

Master's Thesis

Timber high-rise buildings

fire risk evaluation of flammable load-bearing elements

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Hochhäuser aus Holz

Zur Beurteilung der Brandschutzsicherheit von brennbaren
Tragwerkselementen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Diplom-Ingenieurs
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

David Nöbauer, BSc.

Matr.Nr.: 01126199

unter der Anleitung von

Assoc.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Alireza Fadai

Institut für Architektur und Entwerfen
Forschungsbereich Tragwerksplanung und Ingenieurholzbau
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/259.2, A-1040 Wien

Wien, im Oktober 2018

Danksagung

Zunächst möchte ich gerne meinem Masterarbeitsbetreuer Assoc.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Alireza Fadai danken, der mich durch seine fachliche Kompetenz sowie seiner besonnenen, ermutigenden und wertschätzenden Art bei der Bearbeitung des gewünschten Themas bestmöglich beraten hat.

Ein großer Dank gebührt meinen Eltern, die mir das Studium ermöglicht haben, die mich unterstützt und in jeder Lebenslage stets an mich geglaubt haben.

Ein besonderer Dank gilt meiner Partnerin für die langanhaltende Geduld und Rücksicht über alle Höhen und Tiefen während dieser Arbeit und für den kontinuierlichen Ansporn die Arbeit zu Ende zu bringen.

Zum Schluss möchte ich mich auch bei all jenen bedanken, die mir während meiner Studienzeit und beim Verfassen meiner Diplomarbeit mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind.

Abstract

With means of theoretical and empirical research this master thesis' main question "Which effects do combustible structural elements of high-rise buildings have on the fire risk?". The theoretical part contains definitions of research relevant terms. Thereafter, the paper focuses on current fire protection regulations and their application problems in novel constructions. This is followed by the current state of research to elaborate the basics and characteristics of fire risks. Therefore, the findings of the research in relevant literature will be summarized and considered critically, as well as own ideas and findings are presented.

The empirical part deals with the central research question. For this purpose, the fire protection regulations for skyscrapers in Vienna are assessed by the fire risk assessment method F.R.A.M.E according to [1]. Subsequently, a variant with visible solid wood construction is presented and subjected to a safety assessment. In addition, proposals for suitable compensatory measures will be developed. The study shows that timber high-rise buildings have the same level of fire safety as conventional non-combustible constructions.

Kurzfassung

Anhand einer theoretischen und empirischen Auseinandersetzung wird im Zuge der Masterarbeit der Forschungsfrage „Welche Auswirkungen haben brennbare Tragwerkselemente von Hochhäusern auf das Brandrisiko?“, nachgegangen. Im Theorie-Teil findet sich eine Begriffsklärung, die im Zusammenhang mit der Forschungsfrage steht. Danach wird auf die aktuellen Brandschutzvorschriften und deren Anwendungsprobleme bei neuartigen Konstruktionen eingegangen. Danach folgt der aktuelle Stand der Forschung um Grundlagen und Charakteristika von Brandrisiken genauer herauszuarbeiten. Im Zuge dessen werden die Erkenntnisse der Recherchen in einschlägiger Literatur zusammengefasst und kritisch betrachtet, sowie eigene Ideen und Feststellungen präsentiert.

Im empirischen Teil wird der zentralen Forschungsfrage nachgegangen. Dazu werden zunächst die Brandschutzvorschriften für Hochhäuser in Wien durch die Brandrisikobewertungsmethode F.R.A.M.E nach [1] beurteilt. Anschließend wird eine Variante mit sichtbarer Holzmassivbauweise vorgestellt und ebenfalls einer Sicherheitsbewertung unterzogen. Darüber hinaus werden Vorschläge für geeignete Kompensationsmaßnahmen erarbeitet. Die Untersuchung zeigt, dass Hochhäuser aus Holz dasselbe Brandsicherheitsniveau wie herkömmliche nichtbrennbare Bauweisen aufweisen.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung.....	3
Abstract.....	4
Kurzfassung.....	5
1 Einleitung	1
1.1 Motivation Hochhäuser aus Holz.....	1
1.2 Aktuelle Holzhochhaus-Bauprojekte	2
1.3 Problematik: Kein reines Holztragwerk.....	2
1.4 Forschungsfrage.....	3
2 Theoretische Grundlagen	4
2.1 Klärung zentraler Begriffe.....	4
2.1.1 Hochhäuser aus Holz	4
2.1.2 Brennbare Tragwerkselemente.....	4
2.1.3 Brandrisiko	5
2.1.4 Risikobeurteilung	6
2.2 Brandschutzvorschriften	6
2.2.1 Präskriptiver Ansatz zur Risikobeurteilung.....	6
2.2.2 Leistungsorientierte Brandschutzvorschriften	10
2.2.3 Abweichung von Brandschutzvorschriften in Österreich.....	10
2.2.4 Kritik an Schutzzieldefinitionen.....	11
2.3 Forschungsstand.....	12
2.3.1 Komponenten der Brandentstehung	12
2.3.2 Häufigkeit eines Brandereignisses.....	13
2.3.3 Brandweiterleitung	14
2.3.4 Gliederung und differenzierte Betrachtung von Risiken.....	14
2.3.5 Personenrisiko im Brandfall	16
2.3.6 Personenrisiko in Österreich steigt mit zunehmender Fluchthöhe	17
2.3.7 Ansatz zur Ermittlung der Tragwerkszuverlässigkeit im Brandfall	18
2.3.8 Ansatz zum Nachweis der Evakuierungsfähigkeit	20
2.3.9 Festlegen eines akzeptablen Risikoniveaus.....	21
3 Empirische Untersuchung.....	24
3.1 Vorgehensweise	24
3.1.1 Semi-quantitative Bewertungsmethoden.....	24
3.1.2 Methodenwahl	25
3.1.3 Risikobewertungsmethode F.R.A.M.E nach De Smeg.....	25
3.2 Sicherheitsbewertung der Brandschutzvorschriften in Wien	54
3.2.1 Ermittlung des Brandlastfaktors.....	55
3.2.2 Ermittlung des Faktors für die Brandausdehnung i	56

3.2.3	Ermittlung des Faktors für Größe und Form des Brandabschnitts g	57
3.2.4	Ermittlung des Faktors für Verrauchungsgefahr v.....	57
3.2.5	Ermittlung des Faktors für die betrachtete Etage e.....	58
3.2.6	Ermittlung des Faktors für die Gebäudezugänglichkeit z.....	58
3.2.7	Ermittlung des Faktors für die Löschwasserversorgung W	59
3.2.8	Ermittlung des Faktors für anlagentechnische Maßnahmen S.....	60
3.2.9	Ermittlung des Faktors für organisatorische Maßnahmen N	61
3.2.10	Ermittlung des Faktors zur Beachtung der Feuerwiderstände F.....	62
3.2.11	Ermittlung des Faktors für Evakuierungssicherheit U.....	62
3.2.12	Ermittlung des Rettungsfaktors Y	64
3.2.13	Ermittlung des Faktors für die Brandentstehungswahrscheinlichkeit a... 64	
3.2.14	Ermittlung des Faktors für die geschätzte Evakuierungsdauer t.....	65
3.2.15	Ermittlung des Faktors für die Ersetzbarkeit des Gebäudeinhalts c	66
3.2.16	Ermittlung des Faktors Berücksichtigung von Unterbrechungen d	66
3.2.17	Ermittlung der Risiken.....	66
3.3	Sicherheitsbewertung der Variante aus Holz	67
3.3.1	Ermittlung des Brandlastfaktors.....	70
3.3.2	Ermittlung des Faktors für die Brandausdehnung i	71
3.3.3	Ermittlung des Faktors für Größe und Form des Brandabschnitts g	72
3.3.4	Ermittlung des Faktors für Verrauchungsgefahr v.....	72
3.3.5	Ermittlung des Faktors für die betrachtete Etage e.....	72
3.3.6	Ermittlung des Faktors für die Gebäudezugänglichkeit z.....	72
3.3.7	Ermittlung des Faktors für die Löschwasserversorgung W	73
3.3.8	Ermittlung der Faktoren S, N, F, Y, d, a, c, t.....	73
3.3.9	Ermittlung der Risiken.....	74
3.4	Sicherheitsbewertung von Kompensationsmaßnahmen	75
3.4.1	Einbau einer Brandrauchentlüftung	75
3.4.2	Verbesserung des automatischen Brandmeldersystems	76
3.4.3	Ermittlung der Risiken.....	76
3.5	Darstellung der Ergebnisse.....	77
4	Konklusion	80
5	Fazit und Ausblick.....	82
	Literaturverzeichnis.....	83
	Abbildungsverzeichnis.....	85
	Tabellenverzeichnis	86

1 Einleitung

Die hier vorliegende Masterarbeit beschäftigt sich mit dem Thema „Hochhäuser aus Holz: Zur Beurteilung der Brandschutzsicherheit von brennbaren Tragwerkselementen.“ In diesem einleitenden Kapitel wird zunächst auf die Motivation Hochhäuser aus Holz bauen zu wollen eingegangen. In weiterer Folge werden in diesem Zusammenhang aktuelle Bauprojekte vorgestellt. Im Zuge dessen kann eine Problematik aufgezeigt werden, aus welcher die Fragestellung dieser Arbeit herausgearbeitet wird.

1.1 Motivation Hochhäuser aus Holz

Der derzeitige weltweite Trend zur Urbanisierung rückt den Gedanken, Städte durch höhere Bauwerke zu verdichten, in den Mittelpunkt. Städte werden als Zentren der Kreativität und Innovation begriffen und stehen vor der Aufgabe, eine stetig steigende Zahl an Menschen zu beherbergen. Mit dem gegenwärtig für die flächigen Tragwerkselemente üblicherweise eingesetzten Baustoff Beton, lässt sich dieses erforderliche Bauvolumen jedoch nicht ohne gravierende Umweltauswirkungen realisieren, es würde zum Ausstoß von Treibhausgasen in einer erheblichen Größenordnung und möglicherweise zu einer katastrophalen Beschleunigung des Klimawandels führen [2]. Trotz der hohen CO₂-Emissionen bei der Herstellung, kann der in Beton enthaltene Zement nur einmal als Bindemittel verwendet werden. Aus diesem Grund sollte aufgrund der hohen CO₂ Konzentration in der Atmosphäre auf den Einsatz von Beton nach Möglichkeit verzichtet werden. Stahlkonstruktionen können zwar vergleichsweise effizient recycelt werden, eine Anwendung von flächigen Tragwerkselementen aus Stahlblechen ist aus verschiedenen Gründen jedoch nur im Verbund mit Beton sinnvoll möglich. Während viele Anforderungsbereiche im Tiefbau kaum einen anderen Baustoff zulassen, ist die Verwendung von Beton im Hochbau zu hinterfragen.

Im Gegensatz dazu kann man aus Holz auch flächige Tragwerkselemente herstellen und dabei durch den Bau die Treibhausbelastung sogar senken. Nach [3] ist der Rohbau eines Hochhauses in Holzbauweise jedoch um 70 % teurer als Stahlbeton. Der Einsatz von Holz als Baustoff ermöglicht laut [3] aber neue Lösungen und damit ein enormes Optimierungspotential im Bereich Fassade, Ausbau und Haustechnik.

Gemessen an den Schlüsselfertigkosten wäre damit eine Kostenreduzierung bis zur Kostengleichheit möglich [3]. Bis diese Optimierungen durchgeführt sind, bleiben solche Konstruktion zwar teurer aber sie sind trotzdem wirtschaftlich [3]. Besonders in Zentren von Ballungsräumen rücken die Grundstückskosten und die erzielbaren Mietpreise im Vergleich zu den Errichtungskosten in den Vordergrund. Beispielsweise wird dem Hochhaus eine enorme repräsentative Wirkung zugesprochen, wie man am Wettkampf, immer höhere Gebäude zu bauen, erkennen kann. Die durch die Vorfertigung im Holzbau erreichbare kurze Bauzeit ermöglicht rasche Renditeausschüttungen an die Investoren und garantiert geringere Lärm- und Staubemissionen für die Anrainer. Als Innovationsquelle eröffnet der Baustoff Holz Raum für neue Ideen. In den Köpfen von Architekten und Bauingenieuren bilden sich neue Zukunftsvisionen ähnlich wie bei der Entwicklung der Stahlbetonbauweise vor mehr als 100 Jahren. Davon angesteckt ist bereits ein regelrechter Wettbewerb um das höchste Hochhaus aus Holz entstanden.

1.2 Aktuelle Holzhochhaus-Bauprojekte

Die momentane Spitze, ein 63 m hohes Studentenwohnheim in Vancouver, wird demnächst vom HoHo in Wien um 21 m in der Höhe überboten. Weitere Projekte wie der Oakwood Tower (300 m) in London und der W350 (350 m) in Tokyo sollen folgen, befinden sich aber derzeit noch in Planung. Auf eine Auseinandersetzung mit diesen und weiteren aktuellen Holzhochhausprojekten soll an dieser Stelle nicht detaillierter eingegangen werden, stattdessen wird auf folgende Literatur verwiesen: [2], [4], [5].

1.3 Problematik: Kein reines Holztragwerk

Die Euphorie für den Bau von Holzhochhäusern scheint zunächst ungebrochen. Erst beim genaueren Studium der derzeit höchsten Holzhochhäuser wird ersichtlich, dass diese häufig ein hybrides Tragwerkssystem aufweisen. Dabei wird ein Gebäudekern in herkömmlicher Stahlbetonbauweise vor Ort hergestellt und anschließend ein Holztragwerk angedockt. Durch Ausführung als Stahlbeton-Holz-Hybrid-Konstruktion bekommt der Begriff „Holzhochhaus“ eine neue Bedeutung, da es sich in Wirklichkeit um ein Tragwerk „mit“ Holz und nicht anzunehmen um ein Tragwerk „aus“ Holz handelt. Diese Tatsache ist insofern keine vernachlässigbare rein

begriffliche Problematik, da unter anderem die in Kapitel 1.1 erläuterten Vorteile an Gültigkeit verlieren. In diesem Zusammenhang ist auch die vollständige Verkleidung der Holzelemente mit Gipsplatten durchaus problematisch zu sehen.

Die Ursache kein reines Holztragwerk verwenden zu können liegt nicht an einer mangelnden statischen Tragfähigkeit. Nach [4] bilden hohe und mehrgeschoßige Gebäude seit dem Aufkommen befestigter Städte und Dörfer den Schwerpunkt baukonstruktiver Entwicklungen. Aufgrund begrenzter Transportmöglichkeiten war es erforderlich, für Bauzwecke überwiegend örtlich verfügbare Materialien heranzuziehen. Während in Teilen der Erde aus diesem Grund hohe Türme und Sakralbauten meist aus Stein errichtet wurden, etablierten sich insbesondere in den waldreichen Regionen in Ostasien seit der Antike das Wissen und das Handwerk zur Errichtung dauerhafter, mehrgeschoßiger Holzbauten. Die bis heute erhaltene, im Jahr 1644 widererrichtete Pagode^a des To-ji Tempels in Kyoto, erreicht eine eindrucksvolle Höhe von 57 m. Laut [5] soll es im 8. Jhd. sogar Pagoden mit einer Höhe von bis zu 100 m gegeben haben. Auch aktuelle Untersuchungen zeigen, dass für Hochhäuser mit Höhen bis 75 m aber auch für 100 m und mehr durchaus wirtschaftliche Konstruktionen aus Holz möglich sind [2], [6], [7]. In Wirklichkeit ist der Stahlbetonkern meist aus Brandschutzgründen (Brandschutzvorschriften) erforderlich [2].

1.4 Forschungsfrage

Aus dieser Auseinandersetzung mit den aktuellen Holzhochhausprojekten, der sich daraus ergebenden Problematik, sowie der vorhandenen Motivation Hochhäuser aus Holz zu errichten, ergibt sich folgende Forschungsfrage, die beantwortet werden soll:

Welche Auswirkungen haben brennbare Tragwerkselemente von Hochhäusern auf das Brandrisiko?

^a Pagode: Ein markantes, mehrgeschossiges, turmartiges Bauwerk, dessen einzelne Geschoße meist durch vorragende Gesimse oder Dachvorsprünge voneinander getrennt sind.

2 Theoretische Grundlagen

Dieser Teil der Masterarbeit befasst sich zunächst in Kapitel 2.1 mit der Klärung der zentralen Begriffe, die in Zusammenhang mit der Forschungsfrage stehen. Anschließend wird unter Punkt 2.2 geklärt, inwiefern die gültigen Brandschutzvorschriften eine Risikobeurteilung darstellen. In Kapitel 2.3 sollen Grundlagen für alternative Ansätze zur Risikobeurteilung geschaffen werden.

2.1 Klärung zentraler Begriffe

In diesem Abschnitt werden die Begriffe „Hochhäuser aus Holz“, „brennbare Tragwerkselemente“, „Brandrisiko“ und „Risikobeurteilung“ geklärt. Das Ziel besteht darin, alle Begriffe, die in Zusammenhang mit dem Thema und der Forschungsfrage stehen, genau zu erläutern. Dadurch soll es der Leserin/dem Leser ermöglicht werden, dem Fortgang der Untersuchung zu folgen und gewonnene Ergebnisse nachvollziehen zu können.

2.1.1 Hochhäuser aus Holz

Im Zuge dieser Arbeit wird ein Hochhaus in Anlehnung an [8] als ein Gebäude mit einer Höhe von mehr als 30 m definiert. Der in der Mitte stehende Teil des Begriffes „aus“ soll dazu dienen, der möglichen Doppeldeutigkeit des Begriffs „Holzhochhaus“ zu entkommen. Wie bereits in Kapitel 1.2 erwähnt, werden Hochhäuser mit einem Ortbetonkern und einigen Bauteilen aus Holz, welche häufig durch eine oder mehrere Lagen Gipsplatten verkleidet sind, im Rahmen dieser Ausarbeitung als Hochhaus „mit“ Holz bezeichnet. Im Gegensatz dazu sollen im Folgenden Hochhäuser „aus“ Holz untersucht werden, bei denen die Tragwerkselemente oberirdischer Geschosse zum weit überwiegenden Teil aus sichtbar ausgeführtem Holz (ohne Brandschutzverkleidungen) bestehen.

2.1.2 Brennbare Tragwerkselemente

Im nachstehenden Absatz wird auf „brennbare Tragwerkselemente“ eingegangen. Als „brennbar“ werden in der vorliegenden Arbeit jene Materialien bezeichnet, die unter den Bedingungen eines Vollbrandes einen Beitrag zur Brandlast im Brandabschnitt leisten. Dies entspricht allen Brandverhaltensklassen nach [9] ausgenommen den Klassen A1 und A2. Nach [10] sind massive Holztragwerkselemente als D-

s2, d0 eingestuft. Bei Anwendung von Flammschutzmitteln, welche die Entzündung von Holzwerkstoffen verzögern und die nachträgliche Energiefreisetzung minimieren können, kann das Brandverhalten abhängig vom verwendeten Mittel in die Klassen C bzw. B eingeordnet werden [10]. Auf derartige brandschutztechnische Anstriche des Holzes sollte allerdings verzichtet werden, da dies negative Auswirkungen auf die Recyclingfähigkeit hat [4]. Das Brandverhalten eines Baustoffes ist unbedingt vom Feuerwiderstand eines Bauteils zu unterscheiden. Der Feuerwiderstand eines Bauteils beschreibt nach [4] das Vermögen, standsicher zu bleiben (Kriterium R) sowie bei raumabschließenden Bauteilen den Durchgang von Rauchgasen (Kriterium E) und den Durchgang von Wärme (Kriterium I) für die geforderte Dauer zu verhindern. Der Begriff Tragwerkselemente dient als Hinweis auf den beabsichtigten Vergleich von Gebäudevarianten, die sich lediglich im Brandverhalten der Tragwerkselemente unterscheiden sollen.

2.1.3 Brandrisiko

An dieser Stelle wird eine Begriffsklärung des Terminus „Brandrisiko“ stattfinden, wobei zunächst auf die Definition des Begriffs Risiko eingegangen wird. Mit Risiko wird laut [11] im allgemeinen Sinn die Möglichkeit bezeichnet, dass aus Zustand, Umstand oder Vorgang ein Schaden entstehen kann. Im engeren Sinn beschreibt ein Risiko die Gefahr [12], während einer bestimmten Zeit einen Schaden zu erleiden, und kann somit auch als Maß für die Größe dieser Gefahren betrachtet werden. Der Ausdruck „Brand“ weist auf die Schadensursache, einen Gebäudebrand hin. Risiken werden im Zuge einer Risikoanalyse durch geeignete Methoden hinsichtlich der Wahrscheinlichkeit des Eintreffens und des Ausmaßes der Folgen charakterisiert und **wenn möglich** quantifiziert [11]. Ein Risiko kann demnach sowohl quantitativ als auch qualitativ ausgedrückt werden. Nach [11] ist man jedoch bestrebt, Risiken zu quantifizieren. In der einfachsten Form wird ein Risiko als Produkt der Häufigkeit eines Ereignisses und des dabei zu erwartenden Schadens verstanden [12]. Die Wahrscheinlichkeit nimmt Werte zwischen 0 und 1 ein und ist dimensionslos, da der zeitliche Bezug fehlt [11]. Bezieht man ein Risiko auf bestimmte Zeitintervalle spricht man nicht von Wahrscheinlichkeiten, sondern von Häufigkeiten. Alternativ zu diesem absoluten Ausdruck für ein Risiko (siehe [12]), ist auch eine relative Beschreibung des Risikos durch Zuweisung eines Werts möglich (siehe [1]).

2.1.4 Risikobeurteilung

Der Begriff Risikobeurteilung wird oft als Synonym mit Risikobewertung verwendet [11]. Im Rahmen der Risikobeurteilung wird nach [11] festgelegt, welche Risiken akzeptierbar sind bzw. akzeptiert werden müssen. Oft wird der Begriff Risikobeurteilung aber auch etwas erweitert betrachtet. In [12] werden darunter auch Methoden verstanden, bei denen der Nachweis nicht auf dem Vergleich von einem Risiko nach 2.1.3 geführt wird, sondern durch stellvertretende Werte oder durch die Einhaltung von taxativ aufgelisteten Vorschriften. In [12] werden die gebräuchlichsten Ansätze zur Risikobeurteilung im weiteren Sinn erläutert und im Zuge dessen darauf hingewiesen, dass die meisten Ansätze zur Risikobeurteilung die Definition bzw. Ermittlung des eigentlichen Risikos umgehen.

2.2 Brandschutzvorschriften

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Befolgen von Brandschutzvorschriften, analog zu [12], ebenfalls als Risikobeurteilungsmethode angesehen. Die Risikobeurteilungsmethodik, die behandelt werden soll, ist nicht auf den Baustoff Holz beschränkt, sondern ist für alle Bauweisen gültig. Im Folgenden wird versucht, die Art und Weise der Vorschriften zu analysieren und den aktuellen Stand der Brandschutzvorschriften zu präsentieren. Dabei wird zunächst nicht auf die Brandschutzvorschriften eines bestimmten Staates oder einer Region eingegangen. Es wird stattdessen versucht, allgemein gültige Aussagen und die Gemeinsamkeiten von Brandschutzvorschriften herauszuarbeiten. Der Autor stützt sich dabei auf entsprechende Literatur. Ein Anspruch auf Vollständigkeit kann im Rahmen dieser Diplomarbeit nicht gegeben werden. Dennoch stellt dieses Kapitel einen Einblick in die Vorgehensweise zur Risikobeurteilung mit Brandschutzvorschriften dar. Dabei wird in einem ersten Schritt auf die Problematik präskriptiver Vorschriften eingegangen. Darauf aufbauend wird ein leistungsorientierter Ansatz präsentiert, welcher zwar die Mängel des präskriptiven Ansatzes beheben kann, jedoch aufgrund fehlender Kenntnisse hinsichtlich eines akzeptablen Risikoniveaus in seiner Anwendung eingeschränkt ist.

2.2.1 Präskriptiver Ansatz zur Risikobeurteilung

Nach [13] beinhalten Brandschutzvorschriften im Allgemeinen oft lediglich materielle Anforderungen an bestimmte Schutzmaßnahmen. Eine derartige Festlegung

wird als vorgeschriebene oder „präskriptive“ Ausführung bezeichnet. Solange Planer mit diesen präskriptiven Standardschutzkonzepten arbeiten, gestaltet sich die Brandrisikobeurteilung sehr einfach, da eine Auseinandersetzung mit dem eigentlichen Begriff Brandrisiko nicht erforderlich ist. Das Brandrisiko gilt als ausreichend klein, wenn bestimmte definierte Produkttypen, Klassen, Dimensionen oder sonstige festgelegte Planungselemente eingehalten werden. Dem Verlangen nach Fortschritt, innovativen Gebäuden und der Weiterentwicklung von Werkstoffen kann diese Art der Risikobeurteilung jedoch nicht folgen [12], da für neue Probleme keine Standardlösungen vorhanden sind. Durch die präskriptiven Anforderungen werden der Freiheitsgrad und die Ausarbeitung von alternativen Lösungen (in diesem Fall die Errichtung eines Hochhauses aus Holz) deutlich eingeschränkt. Selbst bei ständiger Anpassung und Adaptierung kann es sich bei präskriptiven Regeln nur um ein vereinfachtes Nachweisformat handeln, welches gegenüber genaueren Einzelfallbetrachtungen stets auf konservativeren Ansätzen beruhen muss. In [2] wird aus diesem Grund ein Wandel der Brandschutzvorschriften als unbedingt erforderlich erachtet.

Die ersten Baugesetze zum Brandschutz wurden im 18. Jahrhundert als Folge von schweren Stadtbränden erlassen. Nach [14] wurden aufgrund mangelnder Möglichkeiten zur Brandbekämpfung der bauliche Brandschutz als wichtigste Maßnahme zur Vermeidung von Brandkatastrophen angesehen. Diese Bestimmungen, wonach Gebäude hauptsächlich aus nichtbrennbaren Baustoffen wie Ziegel oder Stein zu errichten waren, um eine „nichtbrennbare Stadt“ zu erhalten, beschränkten den Einsatz von Holz in vielerlei Hinsicht. Vor diesem Hintergrund bot sich laut [2] für Architekten und Bauingenieure durch die Einführung des Stahlbetons im späten 19. Jahrhundert eine überzeugende, den Vorschriften entsprechende Zukunftsvision. Begünstigt durch Entwicklung von neuzeitlichen Personenaufzugsanlagen wurde exakt zu dieser Zeit auch der Grundstein für Hochhäuser wie wir sie heute kennen gelegt. Aufgrund der rasant steigenden Einwohnerzahl waren, um die Grundstücke optimal zu nutzen, größere Bebauungsdichten erforderlich. Um dennoch den Gesetzen zum Brandschutz zu entsprechen, kam die bis heute weltweit verbreitete Stahlbeton- und Stahlskelettbauweise bei Hochhäusern zum Einsatz [15]. In Europa hat Holz als konstruktiver Baustoff aufgrund von Stadt- und Dorfbränden infolge von Bombenangriffen im zweiten Weltkrieg, vielerorts an Bedeutung verloren [4]. Laut

[8] wirkt sich das bis heute auf die Bauordnungen aus. Weshalb die derzeit gültigen Brandschutzbestimmungen nahezu weltweit die Errichtung von Hochhäusern hauptsächlich aus „nicht brennbaren“ Baustoffen also Tragwerken aus Beton, Mauerwerk oder Stahl vorschreiben [2]. Diese überwiegend auf Ereignissen basierenden Festlegungen lassen die Vermutung zu, dass den präskriptiven Bauvorschriften keine tatsächliche Risikoermittlung zu Grunde liegt und demnach auch das vorhandene Risikoniveau (das Sicherheitsniveau) der präskriptiven Brandschutzvorschriften quantitativ unbekannt ist.

Heute wissen wir, dass sich Bauteile aus Massivholzwerkstoffen wie CLT^b hinsichtlich des Brandverhaltens deutlich von den in den historisch verwendeten leichten Holzkonstruktionen unterscheiden [2]. Außerdem kann man laut [8] heute auf eine hoch technologisierte Feuerwehr sowie funktionierende Wasserversorgungs-, Alarm- und Verkehrssysteme setzen. Der Schritt vom kleinen Brand bis zum Eintreffen der Feuerwehr ist ein ganz anderer als vor 500 Jahren, dementsprechend rückt auch die Gefahr von Stadt- und Dorfbränden eher in den Hintergrund. In Abb. 2-1 werden nun die Brandschutzvorschriften mehrerer Länder hinsichtlich Hochhäuser aus Holz verglichen.

^b CLT: cross laminated timber (Brettsperrholz); Ein flächiges massives Holzprodukt aus kreuzweise miteinander verleimten Brettlagen

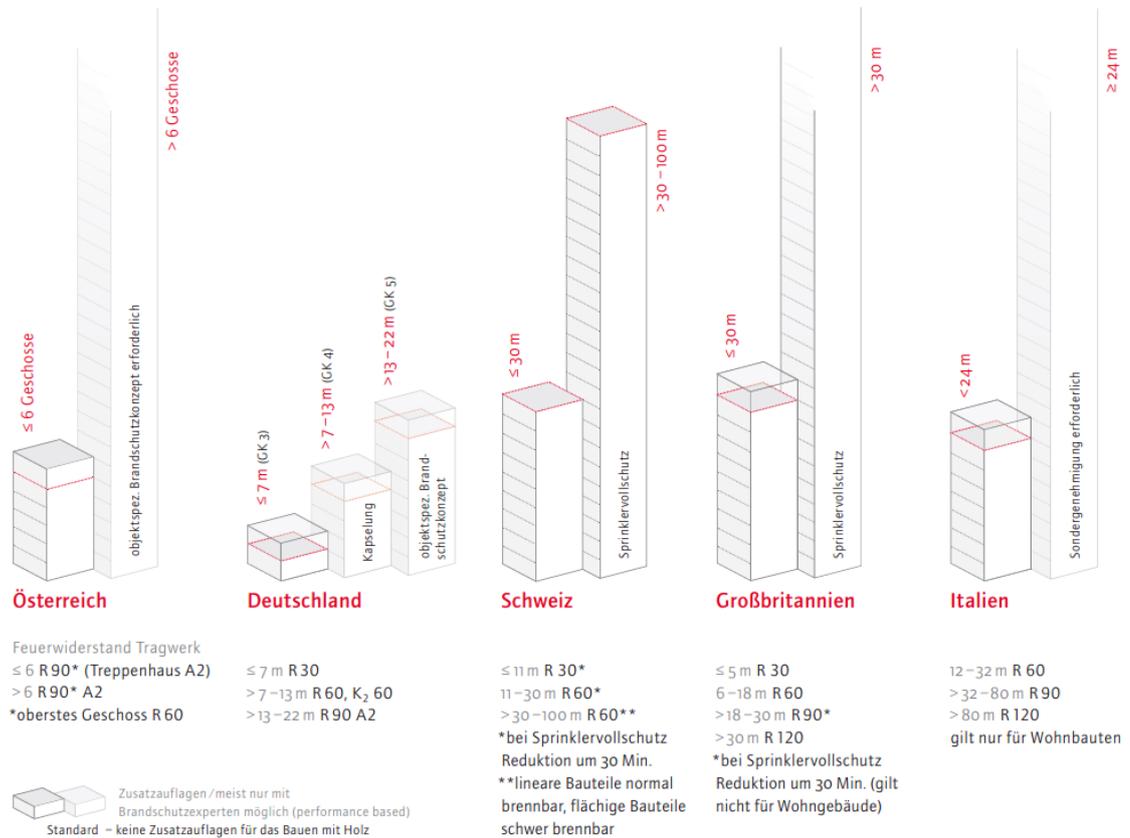


Abb. 2-1: So hoch darf man mit Holz bauen: Ein Ländervergleich [8]

Die in Abb. 2-1 angegebenen Werte beziehen sich allerdings nicht auf Treppenhäuser. Da die Problematik bei Holzhochhäusern aus Kapitel 1.3 vor allem die Erschließungskerne aus Stahlbeton betrifft, werden in Tab. 2-1 die aktuellen präskriptiven Brandschutzvorschriften mehrerer Länder hinsichtlich der möglichen Ausführung von Treppenhaukernen aus Holz untersucht und verglichen.

	Österreich	Schweiz	Großbritannien
Holz sichtbar	<7 m (<GK2)	nicht vorgesehen	<18 m
Holz sichtbar mit Flammenschutz B1	<11 m	nicht vorgesehen	<18 m
Kapselung 30min	GK <22 m	<30 m (mit Sprinklervollschutz)	keine Begrenzung
Stahlbeton	<90 m	<100 m	keine Begrenzung

Tab. 2-1 zulässige Gebäudehöhe für Treppenhaukern aus Holz: Ein Ländervergleich [5]

Die geringen zulässigen Gebäudehöhen zeigen klar, dass Treppenhaukerne mit sichtbarem Holztragwerk bei Hochhäusern unter Beachtung präskriptiven Standardbrandschutzkonzepten nicht zulässig sind. Oft wird fälschlicherweise davon

ausgegangen, dass die präskriptive Lösung den einzig denkbaren Weg darstellt, ein bestimmtes Sicherheitsziel zu erreichen. Um diese Problematik zu entschärfen, haben viele Länder die Möglichkeit objektspezifischer Abweichungen von den Brandschutzregelungen eingeführt, wenn vom Bauwerber nachgewiesen wird, dass dennoch das gleiche Sicherheitsniveau wie bei Anwendung der präskriptiven Richtlinien erreicht wird. Nach [16] ist dies ein Schritt in Richtung leistungsorientierter bautechnischer Vorschriften.

2.2.2 Leistungsorientierte Brandschutzvorschriften

Obwohl leistungsorientierte Bauvorschriften schon seit den 1990er Jahren auch für den Brandschutz intensiv diskutiert werden, enthalten diese laut [17] weltweit diesbezüglich noch überwiegend vorgeschriebene Ausführungen. Mittel- bis langfristig ist aber bereits angedacht, die Brandschutzbestimmungen in Richtung eines echten leistungsorientierten Konzeptes mit quantitativen Anforderungskriterien für die Anwendung brandschutzingenieurmäßiger Methoden zu entwickeln. Analog zur Tragwerksbemessung ist damit eine Bemessung von Bauwerken hinsichtlich des Brandschutzes denkbar. Im Zuge der Recherchen zu dieser Arbeit konnte leider wenig über den aktuellen Entwicklungsstand der leistungsorientierten Brandschutzvorschriften gemacht werden. Wie bereits in Kapitel 2.2.1 erläutert, verursacht die Tatsache, dass den Festlegungen der präskriptiven Brandschutzvorschriften keine einheitlichen Risikoermittlungen zugrunde liegt, nach Ansicht des Autors, Probleme.

2.2.3 Abweichung von Brandschutzvorschriften in Österreich

Um dem Verlangen nach Fortschritt und innovativen Gebäuden zu genügen, sind vielerorts objektbezogene Abweichungen von Brandschutzvorschriften zulässig, wenn vom Bauwerber nachgewiesen wird, dass dennoch das gleiche Sicherheitsniveau wie bei Anwendung der präskriptiven Richtlinien erreicht wird. Ein dementsprechender Passus ist auch in den für Österreich verbindlich erklärten OIB Richtlinien^c [18] und den darin enthaltenen Regelungen zum Brandschutz verankert. Wie

^c Während des Verfassens dieser Arbeit wurden Entwürfe für die OIB Richtlinien 2019 mit einigen Abänderungen und Ergänzungen zum gültigen Stand aus 2015 veröffentlicht. Um diese Veränderungen zu berücksichtigen, werden im Zuge dieser Arbeit, die im Juni 2018 herausgegebenen Entwürfe für die OIB Richtlinien 2019 als Literatur herangezogen.

in [19] verankert und in Abb. 2-1 ersichtlich sind Hochhäuser in Österreich stets in nicht brennbarer Bauweise auszuführen. Im Zuge dieser Arbeit soll jedoch die Brandschutzsicherheit von Hochhäusern mit einer brennbaren Holzkonstruktion untersucht werden. Diese Abweichung von dem in den Vorschriften festgehaltenen Brandverhalten ist nach [18] als wesentlich einzustufen und ist anhand anerkannter Methoden des Brandschutzingenieurwesens als gleichwertig nachzuweisen. Diesbezüglich wird in [18] folgende Vorgehensweise vorgeschlagen:

- Konkretisierung der in [18] festgehaltenen Schutzziele durch die Festlegung von quantitativen Schutzzielkriterien
- Festlegung von Brandszenarien entsprechend der vorgesehenen Nutzung

Auf die Bedeutung und die konkrete Umsetzung dieser Arbeitsschritte und Forderungen soll an dieser Stelle nicht näher eingegangen werden, denn sie stehen eindeutig im Widerspruch mit der Aussage vom Geschäftsführer des Österreichischen Instituts für Bautechnik^d Dr. Rainer Mikultis in [16]. Er weist darauf hin, dass noch intensive Grundlagenarbeit hinsichtlich der Evaluierung des tatsächlichen Sicherheitsniveaus der bestehenden Vorschriften notwendig ist. Um dennoch einen Nachweis der Gleichwertigkeit führen zu können, ist man gezwungen Kriterien, Grenzwerte und Methoden aus anderen Richtlinien, Normen oder der Fachliteratur zu übernehmen. Nach [16] variieren die in den verschiedenen Quellen angeführten Werte und Methodenergebnisse aber teilweise beträchtlich.

2.2.4 Kritik an Schutzzieldefinitionen

Eine von mehreren Ursachen für die vorherrschende Unkenntnis hinsichtlich Sicherheitsniveaus wird in der Definition der Schutzziele nach [20] gesehen. Forderungen wie:

- Erhaltung der Tragfähigkeit eines Bauwerks während eines bestimmten Zeitraumes
- Begrenzung der Entstehung und Ausbreitung von Feuer und Rauch innerhalb eines Bauwerkes

sind nach Ansicht des Autors als Schutzziele ungeeignet, da diese keine Verbindung mit dem „zu Schützenden“ herstellen. Im Falle eines Brandes geht es im

^d Das Österreichische Institut für Bautechnik ist Herausgeber der OIB-Richtlinien. Diese sind nach den österreichischen Baugesetzen als Bauvorschriften (mit wenigen Ausnahmen) einzuhalten.

Wesentlichen darum, Personenschäden (Personen im Gebäude, Rettungskräfte) und Sachschäden auf ein erträgliches Maß zu reduzieren. Sinnvolle Schutzziele in Anlehnung an die in Kapitel 3.1.3 erläuterte die Risikoeinteilung nach [1] würden daher wie folgt lauten:

- Beschränkung der Gefahr für Personen und Rettungskräften im Gebäude, oder in umliegenden Bereichen
- Beschränkung von Sachschäden
- Beschränkung der Gefahr für Betriebsausfälle oder Imageverluste

2.3 Forschungsstand

Im vorigen Abschnitt wurde darauf aufmerksam gemacht, dass das gewünschte Schutzzielniveau nicht bekannt ist und diesbezügliche Evaluierungen noch nicht erfolgt sind. Außerdem ist nicht einheitlich geregelt, wie das Sicherheitsniveau eines Gebäudes bestimmt und nachgewiesen werden kann. In den folgenden Kapiteln sollen zunächst einige Grundlagen und Charakteristika von Brandrisiken erläutert werden. Anschließend wird auf mögliche Nachweise und Ansätze zur Risikobeurteilung eingegangen. Im Zuge dessen werden die Erkenntnisse der Recherchen in einschlägiger Literatur zusammengefasst und kritisch betrachtet, sowie eigene Ideen und Feststellungen präsentiert.

2.3.1 Komponenten der Brandentstehung

Auch Kaminfeuer oder brennende Kerzen stellen genaugenommen ein Brandereignis dar. Solche gewünschten Brandereignisse führen aber nur in Ausnahmefällen zu den gefährlichen und schadensbringenden Ereignissen, die im Zuge dieser Arbeit behandelt werden sollen. Daher wird als Brandereignis jenes Ereignis definiert, bei dem ein Schaden durch einen Brand entstanden ist. Diese Definition erweist sich als günstig, da Versicherungen über genaue Aufzeichnungen zu diesen Ereignissen aus Schadensmeldungen verfügen.

Damit ein Feuer entsteht, braucht es Brennstoff, eine Zündenergie und ausreichend Sauerstoff. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Anwesenheit von genügend Sauerstoff zur Brandentstehung als gegeben vorausgesetzt, da ein Fehlen einen Aufenthalt in Gebäuden für Menschen unter normalen Bedingungen unmöglich macht. Um einen Brand zu vermeiden, ist es daher erforderlich, Zündquelle und Brennstoff

voneinander fernzuhalten. Die klassische Kombination von Kerzen auf raumluftgetrockneten Tannen im Wohnzimmer ist wohl die anschaulichste Form, das Prinzip der Brandvermeidung zu ignorieren. Die Tatsache, dass wohl ein Streichholz als Energiequelle ausreichen würde, um den trockenen Tannenbaum zu entzünden zeigt, dass die Entzündbarkeit des Brennmaterials einen wesentlichen Faktor für die Eintrittswahrscheinlichkeit darstellt. Auf einem Stück Massivholz hinterlässt dasselbe Streichholz nur einen Brandfleck, da die Restfeuchte und das Verhältnis von Volumen zu Oberfläche ein Erreichen der Zündtemperatur verhindern.

2.3.2 Häufigkeit eines Brandereignisses

Die Häufigkeit eines Brandereignisses hängt von der Anzahl der Zündquellen und der Entzündlichkeit der Materialien im Gebäude ab. Die Vermeidung von Brandquellen, durch das Verbot von Kerzen und Zigaretten in der Nähe von Gebäuden sowie die verpflichtende Überprüfung und Wartung von technischen Geräten, ist oft nicht durchsetzbar. Im Rahmen dieser Ausarbeitung wird daher nicht näher darauf eingegangen, da sich laut [21] Brandfälle und ihre Brandfolge aufgrund von zu vielen Unsicherheitsfaktoren auch in Zukunft nicht vermeiden lassen werden. Die Berücksichtigung des Gebäudealters und die damit einhergehenden unterschiedlichen Sicherheitsniveaus werden ebenfalls vernachlässigt. Es wird darauf hingewiesen, dass Anzahl der Brandereignisse aufgrund höherer technischer Standards bei neuen Gebäuden geringer ist und die Werte aus aktuellen Brandstatistiken daher auf der sicheren Seite liegend zu betrachten sind.

Hinsichtlich des verwendeten Baustoffes ist aus statistischen Erhebungen von Versicherungsgesellschaften kein signifikanter Unterschied der Brandhäufigkeit zu erkennen [22]. Auch die weltweit veröffentlichten Brandursachenstatistiken zeigen, dass die Verwendung brennbarer Konstruktionsbestandteile die Brandentstehung weder begünstigt noch hervorruft. In speziellen Bereichen wie Sicherheitstreppehäusern, in denen keine mobilen Brandlasten vorhanden sind, wäre durch eine sichtbare Holzkonstruktion zumindest theoretisch eine negative Auswirkung auf das Sicherheitsniveau denkbar. Eine mögliche Zündquelle in solchen Bereichen könnten Defekte von elektrischen Installationen sein, oder ein bestehender Vollbrand, der sich auch auf diesen Raum weiter ausbreiten kann.

2.3.3 Brandweiterleitung

Die DIN [23] verwendet den Begriff der brandschutztechnisch wirksam abgegrenzten Nutzungseinheit ohne näher darauf einzugehen, wie dies zu erreichen ist. Als „100 %“ sicher gegen Brandweiterleitung kann dabei lediglich das freistehende Haus bezeichnet werden. In allen anderen Fällen muss diese Brandweiterleitung durch geeignete bauliche oder anlagentechnische Maßnahmen verhindert werden, wobei diese aber stets einer gewissen Versagenswahrscheinlichkeit unterliegen. Für alle baulichen und anlagentechnischen Maßnahmen ist unbedingt festzulegen, wie lange diese brandschutztechnisch wirksame Abgrenzung einer Beanspruchung standhalten muss. Durch die Brandweiterleitung besteht die Gefahr, dass sich das Feuer auf die Nachbargebäude ausbreitet. Bei insgesamt drei Häusern verdreifacht sich die Wahrscheinlichkeit eines Brands. Durch Einbau einer gemeinsamen Sprinkleranlage kann die Situation wieder entschärft werden.

2.3.4 Gliederung und differenzierte Betrachtung von Risiken

Bei Tragsicherheitsnachweisen für außergewöhnliche Belastungen ist eine Unterscheidung der Risiken hinsichtlich des Schutzziels unüblich, da alle Risiken nur von der Zuverlässigkeit des Tragwerks abhängig sind. Einwirkungen zufolge Eigengewicht, Nutzlast, Schnee, Wind und Erdbeben werden stets als statische Kraft oder dynamische Schwingung berücksichtigt. Befinden sich beispielsweise im Falle eines Erdbebens Personen in einem Gebäude, erfahren sie die gleiche horizontale Erregung wie die Konstruktion und die Gegenstände um sie herum. Dennoch ist dabei nur die Einwirkung auf die Konstruktion und gegebenenfalls vorhandene Ausbauteile und Möbel relevant, da Personen im Gebäude nicht durch die Erdbebeneinwirkung an sich gefährdet sind. Die Bedrohung geht vielmehr von einem möglichen, durch ein Erdbeben verursachtes, Versagen von Bauteilen und dem damit einhergehenden Herabfallen von Elementen aus. Ein Brand hingegen wirkt nicht nur belastend bzw. zerstörend auf das Gebäude selbst ein, sondern auch auf die Menschen im Gebäude. Zu derartigen Gefahren für Personen im Zuge eines Brandereignisses zählen unter anderem Rauchgasvergiftungen und Verbrennungen. Darüber hinaus besteht auch im Brandfall die Gefahr durch das Versagen, Herabfallen oder Umstürzen von Bauteilen oder Gegenständen verletzt zu werden.

Während Konstruktionen so ausführt werden können, dass sie auch im Brandfall eine ausreichende Zuverlässigkeit aufweisen, ist eine Veränderung der Brandbeständigkeit von Personen durch Schutzkleidung und spezielle Ausrüstung bis auf wenige Ausnahmen in Industriebetrieben unüblich.

Anders als beispielsweise ein Erdbeben, wirkt ein Brand nicht sofort auf das gesamte Gebäude ein, sondern entwickelt sich aus einem örtlichen Entstehungsbrand. Wie schnell sich der Brand ausbreitet und wie groß er schlussendlich wird, hängt von einer Vielzahl von Faktoren ab, die durch verschiedene Maßnahmen positiv (und negativ) beeinflusst werden können. Diese zeitliche Komponente der Brandentwicklung ermöglicht es, dass Personen in einem Gebäude im Brandfall den betroffenen Bereich verlassen können. Die Sicherheit der Personen hängt somit nicht nur von der Zuverlässigkeit des Tragwerks ab, sondern ist viel mehr an die Beschaffenheit der Fluchtwege, dem Zeitpunkt des Fluchtbeginns, der Handlungsfähigkeit der betroffenen Personen und einigen weiteren Faktoren gebunden.

Im Zuge einer Brandrisikountersuchung ist demnach eine Gliederung des Risikos möglich und üblich. In [1] erfolgt eine Unterteilung in Personenrisiken, Sachwerttrisiken, und Risiken für die (wirtschaftliche) Tätigkeit im Gebäude.

Eine derartige differenzierte Betrachtung der Risiken ist auch in der Erdbebennorm verankert. Während beim, für die Personensicherheit relevanten, Bemessungsbeben örtliche Schäden zulässig sind, sind bei einem kleineren Erdbeben „keine“ Beschädigungen erlaubt (Sicherheit des Tragwerks). Eine Übertragbarkeit auf die Brandsicherheit ist jedoch nicht ohne weiteres möglich, da unklar ist welches erlaubte Schadensausmaß diesen Ereigniswahrscheinlichkeiten zugeordnet werden soll. Anders als beim Erdbeben sind die Personen im Gebäude wie bereits erwähnt neben einem Gebäudeeinsturz auch von Rauchgasvergiftung usw. bedroht. Die zuverlässige Bemessung von Fluchtwegen ist aufgrund der großen Streubreiten von menschlichen Handlungen in der Regel auf Personenstromanalysen angewiesen. Zur übersichtlichen Darstellung können die Gefährdungen für Personen folgendermaßen gegliedert werden:

- Primäre Gefährdungen
 - Rauchgasvergiftung und Verbrennen
 - Einstürzende Konstruktion und herabfallende Teile
- Sekundäre Gefährdungen

- erdrückt, zertrampelt, Sturz durch Panikreaktion

2.3.5 Personenrisiko im Brandfall

Die Sicherheit der Personen im Brandfall hängt also, im Gegensatz zu sämtlichen statischen oder dynamischen Belastungen, nicht nur von der Zuverlässigkeit des Tragwerks, sondern viel mehr von der Beschaffenheit der Fluchtwege, dem Zeitpunkt des Fluchtbeginns, der Handlungsfähigkeit der betroffenen Personen ab.

Um sich den primären Gefährdungen zu entziehen, ist daher eine möglichst rasche Flucht aus den betroffenen Bereichen erforderlich. In Folge dessen sind in allen Gebäuden Wege anzulegen, welche den Betroffenen eine Flucht in einen sicheren Bereich ermöglichen. Laut [24] ist ein Fluchtweg ein Weg, der den Benützern eines Bauwerkes im Gefahrenfall grundsätzlich ohne fremde Hilfe das Erreichen eines sicheren Ortes des angrenzenden Geländes im Freien – in der Regel eine Verkehrsfläche – ermöglicht. Demnach ist ein Fluchtweg die Verbindung von einem beliebigen Standort im Gebäude zum Fluchtziel: ebenerdiger freier Außenbereich. Im Falle einer Evakuierung müssen bei Hochhäusern dazu große vertikale Distanzen, meist über Treppen zurückgelegt werden.

Die erläuterten primären Gefährdungen sind auch im Bereich der außen- oder innenliegenden Treppen oder Treppenhäusern nicht prinzipiell auszuschließen. Die Sicherheit hinsichtlich der Rauchfreiheit ist bei innenliegenden Sicherheitstreppehäusern an die Versagenswahrscheinlichkeit der Druckbelüftung und an die Funktionsfähigkeit von Brandschutztüren gebunden. Bei außenliegenden Sicherheitstreppehäusern garantiert der Zugang über eine im Freien liegende Rauchsleuse, dass kein Rauch über Türen im Verlauf des Fluchtweges eindringen kann.

Bei überwiegend horizontal orientierten Gebäuden funktionieren Bauwerksteile oft unabhängig voneinander und haben eigene Tragwerke und Fundamente. Ein Treppenhäuser im Hochhaus ist allseits mit Wänden begrenzt und dient häufig der horizontalen Aussteifung des Gebäudes und könnte daher unabhängig vom restlichen Tragwerk funktionieren. Da es in der Praxis nicht üblich ist, wird im Rahmen dieser Arbeit die Möglichkeit einer derartigen konstruktiven Abtrennung von Treppenhäusern jedoch nicht näher verfolgt.

Bei einer sichtbaren Holzkonstruktion besteht Gefahr, dass sich ein Brand über offene Wohnungstüren in den Treppenhäuserbereich ausbreitet. Dieses erhöhte Risiko

ist bei Fluchtwegen ohne Brandlast nicht gegeben. Die Relevanz dieses Szenarios ist aber fraglich, da bei offenen Türen zum Brandraum dieser Fluchtweg auch bei nicht-brennbaren Oberflächen aufgrund der Rauchausbreitung kaum mehr betreten werden kann.

Bei Eintritt eines Brandereignisses in einem Gebäude sind Personen in den von Feuer oder Rauch betroffenen oder gefährdeten Bereichen, nicht mehr sicher und müssen diese verlassen. Ist diese Flucht nicht ungehindert möglich, drohen sekundären Gefährdungen durch Panikreaktionen. In [21] werden einige von Verhaltensforschern festgestellte Voraussetzungen für die Entstehung der klassischen Panik, als emotionale Kollektivreaktion einer kommunizierenden Menschenmenge genannt. Panik entsteht demnach nur, wenn sich in einem Raum eine Vielzahl von Personen befindet, deren Existenz durch eine fiktive oder tatsächliche Gefahr bedroht wird, die in dieser Situation zu einer massiven Beeinflussung des Gefühlslebens führt. Paniktypisches Verhalten ist nach [21] durch Rücksichtslosigkeit, Unkontrollierbarkeit geprägt mit dem einzigen Ziel, das eigene Entfliehen und Überleben zu sichern. Es kommt demzufolge zu einem Zusammenbruch von wichtigen sozialen Bindungen. Laut [21] konnte aber durch eine Studie bestätigt werden, dass das „Zusammengehörigkeitsgefühl“ durch die Bildung von vielen kleinen Gruppen einen massiven Einfluss die Überlebenschancen hat. Um Panikverhalten zu vermeiden, erscheint es daher sinnvoll, das Bedrohungsgefühl durch klare Anweisungen und nachvollziehbare Fluchtwegverläufe zu mindern. Weiters sind Stauungen an Fluchtwegen, welche zu hohen Personendichten führen, durch geeignete Maßnahmen zu vermeiden.

Im Brandfall ist man selbst in Sicherheitstreppenhäusern einer erhöhten Gefährdung ausgesetzt. Hinsichtlich der primären Gefährdungen erreichen alternative Fluchtziele innerhalb eines Gebäudes, wie sogenannte Evakuierungszonen oder Teilevakuierungen des Gebäudes nach [15] nicht dasselbe Sicherheitsniveau wie das Fluchtziel „freier Außenbereich“. Die dadurch denkbare Steuerung des Fluchstroms führt jedoch zu einer Reduzierung der sekundären Gefährdungen.

2.3.6 Personenrisiko in Österreich steigt mit zunehmender Fluchthöhe

In [25] wird festgelegt, dass jede Stelle jedes Raumes maximal 40 m Gehweglänge von einem direkten Ausgang zu einem sicheren Ort des angrenzenden Geländes im

Freien oder einer entsprechend ausgeführtem innen- oder außenliegenden Treppe entfernt sein darf. Hinsichtlich der gesamten Länge des Fluchtweges bis zum Fluchtziel gibt es keine Beschränkungen. Im Bemessungsmodell der [26] geht die Breite eines Fluchtweges als einzige Einflussgröße in dessen Leistungsfähigkeit ein, welche wiederum nur von der Personenanzahl abhängig ist. Das mit der Länge des Evakuierungsweges steigende Risiko von sekundären Gefährdungen bleibt unberücksichtigt. Daraus kann abgeleitet werden, dass in [25] ein sinkendes Sicherheitsniveau für Fluchtwege mit zunehmender Gebäudehöhe akzeptiert wird.

2.3.7 Ansatz zur Ermittlung der Tragwerkszuverlässigkeit im Brandfall

Die Brennbarkeit eines Baustoffes spielt vor allem in der Brandentstehungsphase hinsichtlich der Brandausbreitungsgeschwindigkeit [4] und in der Brandabklingphase bezüglich des Selbstlöschverhaltens eine übergeordnete Rolle.

Durch die Steigerung der Leistungsfähigkeit von Feuerwehr und Sprinkleranlagen ist die Sicherheit von Menschen im Brandfall in Gebäuden gegenüber vorherigen Jahrhunderten stark gestiegen [14]. Auch die Steigerung der Qualität der Überwachung von Planung und Ausführung von baulichen und anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen tragen laut [14] ihres dazu bei. Eine Möglichkeit, um wieder die Freiheit der Materialwahl für tragende um raumabschließende Bauteile im urbanen Raum für den Architekten auf den Holzbau zu erweitern, wird nach [14] in der aktiven Brandbekämpfung gesehen.

Löscharbeiten können je nach Wirkungsumfang in Brandunterdrückung, Brandbeherrschung und Brandlöschung eingeteilt werden. Da die Feuerwehr unter Umständen keine ausreichende Leistungsfähigkeit für Löschung eines Vollbrands oberhalb von 22 m hat, sollte die Konstruktion dieses Brandabschnitts in der Lage sein, ohne Einsturz des Tragwerks ein vollständiges Verbrennen der enthaltenen Brandlasten zu überdauern [4]. Die in [19] vorgeschriebene, nicht brennbare Ausführung von Bauteilen muss einem Feuer 90 min Widerstand leisten. Diese 90 min reichen laut [4] jedoch nur bei voll ventilierten Bränden (ausreichende Sauerstoffzufuhr) und Brandlasten bis zu $600 - 750 \text{ MJ/m}^2$. Da die Brandlasten nicht begrenzt und Ventilationsbedingungen nicht vorgeschrieben sind, ist es möglich, dass das Tragwerk des Gebäudes versagt, bevor der Brandabschnitt ausgebrannt ist.

Im Zuge dessen wird in [14] durch ein geeignetes Berechnungsmodell der zeitliche Verlauf der Energiefreisetzungsrates [MW] ermittelt, ohne auf Naturbrandversuche zurückgreifen zu müssen. Weiters wird ein durch Experten gesicherter Wert der maximalen Löschleistungsfähigkeit [MW] der Feuerwehr festgelegt, ab welcher ein Brand unter Angabe einer bestimmten Dauer gelöscht werden kann. Dies ermöglicht die Ermittlung der tatsächlichen Branddauer unter Berücksichtigung zahlreicher Aspekte wie z.B. Sprinkleranlage, Feuerwehr, Brandlastdichte, Brandausbreitungsgeschwindigkeit und Brandabschnittsgröße.

In [4] wird die Hypothese aufgestellt, dass insbesondere massive Holzbauteile aus CLT^e von selbst zu brennen aufhören. Diese Behauptung konnte in einem Forschungsvorhaben [27] für Brettspertholz grundsätzlich bestätigt werden, jedoch nur für den Fall, dass ein Abfallen der Brettschichten ausgeschlossen werden kann, die Wärmefreisetzungsrates weniger als 6 kW/m^2 beträgt und die darüber streichenden Luft eine Geschwindigkeit von $0,5 \text{ m/s}$ nicht überschreitet. Diese geringe Luftgeschwindigkeit ist im Wesentlichen nur in geschlossenen Räumen dauerhaft anzutreffen. Ein Ansatz des Selbstlöschverhaltens massiver Holzkonstruktionen in der Abklingphase eines Gebäudebrandes ist somit nicht möglich.

Durch eine entsprechende Bemessung konnte in [14] aber dennoch gezeigt werden, dass die Konstruktion von Gebäuden auch brennbar ausgeführt werden kann. Das Sicherheitsniveau des Tragwerks bleibt erhalten, da die Brandeinwirkungsdauer kleiner als die Feuerwiderstandsdauer der Bauteile ist. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass sich sämtliche Aussagen zur Löschleistungsfähigkeit der Feuerwehr in [14] auf Gebäude bis zu einer Fluchthöhe von weniger als 22 m beziehen. Allein die zu erwartende längere Dauer der Gebäudeevakuierung bei Hochhäusern kann den Löschbeginn der Feuerwehr erheblich verzögern. Darüber hinaus fehlt ein Leistungsansatz für die passiven Löscharbeiten der Feuerwehr zum Schutz vor einer Brandausbreitung in andere Brandabschnitte. Die restlichen Ansätze zur Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Energiefreisetzungsrates eines Brandes sollten auch auf Hochhäuser übertragbar sein. Der in [14] gezeigte Berechnungsansatz eignet sich nur als Nachweis für die Zuverlässigkeit des Tragwerks. Etwaige Personenrisiken werden nicht berücksichtigt. Laut [8] wirkt sich die Brennbarkeit der Konstruktion

^e CLT: cross laminated timber (Brettspertholz); Ein flächiges massives Holzprodukt aus kreuzweise miteinander verleimten Brettlagen

nicht auf die Sicherheit der Personen im Gebäude aus, da die Gefährdung von Personen rein von der mobilen Brandlast ausgeht. In [28] wird darauf hingewiesen, dass dies nur auf die Primärgefährdung^f von Personen zutrifft. Sobald sich ein Brandabschnitt im Vollbrand befindet, kann sich ein Gebäude aus Holz eventuell nachteilig auf die Personensicherheit auswirken. Der Autor teilt jedoch die in [12] durch Versuche belegte Tatsache, dass durch eine brennbare Konstruktion, insbesondere bei geringen mobilen Brandlasten, die Zeit bis zum Flashover^g massiv verringert wird. Nichtbrennbare Innenraumbooberflächen erhöhen somit die Personensicherheit in Gebäuden, da die zur Verfügung stehende Evakuierungszeit der anderen Brandabschnitte vergrößert wird [12].

2.3.8 Ansatz zum Nachweis der Evakuierungsfähigkeit

Um im Gefahrenfall sicherstellen zu können, dass alle Personen das Fluchtziel erreichen, ist ein Nachweis hinsichtlich der Evakuierungsfähigkeit erforderlich. Dieser Nachweis nach [21] ist erfüllt, wenn folgendes gilt:

$$\text{erforderliche Evakuierungsdauer} < \text{mögliche Evakuierungsdauer}$$

Nach [21] & [13] setzt sich erforderliche Evakuierungsdauer wie folgt zusammen:

$$t_{\text{evak.erf}} = t_{\text{Detektion}} + t_{\text{Alarm}} + t_{\text{Reaktion}} + t_{\text{Flucht}}$$

wobei:

- $t_{\text{Detektion}}$... Branddetektionsdauer
- t_{Alarm} ... Alarmierungsdauer
- t_{Reaktion} ... Reaktionsdauer
- t_{Flucht} ... Fluchtdauer

Nach [25] sind Hochhäuser mit einer automatischen Brandmeldeanlage auszustatten. Diese ermöglicht eine rasche Erkennung und Lokalisierung des Brandes. Zeitgleich beginnt dann die Alarmierung von Personen im Gebäude durch ein akustisches Signal und die Verständigung der Feuerwehr und anderen Hilfe leistenden Stellen. Laut [14] ist die Brandmeldeanlage derart auszuführen, dass eine Dauer von 5 min für Detektion und Alarmierung nicht überschritten wird.

^f Primärgefährdung: Direkte Gefährdung von Personen durch ein Brandereignis. Dazu gehören im Wesentlichen Hitze und Rauch im von Feuer betroffenen Brandabschnitt.

^g Flashover: Explosionsartige Brandvergrößerung verursacht durch die Entzündung brennbarer Gase.

Die Reaktionsdauer entspricht dem Zeitraum von Beginn der Alarmierung bis zum Antritt der Flucht. Hosser führt hierzu in [13] einerseits die Zeit bis zur Wahrnehmung des Alarms, andererseits die Zeit bis zur Interpretation der Wahrnehmung sowie auch die Zeit für Handlungen, welche nicht der unmittelbaren Flucht dienen, an. Dazu gehört unter anderem die manuelle Brandbekämpfung, das Suchen von Personen oder das Warten auf Fremdrettung, wenn eine Selbstrettung aufgrund körperlicher oder geistiger Einschränkung nicht möglich ist. Die Reaktionszeit hängt demnach im Wesentlichen von der Aufnahmebereitschaft (wach/schlafend), der Vertrautheit der Personen mit dem Gebäude, der Gebäudekomplexität, vom Alarmierungssystem und dem Brandschutzmanagement (Anzahl der Brandschutzhelfer) ab. Die Bestimmung der Fluchtdauer erfolgt nach [21] & [13] üblicherweise mittels Methoden der Personenstromanalyse. Diese Methoden reichen von einfachen empirisch abgeleiteten Handrechnungen bis hin zu komplexen rechnergestützten Simulationsmodellen. Es lassen sich dabei im Wesentlichen drei Hauptgruppen unterscheiden:

- vereinfachte empirisch abgeleitete Berechnungsansätze zur Kapazitätsanalyse
- hydraulische Modelle (Strömungsmodelle) und Netzwerkmodelle, welche auch Bewegungsdynamiken näherungsweise berücksichtigen
- Individualmodelle (mikroskopische Modelle) Simulation der Bewegung einzelner Personen unter möglichst realen Umständen.

Die mögliche Evakuierungsdauer kann als Zeitspanne betrachtet werden, in welcher ausreichende Voraussetzungen für Menschen zur Flucht aus dem Gebäude vorhanden sind. Diese Voraussetzungen betreffen unter anderem die Sichtweite, die Temperaturen sowie einen ausreichenden Sauerstoffgehalt in der Luft.

2.3.9 Festlegen eines akzeptablen Risikoniveaus

2.3.9.1 Vergleichender Ansatz

Die Tatsache, dass in den Nachweisen nach EN 199x akzeptable Risiken nicht explizit erwähnt werden, bekräftigt die Aussage von [12], wonach die Definition von absoluten Akzeptanzkriterien und die Kommunikation von Risiken sich oft als gesellschaftliche heikle Aufgabe gestaltet. Um dies zu umgehen, kann die Ermittlung von Grenzwerten auch mittels eines vergleichenden Ansatzes vorgenommen werden. In

den meisten Fällen ist die Ermittlung eines vorhandenen Risikos auch nicht notwendig, da lediglich nachgewiesen werden soll, dass das Risiko ausreichend gering ist. Dies kann durch das Einhalten von vorgegebenen Ausführungen oder durch Nachweisformate basierend auf Bemessungswerten der Einwirkung und des Widerstands erreicht werden. Die tatsächliche Ermittlung des Risikoniveaus und die Identifikation von Sicherheitsreserven sind eher unüblich. In [1] wird darauf hingewiesen, dass es sich bei allen Risikomethoden lediglich um den Versuch einer Prognose handelt.

Im Zuge des vergleichenden Ansatzes, wird eine Risikoanalyse an einem nach den gültigen präskriptiven Bauvorschriften errichtet und demnach als brandschutztechnisch zuverlässig erachteten Gebäude durchgeführt. Eine solche vergleichende Betrachtung wird auch von den meisten derzeit gültigen Bauvorschriften bei Abweichungen von diesen vorgeschrieben. Die Problematik dieser Methode liegt laut [16] jedoch darin, dass die Streuung des Sicherheitsniveaus bei mehreren nach Bauvorschrift ausgeführten Objekten beträchtlich sein kann, weshalb festgelegte Grenzwerte erstrebenswert wären.

2.3.9.2 Auswertung von Brandschadensstatistiken

Eine weitere Möglichkeit akzeptable Risiken festzulegen, besteht in der Auswertung von aktuellen Brandschadensstatistiken der Versicherungen. Dabei geht man davon aus, dass das Risikoniveau in bestehenden Gebäuden akzeptabel ist.

Aufgrund der raschen und einfachen Ermittlung kommt dieser Ansatz in zahlreichen Literaturen [1], [12], [14], [22] zur Anwendung. Meist stehen Daten zur Anzahl der Brände, der Versichertenflächen und der Schadenshöhen zur Verfügung. In wenigen Fällen liegen die Daten sogar nach Bauweisen getrennt vor. Im Rahmen der Recherchen im Zuge dieser Masterarbeit konnten allerdings keine Brandschadenstatistiken für Hochhäuser gefunden werden. Dies ist insofern problematisch, da keine differenzierte Betrachtung hinsichtlich der Risikohöhe möglich ist. Jede Risikobeurteilung sollte die subjektive Bewertung des Risikos (Risikoaversion) berücksichtigen. Menschen mögen keine großen Risiken, selbst bei geringen Wahrscheinlichkeiten. Zwei quantitativ ermittelte gleich große Risiken werden nicht unbedingt als gleich groß empfunden. Diese Risikoaversion ist die Grundlage für die gesamte Versicherungsbranche. Durch den Kauf einer Versicherungspolizze

transformiert der Gebäudeeigentümer einen Verlust mit hoher Schwere und geringer Wahrscheinlichkeit, in ein Ereignis mit hoher Wahrscheinlichkeit und geringer Schweregrad (Regelmäßige Zahlung der Versicherungsprämien). Dieser Aspekt der Risikoaversion muss sich in den Ergebnissen einer Risikobewertungsmethode widerspiegeln.

3 Empirische Untersuchung

Nachdem der theoretische Rahmen der Untersuchung abgesteckt ist und die wesentlichen Fakten und Zusammenhänge hinsichtlich der Fragestellung behandelt wurden, folgt die empirische Betrachtung der Fragestellung:

Welche Auswirkungen haben brennbare Tragwerkselemente bei Holzhochhäusern auf das Brandrisiko?

Dazu wird das Sicherheitsniveau eines Hochhauses aus Holz mit der herkömmlichen „nicht brennbaren“ Variante durch Anwendung einer Brandrisikobewertungsmethode miteinander verglichen. Zunächst wird jedoch im nachstehenden Kapitel 3.1 die Vorgehensweise der Untersuchung offengelegt. Im Anschluss erfolgt in Abschnitt 3.2 die Festlegung aller Eingangsparameter für ein Betongebäude mit dem niedrigsten zulässigen Sicherheitsniveau unter Einhaltung der in Wien gültigen Brandschutzvorschriften. Dies stellt die Grundlage für die in Kapitel 3.3 angeführte Bewertung von Hochhäusern aus Holz und die Identifikation von möglichen Kompensationsmaßnahmen dar. Zuletzt kommt es in 3.5 zu einer zusammenfassenden Darstellung der empirischen Ergebnisse der Untersuchung.

3.1 Vorgehensweise

Im Rahmen dieser Masterarbeit werden die Auswirkungen von brennbaren Tragwerkselemente bei Holzhochhäusern auf das Brandrisiko bewertet. Da ein quantitativer Ansatz zur Risikobewertung wie in [12] den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde, orientiert sich die gewählte Methodik an den Grundsätzen der Semi-quantitativen Bewertung. Nach Einschätzungen des Autors kann jedoch auch bei Anwendung von quantitativen Methoden, aufgrund der hohen Anzahl an unbekanntem Eingangsparameter bei der Beurteilung des Sicherheitsniveaus von Brandschutzvorschriften, kein exakteres Ergebnis erwartet werden.

3.1.1 Semi-quantitative Bewertungsmethoden

Die semi-quantitative Risikobewertung ist eine Kombination aus dem qualitativen und dem quantitativen Verfahren [22]. Im Gegensatz zu den qualitativen Verfahren wird hier jedoch dem ermittelten Risiko ein bestimmter Zahlenwert als Ergebnis

zugeordnet. Die halb-quantitativen Methoden wurden laut [13] häufig mit dem Ziel einer vereinfachten, schematischen Risikoeinstufung für Gebäude entwickelt. Aufgrund des empirischen Ansatzes liegt der größte Teil der Verantwortung beim Entwickler, weil im Wesentlichen nur ihm bekannt ist, wie die Bewertungsfaktoren im Modell festgelegt und miteinander verknüpft sind [13]. Die Bewertungsfaktoren selbst werden auf unterschiedlichste Art und Weise hergeleitet und sind oft in mehrere Ebenen gegliedert. Nach [13] sind semi-quantitative Methoden für die praxisbezogenen ingenieurmäßigen Anwendungen aufgrund des reduzierten Rechenaufwandes besser geeignet als quantitative Methoden, welche daher eher für genauere Untersuchungen bzw. zur Herleitung vereinfachter Methoden anzuwenden sind. Im Rahmen dieser Bewertungen ist keine Ermittlung eines „tatsächlichen“ absoluten Risikos möglich, da dem Risiko lediglich ein bestimmter Wert zugeordnet wird. Dennoch sind zumindest relative Aussagen zur Sicherheit eines Gebäudes im Vergleich zu einem anderen möglich [13].

3.1.2 Methodenwahl

Die Beschäftigung mit den Grundlagen der semi-quantitativen Risikobeurteilungsmethode, die im Vorhergehenden beschrieben wurden, zeigt, dass sie zur Beantwortung der zentralen Fragestellung dieser Arbeit geeignet ist. Für die Durchführung der vorliegenden Untersuchung bietet sich die Risikobewertungsmethode F.R.A.M.E nach De Smeg [1] an, welche im Nachfolgenden näher erläutert wird.

3.1.3 Risikobewertungsmethode F.R.A.M.E nach De Smeg

“F.R.A.M.E” steht für “Fire Risk Assessment Method for Engineering” übersetzt: Risikobewertungsmethode für Ingenieure. “F.R.A.M.E” basiert laut [1] auf der im Jahre 1960 durch den schweizerischen Ingenieur M. GRETENER entwickelten Methode und auf mehreren ähnlichen Vorgehensweisen. Das Verfahren ist empirisch aufgebaut, wurde jedoch in der Praxis bereits vielfach erfolgreich überprüft [1].

Im Zuge der Risikobewertungsmethode F.R.A.M.E, erfolgt nicht nur die Ermittlung eines vorhandenen Risiko-Werts, sondern auch der Vergleich mit einem zulässigen Risiko. Es wird hervorgehoben, dass es sich bei den ermittelten vorhandenen und zulässigen „Risiken“ nicht um absolute Größen, sondern den Risiken zugewiesene Werte handelt. Die empirischen Formeln in F.R.A.M.E sind so ausgelegt, dass bei

Erfüllung der Nachweise die Häufigkeit eines Brandopfers kleiner als $5 \cdot 10^{-6}$ pro Einwohner und Jahr ist, sowie die Häufigkeit eines Gebäudetotalschadens weniger als $40 \cdot 10^{-6}$ /pro Gebäude und Jahr beträgt [1]. Das Phänomen der Risikoaversion wird in F.R.A.M.E durch eine Modifizierung der Formeln berücksichtigt [1]. Der Ausdruck für einen Nachweis lautet in [1]:

$$\frac{P * \frac{1}{D}}{A} \leq 1 \quad (1)$$

wobei:

P ... Wert für das Schadenspotential [-]

D... Wert für die Brandschutzmaßnahmen [-]

A... Wert für das akzeptable Risiko [-]

Das vorhandene Risiko ergibt sich per Definition in Kap 2.1 als Produkt der, dem Schadenspotential P und der Wahrscheinlichkeit zugeordneten Werte. Nach [1] führt ein Brandereignis nur dann zu einem großen Schaden, wenn alle vorhanden Brandschutzmaßnahmen versagen. Je besser die Brandschutzmaßnahmen sind desto seltener kommt es zu einem großen Schaden. Im Zuge dessen kann laut [1] der Logarithmus der Eintrittswahrscheinlichkeit als Kehrwert des, den Brandschutzmaßnahmen zugewiesenen Werts D ausgedrückt werden. Die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Schadenszenarios kann somit durch folgende Formel aus dem Brandschutzwert D abgeschätzt werden.

$$\text{Wahrscheinlichkeit} = 10^{\frac{1}{D}} [\%] \quad (2)$$

wobei:

D... Wert für die Brandschutzmaßnahmen [-]

Das zulässige Risiko wird durch den Wert des akzeptierten Risikos A dargestellt.

Die Risiken in F.R.A.M.E werden nach [1] auf Grundlage von drei Worst-Case-Szenarien unter Berücksichtigung von Brandschutzmaßnahmen beurteilt. Jedes Worst-Case-Szenario ist einer bestimmten Risikoart zugeordnet. Im Zuge von F.R.A.M.E. werden Nachweise hinsichtlich der folgenden drei Risikoarten geführt:

- Sachwertrisiko
- Personenrisiko
- Produktionsausfallrisiko.

Zur Bewertung des Risikos für Sachwerte wird ein Szenario angenommen, bei dem alles zerstört wird. Für das Personenrisiko gilt jeder Entstehungsbrand als Bedrohung, daher als Worst Case. Beim Szenario, das der Beurteilung des Produktionsausfallsrisikos zugrunde liegt, werden alle Gegenstände beschädigt, aber nicht zerstört.

Nachweis Sachwertrisiko:
$$\frac{P * \frac{1}{D}}{A} < 1 \quad (3)$$

wobei:

P... Wert für das Sachschadenspotential [-]

D... Brandschutzwert Sachwertrisiko [-]

A... Wert für das akzeptable Sachwertrisiko [-]

Nachweis Personenrisiko:
$$\frac{P_1 * \frac{1}{D_1}}{A_1} < 1 \quad (4)$$

wobei:

P₁... Wert für das Personenschadenspotential [-]

D₁... Brandschutzwert Personenrisiko [-]

A₁... Wert für das akzeptable Personenschadensrisiko [-]

Nachweis Produktionsausfallrisiko:
$$\frac{P_2 * \frac{1}{D_2}}{A_2} < 1 \quad (5)$$

wobei:

P₂... Wert für das Schadenspotential von Produktionsausfällen [-]

D₂... Brandschutzwert Produktionsausfallrisiko [-]

A₂... Wert für das akzeptable Produktionsausfallrisiko [-]

Für jeden der drei Nachweise sind jeweils ein Schadenspotential, ein Brandschutzwert und ein Wert des akzeptablen Risikos zu ermitteln. Das Schadenspotential, der Brandschutzwert und der Wert des akzeptablen Risikos, sind von einigen brandrisikorelevanten Bewertungsfaktoren abhängig. Bei jedem Szenario sind jeweils andere Bewertungsfaktoren anzusetzen.

Wert für das Sachschadenspotential: $P = q * i * v * g * e * z$ (6)

Wert für das Personenschadenspotential: $P_1 = q * i * v * e * z$ (7)

Wert für das Schadenspotential von Produktionsausfällen: $P_2 = g * i * v * e * z$ (8)

wobei:

q... Brandlastfaktor [-]

i... Faktor für die Brandausdehnung [-]

g... Faktor für Größe und Form des Brandabschnitts [-]

v... Faktor für Verrauchungsgefahr [-]

e... Faktor für die betrachtete Etage [-]

z... Faktor für die Gebäudezugänglichkeit [-]

Brandschutzwert Sachwertrisiko: $D = W * N * S * F$ (9)

Brandschutzwert Personenrisiko: $D = N * U$ (10)

Brandschutzfaktor Produktionsausfallrisiko: $D = W * N * S * Y$ (11)

wobei:

W... Faktor für die Löschwasserversorgung [-]

S... Faktor für anlagentechnische Maßnahmen [-]

N... Faktor für organisatorische Maßnahmen [-]

F... Faktor für die Beachtung der Feuerwiderstände [-]

U... Faktor für die Evakuierungssicherheit [-]

Y... Rettungsfaktor [-]

$$\begin{array}{ll} \text{Wert für das akzeptable} & A = 1,6 - a - t - c \\ \text{Sachwertrisiko:} & \end{array} \quad (12)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Wert für das akzeptable} & A = 1,6 - a - t - (0,1 * \log(Q_i + 1) + \frac{M}{10}) \\ \text{Personenrisiko:} & \end{array} \quad (13)$$

$$\begin{array}{ll} \text{Wert für das akzeptable} & A = 1,6 - a - c - d \\ \text{Produktionsausfallrisiko:} & \end{array} \quad (14)$$

wobei:

a... Faktor für die Brandentstehungswahrscheinlichkeit [-]

t... Faktor für die geschätzte Evakuierungsdauer [-]

c... Faktor für die Ersetzbarkeit des Gebäudeinhalts [-]

Q_i... immobile Brandlastdichte [MJ/m²]

M... Brennbarkeitsklassenbeiwert [-]

d... Faktor zur Berücksichtigung von Unterbrechungen [-]

Die Vorgangsweise zur Ermittlung der einzelnen Bewertungsfaktoren wird in den folgenden Kapiteln 3.1.3.1 bis 3.1.3.16 ausführlich erläutert.

3.1.3.1 Brandlastfaktor

Der Brandlastfaktor ist von der Brandlastdichte abhängig und ist mit folgender Formel zu ermitteln.

$$\begin{array}{ll} \text{Brandlastfaktor [1]:} & q = \frac{2}{3} * \log(Q_i + Q_m) - 0,55 \\ & \end{array} \quad (15)$$

wobei:

Q_i... immobile Brandlastdichte [MJ/m²]

Q_m... mobile Brandlastdichte [MJ/m²]

Mobile Brandlastdichte Q_m

Nutzungsart	Mobile Brandlastdichte [MJ/m ²]		
	F.R.A.M.E [1]	EN 1991-1-2:2013 Tabelle E.4	
		Mittelwert	80 %-Fraktile
Büros	400 (80-550)	420	511
Wohnungen	500 (330-780)	780	948
Schulen	200 (215-340)	285	347
Krankenhäuser	250 (100-330)	230	280
Hotels	250 (310-330)	310	377
Hochregallager	6750 (3750-15000)	-	-

Tab. 3-1: typische Werte für mobile Brandlastdichten Q_m [1]Immobilie Brandlastdichte Q_i

Zur Berechnung des Brandlastfaktors im Zuge der Risikobewertungsmethode F.R.A.M.E nach [1] sind Brandlastdichten zu bestimmen. Dazu wird die gesamte Brandlast in einem festgelegten Bereich auf die Grundfläche des Bereichs bezogen. Zur einfacheren Abschätzung der Brandlastdichte erfolgt in [1] eine Gliederung in immobile- und mobile Brandlastendichten. Der immobile Anteil der Brandlast berücksichtigt die Brennstoffmenge, welche den brennbaren Konstruktions- und Ausbauelementen des Gebäudes zuzuordnen ist [1]. Sämtliche brennbaren Möbel und Güter gehören zu den mobilen Brandlasten. Zur raschen Ermittlung der immobilien Brandlastdichten wird in [1] eine Tabelle für typische Konstruktionsarten angeführt. Nach [1] ist es jedoch zulässig, von diesen Tabellen abzuweichen und eine exaktere Bestimmung der Brandlastdichte vorzunehmen.

Im Zuge der Untersuchungen im Rahmen dieser Masterarbeit ist vor allem der Einfluss der immobilien Brandlast von hoher Relevanz. Aus diesem Grund wird vom Autor im Folgenden eine Methode zur genaueren Berechnung der immobilien Brandlasten vorgeschlagen.

Die Brandlast dient als Maß für die Menge an Brennstoff in einem bestimmten Bereich, z.B. in einem Brandabschnitt.

In Anlehnung an die Brandlastermittlung nach [29] kann die Brandlast bezogen auf einen m³ eines Werkstoffes wie folgt ermittelt werden

$$Q = \varphi * H_u * \psi \quad [MJ/m^3] \quad (16)$$

wobei:

φ ... Dichte des Werkstoffes [kg/m^3]

H_u ... Netto Heizwert [MJ/kg]

ψ ... Beiwert zur Berücksichtigung geschützter Brandlasten [-]

Tragenden Bauteile werden auf eine bestimmte Branddauer bemessen, innerhalb dieser eine ausreichende Tragfähigkeit gewährleistet werden muss. Bei Holzkonstruktionen kann diese Forderung laut [30], aufgrund des kalkulierbaren Abbrandes, durch eine entsprechende Querschnittsvergrößerung erfüllt werden. Nach verstreichen der Brandbemessungsdauer ist von einem Versagen der Konstruktion auszugehen. Beim Einsturz des Tragwerks verlieren die verbliebenen Brandlasten, ihre Bedeutung und sind nach Ansicht des Autors, den geschützten Brandlasten zuzuordnen. Für die Ermittlung der Brandlasten sind daher nur jene Teile der Elemente relevant, die während der angesetzten Branddauer verbrennen. Alternativ zum Beiwert ψ würde sich im Falle von massiven Holzbauteilen daher ein Ansatz mit Berücksichtigung der Abbrandrate anbieten, der wie folgt lauten könnte:

$$Q = \varphi * H_u * t * \beta * A_f \quad [MJ] \quad (17)$$

wobei:

φ ... Dichte von Fichtenholz [kg/m^3] nach [30] = 450 kg/m^3

H_u ... Netto Heizwert von Fichtenholz nach [29] = $17,5 \text{ MJ/kg}$

t ... Feuerwiderstandsdauer R [min]

β ... Abbrandrate CLT nach [29] = $0,00065 \text{ m/min}$

A_f ... brennbare Oberfläche im je m^2 Brandabschnittsfläche: Annahme (Konservativ): $2 \text{ m}^2/m^2$

Abhängig von der Feuerwiderstandsdauer des Tragwerks ergeben sich für Sichtbare Massive Holzkonstruktionen folgende immobile Brandlastdichten:

30 min: $Q_i=307 \text{ MJ}$

60 min: $Q_i =615 \text{ MJ}$

90 min: $Q_i =922 \text{ MJ}$

120 min: $Q_i =1230 \text{ MJ}$

Konstruktionsart (Branddauer 90 min)	[MJ/m ²]
100 % nicht brennbare Konstruktion	0
90 % Nicht brennbare Konstruktion (brennbare Elemente wie Fenster, Dachbekleidung, Dämmung)	100
Nicht brennbare Konstruktion mit Holzbodenbelag 2 cm	300
Massive Fichtenholzkonstruktion (CLT) mit 60 min Kapselung	307
Fichtenholz Massivbauweise (CLT) Af= 2 m ² /m ²	922
nur Tragwerkselemente sind nicht brennbar (Stahlskelett, mit Holzleicht-elementen)	1000
Fichtenholz Leichtbauweise Af=3,25 m ² /m ²	1500

Tab. 3-2: typische Werte für immobile Brandlastdichten Q_i in Anlehnung an [1]

3.1.3.2 Faktor für die Brandausdehnung i

In [1] wird der Brandentstehung und der Ausdehnungsgeschwindigkeit ein großer Einfluss auf die Sicherheit der Personen im Gebäude zugesprochen, da die mögliche Fluchtdauer wesentlich von Brandentwicklungsphase abhängt. Hinsichtlich der Brandausdehnungsgeschwindigkeit stehen in [13], [14] und zahlreichen anderen Literaturquellen nur vier Brandausbreitungsgeschwindigkeiten zur Verfügung. Die Brandausdehnungsproblematik ist laut [1] im Wesentlichen von den Oberflächen abhängig. Der Faktor für die Brandausdehnungsgeschwindigkeit ermittelt sich laut [1] aus:

$$i = 1 - \frac{T}{1000} - (0,1 * \log(m)) + \frac{M}{10} \quad (18)$$

wobei:

T... Beschädigungstemperatur [°C]

m... Abmessungsbeiwert [-]

M... Brennbarkeitsklassenbeiwert [-]

Abmessungsbeiwert der brennbaren Oberflächen m

Die Brandausdehnung ist hauptsächlich von der Oberfläche der brennbaren Objekte abhängig. Je größer die Oberfläche, desto leichter erfolgt eine Brandausbreitung [1]. Dieses kann bei einem Lagerfeuer aufgebaut aus feinen Zweigen erkannt werden. Um dieses Phänomen bei der Festlegung des Brandausdehnungsfaktors berücksichtigen zu können, wird ein Abmessungsbeiwert eingeführt. Zur Ermittlung dieses

Beiwerts nimmt man n Abmessungen s der Objekte [m] im Raum und berechnet die n -te Wurzel des Produktes dieser Zahlen.

$$\text{Beiwert } m \text{ [1]:} \quad m = \sqrt[n]{s_1 * s_2 * \dots * s_n} \quad (19)$$

wobei:

s_n ... Abmessung eines Objekts im Raum [m]

Nach [13] kann die Zuordnung auch nach der folgenden Tabelle erfolgen:

Nutzungsart	Beiwert m
Palettenlager	1
Üblicher Wert für Büro, Wohnung, Hotels,...	0,3
Lager für kleinerer Objekte	0,1
Lager für Folien	0,01
Lager für Körner, Pellets	0,001

Tab. 3-3: Bewertungstabelle Abmessungsbeiwert in abhängig von Nutzungsart [1]

Beschädigungstemperatur T

Der überwiegende Teil der Baustoffe kann durch die Einwirkung von entsprechend hohen Temperaturen seine Tragfähigkeit verlieren oder beschädigt werden. Dies betrifft nicht nur brennbare Werkstoffe. In der folgenden Tabelle aus [1] werden die Beschädigungstemperaturen für verschiedene Stoffarten angeführt:

Stoffarten	T_i [°C]
Entzündliche Flüssigkeiten	20
Kunststoffe, Elektronik	100
Holz, Papier, Textilien	200
Metall	400
Beton und sonstige nichtbrennbaren Materialien	500

Tab. 3-4: Beschädigungstemperaturen für typische Stoffe in Bauwerken [1]

Brennbarkeitsklassenbeiwert M

Zur Berücksichtigung der Brandausdehnungsgeschwindigkeit wird in [1] der Brennbarkeitsklassenbeiwert M eingeführt. Im Zuge dessen werden in Tab. 3-5 den Brennbarkeitsklassen nach [9] bestimmte Werte zugeordnet, wobei nur die Brennbarkeitsklasse der Oberfläche betrachtet wird.

Brennbarkeitsklassen nach [9]	Beiwert M
A1	0
A2	0,5
B	1
C	2
D	3
E	4
F	5

Tab. 3-5: Bewertungstabelle der Brennbarkeitsklassen [1]

3.1.3.3 Faktor für Größe und Form des Brandabschnitts g

Der Brandabschnittsfaktor g wird nach [1] wie folgt ermittelt:

$$g = \frac{5 * \sqrt[3]{\left(\left(\frac{A}{l}\right)^2 * l\right)}}{200} \quad (20)$$

wobei:

A... Fläche des betrachteten Brandabschnitts [m²]

l... Länge des fiktiven Brandabschnitts [m]

Fläche A des betrachteten Brandabschnitts

In F.R.A.M.E ist laut [1] grundsätzlich jedes Geschoß als ein großer Brandabschnitt zu betrachten. Eine Gliederung in zwei oder mehrere Brandabschnitte je Stockwerk ist nur möglich, wenn folgende Anforderungen nach [1] an die trennende Wand eingehalten werden:

- Feuerwiderstandsdauer von REI 120 (auch Türen)
- keine Brandübertragung um die Wand herum
- Eigenständiges Tragwerk (bauliche Trennung der Brandabschnitte)

Im Zuge des Brandabschnittsfaktors g, wird ausschließlich die horizontale Brandausbreitung betrachtet. Bei mehrgeschoßigen Gebäuden gilt jedes Geschoß als eigener Brandabschnitt. Die Gefahr der vertikalen Brandausbreitung über Fenster oder in Atrien findet, unter anderem durch den Etagenfaktor, den Zugänglichkeitsfaktor sowie den Feuerwiderstandsfaktor Eingang in die Brandrisikobewertung.

Zur Ermittlung des Personenrisiko nach F.R.A.M.E wird jeder Entstehungsbrand als Worst-Case-Szenario behandelt. Daher hat laut [1] die Größe des Brandabschnitts

keinerlei Auswirkung auf die Sicherheit der Personen. Die Gefährdung von Sachwerten steigt hingegen unmittelbar mit der Größe des Brandabschnitts [1]. Die Ursachen dafür sind die höhere Brandeintrittswahrscheinlichkeit je Brandabschnitt sowie die verringerte Kontrollierbarkeit eines großflächigen Brandes [1]. Weiters wirkt sich die Form des Brandabschnitts auf die mögliche Brandausbreitung aus [1]. Während in einem quadratischen Brandabschnitt eine nahezu kreisförmige Brandausbreitung möglich ist, führt eine längliche Form zu einer Beschränkung auf zwei Richtungen. Im Zuge der F.R.A.M.E Methode nach [1] wird daher jede beliebig polygonale Brandabschnittsform in ein äquivalentes Rechteck umgewandelt.

Länge l des fiktiven Brandabschnitts

Die Länge des fiktiven Rechtecks entspricht dabei größer Abstand zweier Seitenmittelpunkte des Brandabschnittes siehe Abb. 3-1.

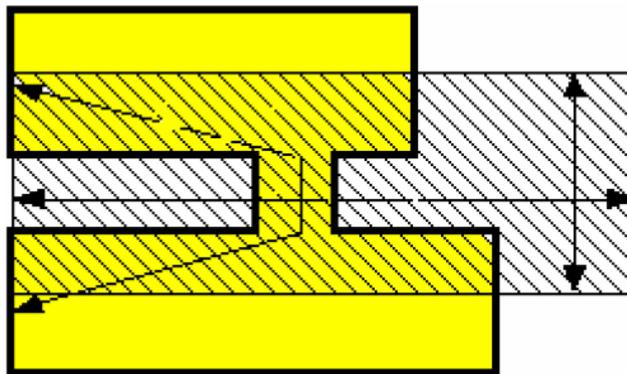


Abb. 3-1: Ermittlung der äquivalenten rechteckigen Brandabschnittsform [1]

3.1.3.4 Faktor für Verrauchungsgefahr v

Faktor für Verrauchungsgefahr [1]:

$$v = 0,84 + 0,1 * \log(Q_m) - \sqrt{\frac{A_v}{A} * \sqrt{h}} \quad (21)$$

wobei:

Q_i... immobile Brandlastdichte gemäß Kapitel 3.1.3.1 [MJ/m²]

A_v... effektive Rauchabzugsfläche [m²]

A... Fläche des betrachteten Brandabschnitts (siehe Kapitel 3.1.3.3) [m²]

h... Raumhöhe gemäß Kapitel 3.1.3.3 [m]

Die Rauchmenge, die im Brandfall entsteht, wird nach [1] aus der mobilen Brandlast, wie für den Brandlastfaktor definiert, abgeleitet. Dabei folgt [1] einem Ansatz

wonach je kg verbranntes Material im Durchschnitt ein Normvolumen von 20 m³ Rauch entsteht. Weshalb die immobile Brandlast unberücksichtigt bleibt, geht aus [1] nicht hervor. Aufgrund dessen beschließt der Autor, auf der konservativen Seite liegend, die immobile Brandlast ebenfalls zu berücksichtigen. Die Formel für den Verrauchungsgefahr wird im Zuge dieser Arbeit auf der sicheren Seite liegend verändert und lautet nunmehr:

Faktor für Verrauchungsgefahr:

$$v = 0,84 + 0,1 * \log(Q_i + Q_m) - \sqrt{\frac{A_v}{A} * \sqrt{h}} \quad (22)$$

wobei:

Q_i... immobile Brandlastdichte gemäß Kapitel 3.1.3.1 [MJ/m²]

Q_m... mobile Brandlastdichte gemäß Kapitel 3.1.3.1 [MJ/m²]

A_v... effektive Rauchabzugsfläche [m²]

A... Fläche des betrachteten Brandabschnitts (siehe Kapitel 3.1.3.3) [m²]

h... Raumhöhe gemäß Kapitel 3.1.3.3 [m]

Raumhöhe h

Da Rauch wärmer als die Luft im Raum ist, sammelt sich er sich zunächst nach [13] im oberen Bereich des Raumes. Darunter befindet sich zu Beginn des Brandes zunächst die sogenannte „rauchfreie Schicht“, in welcher zumindest für eine begrenzte Dauer Fluchtbedingungen für Personen gegeben sind. Je höher der Raum ist, desto länger steht eine rauchfreie Schichthöhe zur Verfügung. Zur Bewertung der Verrauchungsgefahr wird nach [1] die Raumhöhe als Abstand von Boden bis zur Decke berücksichtigt. Bei schrägen Oberflächen (Dach) ist nach [1] die mittlere Höhe heranzuziehen. Um keine unrealistischen Werte zu erhalten, ist laut [1] großen Raumhöhen der Maximalwert von 15 m zuzuordnen. Spezielle Regelungen für mehrgeschoßige Brandabschnitte und Atrien sind den Erläuterungen in [1] zu entnehmen.

Effektive Rauchabzugsfläche A_v

Eine Reduzierung der Verrauchung im Raum ist auch durch Rauchabzugsöffnungen möglich. Die Effizienz dieses Rauchabzugs ist nach [1] in erster Linie von der Größe und der Lage der Öffnungen abhängig. Da der warme Rauch nach oben abziehen

möchte, können lediglich Öffnungen im oberen Drittel des Raumes als Rauchabzugsfläche geltend gemacht werden [1].

Neben natürlichen, oder mechanischen Rauchabzugssystemen können in geschlossenen Räumen auch geschlossene Fensterflächen als Öffnungen herangezogen werden, da laut [1] durch den Druck der entstehenden heißen Gase von Bruch der Fensterscheiben ausgegangen werden kann.

In [1] wird darauf hingewiesen, dass nur jene Fensterflächen angesetzt werden dürfen welche rasch brechen, da sonst ein Bruch erst im Zuge des Flashovers eintritt. In diesem Zusammenhang dürfen laut [1] nur einfache Verglasungen und Kunststoffscheiben als effektive Rauchabzugsfläche A_v bezeichnet werden. Daraus lässt sich schließen, dass heutzutage üblich eingesetzte Mehrfach- oder Sicherheitsverglasungen nicht angesetzt werden dürfen, außer es ist eine sichere ferngesteuerte Öffnung möglich (natürliches Rauchabzugssystem).

Die Leistung von Mechanische Rauchabzugssystemen (Ventilatoren) wird nach [1] in eine äquivalente statische Öffnungsfläche umgerechnet, wobei ein Luftnormvolumenstrom von $10000 \text{ m}^3/\text{h}$, einem m^2 entspricht.

3.1.3.5 Faktor für die betrachtete Etage e

Der Etagenfaktor ist laut [1] durch folgende Formel zu bestimmen:

$$e = \left[\frac{(|E| + 3)}{(|E| + 2)} \right]^{(0,7 * |E|)} \quad (23)$$

wobei:

E ... Nummer der betrachteten Etage [-]

In F.R.A.M.E wird nach [1] das Risiko für einen bestimmten Brandabschnitt betrachtet. Die Festlegung der Etagenbeiwert E des zu untersuchenden Brandabschnitts wird in Abb. 3-2 erläutert.

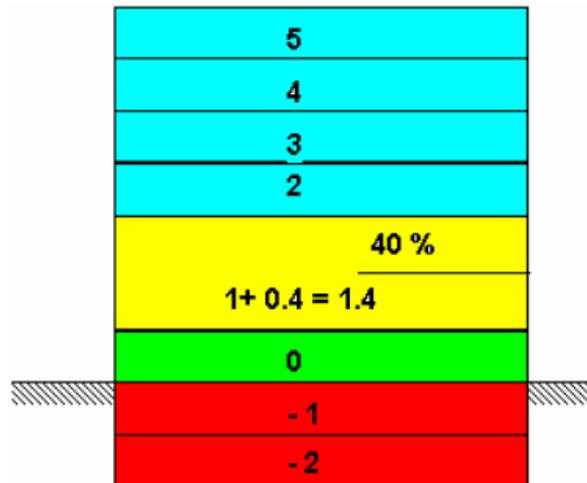


Abb. 3-2: Festlegung der Etagennummer [1]

In [1] wird behauptet, dass der Etagenfaktor e die Gefahr der vertikalen Ausbreitung von Feuer und Rauch, sowie das erhöhte Schadenspotential eines Tragwerksversagens berücksichtigt. Da sich die Etagennummern jeweils auf das Erdgeschoß beziehen und nicht auf die Gesamtanzahl der Stockwerke, bewertet der Etagenfaktor nach Ansicht des Autors eher eine eingeschränkte Leistungsfähigkeit der Feuerwehr in Abhängigkeit von der Entfernung des betrachteten Stockwerks zum Erdgeschoss.

3.1.3.6 Faktor für die Gebäudezugänglichkeit z

Der Zugänglichkeitsfaktor bewertet die Erreichbarkeit eines bestimmten Brandabschnitts durch die Feuerwehr und wird durch folgende Formel ermittelt [1]:

$$z = 1 + 0,05 * \text{GANZZAHL} \left[\frac{\left(\frac{A}{l}\right)}{20 * Z} + \frac{H}{25} \right] \quad (24)$$

wobei:

- A... Fläche des betrachteten Brandabschnitts gemäß Kapitel 3.1.3.3 [m]
- l... Länge des fiktiven Brandabschnitts gemäß Kapitel 3.1.3.3 [m]
- Z... Anzahl der zugänglichen Seiten gemäß Tab. 3-6 [-]
- H... Fluchthöhenniveau [m]

Dabei wird die Gebäudetiefe, ausgedrückt durch die fiktive Breite $b = \left(\frac{A}{l}\right)$, in Relation zu der Anzahl der zugänglichen Gebäudeseiten und der üblichen Länge eines Feuerwehrschauches von 20 m gesetzt [1]. Analog zum Etagenfaktor, spielt das Höhenniveau des betrachteten Brandabschnitts gemessen vom anstehenden Gelände eine

Rolle. Dieses wird in Relation zur, durch Drehleitern erreichbare Höhe von 25 m angegeben.

Beiwert Z zur Berücksichtigung der Gebäudezugänglichkeit

Eine Gebäudeseite ist dann als zugänglich zu betrachten, wenn Türen und Fenster vorhanden sind, durch die man in den betrachteten Brandabschnitt gelangt, sowie wenn eine geeignete Fläche für die Aufstellung einer Drehleiter verfügbar ist [1].

Anzahl der zugänglichen Seiten	Z
Eine Seite	1
Zwei Seiten	2
Drei Seiten	3
Vier Seiten	4

Tab. 3-6: Beurteilungstabelle Anzahl der zugänglichen Seiten [1]

3.1.3.7 Faktor für die Löschwasserversorgung W

$$W = 0,95^{(w_1+w_2+w_3+w_4+w_5)} \quad (25)$$

wobei:

w_1 ... Beiwert zur Berücksichtigung der Zuverlässigkeit der Löschwasserquelle [-]

w_2 ... Beiwert zur Berücksichtigung der verfügbaren Löschwassermenge [-]

w_3 ... Beiwert zur Berücksichtigung der Flusskapazität der Wasserversorgung [-]

w_4 ... Beiwert zur Berücksichtigung der Hydrantenkapazität [-]

w_5 ... Beiwert zur Berücksichtigung des erforderlichen Wasserdrucks [-]

Beiwert w_1 zur Berücksichtigung der Zuverlässigkeit der Löschwasserquelle

Art der Löschwasserquelle	w_1
Fluss, See, Trinkwassernetz	0
Löschteich, Wasserturm	4
Kein Löschwasser vor Ort	10

Tab. 3-7: Beurteilungstabelle Zuverlässigkeit der Löschwasserquelle [1]

Beiwert w_2 zur Berücksichtigung der verfügbaren Löschwassermenge

Als erforderliche gesamte Löschwassermenge in m^3 wird nach [1] $\frac{1}{4}$ des Werts der gesamten Brandlastdichte angenommen:

$$\text{Löschwassermenge}_{erf} = \frac{Q_i + Q_m}{4} [m^3] \quad (26)$$

$\frac{\text{Löschwassermenge}_{vorh}}{\text{Löschwassermenge}_{erf}} * 100 \%$	w ₂
0 %	4
70 %	3
80 %	2
90 %	1
≥100 %	0

Tab. 3-8: Beurteilung der vorhandenen Löschwassermenge [1]

Beiwert w₃ zur Berücksichtigung der Flusskapazität der Wasserversorgung

$$\text{Flusskapazität}_{erf} = \frac{\text{Löschwassermenge}_{erf}}{2 \text{ Stunden}} = \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (27)$$

$\frac{\text{Flusskapazität}_{vorh}}{\text{Flusskapazität}_{erf}} * 100 \%$	w ₃
≥100 % (Versorgungsleitung weist eine Ausreichende Kapazität auf)	0
1-99 % (Leitung zu klein für erforderliche Flusskapazität)	4
0 % (keine Wasserversorgungsleitung)	10

Tab. 3-9: Beurteilung der Flusskapazität [1]

Beiwert w₄ zur Berücksichtigung der Hydrantenkapazität

Feuerwehrrkupplungsbezeichnung	Schlauchdurchmesser	m ³ /h [1]
C-Schlauchanschluss	52 mm	15,5
B-Schlauchanschluss	75 mm	32,3
A-Schlauchanschluss	110 mm	69,4

Tab. 3-10: Flusskapazität von Hydranten [1]

$$\text{Flusskapazität. Hydrant}_{erf} = 0,31 * \text{Gebäudeumfang} [m] = \left[\frac{m^3}{h} \right] \quad (28)$$

$\frac{\text{Flusskapazität. Hydrant}_{vorh}}{\text{Flusskapazität. Hydrant}_{erf}} * 100 \%$	w ₄
≥100 % (Hydranten weisen eine Ausreichende Kapazität auf)	0
50-99 %	1
<50 %	3

Tab. 3-11: Beurteilung der Hydrantenkapazität [1]

Beiwert w_5 zur Berücksichtigung des erforderlichen Wasserdrucks

$$Wasserdruck_{erf} = maxFluchthöhe + 35m \text{ [meter Wassersäule]} \quad (29)$$

$\frac{Wasserdruck_{vorh}}{Wasserdruck_{erf}} * 100 \%$	w_5
$\geq 100 \%$	0
$< 100 \%$	3

Tab. 3-12: Beurteilung des Wasserdrucks [1]

3.1.3.8 Faktor für anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen

$$S = 1,05^{(s_1+s_2+s_3+s_4+s_5+s_6+s_7+s_8+s_9)} \quad (30)$$

s_1 ... Beiwert zur Berücksichtigung der Art der automatischen Brandmeldeanlage [-]

s_2 ... Beiwert zur Berücksichtigung der Zuverlässigkeit der Löschwasserquelle [-]

s_3 ... Beiwert zur Berücksichtigung von Löschwasserrückhaltung [-]

s_4 ... Beiwert zur Berücksichtigung von Wasserversorgungsinspektionen [-]

s_5 ... Beiwert zur Berücksichtigung der Zuverlässigkeit der Drucksteigerungsanlage [-]

s_6 ... Beiwert zur Berücksichtigung von Automatischen Löschanlagen [-]

s_7 ... Beiwert zur Berücksichtigung der Feuerwehrleistungsfähigkeit [-]

s_8 ... Beiwert zur Berücksichtigung von vorhandenen Betriebsfeuerwehren [-]

s_9 ... Beiwert zur Beurteilung von Zusatzfunktionen der Brandmeldeanlage [-]

Beiwert s_1 zur Berücksichtigung der Art der automatischen Brandmeldeanlage

Art der automatischen Brandmeldeanlage mit Feuerwehralarmierung	s_1
Keine automatische Brandmeldeanlage	0
Sprinkleranlage mit Flussmelder	6
Wärmemelder	7
Rauch- oder Flammenmelder	10

Tab. 3-13: Beurteilung der Art der automatischen Brandmeldeanlage [1]

Beiwert s_2 zur Berücksichtigung der Zuverlässigkeit der Löschwasserquelle

$(Löschwasser_{vorh} > 4 * Löschwasser_{erf})$	s_2
Trifft nicht zu	0
Trifft zu	3

Tab. 3-14: Beurteilung der Zuverlässigkeit der Löschwasserquelle [1]

Beiwert s_3 zur Berücksichtigung von Löschwasserrückhaltung

Für Löschwasser reservierter Wasservorrat	s_3
Trifft nicht zu	0
Trifft zu	2

Tab. 3-15: Beurteilung der Löschwasserrückhaltung [1]

Beiwert s_4 zur Berücksichtigung von Wasserversorgungsinspektionen

regelmäßige Inspektion durch Gebäudebetreiber	s_4
Trifft nicht zu	0
Trifft zu	2

Tab. 3-16: Beurteilung der Wasserversorgungsinspektion [1]

Beiwert s_5 zur Berücksichtigung der Zuverlässigkeit der Drucksteigerungsanlage

Zuverlässigkeit der Drucksteigerungsanlage	s_5
Keine Redundanzen	0
1 Wasserversorgung mit erhöhter Zuverlässigkeit (alle Pumpen doppelt ausgeführt)	5
2 unabhängige Wasserversorgungen mit hoher Zuverlässigkeit (jeweils alle Pumpen doppelt ausgeführt)	12

Tab. 3-17: Beurteilung der Zuverlässigkeit der Drucksteigerungsanlage

Beiwert s_6 zur Berücksichtigung von Automatischen Löschanlagen

Art der Automatische Löschanlage	s_6
Löschanlagen mit CO ₂ oder Schaum	11
Sprinkleranlage am Trinkwassernetz	11
Sprinkleranlage mit einer eigenen Wasserversorgung	14
Sprinkleranlage mit 2 unabhängigen Wasserversorgungen	20

Tab. 3-18: Beurteilung der Zuverlässigkeit der Automatischen Löschanlage [1]

Beiwert s_7 zur Berücksichtigung der Feuerwehrleistungsfähigkeit

Öffentliche Feuerwehr	s_7
freiwillige Feuerwehr	2
freiwillige Feuerwehr mit Hauptamtlichen Kräften	4
Berufsfeuerwehr: Tagsüber ständig anwesend, nachts Bereitschaft	6
Berufsfeuerwehr: Permanent besetzt	8

Tab. 3-19: Beurteilung der öffentlichen Feuerwehr [1]

Beiwert s_8 zur Berücksichtigung von vorhandenen Betriebsfeuerwehren

Betriebsfeuerwehr	s_8
nicht vorhanden	0
Betriebsfeuerwehr nur zu Betriebszeiten besetzt	6
Betriebsfeuerwehr permanent besetzt	14

Tab. 3-20: Beurteilung der Betriebsfeuerwehr [1]

Beiwert s_9 zur Beurteilung von Zusatzfunktionen der Brandmeldeanlage

Funktionen der Brandmeldeanlage	s_9
Lokalisierung von Bränden möglich + Elektronische Überwachung des Systems	4
Eine Funktion nicht vorhanden	2
Beide Funktionen nicht vorhanden	0

Tab. 3-21: Beurteilung von Zusatzfunktionen der Brandmeldeanlage [1]

3.1.3.9 Faktor für organisatorische Brandschutzmaßnahmen N

$$N = 0,95^{(n_1+n_2+n_3+n_4)} \quad (31)$$

wobei:

n_1 ... Beiwert zur Berücksichtigung der manueller Alarmierungsmaßnahmen [-]

n_2 ... Beiwert zur Berücksichtigung der verfügbaren Handlöschmittel [-]

n_3 ... Beiwert zur Berücksichtigung der Feuerwehr-Hilfsfrist [-]

n_4 ... Beiwert zur Berücksichtigung des Löschtrainings für Personen im Gebäude [-]

Beiwert n_1 zur Berücksichtigung der manueller Alarmierungsmaßnahmen

Beschreibung manueller Alarmierungsmaßnahmen	n_1
kontinuierlich besetzter Sicherheitsdienst + manuelles Brandmeldesystem vorhanden (Telefon, Brandmeldeknopf) + manuell aktivierbare akustische Warnsignalanlage vorhanden	2
Ein Element fehlt	4
Zwei Elemente fehlen	6
Alle drei Elemente fehlen	8

Tab. 3-22: Beurteilung der organisatorischen Alarmierungsmaßnahmen [1]

Beiwert n_2 zur Berücksichtigung der verfügbaren Handlöschmittel

Art und Ausstattung mit Handlöschmittel	n_2
Wandhydranten und Schlauchhaspeln sind ausreichender Anzahl sowie derart ausgeführt, dass damit alle Bereiche des Gebäudes erreicht werden können. Außerdem entsprechen die Anzahl und Typen der Feuerlöscher im Gebäude den Vorschriften	0
Feuerlöscher Wandhydranten und Schlauchhaspeln sind nicht ausreichend vorhanden.	4
Es gibt gar keine Feuerlöscher Wandhydranten oder Schlauchhaspeln	8

Tab. 3-23: Beurteilung der verfügbaren Handlöschmittel [1]

Beiwert n_3 zur Berücksichtigung der Feuerwehr-Hilfsfrist

Zeit von Alarmierung bis zur Ankunft der Feuerwehr (Hilfsfrist)	n_3
<10 min	0
10-15 min	2
15-30 min	5
>30 min	10

Tab. 3-24: Beurteilung der Feuerwehr-Hilfsfrist [1]

Beiwert n_4 zur Berücksichtigung des Löschtrainings für Personen im Gebäude

Umfang des Löschtrainings	n_4
Alle Personen wissen wie man richtig einen Feuerlöscher bedient	0
Nur ein Teil der Personen haben ein diesbezügliches Training absolviert	2
Es gibt keinen entsprechenden Kurs	4

Tab. 3-25: Beurteilung des Umfangs des Löschtrainings für Personen im Gebäude [1]

3.1.3.10 Faktor für die Feuerwiderstände der Bauteile

Der Feuerwiderstandsfaktor F deutet nach [1] den Wert des Feuerwiderstandes von Bauteilen. Dabei wird auch der Faktor für Anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen berücksichtigt, da sich die Bedeutung des Baulichen Brandschutzes in einem Gebäude mit vielen Anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen verringert [1].

$$\text{Feuerwiderstandsfaktor [1]:} \quad F = \left[1 + \frac{f}{100} - \frac{f^{2,5}}{10^6} \right] \left[1 - \frac{(S-1)}{40} \right] \quad (32)$$

$$\text{gewichteter Feuerwiderstand [1]:} \quad f = \frac{1}{2} * f_s + \frac{1}{4} * f_f + \frac{1}{8} * f_d + \frac{1}{8} * f_w \quad (33)$$

wobei:

S ... Faktor für anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen gemäß Kapitel 3.1.3.8

f_s ... Feuerwiderstandsdauer des Haupttragwerk [min]

f_f ... Feuerwiderstandsdauer der Außenwände [min]

f_d ... Feuerwiderstandsdauer der Decken [min]

f_w ... Feuerwiderstandsdauer der Wände innerhalb eines Brandabschnittes [min]

Die zulässige Feuerwiderstandsdauer ist gemäß Einheitstemperaturkurve nach [29] zu ermitteln [1]. Im Zuge der Beurteilung nach F.R.A.M.E sind laut [1] folgende Regeln zu befolgen:

Feuerwiderstand des Haupttragwerk f_s

Die angesetzte Widerstandsdauer R des Tragwerks muss immer gleich oder höher sein als jene der restlichen Elemente. Um unrealistische Ergebnisse zu vermeiden ist die maximale Feuerwiderstandsdauer im Zuge der Beurteilung nach F.R.A.M.E auf 120 min zu begrenzen [1].

Feuerwiderstand der Außenwände f_f

Um eine vertikale Ausbreitung zu vermeiden, ist insbesondere der Raumabschluss der Außenwände von Bedeutung [14]. Dabei soll verhindert werden, dass ein Feuer nach außen gelangt, weshalb vor allem die Innenseite der Außenwand relevant ist. Vor allem Fensterflächen sind besonders gefährdet und weisen bis auf spezielle Brandschutzgläser keinen Feuerwiderstand auf. Im Falle einer nicht brennbaren Ausführung der Fassade, dürfen Fenster mit einer Gesamtfläche von weniger als 5 % der Außenwandfläche vernachlässigt werden [1].

Feuerwiderstand der Decken f_d

Insbesondere bei Hochhäusern ist eine Unterscheidung zwischen einem Haupttragwerk und einem Sekundärtragwerk sinnvoll. Während ein Versagen des Haupttragwerks zu einem Einsturz des Gebäudes führen kann, ist bei Einsturz eines Sekundärelements (Decke) nur ein kleiner Bereich betroffen. Aufgrund dessen kann eine Abstufung der Feuerwiderstandsdauer REI sinnvoll sein.

Feuerwiderstand der Wände innerhalb eines Brandabschnitts f_w

Innenwände mit einem Widerstand EI erlauben die Teilung eines Brandabschnitts in mehrere Brandzonen. Nach [1] ist ein derartiger Ansatz allerdings nur zulässig falls der Brandabschnitt in mindestens 4 Brandzonen geteilt wird, die jeweils nicht größer als $\frac{1}{4}$ der Brandabschnittsfläche bzw. 1000 m^2 sein dürfen.

3.1.3.11 Faktor für Maßnahmen zur Erhöhung der Evakuierungssicherheit

$$\text{Fluchtfaktor [1]:} \quad U = 1,05^{(u_1+u_2+u_3+u_4+u_5+u_6+u_7+u_8+u_9+u_{10})} \quad (34)$$

wobei:

- u₁... Beiwert zur Art der automatischen Brandmeldeanlage [-]
- u₂... Beiwert zur Beurteilung von Zusatzfunktionen der Brandmeldeanlage [-]
- u₃... Beiwert zur Berücksichtigung der vertikalen Fluchtwegverhältnisse [-]
- u₄... Beiwert zur Berücksichtigung der horizontalen Fluchtwegverhältnisse [-]
- u₅... Beiwert zur Berücksichtigung des Sprinklerschutzumfangs [-]
- u₆... Beiwert zur Berücksichtigung der Art der öffentlichen Feuerwehr [-]
- u₇... Beiwert zur Berücksichtigung einer vorhandenen Betriebsfeuerwehr [-]
- u₈... Beiwert zur Berücksichtigung der Rauchabzugsanlagen [-]
- u₉... Beiwert zur Beurteilung der Art der Alarmierung [-]
- u₁₀... Beiwert zur Berücksichtigung von Fluchtwegkennzeichnungen [-]

Beiwert u_1 zur Art der automatischen Brandmeldeanlage

Art der automatischen Brandmeldeanlage	u_1
Keine automatische Brandmeldeanlage	0
Rauchwarnmelder	2
Sprinkleranlage mit Flussmelder	4
Wärmemelder	5
Rauch- oder Flammenmelder	8

Tab. 3-26: Beurteilung der Automatischen Brandmeldeanlage [1]

Beiwert u_2 zur Beurteilung von Zusatzfunktionen der Brandmeldeanlage

Funktionen der Brandmeldeanlage	u_2
Lokalisierung von Bränden möglich + Elektronische Überwachung des Systems	4
Eine Funktion nicht vorhanden	2
Beide Funktionen nicht vorhanden	0

Tab. 3-27: Beurteilung von Zusatzfunktionen der Brandmeldeanlage [1]

Beiwert u_3 zur Berücksichtigung der vertikalen Fluchtwegverhältnisse

Beschreibung des vertikalen Fluchtweges (Treppenhaus)	u_3
keine Treppen benötigt - Erdgeschoß	0
Offene Innentreppe	0
1 Innentreppe in eigenem Brandabschnitt (kein Schutz vor Verrauchung)	1
>1 Innentreppen in eigenem Brandabschnitt (kein Schutz vor Verrauchung)	2
1 Innentreppe in eigenem Abschnitt + Schutz vor Verrauchung (Rauchabzug, Druckbelüftung)	3
>1 Innentreppen in eigenem Abschnitt + Schutz vor Verrauchung (Rauchabzug, Druckbelüftung)	4
Innentreppe + 1 Außentreppe	6
Innentreppen + >1 Außentreppe	8

Tab. 3-28: Beurteilung der vertikalen Fluchtwegverhältnisse [1]

Beiwert u_4 zur Berücksichtigung der horizontalen Fluchtwegverhältnisse

Beschreibung der horizontalen Fluchtwege	u_4
Keine Flucht in anderen Brandabschnitt im selben Geschoß möglich	0
Flucht in anderen Brandabschnitt im selben Geschoß für 50 % möglich	2
Flucht in anderen Brandabschnitt im selben Geschoß für 100 % möglich	8

Tab. 3-29: Beurteilung der horizontalen Fluchtwege [1]

Beiwert u_5 zur Berücksichtigung des Sprinklerschutzumfangs

Umfang des Sprinklerschutz	u_5
Kein Sprinkler	0
Nur in Bereichen mit erhöhtem Brandrisiko	5
Sprinkler im gesamten Brandabschnitt (Vollschutz)	10

Tab. 3-30: Beurteilung des Umfangs des Sprinklerschutzes [1]

Beiwert u_6 zur Berücksichtigung der Art der öffentlichen Feuerwehr

Art der öffentlichen Feuerwehr	u_6
freiwillige Feuerwehr	2
freiwillige Feuerwehr mit Hauptamtlichen Kräften	4
Berufsfeuerwehr: Tagsüber ständig anwesend, nachts Bereitschaft	6
Berufsfeuerwehr: Permanent besetzt	8

Tab. 3-31: Beurteilung der öffentlichen Feuerwehr [1]

Beiwert u_7 zur Berücksichtigung einer vorhandenen Betriebsfeuerwehr

Betriebsfeuerwehr	u_7
nicht vorhanden	0
Betriebsfeuerwehr nur zu Betriebszeiten besetzt	5
Betriebsfeuerwehr permanent besetzt	5

Tab. 3-32: Beurteilung der Betriebsfeuerwehr [1]

Beiwert u_8 zur Berücksichtigung der Rauchabzugsanlagen

Rauchabzug	u_8
kein Rauchabzug im Brandabschnitt	0
Kein Rauchabzug durch automatischen Brandmelder gesteuert	0
Rauchabzug durch automatischen Brandmelder gesteuert	3

Tab. 3-33: Beurteilung Rauchabzug [1]

Beiwert u_9 zur Beurteilung der Art der Alarmierung

Art der Alarmierung	u_9
Alarmierung mittels Lautsprecherdurchsagen	6
Alarmierung durch Sirene	0

Tab. 3-34: Beurteilung der Art der Alarmierung [1]

Beiwert u_{10} zur Berücksichtigung von Fluchtwegkennzeichnungen

Art der Fluchtwegkennzeichnung	u_{10}
Fluchtwegmarkierung und Beschilderung	4
Keine Kennzeichnung von Fluchtwegen	0

Tab. 3-35: Beurteilung von Fluchtwegkennzeichnungen [1]

3.1.3.12 Rettungsfaktor

$$\text{Rettungsfaktor [1]:} \quad Y = 1,05^{(y_1 + y_2)} \quad (35)$$

wobei

y_1 ... Beiwert zur Berücksichtigung von Unterbrandabschnittsbildung [-]

y_2 ... Beiwert zur Berücksichtigung der Maßnahmen zur Beschleunigung Brandschadensbehebung [-]

Beiwert y_1 zur Berücksichtigung von Unterbrandabschnittsbildung

Unterteilung des betrachteten Brandabschnitts	y_1
Keine Unterteilung	0
Unterteilung in Bereiche $<1000 \text{ m}^2$ mit einem Feuerwiderstand EI30	2
Unterteilung in Bereiche $<1000 \text{ m}^2$ mit einem Feuerwiderstand EI60	4

Tab. 3-36: Beurteilung Unterteilung des betrachteten Brandabschnitts [1]

Beiwert y_2 zur Berücksichtigung der Maßnahmen zur Beschleunigung Brandschadensbehebung

Organisatorische Maßnahmen einen Brandschaden schnell beheben zu können	$y_2 = \sum y_{2,i}$	
	$y_{2,i}$	
	trifft zu	trifft nicht zu
Externe Sicherung der Finanz- und Wirtschaftsdaten	2	0
Beschaffung von Ersatzteilen ist einfach	4	0
Reparaturen sind ohne fremde Hilfe möglich	2	0
Vereinbarung mit anderen Betrieben die Produktion dorthin zu verlagern	3	0
Mehrere Produktionsstandorte, Kapazitätsreserven	3	0

Tab. 3-37: Beurteilung der Brandschadensbehebung [1]

3.1.3.13 Faktor für Brandentstehungswahrscheinlichkeit a

Faktor für Brandeintrittswahrscheinlichkeit [1]:
$$a = a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5 + a_6 + a_7 \quad (36)$$

wobei:

- a₁... Beiwert zur Berücksichtigung der Nutzungsart [-]
- a₂... Beiwert zur Berücksichtigung des Zustands der Elektroinstallation [-]
- a₃... Beiwert zur Berücksichtigung des Heizmaterials [-]
- a₄... Beiwert zur Berücksichtigung der räumlichen Anordnung der Heizung [-]
- a₅... Beiwert zur Berücksichtigung von vorhandenen Gas-Zündgefahrenzonen [-]
- a₆... Beiwert zur Berücksichtigung von Staubexplosionsgefahrenzonen [-]
- a₇... Beiwert zur Berücksichtigung des Zündrisikos durch Zigaretten [-]

Beiwert a_1 zur Berücksichtigung der Nutzungsart

Nutzungsart	a_1
Nicht industriell genutzt (Wohnung, Büro, Hotel)	0
Lagerhallen	0
Industriebetriebe in denen nichtbrennbare Produkte hergestellt werden	0
Einzelhandel, Kaufhäuser	0,2
Papier-, Holz-, Chemieindustrie	0,4

Tab. 3-38: Beurteilung des Brandentstehungsrisikos abhängig von der Nutzungsart [1]

Beiwert a_2 zur Berücksichtigung des Zustands der Elektroinstallation

Zustand der Elektroinstallation	a_2
Entspricht den Vorschriften und wird regelmäßig überprüft	0
Entspricht den Vorschriften	0,1
Entspricht nicht den Vorschriften	0,2

Tab. 3-39: Beurteilung des Zustands der Elektroinstallation [1]

Beiwert a_3 zur Berücksichtigung des Heizmaterials

Art des Heizmaterials	a_3
Fernwärme, Strom, Kohle, Heizöl	0
Gas	0,1
Holz, Müll	0,15

Tab. 3-40: Beurteilung des Brandentstehungsrisikos abhängig vom Heizmaterial [1]

Beiwert a_4 zur Berücksichtigung der räumlichen Anordnung der Heizung

Standort der Heizung	a_4
nicht im Gebäude (Fernwärme)	0
in einem eigenen Brandabschnitt	0
Im betrachteten Brandabschnitt	0,1

Tab. 3-41: Beurteilung der Lage der Heizung [1]

Beiwert a_5 zur Berücksichtigung von vorhandenen Gas-Zündgefahrenzonen

Art der Gas-Zündgefahrenzone	a_5
Keine Gefahrenzone	0
Ständige Zündgefahr (ATEX Zone 0)	0,3
Zündgefahr unter normaler Wirkung (ATEX Zone 1)	0,2
Zündgefahr unter abnormaler Wirkung (ATEX Zone 2)	0,1

Tab. 3-42: Beurteilung der Gas-Zündgefahr [1]

Beiwert a_6 zur Berücksichtigung von Staubexplosionsgefahrenzonen

Art der Staubexplosionsgefahrenzone	a_6
Keine Gefahrenzone	0
Zündgefahr (ATEX Zone 20/21/22)	0,2
Zündgefahr unter abnormaler Wirkung	0,1

Tab. 3-43: Beurteilung der Staub-Zündgefahr [1]

Beiwert a_7 zur Berücksichtigung des Zündrisikos durch Zigaretten

Beschreibung des Zündrisiko von Zigaretten	a_7
Kein Risiko – Strenge Kontrollen	0
Gefahr unerlaubten Rauchens, ist gegeben	0,1

Tab. 3-44: Beurteilung des Brandentstehungsrisikos abhängig von Raucherlaubnis [1]

3.1.3.14 Faktor für geschätzte Evakuierungsdauer t

Faktor für die erforderliche Fluchtdauer [1]:

$$t = \frac{p * \left[\left(\frac{A}{l} + l \right) + \frac{X * A}{x} + 1,25 * H \right] * \left[x * \left(\frac{A}{l} + l \right) \right]}{800 * \frac{x * 120}{X * A} * \left[1,4 * x * \left(\frac{A}{l} + l \right) - 0,44 * X * A \right]} \quad (37)$$

wobei:

- p... Beiwert für die Mobilität der Personen [-]
- X... Personendichte im betrachteten Bereich [Pers./m²]
- x... Fluchtweeinheiten [-]
- A... Fläche des betrachteten Brandabschnitts gemäß Kapitel 3.1.3.3 [m]
- l... Länge des fiktiven Brandabschnitts gemäß Kapitel 3.1.3.3 [m]
- H... Fluchthöhenniveau gemäß Kapitel 3.1.3.6 [m]

Beiwert p für die Mobilität der Personen

Der Mobilitätsfaktor bewertet die Fähigkeit von Personen, selbst und sicher aus einem brennenden Gebäude zu fliehen. Dabei spielen die eigene körperliche und geistige Verfassung sowie die Gebäudekenntnis eine Rolle.

Selbstfluchtfähigkeit	p_i	Anteil A_i in %
Bewegliche und ortskundige Personen	1	A_1
Bewegliche aber nicht ortskundige Personen	2	A_2
Personen mit eingeschränkter Mobilität	8	A_3
Schlafende Personen oder jene mit eingeschränkter Wahrnehmung	2	A_4

Tab. 3-45: Ermittlung des Mobilitätsbeiwerts [1]

Der gewichtete Mobilitätsbeiwert beträgt somit:

Mobilitätsbeiwert: $p = p_1 * A_1 + p_2 * A_2 + p_3 * A_3 + p_4 * A_4 \quad (38)$

Personendichte X im betrachteten Bereich abhängig von der Nutzung

Nutzungsart	X [Personen /m ²]
Wartesäle, Bahnsteig	3
Treffpunkte, Tanzlokale, Festsäle	1,5
Restaurants	0,6
Schulklassen	0,5
Kindergarten	0,3
Labors und Werkstätten in Schulen	0,2
Krankenhäuser	0,1
Gefängnisse	0,1
Wohnungen, Hotels	0,05
Geschäfte im Erdgeschoß und 1.UG	0,3
Geschäfte in anderen Geschoßen	0,2
Bürogebäude	0,1
Werkstätten	0,03
Lagergebäude	0,003

Tab. 3-46: Personendichte abhängig von der Nutzungsart [1]

Fluchtwegeinheiten x

Um den x-Wert zu bestimmen, berücksichtigt man alle Ausgänge, die es erlauben den Brandabschnitt zu verlassen bzw. den Zugangsweg zu diesen Ausgängen. Die minimale effektive Breite eines Ausgangs beträgt 60 cm. Eine Tür mit einer 80 cm Öffnung hat so eine effektive Breite von 60 cm. Ein 2 m breiter Korridor hat eine effektive Breite von 180 cm.

3.1.3.15 Faktor für die Ersetzbarkeit des Gebäudeinhalts c

Beschreibung der Ersetzbarkeit des Inhalts	c
Leicht ersetzbar	0
Schwer ersetzbar	0,1
unersetzlich	0,2

Tab. 3-47: Beurteilung der Ersetzbarkeit des Inhalts [1]

3.1.3.16 Faktor d zur Berücksichtigung der Unterbrechungsempfindlichkeit

Art der Tätigkeiten im Gebäude	d
Hochtechnologische Industrie (Flugzeugbau)	0,8 (0,7-0,9)
Feintechnologische Industrie (Elektronik)	0,6 (0,45-0,7)
Verarbeitende Industrie	0,35 (0,25-0,45)
Handelsunternehmen	0,1 (0,05-0,015)
Administrative Dienste (Büronutzung)	0,8

Tab. 3-48: Beurteilung Unterbrechungsempfindlichkeit abhängig von der Tätigkeit [1]

3.2 Sicherheitsbewertung der Brandschutzvorschriften in Wien

Im Zuge dieses Kapitels soll eine Sicherheitsbewertung der Brandschutzvorschriften für Hochhäuser durchgeführt werden. Es wird darauf hingewiesen, dass die gezeigte Sicherheitsbewertung auch für andere Gebäudearte, andere Nutzungen sowie andere Bauweisen möglich ist. Um eine Risikobewertung mit F.R.A.M.E durchführen zu können muss unter anderem eine Nutzung festgelegt werden. Im Zuge dieser Arbeit wird die Bewertung für Hochhäuser durchgeführt, welche ausschließlich für Büros genutzt werden. Im Rahmen dieser Gebäude in herkömmlicher Betonbauweise soll das mindestens erforderliche Brandsicherheitsniveau eines Hochhauses unter Einhaltung der gültigen Vorschriften ermittelt werden. Die Erhebung der Eingangsparameter für die Risikobewertung F.R.A.M.E nach [1] erfolgt dabei nicht auf Grundlage eines konkreten Beispielgebäudes, sondern basiert auf den unteren Grenzwerten der gültigen Brandschutzvorschriften. Durch die vielen Eingangsparameter in der F.R.A.M.E Bewertung ist es möglich, dass (mindestens) erforderliche Sicherheitsniveau nach gültigen Vorschriften zu bestimmen.

Die, die Brandsicherheit betreffenden gesetzlichen Vorgaben werden in Österreich von den einzelnen Bundesländern erlassen. Im Bundesland Wien sind diese unter einigen anderen in der Wiener Bautechnikverordnung festgeschrieben. Das österreichische Institut für Bautechnik arbeitet an der Schnittstelle zwischen Bautechnik und Baurecht und versucht mit seinen „OIB Richtlinien“ einen Überblick über die vielen Anforderungen zu schaffen. Die Bundesländer haben die OIB-Richtlinien in ihren Baugesetzen für verbindlich erklärt.

OIB Richtlinien zu Brandschutz

- OIB 2 Brandschutz

- OIB 2 Leitfaden - Abweichungen im Brandschutz und Brandschutzkonzepte
 - OIB 2.1 Brandschutz bei Betriebsbauten
 - OIB 2.2 Brandschutz bei Garagen, überdachten Stellplätzen und Parkdecks
 - OIB 2.3 Brandschutz bei Gebäuden mit einem Fluchtniveau von mehr als 22 Meter
- OIB 4 Nutzungssicherheit und Barrierefreiheit

Im Falle, dass für Eingangsparemeter Risikobewertung F.R.A.M.E keine zugehörigen Bestimmungen in den OIB-Richtlinien enthalten sind, wird versucht die Festlegungen entsprechend dem Stand der Technik zu treffen. Als Literatur für den Stand der Technik hinsichtlich der Brandschutzsicherheit in Gebäuden werden die vom österreichischen Bundesfeuerwehrverband herausgegebenen technischen Richtlinien vorbeugender Brandschutz (TRVB) und andere einschlägige Werke herangezogen. Alternativ dazu werden vom Autor begründete Annahmen getroffen.

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass eine

3.2.1 Ermittlung des Brandlastfaktors

Im Rahmen der OIB-Richtlinien [18], [19] werden keine Begrenzungen der Brandlasten vorgeschrieben. Laut Kist [14] ist nach TRVB A 126 in Büros eine Brandlastdichte von 700 MJ/m^2 anzusetzen. Nach [29] beträgt der 80 % Quantilwert der Brandlastdichte bei Büronutzung 511 MJ/m^2 . Die zuvor genannten Werte beziehen sich jeweils auf die gesamte Brandlastdichte [29]. Wie bereits in Kapitel 2.2.1 erläutert, sind nach [19] Hochhäuser zunächst nur in nicht-brennbarer Bauweise zulässig, wobei Fenster und diverse Ausbauelemente durchaus brennbare Elemente enthalten dürfen. Die Summe der mobilen Brandlast bei Büronutzung von 400 MJ/m^2 nach Tab. 3-1, sowie dem Ansatz aus Tab. 3-2 wonach die immobile Brandlast der Ausbauelemente mit 100 MJ/m^2 festgelegt wird, entspricht in etwa dem in [29] festgelegten Wert. Da niedrigere zulässige Brandlastdichten ein höheres Sicherheitsniveau versprechen, werden auf der sicheren Seite liegend die Werte nach [1] herangezogen, wonach die Brandlastdichten wie folgt festgelegt werden:

$Q_m=400 \text{ MJ/m}^2$ und $Q_i=100 \text{ MJ/m}^2$. Der Brandlastfaktor ergibt sich durch Einsetzen in Formel (15).

$$q = \frac{2}{3} * \log(400 + 100) - 0,55 = 1,25$$

3.2.2 Ermittlung des Faktors für die Brandausdehnung i

Im Rahmen der OIB-Richtlinien [18], [19] werden keine Angaben zur Brandausbreitungsgeschwindigkeit gemacht. Der Autor geht davon aus, dass der Inhalt in Büros hauptsächlich Möbel aus Holzwerkstoffen und Papier besteht, aber auch Kunststoffe und Elektronik enthalten sind. In Anlehnung an Tab. 3-4 wird dem Gebäudeinhalt eine Beschädigungstemperatur von 150 °C zugeordnet. Weiters wird vom Autor angenommen, dass der Anteil der Konstruktion aus Beton an der gesamten beflammbaren Oberfläche im Brandabschnitt 40 % beträgt. Nach Tab. 3-4 beträgt die Beschädigungstemperatur von Beton 500 °C. Damit ergibt sich die Beschädigungstemperatur T in Abhängigkeit von Konstruktionsoberfläche wie folgt:

$$T = 150 \text{ °C} * 60 \% + 500 \text{ °C} * 40 \% = 290 \text{ °C}.$$

Einer Betonkonstruktion ist laut [9] die Brennbarkeitsklasse A2 zuzuordnen. Da der Inhalt eines Büros, wie zuvor festgelegt, im Wesentlichen aus brennbaren Elementen besteht, wird ihm die Brennbarkeitsklasse D zugewiesen. Damit ergibt sich der Brennbarkeitsklassenbeiwert M in Abhängigkeit von Konstruktionsoberfläche wie folgt:

$$M = 3 * 60 \% + 0 * 40 \% = 1,8.$$

Dem Abmessungsbeiwert m ist laut Tab. 3-3 für Büronutzungen der Wert 0,3 zuzuordnen. Für Büronutzung in einem nichtbrennbaren Gebäude ergibt sich der Brandausdehnungsfaktor i durch einsetzen der Beiwert in die Formel (18):

$$i = 1 - \frac{290}{1000} - (0,1 * \log(0,3)) + \frac{1,8}{10} = 0,94$$

In [14] werden Ansätze beschrieben, bei denen die Ausbreitungsgeschwindigkeit nur der Nutzungsart abhängig ist. Nach den Recherchen in [14] ist für Bürogebäude mit nicht-brennbarer Bauweise eine „mittlere“ Brandausbreitungsgeschwindigkeit zuzuordnen. Ohne dies grundlegend zu erläutern wird in [14] auf der sicheren Seite liegend für Holzbauweisen eine „schnelle“ Brandausbreitungsgeschwindigkeit angesetzt. In [1] wird der Faktor für die Brandausdehnung i in Relation zu den zuvor beschriebenen „mittleren“ und „schnellen“ Ausbreitungsgeschwindigkeit gestellt.

Ausbreitungsgeschwindigkeiten [14]	Brandausdehnungsfaktor i [1]
Sehr langsam	0,4
langsam	0,7
Mittel	1
Schnell	1,3
Sehr schnell	1,63

Tab. 3-49: Vergleichende Betrachtung von Ausbreitungsgeschwindigkeiten [1]

Da niedrigere zulässige Brandausbreitungsgeschwindigkeiten ein höheres Sicherheitsniveau versprechen, werden auf der sicheren Seite liegend die Werte nach [1] herangezogen, weshalb der Brandausdehnungsfaktor $i=0,96$ wie zuvor ermittelt angesetzt wird.

3.2.3 Ermittlung des Faktors für Größe und Form des Brandabschnitts g

Nach [19] ist ab dem 5. Obergeschoß (ohne Sprinkler) bzw. ab 32m Höhe (mit Sprinkler) jede Etage auf Brandabschnitte mit maximal 800m^2 aufzuteilen. Die brandabschnittsbildenden Bauteile müssen laut [19] den Anforderungen REI 90 A2 M entsprechen. Nach [1] ist eine Unterteilung in mehrere Brandabschnitte je Geschoß nur zulässig, wenn diese jeweils über ein eigenes Tragwerk verfügen. Der Autor schätzt eine derartige bauliche Trennung bei Hochhäusern als unüblich ein und betrachtet in Anlehnung an [1] jede Etage als einen einzigen Brandabschnitt. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Masterarbeit in Anlehnung an die Bestimmungen nach [19] eine Geschoßfläche=Brandabschnittsfläche von 800m^2 festgelegt. Die Form des Grundrisses wird vom Autor als einem Rechteck mit einer Länge von 40m und einer Breite von 20m angenommen. Der Faktor für Größe und Form des Brandabschnitts ermittelt sich durch Anwendung der Gleichung (20):

$$g = \frac{5 * \sqrt[3]{\left(\left(\frac{800}{40}\right)^2 * 40\right)}}{200} = 0,63$$

3.2.4 Ermittlung des Faktors für Verrauchungsgefahr v

In [25] ist die Brandabschnittsgröße für Verkaufsflächen an Brandschutztechnische Einrichtungen zum Rauch- und Wärmeabzug gekoppelt. Für Büronutzungen werden in [25] und [19] keine Angaben zu Rauchableitungsmaßnahmen gemacht.

Die positive Auswirkung von Rauch- und Wärmeabzugsanlagen liegt nach [13] unter anderem in der geringeren Rauchgasbelastung sowie in der Verzögerung des Flashover-Zeitpunktes. Da wie in 3.1.3.4 erläutert, die Fensterflächen nicht angesetzt werden dürfen, da Sie im Allgemeinen erst zu spät brechen, ist die effektive Rauchabzugsfläche bei Bauwerken mit Büronutzung gemäß mit 0 m^2 zu beziffern. Vom Autor wird im Rahmen dieser Arbeit eine im Hochbau übliche Geschoßhöhe h von $2,6 \text{ m}$ festgelegt. Der Faktor zur Berücksichtigung der Verrauchungsgefahr ermittelt sich aus Formel (22).

$$v = 0,84 + 0,1 * \log(400 + 100) - \sqrt{\frac{0}{800} * \sqrt{2,6}} = 1,10$$

3.2.5 Ermittlung des Faktors für die betrachtete Etage e

Im Rahmen dieser Masterarbeit soll das Sicherheitsniveau der präskriptiven Bestimmungen zum Brandschutz in Wien ermittelt werden. Für ein Fluchhöheniveau über 90 m sind in [19] keine präskriptiven Vorschriften vorhanden. Deshalb wird ein maximales Fluchhöheniveau von 90 m betrachtet. Bei einer Geschoßhöhe von 3 m entspricht dies der 30. Etage. Der Etagenfaktor nach ergibt sich durch einsetzen in die Formel (23).

$$e = \left[\frac{(|30| + 3)}{(|30| + 2)} \right]^{(0,7 * |30|)} = 1,91$$

3.2.6 Ermittlung des Faktors für die Gebäudezugänglichkeit z

Die einzige Regelung in [25] zur Gebäudezugänglichkeit betrifft Betriebsgebäude. Dabei muss jeder Brandabschnitt durch zumindest eine Seite für Fahrzeuge der Feuerwehr zugänglich sein. In Anlehnung an diese Bestimmung wird vom Autor eine Seite als zugänglich festgelegt. Nach Tab. 3-6 ist dem Beiwert Z daher der Wert 1 zuzuordnen. Die Brandabschnittsfläche $A=800 \text{ m}^2$, die Länge $L=40 \text{ m}$ sowie die Brandabschnittshöhe $H=90 \text{ m}$ wurden bereits in den vorhergehenden Schritten festgelegt. Der Faktor für die Gebäudezugänglichkeit ergibt sich somit nach der folgenden Formel (24).

$$z = 1 + 0,05 * \text{GANZZAHL} \left[\frac{\left(\frac{800}{40} \right)}{20 * 1} + \frac{90}{25} \right] = 1,2$$

3.2.7 Ermittlung des Faktors für die Löschwasserversorgung W

In den OIB-Richtlinien werden keine quantitativen Angaben zur erforderlichen Wasserversorgung gemacht. Nach Einschätzungen des Autors verfügt die Stadt Wien über ein zuverlässiges Trinkwassernetz mit entsprechenden Löschwasserreserve. Dem Beiwert w_1 wird daher gemäß Tab. 3-7 der Wert 0 zugeordnet. Im Rahmen dieser Ausarbeitung wird weiters davon ausgegangen, dass die Bemessung der Löschwasserversorgung in Anlehnung an Tab. 3-50 erfolgen.

	Bebauungsart				
	Streusiedlungen	Ortsgebiete <3 OGs	Ortsgebiet >3 OG	Betriebsgebiete	Altstadtgebiete
Löschwasserrate [l/min]	800	1600	2400	3200	3200
Lieferdauer [h]	1	2	2	3	3
Entfernung von Hydranten oder sonst. Entnahmestellen zum Objekt	<60 m			800	800
	60-100 m	800	800	800	
	100-250 m		800	800	1200
	250-500 m			800	1200

Tab. 3-50: Richtwerte für den Löschwasserbedarf-Grundschutz [31]

Der Autor geht davon aus, dass für Hochhausbebauung zulässige Flächen mit einer Löschwasserversorgung gemäß Bebauungsart c nach Tab. 3-50 ausgestattet sind. Der damit verbundene Löschwasservorrat von 300 m^3 ist größer als der erforderliche Löschwasservorrat nach Gleichung (26):

$$\text{Löschwassermenge}_{erf} = \frac{400 + 100}{4} [\text{m}^3] = 125 \text{ m}^3$$

Dem Beiwert w_2 ist laut Tab. 3-8 somit der Wert 0 zuzuordnen.

Gemäß Tab. 3-50 beträgt die vorhandene Löschwasserrate mindestens 2400 l/min oder $144 \text{ m}^3/\text{s}$ für 2 Stunden. Auch dies übertrifft die erforderliche Löschwasserkapazität nach Gleichung (27):

$$\text{Flusskapazität}_{erf} = \frac{125 \text{ m}^3}{2 \text{ Stunden}} = 75 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Daher ist dem Beiwert w_3 nach Tab. 3-9 der Wert 0 zuzuweisen.

Laut Tab. 3-50 weisen die Hydranten in unmittelbarer Nähe zum Gebäude >800 l/min bzw. >48 m³/h auf. Die erforderliche Flusskapazität der Hydranten in der Nähe beträgt nach Gleichung (28):

$$\text{Flusskapazität. Hydrant}_{erf} = 0,31 * (40 + 40 + 20 + 20) = 37,2 \frac{m^3}{h}$$

Dem Beiwert w_4 wird, nachdem eine größere Entfernung zum Gebäude möglich ist, in Anlehnung an Tab. 3-10 der Wert 1 zugeordnet.

Im Zuge dieser Ausarbeitung wird von Autor angenommen, dass vorhandene Wasserdruck der Trinkwasserversorgung in Wien <9 bar (90 m Wassersäule) beträgt. Der erforderliche Wasserdruck gemäß Formel (29) ergibt sich bei der in Kapitel 3.2.5 festgelegten maximalen Fluchthöhe H von 90 m zu:

$$\text{Wasserdruck}_{erf} = 90 \text{ m} + 35 \text{ m} = 125 \text{ m Wassersäule}$$

Da der erforderliche Wasserdruck kleiner als der verfügbare ist, erfolgt die Bewertung von $w_5=3$ gemäß Tab. 3-12.

Der Wasserversorgungsfaktor ergibt sich durch Einsetzen der Beiwerte in die Gleichung (25):

$$W = 0,95^{(0+0+0+1+3)} = 0,81$$

3.2.8 Ermittlung des Faktors für anlagentechnische Maßnahmen S

In [19] wird für Gebäude mit einem Fluchtniveau von 32-90 m eine automatische Brandmeldeanlage gefordert. Im Zuge dieser Arbeit wird von Autor angenommen, dass dafür die Durchflusssensoren der Sprinkleranlage zur Anwendung kommen. Nach Tab. 3-13 ist dem Beiwert s_1 der Wert 4 zuzuordnen. Die vorhandene Löschwassermenge=300 m³ und die erforderliche Löschwassermenge=125 m³ wurden in Kapitel 3.2.7 festgelegt. Es liegt keine Unerschöpfliche Wasserquelle nach [1] vor da 300/125=2,4 kleiner als 4 ist. Dementsprechend ist dem Beiwert s_2 ist gemäß Tab. 3-14 der Wert 0 zuzuweisen. Die Regelungen in [31] betreffen die Rückhaltung von Löschwasser und somit den Wassermengen, die immer für Löschzwecke zur Verfügung stehen müssen. Der Beiwert s_3 zur Berücksichtigung einer Wasserrückhaltung entspricht nach Tab. 3-15 dem Wert 2. Vom Autor wird angenommen, dass die Wasserversorgung in regelmäßigen Abständen inspiziert wird und weist gemäß Tab. 3-16 dem Beiwert s_4 den Wert 2 zu. Da der anstehende Löschwasserdruck, wie in Kapitel 3.2.7 nachgewiesen wurde, nicht ausreichend ist, sind

Drucksteigerungsanlagen erforderlich, um die Sprinkleranlage mit Wasser zu versorgen. Nach Einschätzungen des Autors ist eine doppelte Ausführung der Drucksteigerungsanlage mit 2 Wasserreservoirs üblich. Entsprechend Tab. 3-17 wird dies durch die Bewertung $s_5=12$ berücksichtigt. In [19] wird für Büronutzungen eine automatische Löschanlage gefordert. Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Forderung durch eine am Trinkwassernetz angeschlossene Sprinkleranlage erfüllt. Dies wird durch die Bewertung $s_6=11$ gemäß Tab. 3-18 berücksichtigt. In Wien ist laut [14] eine permanent besetzte Berufsfeuerwehr im Dienst, was einer Bewertung von $s_7=8$ laut Tab. 3-19 entspricht. Nach Einschätzungen des Autors sind Betriebsfeuerwehren für Bürogebäude nicht üblich, weshalb davon ausgegangen wird, dass keine eigene Betriebsfeuerwehre vorhanden ist. Laut Tab. 3-20 ist daher der Beiwert s_8 zu Berücksichtigung einer vorhandenen Betriebsfeuerwehr mit 0 zu bewerten. Es wird jedoch im Rahmen dieser Bewertung davon ausgegangen, dass die Brandmeldeanlage eine Lokalisierung von Bränden nicht üblich ist. Auch eine elektronische Überwachung des Systems wird als nicht vorhanden angenommen. Dem Beiwert s_9 wird nach Tab. 3-21 der Wert 0 zugeordnet. Durch Einsetzen der Beiwerte in Formel (30) ergibt sich der Faktor S zur Berücksichtigung der anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen.

$$S = 1,05^{(4+0+2+2+12+11+8+0+0)} = 6,70$$

3.2.9 Ermittlung des Faktors für organisatorische Maßnahmen N

Nach [19] ist ein nachweislich ausgebildeter Brandschutzbeauftragter bei Gebäuden ab einer Fluchthöhe von 22 m zu bestellen. Eine kontinuierliche Besetzung ist jedoch nicht festgehalten. Die heutige technische Ausstattung in Büros erlaubt es nach Einschätzungen des Autors jederzeit einen Notruf abzusetzen. Bei Vorhandensein einer automatischen Brandmeldeanlage ist nach Ansicht des Autors eine zusätzliche manuelle Aktivierungsmöglichkeit der akustischen Warneinrichtung nicht üblich. Dem Beiwert n_1 ist daher gemäß Tab. 3-22 der Wert 6 zuzuordnen. In [25] wird festgehalten, dass jedes Gebäude mit ausreichenden und geeigneten Mittel der ersten Löschhilfe auszustatten ist. In Anlehnung an diese Forderung wird unter Beachtung von Tab. 3-23 die Bewertung von $n_2=0$ festgelegt. Die Hilfsfrist der Feuerwehr Wien beträgt laut [14] im Durchschnitt 11 Minuten. Nach [14] wird angestrebt, dass eine Dauer von Alarmierung bis zur Ankunft der Feuerwehr von 15 min nur in 5 % aller

Fälle überschritten wird. Im Zuge dessen wird eine Hilfsfrist von 10-15 min angenommen und dem Beiwert n_3 gemäß Tab. 3-24 der Wert 2 zugewiesen. Der Faktor für organisatorische Brandschutzmaßnahmen ergibt sich somit laut Formel (31) zu:

$$N = 0,95^{(6+0+2+4)} = 0,54$$

3.2.10 Ermittlung des Faktors zur Beachtung der Feuerwiderstände F

Nach [19] müssen sämtliche tragenden und aussteifenden Bauteile eine Feuerwiderstand R90 aufweisen ($f_s=90$ min). Alle Decken und brandabschnittsbildenden Innenwände müssen REI90 entsprechen ($f_d=90$ min). Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Etage als ein Brandabschnitt betrachtet, eine weitere Unterteilung ist nicht vorgesehen, der Feuerwiderstand f_w wird deshalb mit 0 min angenommen (siehe auch Kapitel 3.2.3). Der Feuerwiderstand der Außenwände f_f ist ebenfalls der Wert 0 min zuzuordnen, da die Fensterfläche bei Büronutzungen 5 % der Außenwandfläche aus Belichtungsgründen nach Einschätzungen des Autors überschreitet. Eine Ausführung sämtlicher Fenster mit Brandschutzgläser wird im Rahmen dieser Arbeit als unüblich erachtet. Die Ermittlung der gewichteten Feuerwiderstandsdauer f erfolgt durch einsetzen in Formel (32).

$$f = \frac{1}{2} * 90 + \frac{1}{4} * 0 + \frac{1}{8} * 90 + \frac{1}{8} * 0 = 56,25$$

Der Faktor S für anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen wurde bereits im Kapitel 3.2.8 ermittelt. Durch Lösen der Gleichung (33) ergibt sich der Faktor zur Berücksichtigung der Feuerwiderstände F:

$$F = \left[1 + \frac{56,25}{100} - \frac{56,25^{2,5}}{10^6} \right] \left[1 - \frac{(6,70 - 1)}{40} \right] = 1,32$$

3.2.11 Ermittlung des Faktors für Evakuierungssicherheit U

In [19] wird für Gebäude mit einem Fluchtniveau von 32-90 m eine automatische Brandmeldeanlage gefordert. Im Zuge dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass dafür der Durchflussmelder der Sprinkleranlage zur Anwendung kommt. Gemäß Tab. 3-26 ist dem Beiwert u_1 der Wert 4 zuzuweisen. In den Brandschutzvorschriften [25] werden keine genaueren Angaben zu speziellen Funktionen der Brandmeldeanlagen gemacht. Es wird deshalb im Rahmen dieser Bewertung davon ausgegangen, dass die Brandmeldeanlage eine Lokalisierung von Bränden nicht möglich sein muss. Auch eine Elektronische Überwachung des Systems wird als nicht vorhanden

angenommen. Dem Beiwert u_2 wird nach Tab. 3-27 der Wert 0 zugeordnet. In [19] werden für ein Gebäude mit einem Fluchtniveau 90 m zwei voneinander unabhängige Treppenhäuser mit Druckbelüftung vorgeschrieben. Zusätzlich sind vor den Treppenhäusern Schleusen anzuordnen. Um den Sicherheitszugewinn durch die vorhandenen Schleusen zu berücksichtigen wird dem Beiwert u_3 nach Tab. 3-28 der Wert 6 zugeordnet. Wie bereits in Kapitel 3.2.3 festgelegt besteht jede Etage nur aus einem einzigen Brandabschnitt. Da keine horizontale Fluchtmöglichkeit gegeben ist, wird Beiwert u_4 gemäß Tab. 3-29 der Wert 0 zugewiesen.

In [19] wird für Büronutzungen eine automatische Löschanlage im gesamten Brandabschnitt gefordert. Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Forderung durch eine Sprinkleranlage am Trinkwassernetz erfüllt. Dem Beiwert zur Berücksichtigung des Sprinklerschutzumfangs u_5 ist nach Tab. 3-30 der Wert 10 zuzuordnen.

Da in Wien laut [14] eine permanent besetzte Berufsfeuerwehr im Dienst ist, wird dem Beiwert u_6 zur Berücksichtigung der Art der öffentlichen Feuerwehr in Anlehnung an Tab. 3-31 der Wert 8 zugeordnet.

Nach Einschätzungen des Autors sind Betriebsfeuerwehren für Bürogebäude nicht üblich, weshalb davon ausgegangen wird, dass keinen eigene Betriebsfeuerwehr vorhanden ist. Laut Tab. 3-32 ist daher der Beiwert u_7 zu Berücksichtigung einer vorhandenen Betriebsfeuerwehr mit 0 zu bewerten.

Für Büronutzungen werden in [25] und [19] keine Rauchabzugsanlagen gefordert. Dem Beiwert u_8 zur Berücksichtigung der Rauchabzugsanlagen ist gemäß Tab. 3-33 der Wert 0 zuzuweisen.

Nach Einschätzungen des Autors sind Alarmierungen durch Sprachdurchsagen ohne großen Aufwand umsetzbar, dennoch sind Sie nicht in [25] verankert. Im Rahmen dieser Arbeit wird deshalb diese Art der Warnung nicht angewendet. Nach Tab. 3-34 ist $u_9=0$.

Nach [25] ist in Hochhäuser eine Fluchtweg- und Orientierungsbeleuchtung anzuordnen. Dem Beiwert u_{10} wird daher gemäß Tab. 3-35 der Wert 4 zugeordnet.

Der Faktor Maßnahmen zu Erhöhung der Evakuierungssicherheit ergibt sich durch einsetzen der Beiwerte in Formel (34).

$$U = 1,05^{(4+0+6+0+10+8+0+0+0+4)} = 4,76$$

3.2.12 Ermittlung des Rettungsfaktors Y

Wie bereits in Kapitel 3.2.3 festgelegt, besteht jede Etage aus jeweils einem Brandabschnitt. Nach Ansicht des Autors sollten, in Anlehnung an die Tragwerksbemessung, sonstige Innenwände innerhalb eines Geschoßes, um die Grundrissflexibilität zu erhalten, nicht für die Brandschutzbeurteilung herangezogen werden. Dem Beiwert y_1 zur Berücksichtigung der Unterbrandabschnittsbildung ist gemäß Tab. 3-36 der Wert 0 zuzuordnen.

Um das Produktionsausfallsrisiko zu verringern, sind in Tab. 3-37 organisatorischen Maßnahmen angegeben, die dafür sorgen, dass die Arbeit möglichst rasch wieder aufgenommen werden kann. Diese Maßnahmen müssen vom Gebäudenutzer selbst festgelegt und umgesetzt werden. Diesbezüglich vorgeschriebene Regelungen sind nicht vorgesehen. Nach Einschätzungen des Autors ist eine externe Sicherung der Daten mittlerweile üblich, außerdem die Beschaffung von Ersatzgeräten meist einfach. Die Verlagerung in ein anderes Büro stellt in der Regel auch kein Problem dar. Im Rahmen dieser Arbeit wird angenommen, dass diese drei Maßnahmen bei Büronutzungen umgesetzt werden. Dem Beiwert y_2 ist laut Tab. 3-37 der Wert 9 zuzuweisen. Der Rettungsfaktor ergibt sich durch einsetzen der ermittelten Beiwerte in Formel (35)

$$Y = 1,05^{(0+9)} = 1,55$$

3.2.13 Ermittlung des Faktors für die Brandentstehungswahrscheinlichkeit a

Die vorliegende Risikobewertung behandelt Hochhäuser mit Büronutzung. Dem Beiwert a_1 ist deshalb nach Tab. 3-38 der Wert 0 zuzuordnen. Nach Einschätzungen des Autors sind regelmäßige Überprüfungen von Elektroinstallationen in Österreich nicht zwingend vorgeschrieben. Gemäß Tab. 3-39 wird dem Beiwert zur Berücksichtigung des Brandentstehungsrisikos ausgehend von Elektroinstallationen a_2 mit 0,1 bewertet.

Im Rahmen dieser Arbeit wird davon ausgegangen, dass das Gebäude mit Fernwärme versorgt wird. Den Beiwerten a_3 und a_4 sind bei Fernwärmeversorgung gemäß Tab. 3-40 und Tab. 3-41 jeweils mit 0 zu beurteilen.

Bei Büronutzungen ist nach Ansicht des Autors nicht mit erhöhten Zündgefahren durch Staub oder Gasen zu rechnen. Nach Tab. 3-42 und Tab. 3-43 ist den Beiwerten a_5 und a_6 jeweils der Wert 0 zuzuordnen.

Nach Einschätzungen des Autors ist die Gefahr unerlaubten Rauchens in Hochhäusern mit Büronutzungen gegeben. Dem Beiwert a_7 wird daher gemäß Tab. 3-44 der Wert 0,1 zugewiesen. Der Faktor für die Brandentstehungswahrscheinlichkeit wird durch Gleichung (36) ermittelt.

$$a = 0 + 0,1 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0,1 = 0,2$$

3.2.14 Ermittlung des Faktors für die geschätzte Evakuierungsdauer t

In [25] werden keine Angaben zur Mobilität der Personen in Gebäuden gemacht. Vom Autor werden diesbezüglich in Anlehnung an Tab. 3-45 davon ausgegangen, dass in Gebäuden mit Büronutzung 2 % der Personen, Rollstuhlfahrer sind. Die Mehrheit (60 %) der Personen wird laut Einschätzungen des Autors durch ortskundige Angestellte im Gebäude gebildet. Die verbleibenden 38 % sind Kunden, die nicht ortskundig sind. Der Mobilitätsbeiwert p ergibt sich durch Beachtung von Tab. 3-45 und Einsetzen in Formel(38).

$$p = 1 * 60 \% + 2 * 38 \% + 8 * 2 \% + 2 * 0 \% = 1,52$$

Der Wert $X=0,1$ Pers/ m^2 für die Personendichte in Bürogebäuden wurde aus Tab. 3-46 entnommen.

Die einzuhaltenden Fluchtwegbreiten für ein Gebäude in Wien sind in [26] festgelegt. Demnach muss die Breite der Fluchtwege mindestens 120 cm betragen. Durch Handläufe verursachte Einengungen <10 cm je Seite müssen laut [26] nicht berücksichtigt werden. Bei Gängen und Treppen im Verlauf von Fluchtwegen für mehr als 120 Personen muss die Breite für jeweils weitere angefangene zehn Personen um jeweils 10 cm erhöht werden, wobei eine maximale Breite von 240 cm nicht überschritten werden darf [26].

Für die Bemessung der Fluchtwege in Stiegehäusern in oberirdischen Geschoßen werden alle Geschoße oberhalb des Erdgeschoßes betrachtet, und jene drei unmittelbar übereinander liegenden Geschoße herangezogen, deren Gesamtanzahl gleichzeitig anwesender Personen das höchste Ergebnis liefert [26].

Die Anzahl der Personen in drei übereinanderliegenden Geschoßen kann durch Multiplikation der Personendichte $X=0,1$ mit der in Kapitel 3.2.3 festgelegten Geschoßfläche $A=800$ m^2 und dem Faktor 3.

$$0,1 * 800 * 3 = 240 \text{ Personen}$$

Die Anzahl von 240 Personen entspricht nach [26] einer Fluchtwegbreite von insgesamt 240 cm. In [19] werden für Hochhäuser zwei unabhängige Fluchtwege gefordert. Für das betrachtete Beispielgebäude sind nach [26] somit zwei Fluchtwege mit einer Breite von mindestens 120 cm erforderlich. Nach 3.1.3.14 entspricht dies insgesamt $2 \times 2 = 4$ Fluchtwegeinheiten x . Die zwei Treppenhäuser als wesentlicher Teil der Fluchtwege werden jedoch auch für die Evakuierung der anderen Geschoße benötigt, und stehen somit dem betrachteten Brandabschnitt nicht allein zur Verfügung. In Anlehnung an [26] wird von Autor angenommen, dass die Personen von drei Etagen gleichzeitig einen Bereich des Treppenhauses betreten. Die verfügbaren Fluchtwegeinheiten pro Geschoß reduzieren sich somit auf $x = 4/3$. Der Faktor für die Evakuierungsdauer ergibt sich durch Formel (37). Die Gebäudeabmessungen l und b wurden in Kapitel 3.2.3, die maximale Fluchthöhe H in Kapitel 3.2.5 festgelegt.

$$t = \frac{1,52 * \left[(20 + 40) + \frac{0,1 * 800}{4/3} + 1,25 * 90 \right] * [4/3 * (20 + 40)]}{800 * \frac{4/3 * 120}{0,1 * 800} * [1,4 * 4/3 * (20 + 40) - 0,44 * 0,1]} = 0,23$$

3.2.15 Ermittlung des Faktors für die Ersetzbarkeit des Gebäudeinhalts c

Aufgrund der Büronutzung ist davon auszugehen, dass es sich vor allem um Informationen und Daten handelt, die bei Verlust als unersetzbar einzustufen sind. Die Möbel und Geräte in Büros sind als leicht ersetzbar einzustufen. Als Mittelwert wird nach Tab. 3-47 $c = 0,1$ angenommen.

3.2.16 Ermittlung des Faktors Berücksichtigung von Unterbrechungen d

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Gebäude mit Büronutzung bewertet. Der Faktor d zur Berücksichtigung der Unterbrechungsempfindlichkeit beträgt nach Tab. 3-48 daher 0,8.

3.2.17 Ermittlung der Risiken

Wert für das Sachschadenspotential nach Gleichung (6):

$$P = 1,25 * 0,94 * 1,10 * 0,63 * 1,91 * 1,2 = 1,86$$

Wert für das Personenschadenspotential nach Gleichung (7):

$$P_1 = 1,25 * 0,94 * 1,10 * 1,91 * 1,2 = 2,95$$

Wert für das Schadenspotential von Produktionsausfällen nach Gleichung (8):

$$P_2 = 0,63 * 0,94 * 1,10 * 1,91 * 1,2 = 1,49$$

Brandschutzwert Sachwertrisiko nach Gleichung (9)

$$D = 0,81 * 0,54 * 6,70 * 1,32 = 3,89$$

Brandschutzwert Personenrisiko nach Gleichung (10)

$$D_1 = 0,54 * 4,76 = 2,57$$

Brandschutzfaktor Produktionsausfallrisiko nach Gleichung (11)

$$D_2 = 0,81 * 0,54 * 6,70 * 1,55 = 4,58$$

Wert für das akzeptable Sachwertrisiko nach Gleichung (12)

$$A = 1,6 - 0,2 - 0,23 - 0,1 = 1,07$$

Wert für das akzeptable Personenrisiko nach Gleichung (13)

$$A_1 = 1,6 - 0,2 - 0,23 - (0,1 * \log(100 + 1) + \frac{1,8}{10}) = 0,79$$

Wert für das akzeptable Produktionsausfallrisiko nach Gleichung (14)

$$A_2 = 1,6 - 0,2 - 0,1 - 0,8 = 0,5$$

Sachwertrisiko nach Gleichung (3)

$$\frac{1,86 * \frac{1}{3,89}}{1,07} = 0,45$$

Personenrisiko nach Gleichung (4)

$$\frac{2,95 * \frac{1}{2,57}}{0,79} = 1,44$$

Produktionsausfallrisiko nach Gleichung (5)

$$\frac{1,49 * \frac{1}{4,58}}{0,50} = 0,65$$

3.3 Sicherheitsbewertung der Variante aus Holz

Im Rahmen dieses Abschnitts soll nun herausgefunden werden, wie sich eine reine Holzkonstruktion auf die Brandschutzsicherheit von Hochhäusern auswirkt.

Im Zuge dessen soll basierend auf dem in Kapitel 3.2 untersuchten Gebäude aus Beton eine funktionsäquivalente Variante in Holzbauweise hinsichtlich der Sicherheit im Brandfall analysiert werden. Da sich laut [1] die Größe der brennbaren Konstruktionsoberfläche unter Anderem maßgeblich auf die Brandlast und die Brandausdehnung auswirken, muss bei derartigen Bauweisen, für ein aussagekräftiges Brandsicherheitsbewertungsergebnis, die Konstruktion festgelegt werden.

Die Gestaltung der Konstruktion des Gebäudes erfolgt dabei in Anlehnung an das Tragwerkssystem des „Wood Innovation and Design Centre“ in Kanada. Dessen Tragkonstruktion besteht aus einem Skelettbau mit einem Grundraster von 6,5 m und einem zentralen Erschließungskern zur Aussteifung. Um einen einfachen Rückbau und die Wiederverwertung am Ende der Lebensdauer zu ermöglichen, besteht das gesamte Tragwerk inklusive des Gebäudekerns ausschließlich aus Holz. Zu den konstruktiven Innovationen dieses Projekts zählt ein Deckensystem mit versetzt angeordneten Brettsperrholzplatten, welches die Haustechnik verbirgt und gleichzeitig die Holzdeckenkonstruktion sichtbar lässt siehe Abb. 3-3 [2].

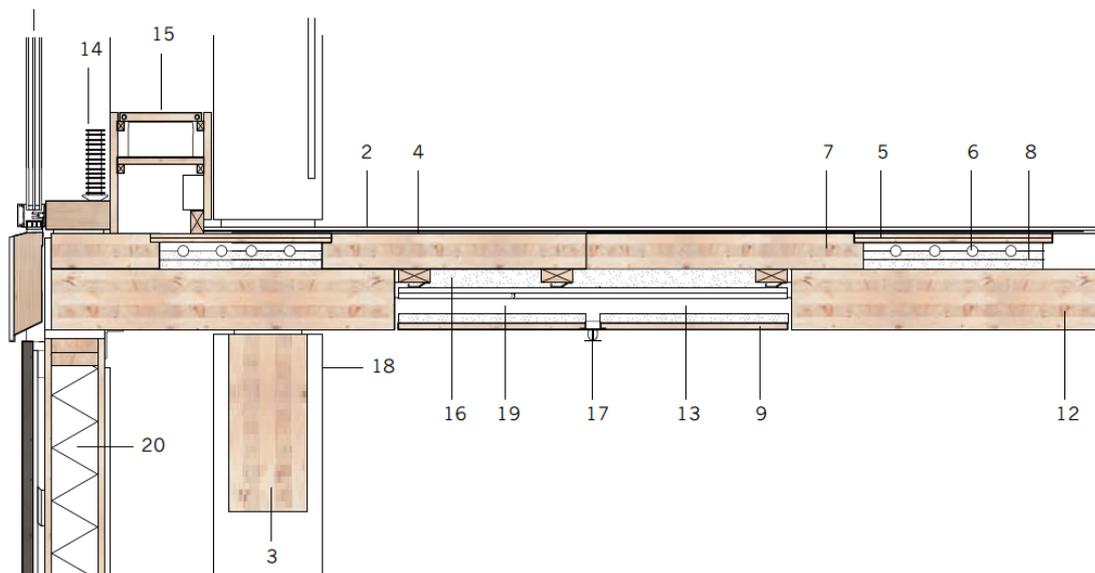


Abb. 3-3: Schnitt, Anschluss Decke-Fassade [2]

Die Konstruktion laut Abb. 3-3 wird hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit sowie der Gebrauchstauglichkeit (Schwingung, Schallschutz) im Rahmen dieser Masterarbeit nicht näher untersucht.

Durch den Höhenversatz der Brettsperrholzplatten ist wie in Abb. 3-4 ersichtlich eine schubsteife Verbindung durch eingeklebte Metallgitterbleche möglich. Dies

bewirkt eine Erhöhung der Steifigkeit der Decke, was sich nach [30] unter anderem positiv auf des Schwingungsverhalten auswirkt. Dadurch kann möglicherweise auf einen schweren Zementestrich verzichtet werden. Nach Einschätzungen des Autors kann eine direkte Verlegung des Bodenbelags auf die Brettsperrholzkonstruktion, wie in Abb. 3-3 dargestellt, hinsichtlich des Schallschutzes problematisch sein. Im Rahmen dieser Ausarbeitung wird davon ausgegangen, dass der Fußbodenaufbau aus einer Trittschalldämmung aus Mineralwolle und einem schwimmend verlegten Zementestrich besteht. Der Autor geht außerdem davon aus, dass dadurch die Oberseite der Brettsperrholzdecken für >90 min vor einer Entzündung geschützt sind.

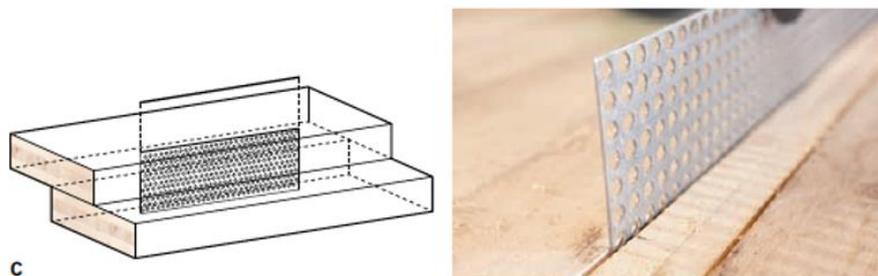


Abb. 3-4: Schubsteife Verbindung der CLT-Platten durch Metallgitter [4]

Die Brandbeständigkeit sämtlicher Verbindungsmittel aus Metall wird durch die Überdeckung mit den Holzbauteilen erreicht. Wie in Abb. 3-5 erkennbar ist, sind keine Stahlknoten sichtbar ausgeführt.



Abb. 3-5: Gebäude innen [4]

Die Brandbeständigkeit des Holzes wird unter Berücksichtigung des Abbrandes durch Überdimensionierung erreicht.

Das 6-geschossige Wood Innovation and Design Centre (WIDC) wird mit einer Höhe von 29,5m im Rahmen dieser Arbeit nicht als Hochhaus bezeichnet. In [2] wird jedoch darauf hingewiesen, dass sich die Bauweise auf bis zu 30 Geschoße übertragen lässt. Diese Behauptung soll nun hinsichtlich der Brandschutzsicherheit überprüft werden.

Bei allen Bauweisen sind jeweils andere konstruktive und/oder anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen notwendig. So wird auch beim Stahlbeton durch ausreichende Betondeckung und geeignete Betonmischungen dafür gesorgt werden, dass der Bewehrungsstahl während der geforderte Brandwiderstandsdauer vor unzulässiger Erwärmung geschützt wird. Bei Stahlkonstruktionen wird dieser Schutz üblicherweise durch spezielle Beschichtungen oder Bekleidungen erreicht [13]. Holz weist hingegen eine beliebige Brandwiderstandsdauer durch entsprechende Querschnittsdimensionierung auch ohne Bekleidung auf [30]. Der damit einhergehende Mitbrand der Konstruktion führt laut Einschätzungen des Autors unter anderem zu einer Erhöhung der erforderlichen Löschenenergie und möglicherweise zu einer stärkeren und rascheren Rauchentwicklung. In diesem Kapitel sollen nun diese Sicherheitsbedenken quantifiziert werden, daher werden zunächst lediglich die Konstruktion betreffenden Faktoren verändert. Es wird davon ausgegangen, dass durch die vermehrte Anwendung von brennbaren Elementen die Brandsicherheit sinken wird. In diesem Zusammenhang wird bereits an dieser Stelle ausdrücklich darauf hingewiesen, dass auch Hochhäuser aus Holz ein Sicherheitsniveau aufweisen können. Denn wie in Kapitel 3.4 gezeigt werden wird, können sämtliche, durch die Brennbarkeit der Konstruktion verursachten, Probleme mittels geeigneter Maßnahmen behoben werden.

3.3.1 Ermittlung des Brandlastfaktors

Da die Nutzung unverändert bleibt, wird die mobile Brandlastdichte $Q_m = 400 \text{ MJ/m}^2$ aus Abschnitt 3.2.1 übernommen.

Im Zuge der Ausarbeitung dieser Variante wird davon ausgegangen, dass sämtliche Oberflächen (Decken, Wände, Träger, Stützen) aus Holz ausgeführt werden. Brandlasten aus nicht tragenden Innenwänden werden nicht berücksichtigt und sind gegebenenfalls nicht brennbar auszuführen (Gipsplatten auf Aluminiumständerkonstruktion). Der Bodenbelag sowie der Fußbodenaufbau bestehen aus nicht-

brennbaren Material und dienen als 90-minütige Kapselung der Oberseite der Brettsperrholzdecken. Die restlichen Bauteile bestehen aus Fichtenholz mit einer Dichte von 450 kg/m^3 nach [30]. Der Heizwert für Fichtenholz beträgt laut [29] $17,5 \text{ MJ/kg}$, die Abbrandrate $0,00065 \text{ m/min}$. Die Feuerwiderstandsdauer der tragenden Elemente wird aus Kapitel 3.2.10 übernommen und beträgt 90 min . Die den Flammen ausgesetzte brennbare Oberfläche je m^2 Brandabschnitt wird mit $2 \text{ m}^2/\text{m}^2$ angenommen.

Diese Annahme basiert auf den Festlegungen zur Ausführung der gesamten Deckenuntersicht aus Holz und einem Zuschlag für die Oberflächen von sonstigen Konstruktionselementen wie Wände, Stützen und Träger. Der Zuschlag wurde bewusst konservativ gewählt. Eine genaue Ermittlung der Oberfläche ist nur anhand eines konkreten Gebäudes in Verbindung mit einer Querschnittsbemessung möglich. Durch Auswertung der Gleichung (17) ergibt sich die immobile Brandlastdichte.

$$Q_i = 450 * 17,5 * 90 * 0,00065 * 2 = 922 \text{ MJ/m}^2$$

Der Brandlastfaktor ergibt sich durch Einsetzen in Formel (15).

$$q = \frac{2}{3} * \log(400 + 922) - 0,55 = 1,53$$

3.3.2 Ermittlung des Faktors für die Brandausdehnung i

Die Beschädigungstemperatur des Gebäudeinhalts wird analog zu Kapitel 3.2.2 mit 150 °C angenommen. Der Anteil der Konstruktion an der gesamten beflammbaren Oberfläche im Brandabschnitt bleibt ebenfalls bei 40% . Die Beschädigungstemperatur von Holz beträgt nach Tab. 3-4 200 °C . Damit ergibt sich die Beschädigungstemperatur T in Abhängigkeit von Konstruktionsoberfläche wie folgt:

$$T = 150 \text{ °C} * 60 \% + 200 \text{ °C} * 40 \% = 170 \text{ °C}.$$

Da der Inhalt eines Büros nach Einschätzungen des Autors im Wesentlichen aus brennbaren Elementen besteht und auch die Konstruktionsoberfläche aus Brettsperrholz besteht, ist dem Brennbarkeitsklassenbeiwert M laut Tab. 3-5 der Wert 3 zuzuordnen.

Der Abmessungsbeiwert m bleibt unverändert. Für Büronutzung in einem Gebäude mit sichtbarer Massivholzkonstruktion ergibt sich der Brandausdehnungsfaktor i durch einsetzen der Beiwert in die Formel (18):

$$i = 1 - \frac{170}{1000} - (0,1 * \log(0,3)) + \frac{3}{10} = 1,18$$

Damit kann bestätigt werden, dass die in [14] festgelegte „schnelle“ Brandausbreitungsgeschwindigkeit für Holzbauweisen auf der sicheren Seite liegt.

3.3.3 Ermittlung des Faktors für Größe und Form des Brandabschnitts g

Durch die Verkleinerung der Brandabschnittfläche wäre eine Steigerung der Sicherheit für den Gebäudeinhalt möglich. Im Zuge dieser Variante wird jedoch der Faktor $g=0,63$ aus dem Abschnitt 3.2.3 übernommen.

3.3.4 Ermittlung des Faktors für Verrauchungsgefahr v

Gegenüber der Bewertung in Abschnitt 3.2.4 wird im Zuge dieser Variante nur die immobile Brandlastdichte Q_i von 100 auf 922 MJ/m² verändert. Der Faktor zur Berücksichtigung der Verrauchungsgefahr ermittelt sich aus Formel (22).

$$v = 0,84 + 0,1 * \log(400 + 922) - \sqrt{\frac{0}{800} * \sqrt{2,6}} = 1,15$$

3.3.5 Ermittlung des Faktors für die betrachtete Etage e

Durch eine Höhenbeschränkung wäre eine Steigerung des Sicherheitsniveaus in allen Aspekten möglich. In [25] dient dies als eine Maßnahme zur Kompensation der Brennbarkeit der Konstruktion. Das Ziel dieser Arbeit ist jedoch alternative Maßnahmen aufzuzeigen um eine Höhenbeschränkung aufzuheben. Aus diesem Grund wird der Etagenfaktor $e=1,91$ aus Abschnitt 3.2.5 übernommen.

3.3.6 Ermittlung des Faktors für die Gebäudezugänglichkeit z

Hochhäuser werden wie im einleitenden Kapitel 1.1 unter anderem zur Nachverdichtung von Städten gebaut. Um die Umsetzbarkeit von Hochhäusern aus Holz nicht einzuschränken, sollten nach Ansicht des Autors keine zusätzlichen Forderungen an das Gebäudeumfeld gestellt werden. Bei Hochhäusern verliert der Einfluss der Anzahl der zugänglichen Seiten aber, aufgrund der hohen Fluchtniveauhöhe, ohnehin an Bedeutung. Aus diesem Grund wird der Faktor für die Gebäudezugänglichkeit $z=1,2$ aus Kapitel 3.2.6 übernommen.

3.3.7 Ermittlung des Faktors für die Löschwasserversorgung W

Eine Beeinflussung der innerstädtischen Löschwasserversorgung kann nach Einschätzungen des Autors im Zuge eines einzelnen Hochhaus-Bauvorhaben einen verhältnismäßig großen Aufwand mit sich bringen. Aus diesem Grund können derartige Maßnahmen kaum für eine Steigerung des Sicherheitsniveaus herangezogen werden. Dies betrifft Beiwerte $w_1=0$, $w_4=1$ und $w_5=3$ sowie den vorhandenen Löschwasservorrat. Im Kapitel 3.2.7 dieser Arbeit wurde vom Autor angenommen, dass für Hochhausbebauung zulässige Flächen mit einer Löschwasserversorgung gemäß Bebauungsart c nach [31] ausgestattet sind. Der dabei festgelegte Löschwasservorrat beträgt 300 m^3 .

Aufgrund der höheren immobilien Brandlastdichte bei Hochhäusern mit sichtbar ausgeführtem Holztragwerk erhöht sich der erforderliche Löschwasservorrat gemäß Gleichung (26):

$$\text{Löschwassermenge}_{erf} = \frac{400 + 922}{4} [\text{m}^3] = 330 \text{ m}^3$$

Da etwas zu wenig Löschwasser vorhanden ist, muss dem Beiwert w_2 laut Tab. 3-8 somit der Wert 1 zugeordnet werden.

Gemäß Tab. 3-50 beträgt die vorhandene Löschwasserrate mindestens 2400 l/min oder $144 \text{ m}^3/\text{s}$ für 2 Stunden. Auch dies unterschreitet die erforderliche Löschwasserserkapazität nach Gleichung (27):

$$\text{Flusskapazität}_{erf} = \frac{330 \text{ m}^3}{2 \text{ Stunden}} = 165 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

Daher ist dem Beiwert w_3 nach Tab. 3-9 der Wert 2 zuzuweisen.

Der Wasserversorgungsfaktor ergibt sich durch Einsetzen der Beiwerte in die Gleichung (25):

$$W = 0,95^{(0+1+2+1+3)} = 0,70$$

3.3.8 Ermittlung der Faktoren S, N, F, Y, d, a, c, t

Im Rahmen dieser Variante werden nur jene Faktoren verändert, die von der einer Veränderung der Konstruktion betroffen sind. Da sämtliche in den Abschnitten 3.2.8 - 3.2.16, ermittelten Beiwerte nicht beeinflusst werden, können die jeweiligen Faktoren $S=6,70$, $N=0,54$, $U=4,76$, $F=1,32$, $Y=1,55$, $d=0,8$, $a=0,2$, $t=0,23$ und $c=0,1$ unverändert übernommen werden.

3.3.9 Ermittlung der Risiken

Wert für das Sachschadenspotential nach Gleichung (6):

$$P = 1,53 * 1,18 * 0,63 * 1,91 * 1,15 * 1,2 = 3,01$$

Wert für das Personenschadenspotential nach Gleichung (7):

$$P_1 = 1,53 * 1,18 * 1,91 * 1,15 * 1,2 = 4,76$$

Wert für das Schadenspotential von Produktionsausfällen nach Gleichung (8):

$$P_2 = 1,18 * 0,63 * 1,91 * 1,15 * 1,2 = 1,96$$

Brandschutzwert Sachwertrisiko nach Gleichung (9)

$$D = 0,70 * 0,54 * 6,70 * 1,32 = 3,34$$

Brandschutzwert Personenrisiko nach Gleichung (10)

$$D_1 = 0,54 * 4,76 = 2,57$$

Brandschutzfaktor Produktionsausfallrisiko nach Gleichung (11)

$$D_2 = 0,70 * 0,54 * 6,70 * 1,55 = 3,92$$

Wert für das akzeptable Sachwertrisiko nach Gleichung (12)

$$A = 1,6 - 0,2 - 0,23 - 0,1 = 1,07$$

Wert für das akzeptable Personenrisiko nach Gleichung (13)

$$A_1 = 1,6 - 0,2 - 0,23 - (0,1 * \log(922 + 1) + \frac{3}{10}) = 0,57$$

Wert für das akzeptable Produktionsausfallrisiko nach Gleichung (14)

$$A_2 = 1,6 - 0,2 - 0,1 - 0,8 = 0,5$$

Sachwertrisiko nach Gleichung (3)

$$\frac{2,06 * \frac{1}{3,34}}{1,07} = 0,84$$

Personenrisiko nach Gleichung (4)

$$\frac{4,76 * \frac{1}{2,57}}{0,57} = 3,24$$

Produktionsausfallrisiko nach Gleichung (5)

$$\frac{1,96 * \frac{1}{3,92}}{0,50} = 1$$

3.4 Sicherheitsbewertung von Kompensationsmaßnahmen

Die Festlegung aller Eingangsparameter für ein Betongebäude mit dem niedrigsten zulässigen Sicherheitsniveau stellt eine ideale Grundlage für die Bewertung von Hochhäusern aus Holz und die Identifikation von möglichen Kompensationsmaßnahmen dar. Die Risikobewertungsmethode F.R.A.M.E nach [1] weist viele Eingangsparameter auf, die verändert werden können. Jede dieser Veränderungen hat eine Auswirkung auf die Sicherheit eines Gebäudes, der Güter oder der Personen, welche sich darin befinden. Die positive Beeinflussung jedes einzelnen Eingangsparameters kann als Brandschutzmaßnahme gedeutet werden.

Im Zuge dieser Arbeit werden nun Kompensationsmaßnahmen vorgeschlagen, die keine Veränderung des Gebäudes selbst erfordern. Es handelt sich dabei um anlagentechnische Brandschutzmaßnahmen, durch welche das Sicherheitsniveau der sichtbaren Massivholzkonstruktion aus Kapitel 3.3 auf das zulässige Sicherheitsniveau entsprechend der gültigen Brandschutzvorschriften für Hochhäuser in Betonbauweise aus Abschnitt 3.2 angehoben wird.

Da es sich lediglich um eine Anpassung in Punkt 3.3 ausgearbeiteten Risikobewertung der Variante aus Holz handelt, werden nur jene Bewertungsfaktoren angeführt, welche von den Kompensationsmaßnahmen betroffen sind.

3.4.1 Einbau einer Brandrauchentlüftung

Durch die Ausführung von Rauchabzugsöffnungen an den Außenwandflächen kann die Verrauchungsgefahr massiv reduziert werden. Nach Einschätzungen des Autors ist die effektive Abzugsfläche von 65 m² je Brandabschnitt bei der angegebenen Bauweise möglich. Die Brandrauchabzugsöffnungen können außerdem für eine Automatisierte Nachtlüftung eingesetzt werden. Der Faktor zur Verrauchungsgefahr unter Berücksichtigung der Rauchabzugsöffnungen ergibt sich durch Einsetzen in Formel (22).

$$v_{RWA\ 65m^2} = 0,84 + 0,1 * \log(400 + 922) - \sqrt{\frac{65}{800} * \sqrt{2,6}} = 0,79$$

3.4.2 Verbesserung des automatischen Brandmeldersystems

Im Zuge dieser Arbeit wird von Autor angenommen, dass für Brandmeldeanlagen laut [19] Durchflusssensoren der Sprinkleranlage herangezogen werden. Dabei kommt es erst zur Alarmierung, wenn die Sprinkleranlage ausgelöst wurde. Nach [28] passiert dies durch den Bruch der Glasampulle bei einer Temperatur von meist 68 °C. Bis zum Erreichen dieser Temperatur kann es unter Umständen bereits zu einer massiven Verrauchung gekommen sein. Laut [1] können Rauch- oder Flammenmelder drohende Brände schon früher erkennen. Zur Anpassung des Sicherheitsniveaus von Hochhäusern aus Holz wird von Autor der Einbau von Rauchmeldern empfohlen. Nach Tab. 3-13 ist dem Beiwert s_1 der Wert 4 zuzuordnen. Die damit einhergehende steigende Gefahr von Fehlauslösungen kann nach [1] durch entsprechende elektronische Überwachung und Steuerung vermieden werden. Durch die elektronische Steuerung ist nach Einschätzungen des Autors auch eine Lokalisierung des Brandes möglich. Dem Beiwert s_9 wird nach Tab. 3-21 der Wert 4 zugeordnet. Durch Einsetzen der Beiwerte in Formel (30) ergibt sich der Faktor S zur Berücksichtigung der anlagentechnischen Brandschutzmaßnahmen.

$$S = 1,05^{(8+0+2+2+12+11+8+0+4)} = 9,91$$

Die Verbesserung des Brandmeldersystems wirkt sich auch auf den Faktor U zur Berücksichtigung der Evakuierungssicherheit aus. Der Faktor „Maßnahmen zur Erhöhung der Evakuierungssicherheit“ ergibt sich durch Einsetzen der Beiwerte in Formel (34). Auch die festgelegten Rauchabzugsöffnungen können elektronisch über das Rauchmeldersystem angesteuert werden. Dem Beiwert u_8 zur Berücksichtigung der Rauchabzugsanlagen ist gemäß Tab. 3-33 der Wert 3 zuzuweisen.

$$U = 1,05^{(8+4+6+0+10+8+0+0+3+4)} = 8,15$$

3.4.3 Ermittlung der Risiken

Wert für das Sachschadenspotential nach Gleichung (6):

$$P = 1,53 * 1,18 * 0,63 * 1,91 * 0,79 * 1,2 = 2,06$$

Wert für das Personenschadenspotential nach Gleichung (7):

$$P_1 = 1,53 * 1,18 * 1,91 * 0,79 * 1,2 = 3,27$$

Wert für das Schadenspotential von Produktionsausfällen nach Gleichung (8):

$$P_2 = 1,18 * 0,63 * 1,91 * 0,79 * 1,2 = 1,35$$

Brandschutzwert Sachwertrisiko nach Gleichung (9)

$$D = 0,70 * 0,54 * 9,91 * 1,20 = 4,47$$

Brandschutzwert Personenrisiko nach Gleichung (10)

$$D_1 = 0,54 * 8,15 = 4,40$$

Brandschutzfaktor Produktionsausfallrisiko nach Gleichung (11)

$$D_2 = 0,70 * 0,54 * 9,91 * 1,55 = 5,80$$

Wert für das akzeptable Sachwertrisiko nach Gleichung (12)

$$A = 1,6 - 0,2 - 0,23 - 0,1 = 1,07$$

Wert für das akzeptable Personenrisiko nach Gleichung (13)

$$A_1 = 1,6 - 0,2 - 0,23 - (0,1 * \log(922 + 1) + \frac{3}{10}) = 0,57$$

Wert für das akzeptable Produktionsausfallrisiko nach Gleichung (14)

$$A_2 = 1,6 - 0,2 - 0,1 - 0,8 = 0,5$$

Sachwertrisiko nach Gleichung (3)

$$\frac{3 * \frac{1}{4,47}}{1,07} = 0,43$$

Personenrisiko nach Gleichung (4)

$$\frac{3,27 * \frac{1}{4,40}}{0,57} = 1,30$$

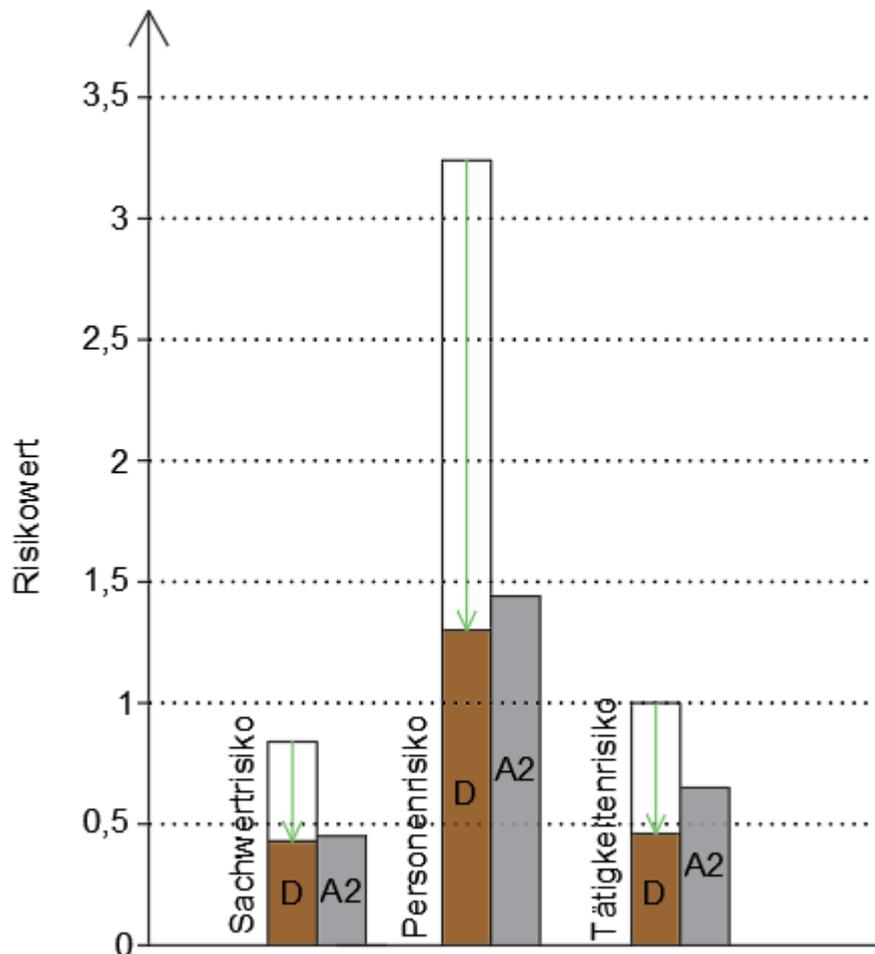
Produktionsausfallrisiko nach Gleichung (5)

$$\frac{1,35 * \frac{1}{5,80}}{0,50} = 0,46$$

3.5 Darstellung der Ergebnisse

In diesem Kapitel der vorliegenden Masterarbeit werden die Ergebnisse aus der Brandrisikobewertung nach [1] eines Beispielgebäudes im Hinblick auf die im Mittelpunkt stehende Forschungsfrage: „*Welche Auswirkungen haben brennbare Tragwerkselemente bei Holzhochhäusern auf das Brandrisiko?*“ zusammenfassend in Abb. 3-6 dargestellt. Im Zuge der Sicherheitsbewertung nach F.R.A.M.E werden laut [1] die ermittelten vorhandenen Risiken mit zulässigen Risiken verglichen. Durch die

Ermittlung des gemäß den Vorschriften einzuhaltende Sicherheitsniveaus wird das zulässige Risiko explizit ermittelt.



A2... Risikoniveau von Hochhäusern mit einer Fluchthöhe von 90m in nicht brennbarer Stahlbetonbauweise gemäß den OIB-Richtlinien [19]

D... Risikoniveau von Hochhäusern mit einer Fluchthöhe von 90m in Holzbauweise und entsprechenden Kompensationsmaßnahmen

->... Auswirkung der Kompensationsmaßnahmen auf das Risikoniveau von Hochhäusern mit einer Fluchthöhe von 90m in Holzbauweise

Abb. 3-6: Vergleich der Risikoniveaus der analysierten Varianten

Die Festlegungen zu Brandschutzvorschriften [25] für Bürohochhäuser in Wien beschränken sich auf Gebäude mit einer maximalen Fluchthöhe von 90 m. Für höhere Gebäude sind in Absprache mit der Brandschutzbehörde, objektspezifische Nachweise zu erbringen. Die in 3.2 ermittelten Sicherheitsniveaus unter Berücksichtigung der gültigen Brandschutzvorschriften werden übersichtlich durch die grauen

Balken in Abb. 3-6 dargestellt. Die Kennzeichnung mit der Brennbarkeitsklasse A2 weist darauf hin, dass die in Wien gültigen Brandschutzvorschriften für Hochhäuser [19] lediglich eine nicht-brennbare Ausführung der Konstruktion erlauben. Wie in Abb. 3-6 ersichtlich, unterscheidet sich das erforderliche Sicherheitsniveau für Hochhäuser mit einer Fluchthöhe <90 m gemäß [19] wesentlich von den Festlegungen in [1], wonach ein Wert höher als 1 als unzulässig erachtet wird. Während eine Ausführung nach [19] zu einem vergleichsweise hohen Sicherheitsniveau hinsichtlich Sachwerte und Produktionsausfall führen, ist ein höheres Personenrisiko als in [1] zulässig. Basierend auf die in [18] verankerte Möglichkeit, von den Vorschriften abzuweichen zu dürfen, solange das Sicherheitsniveau erhalten bleibt, wurde in Kapitel 3.3 eine Sicherheitsbewertung für eine Variante mit einer Massivholzkonstruktion durchgeführt. Die Bewertungsergebnisse sind in Abb. 3-6 als Balken ohne Füllung ersichtlich. Die Ausführung von brennbaren Konstruktionen führt demnach, ohne zusätzliche Maßnahmen, zu einer massiven Reduktion der Sicherheit in allen Bereichen. Nach Einschätzungen des Autors liegt dies insbesondere am möglichen Mitbrand der Konstruktion und der damit verbundenen Erhöhung der erforderlichen Löschenergie und der rascheren Rauchentwicklung. Durch den in Abschnitt 3.4 angeführten Einbau von Rauchmeldern, welche die Sprinkleranlage und zusätzlich angeordnete Brandrauchabzugsöffnungen in jedem Brandabschnitt automatisch auslösen, konnten diese Sicherheitsprobleme behoben werden. Durch die mögliche Anwendung der Brandrauchöffnungen als automatisierte Nachlüftung, verursachen diese Maßnahmen nach Ansicht des Autors keine wesentlichen Mehrkosten. Die Auswirkung der Maßnahmen auf die Sicherheit wird in Abb. 3-6 durch die grünen Pfeile dargestellt. Die braunen Balken D in Abb. 3-6 stellen schlussendlich das Sicherheitsniveau von Hochhäusern mit einer sichtbaren Holzkonstruktion unter Berücksichtigung der in Kapitel 3.4 erläuterten Kompensationsmaßnahmen dar. Da das aus [19] abgeleitete Sicherheitsniveau für Hochhäuser mit einem Fluchtniveau <90 m von Hochhäusern mit einer sichtbaren Holzkonstruktion eingehalten wird, sind diese gemäß [18] als zulässig zu erachten.

4 Konklusion

Ziel der vorliegenden Masterarbeit war es aufzuzeigen, welche Auswirkungen brennbare Tragwerkselemente auf die Brandschutzsicherheit eines Hochhauses haben.

Hierfür wurden zunächst die zentralen Begriffe, die in Zusammenhang mit der Forschungsfrage stehen, in Kapitel 2.1 geklärt. Des Weiteren wurde im darauffolgenden Abschnitt 2.2 die Situation der Brandrisikobeurteilung durch Einhaltung von Brandschutzvorschriften beleuchtet. Der Fokus lag dabei nicht darauf einzelne vorgeschriebene Ausführungen zu hinterfragen, sondern vielmehr in einer kritischen Auseinandersetzung mit dem präskriptiven Konzept, welches dem überwiegenden Anteil der Bauvorschriften zum Thema Brandschutz zugrunde liegt. Anschließend konnte festgestellt werden, dass Hochhäuser gemäß den Brandschutzvorschriften in Österreich in nicht-brennbarer Bauweise herzustellen sind. Im weiteren Verlauf wurde auf die in den OIB-Richtlinien [18] verankerte Möglichkeit der objektbezogenen Abweichungen von den Brandschutzrichtlinien, welche im Wesentlichen einem leistungsorientierten Bemessungsansatz entspricht, eingegangen. Demnach gilt es nachzuweisen, dass Hochhäuser mit einer sichtbaren und somit ungeschützt-brennbare Holzkonstruktion das gleiche Sicherheitsniveau aufweist, wie eine in den Vorschriften festgelegte nicht-brennbare Bauweise.

Aus dem Artikel [16] des Geschäftsführers des Österreichischen Institut für Bauwesen kann entnommen werden, dass aus heutiger Sicht ein solcher Nachweis aufgrund des nicht klar definierten akzeptablen Sicherheitsniveaus jedenfalls als in der Praxis problematisch einzustufen ist. Darüber hinaus wird in den Vorschriften kein entsprechendes Nachweisformat, sondern lediglich die Anwendung von geeigneten Ingenieurmethoden des Brandschutzes festgelegt.

Um die Eignung der Methoden zu prüfen, wurde zunächst versucht Grundlagen und Charakteristika von Brandrisiken zu erläutern. Die diesbezüglichen Recherchen waren überaus zeitraubend und mussten angesichts des kaum überblickbaren Umfangs des Themengebiets aus Zeitgründen vorzeitig abgebrochen werden. Die dabei erlangten Erkenntnisse der Recherchen zu einigen ausgewählten Themengebieten wurden in Kapitel 2.3 zusammengefasst. In einer vergleichenden Betrachtung mit einem Erdbebenereignis im Unterkapitel 2.3.4, konnte eine Ursache für hohe Komplexität einer Brandrisikobeurteilung in der erforderlichen Unterscheidung von

personenbezogenen- und sachwertbezogenen Risiken gefunden werden. Da das akzeptable Brandsicherheitsniveau nicht klar definiert ist, wurden in Abschnitt 2.3.9 mögliche Methoden zur Festlegung eines akzeptablen Risikoniveaus aufgezeigt.

Die empirische Untersuchung in der vorliegenden Arbeit hat sich zur Aufgabe gemacht in Kapitel 3.1 eine Risikobeurteilungsmethode zu entdecken, die den gewonnenen Erkenntnissen und den damit verbundenen Ansprüchen genügt. Um den Rahmen dieser Masterarbeit nicht zu sprengen, musste auch der Ausarbeitungsumfang der Methoden berücksichtigt werden, wodurch sich die Methodenfindung als sehr langwierige Aufgabe herausstellte. Dabei wurde die Methode F.R.A.M.E nach [1] ausgewählt. Sie ermöglicht die Berücksichtigung eines umfangreichen Einflusspektrums und ist aufgrund der, in einer Methode vereinte gesamtheitliche Betrachtung eines Bauwerks überaus benutzerfreundlich.

Durch die Anwendung der Bewertungsmethode auf die Brandschutzvorschriften für Hochhäuser in Wien in Abschnitt 3.2, konnte das Sicherheitsniveau dieser Vorschriften [25] ermittelt werden. Somit konnte die in Kapitel 2.2.3 erläuterte Problematik, hinsichtlich des Nachweises der Zulässigkeit einer Abweichung von den Brandschutzvorschriften behoben werden. Die Auswirkungen von brennbaren im Vergleich zu nicht brennbaren Konstruktionselementen auf die Brandschutzsicherheit wurde im Punkt 3.3 durch die Risikobewertung eines Hochhauses einer sichtbare Massivholzbauweise wie sie auch beim „Wood Innovation and Design Centre“ in Kanada zur Anwendung kam. Dabei stellte sich heraus, dass sich brennbare Konstruktionen im Vergleich zu nicht brennbaren Konstruktionen ein geringeres Sicherheitsniveau aufweisen. Die Methode F.R.A.M.E nach [1] wurde im Kapitel 3.4 für eine dritte Bewertung zur Identifizierung der optimalen Kompensationsmaßnahmen herangezogen. Es konnten nachgewiesen werden, dass durch eine Optimierung des Brandmeldesystems sowie durch selbstauslösende Brandrauchabzugsöffnungen in jedem Brandabschnitt, das zuvor ermittelte zulässige Sicherheitsniveau erreicht werden.

5 Fazit und Ausblick

Im Zuge dieser Masterarbeit konnte durch Anwendung einer Risikobewertungsmethode gezeigt werden, dass Hochhäuser aus Holz bis zu einer Fluchthöhe von 90 m nach den in Wien gültigen Vorschriften hinsichtlich der Brandschutzsicherheit als zulässig einzustufen sind. Die Höhenbegrenzung liegt in der Tatsache begründet, dass die präskriptiven Brandschutzvorschriften in Wien nur bis zu einer Fluchthöhe von 90 m festgelegt sind. Durch die Zusammenfassung einer Vielzahl an Brandschutzsicherheitsrelevanten Gebäudeeigenschaften ermöglicht die Methode F.R.A.M.E eine rasche ganzheitliche Betrachtung der Brandschutzsicherheit von Gebäude. Dieser Aspekt ist ermöglicht unter anderem eine strategische Planung und Bemessung von Brandschutzmaßnahmen oder eine gezielte Beeinflussung von Gebäudeeigenschaften unabhängig von der Bauweise. Durch eine Variation die Fluchthöhe betreffenden Eingangsparameter könnte so in weiteren Schritten untersucht werden ob Hochhäuser aus Holz auch mit Fluchthöhen > 90 m zulässig sind. Um das erforderliche Sicherheitsniveau zu ermitteln, könnten bestehende Gebäude > 90 m als Referenzobjekte bewertet werden.

Ob der im Rahmen dieser Arbeit geführte Nachweis der Brandschutzsicherheit von Hochhäusern aus Holz letztlich gültig ist, hängt von der Brandschutzbehörde und deren Entscheidung ob die Methode F.R.A.M.E geeignet ist. Da Entwickler der Bewertungsmethode in [1] darauf hinweist, dass die Methode bereits häufig zur Anwendung kam und vielfach validiert wurde, sollte es im Zweifelsfall kein Problem darstellen die Zuverlässigkeit der Methode aufzuzeigen und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen.

Schlussendlich kann diese Masterarbeit als ein weiterer Schritt hin zu leistungsorientierten Brandschutzvorschriften verstanden werden und soll in weiterer Folge dazu beitragen, dass die in [12] erwähnten Einschränkungen in der Projektierung von Gebäuden aufgehoben sowie Konfliktsituationen zwischen Planern und Behörden vermieden werden.

Literaturverzeichnis

- [1] E. De Smet, FRAME - Theoretical basis and technical reference guide, Gent, 2008.
- [2] M. Green und J. Taggart, Hoch bauen mit Holz, Basel: Birkhäuser, 2017.
- [3] M. Zangerl und U. Forster, „Teuer und trotzdem wirtschaftlich!“, *Zuschnitt Attachment - Sonderthemen im Bereich Holz, Holzwerkstoff und Holzbau*, p. 16, Dezember 2008.
- [4] H. Kaufmann, S. Krötsch und S. Winter, Atlas mehrgeschoßiger Holzbau, München: Detail Business Information GmbH, 2017.
- [5] C. Pillich, Timber as a construction Material in middle- and high-rise buildings, Wien: Diplomarbeit, TU Wien, 2011.
- [6] E. Christanell, Holzhochhaus: Eine vergleichende Betrachtung mit der konventionellen Massivbauweise unter Wind- und Erdbebenbeanspruchung, Wien: Diplomarbeit, TU-Wien, 2015.
- [7] L. Heinrich, „Im Detail betrachtet“, *Zuschnitt*, pp. 8-11, Dezember 2008.
- [8] R. Wiederkehr, „So hoch darf man mit Holz bauen“, *Zuschnitt*, pp. 16-17, September 2015.
- [9] ÖNORM EN 13501.1 Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten Teil1, Wien: Austrian Standards plus GmbH, 2017.
- [10] Europäisch Technische Zulassung ETA-08/0271, CLT – Cross Laminated Timber, Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt), 2011.
- [11] J. Schneider, Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen-Grundwissen für Ingenieure, Zürich: vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 2018.
- [12] T. Maag, Risikobasierte Beurteilung der Personensicherheit von Wohnbauten im Brandfall unter Verwendung von Bayes'schen Netzen, Zürich: Institut für Baustatik und Konstruktion Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 2004.
- [13] D. Hosser, Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes, Braunschweig: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes (vfdb), 2009.
- [14] M. Kist, Sicherheitskonzept für mehrgeschossige Gebäude aus Holz am Beispiel von Wien, Wien: Dissertation TU Wien, 2013.
- [15] F. von Kaufmann und F. Schmid, Hochhausbrandbekämpfung, Stuttgart: Kohlhammer, 2010.
- [16] R. Mikulits, „OIB-Richtlinien im Brandschutz“, *Brandschutzjahrbuch*, pp. 22-27, 2016.
- [17] R. Mikulits, „Das Konzept der leistungsorientierten bautechnischen Vorschriften“, *OIB-Aktuell*, pp. 4-5, Februar 2013.
- [18] Entwurf OIB-Richtlinie 2-Leitfaden: Abweichungen im Brandschutz und Brandschutzkonzepte, Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2018.
- [19] Entwurf OIB-Richtlinie 2.3: Brandschutz bei Gebäuden mit einem Fluchniveau von mehr als 22m, Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2018.
- [20] Bauprodukten-Verordnung (EU) 305/2011, Europäisches Parlament und Europäischer Rat, 2011.
- [21] U. Schneider, M. Haas und M. Oswald, Grundlagen, Methoden und Beispiele der Evakuierungsberechnung, Wien: Technische Universität Wien, 2003.
- [22] M. Merk, Sicherheit mehrgeschossiger Holzgebäude im Brandfall - Eine Risikoanalyse unter stochastischer Abbildung realer Ereignisverläufe im Brandfall, München: Dissertation TU München, 2015.
- [23] DIN EN 1991-1-2/NA Nationale Festlegungen zu Brandeinwirkungen auf Tragwerke, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2010.

- [24] Entwurf OIB-Richtlinien: Begriffsbestimmungen, Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2018.
- [25] Entwurf OIB-Richtlinie2: Brandschutz, Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2018.
- [26] Entwurf OIB-Richtlinie4: Nutzungssicherheit und Barrierefreiheit, Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2018.
- [27] R. Crielaard, Self-extinguishment of Cross-Laminated Timber, Delft: Master's Thesis Report TU Delft, 2015.
- [28] F. Peter, „Brandschutz,“ *Zuschnitt - Vielgeschoßiger Holzbau im urbanen Raum - Dokumentation Forschungsprojekt 8+*, p. 14, Dezember 2008.
- [29] ÖNORM EN 1991-1-2 Brandeinwirkungen auf Tragwerke, Wien: Austrian Standards plus GmbH, 2013.
- [30] EN 1995-1-1 Bemessung und Konstruktion von Holzbauten, Wien: Austrian Standards plus GmbH, 2015.
- [31] ÖVGW-Richtlinie W77 Bereitstellung von Löschwasser, Wien: Österreichische Vereinigung für das Gas- und Wasserfach, 2013.
- [32] Stora Enso, „www.clt.info,“ [Online]. Available: <http://www.clt.info/wp-content/uploads/2015/10/Decken-Einfeldtraeger-Schwingung-DE.pdf>. [Zugriff am 27 September 2018].
- [33] Österreichisches Institut für Bautechnik, Entwurf OIB-Richtlinie2: Brandschutz, Wien: Österreichisches Institut für Bautechnik, 2018.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 2-1: So hoch darf man mit Holz bauen: Ein Ländervergleich [8]	9
Abb. 3-1: Ermittlung der äquivalenten rechteckigen Brandabschnittsform [1]	35
Abb. 3-2: Festlegung der Etagennummer [1]	38
Abb. 3-3: Schnitt, Anschluss Decke-Fassade [2]	68
Abb. 3-4: Schubsteife Verbindung der CLT-Platten durch Metallgitter [4]	69
Abb. 3-5: Gebäude innen [4]	69
Abb. 3-6: Vergleich der Risikoniveaus der analysierten Varianten.....	78

Tabellenverzeichnis

Tab. 2-1 zulässige Gebäudehöhe für Treppenhaukern aus Holz: Ein Ländervergleich [5] ..9	
Tab. 3-1: typische Werte für mobile Brandlastdichten Q_m [1].....	30
Tab. 3-2: typische Werte für immobile Brandlastdichten Q_i in Anlehnung an [1].....	32
Tab. 3-3: Bewertungstabelle Abmessungsbeiwert in abhängig von Nutzungsart [1].....	33
Tab. 3-4: Beschädigungstemperaturen für typische Stoffe in Bauwerken [1].....	33
Tab. 3-5: Bewertungstabelle der Brennbarkeitsklassen [1].....	34
Tab. 3-6: Beurteilungstabelle Anzahl der zugänglichen Seiten [1]	39
Tab. 3-7: Beurteilungstabelle Zuverlässigkeit der Löschwasserquelle [1].....	39
Tab. 3-8: Beurteilung der vorhandenen Löschwassermenge [1].....	40
Tab. 3-9: Beurteilung der Flusskapazität [1].....	40
Tab. 3-10: Flusskapazität von Hydranten [1]	40
Tab. 3-11: Beurteilung der Hydrantenkapazität [1].....	40
Tab. 3-12: Beurteilung des Wasserdrucks [1]	41
Tab. 3-13: Beurteilung der Art der automatischen Brandmeldeanlage [1]	41
Tab. 3-14: Beurteilung der Zuverlässigkeit der Löschwasserquelle [1]	41
Tab. 3-15: Beurteilung der Löschwasserrückhaltung [1]	42
Tab. 3-16: Beurteilung der Wasserversorgungsinspektion [1].....	42
Tab. 3-17: Beurteilung der Zuverlässigkeit der Drucksteigerungsanlage	42
Tab. 3-18: Beurteilung der Zuverlässigkeit der Automatischen Löschanlage [1]	42
Tab. 3-19: Beurteilung der öffentlichen Feuerwehr [1]	43
Tab. 3-20: Beurteilung der Betriebsfeuerwehr [1]	43
Tab. 3-21: Beurteilung von Zusatzfunktionen der Brandmeldeanlage [1].....	43
Tab. 3-22: Beurteilung der organisatorischen Alarmierungsmaßnahmen [1].....	44
Tab. 3-23: Beurteilung der verfügbaren Handlöschmittel [1]	44
Tab. 3-24: Beurteilung der Feuerwehr-Hilfsfrist [1].....	44
Tab. 3-25: Beurteilung des Umfangs des Löschtrainings für Personen im Gebäude [1].....	44
Tab. 3-26: Beurteilung der Automatischen Brandmeldeanlage [1]	47
Tab. 3-27: Beurteilung von Zusatzfunktionen der Brandmeldeanlage [1].....	47
Tab. 3-28: Beurteilung der vertikalen Fluchtwege [1].....	47
Tab. 3-29: Beurteilung der horizontalen Fluchtwege [1].....	48
Tab. 3-30: Beurteilung des Umfangs des Sprinklerschutzes [1].....	48
Tab. 3-31: Beurteilung der öffentlichen Feuerwehr [1]	48
Tab. 3-32: Beurteilung der Betriebsfeuerwehr [1]	48
Tab. 3-33: Beurteilung Rauchabzug [1]	48
Tab. 3-34: Beurteilung der Art der Alarmierung [1]	49
Tab. 3-35: Beurteilung von Fluchtwegkennzeichnungen [1]	49
Tab. 3-36: Beurteilung Unterteilung des betrachteten Brandabschnitts [1].....	49
Tab. 3-37: Beurteilung der Brandschadensbehebung [1].....	50
Tab. 3-38: Beurteilung des Brandentstehungsrisikos abhängig von der Nutzungsart [1] ..50	
Tab. 3-39: Beurteilung des Zustands der Elektroinstallation [1].....	51
Tab. 3-40: Beurteilung des Brandentstehungsrisikos abhängig vom Heizmaterial [1]	51
Tab. 3-41: Beurteilung der Lage der Heizung [1].....	51
Tab. 3-42: Beurteilung der Gas-Zündgefahr [1].....	51
Tab. 3-43: Beurteilung der Staub-Zündgefahr [1]	51
Tab. 3-44: Beurteilung des Brandentstehungsrisikos abhängig von Raucherlaubnis [1]	52
Tab. 3-45: Ermittlung des Mobilitätsbeiwerts [1]	52
Tab. 3-46: Personendichte abhängig von der Nutzungsart [1]	53
Tab. 3-47: Beurteilung der Ersetzbarkeit des Inhalts [1]	53
Tab. 3-48: Beurteilung Unterbrechungsempfindlichkeit abhängig von der Tätigkeit [1] ..54	
Tab. 3-49: Vergleichende Betrachtung von Ausbreitungsgeschwindigkeiten [1]	57
Tab. 3-50: Richtwerte für den Löschwasserbedarf-Grundschatz [31].....	59