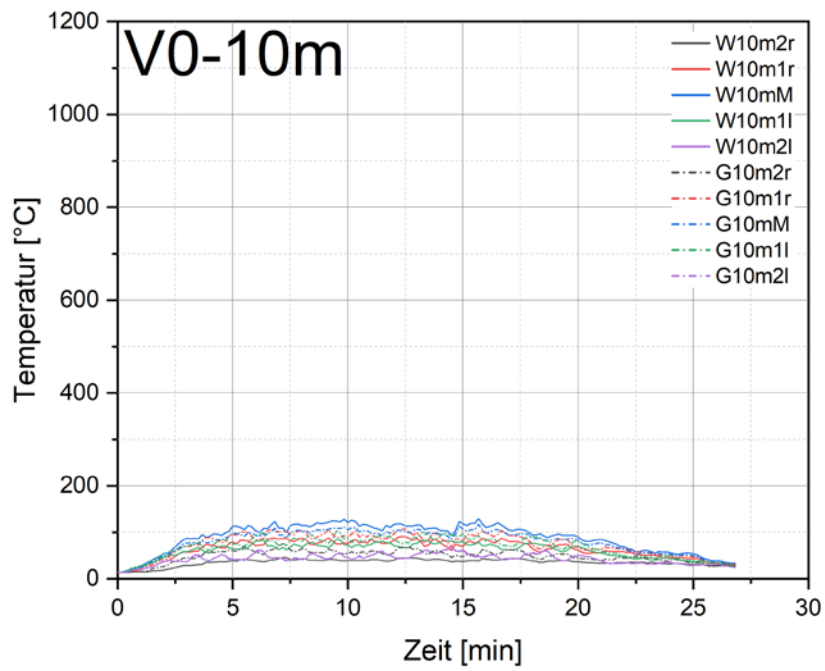


Abbildung A2.11: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 10,0 m für V0

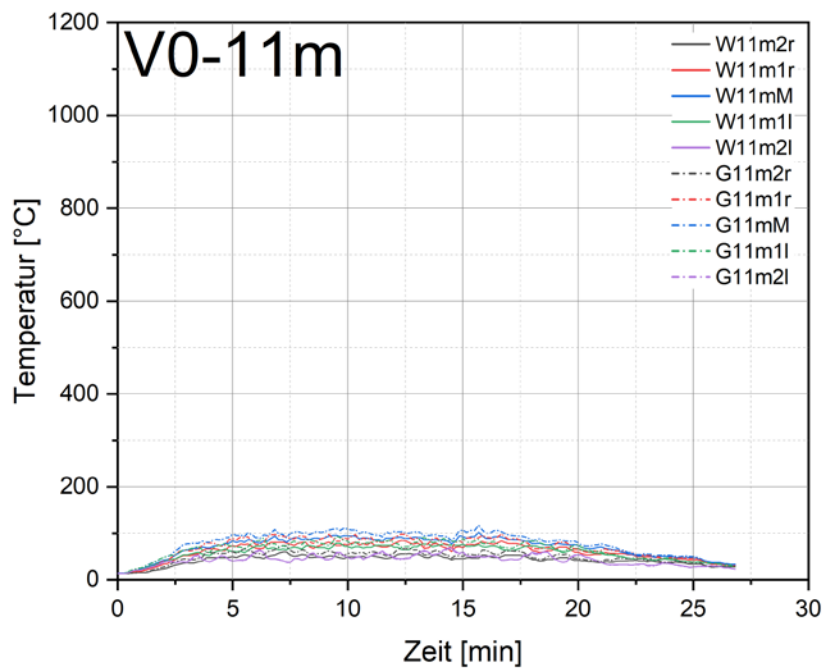


Abbildung A2.12: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 11,0 m für V0

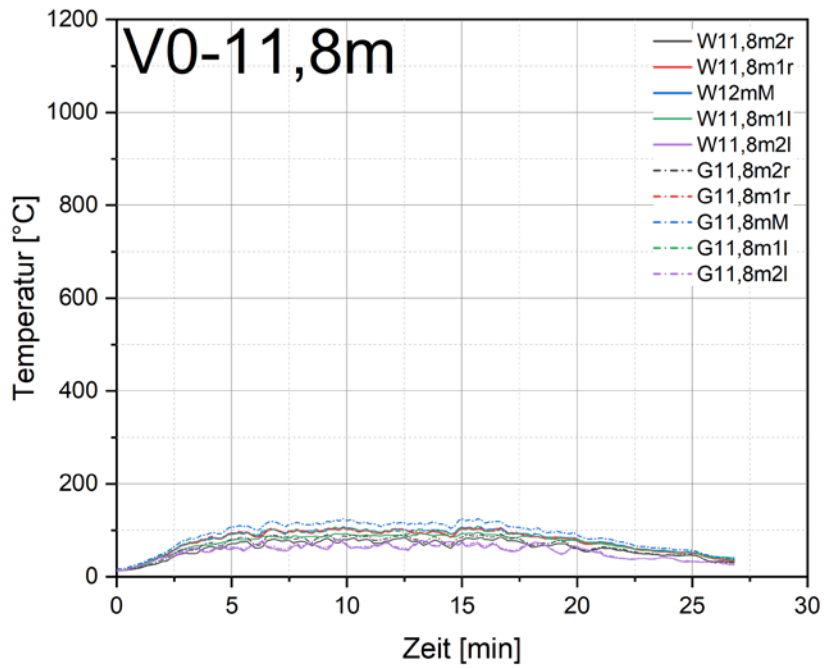


Abbildung A2.13: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 11,8/12,0 m für V0

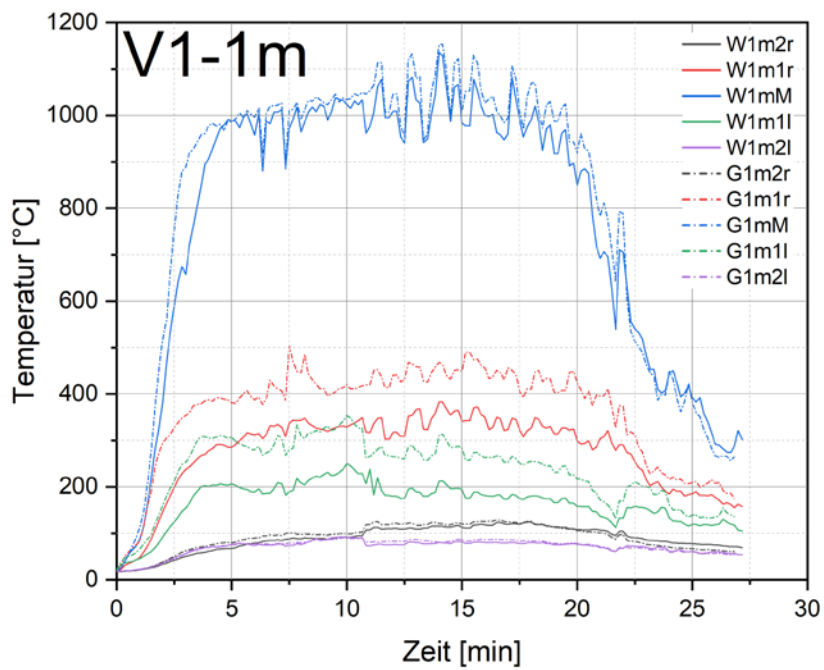


Abbildung A2.14: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 1,0 m für V1

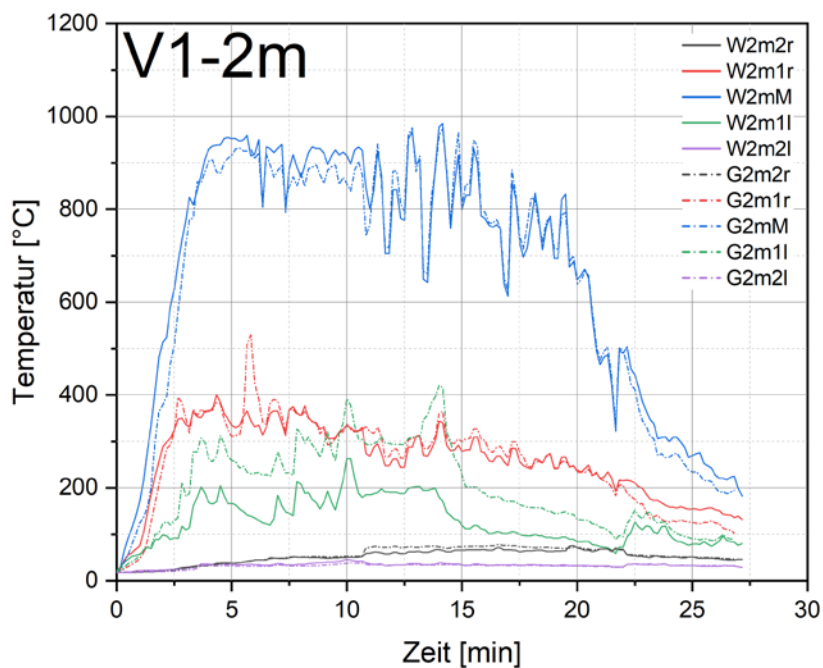


Abbildung A2.15: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 2,0 m für V1

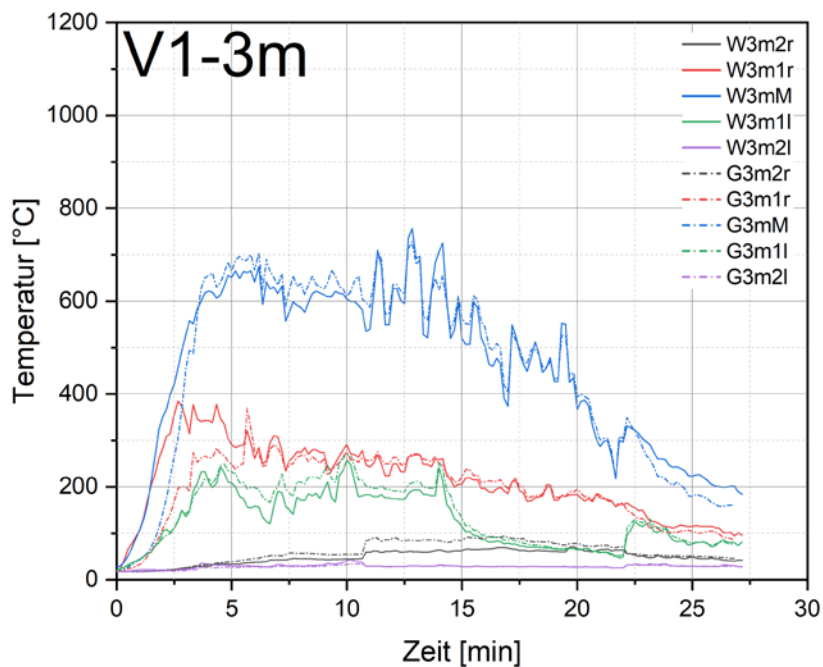


Abbildung A2.16: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 3,0 m für V1

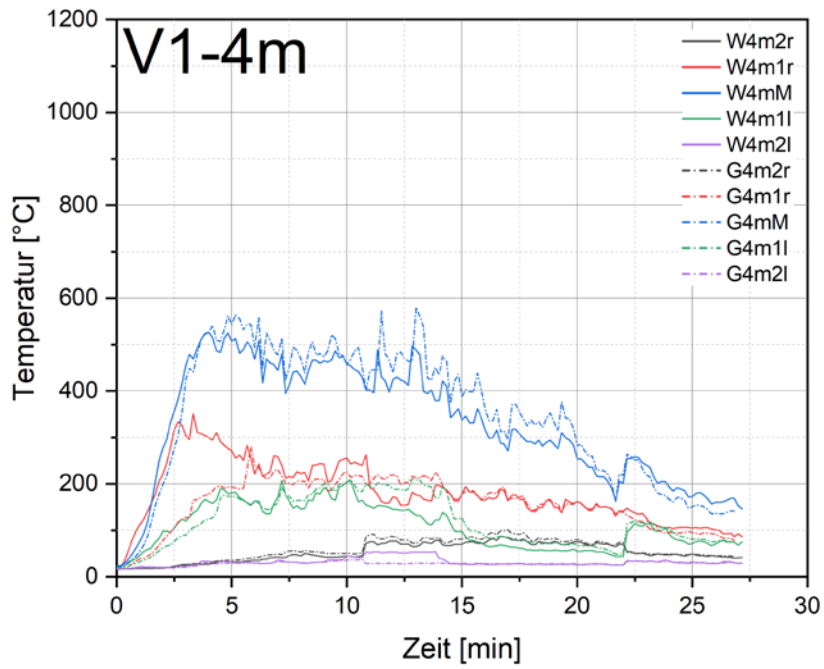


Abbildung A2.17: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 4,0 m für V1

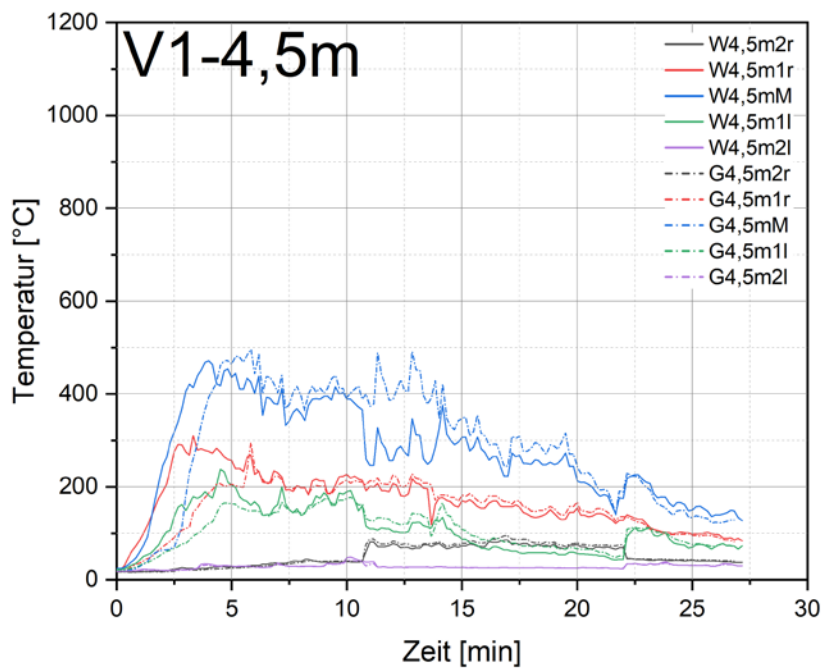


Abbildung A2.18: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 4,5 m für V1

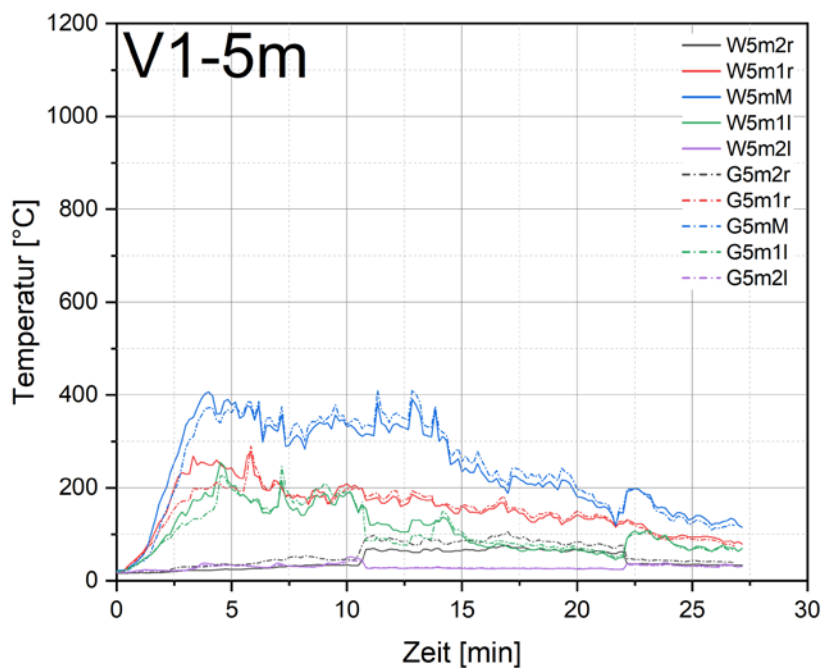


Abbildung A2.19: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 5,0 m für V1

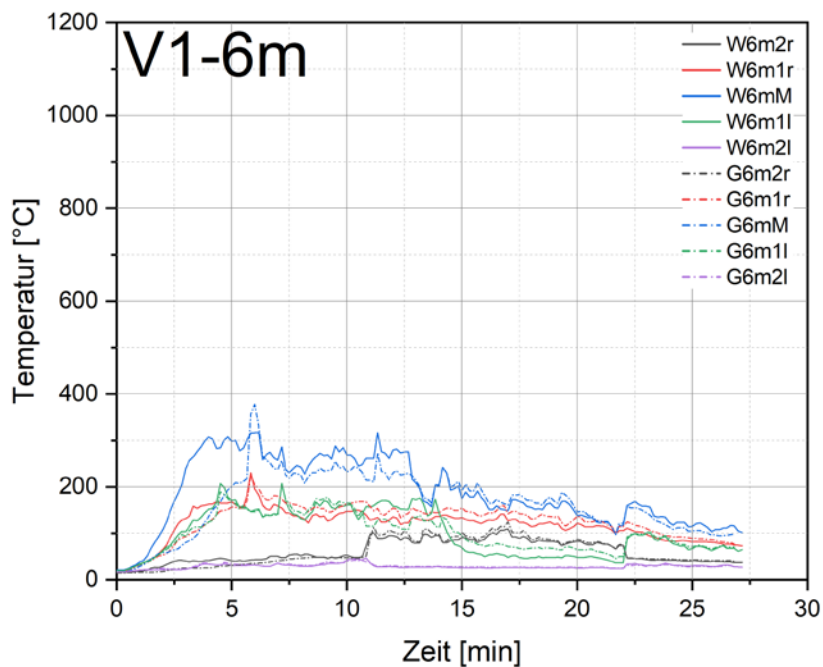


Abbildung A2.20: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 6,0 m für V1

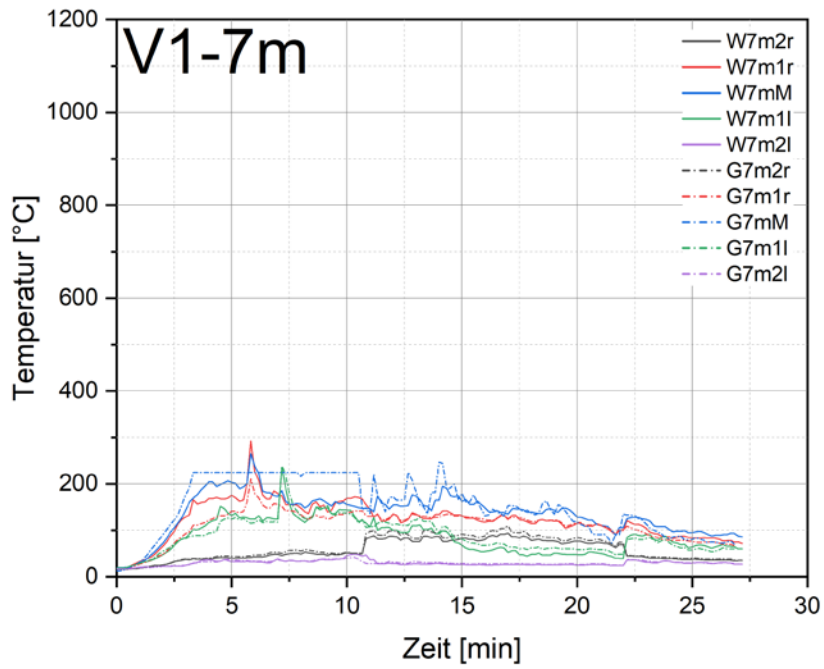


Abbildung A2.21: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 7,0 m für V1

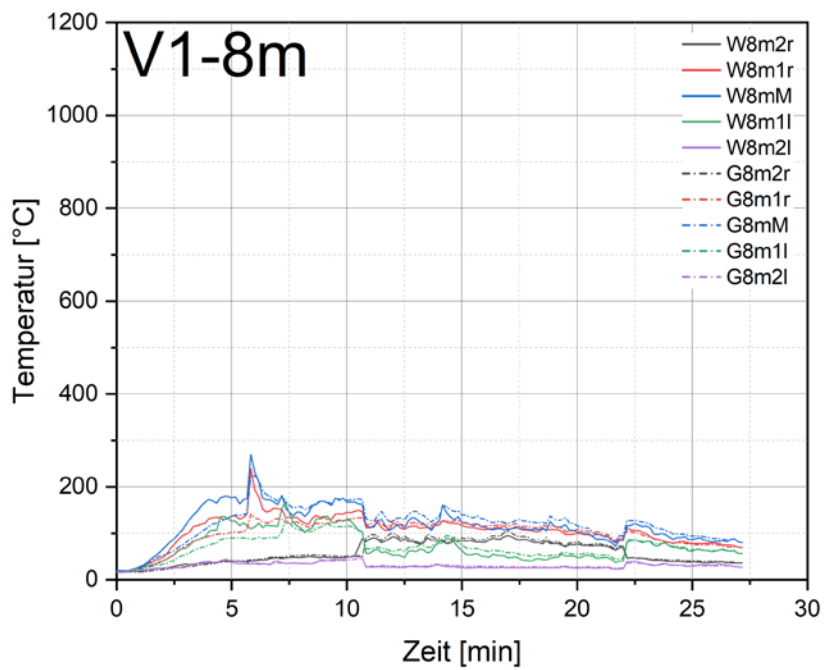


Abbildung A2.22: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 8,0 m für V1

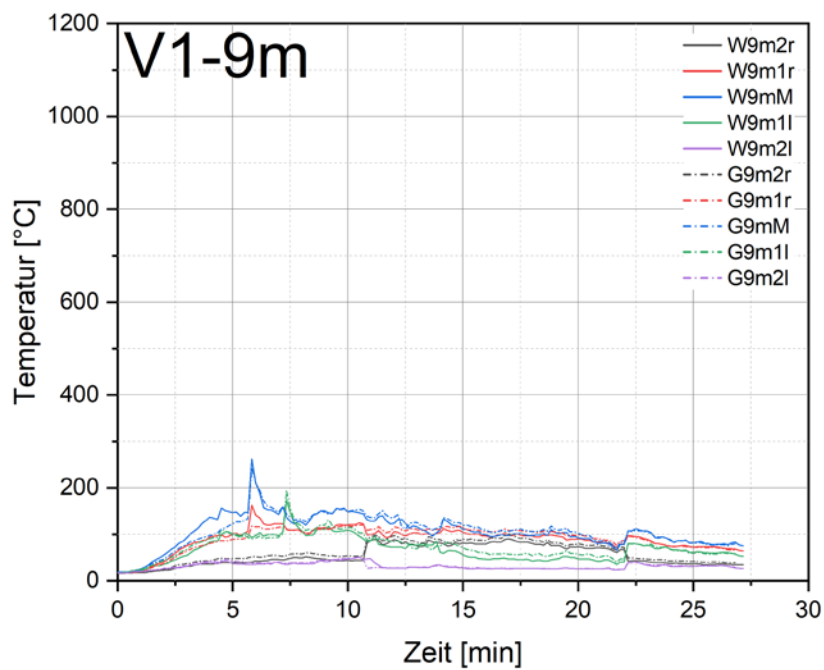


Abbildung A2.23: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 9,0 m für V1

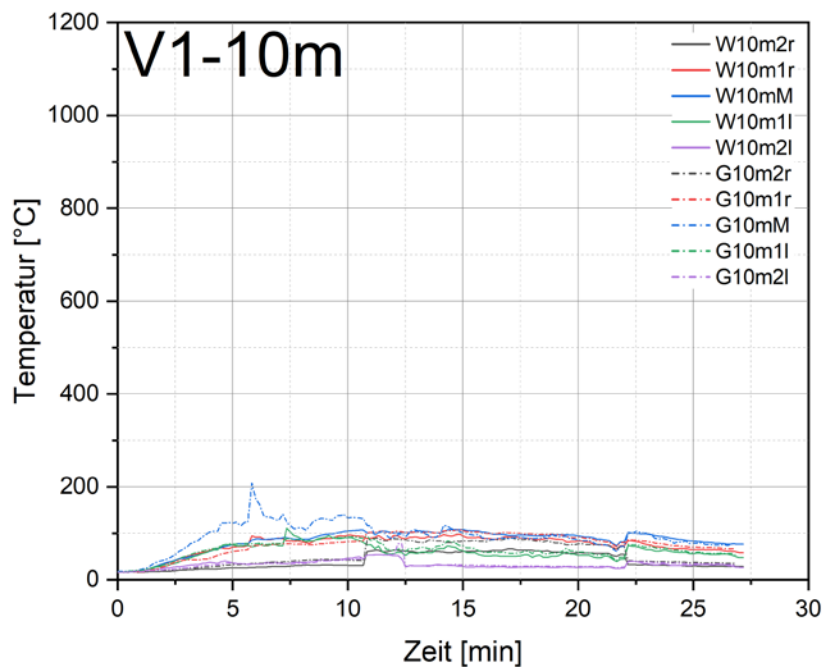


Abbildung A2.24: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 10,0 m für V1

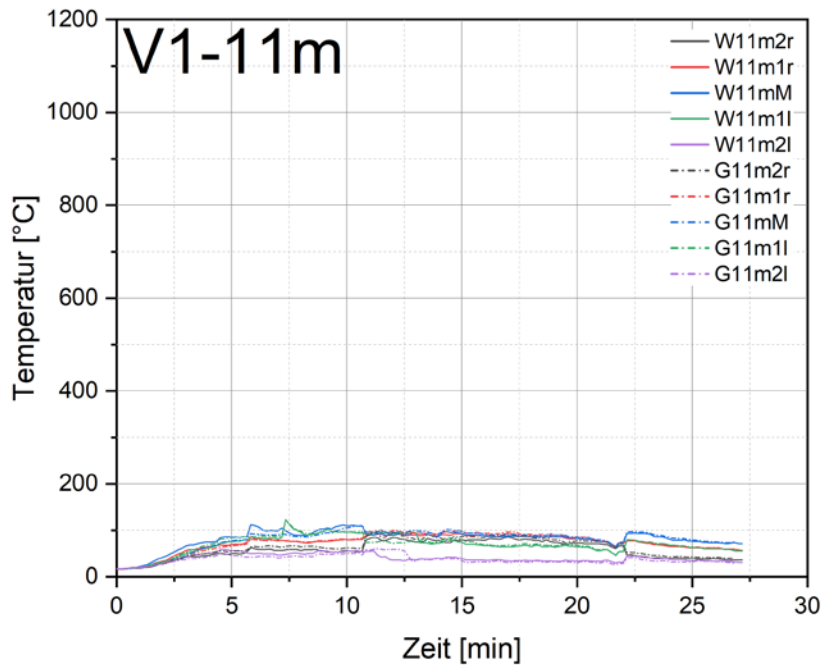


Abbildung A2.25: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 11,0 m für V1

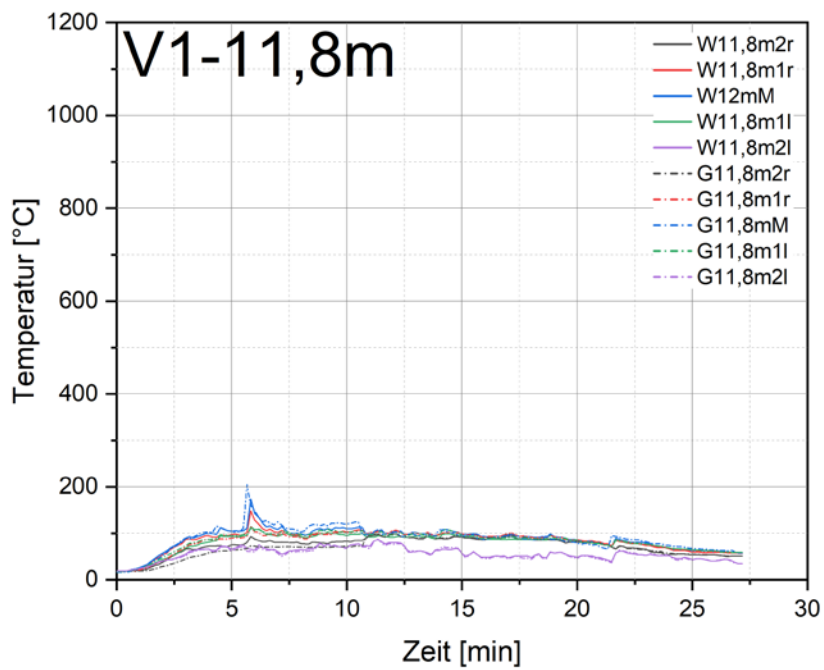


Abbildung A2.26: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 11,8/12,0 m für V1

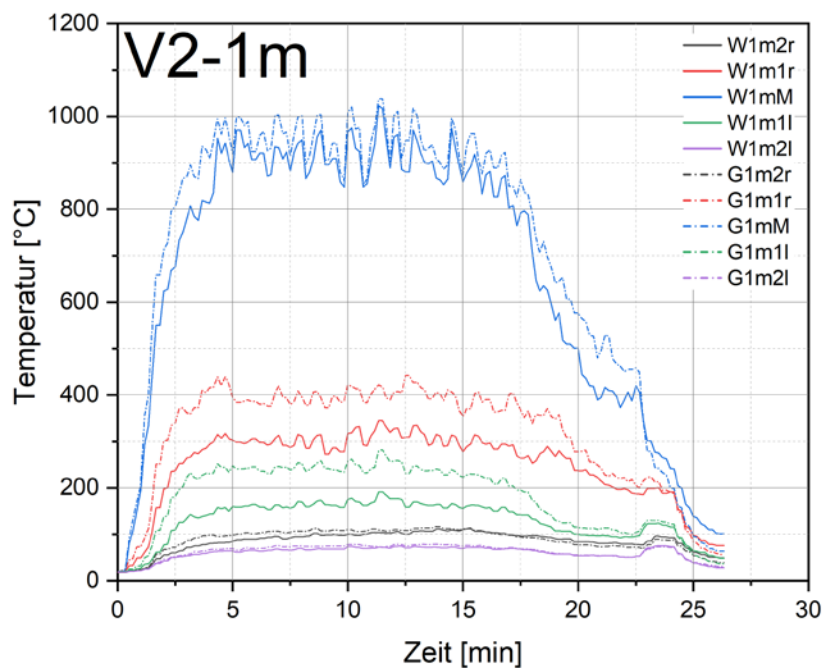


Abbildung A2.27: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 1,0 m für V2

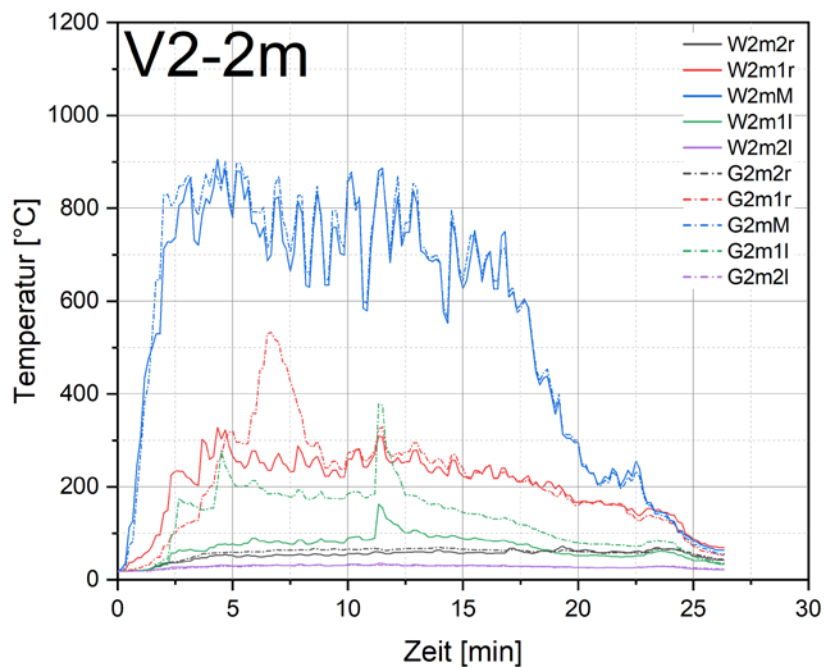


Abbildung A2.28: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 2,0 m für V2

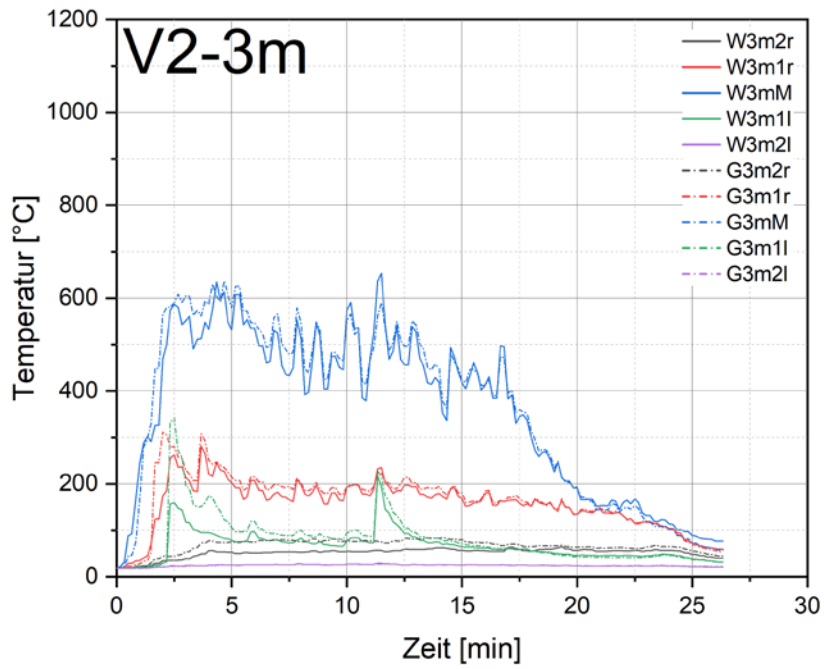


Abbildung A2.29: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 3,0 m für V2

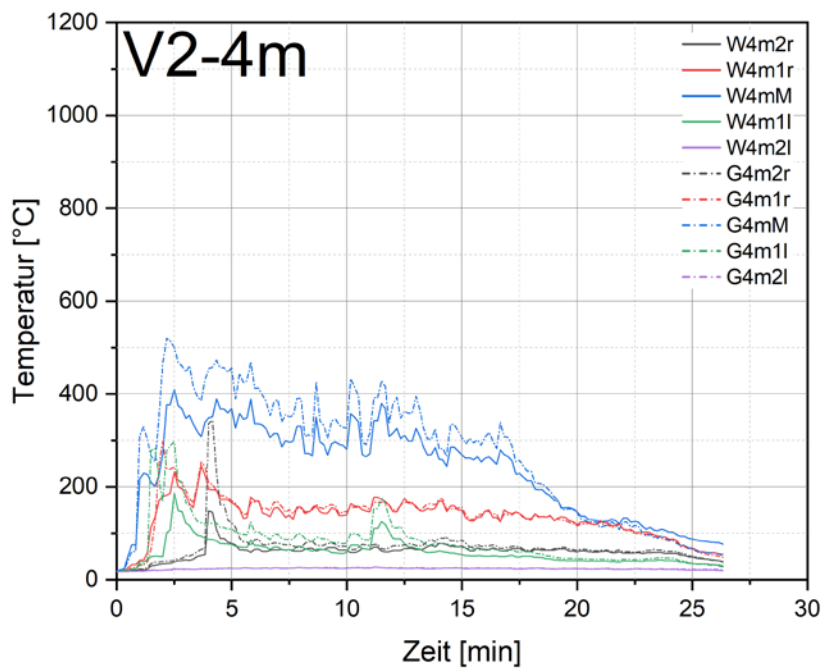


Abbildung A2.30: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 4,0 m für V2

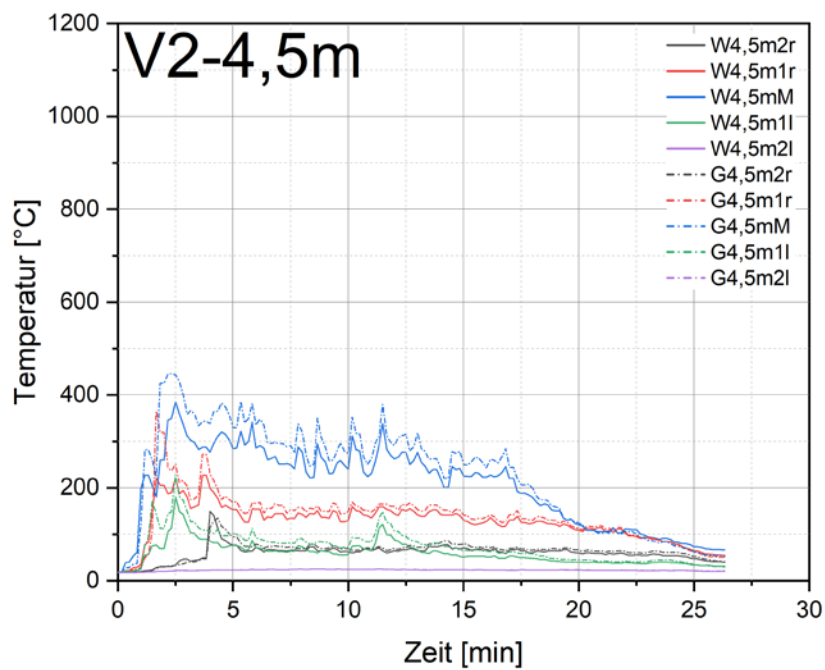


Abbildung A2.31: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 4,5 m für V2

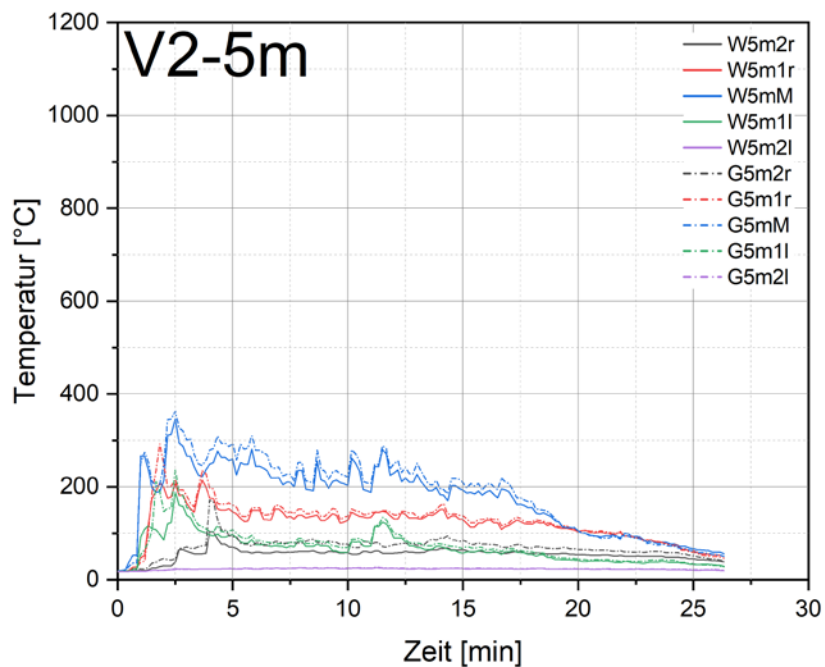


Abbildung A2.32: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 5,0 m für V2

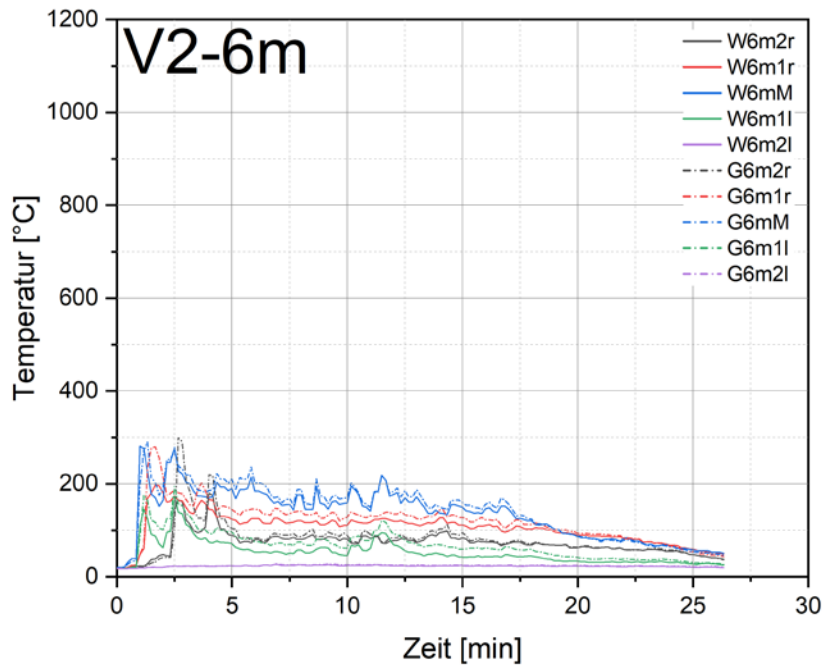


Abbildung A2.33: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 6,0 m für V2

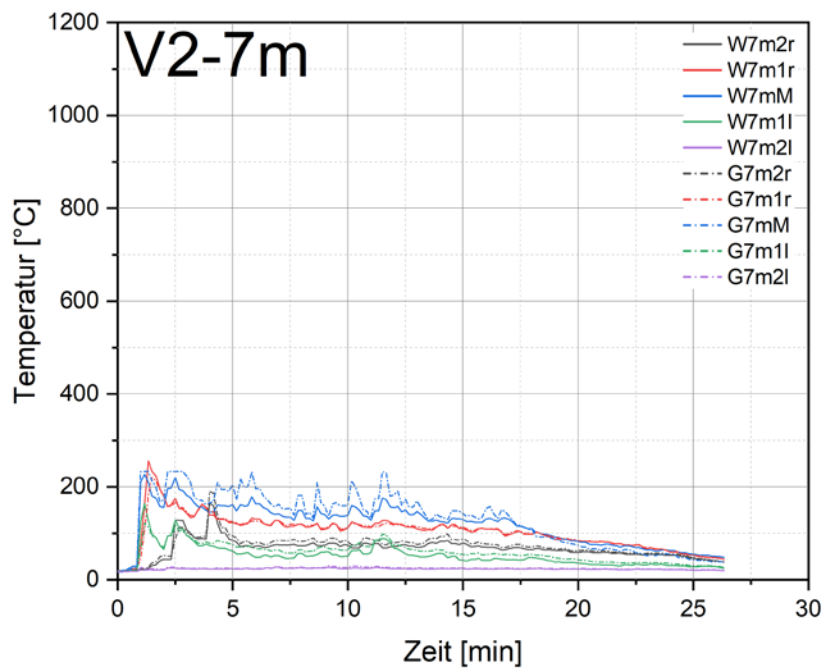


Abbildung A2.34: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 7,0 m für V2

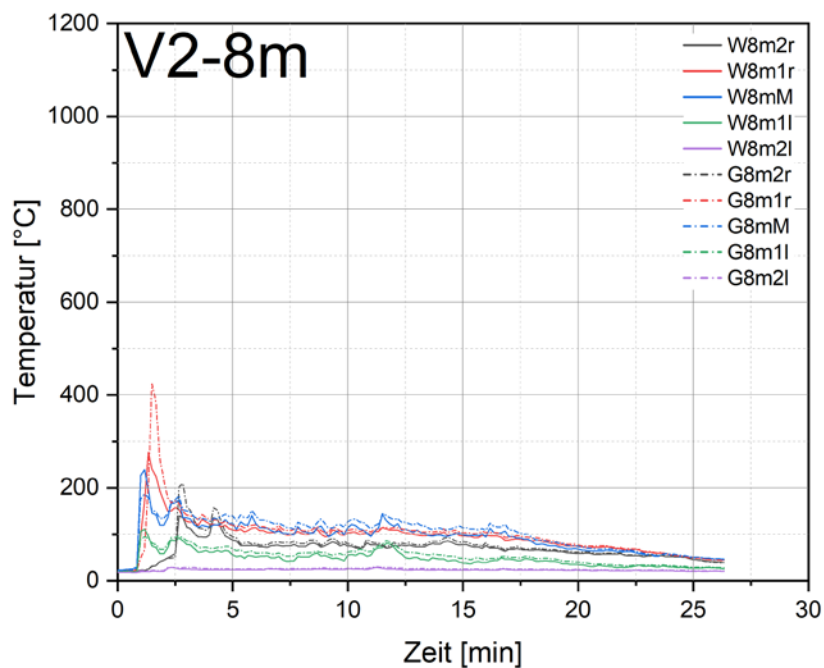


Abbildung A2.35: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 8,0 m für V2

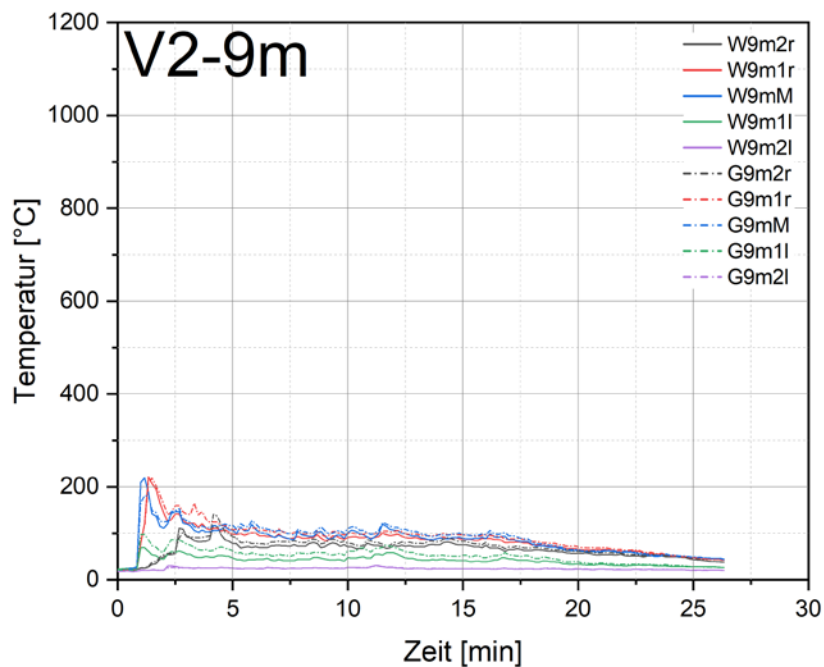


Abbildung A2.36: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 9,0 m für V2

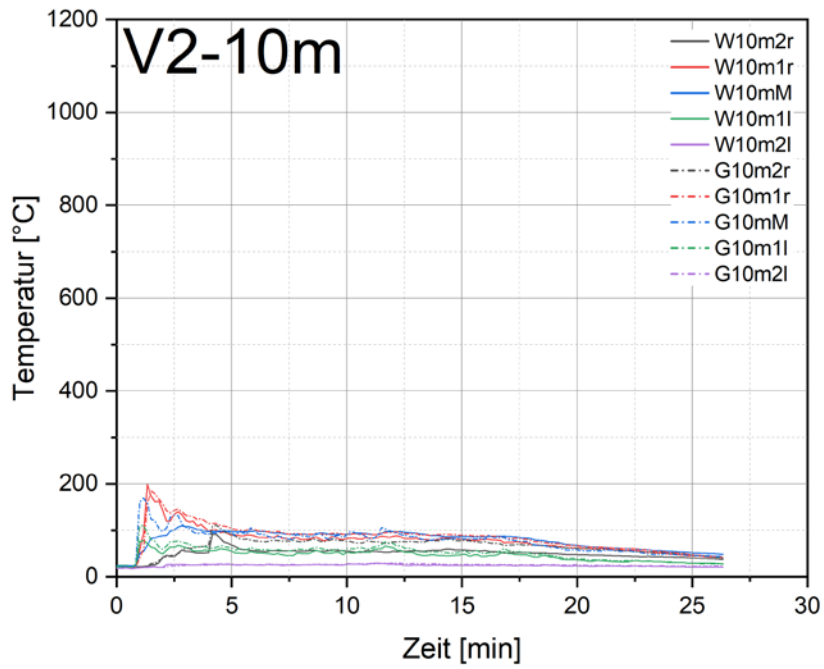


Abbildung A2.37: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 10,0 m für V2

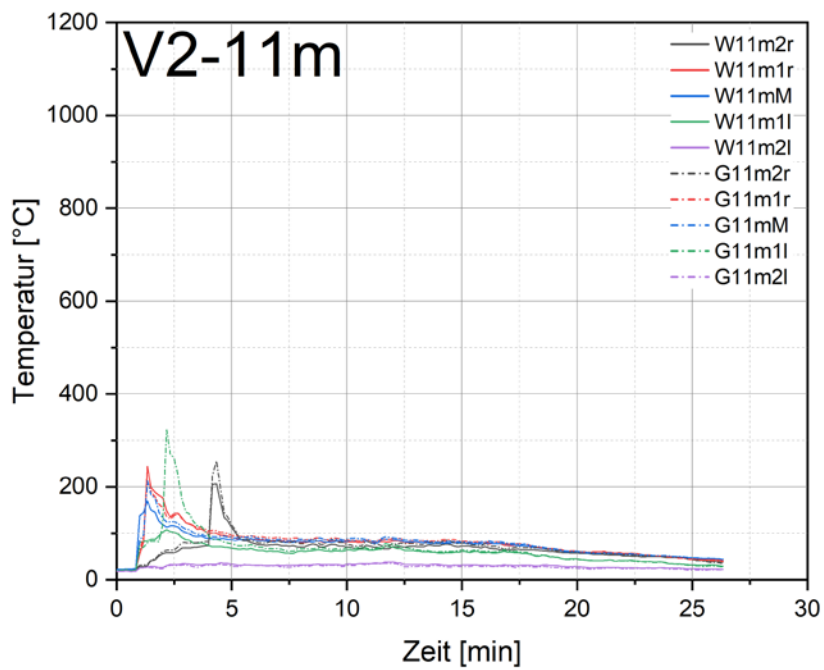


Abbildung A2.38: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 11,0 m für V2

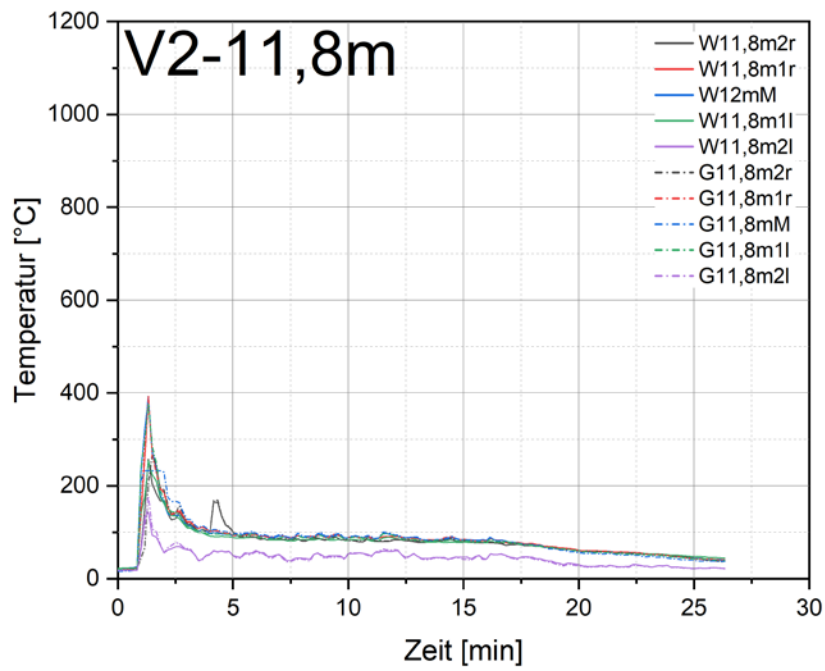


Abbildung A2.39: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 11,8/12,0 m für V2

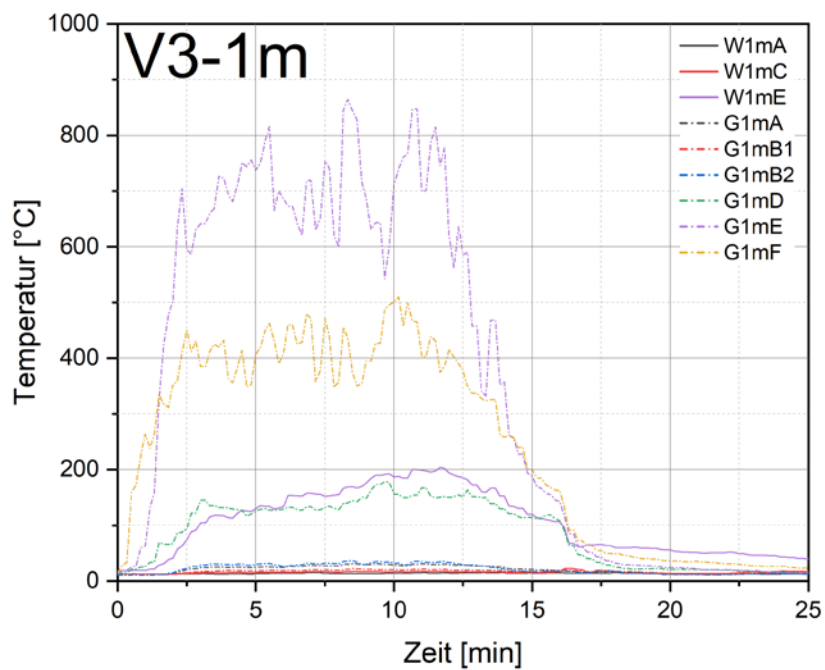


Abbildung A2.40: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 1,0 m für V3

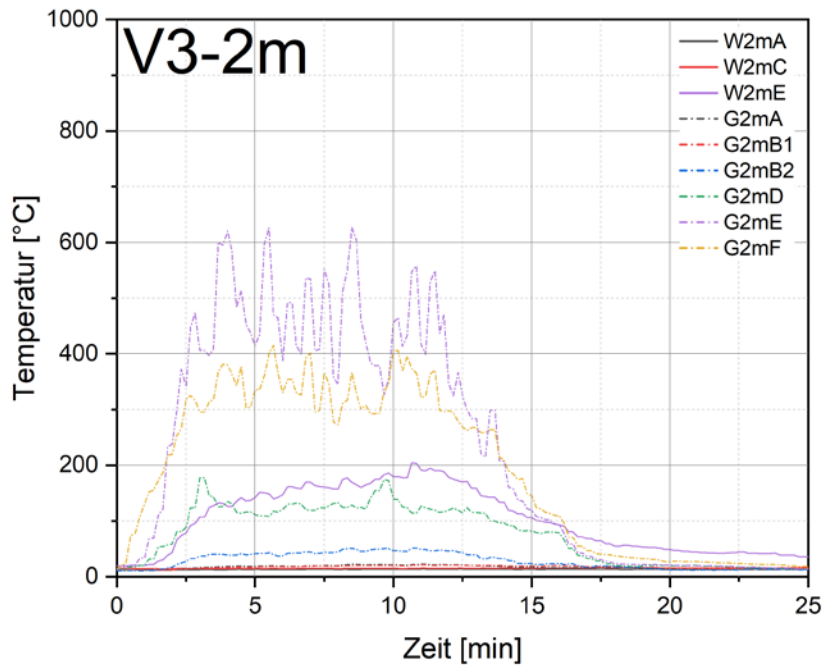


Abbildung A2.41: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 2,0 m für V3

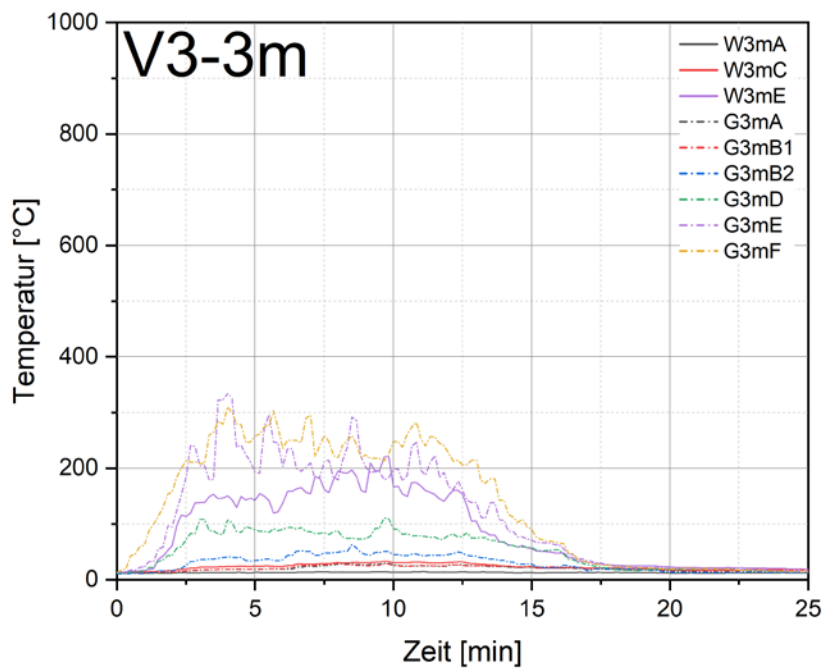


Abbildung A2.42: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 3,0 m für V3

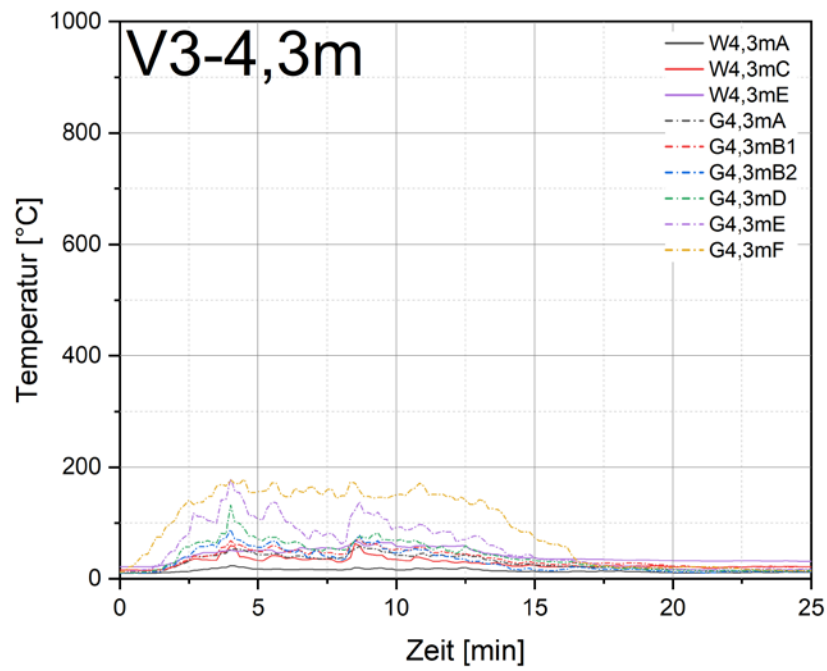


Abbildung A2.43: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 4,3 m für V3

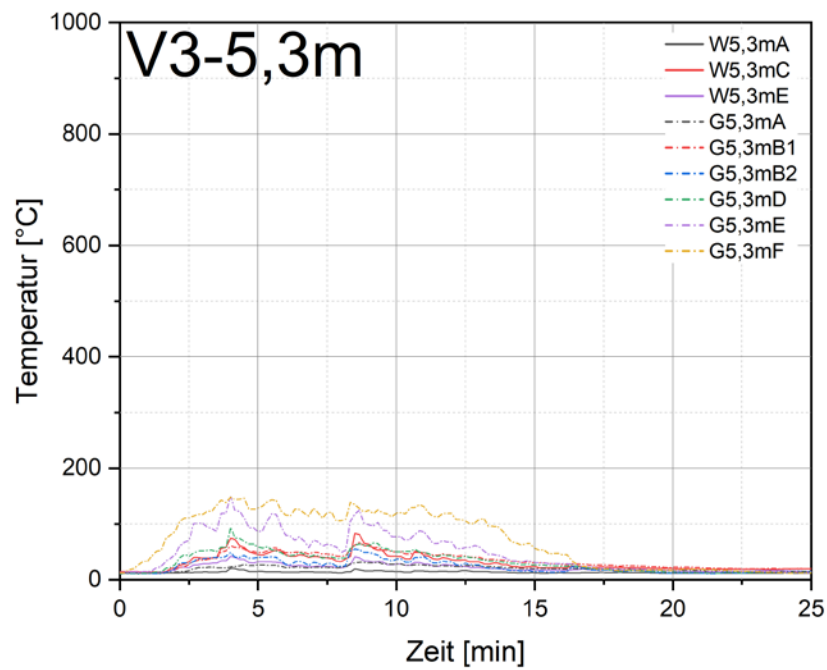


Abbildung A2.44: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 5,3 m für V3

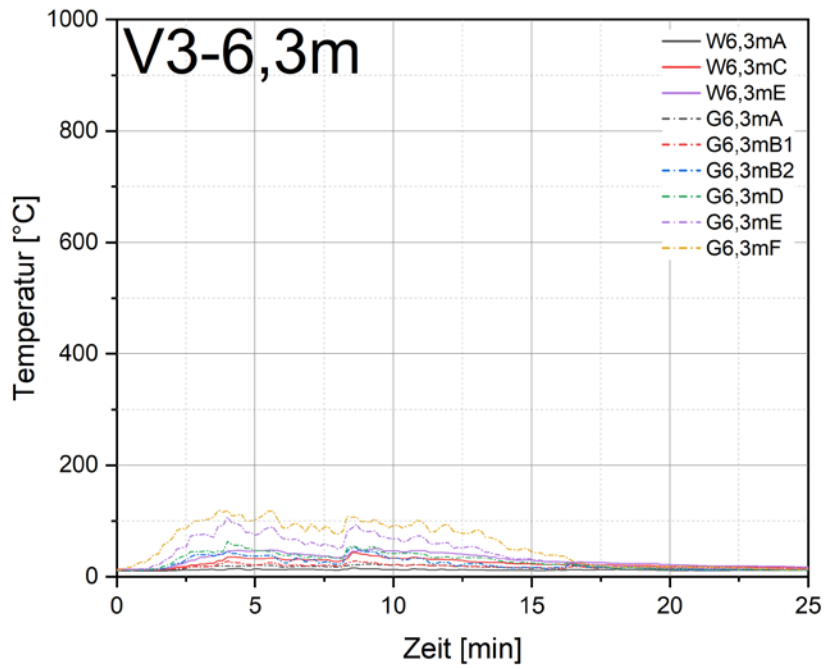


Abbildung A2.45: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 6,3 m für V3

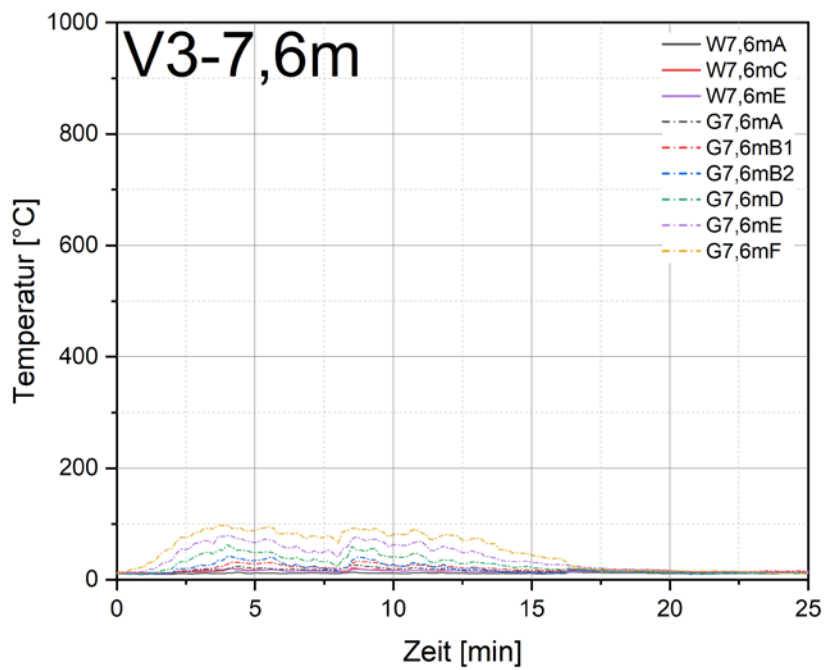


Abbildung A2.46: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 7,6 m für V3

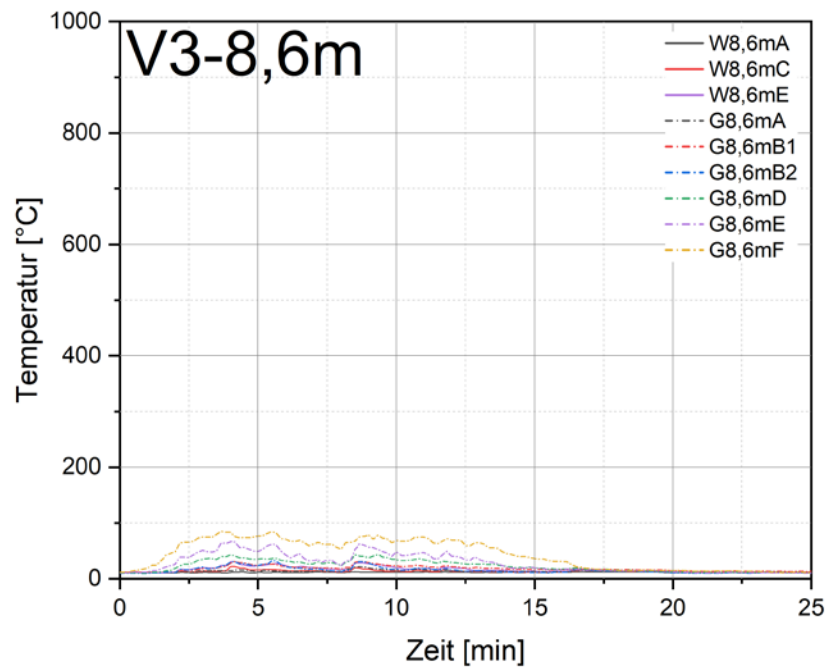


Abbildung A2.47: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 8,6 m für V3

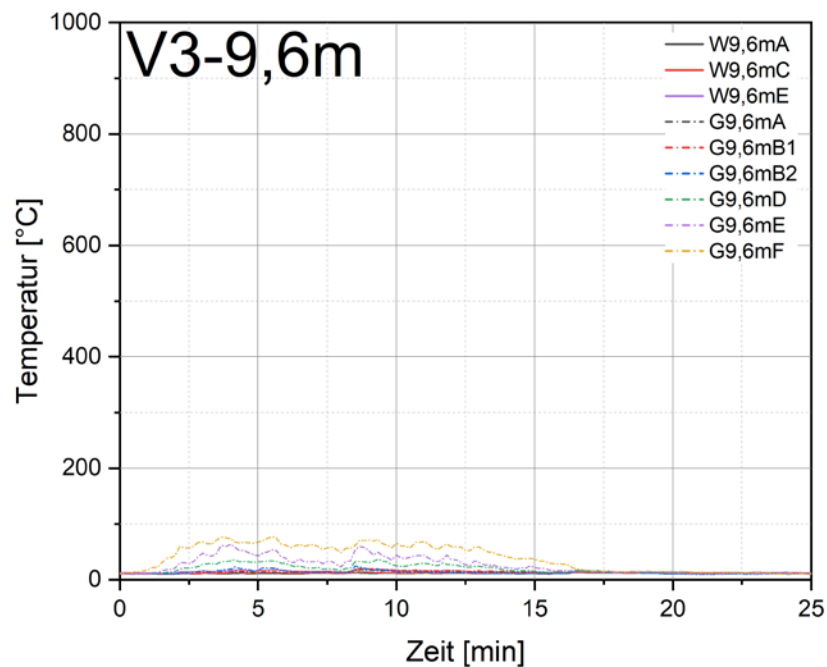


Abbildung A2.48: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 9,6 m für V3

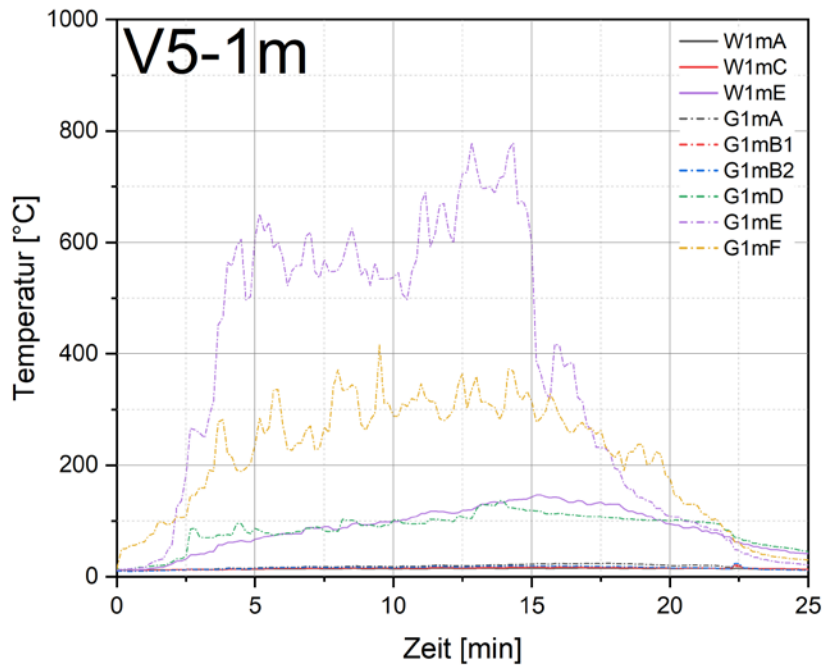


Abbildung A2.49: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 1,0 m für V5

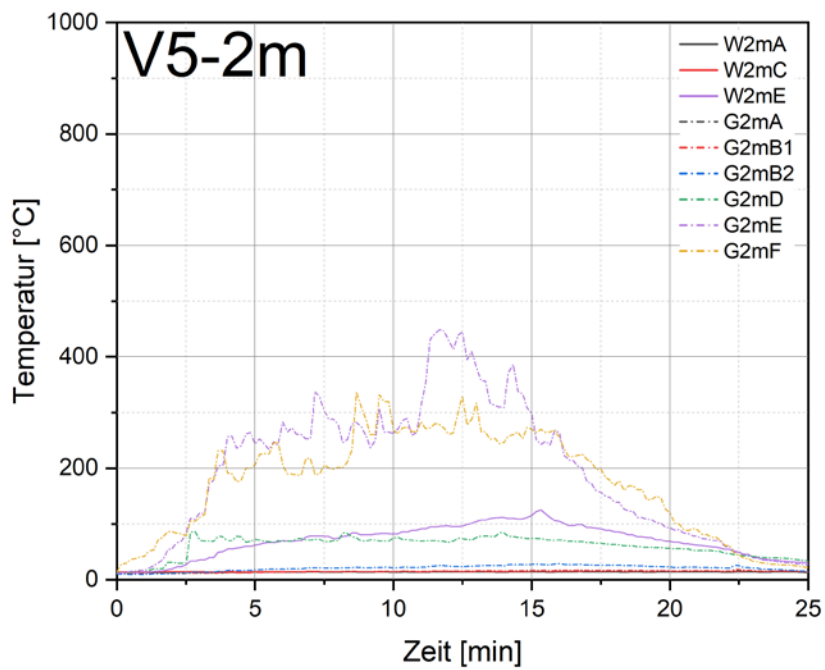


Abbildung A2.50: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 2,0 m für V5

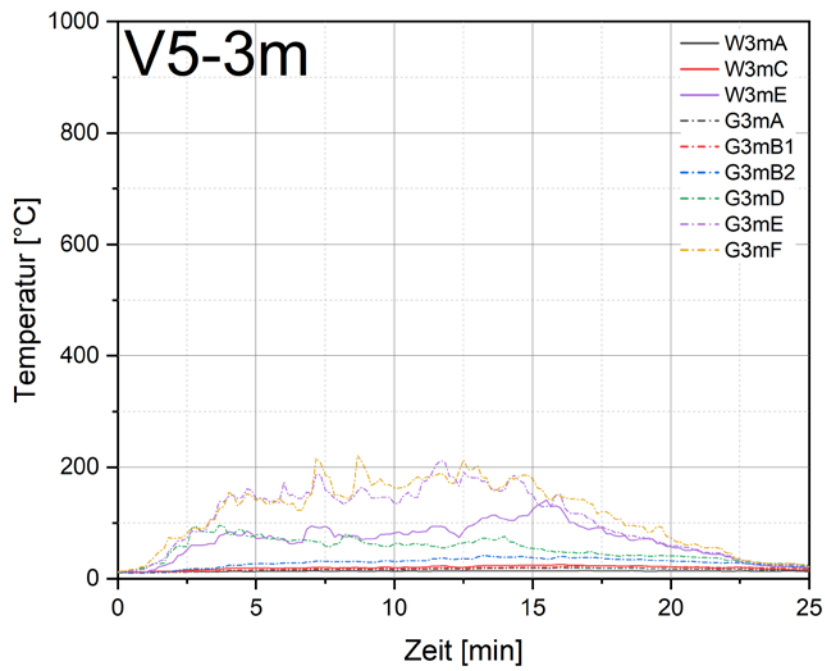


Abbildung A2.51: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 3,0 m für V5

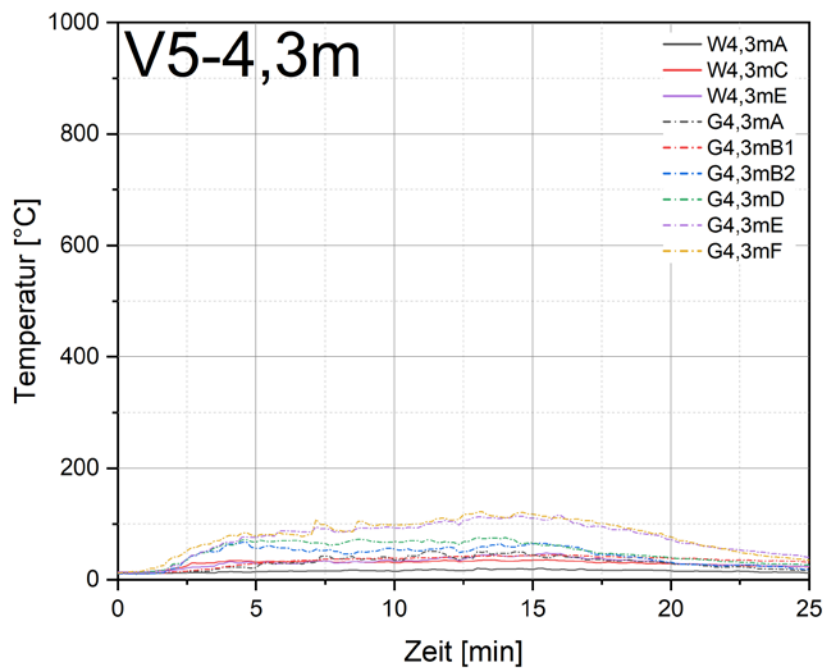


Abbildung A2.52: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 4,3 m für V5

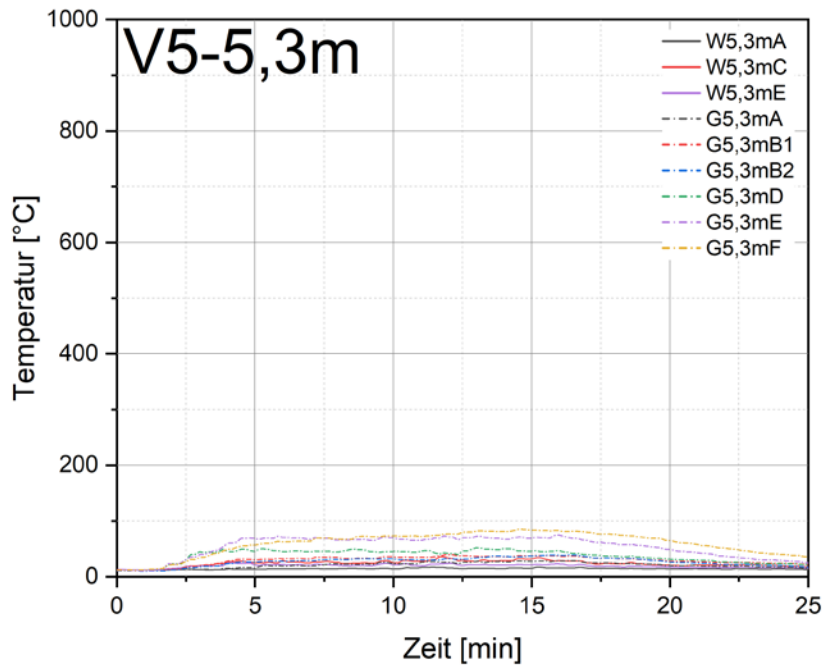


Abbildung A2.53: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 5,3 m für V5

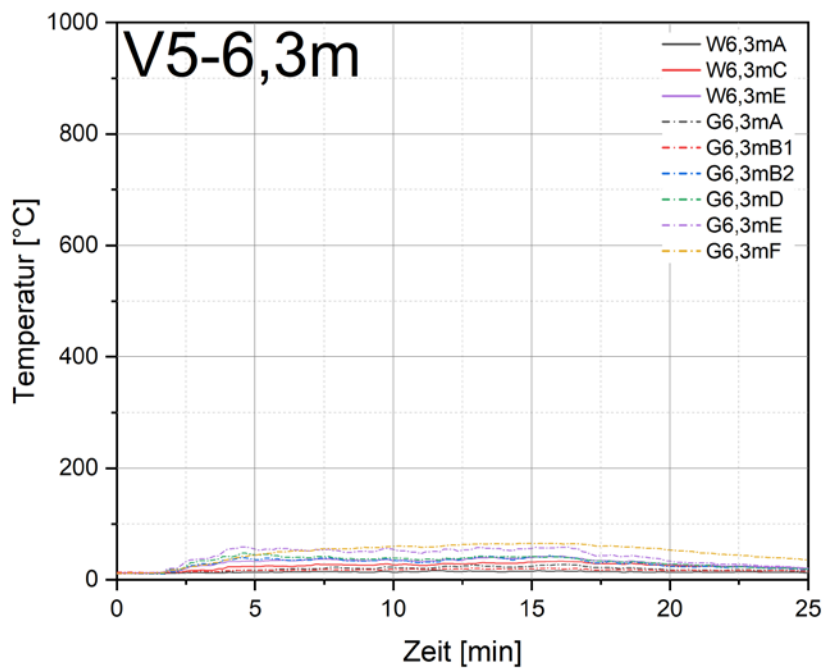


Abbildung A2.54: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 6,3 m für V5

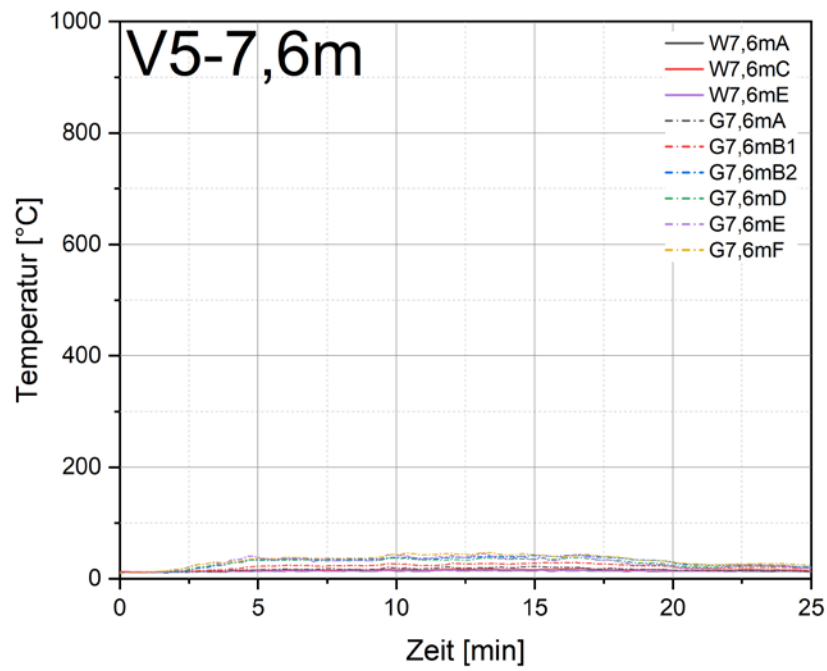


Abbildung A2.55: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 7,6 m für V5

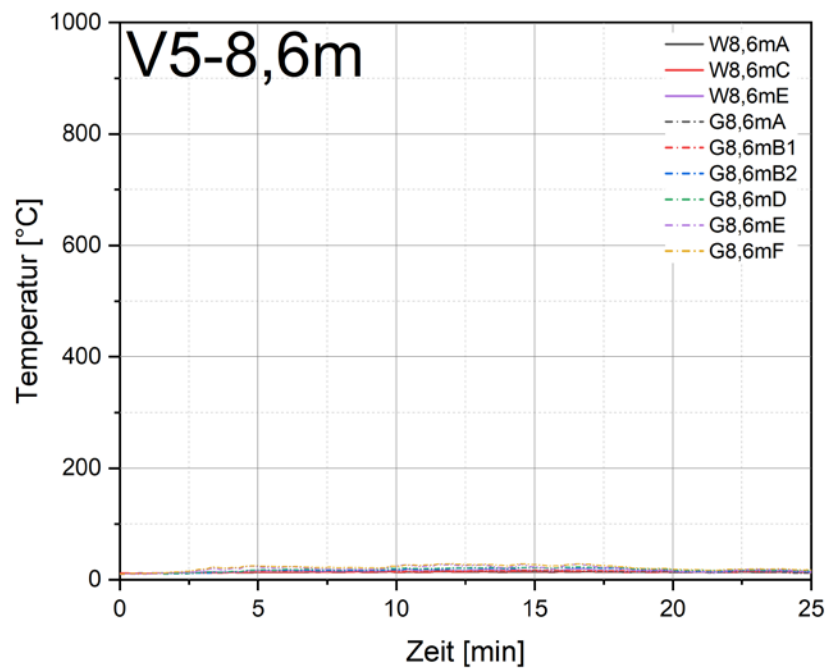


Abbildung A2.56: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 8,6 m für V5

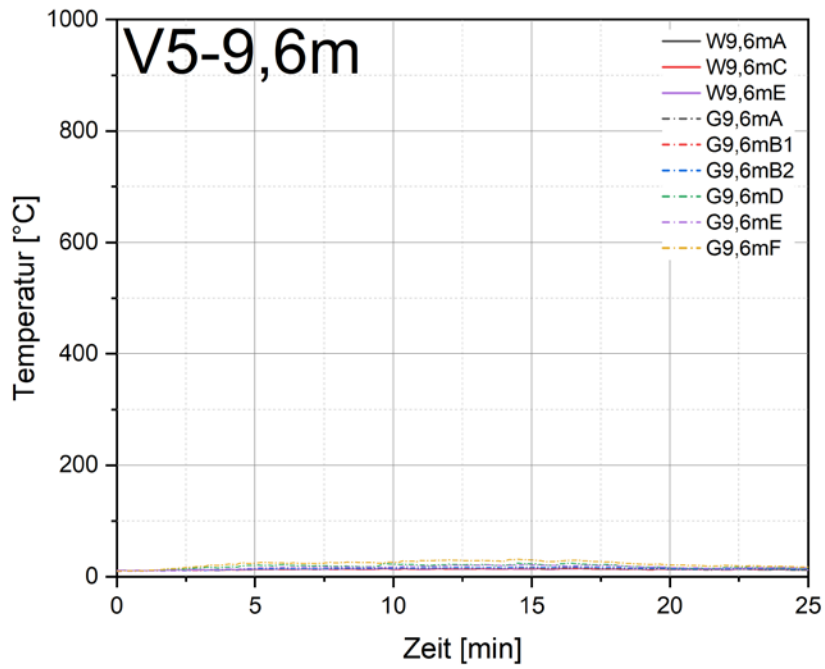


Abbildung A2.57: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 9,6 m für V5

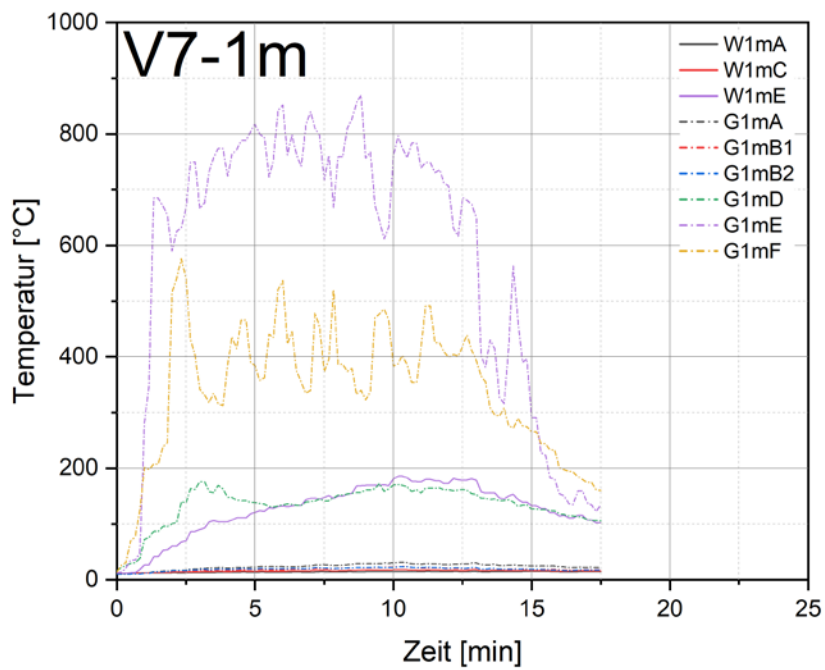


Abbildung A2.58: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 1,0 m für V7

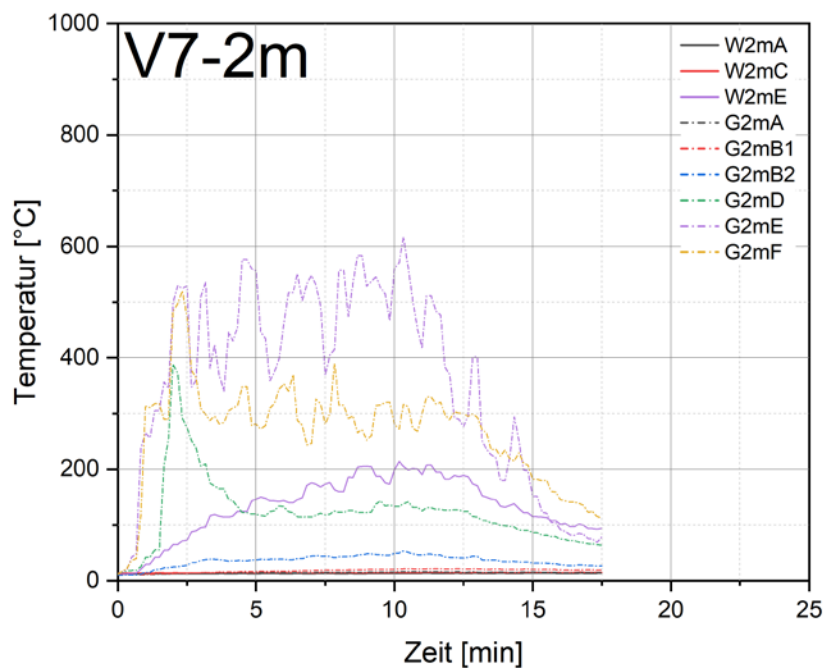


Abbildung A2.59: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 2,0 m für V7

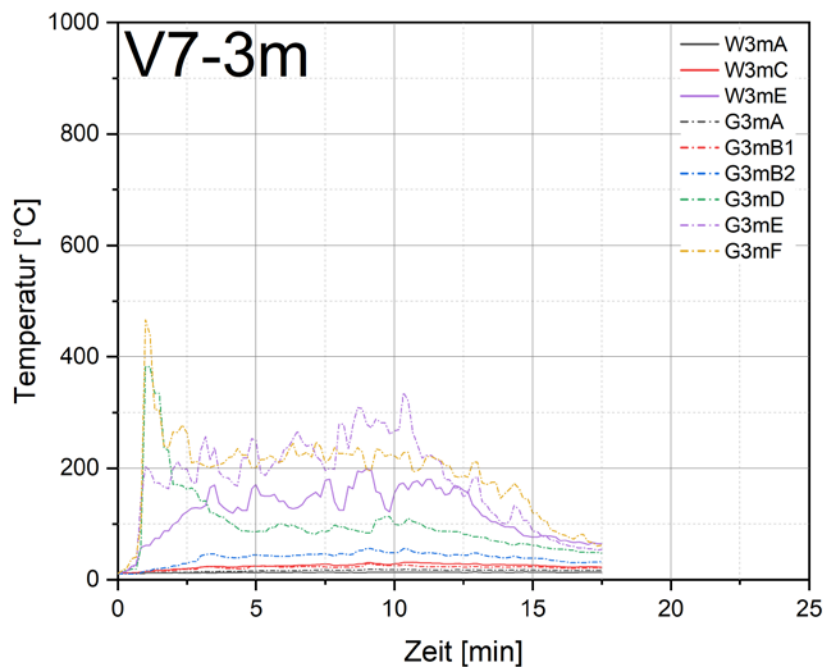


Abbildung A2.60: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 3,0 m für V7

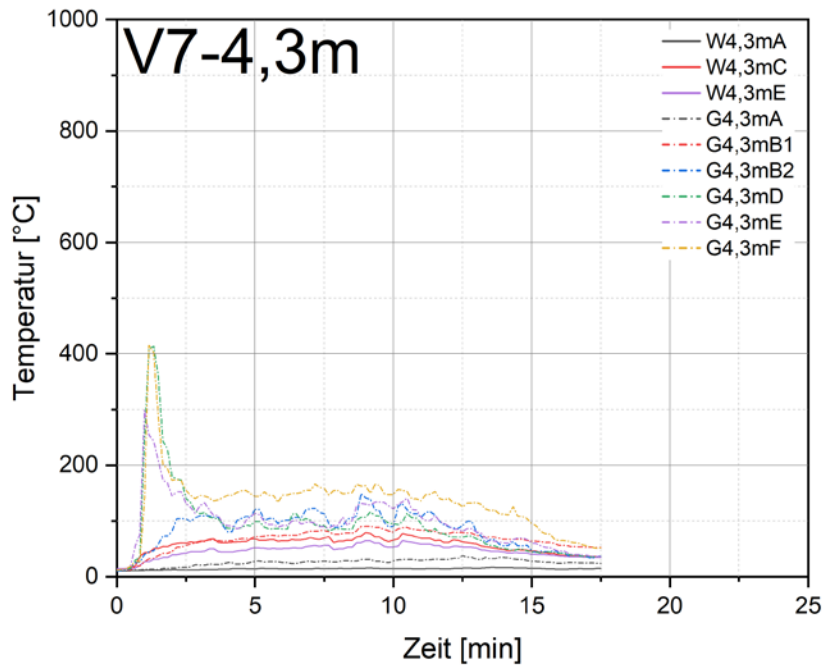


Abbildung A2.61: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 4,3 m für V7

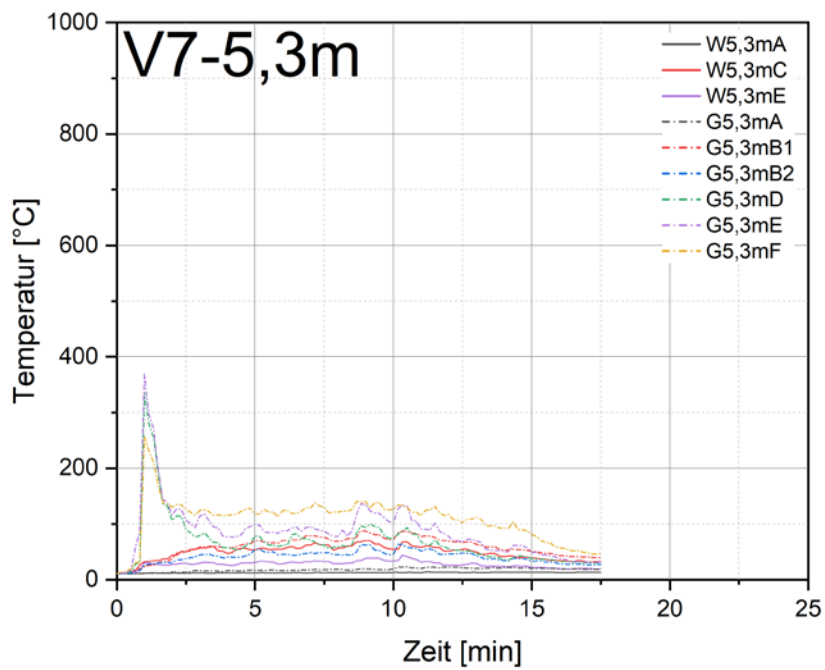


Abbildung A2.62: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 5,3 m für V7

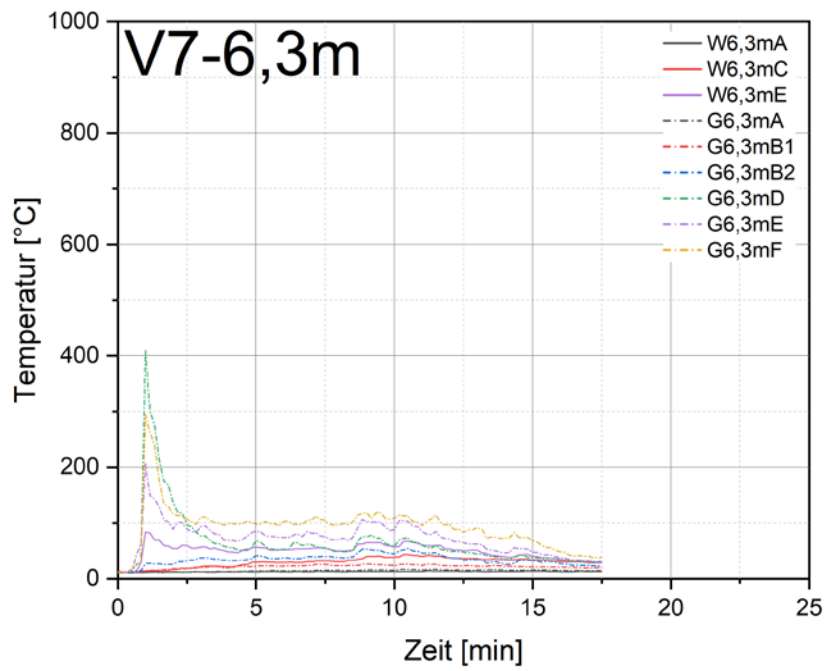


Abbildung A2.63: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 6,3 m für V7

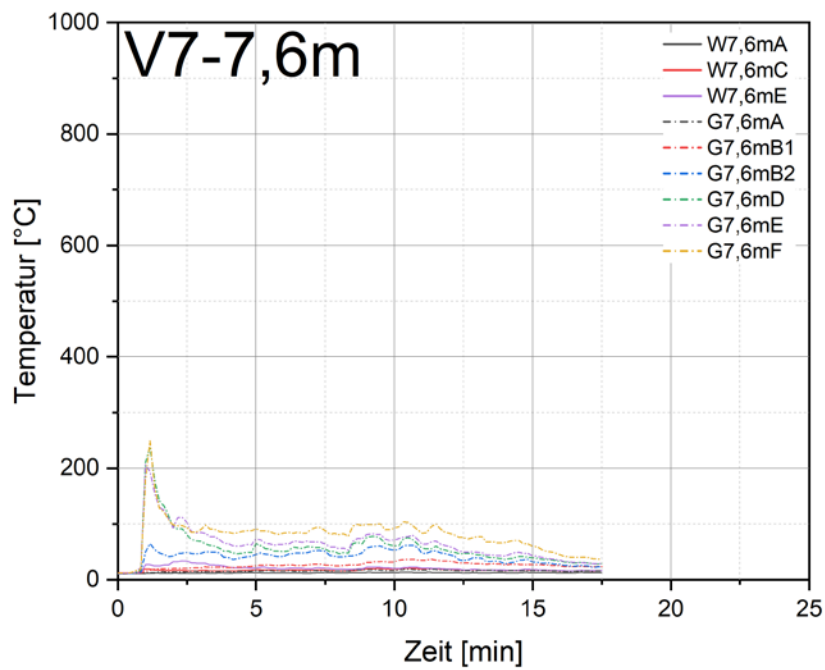


Abbildung A2.64: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 7,6 m für V7

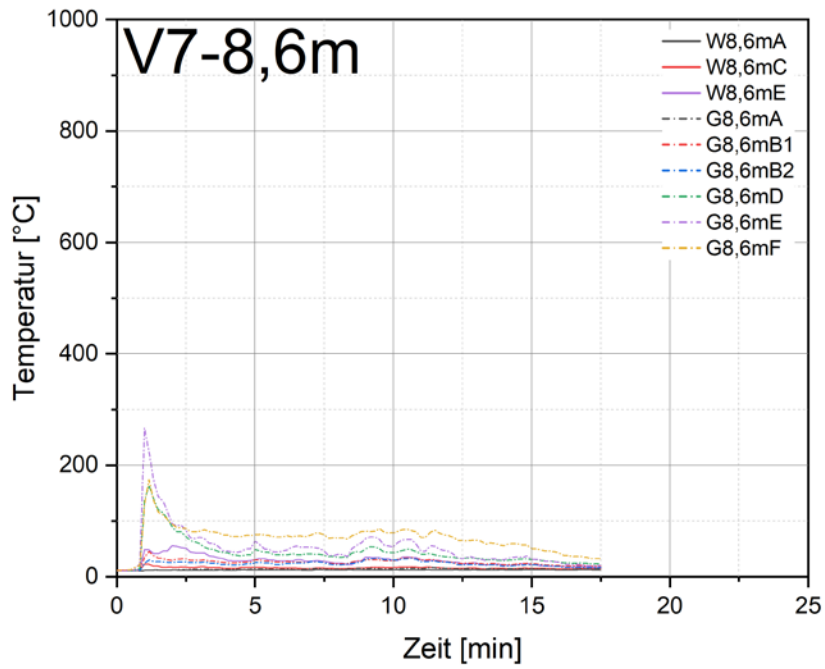


Abbildung A2.65: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 8,6 m für V7

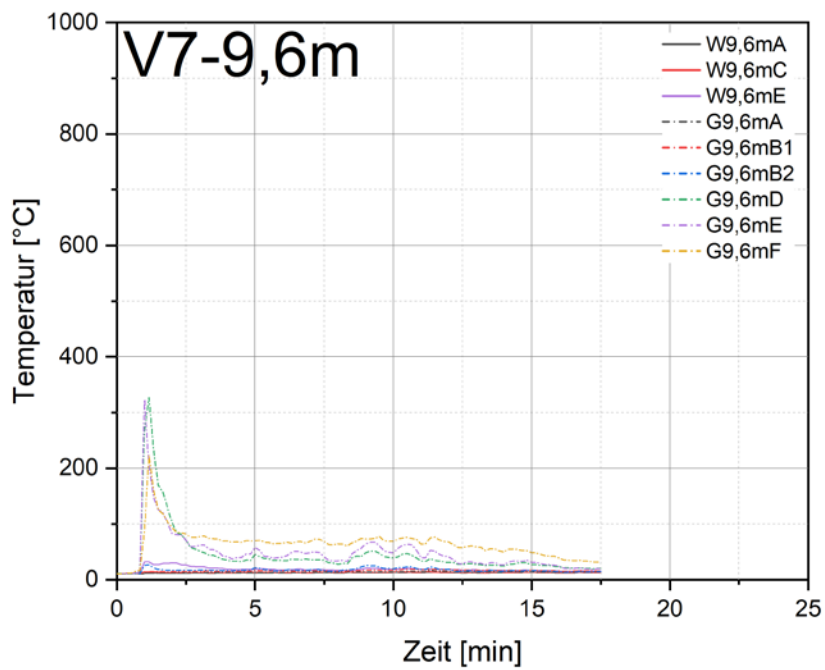


Abbildung A2.66: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 9,6 m für V7

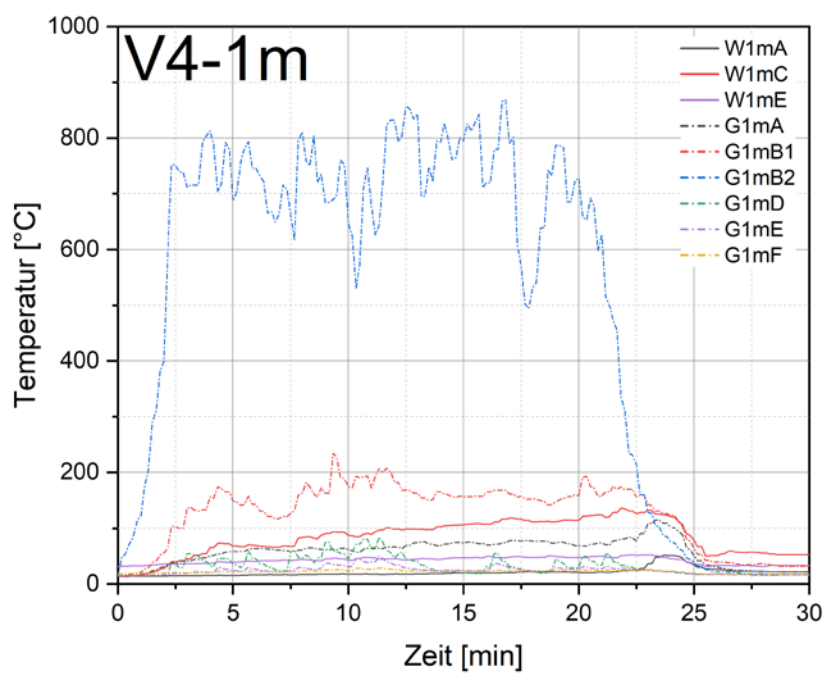


Abbildung A2.67: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 1,0 m für V4

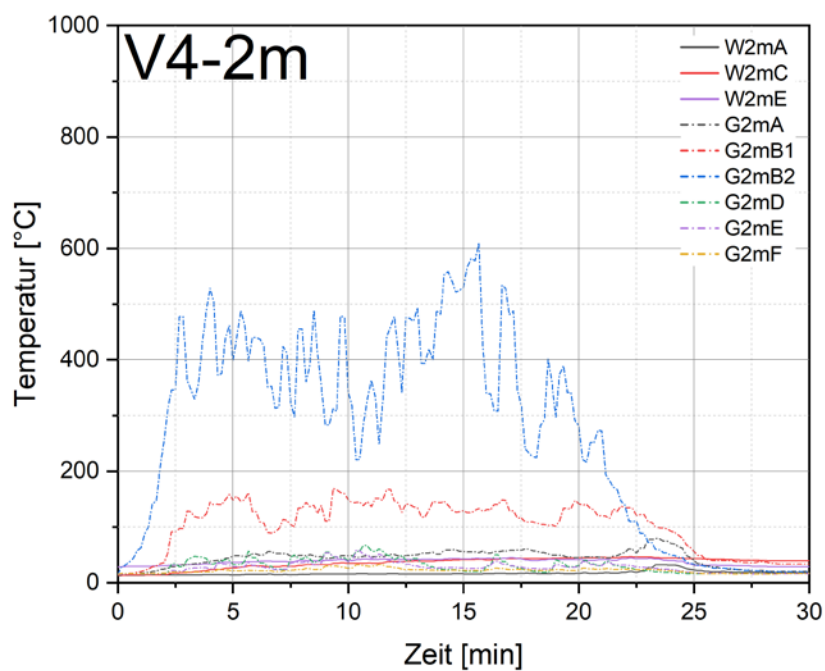


Abbildung A2.68: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 2,0 m für V4

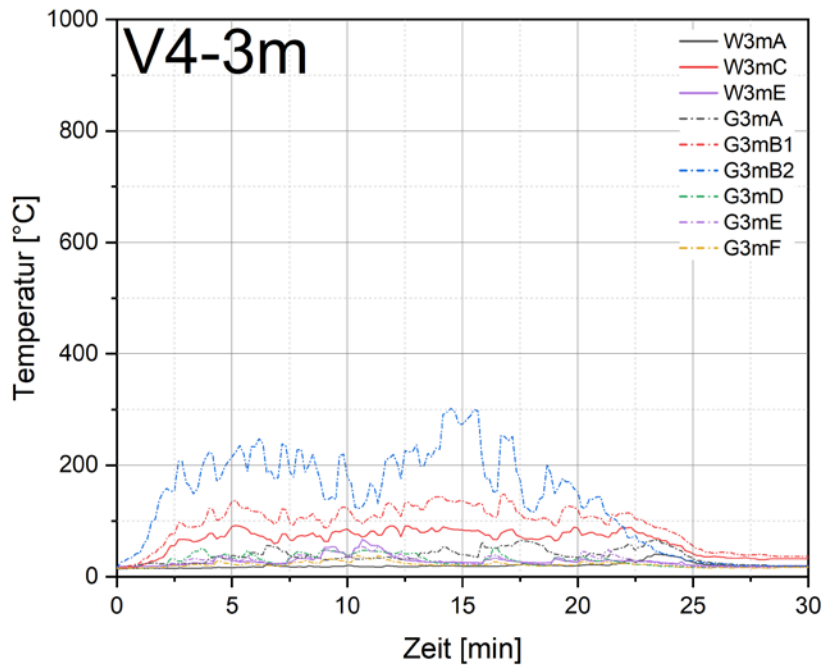


Abbildung A2.69: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 3,0 m für V4

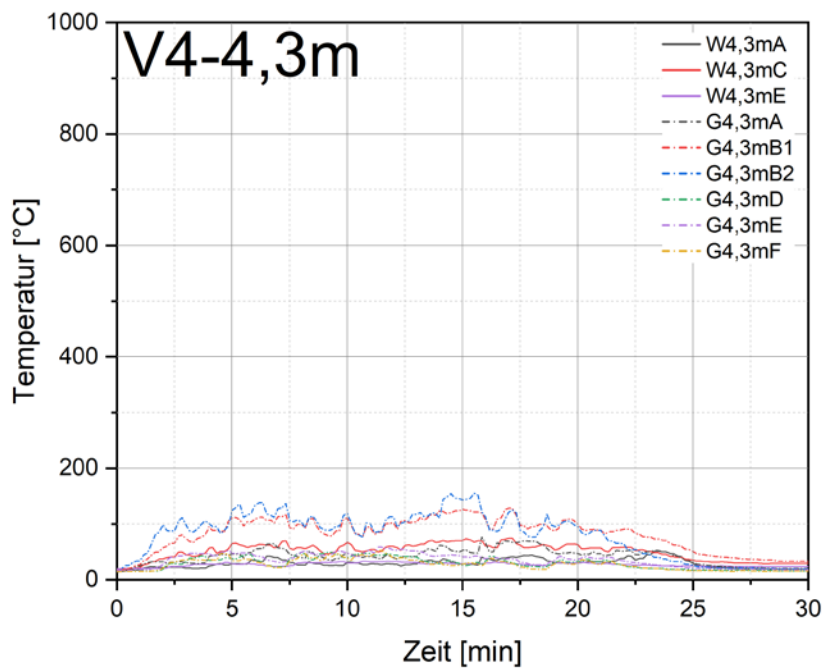


Abbildung A2.70: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 4,3 m für V4

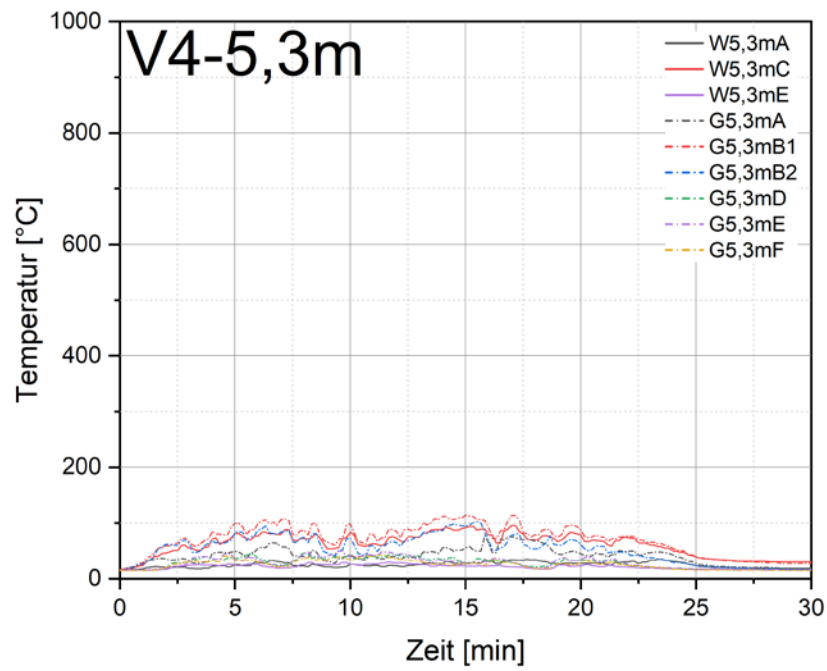


Abbildung A2.71: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 5,3 m für V4

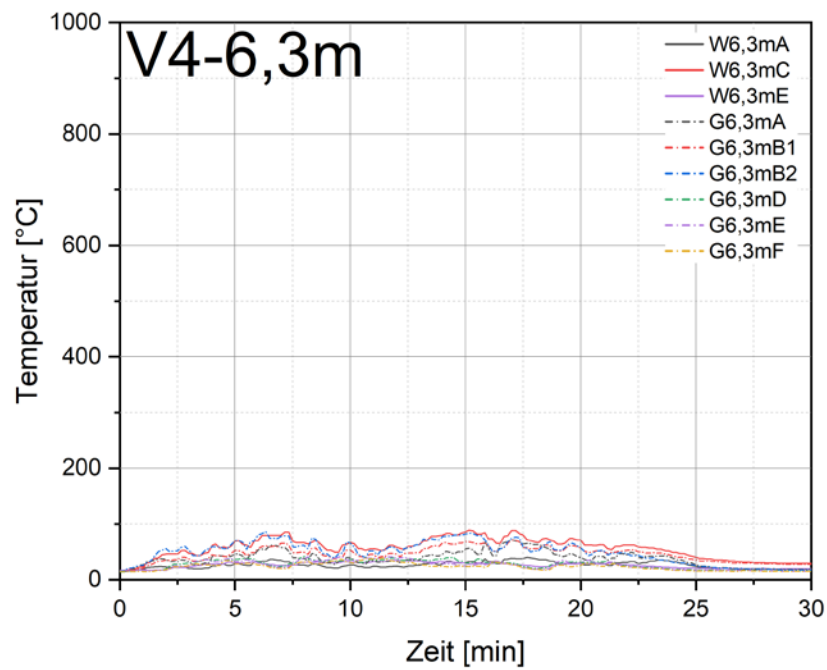


Abbildung A2.72: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 6,3 m für V4

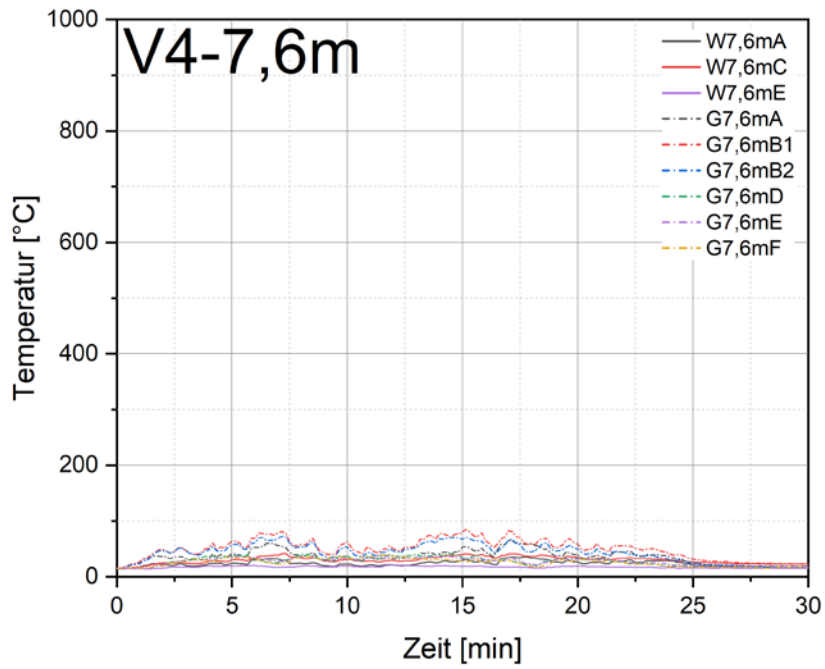


Abbildung A2.73: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 7,6 m für V4

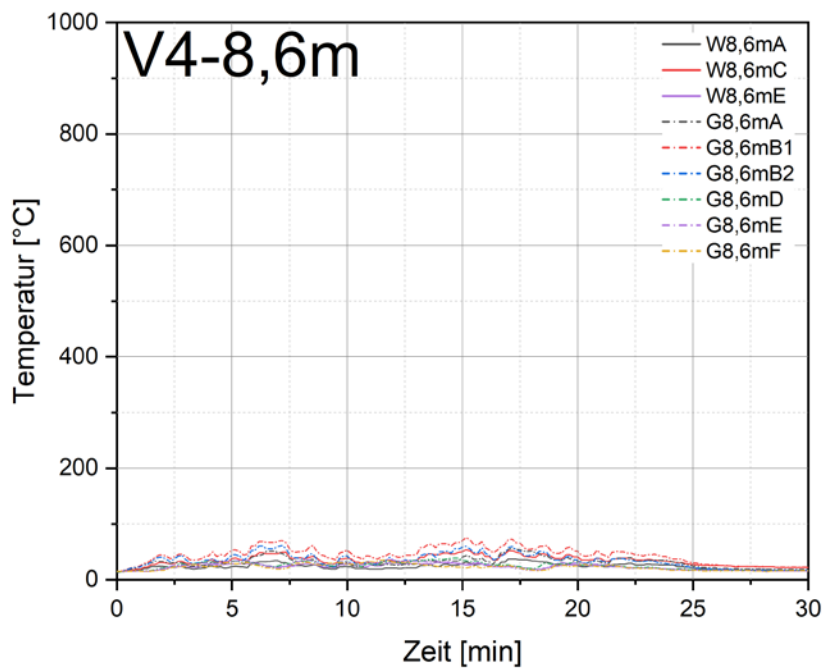


Abbildung A2.74: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 8,6 m für V4

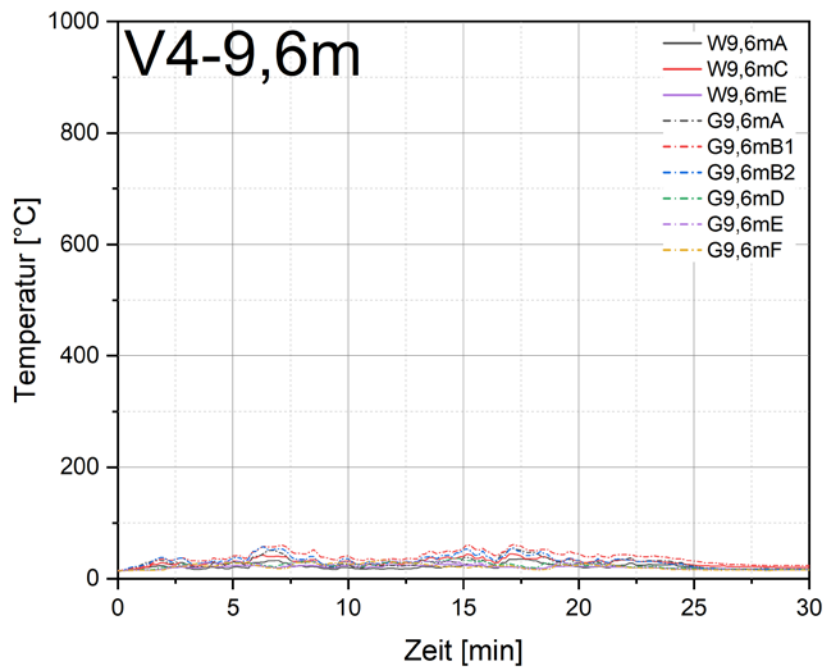


Abbildung A2.75: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 9,6 m für V4

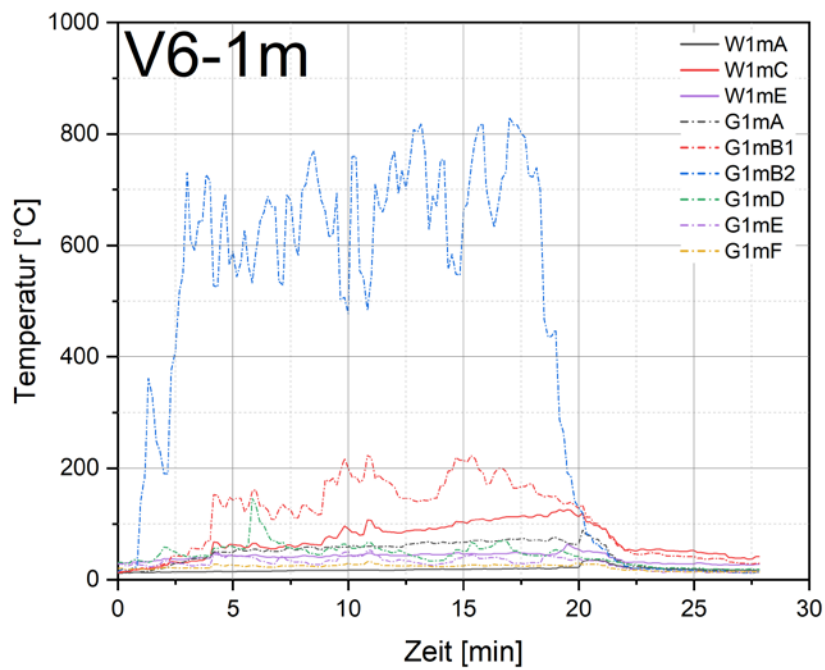


Abbildung A2.76: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 1,0 m für V6

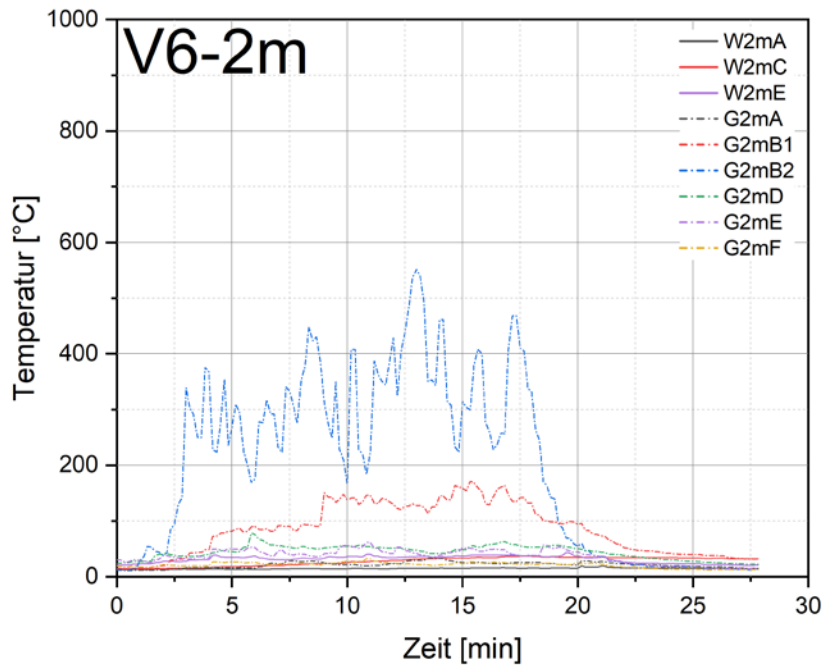


Abbildung A2.77: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 2,0 m für V6

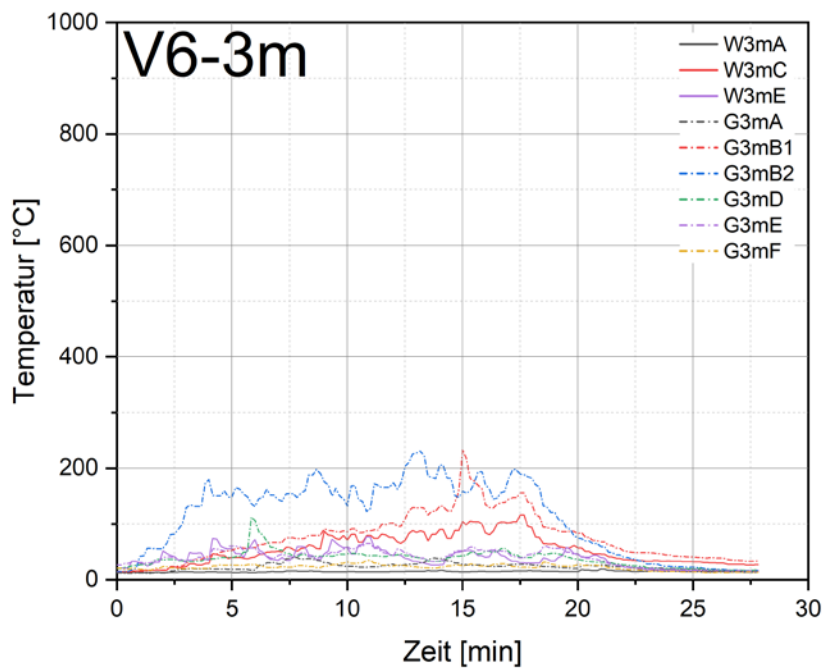


Abbildung A2.78: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 3,0 m für V6

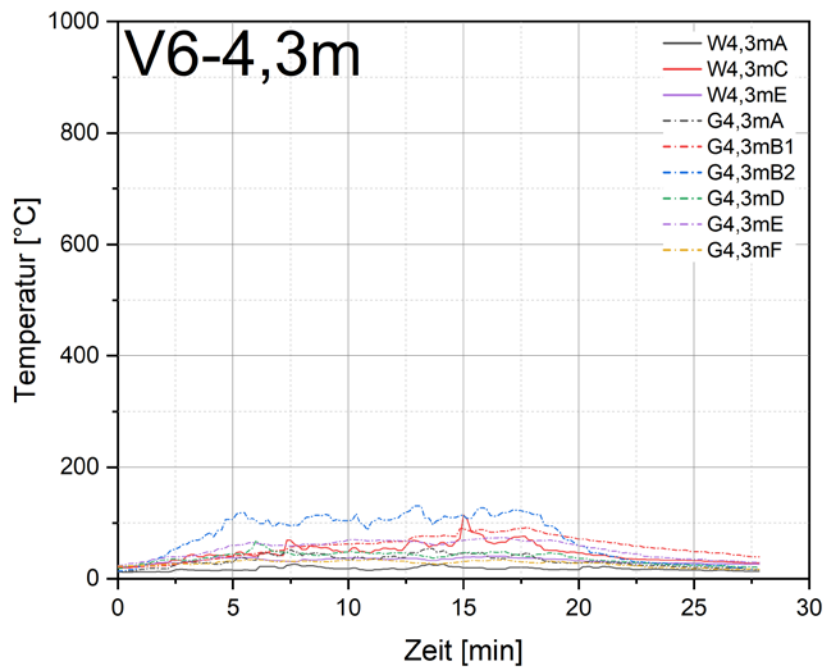


Abbildung A2.79: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 4,3 m für V6

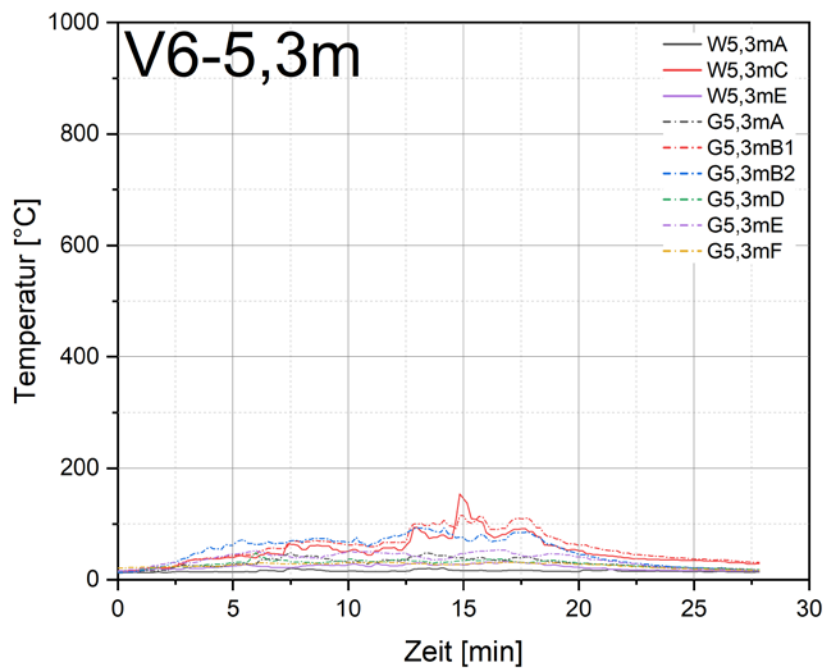


Abbildung A2.80: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 5,3 m für V6

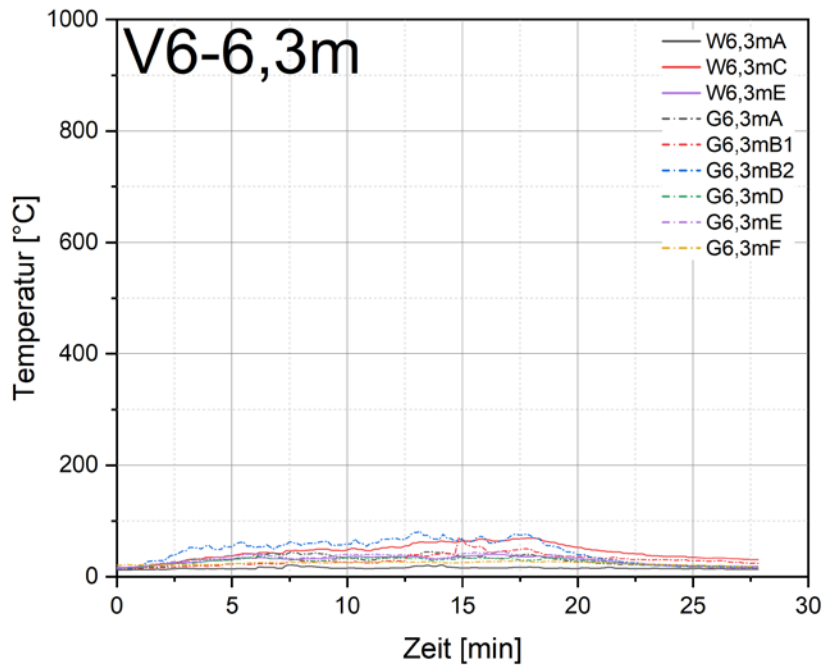


Abbildung A2.81: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 6,3 m für V6

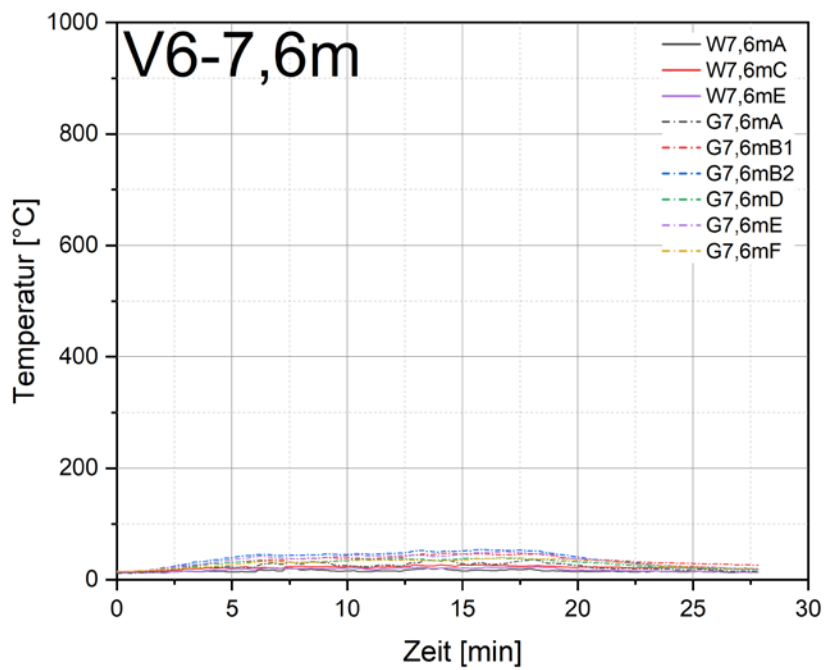


Abbildung A2.82: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 7,6 m für V6

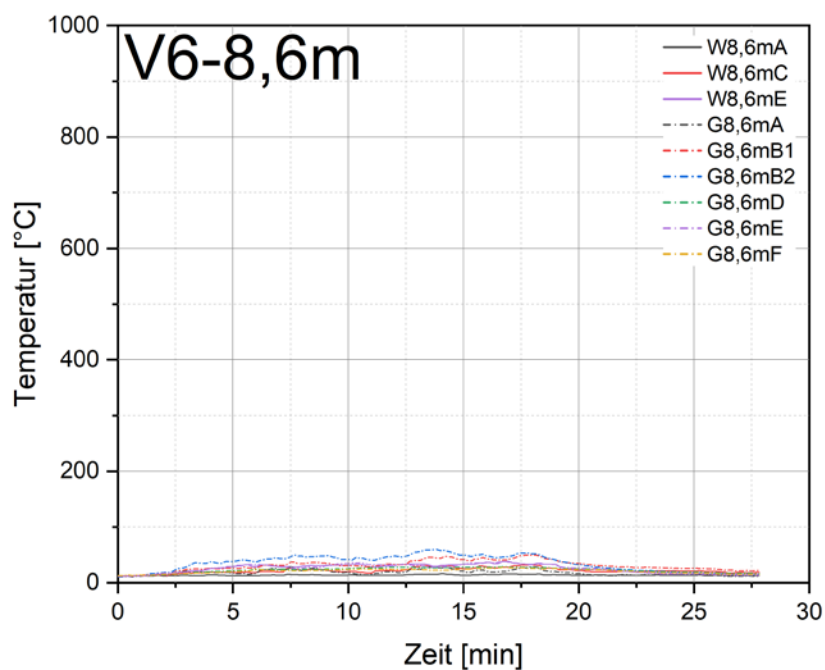


Abbildung A2.83: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 8,6 m für V6

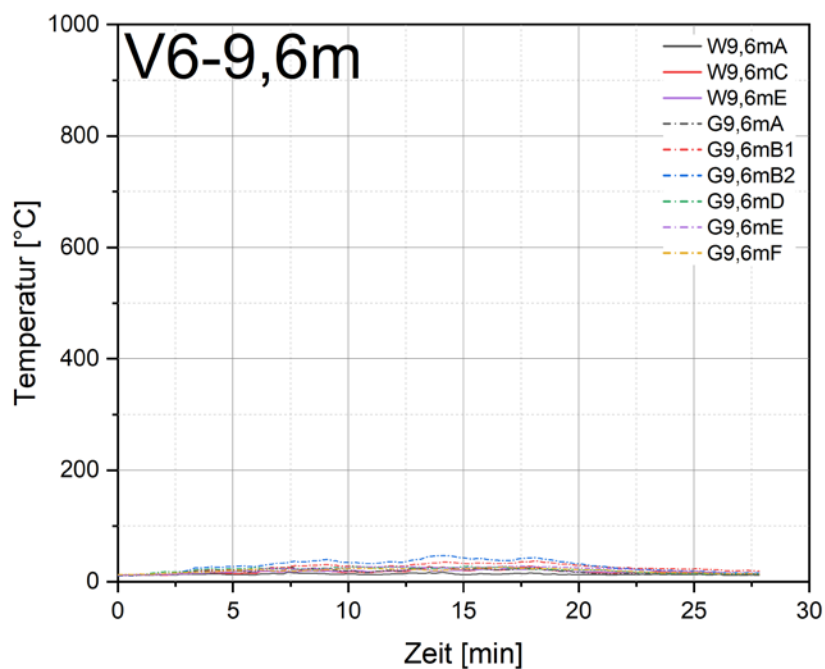


Abbildung A2.84: Temperatur-Zeit Diagramm aller Mantelthermoelemente der Höhe 9,6 m für V6

Anlage 3: Wärmestromdichte-Zeit-Diagramme der Großversuche - ungeglättet

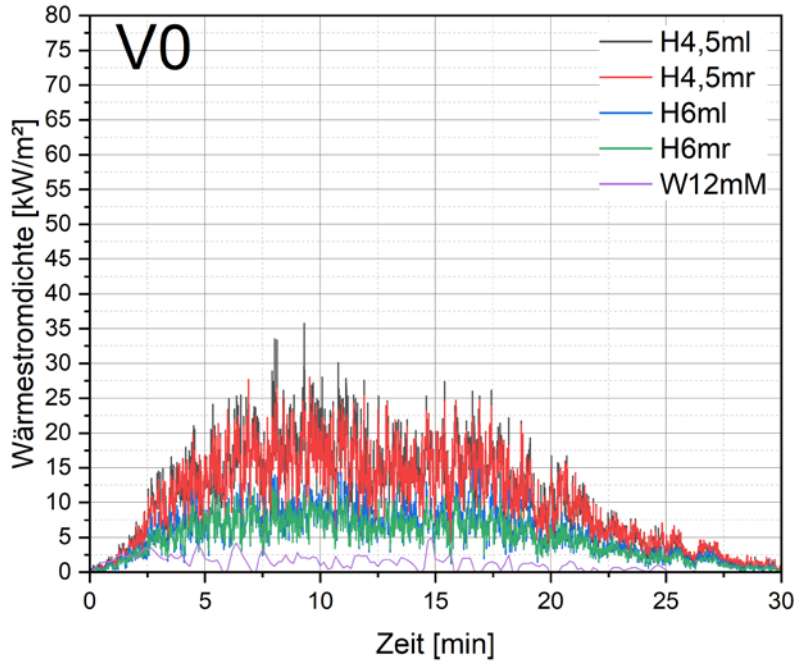


Abbildung A2.1: Wärmestromdichte-Zeit-Diagramm für V0, ungeglättet

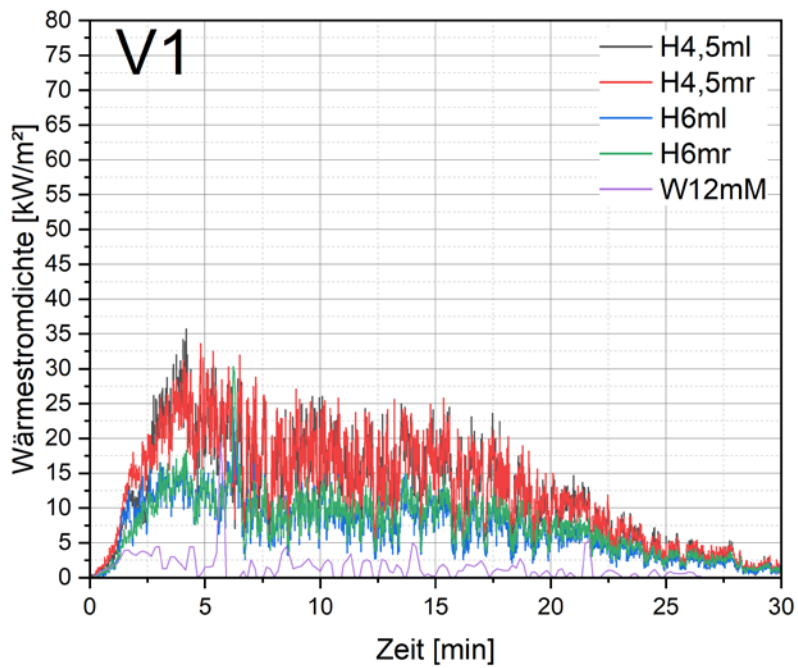


Abbildung A2.2: Wärmestromdichte-Zeit-Diagramm für V1, ungeglättet

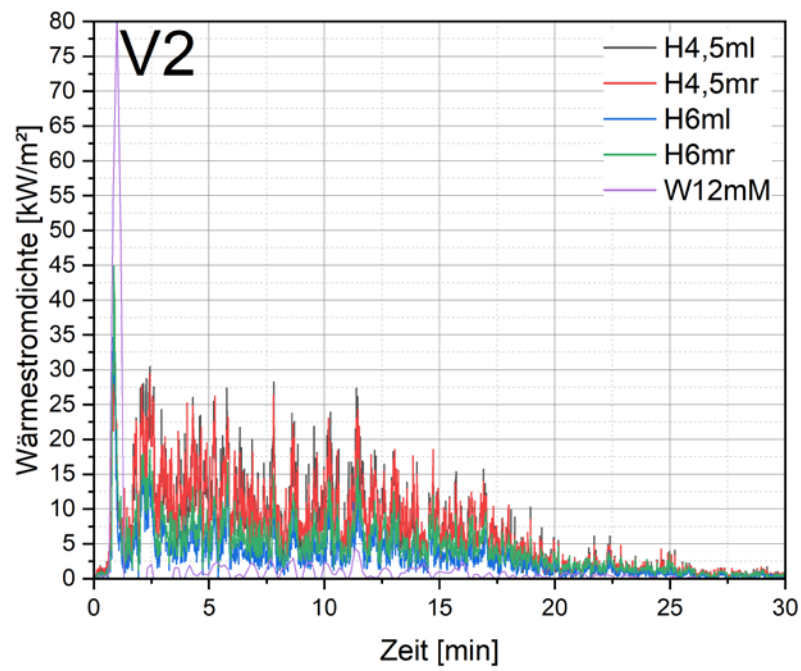


Abbildung A2.3: Wärmestromdichte-Zeit-Diagramm für V2, ungeglättet

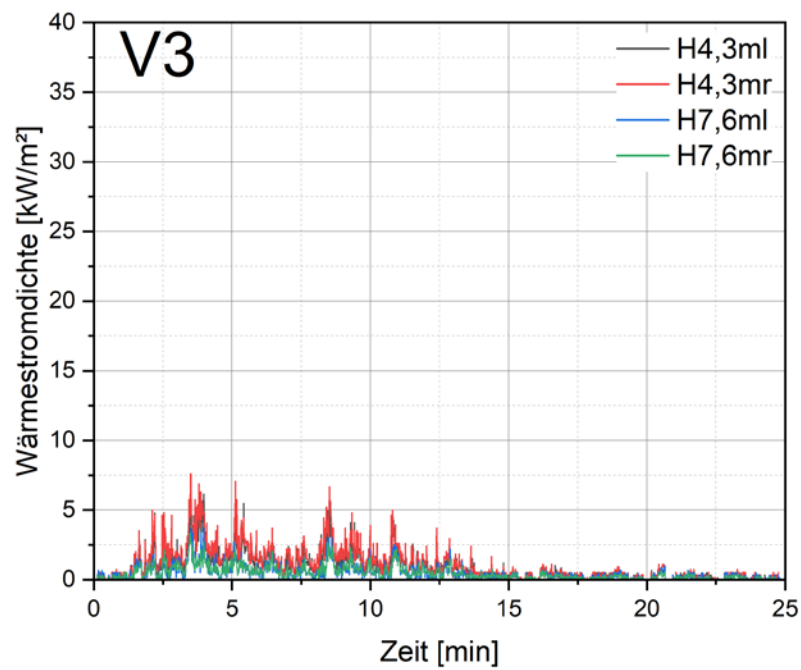


Abbildung A2.4: Wärmestromdichte-Zeit-Diagramm für V3, ungeglättet

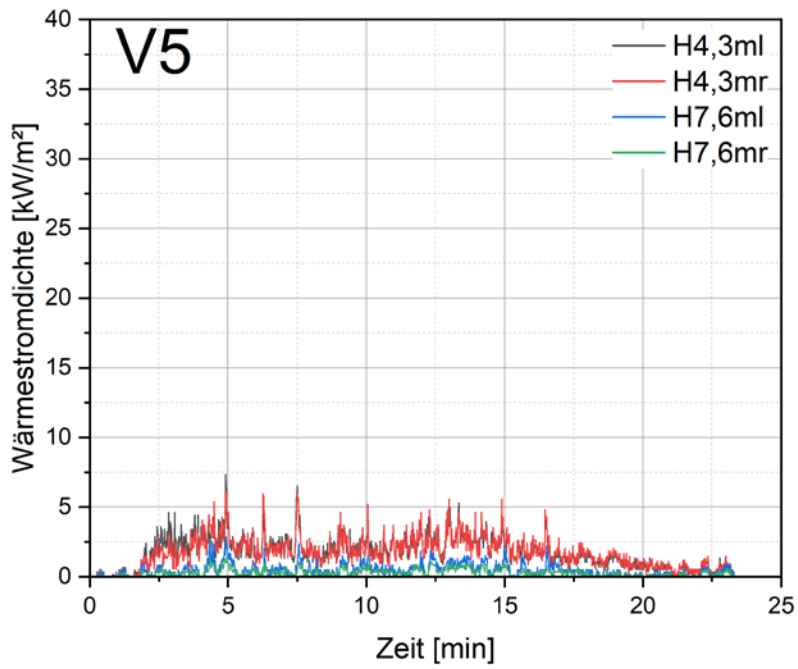


Abbildung A2.5: Wärmestromdichte-Zeit-Diagramm für V5, ungeglättet

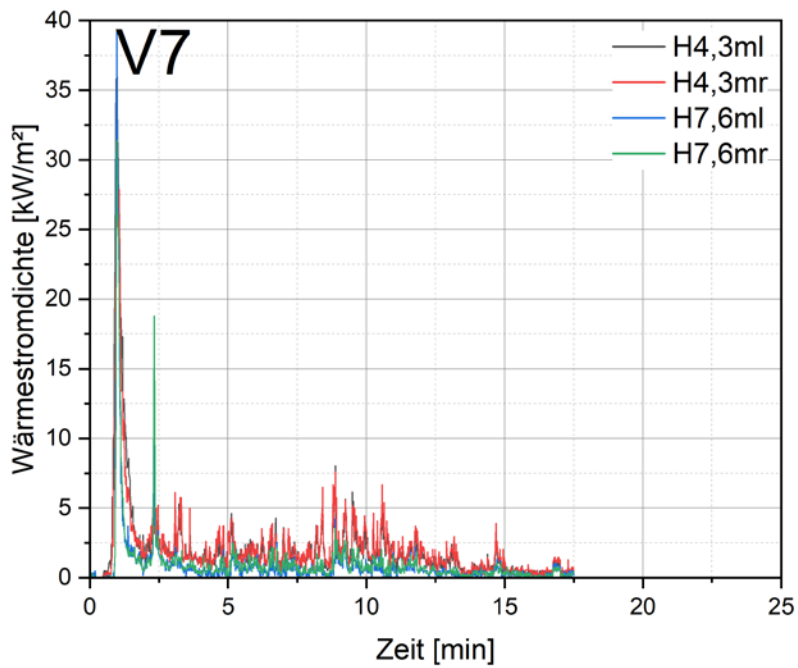


Abbildung A2.6: Wärmestromdichte-Zeit-Diagramm für V7, ungeglättet