AUGUSTAS
Risk Services

COMPARATIVE RISK ANALYSIS

Im Auftrag von
Concrete Europe &
BIBM – Verband der europäischen Fertigteilindustrie

Augustas Risk Services

September 2026

INHALTSVERZEICHNIS

Abschnitt 1: Wissenschaftlicher Vergleichsbericht 5

1. Einleitung 5

1.1 Die zentrale Bedeutung des Brandschutzes bei der Gebäudeplanung 5

1.2 Ziele des Berichts und Anwendungsbereich 6

1.3 Die Rolle von Stahlbeton bei der brandtechnischen Auslegung von Tragwerken 7

1.4 Verbreitung von Holzkonstruktionen und wichtigste Brandschutzaspekte 8

1.5 Aufbau des Dokuments und Vergleichsmethodik 10

2. Stahlbeton vs. Holz: Theoretischer Vergleich 12

2.1 Brandschutzrechtliche Rahmenbedingungen: EN 13501 12

2.2 Vorschriften für die brandtechnische Auslegung von Tragwerken 14

2.3 Werkstoffverhalten 16

2.3.1 Stahlbeton 17

2.3.2 Holz 23

2.4 Brandschutzstrategien 32

3. Zusammenfassung: Brandverhalten von Stahlbeton im Vergleich zu Holz 38

Abschnitt 2: Analyse von Brandrisikoszenarien 40

4. MFL- und NLE-Szenarien 40

4.1 Szenario des maximal vorhersehbaren Schadens (MFL) 41

4.2 Szenario „Normale Verlusterwartung“ (NLE) 41

5. Vergleichende Auslegungsannahmen 42

6. Fallstudie Nr. 1: Industriegebäude – Automatisiertes Lager 44

6.1 Beschreibung der Anlage 44

6.2 Szenarien für den maximal vorhersehbaren Schaden (MFL) 47

6.3 Szenarien für den normalen erwarteten Schaden (NLE) 51

6.4 Szenariovergleich – Fallstudie Nr. 1 55

7. Fallstudie Nr. 2: Wohngebäude 57

7.1 Beschreibung der Anlage 57

7.2 Szenarien für den maximal vorhersehbaren Schaden (MFL) 59

7.3 Szenarien für den normalen erwarteten Schaden (NLE) 62

7.4 Szenariovergleich – Fallstudie Nr. 2 64
8. Fallstudie Nr. 3: Lagerhaus 65
8.1 Beschreibung der Anlage 65
8.2 Szenarien für den maximal vorhersehbaren Schaden (MFL) 67
8.3 Szenarien für den normalen erwarteten Schaden (NLE) 70
8.4 Szenariovergleich – Fallstudie Nr. 3 72
9. Fallstudie Nr. 4: Schulgebäude 74
9.1 Beschreibung der Einrichtung 74
9.2 Szenarien für den maximal vorhersehbaren Schaden (MFL) 78
9.3 Szenarien zur normalen Verlusterwartung (NLE) 83
9.4 Szenariovergleich – Fallstudie Nr. 4 86
10. Fallstudie Nr. 5: Mehrstöckiges Wohnhaus 89
10.1 Beschreibung der Anlage 89
10.2 Szenarien für den maximal vorhersehbaren Schaden (MFL) 92
10.3 Szenarien zur normalen Verlusterwartung (NLE) 97
10.4 Szenariovergleich – Fallstudie Nr. 5 100
11. Vergleichende Betrachtung der 5 Fälle und Schlussfolgerungen 103
11.1 Fallübergreifende vergleichende Analyse 103
11.2 Die Rolle des Konstruktionsmaterials 104
11.3 Einfluss der Belegung 105
11.4 Einfluss der Geometrie 105
11.5 Sachschaden versus Betriebsunterbrechung 107
11.6 Technische Auswirkungen 108
11.7 Einschränkungen 108
11.8 Schlussfolgerungen 109
12. Literaturverzeichnis 112

Der vorliegende Bericht hat technisch-vergleichenden Charakter und zielt darauf ab, das Brandverhalten von Stahlbeton- und Holzbauwerken auf der Grundlage von normativen Vorgaben, wissenschaftlicher Literatur und dokumentierten Fallstudien zu analysieren. Die dargestellten Bewertungen und Schlussfolgerungen beziehen sich auf Projektszenarien und Referenzbedingungen, die anhand realer Stahlbetonkonstruktionen und ausschließlich auf der Planungsebene betrachteter Holzbaulösungen entwickelt wurden, und ersetzen nicht die für einzelne Gebäude oder spezifische reale Situationen erforderlichen detaillierten Prüfungen

Der Vergleich zwischen den untersuchten Konstruktionslösungen erhebt weder den Anspruch, alle möglichen Brandszenarien abzudecken, noch die Einzigartigkeit des Verhaltens unter realen Bedingungen wiederzugeben, das je nach Entwurfsentscheidungen, Bauqualität, Instandhaltung und betrieblichen Faktoren variieren kann. Die Schlussfolgerungen sind daher eher als allgemeine Hinweise denn als Leistungsgarantien für spezifische Anwendungen zu verstehen. Daher wird keine Haftung für die Verwendung der in diesem Bericht enthaltenen Informationen zu Planungs-, Bau- oder Entscheidungszwecken ohne entsprechende projektspezifische Überprüfungen übernommen, ebenso wenig wie für Folgen, die sich aus Interpretationen oder Anwendungen ergeben, die nicht dem beabsichtigten Kontext entsprechen.

Abschnitt 1: Wissenschaftlicher Vergleichsbericht

1. Einleitung

1.1 Die zentrale Bedeutung des Brandschutzes in der Gebäudeplanung

Der Brandschutz stellt heute einen der zentralsten und kritischsten Aspekte bei der Planung und dem Management von Gebäuden dar, insbesondere in komplexen städtischen Kontexten und bei Bauwerken mit strategischen Funktionen oder hoher Personendichte. Ein Brand ist ein außergewöhnliches, aber potenziell verheerendes Ereignis, das gleichzeitig die Sicherheit der Bewohner, die strukturelle Integrität des Gebäudes und die Aufrechterhaltung seiner Funktionen gefährden kann – mit erheblichen wirtschaftlichen, sozialen und ökologischen Folgen.

Auf europäischer Ebene hat der Brandschutz im Gebäudeentwurf zunehmend eine zentrale Rolle eingenommen und sich von einem überwiegend vorschriftsorientierten Ansatz hin zu einem leistungsbasierten und risikoorientierten Rahmen entwickelt. Diese Entwicklung ist eingebettet in den umfassenderen Rechtsrahmen, der durch die Bauprodukteverordnung (EU Nr. 305/2011, 3110/2024) und das System der Eurocodes für Tragwerke geschaffen wurde, welche die grundlegenden Anforderungen hinsichtlich mechanischer Festigkeit, Standsicherheit und Sicherheit im Brandfall definieren. Innerhalb dieses harmonisierten Rahmens erlassen die Mitgliedstaaten nationale Brandschutzvorschriften, die normgebende Bestimmungen mit leistungsbasierten und risikobewussten Methoden verbinden. In Italien beispielsweise stellt der *„Codice di Prevenzione* Incendi“ *(Ministerialdekret vom 03.08.2015 und nachfolgende Änderungen)* im Einklang mit den baulichen Eurocodes die Begrenzung der Brandfolgen in den Mittelpunkt der Brandschutzplanung und verlangt, dass Gebäude so konzipiert werden, dass die Wahrscheinlichkeit eines Einsturzes begrenzt, akzeptable Evakuierungsbedingungen gewährleistet und Rettungskräften ein sicheres Eingreifen ermöglicht wird. In Frankreich verlangen die Anforderungen an die „sécurité incendie“ für ERP[1] und IGH[2] , die durch den *„Code de la construction et de l’habitation“ und die dazugehörigen* „Arrêtés“ geregelt sind, dass Bauwerke eine bestimmte Feuerwiderstandsdauer, eine wirksame Brandabschnittsbildung und die Begrenzung der Brandausbreitung gewährleisten, wobei ingenieurwissenschaftlichen Methoden zunehmend Bedeutung beigemessen wird. Auch in diesem Zusammenhang sind die Wahl der Baustoffe und deren Einstufung hinsichtlich Brennbarkeit und Feuerwiderstand entscheidende Faktoren bei der Festlegung von Sicherheitsmaßnahmen, die sowohl die Tragwerksplanung als auch den Umfang des erforderlichen Brandschutzes beeinflussen.

In diesem Rahmen spielt das Brandverhalten von Baustoffen eine entscheidende Rolle. Materialeigenschaften wie Brennbarkeit, die Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften bei steigender Temperatur, die Fähigkeit zur Beibehaltung der Restfestigkeit und die Vorhersagbarkeit des Brandverhaltens wirken sich direkt auf die Schwere des Brandszenarios und dessen Folgen aus. Die Wahl des Tragwerkssystems beeinflusst daher nicht nur die Leistung unter normalen Bedingungen, sondern wird zu einem Schlüsselfaktor beim Brandrisikomanagement und für die allgemeine Widerstandsfähigkeit des Gebäudes.

[1] ERP: Établissements Recevant du Public, Gebäude oder Einrichtungen, die für die öffentliche Nutzung bestimmt sind.
[2] IGH: Immeubles de Grande Hauteur, Hochhäuser, die besonderen Brandschutzvorschriften unterliegen.

Die zunehmende Fokussierung auf Nachhaltigkeit und innovative Bauweisen hat zudem die Einführung und Verbreitung neuer tragwerkstechnischer Lösungen gefördert, wodurch ein kritischer und konsequenter Ansatz im Bereich des Brandschutzes noch wichtiger geworden ist. In diesem Zusammenhang darf sich die vergleichende Bewertung verschiedener Baustoffe nicht auf die Überprüfung der Einhaltung gesetzlicher Mindestanforderungen beschränken, sondern muss sich auf die Analyse des Verhaltens unter extremen Brandszenarien sowie auf die Folgen nach einem Brandereignis erstrecken – hinsichtlich Sicherheit, Bauschäden und der Möglichkeit einer Wiederherstellung.

1.2 Ziele des Berichts und Anwendungsbereich

Dieser Bericht zielt darauf ab, einen technischen und wissenschaftlichen Vergleich zwischen brennbaren und nicht brennbaren Baustoffen anzustellen und deren Verhalten ausschließlich unter dem Gesichtspunkt des Brandschutzes und der Sicherheit sowie der mit der Brandentwicklung verbundenen Folgen zu analysieren. Die Analyse beschränkt sich bewusst auf die Auswirkungen eines Brandes auf das Gebäude und dessen Wiederherstellbarkeit. Sie befasst sich weder mit der Personensicherheit noch mit multidisziplinären Bewertungen, die zwar relevant sind (ökologische Nachhaltigkeit, Kosten, Bauzeit), jedoch außerhalb des Geltungsbereichs dieses Dokuments liegen.

Insbesondere verfolgt der Bericht folgende Ziele:

- die physikalischen und thermomechanischen Mechanismen zu beschreiben, die das Verhalten der beiden Tragwerkssysteme bei Brandbeanspruchung bestimmen;
- den Verlust der Tragfähigkeit in Abhängigkeit von Temperatur und Branddauer sowie den Zustand der Konstruktion am Ende der Brandbelastung zu vergleichen;
- Untersuchung der Wechselwirkung zwischen dem Baustoff und der Brandschutzstrategie des Gebäudes unter Berücksichtigung von Brandabschnitten, passivem und aktivem Schutz sowie der Aufrechterhaltung dieser Maßnahmen über die gesamte Nutzungsdauer.
- Anhand von fünf Fallstudien die Folgen eines Brandes in Bezug auf Sachschäden, Betriebsunterbrechungen und die Wiederherstellbarkeit nach dem Brand zu bewerten, einschließlich indirekter Schäden durch Rauch, Ruß und Löschwasser.
- Ermitteln Sie die Bedingungen, unter denen die Wahl des Baustoffs das Ergebnis wesentlich beeinflusst, sowie diejenigen, unter denen dies nicht der Fall ist.

Der Anwendungsbereich des Berichts umfasst zivile, gewerbliche und industrielle Gebäude, wobei ein besonderer Schwerpunkt auf mehrstöckigen Bauwerken und Gebäuden mittlerer bis hoher Komplexität liegt, bei denen Brandschutz und Sicherheit eine entscheidende Rolle bei Planungs- und Managemententscheidungen spielen. Der Vergleich erfolgt unter Bezugnahme auf realistische Brandszenarien, die der aktuellen Planungspraxis entsprechen.

Das Dokument verfolgt einen überwiegend leistungsbasierten Ansatz, gestützt auf gesetzliche Vorgaben, experimentelle Erkenntnisse und fundierte wissenschaftliche Literatur. Ziel ist es nicht, eine absolute Rangfolge zwischen den Materialien aufzustellen, sondern dem Leser objektive und technisch fundierte Anhaltspunkte zu liefern, um zu verstehen, wie verschiedene bauliche Lösungen auf einen Brand reagieren und welche Konsequenzen dies in Bezug auf Risiko und Sicherheit hat. Aus ingenieurtechnischer Sicht wird ein Brand als außergewöhnliches Ereignis eingestuft, das durch hohe Unsicherheit und eine starke Abhängigkeit von zahlreichen Faktoren gekennzeichnet ist: Brandlast, Raumnutzung, Belüftung, Geometrie der Brandabschnitte sowie aktive und passive Schutzsysteme.

Im Gegensatz zu statischen oder seismischen Einwirkungen entwickelt sich ein Brand zeitlich und räumlich weiter und erzeugt komplexe thermische und mechanische Effekte. Erhöhte Temperaturen führen zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften, zu thermischer Ausdehnung, zu einem Verlust an Steifigkeit und in den kritischsten Fällen zum Einsturz des Bauwerks. Aus diesem Grund kann sich die Bewertung des Brandverhaltens eines Bauwerks nicht auf dessen anfängliche Widerstandsfähigkeit beschränken, sondern muss das Gesamtverhalten des Systems „Gebäude–Feuer“ berücksichtigen.

1.3 Die Rolle von Stahlbeton bei der brandtechnischen Bemessung von Bauwerken

Stahlbeton profitiert von einem gut etablierten Rahmenwerk für die Brandschutzbemessung. Die Norm EN 1992-1-2 enthält tabellarische Daten, vereinfachte Berechnungsmethoden und fortgeschrittene Berechnungsmodelle, gestützt auf eine umfangreiche Sammlung von standardisierten Brandversuchsergebnissen (*EN 1992-1-2; fib-Bulletin 38, 2007; fib-Bulletin 46, 2008*). In verschiedenen Ländern gibt es ergänzende nationale Brandschutzvorschriften und rechtliche Rahmenbedingungen, beispielsweise durch die *„Norme Tecniche per le* Costruzioni“ (NTC) und den *„Codice di Prevenzione* Incendi“ (Ministerialdekret vom 3. August 2015 und nachfolgende Änderungen) in Italien; das *„Approved Document B to the Building* Regulations“ (Vereinigtes Königreich); den *„Code de la construction et de l’habitation*“ *und* die *dazugehörigen Brandschutzverordnungen* in Frankreich; sowie die *„Boverkets* byggregler“ (BBR) in Schweden und in Österreich die vom Österreichischen Institut für Bautechnik herausgegebenen OIB-Richtlinien, insbesondere die OIB-Richtlinie 2 (Brandschutz) und die OIB-Richtlinie 2.1 (Brandschutz bei Betriebsbauten), ergänzt durch die TRVB-Fachrichtlinien und die ÖNORM-Normen.

Aus brandschutztechnischer Sicht vereint Stahlbeton drei messbare Eigenschaften: Nichtbrennbarkeit (Euroklasse A1 gemäß EN 13501-1), hohe thermische Trägheit und geringe Wärmeleitfähigkeit. Das Material trägt nicht zur Brandlast bei, sodass die Brandentwicklung ausschließlich von den Einbauten und Oberflächenverkleidungen abhängt, während das thermische Verhalten der Deckschicht zu einer allmählichen Erwärmung der Bewehrung führt und so den Verlust der Tragfähigkeit verzögert.

Die mechanische Verschlechterung von Beton und Bewehrungsstahl bei steigender Temperatur ist ein bekanntes und umfassend untersuchtes Phänomen, das in EN 1992-1-2 durch temperaturabhängige Reduktionsfaktoren für Festigkeit und Steifigkeit beschrieben wird. Diese Zusammenhänge ermöglichen die Berechnung der Resttragfähigkeit für eine bestimmte Branddauer, und das daraus resultierende Verhalten ist im Allgemeinen eher durch eine fortschreitende Verringerung der Leistungsfähigkeit als durch einen plötzlichen Verlust der Tragfähigkeit gekennzeichnet.

Ein spezifisches kritisches Problem für Stahlbeton unter Brandbedingungen ist das Phänomen des Abplatzens, das später ausführlich erörtert wird und zum Verlust der Betondeckung sowie zur direkten Freilegung der Bewehrung führen kann. Sein Auftreten hängt vom Feuchtigkeitsgehalt, der Durchlässigkeit, der Druckfestigkeit und der Erwärmungsgeschwindigkeit ab und lässt sich quantitativ nach wie vor nur schwer vorhersagen. Es gibt etablierte Maßnahmen zur Risikominderung, darunter Grenzwerte für den Feuchtigkeitsgehalt, die Verwendung von Polypropylenfasern und zusätzlicher passiver Schutz.

Stahlbeton vereint somit normierte Bemessungsverfahren (*EN 1992-1-2*), ein dokumentiertes Zersetzungsverhalten und einen kritischen Mechanismus, der spezifische Maßnahmen erfordert. Diese Aspekte legen die Rahmenbedingungen fest, unter denen alternative bauliche Lösungen aus brandschutztechnischer Sicht verglichen werden können, da die brandschutztechnische Bemessung drei Hauptziele verfolgt, von denen dieser Bericht das zweite und das dritte behandelt:

- Schutz von Menschenleben durch Gewährleistung angemessener Evakuierungszeiten und Umgebungsbedingungen, die mit dem Überleben der Bewohner vereinbar sind.
- Begrenzung von Bauschäden, Verhinderung eines fortschreitenden Einsturzes und Gewährleistung einer ausreichenden Tragfähigkeit während und nach dem Brand.
- Minderung der wirtschaftlichen und funktionalen Folgen durch Förderung der Widerstandsfähigkeit des Gebäudes und der Machbarkeit einer Wiederherstellung nach dem Brand.

Diese Ziele werden stark von der Bauweise und den verwendeten Materialien beeinflusst. Der Vergleich zwischen Stahlbeton und Holz muss daher nicht nur unter dem Gesichtspunkt der Brennbarkeit erfolgen, sondern vor allem unter Berücksichtigung der systemischen Auswirkungen eines Brandes auf das gesamte Gebäude.

1.4 Verbreitung von Holzkonstruktionen und zentrale Brandschutzaspekte

In den letzten zwei Jahrzehnten hat sich der Einsatz von Holzkonstruktionen im Bausektor zunehmend verbreitet *(Abb. 1)*, insbesondere in Form von Massivholzkonstruktionen wie Brettschichtholz (GLT) und Brettsperrholzplatten (CLT). Dieser Trend wurde durch eine Kombination aus ökologischen, regulatorischen und bauprozessbezogenen Faktoren sowie durch die schrittweise Anpassung des europäischen und internationalen Rechtsrahmens vorangetrieben. Auf europäischer Ebene wird die brandtechnische Bemessung von Holzkonstruktionen speziell im Eurocode 5 – EN 1995-1-2 behandelt, der Berechnungsmodelle für Verkohlungsraten, Restquerschnitte und die Überprüfung der Feuerwiderstandsfähigkeit bereitstellt. Auf nationaler Ebene werden diese Bestimmungen durch Bauvorschriften umgesetzt, die spezielle Anforderungen an brennbare Baustoffe enthalten, wie beispielsweise die *„Norme Tecniche per le Costruzioni“* (Italien), *das „Approved Document B to the Building Regulations“* (Vereinigtes Königreich), der französische *„Code de la construction et de l'habitation“* und die schwedischen *„Boverkets* byggregler“ *(BBR)*. Diese Vorschriften erlauben die Verwendung von Holz in mehrgeschossigen Gebäuden, sofern bestimmte Brandverhaltensanforderungen und in vielen Fällen zusätzliche Schutzmaßnahmen erfüllt werden.

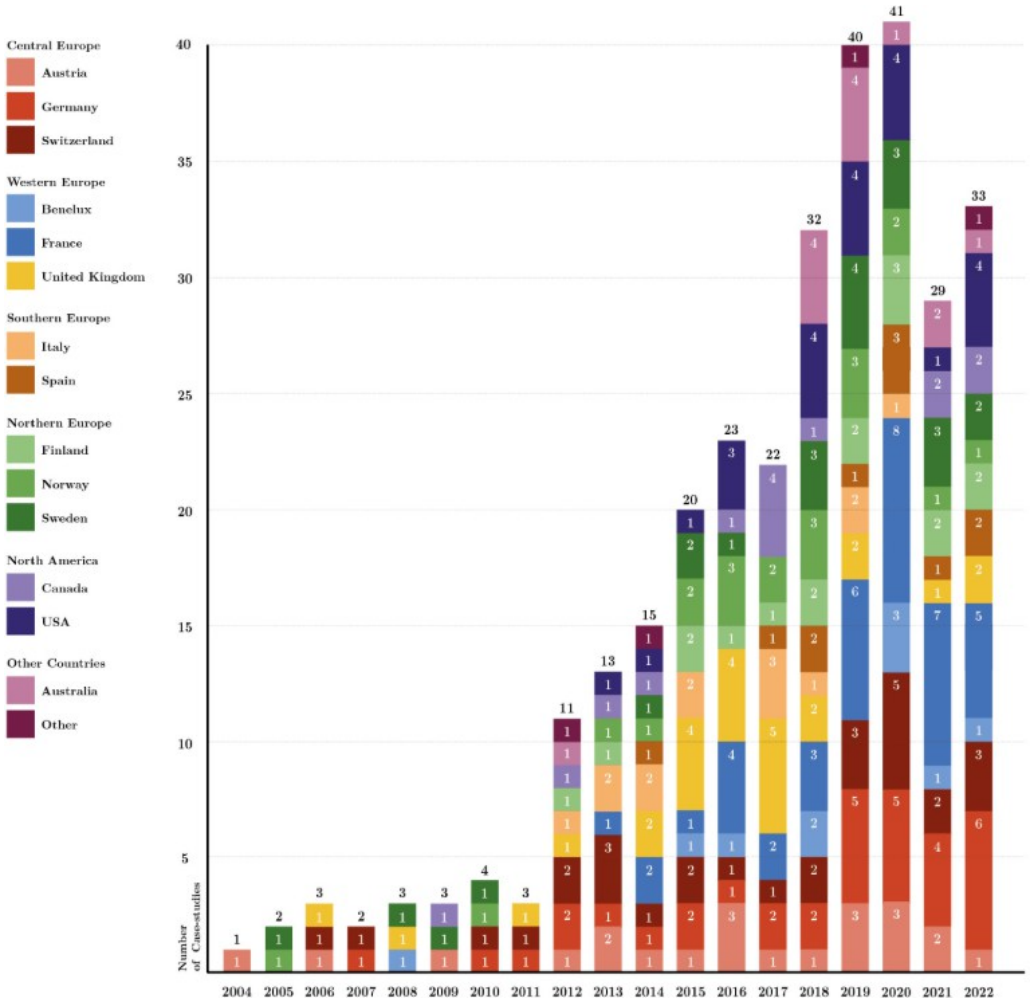


Abb. 1, Bau von mehrgeschossigen Holzgebäuden (TU Wien – Vittorio Salvadori, 2023)

Aus brandschutztechnischer Sicht ist Holz ein brennbarer Werkstoff, der typischerweise der Euroklasse D gemäß EN 13501-1 zugeordnet ist, wobei für dichte Holzarten oder mit Flammschutzmitteln behandelte Produkte höhere Klassen erreichbar sind; es beteiligt sich an der Verbrennung und trägt zur Brandlast des Brandabschnitts bei.

Sein Brandverhalten wird durch das Phänomen der Oberflächenverkohlung bestimmt, das zu einer fortschreitenden Verringerung des tragenden Querschnitts und folglich der Tragfähigkeit der Bauteile führt. EN 1995-1-2 beschreibt diesen Prozess anhand tabellarisch aufgeführter Verkohlungsraten, mit denen der Restquerschnitt für eine bestimmte Branddauer berechnet werden kann. Der Materialverlust ist jedoch irreversibel und beeinträchtigt sowohl die Tragfähigkeit während des Brandes als auch die Resttragfähigkeit der Bauteile in der Phase nach dem Brand.

Die geforderten Feuerwiderstandsklassen für Holzbauteile lassen sich je nach Auslegungsstrategie durch eine Kombination aus Bauteilbemessung, opfernder Verkohlung und passivem Schutz, wie beispielsweise Gipskartonverkleidungen oder anderen Schutzsystemen, erreichen. Das tragtechnische Verhalten hängt daher von der Auslegung, der Einbauweise und der Dauerhaftigkeit dieser Systeme ab, da Beschädigungen, Einbaufehler oder altersbedingte Verschleißerscheinungen zu einer vorzeitigen Freilegung des Holzes und zur direkten Einbeziehung der Bauteile in den Brand führen können.

Freiliegende Holzoberflächen tragen zur Wärmefreisetzungsrate (HRR) des Brandabschnitts bei. In Brandabschnittstests im Originalmaßstab mit vollständig freiliegendem Massivholz war die gemessene Wärmefreisetzung etwa 80 % höher als in vergleichbaren Tests mit geschütztem Holz oder nicht brennbaren Konstruktionen, und in einer Testreihe entfielen etwa 63 % der insgesamt freigesetzten Energie auf die Holzplatten (*McGregor, 2013; Brandon & Östman, 2018*). Unter belüftungsgesteuerten Bedingungen können freiliegende Oberflächen zudem die Flammenausbreitung nach außen durch Öffnungen begünstigen, was Auswirkungen auf die Brandausbreitung und die Löschmaßnahmen hat. Bei Holzwerkstoffen kann das Verhalten von Klebstoffen bei hohen Temperaturen zu einer Delaminierung führen, d. h. zum Ablösen der verkohlten Schicht und zum Freilegen des darunterliegenden unverbrannten Materials, was die Brennphase verlängern oder das Selbstauslöschen verhindern kann. In der aktuellen Forschung und in Brandschutzvorschriften wird das Verhalten von Klebstoffen bei erhöhten Temperaturen zunehmend als wichtiger Faktor für die Eindämmung der Delaminierung anerkannt, obwohl die Vorhersage der Delaminierung nach wie vor ein Bereich ist, der weiter erforscht wird.

Beispielsweise erfordert im Rahmen des italienischen *„Codice di Prevenzione* Incendi“ oder des britischen *„Approved Document B to the Building Regulations“* der Einsatz von Holz als primäres Tragwerkmaterial im Vergleich zu Lösungen auf der Basis nicht brennbarer Materialien oft ausgefeiltere Brandschutzstrategien und Ausgleichsmaßnahmen. Dies führt zu einer größeren Empfindlichkeit des Gebäudestruktursystems gegenüber Planungsannahmen, Betriebsbedingungen und langfristiger Instandhaltung. In diesem Zusammenhang ist zwar anzuerkennen, dass technologische und regulatorische Fortschritte die Anwendbarkeit von Holzkonstruktionen erweitert haben, doch hängt deren Brandverhalten stärker vom Zusammenspiel zwischen statischer Auslegung, Brandschutz, Materialkonfiguration und Brandbelastungsbedingungen ab. Diese Abhängigkeit führt zu zusätzlichen Unsicherheitsfaktoren, die beim Vergleich von Holz mit Stahlbeton ausdrücklich berücksichtigt werden sollten, insbesondere bei schweren Brandszenarien und bei der Bewertung des tragenden Verhaltens nach einem Brand.

1.5 Aufbau des Dokuments und Vergleichsmethodik

Dieser Bericht ist so strukturiert, dass er einen technischen und konsistenten Vergleich zwischen Stahlbetonkonstruktionen und Holzkonstruktionen liefert, der sich auf Brandschutzaspekte sowie auf die Folgen eines Brandes für das Gebäude, seine Nutzer und die Aufrechterhaltung der Nutzung beschränkt. Der gewählte Ansatz ist leistungsbasiert und ingenieurtechnisch ausgerichtet; dabei werden allgemeine oder rein vorschriftsmäßige Bewertungen vermieden und stattdessen der Fokus auf das tatsächliche Verhalten von Materialien und Tragwerkssystemen unter extremen Brandszenarien gelegt.

Das Dokument gliedert sich in zwei Abschnitte: einen theoretischen Vergleich und die Ausarbeitung von fünf Fallstudien. Der einleitende theoretische Vergleich gibt einen Überblick über die wichtigsten normativen Referenzen zum Brandschutz und zur Sicherheit auf europäischer und internationaler Ebene, wobei besonderes Augenmerk auf die Klassifizierungskriterien für das Brandverhalten und die Feuerwiderstandsfähigkeit (EN 13501, NFPA 220) sowie deren Auswirkungen auf die Planungsentscheidungen gelegt wird. Auf dieser normativen Grundlage wird das Verhalten von Baustoffen im Brandfall analysiert, wobei die Eigenschaften von Stahlbeton und Holz getrennt betrachtet werden.

Bei Stahlbeton konzentriert sich die Analyse auf die Nichtbrennbarkeit des Materials, die fortschreitende Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften bei steigender Temperatur, das Phänomen der Abplatzung sowie die Rolle des intrinsischen und extrinsischen Schutzes, wie beispielsweise Betondecke und Schutzputz. Dabei wird der Vorhersagbarkeit des Verhaltens, der Resttragfähigkeit sowie den Auswirkungen auf die Gesamtsicherheit und die Wiederherstellbarkeit nach einem Brand besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

Bei Holzkonstruktionen untersucht der Vergleich die Brennbarkeit des Materials, Verkohlungsmechanismen, die Verringerung des wirksamen Querschnitts und den daraus resultierenden Verlust an Tragfähigkeit. Besonderes Augenmerk wird auf die Abhängigkeit des Brandverhaltens von passiven Schutzsystemen (Auskleidungen, intumeszierende Systeme) sowie auf die Variabilität des Verhaltens in Abhängigkeit von den Brandbelastungsbedingungen, den Bauweisen und der Dauerhaftigkeit der Schutzsysteme gelegt.

Anschließend befasst sich der Bericht mit Brandschutzstrategien auf der Ebene des Gebäudesystems und entwickelt einen Vergleich zwischen den beiden Bauwerkstypologien hinsichtlich Brandabschnittsbildung, passivem und aktivem Schutz sowie langfristiger Instandhaltbarkeit. Diese Analyse erfolgt mit einem folienorientierten Ansatz, bei dem nicht nur die Erreichung der Auslegungsleistung, sondern auch die Gesamtsicherheit des Systems und dessen Empfindlichkeit gegenüber Planungs- und Betriebsannahmen bewertet werden.

Der theoretische Teil schließt mit einer kritischen Zusammenfassung der Ergebnisse und einer vergleichenden Übersichtstabelle, in der Stahlbeton und Holz anhand gemeinsamer Kriterien bewertet werden, darunter beispielsweise das Brandverhalten und der Beitrag zur Brandausbreitung, die thermische Entwicklung des Querschnitts und die daraus resultierende Resttragfähigkeit sowie die für jedes Material spezifischen kritischen Phänomene, wie in Kapitel 3 ausführlich beschrieben. Die Anwendung derselben Kriterien auf beide Systeme ermöglicht es, die Unterschiede auf spezifische Mechanismen zurückzuführen und nicht auf allgemeine Beurteilungen der Materialleistung.

Der zweite Teil des Berichts konzentriert sich auf fünf Fallstudien aus der Praxis, die entsprechend anonymisiert wurden und verschiedene Arten von Stahlbetongebäuden betreffen. Für diese Konfigurationen wird ein leistungsbasierter Vergleich entwickelt, bei dem bewertet wird, wie sich das Brandverhalten und die Gesamtleistung ändern würden, wenn dieselben Gebäude mit einem Holztragwerkssystem errichtet würden. Der Vergleich erfolgt durch die Definition von Brandszenarien und die Bewertung der daraus resultierenden Schäden gemäß der in Abschnitt 4 beschriebenen Methodik.

2. Stahlbeton vs. Holz: Theoretischer Vergleich

2.1 Rechtlicher Rahmen für den Brandschutz: EN 13501

Der Brandschutz im europäischen Bauwesen unterliegt einem harmonisierten Regelwerk, das klar zwischen dem Brandverhalten von Materialien und der Feuerwiderstandsfähigkeit von Bau- und Tragwerkselementen unterscheidet. Diese Unterscheidung ist entscheidend für das Verständnis der Leistungsunterschiede zwischen Stahlbeton- und Holzbauwerken, nicht nur während der Brandentwicklung, sondern vor allem hinsichtlich der tragtechnischen Folgen, der Brandausbreitung und des Notfallmanagements.

Auf europäischer Ebene ist die Normenreihe EN 13501 die wichtigste Referenz, die die Grundlage für die Klassifizierung der Brandverhaltensmerkmale von Produkten und Bauelementen bildet. Insbesondere:

- Die EN 13501-1 regelt das Brandverhalten von Baustoffen.
- EN 13501-2 betrifft die Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen, ausgedrückt in Bezug auf Tragfähigkeit (R), Integrität (E) und Wärmedämmung (I) für vordefinierte Zeiträume (30, 60, 90, 120 Minuten und darüber hinaus).

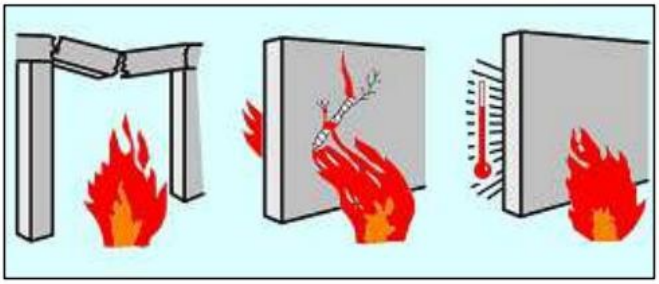


Abb. 2: Verlust der Tragfähigkeit (R), Verlust der Integrität (E) und Verlust der Wärmedämmung (I)

Auf nationaler Ebene werden diese Klassifizierungen in den nationalen Bauvorschriften umgesetzt. Im Vereinigten Königreich beispielsweise übernimmt das *„Approved Document B* to the Building Regulations“ das Klassifizierungssystem der EN 13501 und integriert es in einen leistungsbasierten Rahmen, der Mindestfeuerwiderstandszeiten, Anforderungen an das Brandverhalten von Verkleidungen und Fassaden sowie Bestimmungen zur Begrenzung des Einsturzes von Tragwerken und der Brandausbreitung festlegt.

Das Brandverhalten beschreibt den Beitrag eines Materials zur Entzündung und zur Ausbreitung eines Brandes. Das europäische Klassifizierungssystem definiert Klassen von A1 (nicht brennbar) bis F (leicht brennbar). Innerhalb dieses regulatorischen Rahmens fällt Stahlbeton durchweg in die Klassen A1 oder A2, da es sich um ein nicht brennbares Material handelt, das weder an der Verbrennung teilnimmt noch zur Brandlast beiträgt. Holz und Holzwerkstoffe werden hingegen, sofern sie nicht speziell behandelt sind, in die Klassen C–D–E eingestuft und sind somit brennbare Materialien, die aktiv zur Brandausbreitung beitragen können; die Dauerhaftigkeit solcher Behandlungen über die gesamte Nutzungsdauer hinweg ist weiterhin Gegenstand laufender Untersuchungen (Johansson et al., 2026).

In Italien schränken der „Codice di Prevenzione Incendi“ und mehrere Verordnungen, wie beispielsweise das Ministerialdekret vom 26.08.1992 für Schulgebäude, die Verwendung brennbarer Materialien in Fluchtwegen, Brandabschnittselementen und Räumen mit hoher Personendichte ausdrücklich ein, um das Risiko der Brandausbreitung und des Flashover zu verringern. In diesen Kontexten entsprechen Materialien der Klassen A1/A2 strukturell und funktional besser den Sicherheitszielen.

In internationalen Normen zur Klassifizierung von Bauwerken, wie sie beispielsweise von der National Fire Protection Association (NFPA) und dem International Building Code (IBC) definiert werden, fallen Bauwerke aus nicht brennbaren Materialien (wie Stahlbeton) in der Regel unter die Kategorien Typ I oder Typ II, die mit den höchsten Stufen der Feuerwiderstandsfähigkeit und der Eindämmung der Brandausbreitung verbunden sind. Umgekehrt werden Gebäude auf der Basis von Holzbauteilen in Kategorien wie Typ IV (Massivholz) oder Typ V (Holzrahmenbau) eingestuft, bei denen es sich um brennbare Bauweisen handelt, die zusätzlichen Schutz erfordern, um vergleichbare Feuerwiderstandsklassen zu erreichen *(NFPA 220)*.

Die Feuerwiderstandsfähigkeit bezeichnet die Fähigkeit eines Bauteils, seine tragende Funktion während eines Brandes für einen vordefinierten Zeitraum aufrechtzuerhalten, wodurch der Schutz von Menschen, Eigentum und Umwelt gewährleistet wird und somit Folgendes ermöglicht wird:

- die Evakuierung der Bewohner und das sichere Eingreifen von Rettungskräften.
- die Begrenzung des Risikos eines fortschreitenden Einsturzes
- die Verringerung der mit dem Brand verbundenen Umweltauswirkungen durch die Begrenzung der Entstehung von Rauch, Verbrennungsgasen und potenziell schädlichen Rückständen, die durch die Einbeziehung von Baustoffen entstehen.

Aus regulatorischer Sicht bedeutet die Einstufung von Beton als nicht brennbar (Euroklasse A1 gemäß EN 13501-1), dass sich die Brandschutzprüfung auf die Feuerwiderstandsfähigkeit beschränkt, ohne die zusätzlichen Nachweise, die die Vorschriften für brennbare Baustoffe verlangen. Die Norm EN 1992-1-2 erlaubt die Durchführung dieser Prüfung anhand von Mindestquerschnittsabmessungen und Achsabständen, sodass in vielen Fällen die erforderliche Einstufung ohne zusätzliche Schutzsysteme erreicht wird.

Holzkonstruktionen hingegen erreichen die erforderlichen Feuerwiderstandsklassen durch eine Kombination aus Bauteildimensionierung, opfernder Verkohlung und passivem Schutz, wie beispielsweise der Ummantelung mit Gipskartonplatten, Schutzverkleidungen oder intumeszierenden Beschichtungen. Werden Schutzsysteme eingesetzt, hängt die erzielte Leistung von deren Einbau und ihrem Zustand über die Nutzungsdauer des Gebäudes ab, was eine Anfälligkeit gegenüber lokalen Beschädigungen, Einbaufehler und langfristiger Alterung mit sich bringt.

Eine vergleichbare Regelungsphilosophie lässt sich in Deutschland beobachten, wo die *„Musterbauordnung“ (MBO)* und die entsprechenden Landesbauordnungen klar zwischen brennbaren und nicht brennbaren Bausystemen unterscheiden und einen ausdrücklichen Nachweis der Konformität verlangen, wenn brennbare Baustoffe über die üblichen Grenzen hinaus verwendet werden. Die gleiche Unterscheidung gilt in Österreich, wo die OIB-Richtlinie 2 die Anforderungen an das Brandverhalten und die Feuerwiderstandsdauer an die Gebäudeklasse knüpft, wobei die OIB-Richtlinie 2.1 die entsprechenden Bestimmungen für Industrie- und Lagergebäude festlegt.

In diesem Rahmen verringert der Einsatz nicht brennbarer Materialien wie Stahlbeton den Umfang der durch die Vorschriften geforderten Ausgleichsmaßnahmen.

Jüngste regulatorische Lockerungen in Richtung höherer Holzgebäude ändern nichts an diesem Grundprinzip, da sie das Ergebnis experimenteller Überprüfungen und fortschrittlicher Modellierung sind; sie erfordern jedoch eine strenge Kontrolle der Konstruktionsdetails, eine angemessene Überprüfung und Wartung der Brandschutzsysteme sowie eine umfassende Bewertung der für die jeweilige Gebäudekonfiguration relevanten Brandszenarien.

2.2 Regulatorische Rahmenbedingungen für die brandtechnische Auslegung von Tragwerken

Die brandtechnische Bemessung von Tragwerken im europäischen Rechtsrahmen unterliegt den Bestimmungen der Eurocodes, die spezifische Methoden zur Bewertung des Tragverhaltens von Materialien unter Brandbedingungen vorgeben. Insbesondere werden Stahlbetonkonstruktionen im Eurocode 2 – EN 1992-1-2 behandelt, während Holzkonstruktionen unter den Eurocode 5 – EN 1995-1-2 fallen. Obwohl beide Normen das gemeinsame Ziel verfolgen, die strukturelle Stabilität für die geforderte Feuerwiderstandsdauer sicherzustellen, unterscheiden sich die zugrunde liegenden physikalischen Annahmen und Modellierungsansätze erheblich.

Die Brandbemessungsmethodik für Stahlbetonkonstruktionen basiert in erster Linie auf der fortschreitenden Verringerung der mechanischen Materialeigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur. Gemäß EN 1992-1-2 kann die statische Nachweise unter Brandbedingungen durch verschiedene Ansätze erfolgen, darunter vereinfachte Tabellenverfahren, vereinfachte Berechnungsmodelle oder fortgeschrittene numerische Analysen. Der vereinfachte Bemessungsansatz stützt sich auf experimentell validierte Zusammenhänge, die die Abnahme der Betondruckfestigkeit und der Streckgrenze des Bewehrungsstahls bei erhöhten Temperaturen beschreiben, kombiniert mit Wärmeübertragungsmodellen, die die relativ geringe Wärmeleitfähigkeit und die hohe thermische Trägheit von Beton berücksichtigen.

In der praktischen Bemessungspraxis erlaubt die Norm häufig eine Nachweise anhand von tabellarischen Daten, die die Feuerwiderstandsdauer mit den Mindestabmessungen der Bauteile, der Betondeckungsdicke und der Bewehrungsausführung in Beziehung setzen. Diese tabellarischen Werte basieren auf experimentellen Ergebnissen, die über mehrere Jahrzehnte hinweg bei Ofenversuchen, Bauwerksversuchen im Originalmaßstab und Untersuchungen nach Bränden gesammelt wurden.

Ein wesentlicher Aspekt des Verhaltens von Stahlbeton unter Brandbedingungen ist, dass das Material selbst nicht zur Brandlast beiträgt. Beton wird als nicht brennbares Material eingestuft (A1 gemäß EN 13501-1), weshalb das Tragwerksystem nicht am Verbrennungsprozess beteiligt ist. Die Brandbeanspruchung wirkt sich in erster Linie durch Wärmeübertragung und fortschreitende thermische Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften auf die Bauteile aus, während die Baukörpermasse und die thermische Trägheit im Allgemeinen dazu beitragen, das Eindringen der Temperatur in den Querschnitt zu verlangsamen. Selbst bei schweren Brandereignissen kann ein erheblicher Teil des Querschnitts über längere Zeiträume unter den kritischen Temperaturen bleiben, wodurch eine Resttragfähigkeit aufrechterhalten werden kann.

Umgekehrt basiert der in EN 1995-1-2 beschriebene Brandschutzansatz für Holzkonstruktionen auf einem grundlegend anderen physikalischen Mechanismus. Die Tragfähigkeit während der

Brandbeanspruchung wird durch die Modellierung der fortschreitenden Verkohlung der dem Feuer ausgesetzten Holzbauteile bestimmt. Die Bemessungsmethodik geht davon aus, dass die äußeren Schichten des Holzes nach und nach in eine Verkohlungsschicht umgewandelt werden, die nicht mehr zur Tragfähigkeit beiträgt, während der verbleibende innere Kern seine mechanischen Eigenschaften beibehält. Die statische Nachweise erfolgt daher durch Reduzierung des wirksamen Querschnitts gemäß einer vordefinierten Verkohlungsrate und durch Bewertung der Tragfähigkeit des Restquerschnitts.

Dieser vereinfachte Ansatz bietet zwar eine praktische Bemessungsmethode, stützt sich jedoch auf mehrere Annahmen hinsichtlich der Gleichmäßigkeit und Stabilität des Verkohlungsprozesses. Unter realen Brandbedingungen kann das Verhalten von Holzbaukonstruktionen durch zahlreiche zusätzliche Faktoren beeinflusst werden, die in vereinfachten Bemessungsmodellen nicht immer vollständig berücksichtigt werden. Zu diesen Faktoren zählen das Verhalten von Schutzverkleidungen, die Integrität von Verbindungen, das Verhalten von Brettschichtholz oder Kreuzlagenholz bei erhöhten Temperaturen sowie mögliche Delaminationserscheinungen, durch die frische Holzoberflächen dem direkten Einwirken des Feuers ausgesetzt werden können. Diese Vereinfachungen sind beabsichtigt. Die nominalen Verkohlungsraten und die Methode des reduzierten Querschnitts sind so kalibriert, dass sie über die natürliche Variabilität von Holzprodukten hinweg ein sicheres Bemessungsergebnis liefern, und sind nicht dazu gedacht, das Verhalten eines bestimmten Bauteils in einem bestimmten Brandfall nachzubilden.

Ein weiterer Aspekt, der den sich weiterentwickelnden Charakter des Rahmenwerks für die Brandbemessung von Holzbauwerken unterstreicht, betrifft die Berücksichtigung des Beitrags brennbarer Baustoffe zur Brandentwicklung. In den aktuellen Bestimmungen der EN 1995-1-2 konzentriert sich der statische Bemessungsansatz in erster Linie auf die Nachweisführung der Resttragfähigkeit anhand von Verkohlungsmodellen, während der potenzielle Beitrag freiliegender Holzbauteile zur Gesamtbrandlast nicht explizit in die normativen Berechnungsverfahren einbezogen wird.
Jüngste Entwicklungen bei der Überarbeitung der EN 1995-1-2, die 2025 veröffentlicht wurde und voraussichtlich in den kommenden Jahren in Kraft treten wird, führen einen informativen Anhang ein, der Leitlinien dazu enthält, wie der Beitrag von Holzbauteilen im Rahmen parametrischer Brandanalysen berücksichtigt werden kann. Die Einführung dieses Anhangs spiegelt die wachsende Erkenntnis in der Brandschutztechnik wider, dass brennbare Baustoffe den Brandverlauf erheblich beeinflussen können, insbesondere in Konfigurationen, in denen große, freiliegende Holzoberflächen vorhanden sind.

Die Notwendigkeit solcher Bestimmungen verdeutlicht eine Einschränkung früherer Entwurfsansätze, bei denen im Allgemeinen davon ausgegangen wurde, dass das Tragwerksystem das in der Analyse berücksichtigte Brandszenario nicht wesentlich beeinflussen würde. Bei Konfigurationen, bei denen große Holzflächen freiliegen, kann diese Annahme zu einer Unterschätzung der potenziellen Brandschwere und -dauer führen.

Die praktischen Konsequenzen zeigen sich auf zwei Ebenen. Die erste betrifft das Brandszenario selbst. Das Betonmodell wird auf einen Brand angewendet, dessen Schweregrad durch den Inhalt des Brandabschnitts bestimmt wird, während in Konfigurationen mit großen freiliegenden Holzflächen auch die Konstruktion selbst eine Energiequelle darstellt, sodass die bei der Nachweisführung angenommene Brandbelastung und die im Brandabschnitt tatsächlich entstehende Brandbelastung nicht vollständig unabhängig voneinander sind. Die zweite Ebene betrifft den Zustand der Konstruktion nach Beendigung des Brandes, der für die Schadensbewertung und -behebung maßgeblich ist. Bei Stahlbeton behält der Querschnitt in der Regel seine Geometrie bei und ist

thermisch geschädigt; daher hängt die Resttragfähigkeit weitgehend von der Bestimmung der von der Hitze betroffenen Tiefe ab, es sei denn, durch Abplatzungen wurde ein Teil der Deckschicht oder des Querschnitts entfernt. Bei Holz ist der Querschnitt physikalisch kleiner, und das verkohlte Material bildet sich nicht wieder zurück, sodass die Resttragfähigkeit von der verbleibenden Geometrie bestimmt wird. Beide Modelle sind eher konservative Bemessungswerkzeuge als Beschreibungen des tatsächlichen Brandverhaltens.

Beide Normen bieten daher anerkannte Bemessungsverfahren, die auf unterschiedlichen physikalischen Mechanismen basieren und durch experimentelle Datenbanken unterschiedlichen Umfangs und Reifegrades gestützt werden. Die nach einer der beiden Normen durchgeführte Überprüfung ermittelt das Verhalten unter normgerechter Brandbeanspruchung, und die Grenzen dieser Beanspruchung in Bezug auf natürliche Brandbedingungen werden in den folgenden Abschnitten erörtert.

2.3 Verhalten von Baustoffen

Das Verhalten von Baustoffen unter Brandbedingungen stellt einen der zentralen Aspekte des Brandschutzes und der Sicherheit von Gebäuden dar, da es sowohl den Verlauf des Brandereignisses als auch die damit verbundenen baulichen und umweltrelevanten Folgen unmittelbar beeinflusst. Im Gegensatz zu statischen und seismischen Einwirkungen zeichnet sich ein Brand durch eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität aus, wobei thermische Effekte die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von Baustoffen erheblich beeinflussen. Die technische und wissenschaftliche Literatur zeigt, dass die Einwirkung hoher Temperaturen zu einer fortschreitenden Verschlechterung der Tragwerksleistung führt, die durch Mechanismen bestimmt wird, die je nach Art des Materials unterschiedlich sind. Insbesondere die Brennbarkeit, die Wärmeleitfähigkeit, die Wärmekapazität, die chemische Stabilität und die Entstehung von Verbrennungsabgasen sind Schlüsselparameter für die Bestimmung des Brandverhaltens eines Tragwerks *(Buchanan & Abu, Structural Design for Fire Safety, 2017; SFPE, Handbook of Fire Protection Engineering, 2016)*.

Die baulichen Eurocodes für Brandbedingungen, EN 1992-1-2 für Stahlbeton und EN 1995-1-2 für Holz, verwenden vereinfachte, aber differenzierte Modelle, um den Verlust an Festigkeit und Steifigkeit von Werkstoffen in Abhängigkeit von der Temperatur zu beschreiben. Diese Modelle spiegeln konzeptionell unterschiedliche Ansätze wider: einerseits nicht brennbare Werkstoffe, deren Verhalten von Wärmeübertragung und thermomechanischer Zersetzung dominiert wird; andererseits brennbare Werkstoffe, die aktiv zur Brandausbreitung beitragen können und aufgrund der Verbrennung eine Verringerung des tragenden Querschnitts erfahren.

Zahlreiche experimentelle Studien und Analysen nach Brandereignissen haben zudem gezeigt, dass das Materialverhalten nicht nur die strukturelle Stabilität während des Brandereignisses beeinflusst, sondern auch die Robustheit des Systems, die Brandausbreitung, die Rauch- und Gasentwicklung sowie die Reparaturfähigkeit des Bauwerks nach dem Brand *(FIB, Bulletin 38, 2007; SFPE, 2016)*. Daher spielt die Wahl des Baustoffs eine entscheidende Rolle beim Brandrisikomanagement und bei der Bewertung der Gesamtfolgen des Brandereignisses.

In den folgenden Abschnitten wird daher das Verhalten von Stahlbeton und Bauholz unter Brandbedingungen getrennt analysiert, wobei die vorherrschenden physikalischen Mechanismen, die regulatorischen Auswirkungen sowie die Folgen in Bezug auf Sicherheit, Zuverlässigkeit und Folgenbegrenzung hervorgehoben werden.

2.3.1 Stahlbeton

Stahlbeton wird aufgrund seiner Nichtbrennbarkeit, seiner hohen thermischen Masse und eines mit steigender Temperatur progressiv einsetzenden Festigkeitsverlusts, der durch normierte thermomechanische Modelle beschrieben wird, in großem Umfang im Hoch-, Industrie- und Infrastrukturbau eingesetzt.

In der internationalen Fachliteratur wird hervorgehoben, dass das Verhalten von Stahlbeton unter thermischer Einwirkung durch progressive Phänomene gekennzeichnet ist, die anhand konsolidierter thermomechanischer Modelle und normierter Berechnungsansätze analysiert werden können *(Buchanan & Abu, 2017; FIB, Bulletin 38, 2007; SFPE, 2016)*. Diese Vorhersagbarkeit hat die Entwicklung zuverlässiger Nachweismethoden ermöglicht, die in europäische und internationale Normen, darunter den Eurocode 2 – EN 1992-1-2, aufgenommen wurden.

Mehr als ein Jahrhundert des Einsatzes in Gebäuden mit hoher Personendichte, kritischer Infrastruktur und Industrieanlagen hat eine umfangreiche Dokumentation realer Brandereignisse hervorgebracht, die die Ergebnisse groß angelegter Versuchsprogramme ergänzt. Beide Quellen untermauern die Kalibrierung der Bemessungskriterien in EN 1992-1-2 und ermöglichen die Validierung von Berechnungsmodellen anhand des beobachteten Tragwerksverhaltens, einschließlich Fällen von lang andauernden oder lüftungsgesteuerten Bränden, die außerhalb der Standardversuchsbedingungen liegen.

Ein besonders relevanter Aspekt, der in Nachbrandstudien häufig hervorgehoben wird, ist die Fähigkeit von Stahlbetonkonstruktionen, auch nach einer Brandbelastung noch eine erhebliche Restfestigkeit zu bewahren. Sofern keine schweren Schäden oder lokalen Einstürze vorliegen, haben zahlreiche experimentelle Untersuchungen gezeigt, dass solche Konstruktionen durch zerstörungsfreie Prüfungen begutachtet, lokal repariert und anschließend wiederverwendet werden können *(Kodur, 2014; FIB, Bulletin 46, 2008)*.

Dieses Verhalten wirkt sich unmittelbar auf das gesamte Brandrisikomanagement aus und hat wichtige wirtschaftliche und ökologische Auswirkungen in Form von weniger Abrissmaßnahmen, geringerer Abfallerzeugung und begrenzten Ausfallzeiten bei den Aktivitäten. Im Rahmen der Brandschutztechnik ermöglichen diese Eigenschaften die Überprüfung des Brandverhaltens von Stahlbetonbauteilen anhand der Verfahren der Norm EN 1992-1-2 auf der Grundlage von Bauteilabmessungen, Betondeckung und den temperaturabhängigen Eigenschaften der Materialien.

2.3.1.1 Nichtbrennbares Verhalten

Aus Sicht des Brandverhaltens ist der erste grundlegende Aspekt, der zu berücksichtigen ist, die inhärente Beschaffenheit des Materials und sein potenzieller Beitrag zur Brandausbreitung. In diesem Zusammenhang zeichnet sich Stahlbeton durch sein nicht brennbares Verhalten aus, da er in keiner Weise am Verbrennungsprozess beteiligt ist, weder als Wärmequelle noch als Brennstoff. Gemäß der europäischen Klassifizierung von Bauprodukten hinsichtlich ihres Brandverhaltens (EN 13501-1) fällt Beton in die Klasse A1, die höchste Klasse, die Materialien vorbehalten ist, die in keiner Phase der Brandentwicklung zum Brand beitragen. Diese Klassifizierung wird Materialien zugewiesen, die unter standardisierten Brandprüfbedingungen keine nennenswerte Wärme erzeugen, keine Flammen entwickeln und weder Rauch noch brennende Tropfen freisetzen. Diese Eigenschaft hat erhebliche Auswirkungen auf den Brandschutz. Zunächst einmal bedeutet das Fehlen eines brennbaren Beitrags, dass die Brandlast eines Brandabschnitts durch das Vorhandensein von Stahlbetonbauteilen nicht erhöht wird, sondern auf den Inhalt, die Einrichtung und die Oberflächenverkleidungen beschränkt bleibt. Zahlreiche brandschutztechnische Studien heben hervor, dass die Schwere eines Brandes stark mit der verfügbaren Brandlast und deren Verteilung korreliert, was die Auswahl von Baustoffen, die nicht an der Verbrennung beteiligt sind, zu einer strategischen Planungsentscheidung macht (SFPE, Handbook of Fire Protection Engineering, 2016).

Darüber hinaus trägt die Nichtbrennbarkeit von Beton direkt dazu bei, die Ausbreitung des Feuers sowohl innerhalb desselben Brandabschnitts als auch in benachbarte Brandabschnitte zu begrenzen. Da keine Verbrennungsvorgänge am Baustoff stattfinden, wird die Brandausbreitung in erster Linie durch die Belüftungsbedingungen und die Verteilung brennbarer Materialien bestimmt, was die Analyse von Brandszenarien vereinfacht und die Zuverlässigkeit der zugrunde gelegten Planungsannahmen erhöht.

Auf nationaler Ebene hat diese Klassifizierung direkte Auswirkungen auf die brandschutztechnische Planung. In Italien übernimmt der „Codice di Prevenzione Incendi“ (Ministerialdekret vom 3. August 2015 und nachfolgende Änderungen) das europäische Brandverhaltenssystem und legt Anforderungen fest, die nicht brennbare Materialien bei der Brandabschnittsbildung und bei Brandschutzstrategien bevorzugen. In ähnlicher Weise behandelt der französische „Code de la construction et de l’habitation“, der an den europäischen Klassifizierungsrahmen angepasst ist, A1-Materialien als solche, die nicht zur Brandausbreitung beitragen, wodurch die Planungsannahmen in Bezug auf Brandlast und Flammenausbreitung vereinfacht werden. Die Nichtbrennbarkeit von Stahlbeton bedeutet daher, dass das Material das Feuer nicht nährt, dessen Entwicklung nicht beschleunigt und keine Unsicherheiten hinsichtlich der Beteiligung des Tragwerks am Verbrennungsprozess mit sich bringt. Dieser Aspekt bildet den Ausgangspunkt für die Analyse des Verhaltens von Beton unter Brandbedingungen, das in den folgenden Abschnitten im Hinblick auf das mechanische Verhalten und die tragwerktechnische Leistungsfähigkeit näher untersucht wird.

2.3.1.2 Mechanische Verschlechterung

Während eines Brandes ist Stahlbeton einem fortschreitenden Temperaturanstieg ausgesetzt, der zu einer Verringerung seiner mechanischen Eigenschaften sowie derjenigen der eingebetteten Stahlbewehrung führt. Dieses Phänomen steht nicht im Zusammenhang mit Verbrennungsprozessen, sondern vielmehr mit physikalischen und chemischen Umwandlungen seiner Bestandteile, die die Festigkeit und Steifigkeit des Materials beeinflussen. Es wurde umfassend untersucht und in den normativen Modellen der EN 1992-1-2 formalisiert, die Temperatur-Festigkeits-Beziehungen für beide Materialien bereitstellen. Das Verständnis dieser Mechanismen ist für die korrekte Bewertung der Resttragfähigkeit von brandbelasteten Bauwerken unerlässlich.

Zahlreiche experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass die Druckfestigkeit von Beton in Abhängigkeit von der erreichten Temperatur abnimmt, wobei dieser allmähliche Trend in der Literatur gut dokumentiert ist und durch den Reduktionsfaktor $_{kc}(\Theta)$ ausgedrückt wird, woraus sich ergibt: $_{fck}(\Theta) = _{kc}(\Theta) \cdot _{fck}(°C)$. Insbesondere bis zu etwa 300–400 °C ist der Festigkeitsverlust im Allgemeinen begrenzt, während bei höheren Temperaturen stärkere Abnahmen auftreten, die mit der Zersetzung von Zementhydratationsprodukten und der Zunahme innerer Mikrorisse einhergehen *(CEB, Bulletin 208, 1991; FIB, Model Code 2010)*.

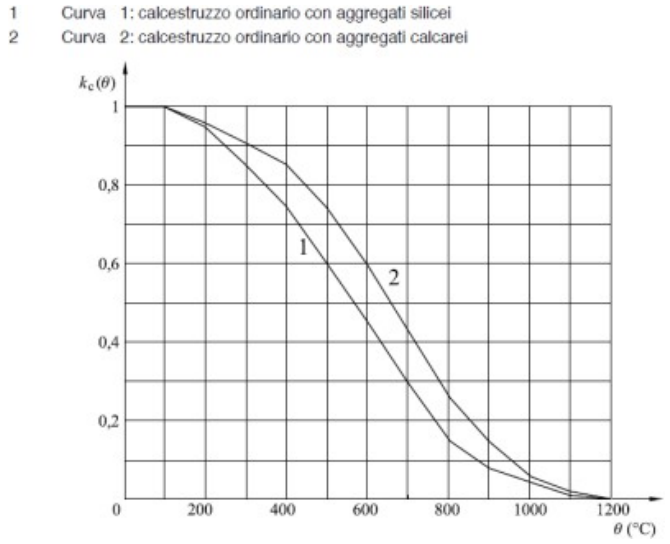


Abb. 3, Verlauf des Koeffizienten Kc(Θ) in Abhängigkeit von der Temperatur Θ (EN 1992-1-2:2005)

Das Verhalten von Beton unter Brandbedingungen wird in den Eurocodes für Tragwerke systematisch beschrieben, insbesondere in der Norm EN 1992-1-2, die vereinfachte Modelle und Reduktionsdiagramme für die mechanischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Temperatur bereitstellt. Diese Modelle, die auf einer umfangreichen experimentellen Datenbasis beruhen, ermöglichen eine zuverlässige Abschätzung der Restfestigkeit von Bauteilen und erleichtern so die Bemessung und Nachweise in Brandsituationen.

Ein in der wissenschaftlichen Literatur hervorgehobener relevanter Aspekt ist der progressive Charakter der mechanischen Verschlechterung von Beton. Im Gegensatz zu plötzlichen oder instabilen Phänomenen erfolgt der Festigkeitsverlust allmählich und kontinuierlich mit steigender Temperatur, was eine gewisse Spannungsverteilung innerhalb der Konstruktion ermöglicht. Dieses progressive Verhalten gilt als entscheidender Faktor für die strukturelle Robustheit unter Brandbedingungen und zur Verhinderung eines plötzlichen Einsturzes *(Buchanan & Abu, 2017)*. Es ist zudem zu beachten, dass das mechanische Verhalten von Beton stark von der Masse und der Dicke der Bauteile beeinflusst wird. Die geringe Wärmeleitfähigkeit des Materials führt zu erheblichen Temperaturgradienten zwischen der exponierten Oberfläche und dem inneren Kern, der selbst bei lang andauernden Bränden relativ niedrige Temperaturen beibehalten kann. Die Folge ist der Erhalt eines wesentlichen Teils der gesamten Tragfähigkeit, wie zahlreiche Versuche im Originalmaßstab bestätigen *(Kodur, 2014)*.

Daher ist die mechanische Verschlechterung von Stahlbeton unter Brandbedingungen ein bekanntes, modelliertes und umfassend geregeltes Phänomen. Die Verfügbarkeit konsolidierter Berechnungsmodelle in Verbindung mit dem progressiven Charakter des Festigkeitsverlusts und der Fähigkeit des Materials, das Eindringen von Wärme zu begrenzen, ermöglicht eine zuverlässige Bewertung des Tragverhaltens während und nach dem Brandereignis

2.3.1.3 Abplatzungen

Ablösung ist ein Phänomen, das bei Beton auftreten kann, der hohen Temperaturen ausgesetzt ist, und besteht in der heftigen Ablösung von Oberflächenschichten des Materials, wodurch die inneren Bereiche freigelegt werden. Dieses Phänomen wird im Allgemeinen mit dem Anstieg des Dampfdrucks innerhalb der zementären Matrix und mit hohen Temperaturgradienten zwischen der dem Feuer ausgesetzten Oberfläche und dem Kern des Bauteils in Verbindung gebracht.

In der wissenschaftlichen Literatur werden verschiedene Arten des Abplatzens unterschieden, darunter das explosive Abplatzen, das fortschreitende Abplatzen und das oberflächliche Abplatzen. Unter diesen hat das explosive Abplatzen die größte Aufmerksamkeit auf sich gezogen, da es zu einer raschen Verringerung der effektiven Dicke des Bauteils und möglicherweise zur Freilegung der Bewehrung führen kann. Zahlreiche experimentelle Studien haben jedoch gezeigt, dass dieses Phänomen weder systematisch noch unvermeidbar ist, sondern von einer Kombination von Faktoren abhängt, die mit dem Material, der Geometrie und den Brandbedingungen zusammenhängen *(Hertz, 2003; Kodur, 2014)*. Zu den wichtigsten Parametern, die die Wahrscheinlichkeit eines Abplatzens beeinflussen, gehören das Wasser-Zement-Verhältnis, die Durchlässigkeit des Betons, der Sättigungsgrad, die Erwärmungsgeschwindigkeit und der Spannungszustand des Bauteils. Insbesondere hochfeste und porenarme Betone reagieren empfindlicher auf dieses Phänomen, da sich der bei hohen Temperaturen entstehende Wasserdampf nur schwerer abführen lässt. Umgekehrt weisen gewöhnliche Betone und dicke Bauteile im Allgemeinen eine geringere Neigung zum explosiven Abplatzen auf *(FIB, Bulletin 38, 2007; CEB, Bulletin 208, 1991)*.

Aus bautechnischer Sicht ist es wichtig zu beachten, dass die Eurocodes, insbesondere EN 1992-1-2, das mögliche Auftreten von Abplatzungen durch vorsorgliche Ansätze berücksichtigen, die die Tragwerkssicherheit auch bei begrenztem Materialverlust an der Oberfläche gewährleisten. Mehrere europäische Länder, wie beispielsweise Italien und Deutschland, haben diese Bestimmungen in ihre

nationalen Vorschriften und fördern damit einen leistungsbasierten Ansatz, der sich auf die ganzheitliche Bewertung des Tragverhaltens im Brandfall konzentriert, anstatt von Annahmen über lokale Schäden auszugehen.

Es ist zudem wichtig zu betonen, dass bei den meisten in der Literatur analysierten realen Bränden Abplatzungen nicht automatisch zum Einsturz des Bauwerks führen. Untersuchungen nach Bränden zeigen, dass Stahlbetonkonstruktionen selbst bei lokalem Ablösen der Betondeckung oft eine ausreichende Resttragfähigkeit behalten, um einen globalen Einsturz zu verhindern, sodass Lösch- und Evakuierungsmaßnahmen sicher durchgeführt werden können *(Buchanan & Abu, 2017)*.

Die moderne Brandschutzplanung für Stahlbeton umfasst spezifische Maßnahmen zur Risikominderung, die darauf abzielen, die Wahrscheinlichkeit kritischer Phänomene unter Brandbedingungen zu verringern. Dazu gehören die korrekte Bemessung der Betondecke, abgestimmt auf die geforderte Feuerwiderstandsklasse, die Auswahl von Betonen mit kontrollierter Zusammensetzung und angemessener Durchlässigkeit sowie der Einsatz von Polypropylenfasern, die in der Literatur weithin als wirksame Lösung dokumentiert sind, um die Ableitung des Dampfdrucks innerhalb der zementären Matrix während der Erwärmung zu erleichtern *(FIB, Bulletin 38, 2007; Hertz, 2003)*.

Abb. 4: Einige Auswirkungen von Abplatzungen (Innocenzo Mastronardi)

Das Abplatzen stellt somit ein potenziell kritisches, aber beherrschbares Phänomen dar, dessen Auftreten von genau identifizierten und umfassend untersuchten Variablen abhängt. Seine angemessene Berücksichtigung bei der Planung und Sicherheitsbewertung ermöglicht es, übermäßig konservative Interpretationen zu vermeiden und gleichzeitig die Fähigkeit des Betons anzuerkennen, auch unter extremen Brandbedingungen eine zuverlässige Tragfähigkeit zu gewährleisten.

2.3.1.4 Zusätzliche Schutzmaßnahmen (Betondeckung, Schutzputze)

Bei Stahlbetonkonstruktionen beruht die Feuerwiderstandsfähigkeit nicht ausschließlich auf aufgebrachten Schutzsystemen, sondern wird weitgehend durch die inhärente Konfiguration des Bauteils gewährleistet, insbesondere durch die Dicke der Betondeckung und die Gesamtmasse des Querschnitts. Zusätzliche Schutzsysteme dienen daher eher der Optimierung und Leistungssteigerung als dass sie eine wesentliche Voraussetzung für das Erreichen der vorgeschriebenen Sicherheitsniveaus darstellen.

Die Betondeckung stellt die erste und wichtigste Schutzmaßnahme für die Bewehrung gegen thermische Einwirkungen dar. Sie erfüllt eine doppelte Funktion: Einerseits verzögert sie den Temperaturanstieg im Stahl, andererseits trägt sie zur Stabilität des Querschnitts bei, selbst bei lokal begrenzten Oberflächenbeschädigungen. Die Norm EN 1992-1-2 enthält genaue Angaben zu den erforderlichen Mindestüberdeckungsdicken, um bestimmte Feuerwiderstandsklassen zu gewährleisten, abhängig von der Art des Bauteils, den einwirkenden Lasten und der Dauer der Brandbelastung. Die französische Norm übernimmt diese Kriterien und macht sie zu einem festen Bestandteil der üblichen Bemessungspraxis. Zusätzlich zur Betondeckung können in bestimmten Situationen Schutzputze oder feuerbeständige Beschichtungen verwendet werden, um die Feuerwiderstandsdauer weiter zu erhöhen oder geometrische Einschränkungen auszugleichen. Diese Lösungen kommen in der Regel eher bei Nachrüstungen, Sanierungen oder Eingriffen an bestehenden Bauwerken zum Einsatz als im Neubau, wo die erforderliche Feuerwiderstandsdauer oft allein durch den Querschnitt erreicht wird.

In der Fachliteratur wird hervorgehoben, dass die Wirksamkeit zusätzlicher Schutzsysteme für Beton aufgrund der physikalischen und chemischen Verträglichkeit zwischen dem Untergrund und den Schutzmaterialien im Allgemeinen hoch ist. Im Gegensatz zu anderen Systemen hängt das Brandverhalten von Beton nicht entscheidend von der Unversehrtheit einer dünnen Schutzschicht ab; selbst bei einer teilweisen Beschädigung der Beschichtung sorgt die Masse des Bauteils weiterhin für eine erhebliche thermische Trägheit, wodurch die Erwärmungsgeschwindigkeit des inneren Kerns begrenzt wird *(Kodur, 2014; FIB, Model Code 2010)*.

Ein weiterer relevanter Aspekt betrifft die langfristige Haltbarkeit von Schutzsystemen. Die Betondeckung, die ein integraler Bestandteil des Bauwerksquerschnitts ist, erfordert keine spezifische Instandhaltung, um die Brandschutzleistung aufrechtzuerhalten. Ebenso weisen herkömmliche, auf Beton aufgetragene Putzschichten eine gute Beständigkeit gegen umweltbedingte und mechanische Abnutzung auf, wodurch die Abhängigkeit des Brandschutzes von regelmäßigen Inspektions- und Reparaturmaßnahmen verringert wird.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass bei Stahlbetonkonstruktionen die erforderliche Feuerwiderstandsdauer sich aus der Betondecke und der Masse des Querschnitts ergibt, während zusätzliche Schutzsysteme die vom Querschnitt selbst erreichte Feuerwiderstandsdauer verlängern. Diese Eigenschaft ermöglicht es, ein hohes Maß an Brandschutz durch robuste Konstruktionslösungen zu erreichen, die nur minimal von den Betriebsbedingungen abhängig sind und während der gesamten Nutzungsdauer des Bauwerks nur begrenzte Auswirkungen auf die Instandhaltungsmaßnahmen haben.

2.3.2 Holz

Bauholz, sei es in massiver Form oder als Holzwerkstoffe wie Brettschichtholz und Brettsperrholz (CLT/X-Lam), weist ein Brandverhalten auf, das sich erheblich von dem nicht brennbarer Baustoffe unterscheidet. Dieses Verhalten wird durch das gleichzeitige Auftreten physikalisch-chemischer, thermischer und mechanischer Phänomene bestimmt, die sich während des Brandereignisses in wechselseitiger Abhängigkeit entwickeln.

Aus brandschutztechnischer Sicht muss Holz bei Brandbeanspruchung als reaktives Material betrachtet werden, da es thermische Zersetzungs- und Verbrennungsprozesse durchläuft, die sowohl die Brandentwicklung als auch das tragtechnische Verhalten des Bauteils direkt beeinflussen. Folglich lässt sich das Brandverhalten von Holzkonstruktionen nicht allein auf der Grundlage der mechanischen Eigenschaften des Materials bei Umgebungstemperatur bewerten; vielmehr erfordert es eine integrierte Analyse der Zersetzungsmechanismen und der Brandbeanspruchungsbedingungen.

In Europa wird die brandtechnische Bemessung von Tragwerken durch die Norm EN 1995-1-2 (Eurocode 5) geregelt, die einen leistungsbasierten Ansatz verfolgt, bei dem im Vordergrund die fortschreitende Verringerung des tragenden Querschnitts infolge der Verkohlung steht. Dieser Ansatz ermöglicht die Modellierung des Materialverhaltens durch vereinfachte Verfahren unter der Annahme definierter Brandszenarien und Brandbedingungen. In der wissenschaftlichen Literatur wird jedoch hervorgehoben, dass das tatsächliche Verhalten von Holzkonstruktionen stark von Variablen wie der Art des Holzprodukts, der geometrischen Konfiguration der Bauteile, der Belüftung der Brandabschnitte und dem Grad der Einwirkung auf die Tragflächen beeinflusst wird *(SFPE, 2016; Buchanan & Abu, 2017)*.

In den letzten Jahren haben experimentelle Forschungsprogramme im Originalmaßstab das Verständnis des Brandverhaltens von Holzkonstruktionen, insbesondere in mehrgeschossigen Gebäuden, erheblich verbessert. Diese Studien haben gezeigt, dass das Brandverhalten je nach den gewählten Entwurfs- und Konstruktionsentscheidungen erheblich variieren kann, was die Bedeutung einer sorgfältigen Bewertung der Materialzerstörungsmechanismen und der damit verbundenen baulichen Folgen unterstreicht *(Fire Protection Research Foundation, 2020)*.

Vor dem Hintergrund dieser Überlegungen muss das Brandverhalten von Bauholz als Ergebnis eines komplexen Systems interpretiert werden, bei dem das endgültige Verhalten von der Wechselwirkung zwischen dem Material, dem Bausystem und dem Brandszenario abhängt. Dieser Rahmen bildet die Grundlage für die Analyse der einzelnen Mechanismen, die das Brandverhalten von Tragwerken bestimmen und die in den folgenden Abschnitten erörtert werden.

2.3.2.1 Brennbarkeit und Verkohlungsverhalten

Das Brandverhalten von Bauholz wird durch physikalisch-chemische Prozesse der thermischen Zersetzung bestimmt, die bereits lange vor dem Einsetzen sichtbarer Flammen beginnen. Mit steigender Temperatur durchläuft Holz eine Pyrolyse, bei der seine

Polymerketten (Zellulose, Hemicellulose und Lignin) sowie die Bildung brennbarer Gase, Dämpfe und kohlenstoffhaltiger fester Rückstände. Diese Prozesse setzen bei Temperaturen im Bereich von etwa 200–250 °C ein und gehen der Phase der Flammenverbrennung voraus *(Drysdale, An Introduction to Fire Dynamics, 2011)*. Da Holz ein brennbarer Werkstoff ist, zersetzt es sich bei Hitzeeinwirkung nicht nur, sondern interagiert aktiv mit dem Feuer und nährt den Verbrennungsprozess durch die Freisetzung von Pyrolysegasen. Die Menge und die Geschwindigkeit, mit der diese Gase freigesetzt werden, hängen von Faktoren wie Holzart, Dichte, Feuchtigkeitsgehalt und dem zugeführten Wärmefluss ab, wodurch das Phänomen von Natur aus variabel und stark vom jeweiligen Brandszenario abhängig ist *(SFPE, 2016)*.

Die Verkohlung stellt das makroskopische Ergebnis dieser Prozesse dar, bei dem die äußere Schicht des Holzes in Kohle umgewandelt wird, ein sprödes und nicht tragfähiges Material mit einer deutlich geringeren Wärmeleitfähigkeit als bei frischem Holz. Obwohl diese Kohleschicht die Wärmeübertragung in das Bauteil verlangsamen kann, ist ihre Bildung eine direkte Folge der Verbrennung und entspricht daher einem irreversiblen Verlust an Masse und tragfähigem Querschnitt *(Buchanan & Abu, 2017)*.

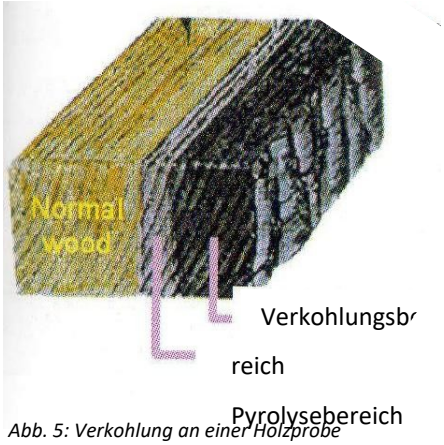


Abb. 5: Verkohlung an einer Holzprobe

Brandversuche in Realmaßstab in Brandabschnitten haben gezeigt, dass die Verbrennung des Holzes, wenn tragende Holzoberflächen freiliegen, zur Gesamtenergiebilanz des Brandes beiträgt und sowohl die Wärmefreisetzungsrate als auch die Dauer des Brandereignisses beeinflusst. Insbesondere hat die Fire Protection Research Foundation hervorgehoben, dass der Beitrag von Holz während der voll entwickelten und der Abklingphase eines Brandes erheblich sein kann, insbesondere unter kontrollierten oder begrenzten Belüftungsbedingungen (FPRF, 2020; Hadden et al., 2017).

Es ist wichtig zu betonen, dass die Verkohlung keine Form des „Selbstschutzes“ im baulichen Sinne darstellt; vielmehr handelt es sich um ein Nebenprodukt der Verbrennung, dessen Entstehung eng mit der Intensität und Dauer der Brandbelastung verbunden ist. Das Brandverhalten von Holz muss daher als Ergebnis eines dynamischen Gleichgewichts zwischen Wärmeentwicklung, Materialverlust und der isolierenden Wirkung der Kohleschicht verstanden werden – ein Gleichgewicht, das sich je nach Brandbedingungen erheblich verschieben kann.

2.3.2.2 Beitrag zur Brandlast

Die Brandlast ist die potenziell freigesetzte Wärmeenergie pro Einheit der Bruttogeschossfläche, ausgedrückt in MJ/m², und umfasst alle vorhandenen brennbaren Materialien: Einrichtungsgegenstände, Oberflächenbeschichtungen und gegebenenfalls Bauteile *(EN 1991-1-2)*.

Bei Gebäuden mit einer tragenden Holzkonstruktion muss unterschieden werden zwischen:

- der Brandlast, die mit dem Hausrat (Möbel, Kunststoffe, Textilien usw.) verbunden ist,
- Brandlast durch Oberflächenbeschichtungen und Verkleidungen.
- einem etwaigen Beitrag der Holzkonstruktion selbst, wenn diese während des Brandes freiliegt oder freigelegt wird

Gemäß Eurocode 1 – EN 1991-1-2 kann der Beitrag brennbarer Bauteile bei der Bestimmung der thermischen Einwirkung ebenfalls berücksichtigt werden, sofern sie am Verbrennungsprozess beteiligt sind. Der tatsächliche Beitrag hängt von den Expositionsbedingungen ab: Sind die Bauteile vollständig umschlossen, wird ihre Beteiligung verzögert oder eingeschränkt; fehlt der Schutz oder versagt er durch Ablösung, Beschädigung oder Alterung im Laufe der Zeit, trägt die Holzoberfläche zur verfügbaren Energie bei. Die experimentelle Literatur zeigt, dass Holz bei Vorhandensein großer und freiliegender Holzoberflächen an der Phase nach dem Flashover teilnehmen und zur Dauer und Intensität des Brandes beitragen kann, wenn auch mit relativ vorhersehbaren Verkohlungsraten *(Buchanan & Abu, 2017; Frangi et al., 2008)*. Studien zu Massivholzgebäuden haben gezeigt, dass bei einigen Produkten Delaminierung und das Abfallen der Verkohlungsschicht die freiliegende Holzoberfläche und damit die Wärmefreisetzung vergrößern können (*Brandon et al., 2018; Awadallah et al., 2024).*

Jüngste Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass dieses Verhalten stark produktspezifisch ist und je nach Klebstoffformulierung, Lamellendicke, Schichtung und Brandbedingungen erhebliche Unterschiede aufweist (*RISE, 2021; Wiesner et al., 2022*). Folglich sollten Delaminierung oder das Ablösen der Verkohlungsschicht nicht als inhärente Eigenschaft von CLT betrachtet werden, sondern vielmehr als ein Phänomen, das für das jeweilige Produkt und Klebstoffsystem einer Bewertung bedarf. Für den Brandschutz gilt Holz daher nicht als einheitliches Material. Produkttyp, Brandbelastungskonfiguration, Klebstoffsystem und Schutzstrategie beeinflussen jeweils das Ergebnis, sodass der Beitrag der Konstruktion zur Brandlast keine feste Größe ist und eine Aussage über Massivholz im Brandfall nur für die jeweilige Kombination dieser vier Faktoren gilt. Eine einzelne exponierte Wand ist nicht gleichbedeutend mit mehreren exponierten Wänden in Kombination mit einer exponierten Decke, und die Geometrie des Brandabschnitts ist ebenso wichtig wie das Ausmaß der Exposition: In einem der natürlichen Brandversuche führte die Position der Öffnung zu einer deutlich asymmetrischen Verkohlung auf gegenüberliegenden Seiten derselben Säule, was eher auf Unterschiede in der lokalen Sauerstoffkonzentration als auf die Temperatur zurückgeführt wurde (*Robert et al., 2023*). EN 1995-1-2 und EN 1991-1-2 liefern die Bemessungsmethoden, mit denen diese Variablen berücksichtigt werden, während die Bedingungen, unter denen Holzbauwerke in mehrgeschossigen Gebäuden zugelassen sind, durch nationale Bauvorschriften festgelegt werden.
Diese materialbezogene Eigenschaft schränkt die Erreichbarkeit bestimmter Feuerwiderstandsklassen nicht zwangsläufig ein, kann jedoch die Dauer eines natürlichen Brandes und die Bewertung der Folgen nach dem Brandereignis in schweren Szenarien beeinflussen.

2.3.2.3 Verkohlungsrate und wirksamer Querschnitt

In Europa basiert die brandtechnische Bemessung von Holzbauteilen auf der Bewertung der Verkohlungsrate und der daraus resultierenden Bestimmung des verbleibenden effektiven Querschnitts. Die Norm EN 1995-1-2 verwendet ein vereinfachtes Modell, bei dem der Verlust der Tragfähigkeit direkt mit dem zeitlichen Fortschreiten der Verkohlungsfront verknüpft ist.

Die Norm gibt nominale Verkohlungsraten (β_o) an, die je nach Art des Holzprodukts (Massivholz, Brettschichtholz, CLT-Platten) und den Brandbedingungen differenziert sind. Typische nominale Verkohlungsraten liegen zwischen 0,7 und 0,9 mm/min, während die mechanischen Eigenschaften des unverkohlt gebliebenen Kerns von erhöhten Temperaturen im Wesentlichen unbeeinträchtigt bleiben. Diese Werte stimmen mit Messungen unter Standard-Brandbedingungen überein, bei denen für die ersten 10 mm der nach der ISO 834-Kurve geprüften Brettschichtholzstützen ein Wert von 0,67 mm/min gemessen wurde. Unter natürlichen Brandbedingungen wiesen dieselben Querschnitte in allen sieben Brandabschnittstests über die ersten 10 mm Rußbildungsraten zwischen 1,52 und 2,00 mm/min auf – das Zwei- bis Dreifache des Standardwerts –, die sich in Richtung der Zerfallsphase progressiv verringerten (*Robert et al., 2023*). Zu diesen Nennwerten addiert die Norm eine zusätzliche Dicke, die Nullfestigkeitsschicht, die Material darstellt, das zwar nicht vollständig verkohlt ist, aber als nicht zur Tragfähigkeit beitragend angesehen wird (EN 1995-1-2). Es handelt sich dabei nicht um eine in Versuchen beobachtete physikalische Grenze, sondern um einen Bemessungszuschlag, der so kalibriert ist, dass die Überprüfung über den gesamten von der Norm abgedeckten Bereich hinweg auf der sicheren Seite bleibt.

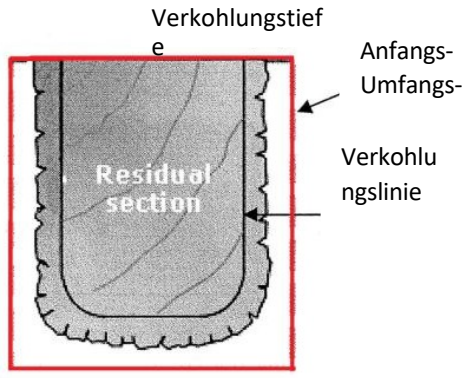


Abb. 6, Verkohlungsverhalten und wirksamer Querschnitt

Der vereinfachte Bemessungsansatz behandelt das Problem als geometrische Verringerung des tragenden Querschnitts, wodurch die Anwendung von Berechnungsmethoden ermöglicht wird, die denen bei Umgebungstemperatur entsprechen. Die ihm zugrunde liegenden Idealvorstellungen – eine gleichmäßige Verkohlungsfront und eine konstante Verkohlungsrate (*Buchanan & Abu, 2017*) – sind bewusst gewählt. Holz ist ein natürlicher Werkstoff, dessen Dichte, Feuchtigkeitsgehalt und Fehlerverteilung sowohl innerhalb einer Art als auch innerhalb eines einzelnen Bauteils variieren. Die Norm trägt dieser Variabilität Rechnung, indem sie Nennwerte verwendet, die auf den oberen Bereich des beobachteten Verhaltens abgestimmt sind, sodass das Bemessungsergebnis konservativ bleibt, ohne dass eine fallweise Rekonstruktion des Verkohlungsprozesses erforderlich ist. Das Modell ist daher eher eine sichere Bemessungsmethode als eine vorhersagende Beschreibung eines bestimmten Bauteils in einem bestimmten Brandfall, und dieselbe Unterscheidung gilt auch für die vereinfachten Bestimmungen der EN 1992-1-2.

Umfangreiche experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass die Verkohlungsrate in Abhängigkeit von Parametern variieren kann, die in vereinfachten Bemessungsmodellen nicht explizit berücksichtigt werden, wie beispielsweise Brandintensität, Belüftung des Brandabschnitts, mehrseitige Einwirkung und das Vorhandensein von baulichen Unstetigkeiten *(SFPE, 2016)*. Insbesondere unter nicht standardisierten realen Brandszenarien kann der einfallende Wärmefluss erheblich von dem der ISO-834-Kurve abweichen und dadurch den Verlauf der Verkohlung beeinflussen.

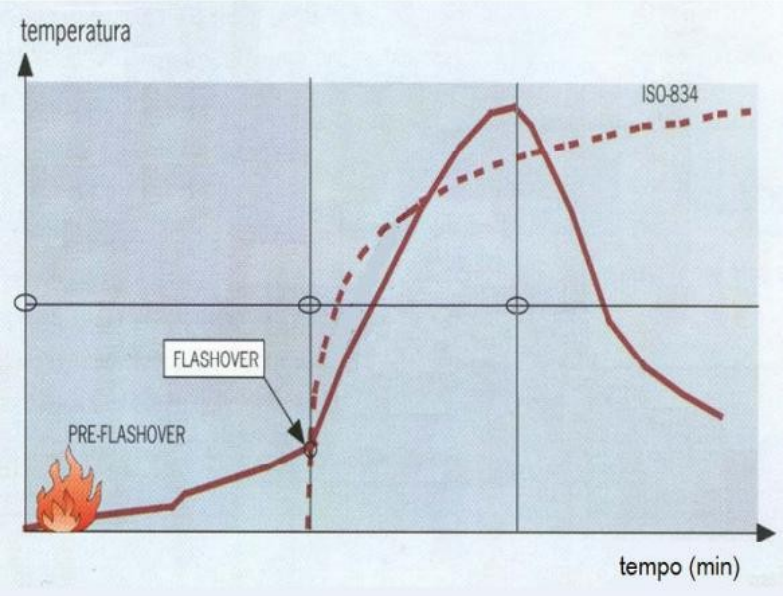


Abb. 7: Natürliche Brandkurven im Vergleich zur ISO-834-Standardbrandkurve (Ing. G. Biffarella, 2014)

Bei verleimten Holzwerkstoffen ergeben sich zusätzliche Komplexitäten aus dem Verhalten der Klebefugen. In der Literatur ist dokumentiert, wie Delaminationsphänomene die effektive Geometrie des tragenden Querschnitts während der Brandbeanspruchung verändern können, was zu einer Verkohlungsfront führt, die entgegen den Konstruktionsannahmen weder kontinuierlich noch gleichmäßig fortschreitet *(Lange et al., 2014; Frangi et al., 2018)*. Unter solchen Bedingungen hängt die Bestimmung des verbleibenden effektiven Querschnitts in hohem Maße von den zugrunde gelegten Annahmen ab.

Aus ingenieurtechnischer Sicht stellt die Verringerung des effektiven Querschnitts einen irreversiblen Verlust an tragfähigem Material dar, der mit der Dauer der Brandbeanspruchung zunimmt. Innerhalb des von der Norm abgedeckten Bereichs bieten die nominalen Verkohlungsraten und die Schicht ohne Festigkeit eine Bemessungsreserve gegen diesen Verlust. Dieselben Versuche zeigten auch, dass sich die Nullfestigkeitsschicht bei natürlicher Brandbeanspruchung nicht als Schicht konstanter Tiefe ausbreitet, sodass sich eine Bemessungsmethode für solche Brände nicht durch einfache Anpassung der beiden konstanten Werte der vereinfachten Methode ableiten lässt (*Robert et al., 2023*). Außerhalb dieses Bereichs, beispielsweise bei längerer Einwirkung, mehrseitiger Einwirkung oder wenn durch Delaminierung frisches Holz freigelegt wird, sollte überprüft werden, inwieweit die Bemessungsreserve angesichts des spezifischen Brandszenarios und, sofern relevant, anhand produktspezifischer Prüfnachweise noch verfügbar ist (*Fire Protection Research Foundation, 2020*).

2.3.2.4 Resttragfähigkeit und Vorhersagbarkeit des Tragverhaltens

Die Resttragfähigkeit von Holzkonstruktionen unter Brandbedingungen ergibt sich aus dem kombinierten Effekt des verbleibenden wirksamen Querschnitts und der Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften des nicht verkohlten Materials, das zunehmend erhitzt wird. Im Gegensatz zur statischen Bemessung bei Umgebungstemperatur erfordert die Bewertung der Feuerwiderstandsfähigkeit die Berücksichtigung eines sich kontinuierlich verändernden Systems, in dem die Tragfähigkeit im Laufe der Zeit in Abhängigkeit von der thermischen Einwirkung abnimmt.

Die Norm EN 1995-1-2 ermöglicht die Abschätzung der Resttragfähigkeit durch Überprüfung des wirksamen Querschnitts, wobei davon ausgegangen wird, dass das verbleibende Material konstante mechanische Eigenschaften beibehält, die den Bemessungswerten bei Umgebungstemperatur entsprechen. Dieser Ansatz steht zwar im Einklang mit dem Ziel der normativen Vereinfachung, führt jedoch eine zusätzliche idealisierte Annahme ein, da er die fortschreitende Verringerung der mechanischen Eigenschaften in den erhitzten inneren Schichten des Holzes vernachlässigt *(Buchanan & Abu, 2017)*. In realen Brandszenarien kann die Temperaturverteilung innerhalb des Querschnitts ungleichmäßig sein, sodass die Beziehung zwischen Restquerschnitt und Tragfähigkeit von den Vorhersagen vereinfachter Modelle abweichen kann.

Aus quantitativer Sicht hängt die Tragfähigkeit eines Bauteils mit gleichmäßigem Querschnitt nichtlinear von seinen geometrischen Abmessungen ab. Bei rechteckigen Querschnitten unter Biegebelastung ist beispielsweise das elastische Querschnittsmodul proportional zum Produkt aus Breite und dem Quadrat der Höhe ($b \times h^2$). Folglich kann bereits eine geringfügige Verringerung der Abmessungen durch Verkohlung zu einer erheblichen Verringerung der Tragfähigkeit führen. Als anschauliches Beispiel: Bei einem rechteckigen Holzbauteil, das an drei Seiten einem Brand ausgesetzt ist, führt eine Verringerung sowohl der Breite als auch der Höhe um 10 % (Ausgangsabmessungen normiert auf 1; reduziert auf $0{,}9 \times 0{,}9^2$) zu einer Verringerung des Querschnittsmoduls um etwa 30 %, während eine Verringerung um 15 % zu einem Rückgang von rund 40 % führt. Ob diese Verringerung die im Grenzzustand der Tragfähigkeit verfügbare Sicherheitsreserve ausschöpft, hängt vom Auslastungsgrad des Bauteils in der Brandbemessungssituation ab. Der Zusammenhang ist eher illustrativ als allgemein gültig, da der tatsächliche Verlust vom maßgeblichen Versagensmechanismus – sei es Biegung, Druck, Zug, Scherung oder Standsicherheit –, von der Querschnittsgeometrie und von den Belastungsbedingungen abhängt. Bei einer fünfschichtigen vertikalen CLT-Platte beispielsweise verringert eine 40-prozentige Verringerung der Dicke – was dem Verlust von zwei Schichten entspricht – den Trägheitsradius und erhöht die Schlankheit, sodass die Tragfähigkeit insbesondere unter exzentrischen vertikalen Lasten eher durch die Standsicherheit als durch die Festigkeit bestimmt wird. Diese Beispiele veranschaulichen die Empfindlichkeit der Resttragfähigkeit gegenüber der Verringerung des wirksamen Querschnitts.

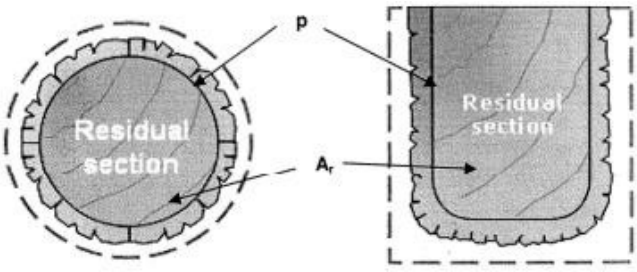


Abb. 8, Beispiele für Restquerschnitte bei runden und rechteckigen Probekörpern

Bei verleimten Holzwerkstoffen wird die Vorhersagbarkeit der Resttragfähigkeit zudem durch das Verhalten der Klebstoffe bei erhöhten Temperaturen beeinflusst. Phänomene des Haftungsverlusts können nicht-progressive Veränderungen im strukturellen Verhalten auslösen, die nicht allein auf die geometrische Verringerung des Querschnitts zurückgeführt werden können; Untersuchungen an CLT-Platten haben plötzliche Einbrüche der Gesamttragfähigkeit des Bauteils gezeigt, die während der Brandbeanspruchung zu Diskontinuitäten führen (*Lange et al., 2014; Frangi et al., 2018*).

Das Brandverhalten einer Massivholzkonstruktion hängt vom gesamten Bausystem ab und nicht allein von den Hauptbauteilen. Wand-Boden-Anschlüsse, Eckverbindungen, Versorgungsdurchführungen sowie Verbindungen aus Brettschichtholz und CLT werden durch standardisierte Prüfverfahren nicht im gleichen Umfang abgedeckt wie die Platten selbst, und die für diese Details verfügbare Dokumentation ist entsprechend begrenzter. Die für ein Bauteil festgestellte Feuerwiderstandsfähigkeit lässt sich daher nicht automatisch auf die Konstruktion übertragen, in die es eingebaut ist.

Ein weiterer Unterschied betrifft den Brand selbst. Bei einer standardmäßigen Feuerwiderstandsprüfung wird die thermische Einwirkung auferlegt und ist unabhängig vom Prüfkörper, während in einem Gebäude mit freiliegendem Holz die Konstruktion dem Brandabschnitt zusätzlichen Brennstoff zuführt, sodass die Schwere des Brandes zum Teil eine Folge der zu bewertenden Konstruktion ist. Die Klassifizierung beschreibt daher das Verhalten eines Bauteils bei einer definierten Einwirkung, nicht die Einwirkung, die sich tatsächlich entwickeln wird.

Ein weiterer kritischer Aspekt betrifft die Phase nach dem Flashover und mögliche Abkühlphasen. Die Fire Protection Research Foundation hat hervorgehoben, dass bei lang andauernden Bränden die verbleibende Tragfähigkeit durch komplexe thermische Zyklen beeinflusst werden kann, bei denen auf teilweise Abkühlphasen eine erneute Erwärmung folgt, was kumulative Auswirkungen auf den Materialabbau hat *(FPRF, 2020)*. Jüngste experimentelle Untersuchungen unterstreichen zudem die Relevanz des Tragverhaltens während der Abkühlphase eines Brandes. Das „Burnout Resistance Project“ umfasste Ofenversuche an Betonsäulen an der Universität Lüttich und an GLT-Säulen an der TU Braunschweig, sowohl gemäß der ISO-834-Kurve als auch unter kontrollierten Aufheiz- und Abkühlbedingungen, gefolgt von natürlichen Brandversuchen an GLT-Säulen am CERIB. Die Ergebnisse zeigen, dass das Tragverhalten von Holzbauteilen nicht allein anhand ihres Verhaltens während der Aufheizphase bewertet werden kann.

Numerische Analysen deuten darauf hin, dass die Dauer der Aufheizphase (DHP), die zum Versagen der Konstruktion führt, zwischen 20 % und 50 % der normierten Feuerwiderstandsdauer liegt (*Gernay, 2021*). Ofenversuche im Originalmaßstab bestätigten den unteren Bereich dieses Spektrums: GLT-Stützen mit den Maßen 280 × 280 mm und einer Nennfeuerwiderstandsdauer von 55–58 Minuten versagten bereits nach einer Aufheizphase von nur 15 Minuten, während identische Stützen, die 10 Minuten lang erhitzt wurden, standhielten, was eine gemessene DHP von 18–27 % ergab (*Robert et al., 2023*). Ein als R60 klassifiziertes Bauteil kann daher während oder nach der Abklingphase zusammenbrechen.

Dieselben Studien zeigen, dass bei Holzbauteilen verzögerte Versagensmechanismen auftreten können, die mit dem fortschreitenden Abbau des Restquerschnitts und dem anhaltenden Eindringen von Wärme in den Kern während der Abkühlphase zusammenhängen.
Einer der Mechanismen, die diesen Prozess aufrechterhalten, ist die Schwelbrandverbrennung, eine langsame, flammenlose Oxidation, die noch lange nach dem scheinbaren Erlöschen eines Feuers andauern kann. Sie hält bei Sauerstoffkonzentrationen an, die zu niedrig sind, um eine Flammenverbrennung aufrechtzuerhalten, und eine Flammenverbrennung tritt erst wieder auf, wenn die

Durch das Schwelen wird die Platte durchbrochen und die verkohlte Oberfläche der Atmosphäre ausgesetzt. In einem Vollmaßstabstest an einem gekapselten CLT-Brandabschnitt wurde zwei Stunden nach der Entzündung Rauch an der Schnittstelle zwischen Wand und Boden beobachtet – eines der oben diskutierten Details –, nach zwölf Stunden trat sichtbares Flammen auf, und etwa neunzig Stunden nach der Entzündung hatte sich das Schwelbrandfeuer bis zum Dach ausgebreitet (*Lennon & Lalu, 2025*), wobei über diesen Zeitraum hinweg wiederholt Wasser aufgebracht wurde. Derselbe Test zeigte, dass der Brandabschnitt während des Abbrennens der beweglichen Brandlast seine Gesamtstabilität und Abschottung beibehielt; das Problem betrifft also eher den darauf folgenden Zeitraum als die Nennleistung selbst. Die Kapselung verzögert die Entzündung, verhindert jedoch nicht das Schwelbrand, das sich unter den Schutzschichten ausbreiten kann und ohne Infrarotbildgebung schwer zu erkennen ist, sodass sich die Inspektion nach dem Brand nicht allein auf eine visuelle Beurteilung stützen kann (*Lennon & Lalu, 2025*).

Die Selbstlöschung ist daher keine vorhersehbare oder inhärente Eigenschaft von Massivholz. Ob sie eintritt, hängt von der Belüftung, dem einfallenden Wärmefluss, der freiliegenden Oberfläche, der Delaminierung und der Klebeleistung ab, und das Erlöschen der sichtbaren Flammen bedeutet nicht, dass die Verkohlung oder der strukturelle Verfall aufgehört haben. In fünf der sieben natürlichen Brandversuchen versagten die Stützen während der Abkühlphase, in einem Fall 71 Minuten nach der Entzündung, als die Raumtemperaturen bereits auf 200–300 °C gesunken waren, und die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die Tatsache, dass ein Bauteil eine gewisse Selbstlöschung aufweist, nicht bedeutet, dass seine Stabilität gewährleistet ist (*Robert et al., 2023*). Strukturelle Instabilität kann sich in einem späteren Stadium entwickeln, wenn sich innere Spannungen, verminderte Materialfestigkeit und geometrische Schwächung unter abnehmenden, aber immer noch kritischen thermischen Bedingungen kumulieren. Dies ist besonders relevant in natürlichen Brandszenarien, in denen sich die Erwärmungs- und Abkühlungszyklen von standardisierten Brandkurven unterscheiden und in denen, wie in Abschnitt 2.3.2.3 quantifiziert, die Verkohlungsrate im Zeitverlauf nicht konstant ist. Diese Erkenntnisse bestätigen, dass die Bewertung der Resttragfähigkeit nicht auf Spitzentemperaturbedingungen beschränkt werden darf, sondern den gesamten thermischen Verlauf des Brandes, einschließlich der Abkühlphasen, berücksichtigen muss.

Insgesamt hängt die Resttragfähigkeit von Holzkonstruktionen im Brandfall eng mit der Gültigkeit der vereinfachten Modelle und deren Anwendung innerhalb der Grenzen zusammen, für die sie entwickelt wurden.

2.3.2.5 Bedeutung des passiven Brandschutzes (Verkleidungen, intumeszierende Beschichtungen)

Bei Holzkonstruktionen hängt das Erreichen der gesetzlich vorgeschriebenen Feuerwiderstandsdauer in der Regel vom Einsatz passiver Schutzsysteme ab, wie beispielsweise Gipskartonverkleidungen, Schutzplatten oder intumeszierende Beschichtungen. Diese Lösungen verändern das eigentliche Verhalten des Materials nicht, sondern verzögern die direkte Einwirkung des Feuers auf das Holz und begrenzen so den Beginn von Pyrolyse- und Verkohlungsprozessen.

Die Norm EN 1995-1-2 ermöglicht es, die Schutzwirkung von Verkleidungen anhand von Modellen zu berücksichtigen, die eine effektive Schutzzeit (t_p) einführen, während der das Holzbauteil nicht direkt dem Feuer ausgesetzt ist. Nach Ablauf dieses Zeitraums wird das Verhalten des Holzes gemäß den Standardmodellen zur Verkohlung bewertet. Dieser Ansatz impliziert, dass das Brandverhalten der Konstruktion entscheidend von der Kontinuität und Integrität des eingesetzten Schutzsystems abhängt.

Wissenschaftliche Literatur und Prüfberichte zeigen, dass die Wirksamkeit des passiven Brandschutzes durch zahlreiche Faktoren beeinflusst werden kann, darunter die Qualität der Installation, die mechanische Festigkeit der Verkleidung, das Vorhandensein von Fugen, technische Durchführungen und bauliche Unterbrechungen *(SFPE, 2016)*. So ergaben beispielsweise Untersuchungen der Fire Protection Research Foundation, dass etwa 70 % der Brandschutzabdichtungen an Versorgungsdurchführungen Installationsmängel oder Abweichungen von den geprüften Konfigurationen aufwiesen. Darüber hinaus zeigen experimentelle Studien des National Institute of Standards and Technology, dass eine unsachgemäße Anwendung oder Beschädigungen an aufgesprühten feuerbeständigen Materialien deren effektive Feuerwiderstandsfähigkeit erheblich verringern können. Dies unterstreicht die Bedeutung der Einbauqualität und der Inspektionsverfahren, da das in Labortests erzielte Brandverhalten unter realen Baubedingungen möglicherweise nicht immer vollständig reproduziert werden kann. Bei Ablösung, Rissbildung oder lokalem Versagen der Schutzschicht kann das darunterliegende Holz plötzlich dem Feuer ausgesetzt werden, was die Zersetzungsprozesse im Vergleich zu den Auslegungsannahmen beschleunigt.

Ein besonders relevanter Aspekt betrifft die Langzeitbeständigkeit passiver Brandschutzsysteme. Mehrere Studien heben hervor, dass die Wirksamkeit von Verkleidungen und intumeszierenden Systemen stark von den Betriebsbedingungen, Wartungsmaßnahmen und Änderungen der Gebäudenutzung abhängen kann. Unfallbedingte Beschädigungen, Stöße, nachfolgende Durchbrüche oder Leistungsabfall aufgrund von Materialalterung können das Brandverhalten des Tragwerks erheblich beeinträchtigen *(Fire Protection Research Foundation, 2020)*.

Aus ingenieurtechnischer Sicht bedeutet dies, dass das Brandverhalten von Holzkonstruktionen nicht allein durch die Eigenschaften des Baustoffs bestimmt wird, sondern stark von der Zuverlässigkeit der Schutzsysteme über die gesamte Nutzungsdauer des Gebäudes abhängt. In der Fachliteratur wird diese Abhängigkeit durchweg als entscheidender Faktor bei der Brandschutzbewertung anerkannt, da sie im Vergleich zu Tragwerkssystemen, die die erforderliche Feuerwiderstandsdauer durch den Querschnitt selbst ohne aufgebrachte Schutzschichten erreichen, eine höhere Empfindlichkeit gegenüber realen Nutzungs- und Wartungsbedingungen mit sich bringt.

2.4 Brandschutzstrategien

Brandschutzstrategien stellen ein koordiniertes Bündel von planerischen, technischen und verwaltungstechnischen Maßnahmen dar, die darauf abzielen, eine Entzündung zu verhindern, die Ausbreitung des Feuers zu begrenzen, die Tragfähigkeit für einen angemessenen Zeitraum sicherzustellen und die Folgen für Menschen, Sachwerte und die Umwelt zu verringern. Diese Strategien können nicht unabhängig vom gewählten Tragwerkssystem betrachtet werden, da die physikalischen Eigenschaften und das Brandverhalten der Materialien die Gesamtwirksamkeit von Brandschutzlösungen direkt beeinflussen.

Der europäische Rechtsrahmen (EU-Verordnung Nr. 305/2011, 3110/2024, EN 13501) fördert einen leistungsbasierten Ansatz für die Brandschutzplanung, bei dem die gewählten Strategien mit dem Risikoprofil der Nutzung und den baulichen Merkmalen des Gebäudes im Einklang stehen müssen. In diesem Zusammenhang ermöglichen Baustoffe mit vorhersehbarem Brandverhalten, die nicht brennbar oder nur begrenzt brennbar sind, eine hohe thermische Trägheit aufweisen und nur in geringem Maße zur Brandausbreitung beitragen, die Umsetzung robusterer Strategien, die weniger von Hilfssystemen oder besonders kontrollierten Betriebsbedingungen abhängig sind.

Unter den Brandschutzstrategien werden in den folgenden Abschnitten Maßnahmen zur Brandabschnittsbildung, passiver und aktiver Brandschutz sowie die langfristige Instandhaltung behandelt. Jede dieser Komponenten wird stark durch das Verhalten des Baustoffs unter Brandbelastung bestimmt und beeinflusst sowohl die Planungsentscheidungen als auch die Widerstandsfähigkeit des Gebäudes während seiner gesamten Nutzungsdauer und bei der Bewältigung der Folgen eines Brandes. Wir werden untersuchen, wie verschiedene bauliche Lösungen mit diesen Strategien zusammenwirken und wie bestimmte Bauweisen von Natur aus günstigere Voraussetzungen bieten, um Schäden zu begrenzen, Menschenleben zu schützen und die wirtschaftlichen und ökologischen Folgen eines Brandereignisses zu verringern.

2.4.1 Brandabschnittsbildung

Die Brandabschnittsbildung ist eine primäre Präventionsmaßnahme, die darauf abzielt, die Ausbreitung von Feuer, Rauch und Hitze innerhalb eines Gebäudes zu begrenzen und so ausreichend Zeit für die Evakuierung der Bewohner sowie für den Einsatz von Rettungskräften zu gewährleisten. Aus regulatorischer Sicht wird die Brandabschnittsbildung auf europäischer Ebene durch die Norm EN 13501-2 geregelt, die das Feuerwiderstandsvermögen von Trennelementen definiert, und auf nationaler Ebene durch spezifische Brandschutzvorschriften, die von den einzelnen Ländern verabschiedet wurden. Italien regelt die Brandabschnittsbildung beispielsweise durch seinen *„Codice di Prevenzione* Incendi“ (Ministerialdekret vom 3. August 2015 und nachfolgende Änderungen), während Länder wie Deutschland und Frankreich ihre eigenen nationalen Vorschriften anwenden, nämlich die *„Musterbauordnung“* (MBO) und die dazugehörigen technischen Richtlinien bzw. den französischen *„Code de la Construction et de l’Habitation“* zusammen mit dem *„Règlement de sécurité contre l’incendie“,* die Anforderungen je nach Gebäudetyp und Risikoprofil festlegen.

In Stahlbetonkonstruktionen profitiert die Brandabschnittsbildung von der Nichtbrennbarkeit des Materials und seiner hohen thermischen Trägheit. Wände, Decken und Schubwände aus Stahlbeton können gleichzeitig tragende und trennende Funktionen erfüllen und bieten selbst ohne zusätzliche Schutzschichten hohe Feuerwiderstandsklassen (REI 90, REI 120 und darüber hinaus), sofern sie ordnungsgemäß gemäß EN 1992-1-2 ausgelegt sind. Dies ermöglicht eine stärkere Integration zwischen Tragwerksplanung und Brandschutzplanung,

die Abhängigkeit von aufgebrachten Systemen verringert und die langfristige Kontrolle der Brandabschnittskontinuität vereinfacht.

Bei Holzkonstruktionen erfordert die Brandabschnittsbildung einen differenzierteren Ansatz, da tragende Bauteile in der Regel nicht freigelegt werden können, wenn sie gleichzeitig eine Brandschutzfunktion erfüllen sollen. Die Brandabschnittsleistung wird typischerweise durch mehrschichtige Systeme erreicht, wie beispielsweise Gipskartonverkleidungen oder Schutzplatten, die darauf ausgelegt sind, die Entzündung und Verkohlung des Holzes zu verzögern. In der Fachliteratur wird hervorgehoben, dass die Wirksamkeit solcher Systeme stark von der Durchgängigkeit der Verkleidung und der Qualität der Installation abhängt, wodurch die Brandabschnittsbildung anfälliger für Baumängel, Versorgungsdurchführungen und altersbedingte Verschleißerscheinungen ist *(Frangi et al., 2018; FPRF, 2020)*.

Untersuchungen an realen Bränden und Versuche im Originalmaßstab zeigen, dass in Gebäuden mit Stahlbetonkonstruktionen die Brandabschnittsbildung unter extremen Brandbedingungen im Allgemeinen ihre Funktion beibehält, sodass die Ausbreitung des Feuers über den Entstehungsbrandabschnitt hinaus für die Nennzeit begrenzt bleibt und eine allgemeine Beeinträchtigung der Tragfähigkeit weniger wahrscheinlich ist. Bei mehreren Brandereignissen in mehrstöckigen Betongebäuden stellte sich heraus, dass die strukturellen Schäden lokal begrenzt waren und durch gezielte Reparaturmaßnahmen behoben werden konnten (*Buchanan & Abu, 2017*). In Holzgebäuden, bei denen die Trennfunktion auf schützenden Verkleidungen beruht, können Schäden an oder Unterbrechungen dieser Verkleidungen während des Brandes zu einem früheren Verlust der Trennfunktion führen, wodurch sich die Brandausbreitung und die Schäden auf einen größeren Teil des Gebäudes ausweiten.

Ein weiterer relevanter Aspekt betrifft die Robustheit der Brandabschnittsbildung unter nicht idealen Szenarien. Der italienische „Codice di Prevenzione Incendi“ betont die Bedeutung von Lösungen, die ihre Leistungsfähigkeit auch bei betrieblichen Unsicherheiten oder suboptimaler Instandhaltung aufrechterhalten. In dieser Hinsicht ist die durch massive Betonelemente erzielte Brandabschnittsbildung weniger von perfekten Betriebsbedingungen abhängig, während Lösungen auf der Grundlage von aufgebrachten Schutzsystemen, wie sie für Holzkonstruktionen typisch sind, ein höheres Maß an Kontrolle und Instandhaltung erfordern, um die langfristige Leistungsfähigkeit zu gewährleisten.

Eine Brandabschnittsbildung lässt sich sowohl in Stahlbeton- als auch in Holzkonstruktionen wirksam erreichen, allerdings durch unterschiedliche Planungsansätze. Bei ersteren ist die Trennfunktion oft untrennbar mit dem Bauteil verbunden; bei letzteren wird sie überwiegend zusätzlichen Systemen anvertraut. Dieser Unterschied wirkt sich auf die Gesamtsicherheit der Brandschutzstrategie und die zu erwartenden Folgen im Falle eines tatsächlichen Brandes aus und unterstreicht die zentrale Rolle einer integrierten Planung und einer ordnungsgemäßen Ausführung.

2.4.2 Passiver Brandschutz

Der passive Brandschutz ist eine Brandschutzstrategie, die bei allen Baustoffen zum Einsatz kommt, wobei die Maßnahmen je nach Material, der geforderten Feuerwiderstandsklasse und dem Gesamtbrandschutzkonzept variieren. Stahlkonstruktionen stützen sich in der Regel auf aufgebrachte Schutzmaßnahmen wie Platten, Spritzmaterialien oder intumeszierende Beschichtungen. Holzbauteile erreichen die geforderte Feuerwiderstandsklasse durch die opfernde Verkohlung eines überdimensionierten Querschnitts, durch Einkapselung oder durch eine Kombination aus beidem. Stahlbeton leitet seine Feuerwiderstandsklasse aus der Überdeckung und der Masse des Querschnitts ab, wobei ein aufgebrachter Schutz dient, um diese weiter zu verlängern. Diese Maßnahmen sollen ohne das Eingreifen aktiver Systeme sicherstellen, dass Trag- und Brandabschnittselemente ihre Feuerwiderstandsleistung für eine vorgeschriebene Dauer aufrechterhalten. Ihre Leistung hängt nicht von der Stromversorgung, einer automatischen Auslösung oder menschlichem Eingreifen ab.

Im europäischen Rechtsrahmen ist der passive Brandschutz eng mit der Brandwiderstandsklassifizierung von Bauelementen gemäß EN 13501-2 und mit der Bestimmung der Leistungsfähigkeit durch standardisierte Prüfungen (EN 1363, EN 1365) verbunden. Auf nationaler Ebene misst das französische Regulierungssystem, das in erster Linie durch den *„Code de la Construction et de l'Habitation"* und das *„Règlement de sécurité contre l'incendie"* definiert ist, dem passiven Brandschutz eine zentrale Rolle bei der Erreichung der Ziele des Personenschutzes, der strukturellen Stabilität und der Schadensbegrenzung bei.

Das Brandverhalten eines Bauteils hängt davon ab, wie viele Bedingungen erfüllt bleiben müssen, damit die angegebene Leistungsfähigkeit gegeben ist. Wenn die Feuerwiderstandsfähigkeit vom Material und dem Querschnitt selbst herrührt, sind weniger Komponenten beteiligt; wenn sie von aufgebrachten Schichten herrührt, hängt die Leistungsfähigkeit von deren Verarbeitungsqualität, Kontinuität und Zustand im Laufe der Zeit ab (*Buchanan & Abu, 2017; SFPE, 2016*).

Zu den häufig verwendeten passiven Schutzsystemen gehören feuerbeständige Putze, Trockenverkleidungen (wie Platten auf Gipsbasis), intumeszierende Beschichtungen und Mehrschichtsysteme. Bei ordnungsgemäßer Auslegung und Instandhaltung können diese Lösungen eine hohe Feuerwiderstandsfähigkeit bieten; zahlreiche experimentelle Studien und Analysen nach Brandereignissen haben jedoch gezeigt, dass ein Verlust der Kontinuität der Verkleidung oder ein vorzeitiges Ablösen dazu führen kann, dass das Tragwerk schnell der thermischen Einwirkung ausgesetzt wird, was eine Verringerung der erwarteten Leistungsfähigkeit zur Folge hat *(Frangi et al., 2018; FPRF, 2020)*.

Ein weiterer relevanter Aspekt betrifft die Dauerhaftigkeit des passiven Brandschutzes. Die von den einzelnen Ländern verabschiedeten nationalen Brandschutzrahmen betonen die Notwendigkeit, dass die ausgewählten Lösungen ihre angegebene Leistungsfähigkeit über die Zeit hinweg beibehalten, wobei die Nutzungsbedingungen und Wartungsanforderungen zu berücksichtigen sind. In diesem Sinne ist die Anfälligkeit eines Schutzsystems gegenüber Alterung, Umwelteinflüssen und Veränderungen durch die Gebäudenutzung Teil seiner Leistungsfähigkeit.

Was schließlich die Folgen eines Brandes betrifft, so begrenzt der passive Brandschutz das Ausmaß von Bauschäden und verringert die Wahrscheinlichkeit eines lokalen oder fortschreitenden Einsturzes, was die Löscharbeiten und anschließende Sanierungsmaßnahmen erleichtert. Die Fire Protection Research Foundation stellt fest, dass Gebäude, die sich durch robuste passive Brandschutzsysteme auszeichnen und weniger

Abhängigkeit von idealen Betriebsbedingungen, unter vergleichbaren Brandszenarien geringere Schadensausmaße aufweisen *(FPRF, 2020).*

2.4.3 Aktiver Brandschutz

Der aktive Brandschutz umfasst die Gesamtheit der Systeme, die eine automatische oder manuelle Aktivierung erfordern, um einen Brand zu erkennen, zu kontrollieren oder zu löschen. Zu dieser Kategorie gehören unter anderem Brandmelde- und Alarmsysteme, Rauch- und Wärmekontrollsysteme, Sprinkleranlagen und Hydranten-Netzwerke. Im Rahmen der britischen Rechtsvorschriften unterliegen diese Systeme den einschlägigen Brandschutzgesetzen, vor allem der „Regulatory Reform (Fire Safety) Order 2005“ sowie den dazugehörigen „Approved Documents“ und britischen Normen, die ihre Rolle innerhalb der Gesamtsicherheitsstrategie im Einklang mit den Zielen des Personenschutzes, des Sachschutzes und des Umweltschutzes definieren. Diese Systeme erfüllen drei unterschiedliche Funktionen. Brandmeldeanlagen dienen der Frühwarnung, bekämpfen oder löschen den Brand jedoch nicht. Herkömmliche Sprinkleranlagen sind als Brandbegrenzungssysteme konzipiert, die das Brandwachstum und die Ausbreitung des Feuers begrenzen, anstatt dessen Löschung zu gewährleisten. Nur Systeme, die für die Brandbekämpfung ausgelegt sind, dienen der Löschung des Feuers. Ihre Notwendigkeit und ihre Auslegungsanforderungen hängen von der Gebäudenutzung, der Gebäudehöhe, der Brandabschnittsbildung und dem Risikoprofil ab; für bestimmte Nutzungsarten sind sie gesetzlich vorgeschrieben.

Sowohl in Stahlbeton- als auch in Holzgebäuden spielen aktive Brandschutzsysteme eine wesentliche Rolle bei der Begrenzung der Brandausbreitung und der Verringerung der Schwere von Auslegungsszenarien. In der brandschutztechnischen Literatur wird jedoch hervorgehoben, dass die Gesamtwirksamkeit des aktiven Brandschutzes maßgeblich vom passiven und baulichen Verhalten des Gebäudes abhängt, das dessen betrieblichen Kontext bildet *(SFPE, 2016)*.

In Gebäuden mit Stahlbetonkonstruktionen wirkt der aktive Brandschutz in der Regel in einer Umgebung, die durch nicht brennbare Bauteile und eine robuste Brandabschnittsbildung gekennzeichnet ist. Unter solchen Bedingungen ist die Aktivierung von Systemen wie Sprinkleranlagen oder Rauchabzugsanlagen tendenziell wirksamer, um den Brand auf den Entstehungsraum zu beschränken, die Ausbreitungswahrscheinlichkeit zu verringern und eine besser vorhersehbare Bewältigung des Brandereignisses zu ermöglichen. Analysen realer Brände zeigen, dass in massiven Gebäuden der Beitrag aktiver Systeme oft dazu führt, dass Schäden auf Einrichtungsgegenstände und Oberflächenverkleidungen beschränkt bleiben und die tragende Struktur nur minimal beeinträchtigt wird *(Buchanan & Abu, 2017)*.

In Holzkonstruktionen spielt der aktive Brandschutz oft eine noch zentralere Rolle innerhalb der Brandschutzstrategie, da er die Brennbarkeit des Baumaterials und die größere Anfälligkeit der Leistungsfähigkeit gegenüber Schäden an passiven Brandschutzsystemen ausgleichen muss. In diesem Zusammenhang wird in der Fachliteratur betont, dass die Zuverlässigkeit aktiver Systeme zu einem entscheidenden Faktor wird, insbesondere in Szenarien, die durch schnell um sich greifende Brände oder ungünstige Belüftungsbedingungen gekennzeichnet sind *(FPRF, 2020)*. Ein Ausfall oder eine verzögerte Aktivierung solcher Systeme kann zu einer raschen Verschärfung des Brandes führen, was sich unmittelbar auf das Ausmaß der Bauschäden auswirkt.

Ein weiterer Vergleichspunkt betrifft die Abhängigkeit der Gesamtsicherheit von der korrekten Funktion aktiver Systeme. Der italienische „Codice di Prevenzione Incendi“ bekräftigt, dass

der aktive Brandschutz niemals als eigenständige Maßnahme betrachtet werden darf, sondern vielmehr als Teil eines integrierten Systems, das Brandabschnitte und Feuerwiderstand umfasst. In Gebäuden, in denen die strukturelle Stabilität und die Brandabschnittsbildung in erster Linie durch die intrinsischen Eigenschaften der Materialien gewährleistet werden, dient der aktive Brandschutz als Maßnahme zur Risikominderung und Optimierung. Umgekehrt wird die Gesamtzuverlässigkeit bei Lösungen, die stark von aktiven Systemen abhängig sind, anfälliger für Ausfälle, Wartungsmängel oder nicht ideale Betriebsbedingungen.

Aus der Perspektive nach einem Brand zeigen Vergleichsstudien, dass Gebäude, in denen der aktive Brandschutz synergetisch mit von Natur aus feuerbeständigen Konstruktionen und Brandabschnitten zusammenwirkt, unter vergleichbaren Szenarien eine höhere Wahrscheinlichkeit aufweisen, Schäden zu begrenzen und die strukturelle Gebrauchstauglichkeit nach dem Ereignis aufrechtzuerhalten *(SFPE, 2016; FPRF, 2020)*. Dies macht deutlich, dass der aktive Brandschutz als Teil der Gesamtbrandschutzleistung des Gebäudes bewertet werden muss.

2.4.4 Langfristige Aufrechterhaltung

Die langfristige Aufrechterhaltung der Brandschutzleistung wird oft unterschätzt, spielt jedoch eine entscheidende Rolle bei der Gesamtbewertung des Brandrisikos und seiner potenziellen Folgen. Brandschutzvorschriften, insbesondere das deutsche Brandschutzrecht, das durch die *„Musterbauordnung“* (MBO), die zugehörigen *„Länderbauordnungen“* und die einschlägigen technischen Normen wie DIN 4102 und EN 13501 definiert ist, betonen, dass zur Erreichung der Sicherheitsziele die Planungsbedingungen über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes hinweg aufrechterhalten werden müssen, und unterstreichen damit die Bedeutung von Verwaltungs- und Instandhaltungsmaßnahmen.

Bei Stahlbetonkonstruktionen wird die Feuerwiderstandsfähigkeit hauptsächlich durch die Masse und Dicke der Bauteile sowie durch die Betondeckung gewährleistet und beruht daher in den meisten Fällen nicht auf aufgebrachten Schutzschichten. Dennoch ist eine Instandhaltung erforderlich, da Karbonatisierung, Bewehrungskorrosion, Rissbildung und der Verlust der Betondeckung den Schutz der Bewehrung und damit das bei der Bemessung angenommene Brandverhalten zunehmend beeinträchtigen. Diese Mechanismen entwickeln sich über lange Zeiträume, werden durch die Bestimmungen zur Dauerhaftigkeit in EN 1992-1-1 behandelt und lassen sich anhand messbarer geometrischer Parameter wie der Überdeckungsdicke bewerten.

Bei Holzkonstruktionen hängt das Brandverhalten häufig von der Unversehrtheit der aufgebrachten Schutzsysteme – wie Gipskartonverkleidungen, Putz und Oberflächenbehandlungen – sowie von der Abdichtung von Versorgungsdurchführungen ab. Diese Bauteile reagieren empfindlich auf Stöße, Feuchtigkeit, Änderungen an den Gebäudetechnikinstallationen und unkontrollierte Eingriffe; ihre Beschädigung oder teilweise Entfernung kann das bei der Inbetriebnahme nachgewiesene Brandverhalten beeinträchtigen (*FPRF, 2020; Frangi et al., 2018*). Der Unterschied gegenüber Stahlbeton betrifft daher eher die Art der zu wartenden Bauteile und den Zeitraum, in dem sich deren Zustand ändern kann, als das Vorhandensein einer Wartungspflicht, die für beide Systeme gilt.

Ein weiterer Vergleichspunkt betrifft die Rückverfolgbarkeit und Beurteilbarkeit der Leistungsfähigkeit im Zeitverlauf. Bei Stahlbetongebäuden stützt sich die Überprüfung der Brandschutzeigenschaften in der Regel auf messbare geometrische und bauliche Parameter wie Dicken und

Betondecke, die auch noch Jahre nach der Errichtung überprüft werden können. Umgekehrt ist bei Systemen, die auf aufgebrachten Schutzmaßnahmen basieren, die Beurteilung des Erhaltungszustands und der tatsächlichen Wirksamkeit komplexer und erfordert möglicherweise häufige Sichtprüfungen oder invasive Untersuchungen.

Aus der Perspektive nach einem Brand beeinflusst die Wartbarkeit direkt die Widerstandsfähigkeit des Gebäudes. Bauwerke, die im Laufe der Zeit eine robuste Brandschutzleistung beibehalten und weniger auf routinemäßige Instandhaltung angewiesen sind, weisen nach einem Brandereignis tendenziell geringere Schäden und eine höhere Wahrscheinlichkeit der Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit auf. Im Gegensatz dazu können Gebäude, deren Brandschutz stark von Systemen abhängt, die anfällig für Verschleiß sind, schwerwiegendere Folgen erleiden, was erhebliche Auswirkungen auf Reparaturkosten und Ausfallzeiten hat. Empirische Erkenntnisse aus der Versicherungsbranche und der Brandschutzforschung deuten darauf hin, dass bei nicht brennbaren Tragwerkssystemen die Brandausbreitung tendenziell geringer ist und die Wiederherstellbarkeit nach einem Brand besser ist. So zeigen beispielsweise von der RISC Authority zitierte Studien, dass nur etwa 4 % der Brände in Betongebäuden zu umfangreichen strukturellen Schäden (>100 m^2) führen. Darüber hinaus können Stahlbetonelemente nach einer Brandbelastung und einer Nachhärtung oft bis zu ~75 % ihrer ursprünglichen Festigkeit wiedererlangen *(Tawfik, T.A. et al., 2025)*.

Jüngste experimentelle Untersuchungen, die von Halliwell Fire Research im Auftrag der NFPA Fire Protection Research Foundation durchgeführt wurden, zeigen, dass in sprinklergeschützten Massivholzgebäuden die Brandschäden nach dem Brand möglicherweise nicht nur durch direkte Einwirkungen des Feuers, sondern auch in erheblichem Maße durch die Einwirkung von Wasser beeinflusst werden. Brandversuche im Originalmaßstab an CLT-Bauteilen haben gezeigt, dass strukturelle Schäden durch Feuer unter kontrollierten Bedingungen zwar begrenzt bleiben, jedoch große Wassermengen, die während der Brandbekämpfung abgegeben werden, in strukturelle Verbindungen eindringen und in verborgenen Hohlräumen eingeschlossen werden können. Dies kann zu anhaltender Feuchtigkeitsansammlung, komplexen Trocknungsprozessen und potenziell invasiven Reparaturmaßnahmen führen. Diese Erkenntnisse deuten darauf hin, dass bei Holzkonstruktionen die Wiederherstellung nach einem Brand nicht nur von der Brandschwere, sondern auch von wasserbedingten Schadensmechanismen bestimmt wird, was direkte Auswirkungen auf Reparaturkosten und Ausfallzeiten hat.

Die Aufrechterhaltung der Brandschutzleistung stellt daher ein wesentliches Kriterium bei der Auswahl von Tragwerks- und Konstruktionslösungen dar. Ein auf Dauerhaftigkeit und langfristige Robustheit ausgerichteter Planungsansatz verringert die Brandgefährdung und begrenzt die mit Brandereignissen verbundenen wirtschaftlichen und funktionalen Folgen, was die Bedeutung einer integrierten Perspektive unterstreicht, die Planung, Management und den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes umfasst.

3. Zusammenfassung: Brandverhalten von Stahlbeton im Vergleich zu Holz

Die in diesem Abschnitt vorgestellte vergleichende Bewertung hebt eine Reihe grundlegender Unterschiede zwischen Stahlbeton- und Holztragwerkssystemen hinsichtlich des Brandverhaltens und des Verhaltens nach einem Brand hervor. Wie in der folgenden Tabelle zusammengefasst, ist Stahlbeton ein nicht brennbarer Werkstoff, der nicht zur Brandlast beiträgt und daher während eines Brandereignisses nicht am Verbrennungsprozess beteiligt ist. Unter solchen Bedingungen werden die Entwicklung und die Dauer des Brandes in erster Linie durch die Menge und Verteilung der im Gebäude gelagerten brennbaren Materialien bestimmt, und der Brand erlischt von selbst, sobald die verfügbare Brennstofflast aufgebraucht ist.

Umgekehrt führen Tragwerkskonfigurationen mit Holzbauteilen zusätzliches brennbares Material in den Brandabschnitt ein. Bei längerer Brandbelastung können Holzbauteile nach und nach verkohlen und weiterhin zur Brandlast beitragen, wodurch der Verbrennungsprozess möglicherweise auch nach dem anfänglichen Einbezug von gelagerten Gütern aufrechterhalten wird. Diese Eigenschaft kann sowohl die Dauer des Brandes als auch das Potenzial für eine Brandausbreitung über Bauteile hinweg beeinflussen.

Auch operative Aspekte werden von diesen Materialeigenschaften beeinflusst. Stahlbetonkonstruktionen behalten aufgrund ihrer Nichtbrennbarkeit und thermischen Trägheit im Brandfall im Allgemeinen stabile bauliche Verhältnisse bei, was Löschmaßnahmen erleichtern und die Wahrscheinlichkeit einer fortschreitenden Einbeziehung der Konstruktion begrenzen kann. Holzkonstruktionen sind zwar in der Lage, ihre Tragfähigkeit durch Verkohlung aufrechtzuerhalten, können jedoch Situationen schaffen, in denen die Einbeziehung brennbarer Bauteile die Brandausbreitung beschleunigen und die Komplexität der Löschmaßnahmen erhöhen kann.

Diese Unterschiede haben auch Auswirkungen auf die Wiederherstellung nach einem Brand. Stahlbetonkonstruktionen behalten häufig auch nach schwerer Brandbelastung einen erheblichen Teil ihrer Resttragfähigkeit bei, was punktuelle Reparaturmaßnahmen und eine relativ schnellere Wiederaufnahme des Betriebs ermöglicht. Im Gegensatz dazu können Schäden an brennbaren Bauteilen einen umfangreicheren baulichen Wiederaufbau erfordern, was möglicherweise zu längeren Wiederherstellungszeiten und einem erhöhten Risiko für Betriebsausfallverluste führt.

Das Ausmaß dieser Unterschiede ist nicht einheitlich. Wie die Fallstudien in Abschnitt 2 zeigen, hängt es davon ab, inwieweit die tragende Konstruktion gleichzeitig die Brandabschnittsgrenzen bildet, und es ist begrenzt, wenn die Konstruktion keine trennende Funktion erfüllt und die Brandlast durch den Gebäudeinhalt bestimmt wird.

Die wichtigsten Parameter, die diese Aspekte beeinflussen, sind in der folgenden Vergleichstabelle zusammengefasst.

Analysierter Parameter	Stahlbeton	Holz
Brandverhalten	Nicht brennbares Material, klassifiziert A1 gemäß EN 13501-1; entzündet sich nicht und trägt nicht zur Brandlast bei	Brennbarer Werkstoff; Entzündung ab ca. 300 °C, trägt zur Brandlast bei
Beitrag zur Brandausbreitung	Beteiligt sich zu keinem Zeitpunkt am Verbrennungsprozess	Beteiligt sich an der Verbrennung; der Beitrag hängt von der Einwirkung und Schutzmaßnahmen
Wärmeentwicklung des Querschnitts	Langsame Erwärmung aufgrund hoher thermischer Trägheit und geringer Wärmeleitfähigkeit	Fortschreitende Verringerung des Querschnitts durch Verkohlung der äußeren Schichten
Vorhersagbarkeit des Verhaltens	Normierte Modelle verfügbar (EN 1992-1-2); fortschreitende mechanische Verschlechterung	Die Verkohlungsrate ist in hohem Maße reproduzierbar, doch die Delaminierung und die führen zu Unsicherheiten
Resttragfähigkeit	Die Restfestigkeit ist dank Massen- und Spannungsverteilung in der Regel auch nach schweren Bränden noch erheblich	Die Resttragfähigkeit hängt bei leichten Bränden vom nach der Verkohlung verbleibenden wirksamen Querschnitt ab; bei schweren oder lang anhaltenden Bränden ist die Tragfähigkeit aufgrund der Verbrennung der Bauteile
Kritische Phänomene	Mögliches Abplatzen, ein bekanntes Phänomen, das durch konstruktive Maßnahmen gemildert werden kann	Verkohlung; mögliche Delaminierung bei verleimten Produkten; lokale Instabilität
Abhängigkeit von zusätzliche Schutzsysteme	Begrenzt; Feuerwiderstand wird oft allein durch die Imprägnierung gewährleistet	Hoch; die Leistungsfähigkeit hängt stark abhängig von der Wirksamkeit und Kontinuität der Schutzsysteme
Verhalten bei Brandereignissen	Das Verhalten entspricht im Allgemeinen den Auslegungsannahmen	Reagiert empfindlicher auf Abweichungen von den Auslegungsbedingungen und auf lokale Schäden
Wartbarkeit der Brandschutzleistung	Inhärente und über die Zeit stabile Leistung; geringer Wartungsaufwand	Erfordert Inspektion und Wartung des passiven Brandschutzes Systeme
Folgen nach einem Brand	Schäden beschränken sich oft auf Oberflächenbeeinträchtigungen; eine Wiederherstellung der Tragfähigkeit ist häufig möglich	Nur bei sehr leichten Bränden können Bauteile durch die Verbrennung einen begrenzten Querschnittsverlust erleiden; bei schweren oder lang anhaltenden Bränden können die Holzbauteile Bauteile vollständig verbrennen
Zuverlässigkeit der Vorschriften	Breite und gefestigte rechtliche und experimentelle Grundlage auf EU- und nationaler Ebene	Sich weiterentwickelnder regulatorischer Rahmen; stärkere Abhängigkeit von Szenarien und spezifischen Annahmen

Abschnitt 2: Analyse von Brandrisikoszenarien

4. MFL- und NLE-Szenarien

Die in dieser Studie entwickelten Brandszenarien basieren auf einem integrierten ingenieurwissenschaftlichen und risikobewertenden Rahmen, der international anerkannte Brandschutznormen mit etablierten Methoden zur Bewertung von Industrieverlusten kombiniert.

Die technische Definition von Brandausbruch, Brandausbreitung, Brandausbreitung innerhalb von Brandabschnitten, Brandausbreitungsmechanismen und thermischer Belastung von Bauwerken leitet sich aus konsolidierten brandschutztechnischen Grundsätzen sowie aus den von der National Fire Protection Association (NFPA) festgelegten Auslegungs- und Schutzkriterien ab. Insbesondere stimmen die Annahmen hinsichtlich Zündquellen, Güterklassifizierung, Lagerkonfigurationen, Sprinklerleistung, Brandmeldeanlagen und dem Einsatz der Feuerwehr mit den allgemeinen Methoden überein, die in Normen wie NFPA 13 und NFPA 72 vorgesehen sind, sowie mit dem umfassenderen leistungsbasierten Ansatz, der in der modernen Brandschutztechnik und der industriellen Risikobewertungspraxis üblicherweise angewendet wird.

Die National Fire Protection Association (NFPA) ist eine international anerkannte Organisation auf dem Gebiet des Brandschutzes und der Brandschutztechnik. NFPA-Normen und -Richtlinien finden weltweit breite Anwendung bei der Auslegung von Brandschutzsystemen, der Brandrisikobewertung und leistungsbasierten brandschutztechnischen Analysen in industriellen, gewerblichen und privaten Bereichen. Ihre Relevanz beruht auf jahrzehntelanger wissenschaftlicher Forschung, groß angelegten Brandversuchen, Untersuchungen nach Brandereignissen und kontinuierlicher technischer Weiterentwicklung durch multidisziplinäre Expertengremien. Die Anwendung NFPA-basierter Methoden im Rahmen dieser Studie bietet einen technisch anerkannten Rahmen für die Definition von Brandszenarien, Annahmen zur Brandbekämpfung, Bedingungen der Brandausbreitung und der strukturellen Beanspruchung im Brandfall und gewährleistet so die Übereinstimmung mit der international anerkannten Praxis der Brandschutztechnik.

Die Entwicklung der Brandszenarien folgt einer deterministischen und szenariobasierten Methodik, die in der Brandschutzpraxis weit verbreitet ist. Die analysierten Szenarien stellen keine probabilistischen Vorhersagen des Brandauftretens dar, sondern vielmehr plausible Auslegungsbrände, die ausgewählt wurden, um die potenziellen baulichen und wirtschaftlichen Folgen unter vordefinierten Randbedingungen zu bewerten. In diesem Zusammenhang werden die Szenarien bewusst unter konservativen Annahmen hinsichtlich Brandausbreitung, Löschwirksamkeit und Brandausbreitungspotenzial entwickelt, um methodische Konsistenz und direkte Vergleichbarkeit zwischen den untersuchten baulichen Konfigurationen zu gewährleisten.

Die Einteilung in Szenarien des maximal vorhersehbaren Schadens (MFL) und der normalen Schadenserwartung (NLE) leitet sich eher aus der industriellen Risikotechnik und der Praxis der Sachversicherung ab als direkt aus den NFPA-Normen. Diese Konzepte werden in vergleichbarer Form von nahezu allen Sachversicherern und Risikotechnik-Organisationen, einschließlich FM Global, zur Bewertung von Sachschadenrisiken und potenziellen Schadensszenarien verwendet. Verwandte Konzepte wie der „Maximum Foreseeable Loss“ (MFL), der „Probable Maximum Loss“ (PML) und andere Arten von Szenarien sind ebenso verbreitet, wobei sich die verwendeten Definitionen je nach Organisation unterscheiden.

Sie alle basieren auf denselben Eingangsgrößen: Gebäudeeigenschaften und Baumaterialien, Brandabschnitte, Feuerwiderstandsklassen, aktive Schutzsysteme, Versicherungswerte und das Risiko von Betriebsunterbrechungen. Die in dieser Studie verwendeten Größen sind im Folgenden aufgeführt.

FM Global gehört zu den führenden internationalen Industrie-Sachversicherern und ist weithin anerkannt für seinen ingenieurwissenschaftlichen Ansatz bei der Risikobewertung von Brand- und Naturgefahren. Auf der Grundlage jahrzehntelanger Analysen von Großschäden, experimenteller Forschung und industrieller Untersuchungen hat FM Global Methoden entwickelt, die speziell auf die Bewertung potenzieller Sachschäden und Betriebsunterbrechungen im Zusammenhang mit schweren Brandereignissen ausgerichtet sind. Die Anwendung dieser Methoden in der vorliegenden Studie ermöglicht es, die Analyse über rein bauliche Brandschutzaspekte hinaus zu erweitern und auch die wirtschaftlichen Folgen von Brandszenarien einzubeziehen, darunter Betriebsausfälle, Wiederherstellbarkeit und das gesamte Ausmaß des Schadens.

Aus wissenschaftlicher Sicht steht die angewandte Methodik im Einklang mit der aktuellen leistungsbasierten Brandschutzpraxis, bei der die Szenariodefinition auf einer physikalisch plausiblen Brandentwicklung, einer thermisch konsistenten baulichen Beanspruchung sowie auf ingenieurtechnischen Einschätzungen beruht, die durch experimentelle Forschung, Branddynamiktheorie und Erfahrungen mit tatsächlichen Schäden gestützt werden. Das Ziel der Studie besteht daher nicht darin, den genauen Verlauf eines zukünftigen Brandereignisses vorherzusagen, sondern unter konsistenten und technisch begründeten Bedingungen die relative Anfälligkeit, das Schadensausbreitungspotenzial, die verbleibende bauliche Stabilität und die wirtschaftlichen Folgen verschiedener Tragwerkssysteme zu vergleichen. Die Studie kombiniert daher zwei unterschiedliche Ansätze. Der Brandverlauf wird anhand leistungsbasierter brandtechnischer Annahmen beschrieben, die mit den NFPA-Leitlinien im Einklang stehen, während die Brandfolgen, einschließlich der Auswirkungen auf Sachschäden (PD) und Betriebsunterbrechungen (BI), anhand von Konzepten zur Schadensbewertung klassifiziert und quantifiziert werden, die aus der industriellen Risikotechnik stammen.

4.1 Szenario des maximal vorhersehbaren Schadens (MFL)

Der MFL ist der größte finanzielle Verlust (einschließlich Sachschäden und Betriebsunterbrechungen), der infolge eines Brandes auftreten könnte, wenn die ungünstigsten Umstände zusammenkommen. Dabei wird davon ausgegangen, dass Brandschutzsysteme wie automatische Sprinkleranlagen und Brandmeldeanlagen unwirksam oder nicht verfügbar sind, dass Brandabschnitte versagen oder nur begrenzten Widerstand leisten und dass das Eingreifen der Feuerwehr verzögert oder unwirksam ist. Infolgedessen wird der Brand letztendlich durch unüberwindbare Hindernisse oder durch Mangel an Brennstoff gestoppt.

4.2 Szenario „Normal Loss Expectancy“ (NLE)

NLE steht für die erwartete Höhe des finanziellen Schadens, der durch einen Brand entsteht, der sich entsprechend der vorhandenen Brandlast und unter normalen Betriebsbedingungen entwickelt. Sind aktive Brandschutzsysteme installiert (wie automatische Brandmelde- oder Löschanlagen), wird davon ausgegangen, dass diese ordnungsgemäß und gemäß ihren Auslegungsspezifikationen funktionieren. Brandschutzabtrennungen erfüllen ihre tatsächliche Feuerwiderstandsklasse, und die örtliche Feuerwehr kann innerhalb realistischer Zeiträume, basierend auf Anfahrtsweg und Verfügbarkeit, reagieren.

5. Vergleichende Planungsannahmen

Für die Zwecke der in dieser Studie entwickelten Vergleichsanalysen werden die alternativen Holzkonstruktionen nach einer vereinfachten Substitutionsmethode definiert, die darauf abzielt, den Einfluss des Materialverhaltens im Brandfall zu isolieren und gleichzeitig vergleichbare architektonische und statische Anordnungen zwischen den untersuchten Lösungen beizubehalten.
Insbesondere werden die Vergleichsszenarien unter der Annahme einer gleichwertigen Gesamtgeometrie, eines gleichwertigen Gebäudevolumens, einer gleichwertigen statischen Anordnung und einer gleichwertigen Lastverteilung zwischen den Stahlbeton- und Holzkonfigurationen entwickelt. Die Position der Bauteile, Spannweiten, Geschosshöhen, die Anordnung der Brandabschnitte und die Gesamtabmessungen des Gebäudes bleiben daher unverändert, um eine direkte Vergleichbarkeit des Brandverlaufs, der Brandausbreitungsmechanismen usw. zu gewährleisten.
Im Rahmen dieses Ansatzes bedeutet der Austausch von Stahlbeton durch Holz keine vollständige statische Neugestaltung des Gebäudes. Unterschiede bei der erforderlichen Bemessung der Bauteile, den Querschnittsabmessungen, der Detailgestaltung der Verbindungen und der Steifigkeit, die typischerweise mit der realen Holzbauweise verbunden sind, werden bewusst nicht im Detail untersucht. Es wird daher angenommen, dass die Bauteile in beiden Lösungen gleichwertige geometrische Konfigurationen aufweisen, während das Material, aus dem das tragende System besteht, zu vergleichenden brandtechnischen Zwecken variiert wird.
Diese Annahme ermöglicht es, den Schwerpunkt der Analyse gezielt auf das unterschiedliche Brandverhalten von brennbaren und nicht brennbaren Baustoffen zu legen und dabei Verzerrungen zu vermeiden, die durch größere geometrische oder architektonische Änderungen entstehen würden, welche andernfalls die Eigenschaften der Brandabschnitte, die Branddynamik, die Belüftungsbedingungen und die exponierten Oberflächenflächen verändern würden.

Bei der Betrachtung von Holzkonstruktionen wird davon ausgegangen, dass Holzwerkstoffsysteme wie CLT und Brettschichtholz gemäß den nationalen Bauvorschriften durch herkömmliche passive Brandschutzmaßnahmen (z. B. Kapselungssysteme auf Gipsbasis oder opfernde Verkohlungsschichten) geschützt sind, die der aktuellen Brandschutzpraxis entsprechen. Die detaillierte Bemessung von Schutzschichten und baulichen Verbindungen geht jedoch über den Rahmen der vorliegenden vergleichenden Bewertung hinaus und wird daher anhand verallgemeinerter ingenieurtechnischer Annahmen behandelt, die mit den aktuellen Methoden der Brandschutzbemessung für Holzbauwerke im Einklang stehen. Aus methodischer Sicht zielt dieser vereinfachte Äquivalenzansatz nicht darauf ab, eine endgültige bautechnische Lösung darzustellen. Vielmehr bietet er einen kontrollierten Vergleichsrahmen, der es der Studie ermöglicht, unter einheitlichen Randbedingungen den relativen Einfluss der Brennbarkeit von Baumaterialien auf die Brandausbreitung, Sachschäden, Betriebsunterbrechungen und die Wiederherstellbarkeit nach einem Brand zu bewerten.

Im Einklang mit diesem Ansatz wird angenommen, dass der Wiederaufbauwert von Holzkonstruktionen in jeder Fallstudie dem der entsprechenden Referenzkonstruktion aus Stahlbeton entspricht. Zwar würde ein Holztragwerkssystem zusammen mit den passiven Brandschutzmaßnahmen, die zur Erreichung gleichwertiger Feuerwiderstandsklassen erforderlich sind, in der Praxis höhere Baukosten verursachen – in der Regel in einer Größenordnung von 5 % bis 15 % über der Stahlbetonlösung –, doch wird diese Differenz bewusst nicht in der monetären Referenzgröße berücksichtigt. Die Verwendung eines identischen Wiederaufbauwerts stellt sicher, dass der Vergleich der Sachschäden zwischen den beiden Konstruktionsformen ausschließlich vom Brandverhalten des Baustoffs abhängt und nicht von einem bereits bestehenden Unterschied im Vermögenswert.

Die in den Szenariotabellen angegebenen Schadensprozentsätze sind keine unabhängigen Annahmen, sondern das quantifizierte Ergebnis des für jeden Fall definierten physikalischen Szenarios. Für jedes Szenario ermittelt die Analyse zunächst auf der Grundlage der Branddynamik und der erwarteten Brandabschnittsleistung das Ausmaß der Brandausbreitung, wobei die vom Brand betroffenen Bauteile identifiziert werden, festgestellt wird, ob Brandabschnittsgrenzen wirksam bleiben oder durchbrochen werden, und ob das tragende Tragwerksystem in den Brand verwickelt wird. Dieses physikalische Ergebnis wird dann in Schadensspannen umgerechnet, die als Prozentsätze des Wiederbeschaffungswerts der betroffenen Vermögenswerte ausgedrückt und getrennt für die Gebäudestruktur und deren Inhalt angegeben werden. Die Verwendung von Prozentintervallen anstelle von Einzelwerten spiegelt die inhärente Variabilität des Brandverlaufs und die damit verbundene Variabilität des daraus resultierenden Schadens wider.

Die neben den Prozentsätzen angegebenen Geldwerte ergeben sich direkt aus der Anwendung dieser Schadensspannen auf die Wiederbeschaffungs- und Inventarwerte, die in der Objektbeschreibung der jeweiligen Fallstudie festgelegt wurden. Folglich handelt es sich bei den in Euro ausgedrückten Werten für Sachschäden um abgeleitete Größen, die von Natur aus sowohl mit den entsprechenden Schadensprozentsätzen als auch mit den Vermögensbewertungen übereinstimmen und keine eigenständigen Schätzungen darstellen. Betriebsunterbrechungen werden separat entsprechend den Nutzungsmerkmalen der jeweiligen Anlage bewertet, wobei der industrielle Gewinn, die Mieteinnahmen oder die Aufrechterhaltung öffentlicher Dienstleistungen berücksichtigt werden, wie in der jeweiligen Fallstudie beschrieben.

Die daraus resultierenden Werte sind daher als indikative technische Schätzungen zu betrachten, die gemäß den etablierten Methoden der „Normal Loss Expectancy“ (NLE) und des „Maximum Foreseeable Loss“ (MFL) innerhalb der in den Einschränkungen dieses Berichts erörterten Unsicherheitsgrenzen ermittelt wurden. Ihr Hauptzweck besteht darin, eine einheitliche Vergleichsgrundlage zu schaffen, und nicht darin, eine exakte Vorhersage des finanziellen Schadens zu liefern. Da in jeder Fallstudie dieselbe Methodik, Szenariodefinition und derselbe Bewertungsrahmen systematisch sowohl auf die Stahlbeton- als auch auf die Holzbaukonstruktionen angewendet werden, bleibt die vergleichende Bewertung zwischen den beiden baulichen Lösungen trotz der mit jeder einzelnen Schätzung verbundenen verbleibenden Unsicherheit robust.

6. Fallstudie Nr. 1: Industriegebäude – Automatisiertes Lager

6.1 Beschreibung der Anlage

Bei dem untersuchten Gebäude handelt es sich um ein neu errichtetes automatisiertes Industrie-Lagerhaus, das für die hochverdichtete Lagerung von Konsumgütern, Dekorationsartikeln, Kunstpflanzen, Saisonprodukten und zugehörigen Materialien vorgesehen ist. Die Nutzung wird als automatisiertes Hochregallager klassifiziert, in dem gemischte Güter mit einem erheblichen Anteil an Verpackungsmaterialien gelagert werden. Basierend auf den Lagerklassifizierungskriterien der NFPA lassen sich die gelagerten Materialien konservativ den Gütern der Klassen III–IV zuordnen, wobei aufgrund der Verpackungskomponenten ein möglicher Anteil an Kunststoffen der Gruppe A besteht.

Die gesamte Bruttogeschossfläche der Anlage beträgt ca. 7.125 m², wovon 6.464 m² dem Lager im Erdgeschoss und 595 m² einer Lager-Zwischengeschoss-Ebene zugeordnet sind. Im ersten Obergeschoss befindet sich ein zusätzlicher Bürobereich von ca. 554 m².

Das Gebäude erreicht im Hauptlagerbereich eine maximale Innenhöhe von 12 m, was eine vertikale Optimierung der Lagerkapazität durch industrielle Regalsysteme ermöglicht. Auf dem Dach ist eine Photovoltaikanlage mit einer Leistung von 410 kWp installiert. Zur Anlage gehören außerdem ein eigener Laderaum für Gabelstapler, Technikräume, Sanitäranlagen sowie Be- und Entladerampen, die mit mehreren Industrietoren ausgestattet sind.

6.1.1 Ist-Zustand – Betonkonstruktion

Statik: Das Gebäude ist vollständig in Stahlbeton ausgeführt. Das Fundament besteht aus Tiefpfählen. Das vertikale Tragwerk besteht aus Stahlbetonstützen und Schubwänden, die gemäß den geltenden Bauvorschriften sowohl der Schwerkraft als auch seismischen Einwirkungen standhalten. Die horizontalen Tragwerke werden durch Stahlbetonfertigteilträger und Hohlkern- oder Rippenplatten gebildet, während die Dachkonstruktion aus Stahlbetonträgern und vorgefertigten Pultdachelementen mit Mineralwolle-Dämmung besteht, was sowohl zur thermischen Leistung als auch zum nicht brennbaren Verhalten der Gebäudehülle beiträgt. Die interne Brandabschnittsbildung zwischen Lager, Zwischengeschoss, Büros und Technikbereichen wird durch Trennwandsysteme aus Stahlbeton oder feuerbeständige Trennwände erreicht. Der Haupttragrahmen ist für eine Feuerwiderstandsklasse von R120 ausgelegt, während Trennelemente und Brandabschnittswände die Klasse REI 120 aufweisen.

Aus brandschutztechnischer Sicht ist das Gebäude mit einer automatischen Brandmeldeanlage, manuellen Alarmsystemen, einer Sprinkleranlage, internen Hydranten und einem eigenen Löschwasserspeicher mit einem Nutzvolumen von ca. 300 m³ ausgestattet. Maßnahmen zur Rauchabführung sowie feuerbeständige Türen sind gemäß den geltenden Brandschutzvorschriften umgesetzt. Das in dieser Studie analysierte Gebäude bildet einen einzigen Brandabschnitt.

Der Wiederaufbauwert des Gebäudes wird auf etwa 11,4 Millionen Euro geschätzt, während der Wert der gelagerten Waren und der automatisierten Fördertechnik auf etwa 8 Millionen Euro geschätzt wird, was zu einem gesamten Wert des gefährdeten Vermögens von über 19 Millionen Euro führt, wobei indirekte wirtschaftliche Auswirkungen nicht berücksichtigt sind.

Posten	Wiederbeschaffungswert in Euro (€)
Bauarbeiten	8.500.000
Technische Anlagen	1.500.000
Elektroinstallation	900.000
Technische Kosten: Inbetriebnahme, Bauaufsicht…	500.000
Maschinen und Waren	8.000.000
Gesamt	19.400.000

Insgesamt stellt die Anlage ein hochwertiges Industrieobjekt dar, das sich durch eine erhebliche Konzentration brennbarer Lagergüter, eine fortschrittliche Betriebslogistik und ein strukturell robustes tragendes Stahlbetonsystem auszeichnet, das darauf ausgelegt ist, Feuerwiderstand, Brandabschnittsbildung und strukturelle Stabilität im Brandfall zu gewährleisten.

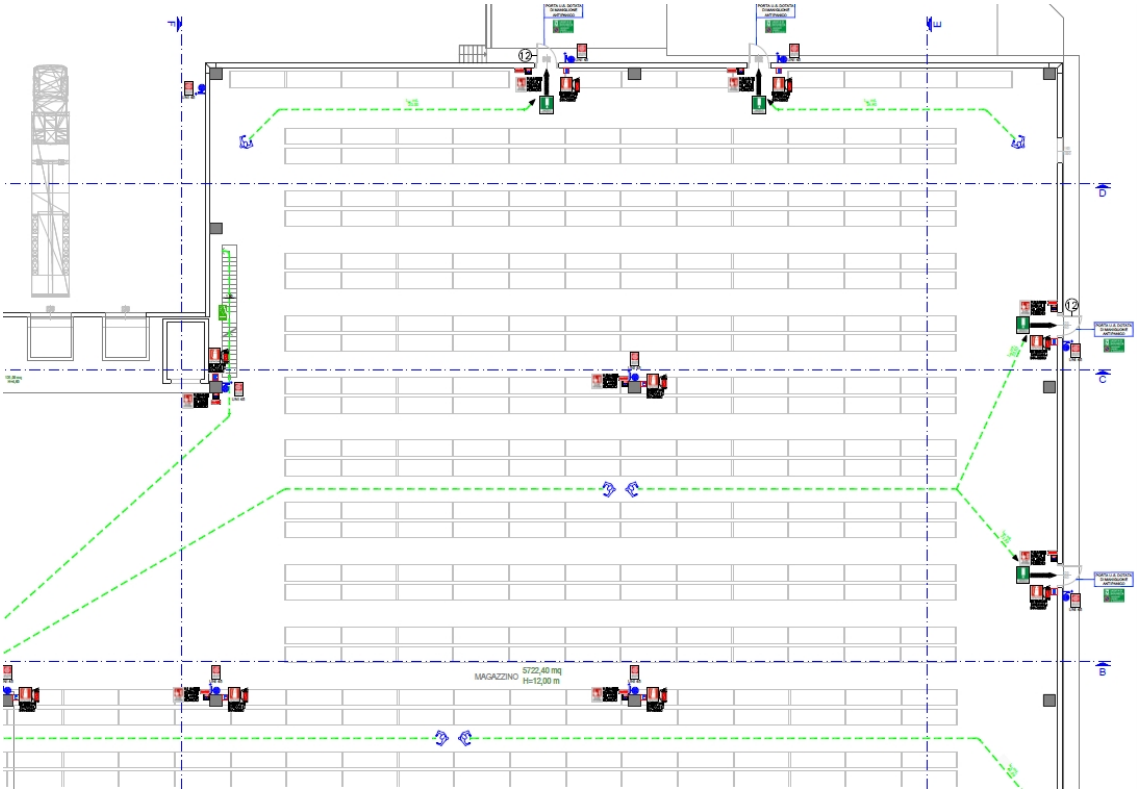


Abb. 9, Detailansicht der automatisierten Lageranlage

6.1.2 Simuliert – hybride Holzbauweise

Um einen technisch konsistenten Vergleich zwischen verschiedenen baulichen Lösungen zu gewährleisten, sieht die erste in dieser Studie betrachtete alternative Konfiguration keinen vollständigen Ersatz des Stahlbeton-Tragsystems vor. Stattdessen wurde ein Szenario mit teilweiser Substitution entwickelt, bei dem die primäre Tragkonstruktion des Gebäudes aus Stahlbeton bestehen bleibt, während die Dachkonstruktion und ausgewählte sekundäre Elemente aus Holzverbundkonstruktionen realisiert werden. Bei dieser Konfiguration wird davon ausgegangen, dass der Haupttragrahmen des Lagers, einschließlich Stützen, Hauptträger und der für die Gesamtstabilität des Gebäudes verantwortlichen Elemente, unverändert bleibt und somit aus Stahlbeton besteht. Diese Wahl spiegelt die gängige Praxis im Industriebau wider, wo Stahlbeton aufgrund seiner Robustheit, Steifigkeit und Langlebigkeit häufig für die Primärkonstruktion verwendet wird, insbesondere bei Gebäuden, die durch große Spannweiten, erhebliche vertikale Lasten und hohe Lagerregale gekennzeichnet sind.

Die hypothetische Holzvariante betrifft hingegen die Dachkonstruktion und ausgewählte nichttragende vertikale Umhüllungselemente. In diesem Szenario wird angenommen, dass das Dachsystem unter Verwendung von Holzwerkstoffbauteilen wie Brettschichtholzträgern und Brettsperrholzplatten (CLT) realisiert wird, die die ursprünglichen nicht brennbaren Konstruktionsschichten ersetzen. Ebenso wird angenommen, dass einige innere Trennwände oder Umhüllungselemente unter Verwendung von Holzwerkstoffsystemen ausgeführt werden.

Aus brandschutztechnischer Sicht führt diese Änderung zu relevanten Unterschieden im potenziellen Verhalten des Gebäudes im Brandfall. Während die Hauptkonstruktion aus Stahlbeton nicht brennbar bleibt und somit nicht zur Brandlast beiträgt, führt der Einbau von Holzbauteilen in die Dach- und Umfassungssysteme potenziell zu einer Erhöhung des Anteils an brennbarem Material im Brandabschnitt. Wie in der brandschutztechnischen Literatur weithin anerkannt ist, können strukturelle oder semistrukturelle Holzbauteile zur Gesamtbrandlast eines Brandabschnitts beitragen, sobald Schutzschichten beschädigt sind oder die Holzoberfläche anhaltender Wärmestrahlung ausgesetzt ist.

Aus diesem Grund berücksichtigen die folgenden Brandszenarien nicht nur das strukturelle Verhalten des Stahlbetonrahmens, sondern auch die mögliche Einbeziehung von Dach- und Außenwandelementen aus Holz in den Brandverlauf. Dieser Ansatz ermöglicht eine umfassendere Bewertung der potenziellen Unterschiede hinsichtlich Brandausbreitung, tragtechnischem Verhalten und Wiederherstellungsbedingungen zwischen der ursprünglichen Stahlbetonkonstruktion und der Hybridlösung mit Holzbauteilen.

Für die Zwecke der vergleichenden Analyse wurde angenommen, dass der Wiederaufbaupreis der hybriden Holzbauweise dem des Referenzszenarios aus Stahlbeton entspricht. Obwohl die Verwendung eines Holztragwerks in Verbindung mit den zusätzlichen passiven Brandschutzmaßnahmen in der Praxis höhere Wiederaufbaukosten mit sich bringen würde, wurde dieser Unterschied bewusst nicht in der monetären Basislinie berücksichtigt, um den Einfluss des Materialverhaltens der Tragkonstruktion im Brandfall von etwaigen Kostenunterschieden zwischen den beiden Lösungen zu isolieren.

6.2 Szenarien für den maximal vorhersehbaren Schaden (MFL)

6.2.1 MFL-Szenario für Stahlbeton

In dem untersuchten automatisierten Lager geht das MFL-Szenario von einer Entzündung in einem dicht beladenen Regalgang in mittlerer Lagerhöhe aus, wobei erhebliche Mengen an brennbaren Verpackungsmaterialien vorhanden sind. Die Sprinkleranlage ist zwar gemäß den Normen der National Fire Protection Association ausgelegt, wird jedoch als beeinträchtigt und daher in der frühen Entwicklungsphase des Brandes als unwirksam bei der Brandbekämpfung angenommen. Eine Branderkennung kann zwar erfolgen, doch ohne sofortige Löschkapazität breitet sich der Brand unkontrolliert aus.

Der Brand entwickelt sich mit einer für Regallagerkonfigurationen typischen schnellen Ausbreitungsrate. Die vertikale Flammenausbreitung wird durch den Kamineffekt in den Lagergängen beschleunigt, wodurch schnell mehrere Palettenebenen erfasst werden. Da sich heiße Gase unter der Decke ansammeln, werden im ursprünglichen Brandbereich die Bedingungen für einen Flashover erreicht. Die Strahlungswärmeübertragung begünstigt die horizontale Ausbreitung auf benachbarte Regalreihen. Da keine wirksamen Brandabschnitte vorhanden sind, die die Ausbreitung in einem frühen Stadium aufhalten könnten, erfasst der Brand nach und nach einen erheblichen Teil der Lagerfläche.

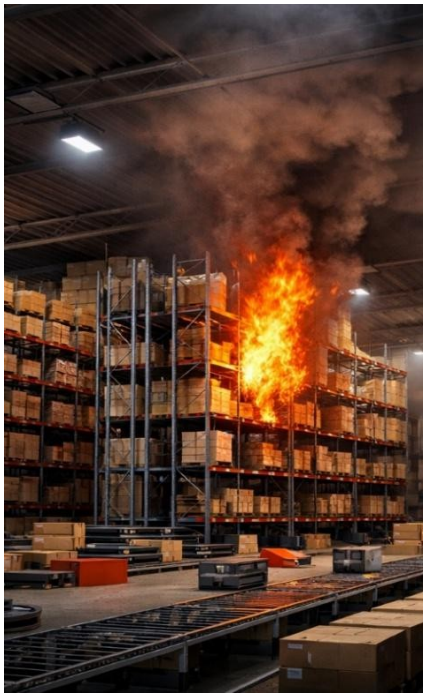


Abb. 10, Simuliertes Bild eines frühen Brandstadiums unter MFL-Bedingungen

Abb. 11, Simulierte Darstellung eines voll entwickelten Brandes in den Regalen

Die Spitzenwärmefreisetzungsraten können mehrere zehn Megawatt erreichen, bevor strukturelle Schäden oder der Verbrauch des Brennstoffs eine weitere Eskalation zu begrenzen beginnen. Es ist zu erwarten, dass die Temperaturen der Gasschicht im oberen Bereich Werte von 900–1000 °C erreichen, wobei die anhaltend hohe thermische Belastung weit über eine Stunde andauert. Der Brand breitet sich so lange aus, bis er entweder auf Bereiche ohne brennbare Lagerbestände oder auf bauliche Begrenzungen trifft, die einem vollständigen Durchdringen standhalten können.

Aus bautechnischer Sicht trägt der Stahlbetonrahmen nicht zur Brandlast bei und ist nicht an der Verbrennung beteiligt. Er ist jedoch einer starken thermischen Belastung ausgesetzt. Die Oberflächen

Schichten von Decken, Trägern und Stützen erfahren einen erheblichen Temperaturanstieg, was gemäß temperaturabhängigen Materialdegradationsmodellen zu einer Verringerung der Druckfestigkeit und Steifigkeit führt. Die im Beton eingebettete Bewehrung verliert zunehmend an Streckgrenze, wenn die Stahltemperaturen 400–500 °C überschreiten. Zwischen den exponierten Oberflächen und dem kühleren Kern entstehen Temperaturgradienten, die zu inneren Spannungen und lokalen Rissen führen. In stark exponierten Bereichen kann es zum Abplatzen der Betondeckung kommen, wodurch die Bewehrung noch stärker erhöhten Temperaturen ausgesetzt wird.

Trotz dieser Mechanismen begrenzen die intrinsischen Eigenschaften des Stahlbetons, nämlich seine Nichtbrennbarkeit, seine hohe thermische Trägheit und seine geringe Wärmeleitfähigkeit, die Tiefe des Wärmeeintritts. Der Zersetzungsprozess verläuft eher schrittweise als plötzlich. Eine Lastumverteilung innerhalb des Tragwerks mindert das Risiko eines unverhältnismäßigen Einsturzes. Zwar kann ein lokales Versagen von Sekundärbauteilen oder Dachabschnitten in den am stärksten exponierten Bereichen nicht ausgeschlossen werden, doch wird ein globaler Einsturz des gesamten Gebäudes nicht als vorhersehbares Ergebnis angesehen. Der Brand wird letztendlich durch das Fehlen von zusätzlichem brennbarem Material und durch den Fortbestand der primären statischen Stabilität gestoppt.

Unter diesen Umständen ist der Sachschaden erheblich. Ein bedeutender Teil der Lagerfläche, geschätzt zwischen 70 % und 80 %, kann direkt durch Feuer, Hitze, Rauch und Löschwasser in Mitleidenschaft gezogen werden. Tragwerkselemente in den am stärksten betroffenen Feldern müssen aufgrund des Verlusts der mechanischen Tragfähigkeit und übermäßiger Rissbildung oder Abplatzungen abgerissen und neu errichtet werden. Dachsysteme, Fassadenplatten, technische Anlagen und elektrische Verteilungsnetze innerhalb des betroffenen Bereichs müssen vollständig ersetzt werden.

Unter Berücksichtigung eines angegebenen Wiederaufbauwerts von 11,4 Millionen Euro für das Gebäude können die baulichen und gebäudebezogenen Schäden vernünftigerweise 70 % des Wiederbeschaffungswerts erreichen. Unter extremen, aber dennoch vorhersehbaren Umständen könnte dieser Wert höhere Prozentsätze erreichen, wenn sich der Abriss der tragenden Bauteile über die ursprünglich betroffenen Felder hinaus erstreckt.

Die Schäden an Inventar und Automatisierungssystemen sind noch erheblicher. Es ist davon auszugehen, dass die automatisierten Lageranlagen, Regalsysteme, Steuergeräte und die gelagerten Waren im betroffenen Bereich weitgehend zerstört sind. Rauchbelastung und Hitzeeinwirkung können weitere Bestände über die direkt vom Brand betroffenen Bereiche hinaus beeinträchtigen. Bei einem deklarierten Wert von etwa 8 Millionen Euro für Maschinen und Waren ist ein Schaden in der Größenordnung von 80 % bis 90 % dieses Wertes plausibel.

Der kombinierte direkte Sachschaden unter MFL-Bedingungen könnte daher etwa
16 Millionen Euro und könnte sich im ungünstigsten Fall, bei dem der Großteil der Lagerbereiche betroffen ist, dem Gesamtvermögenswert annähern.

Die Komponente „Betriebsunterbrechung“ gewinnt in diesem Szenario besondere Bedeutung. Die umfangreichen baulichen Reparaturen, der Abriss und Wiederaufbau mehrerer Lagerbereiche, der Austausch von Automatisierungssystemen, die Neuinstallation der mechanischen und elektrischen Infrastruktur sowie die anschließenden Inbetriebnahmemaßnahmen führen zu einer längeren Betriebsunterbrechung. Selbst wenn Teile des Gebäudes stehen bleiben, führt der für solche Anlagen typische hohe Automatisierungsgrad zu einer starken gegenseitigen Abhängigkeit zwischen den Lagerbereichen, was einen Teilbetrieb während des Wiederaufbaus technisch erschwert. Die für die vollständige Wiederherstellung erforderliche Gesamtdauer wird realistisch auf 12 Monate geschätzt, wobei der Betrieb nach 9 Monaten schrittweise wieder aufgenommen wird, was zu Gesamtgewinnausfällen von

etwa 75 % mit sich bringt. Bei einem angenommenen Jahresgewinn im Bereich von 30 bis 40 Millionen Euro entstehen durch eine Stilllegungsdauer von 12 Monaten Verluste zwischen 20 und 30 Millionen Euro. Diese Zeitspanne umfasst die bautechnische Begutachtung, gegebenenfalls eine technische Neugestaltung, die Beschaffung spezialisierter Automatisierungssysteme, die Wiederaufbauarbeiten sowie umfassende Betriebsprüfungen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass unter den Bedingungen des maximal vorhersehbaren Schadens das automatisierte Lager in Stahlbetonbauweise einen finanziellen Gesamtverlust erleiden kann, der möglicherweise den kombinierten Wert des Gebäudes und seines Inhalts erreicht oder übersteigt. Dennoch trägt das Tragwerksystem nicht zur Ausbreitung des Brandes bei. Im Gegenteil: Die Nichtbrennbarkeit und thermische Robustheit von Stahlbeton begrenzen die Wahrscheinlichkeit eines sofortigen Einsturzes und gewährleisten auch bei starker thermischer Belastung eine verbleibende strukturelle Stabilität. Das endgültige Ausmaß des Schadens wird daher in erster Linie durch die Brandlast, Einschränkungen bei der Brandbekämpfung und betriebliche Abhängigkeiten bestimmt und nicht durch die Brennbarkeit der Konstruktion.

MFL-Szenario für Stahlbeton		
	Betroffener Bereich	**% Schaden**
Sachschaden	Gesamtes Gebäude	70 % der Wiederbeschaffungskosten des Gebäudes 80–90 % der Maschinen und Waren
Betriebsunterbrechung[3]		75 % für 12 Monate

Hinweis:
Die angegebenen Prozentsätze berücksichtigen keine möglichen Schadensminderungsmaßnahmen wie die Anmietung zusätzlicher Räumlichkeiten und/oder die vorübergehende Verlagerung des Betriebs in Räumlichkeiten Dritter.

6.2.2 MFL-Szenario für Holz

Im Szenario des maximal vorhersehbaren Schadens (MFL) wird davon ausgegangen, dass der Brand im automatisierten Lagerbereich des Lagers unter Bedingungen entsteht, die mit den zuvor für die Stahlbetonkonstruktion beschriebenen identisch sind. Die Entzündung erfolgt in einem Lagerregal infolge eines elektrischen Defekts an einem der automatisierten Fördersysteme.

Gemäß den MFL-Annahmen werden automatische Lösch- und Brandmeldeanlagen als nicht vorhanden oder unwirksam betrachtet. Der Brand breitet sich daher ungehindert innerhalb des Regalsystems aus und erfasst rasch die in den Regalen gelagerten brennbaren Güter und Verpackungsmaterialien. Es kommt zu einer vertikalen Flammenausbreitung entlang der Regalkonstruktion und innerhalb der gelagerten Güter, was zu einem raschen Anstieg der Wärmefreisetzungsrate führt.

Innerhalb von etwa 15–20 Minuten erreicht der Brand im Lagerbereich ein voll entwickeltes Stadium. Die Flammen breiten sich durch Strahlung und Flammenausbreitung horizontal auf benachbarte Regale aus, während sich heißer Rauch unter der Decke ansammelt. Bei der für diese Untersuchung betrachteten hybriden Holzbauweise

[3] Bei Wiederherstellungszeiten von bis zu 12 Monaten entspricht der BI-Prozentsatz dem geschätzten jährlichen Gewinnausfall oder Mietausfall über einen Referenzhorizont von 12 Monaten, während die angegebene Wiederherstellungszeit die Zeit angibt, die erforderlich ist, um wieder die volle Betriebskapazität zu erreichen. Bei Wiederherstellungszeiten von mehr als 12 Monaten entspricht der BI-Prozentsatz dem gesamten Gewinnausfall über den angegebenen Wiederherstellungszeitraum, während die angegebenen Monate die Zeit angeben, die erforderlich ist, um den Betrieb schrittweise wieder auf 100 % Kapazität hochzufahren.

In dieser Studie wird davon ausgegangen, dass Teile des Gebäudehüllensystems, insbesondere die Dachkonstruktion und Teile der Wandkonstruktionen, aus Holzbauteilen bestehen. Bei längerer Brandbelastung und ohne wirksame Brandbekämpfung können diese Elemente nach und nach in den Brand verwickelt werden.

Im Gegensatz zu Stahlbeton ist Holz ein brennbarer Werkstoff und kann zur Brandlast beitragen, sobald seine Schutzschichten beschädigt sind oder es direkt den Flammen ausgesetzt ist. Während sich der Brand im Lagerraum weiter ausbreitet, wirken sich die hohen Temperaturen in der oberen Rauchschicht zunehmend auf die Holzdachelemente aus.

Holzbauwerke bilden bei Brandbeanspruchung typischerweise eine schützende Verkohlungsschicht, die den weiteren Abbau des Querschnitts verlangsamt. Unter extremen Brandbedingungen, wie sie im MFL-Szenario angenommen werden und die durch hohe Wärmefreisetzungsraten und lang anhaltende Einwirkung gekennzeichnet sind, kann der fortschreitende Verlust des wirksamen Querschnitts jedoch die Tragfähigkeit der Holzbauteile erheblich verringern. Zudem können Verbindungen und Dachbauteile bei Einwirkung erhöhter Temperaturen einer beschleunigten Zersetzung unterliegen. Infolgedessen kann die Stabilität der Dachelemente nach längerer Brandbelastung zunehmend unsicher werden, insbesondere in Bereichen, in denen die Brandintensität am höchsten ist. In den späteren Phasen des Brandes kann es daher zu einem lokalen Einsturz von Dachteilen kommen. Solche Ereignisse können zusätzlichen Sauerstoff in den Brandabschnitt einleiten, wodurch die Verbrennung möglicherweise verstärkt und die weitere Ausbreitung des Feuers im Gebäude begünstigt wird.

In der Hybridkonstruktion wirkt sich eine längere Brandbelastung auf die Holzdach- und Wandkonstruktionen aus, sobald deren Schutzschichten durchbrochen sind, während der Stahlbetonrahmen und die Fundamente ihre tragende Funktion beibehalten. Die Schäden konzentrieren sich daher auf das Gebäudehüllensystem und können sich über mehrere Felder erstrecken, was den Abriss und Wiederaufbau der Holzbauteile und der Gebäudehülle sowie die Instandsetzung der vom Brand betroffenen Betonbauteile erforderlich macht. Zusammen mit dem Verlust von Inventar und Ausrüstung könnte sich der Gesamtschaden an der Immobilie den vollen Wiederbeschaffungswert des Objekts annähern, der in der ungünstigsten Konfiguration auf etwa 11,4 Millionen Euro geschätzt wird.

Unter MFL-Bedingungen würden die automatisierten Lageranlagen, Regalkonstruktionen, Steuereinheiten und Waren in den betroffenen Bereichen als nicht wiederherstellbar gelten. Zusätzlich zu den direkten Brandschäden dürften eine weitreichende Rauchausbreitung und erhöhte Temperaturen elektronische Komponenten und gelagerte Waren in angrenzenden Bereichen beeinträchtigen. Angesichts des versicherten Wertes von etwa 8 Millionen Euro für Maschinen und Waren sind Verluste in Höhe von 100 % dieses Wertes durchaus realistisch, wenn mehrere Lagergänge betroffen sind und die Automatisierungsinfrastruktur schwer beschädigt wird.

Es ist mit erheblichen betrieblichen Auswirkungen zu rechnen. Der Wiederaufbau beschädigter Bauteile, die Installation neuer Lagerregale, der Austausch automatisierter Fördersysteme sowie die Neuinstallation der mechanischen und elektrischen Infrastruktur würden einen komplexen und zeitaufwändigen Wiederherstellungsprozess erfordern. In hochautomatisierten Anlagen verhindert die gegenseitige Abhängigkeit der Lagerbereiche in der Regel einen sinnvollen Teilbetrieb während der Wiederaufbauarbeiten. Unter Berücksichtigung dieser Faktoren wird die gesamte Wiederherstellungsdauer auf etwa 15 bis 18 Monate geschätzt, einschließlich des Abbruchs der Bauwerke, der technischen Neugestaltung, der Beschaffung spezialisierter Automatisierungsausrüstung, der Wiederaufbauarbeiten und der abschließenden Inbetriebnahme. Eine begrenzte Wiederaufnahme des Betriebs könnte nach etwa 15 Monaten erfolgen, während sich die längere Stilllegung auf etwa 18 Monate erstrecken könnte. Auf der Grundlage desselben Jahresgewinns von 30 bis 40 Millionen Euro, der für die Stahlbetonausführung zugrunde gelegt wurde und einen fast vollständigen Betriebsausfall während dieses Zeitraums widerspiegelt, beläuft sich der daraus resultierende Betriebsausfall auf etwa 55 Millionen Euro.

MFL-Holz-Szenario		
	Betroffener Bereich	**% Schaden**
Sachschaden	Gesamtes Gebäude	100 % der Wiederbeschaffungskosten des Gebäudes 100 % der Maschinen und Waren
Betriebsunterbrechung[3]		90 % für 18 Monate

Hinweis:
Die angegebenen Prozentsätze berücksichtigen keine möglichen Schadensminderungsmaßnahmen wie die Anmietung zusätzlicher Räumlichkeiten und/oder die vorübergehende Verlagerung des Betriebs in Räumlichkeiten Dritter.

6.3 Szenarien zur normalen Schadenerwartung (NLE)

6.3.1 NLE-Szenario für Stahlbeton

Das NLE-Szenario (Normal Loss Expectancy) für das automatisierte Lager wurde gemäß einem leistungsbasierten brandschutztechnischen Ansatz entwickelt, der mit dem von der National Fire Protection Association (NFPA) festgelegten analytischen Rahmen übereinstimmt. Das Szenario spiegelt ein plausibles und statistisch häufig auftretendes Schadensereignis wider, bei dem die Entzündung innerhalb der gelagerten Güter erfolgt und alle aktiven Brandschutzsysteme wie vorgesehen funktionieren, ohne Beeinträchtigungen oder Ausfälle.

Es wird angenommen, dass der Brand in mittlerer Regalhöhe innerhalb eines Lagergangs entsteht, was einen realistischen Entzündungsort darstellt, der mit elektrischen Fehlern, mechanischer Überhitzung oder versehentlichen Zündquellen im Zusammenhang mit automatisierten Fördersystemen in Verbindung steht.

Das Gebäude ist durch eine automatische Sprinkleranlage geschützt, die gemäß den Kriterien der NFPA 13 für Lagergebäude ausgelegt ist. Es wird davon ausgegangen, dass die Anlage hinsichtlich der Regalhöhe und der vorhandenen Warenklasse hydraulisch ausreichend dimensioniert ist, über eine zuverlässige Wasserversorgung verfügt und keine Behinderungen der Sprühbilder vorliegen. Detektions- und Alarmsysteme arbeiten gemäß den Grundsätzen der NFPA 72 und gewährleisten eine rechtzeitige Benachrichtigung sowie den Einsatz der Feuerwehr.

Unter diesen Annahmen führt die Entzündung zu einer lokal begrenzten Flammenentwicklung innerhalb der Regalreihe. Die Bildung einer thermischen Rauchwolke führt zu einer fortschreitenden Erwärmung der Deckenzone, wobei die Auslösung der Sprinkleranlage je nach Deckenhöhe und Reaktionszeit voraussichtlich innerhalb von etwa 4 bis 6 Minuten nach der Entzündung erfolgt. Nach der Auslösung ist die Auslösedichte ausreichend, um die Brandwolke zu kontrollieren und eine vertikale sowie horizontale Ausbreitung über den ursprünglichen Regalbereich hinaus zu verhindern. Es werden keine Bedingungen für einen vollständigen Flashover im gesamten Brandabschnitt erreicht, und die Brandausbreitung bleibt auf einen begrenzten Lagerbereich beschränkt.

Die thermische Belastung der Bauteile ist daher lokal begrenzt und zeitlich begrenzt. Die Gastemperaturen in der oberen Schicht bleiben deutlich unter denen, die bei voll entwickelten Raumbränden nach einem Flashover auftreten, und die Dauer der Einwirkung erhöhter Temperaturen beschränkt sich auf den Zeitraum vor der Stabilisierung der Brandbekämpfung. Bei Stahlbetonelementen können die Oberflächentemperaturen in direkt exponierten Bereichen lokal Werte im Bereich von 400–500 °C erreichen, doch die begrenzte Einwirkdauer und die geringe Wärmeleitfähigkeit des Materials führen zu steilen Temperaturgradienten und relativ niedrigen Kerntemperaturen.

Das Tragwerk besteht aus Stahlbetonelementen, die für eine nominelle Feuerwiderstandsdauer von R120 ausgelegt sind. Als nicht brennbarer Werkstoff trägt Beton nicht zur Brandlast bei und ist nicht an Verbrennungsprozessen beteiligt. Die mechanische Beeinträchtigung bei erhöhten Temperaturen folgt den in EN 1992-1-2 definierten Reduktionsbeziehungen; angesichts der im NLE-Szenario angenommenen lokalen und kurzzeitigen thermischen Einwirkung ist jedoch keine signifikante Verringerung der globalen Tragfähigkeit zu erwarten. Das Tragwerkssystem behält während des gesamten Ereignisses seine Stabilität bei, und es werden keine Mechanismen eines fortschreitenden Einsturzes ausgelöst.

Schadensmechanismen stehen in erster Linie im Zusammenhang mit dem direkten Einwirken von Flammen auf gelagerte Güter, thermischen Schäden an Automatisierungsanlagen, dem Auslaufen von Sprinklerwasser und Rauchbelastung. Etwaige bauliche Schäden beschränken sich auf oberflächliche Risse, geringfügige Abplatzungen in direkt exponierten Bereichen und lokale, reparierbare Schäden an der Betondeckung. Ein baulicher Austausch primärer tragender Bauteile ist nicht zu erwarten.

Aus quantitativer Sicht wird erwartet, dass die Gebäudeschäden bei etwa 2–4 % des Wiederbeschaffungswerts bleiben, was auf punktuelle Reparaturmaßnahmen zurückzuführen ist. Die Schäden am Inventar werden auf 10–15 % des Lagerwerts geschätzt, bedingt durch direkte Brandbeteiligung und Rauchbelastung innerhalb des betroffenen Regalbereichs. Der daraus resultierende Gesamtverlust unter NLE-Bedingungen entspricht somit einem kontrollierten Brandereignis und macht nur einen begrenzten Anteil des gesamten Vermögensrisikos aus.

Die Auswirkungen auf den Betriebsausfall dürften relativ begrenzt bleiben, da die Bausubstanz unversehrt ist und sich das Ereignis auf einen begrenzten Betriebsbereich beschränkt. Vorübergehende Betriebsunterbrechungen im Zusammenhang mit Aufräumarbeiten, dem Austausch von Ausrüstung und der punktuellen Wiederherstellung könnten

über einen Zeitraum von etwa drei Monaten zu einem Verlust von etwa 5 % des Jahresgewinns führen, was eher auf teilweise betriebliche Einschränkungen als auf eine vollständige Stilllegung des Standorts zurückzuführen ist.

NLE-Szenario „Stahlbeton“		
	Betroffener Bereich	**% Schaden**
Sachschaden	Einige Regale im Lagerbereich	4 % der Wiederbeschaffungskosten des Gebäudes 10 %–15 % der Maschinen und Waren
Betriebsunterbrechung[3]		5 % für 3 Monate

Hinweis:
Die angegebenen Prozentsätze berücksichtigen keine möglichen Schadensminderungsmaßnahmen wie die Anmietung zusätzlicher Räumlichkeiten und/oder die vorübergehende Verlagerung des Betriebs in Räumlichkeiten Dritter.

6.3.2 Szenario „Holz-NLE“

Zum Zweck der vergleichenden Analyse wurde ein zweites Szenario entwickelt, das von einer hybriden Baukonstruktion ausgeht, bei der das primäre Tragwerk aus Stahlbeton besteht, während die Dachkonstruktion und ausgewählte sekundäre Elemente, insbesondere Innenwände, aus Holzverbundbauteilen bestehen.

Es wird angenommen, dass der Brand im automatisierten Lagerbereich des Lagerhauses entsteht, wo gelagerte Waren und Verpackungsmaterialien die primäre Brandlast darstellen. Wie im vorherigen Szenario wird angenommen, dass die Zündquelle mit einem elektrischen Defekt an automatisierten Förderanlagen im Regallagersystem zusammenhängt.

In der Anfangsphase des Brandes wird der Verbrennungsprozess hauptsächlich durch die gelagerten Güter, Verpackungsmaterialien und Kunststoffkomponenten angetrieben, die typischerweise in automatisierten Lagern vorhanden sind. Die Wärmefreisetzungsraten steigen progressiv an, während sich das Feuer vertikal innerhalb der Lagerregale ausbreitet, wodurch erhebliche Wärmestrahlung in Richtung der oberen Bereiche des Brandabschnitts entsteht.

Unter normalen, zu erwartenden Schadensbedingungen wird davon ausgegangen, dass die Brandschutzsysteme des Gebäudes wie vorgesehen funktionieren. Die automatische Sprinkleranlage wird nach der Erkennung erhöhter Temperaturen in Deckenhöhe aktiviert und leitet die Wasserabgabe ein, um das Ausbreiten des Feuers im Lagerbereich einzudämmen. Das Brandmeldesystem löst zudem den Alarm aus, wodurch die Rettungsdienste benachrichtigt werden können.

In der Hybridkonfiguration führt das Vorhandensein von Dachelementen aus Holz jedoch zu einer zusätzlichen potenziellen Wechselwirkung mit der Feuerwolke. Während sich das Feuer innerhalb der Lagerregale ausbreitet, sammeln sich heiße Gase unterhalb der Dachebene an, wodurch die thermische Belastung der Dachbauteile zunimmt. Sind Schutzverkleidungen oder Einkapselungsschichten vorhanden, begrenzen diese zunächst die direkte thermische Belastung der Holzelemente. Dennoch kann eine anhaltende Hitzeeinwirkung diese Schutzschichten nach und nach zersetzen. Sollten Teile der Holzkonstruktion freigelegt werden, kann es bei den Holzelementen zu Pyrolyse und Oberflächenverkohlung kommen. Obwohl Holzwerkstoffe ein relativ vorhersehbares Verkohlungsverhalten aufweisen, bedeutet ihre Brennbarkeit, dass sie lokal zur Brandlast beitragen können, sobald sie ausreichender Wärmestrahlung ausgesetzt sind.

Dieser zusätzliche Brennstoffbeitrag kann die Dauer der Brandphase geringfügig verlängern, bevor der Brand vollständig gelöscht ist.

Im NLE-Szenario wird jedoch davon ausgegangen, dass die Sprinkleranlage den Brand erfolgreich unter Kontrolle bringt, bevor er sich zu einem Brand ausweitet, der den gesamten Brandabschnitt erfasst. Das Eingreifen der Feuerwehr unterstützt die Löschphase zusätzlich und begrenzt die Ausbreitung der Flammen über den ursprünglichen Regalbereich hinaus.

Folglich bleibt die Primärkonstruktion aus Stahlbeton aus statischer Sicht weitgehend unbeeinträchtigt, während die Dachelemente aus Holz in Bereichen, die den heißesten Gasen direkt ausgesetzt sind, eine begrenzte Oberflächenverkohlung aufweisen können. Ein lokaler Austausch von Dachelementen und die Reparatur brandgeschädigter Abschnitte können daher während der Sanierungsphase erforderlich sein. Aus betrieblicher Sicht kann das Vorhandensein brennbarer Dach- und Sekundärelemente im Vergleich zur vollständig nicht brennbaren Ausführung zu einer etwas stärkeren Rauchbelastung und geringfügigen baulichen Reparaturmaßnahmen führen. Dennoch beschränkt sich der Schaden unter normalen, zu erwartenden Schadensbedingungen in erster Linie auf die Entzündungszone und auf begrenzte Teile der Dachkonstruktion direkt über dem Brandbereich.

Aus quantitativer Sicht wird erwartet, dass der Gebäudeschaden unter 10 % des Wiederbeschaffungswerts bleibt, was auf punktuelle Reparaturmaßnahmen hindeutet. Der Sachschaden wird auf das gleiche Niveau wie im vorherigen NLE-Szenario geschätzt. Der daraus resultierende Gesamtverlust unter NLE-Bedingungen entspricht daher einem kontrollierten Brandereignis und stellt nur einen begrenzten Anteil des gesamten Vermögensrisikos dar.

Die Auswirkungen auf den Betriebsausfall dürften relativ begrenzt bleiben, da die Tragkonstruktion unbeeinträchtigt bleibt und sich das Ereignis auf einen begrenzten Betriebsbereich beschränkt. Vorübergehende Betriebsunterbrechungen im Zusammenhang mit Aufräumarbeiten, dem Austausch von Ausrüstung und der punktuellen Wiederherstellung könnten über einen Zeitraum von etwa vier Monaten zu einem Verlust von etwa 10 % des Jahresgewinns führen.

NLE-Holzszenario		
	Betroffener Bereich	**% Schaden**
Sachschaden	Holzdach und einige Regale im Lagerbereich	10 % der Wiederbeschaffungskosten des Gebäudes 10–15 % der Maschinen und Waren
Betriebsunterbrechung[3]		10 % für 4 Monate

Hinweis:
Die angegebenen Prozentsätze berücksichtigen keine möglichen Schadensminderungsmaßnahmen wie die Anmietung zusätzlicher Räumlichkeiten und/oder die vorübergehende Verlagerung des Betriebs in Räumlichkeiten Dritter.

Obwohl die primäre Stahlbetonkonstruktion in beiden Konfigurationen für strukturelle Stabilität sorgt, kann der Einbau brennbarer Dach- und Sekundärelemente sowohl das Ausmaß der Gebäudeschäden als auch die Wiederherstellungszeit erhöhen. Insbesondere das Vorhandensein von Dachelementen aus Holz kann nach einer Brandbelastung einen teilweisen strukturellen Austausch erforderlich machen, was im Vergleich zur vollständig nicht brennbaren Stahlbetonkonfiguration zu längeren Reparaturarbeiten und einer längeren Betriebsunterbrechung führt.

6.4 Szenariovergleich – Fallstudie Nr. 1

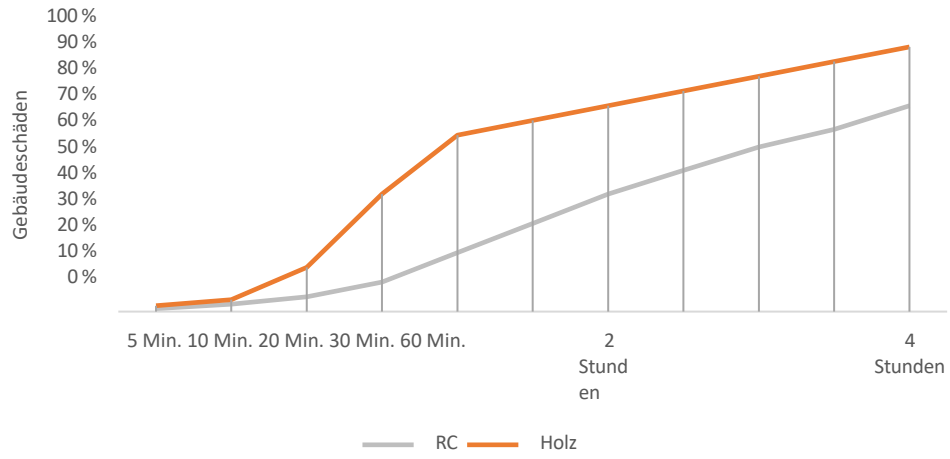
Die vergleichende Analyse der vier Szenarien zeigt, dass die Unterschiede zwischen den beiden baulichen Konfigurationen unter Bedingungen der „Normal Loss Expectancy“ (NLE) relativ gering bleiben. Wenn davon ausgegangen wird, dass die Brandschutzsysteme ordnungsgemäß funktionieren und gemäß NFPA 13 ausgelegt sind, wird die Brandausbreitung rasch unter Kontrolle gebracht und bleibt auf einen begrenzten Lagerbereich beschränkt. Unter diesen Umständen behalten beide baulichen Konstruktionen ihre Gesamtstabilität bei, und der Schaden beschränkt sich hauptsächlich auf gelagerte Waren, Regalsysteme und lokale Gebäudekomponenten. Infolgedessen bleibt der Sachschaden begrenzt und der Betriebsausfall ist relativ kurz, wobei es nur geringfügige Unterschiede zwischen der Stahlbeton- und der hybriden Holzkonstruktion gibt.

Eine deutlichere Abweichung zeigt sich unter den Bedingungen des „Maximum Foreseeable Loss“ (MFL), bei denen davon ausgegangen wird, dass die Brandschutzsysteme unwirksam sind und sich der Brand zu einem Brandereignis mit vollständiger Ausbreitung innerhalb des Brandabschnitts entwickelt. In diesem Szenario profitiert die Stahlbetonkonstruktion von der inhärenten Nichtbrennbarkeit und der thermischen Trägheit des Tragwerks, wodurch die Gesamtstabilität voraussichtlich auch bei starker Brandbelastung erhalten bleibt. Folglich können sich die Wiederherstellungsmaßnahmen in erster Linie auf den Austausch beschädigter Ausrüstung und den Wiederaufbau lokaler Bauteile konzentrieren, was eine kürzere Wiederherstellungszeit und ein vergleichsweise geringeres Risiko von Betriebsunterbrechungen ermöglicht. Im Gegensatz dazu kann es bei der Hybridkonstruktion mit Dachelementen aus Holz bei längerer Brandbelastung zu einer zusätzlichen strukturellen Verschlechterung kommen, was umfangreichere Abbruch- und Wiederaufbauarbeiten erforderlich macht. Dieser Umstand erhöht sowohl den Umfang der baulichen Reparaturen von 12 auf 18 Monate als auch die Komplexität des Wiederherstellungsprozesses, was zu längeren Wiederherstellungszeiten und Betriebsunterbrechungsverlusten führt, die um 25 bis 35 Millionen Euro höher sind als bei der Stahlbetonkonstruktion.

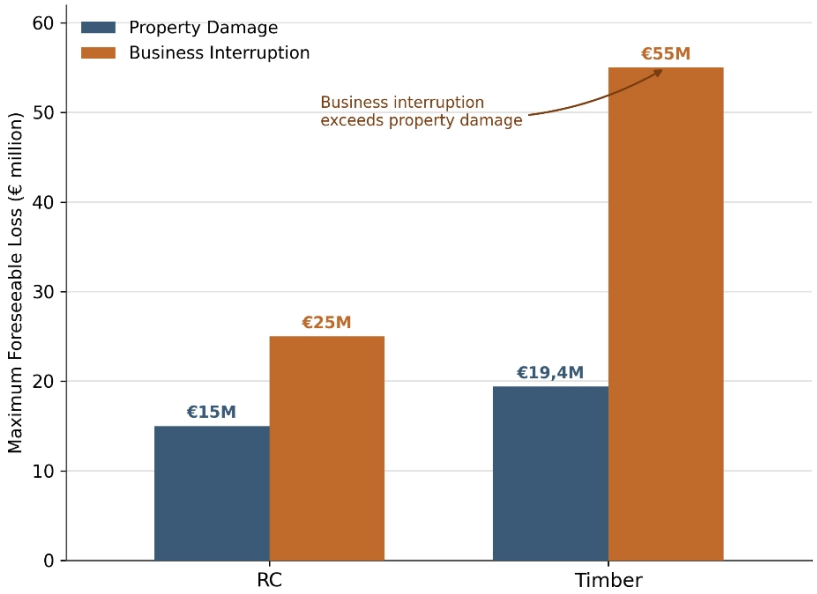
	Gebäudeschäden		Maschinen- und Sachschäden		Gesamt Sachschäden	Betriebsunterbrechungsschäden		Gesamt PD + BI
MFL – Haftpflicht	70 %	ca. 8 Mio. €	90 %	ca. 7 Mio. €	~15 Mio. €	75 % für 12 Monate	~25 Mio. €	ca. 40 Mio. €
MFL – Holz	100 %	ca. 11,4 Mio. €	100 %	ca. 8 Mio. €	ca. 19,4 Mio. €	90 % für 18 Monate	ca. 55 Mio. €	~74,5 Mio. €
NLE – RC	4 %	ca. 0,5 Mio. €	10–15 %	ca. 1 Mio. €	ca. 1,5 Mio. €	5 % für 3 Monate	ca. 1,5 Mio. €	ca. 3 Mio. €
NLE – Holz	10 %	ca. 1,1 Mio. €	10–15 %	ca. 1 Mio. €	ca. 2,1 Mio. €	10 % über 4 Monate	ca. 3,5 Mio. €	~5,7 Mio. €

Insgesamt bleiben Brandschutzsysteme zwar unter normalen Betriebsbedingungen der Hauptfaktor für die Begrenzung des Schadensausmaßes, doch wird die bauliche Konfiguration in extremen Brandszenarien zu einem entscheidenden Faktor für die Wiederherstellungszeit und die wirtschaftlichen Auswirkungen – insbesondere in hochautomatisierten Anlagen, in denen die Betriebskontinuität stark von der raschen Wiederherstellung sowohl der baulichen als auch der technischen Systeme abhängt.

Dieser erste Vergleich verdeutlicht somit, wie die inhärente Nichtbrennbarkeit und thermische Stabilität von Stahlbeton dazu beitragen, die strukturelle Integrität selbst unter extremen Brandbedingungen aufrechtzuerhalten. Umgekehrt kann der Brand bei Verwendung brennbarer Baumaterialien das Tragwerkssystem selbst zunehmend beeinträchtigen, wodurch das Ausmaß der Schäden und die Komplexität der Wiederherstellungsmaßnahmen nach dem Brand zunehmen.



Grafik 1: Vergleich der Gebäudeschäden zwischen Stahlbeton und Holz im MFL-Szenario



Grafik 2: Sachschäden und Betriebsunterbrechungen im MFL-Szenario, Fallstudie Nr. 1

7. Fallstudie Nr. 2: Wohngebäude

7.1 Beschreibung der Anlage

Die zweite Fallstudie betrifft eine Wohnsiedlung, bestehend aus vier aneinandergebauten Wohneinheiten (Reihenhäuser), die als flache Mehrfamilienhäuser konzipiert sind. Das Gebäude zeichnet sich durch einen sich wiederholenden modularen Grundriss, eine begrenzte vertikale Ausdehnung und eine im Vergleich zu großen Wohn- oder Geschäftsgebäuden relativ geringe Personenzahl aus.
Jede Einheit ist funktional unabhängig, verfügt über einen eigenen Zugang und nutzt nur in begrenztem Umfang gemeinsame Infrastruktur. Das Gebäude kann daher als niedriges Wohngebäude mit einer inhärenten Abtrennung zwischen den Einheiten klassifiziert werden, was eine entscheidende Rolle bei der Brandausbreitung und -eindämmung spielt.

Aus geometrischer Sicht erstreckt sich jede Einheit über mehrere Ebenen (Keller, Erdgeschoss, erster Stock und Dachgeschoss) mit einer Bruttogeschossfläche von insgesamt ca. 656 m² und einem umschlossenen Gesamtvolumen von ca. 1.998 m³ für den gesamten Komplex. Die Netto-Nutzfläche jeder Wohnung beträgt ca. 124 m², was dem Standard von Wohngebäuden mit geringer Bebauungsdichte entspricht.
Die architektonische Gestaltung folgt einer Reihenhaus-Typologie, bei der benachbarte Wohneinheiten vertikale Trennwände gemeinsam nutzen. Diese kompakte Anordnung hat direkte Auswirkungen auf Brandszenarien, insbesondere in Bezug auf die horizontale Brandausbreitung zwischen den Wohneinheiten, die Brandausbreitung an der Fassade und die Rolle der Brandabschnitte.

Im Vergleich zum zuvor analysierten industriellen Fall sind die Brandlasten deutlich geringer und gleichmäßiger verteilt, während die Brandszenarien im Allgemeinen stärker lokal begrenzt sind. Das Vorhandensein brennbarer Materialien in der Gebäudehülle und in den Dachkonstruktionen kann jedoch unter extremen Bedingungen den Brandverlauf beeinflussen, insbesondere wenn keine Löschanlagen vorhanden sind.

Das Gebäude ist mit den üblichen Brandschutzmaßnahmen für Wohngebäude ausgestattet, darunter Rauchmeldeanlagen, Alarmvorrichtungen und passive Brandschutzelemente. Es wird davon ausgegangen, dass keine automatischen Sprinkleranlagen vorhanden sind, was der gängigen europäischen Praxis für Flachbauten entspricht.

Insgesamt stellt die Fallstudie eine typische zeitgenössische Wohnbebauung dar, die sich durch moderate Brandlasten, eine wirksame Brandabschnittsbildung und eine begrenzte Abhängigkeit von aktiven Brandschutzsystemen auszeichnet. In diesem Zusammenhang wird das Brandverhalten in erster Linie durch die Dynamik der Brandabschnitte und das Verhalten der Materialien unter Brandbelastung bestimmt.

Abb. 12, Ansicht der Eingangsfassade

7.1.1 Ist-Zustand – Stahlbetonkonstruktion mit Holzdach

Statikisch ist das Gebäude als Mischbauweise ausgeführt, bei der Stahlbetonbauteile mit leichten und teilweise brennbaren (hauptsächlich aus Holz bestehenden) Bauteilen kombiniert werden. Das Fundamentsystem besteht aus Stahlbeton-Streifenfundamenten und/oder Bodenplatten auf dem Baugrund. Das vertikale Tragwerk besteht hauptsächlich aus Stahlbetonwänden und -decken, die sowohl die Widerstandsfähigkeit gegen Eigengewicht als auch die globale strukturelle Stabilität gewährleisten. Die horizontalen Tragwerke bestehen aus vor Ort gegossenen Stahlbetondecken mit typischen Dicken von bis zu etwa 20 cm, die eine ausreichende Steifigkeit und eine wirksame Brandabschnittsbildung zwischen den Geschossen gewährleisten.

Die Dachkonstruktion zeichnet sich durch eine leichte Holzkonstruktion aus, die aus tragenden Holzelementen in Kombination mit Dämmschichten (z. B. Zellulosedämmung) und Abdichtungssystemen besteht. Durch diese Konfiguration gelangen brennbare Materialien in die oberste Ebene der Gebäudehülle, die bei längerer thermischer Einwirkung in Brandszenarien in Mitleidenschaft gezogen werden können.

Die Außenwände bestehen aus mehrschichtigen Systemen, darunter Mauerwerk oder Betonelemente in Kombination mit Wärmedämmung (z. B. EPS), während die interne Brandabschnittsbildung zwischen den Wohneinheiten durch Trennwände erreicht wird, die auf Feuerwiderstand ausgelegt sind.

Aus brandschutztechnischer Sicht ist das Tragwerksystem mit Ausnahme der Dachkonstruktion überwiegend nicht brennbar. Diese Konfiguration bietet ein robustes Brandabschnittsgerüst, das die Ausbreitung des Feuers begrenzt und die Tragwerksstabilität auch bei starker Brandbelastung gewährleistet

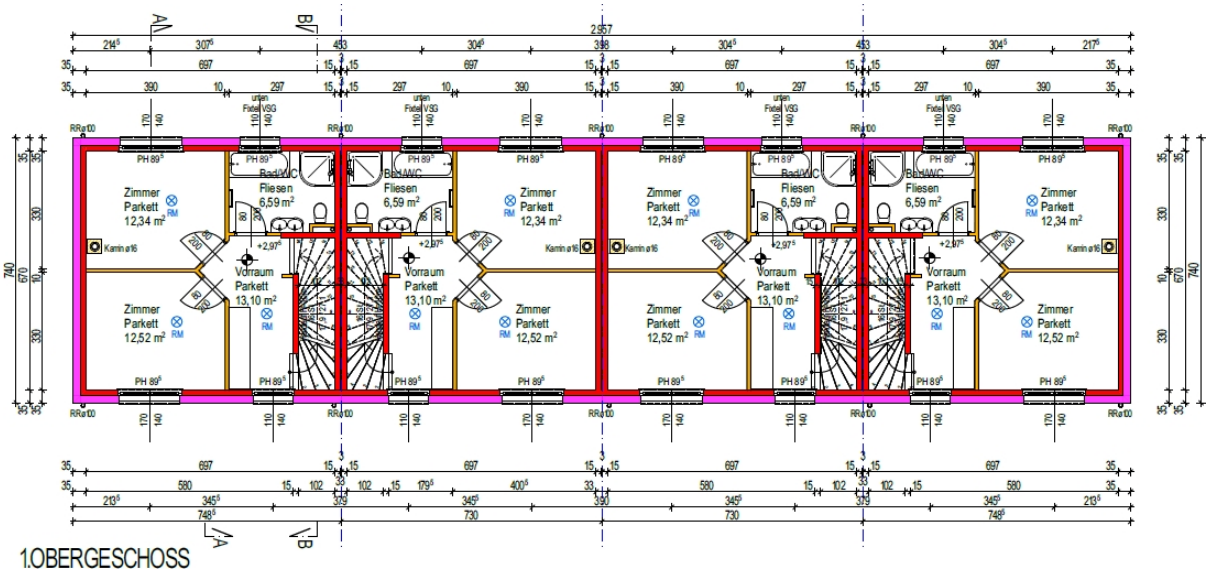


Abb. 13, Detailansicht des ersten Obergeschosses

Der Wiederaufbauwert des Komplexes wird auf etwa 1,2 Millionen Euro geschätzt, wobei Innentüren, Bodenbeläge, Einrichtungsgegenstände und der Wert der gelagerten Güter nicht berücksichtigt sind, was zu einem gesamten Wert des gefährdeten Vermögens von etwa 2 Millionen Euro führt, ohne Berücksichtigung indirekter wirtschaftlicher Auswirkungen.

7.1.2 Simulation – Holzbauweise

Im alternativen Entwurfszenario wird davon ausgegangen, dass das Gebäude unter Verwendung eines Holztragwerks realisiert wird, das repräsentativ für moderne Holzbauweise im Wohnungsbau ist.

Das Fundamentsystem bleibt aus Stahlbeton, wie es typischerweise aus Gründen der Dauerhaftigkeit und aufgrund der Bodenverhältnisse erforderlich ist, während der Überbau vollständig aus Holzbauteilen besteht. Das vertikale Tragwerk besteht aus Wänden aus Brettsperrholz (CLT), die sowohl Tragfähigkeit als auch Steifigkeit in der Ebene für die Gesamtstabilität bieten. Horizontale Konstruktionen (Decken) werden aus CLT-Platten oder Holzverbundelementen (z. B. Brettschichtholzträgern mit Holzbelag) realisiert, die zur Übertragung vertikaler Lasten ausgelegt sind. Die Dachkonstruktion wird als dem tatsächlichen Fall entsprechend angenommen.

Die Brandabschnittsbildung zwischen den Wohneinheiten wird durch mehrschichtige Holzbauwerke erreicht, die zusätzliche Schutzschichten (z. B. Gipskartonplatten) enthalten, um die Anforderungen an die Feuerwiderstandsfähigkeit zu erfüllen. Das Verhalten solcher Systeme hängt stark von der Unversehrtheit der Schutzschichten, der Detailgestaltung der Fugen und dem Verbindungsverhalten unter Brandbeanspruchung ab.

Die brandtechnische Bemessung von Tragwerken erfolgt gemäß EN 1995-1-2 auf der Grundlage der fortschreitenden Verringerung des wirksamen Querschnitts durch Verkohlung. Während Holzwerkstoffe ein vorhersehbares Verkohlungsverhalten aufweisen, bedeutet ihre Brennbarkeit, dass das Tragwerk selbst im Falle einer Brandbeanspruchung der Bauteile zur Brandlast beitragen kann.

Im Vergleich zu einer Stahlbetonkonstruktion zeichnet sich die Holzkonstruktion durch eine geringere Masse, eine geringere thermische Trägheit und eine potenzielle Beteiligung am Verbrennungsprozess unter extremen Brandbedingungen aus.

7.2 Szenarien für den maximal vorhersehbaren Schaden (MFL)

7.2.1 MFL-Szenario für Stahlbeton

Das MFL-Szenario geht von einem schweren, unkontrollierten Brand aus, der im Küchen-/Wohnbereich im Erdgeschoss einer zentralen Wohneinheit entsteht, ohne dass aktive Brandschutzsysteme zum Einsatz kommen und ohne Eingreifen der Feuerwehr. Unter diesen Bedingungen wird angenommen, dass sich der Brand bis zur vollständigen Ausbrennung entwickelt, d. h. bis das verfügbare brennbare Material aufgebraucht ist.

Als Zündquelle werden typische Ursachen im Wohnbereich angenommen (z. B. Ereignisse im Zusammenhang mit dem Kochen oder elektrische Fehler), an denen Möbel, Geräte und Kunststoffbauteile beteiligt sind. Der Brand entwickelt sich rasch und führt wahrscheinlich innerhalb kurzer Zeit zu einem Flashover im Entstehungsraum. Nach dem Flashover ist das Erdgeschoss vollständig vom Brand erfasst, gefolgt von einer vertikalen Brandausbreitung durch Innenöffnungen und das Treppenhaus, wodurch nach und nach die gesamte Wohneinheit in Mitleidenschaft gezogen wird.

Es wird erwartet, dass die Spitzen-Gastemperaturen Werte im Bereich von 800–1000 °C erreichen. Es wird davon ausgegangen, dass alle brennbaren Gegenstände innerhalb der betroffenen Wohneinheit zerstört werden. Eine Ausbreitung des Feuers auf benachbarte Wohneinheiten kann durch Fassadenöffnungen aufgrund von Flammenausstoß und Fensterbruch erfolgen. Aufgrund des

vorhandenen Trennwände und Decken aus Stahlbeton bleibt die horizontale Brandausbreitung begrenzt und führt in der Regel nicht zum vollständigen Ausbruch des Brandes in mehreren Wohneinheiten.

Das Tragwerksystem aus Stahlbeton spielt eine entscheidende Rolle bei der Begrenzung des Brandausmaßes. Aufgrund seiner Nichtbrennbarkeit und seiner inhärenten Feuerwiderstandsfähigkeit trägt die Konstruktion nicht zur Brandlast bei und wirkt als wirksame Barriere gegen die Brandausbreitung. Es ist davon auszugehen, dass die Bauteile benachbarter Gebäude, einschließlich Decken und Trennwände, ihre tragende Funktion während des gesamten Brandes aufrechterhalten, wobei sich die Schäden im Allgemeinen auf oberflächliche Zersetzungserscheinungen wie lokale Abplatzungen und eine Verringerung der Betondecke in den am stärksten exponierten Bereichen beschränken. Unter den angenommenen Bedingungen ist keine globale strukturelle Instabilität zu erwarten, und der Brand wird letztendlich durch den verfügbaren Brennstoff innerhalb der betroffenen Brandabschnitte bestimmt.

In dieser Konfiguration ist das MFL-Szenario durch den Totalverlust der Brandherdeinheit und eine teilweise Beschädigung benachbarter Einheiten gekennzeichnet, während die übrigen Teile des Gebäudes statisch intakt bleiben.

Aus wirtschaftlicher Sicht werden die Gesamtverluste auf 40–50 % des Gesamtwerts des Gebäudekomplexes geschätzt, was etwa 0,6 Millionen Euro entspricht. Der Wiederherstellungsprozess erfolgt in erster Linie durch interne Sanierung statt durch baulichen Wiederaufbau, was zu einer geschätzten Wiederherstellungsdauer von 6 bis 9 Monaten führt.

MFL-Szenario mit Stahlbeton		
	Betroffener Bereich	**% Schaden**
Sachschaden	Zentrale Einheit und angrenzende Einheiten	40–50 % der Wiederbeschaffungskosten von 4 Einheiten 100 % des Eigenwerts von 1 Einheit
Betriebsunterbrechung[3]		100 % einer Einheit für 6 bis 9 Monate

Hinweis:
Die angegebenen Prozentsätze berücksichtigen keine zusätzlichen Kosten im Zusammenhang mit vorübergehender Unterbringung, wie z. B. die Anmietung alternativer Wohneinheiten während der Zeit, in der die betroffene Wohnung nicht zur Verfügung steht.

7.2.2 MFL-Szenario für Holz

Das MFL-Szenario wird unter der Annahme derselben Entzündungsbedingungen wie im Fall des Stahlbetons definiert, um eine vollständige Vergleichbarkeit zwischen den beiden Konfigurationen zu gewährleisten.

Nach der Entzündung und dem Flammenüberschlag innerhalb der Ursprungseinheit entwickelt sich der Brand zu einem Brandereignis, das den gesamten Brandabschnitt erfasst. Wie im vorherigen Fall wird das anfängliche Brandwachstum durch bewegliche Brandlasten (Möbel, Oberflächenverkleidungen und Hausrat) angetrieben. In der Holzkonstruktion kann das Tragwerksystem jedoch zunehmend mit dem Brand interagieren, wenn die Brandbedingungen immer extremer werden. Das Verhalten des Bauwerks hängt stark von der Leistungsfähigkeit der Schutzverkleidungen und der Integrität der Verbindungen ab.

In den frühen Phasen verzögern Schutzschichten (z. B. Gipskartonplatten) die Einbeziehung von Holzbauteilen. Bei längerer Einwirkung können Zersetzung oder Versagen dieser Schichten dazu führen, dass tragende Holzoberflächen lokal freigelegt werden. Sobald das Holz freigelegt ist, unterliegt es einer Pyrolyse und Verkohlung. Während die Bildung einer Verkohlungsschicht einen gewissen Schutz bietet, kann eine anhaltende thermische Einwirkung zu einer fortschreitenden Verringerung des wirksamen Querschnitts führen. Unter bestimmten Bedingungen können Phänomene wie Delaminierung oder das Aufgehen von Fugen dazu führen, dass frische Holzoberflächen erneut freigelegt werden, was die Verbrennung über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten kann.

Infolgedessen kann die Branddauer im Vergleich zu einer Stahlbetonkonstruktion länger sein, und die Abklingphase kann sich erheblich verzögern.

Die Brandausbreitung ist nicht mehr auf Brandabschnittsgrenzen beschränkt. Durch eine Kombination aus innerer Ausbreitung, Flammenausbreitung an der Fassade und der fortbestehenden Verfügbarkeit von brennbarem Baumaterial ist zu erwarten, dass sich der Brand auf benachbarte Wohneinheiten ausbreitet. Angesichts der Kontinuität der Holzbauteile und des Fehlens wirksamer passiver Barrieren, die Stahlbetonwänden entsprechen, wird eine fortschreitende Brandausbreitung zwischen den Wohneinheiten wahrscheinlich.

Unter diesen Bedingungen entwickelt sich der Brand von einem auf Brandabschnitte beschränkten Ereignis zu einem Szenario mit Beteiligung der gesamten Baukonstruktion, bei dem das Gebäude selbst als Brennstoff dient. Der Verbrennungsprozess dauert so lange an, bis ein erheblicher Teil sowohl des Gebäudeinhalts als auch der tragenden Holzbauteile verbrannt ist. Dies führt zu einer deutlich längeren Branddauer im Vergleich zum Fall mit Stahlbeton und kann zu einem teilweisen oder vollständigen Einsturz der Konstruktion führen, insbesondere von Deckenkonstruktionen und tragenden Wänden, da sich die Querschnitte durch Verkohlung zunehmend verkleinern.

Aus Sicht der Schadensschätzung nähert sich der Sachschaden im ungünstigsten Szenario einem potenziellen vollständigen Wiederbeschaffungswert an, wobei der Verlust des gesamten Gebäudewerts von etwa 1,2 Millionen Euro den Innenwert der vier Wohneinheiten nicht berücksichtigt.

Der Wiederaufbauprozess wird maßgeblich durch die Notwendigkeit beeinflusst, tragende Holzelemente zu ersetzen, die Resttragfähigkeit zu überprüfen und betroffene Gebäudeteile wiederherzustellen. Dies führt zu einer längeren und komplexeren Wiederaufbauphase, die in der Regel auf 12 bis 18 Monate geschätzt wird.

MFL-Holzszenario		
	Betroffene Fläche	**% Schaden**
Sachschaden	Der gesamte Komplex	100 % der Wiederbeschaffungskosten von 4 Einheiten 100 % des inneren Werts von 4 Einheiten
Betriebsunterbrechung[3]		100 % für 18 Monate

Hinweis:
Die angegebenen Prozentsätze berücksichtigen keine zusätzlichen Kosten im Zusammenhang mit vorübergehender Unterbringung, wie z. B. die Anmietung alternativer Wohneinheiten während der Zeit, in der die betroffene Wohnung nicht zur Verfügung steht.

7.3 Szenarien zur normalen Schadenerwartung (NLE)

7.3.1 NLE-Szenario für Stahlbeton

Das NLE-Szenario geht von einem relativ häufigen und realistischen Brandereignis aus, das durch frühzeitige Erkennung, begrenzte Ausbreitung und Eingreifen der Bewohner und/oder der Feuerwehr gekennzeichnet ist. Es wird angenommen, dass die Entzündung in der Küche einer Wohneinheit erfolgt, einer der häufigsten Brandquellen in Wohngebäuden (z. B. unbeaufsichtigtes Kochen oder Fehlfunktion kleiner Elektrogeräte). Der Brand entwickelt sich zunächst lokal und erfasst Kochgeräte sowie in der Nähe befindliche brennbare Materialien. Dank Rauchmeldern werden die Bewohner frühzeitig alarmiert, was eine schnelle Reaktion wie z. B. das manuelle Löschen ermöglicht.

Bevor es zum Flashover kommt, wird der Brand entweder durch die Bewohner oder durch das Eingreifen der Feuerwehr teilweise unter Kontrolle gebracht. Infolgedessen bleibt die Brandausbreitung auf den Entstehungsraum beschränkt, mit begrenzter Ausbreitung auf angrenzende Räume. Die Spitzentemperaturen bleiben deutlich niedriger als in MFL-Szenarien, und der Brand ist hauptsächlich brennstoffgesteuert, wobei bewegliche Brandlasten und begrenzte Teile fester Materialien betroffen sind.

Das Stahlbeton-Tragwerksystem bleibt aufgrund der begrenzten thermischen Belastung und der Nichtbrennbarkeit der Materialien unbeeinträchtigt. Innenwände (Gipskartonsysteme) können lokal beschädigt werden, verursachen jedoch keine nennenswerte Brandausbreitung. Die Dachkonstruktion aus Holz ist nicht betroffen, da das Feuer die oberen Stockwerke nicht erreicht.

Die Rauchentwicklung ist die Hauptursache für Schäden und betrifft den Entstehungsraum sowie angrenzende Räume innerhalb der Wohneinheit. Rußablagerungen und Verunreinigungen können eine Reinigung und teilweise Sanierung erforderlich machen. Das unter NLE-Bedingungen zu erwartende Schadensausmaß ist begrenzt. Strukturelle Schäden sind aufgrund des nicht brennbaren Stahlbetons und der begrenzten thermischen Belastung vernachlässigbar (0–5 %). Schäden an Einrichtungsgegenständen und Oberflächen sind erheblicher, hauptsächlich aufgrund direkter Einwirkung des Feuers und der Rauchausbreitung. Der Gesamtverlust an Hausrat auf Wohneinheitsebene wird auf 15–30 % geschätzt, mit schweren Schäden in der Küche und leichter Rauchverschmutzung in angrenzenden Räumen. Die Nutzungsausfallzeit wird voraussichtlich zwischen 1 und 2 Monaten liegen, abhängig vom Ausmaß der Rauchschäden und der für Reinigung und Sanierung erforderlichen Zeit.

NLE-Szenario „Stahlbeton“		
	Betroffener Bereich	**% Schaden**
Sachschaden	Raum, in dem der Brand entstanden ist (Küche)	0–5 % der Wiederbeschaffungskosten einer Wohneinheit 15–30 % des inneren Werts der Wohneinheit
Betriebsunterbrechung Betriebsunterbrechung[3]		100 % für 1 bis 2 Monate

Hinweis:
Die angegebenen Prozentsätze berücksichtigen keine zusätzlichen Kosten im Zusammenhang mit vorübergehender Unterbringung, wie z. B. die Anmietung von Ersatzwohnungen während der Zeit, in der die betroffene Wohnung nicht zur Verfügung steht.

7.3.2 NLE-Szenario für Holzbau

Das NLE-Szenario wird unter der Annahme derselben Entzündungsbedingungen und Erkennungsmechanismen wie im Referenzfall mit Stahlbeton definiert, wobei ein lokal begrenzter Brand im Küchenbereich einer einzelnen Wohneinheit entsteht und ein frühzeitiges Eingreifen die Brandausbreitung begrenzt. Der wesentliche Unterschied liegt im Tragwerksystem, das in diesem Fall vollständig aus Holzbauteilen besteht.

Die frühzeitige Erkennung wird durch Rauchmelder gewährleistet, was eine schnelle Reaktion der Bewohner und das Eingreifen der Feuerwehr ermöglicht. Im Vergleich zur Stahlbetonkonstruktion führt das Vorhandensein brennbarer Bauteile jedoch zu einer zusätzlichen Branddynamik. In den frühen Phasen bleibt das Brandwachstum in erster Linie durch den Brennstoff begrenzt, doch kann eine teilweise Zersetzung oder ein lokaler Versagen von Schutzverkleidungen (z. B. Gipskartonplatten) Holzbauteile freilegen. Dies kann zur Einbeziehung von tragenden Bauteilen führen, wodurch dem Brand zusätzlicher Brennstoff zugeführt wird und die Brandschwere im Vergleich zum tatsächlichen Fall leicht zunimmt. Dennoch entwickelt sich der Brand dank des rechtzeitigen Eingreifens nicht zu einem voll ausgeprägten Szenario mit Einbeziehung der Tragkonstruktion.

Die Brandausbreitung bleibt größtenteils auf den Entstehungsraum beschränkt, mit nur geringfügiger Ausbreitung auf angrenzende Räume. Die Brandabschnittsbildung zwischen den Wohneinheiten bleibt unter NLE-Bedingungen wirksam und verhindert eine Brandausbreitung zwischen den Einheiten. Die Holzdachkonstruktion ist nicht direkt betroffen, obwohl geringfügige Rauchbelastung die oberen Stockwerke erreichen kann.

Die Rauchentwicklung spielt eine bedeutende Rolle und betrifft aufgrund der etwas höheren Brandschwere und des Materialbeitrags einen größeren Teil der Wohneinheit als im Fall mit Stahlbeton. Unter NLE-Bedingungen bleibt sie moderat, ist jedoch aufgrund der teilweisen Einbeziehung brennbarer Bauteile höher als im Fall mit Stahlbeton. Die strukturellen Schäden sind begrenzt, aber nicht zu vernachlässigen (unter 20 %), hauptsächlich aufgrund lokaler Verkohlung von Holzbauteilen und Schäden an Schutzverkleidungen, die repariert oder ersetzt werden müssen. Wasserschäden durch Löschmaßnahmen können ebenfalls erheblich zu den Gesamtschäden beitragen und betreffen insbesondere Oberflächen und angrenzende Bereiche.

Die Schäden an Hausrat und Oberflächen sind erheblicher, bedingt sowohl durch die direkte Einwirkung des Feuers im Entstehungsraum als auch durch die erhöhte Rauchentwicklung. Der Gesamtverlust an Hausrat auf Ebene der Wohneinheit wird auf etwa 20–35 % geschätzt. Die Nutzungsausfallzeit wird voraussichtlich zwischen 2 und 4 Monaten liegen, abhängig vom Ausmaß der Rauchbelastung und der Notwendigkeit von Inspektionen und Reparaturen an tragenden Holzbauteilen.

NLE-Holzszenario		
	Betroffene Fläche	**% Schaden**
Immobilie Schaden	Raum, in dem der Brand ausgebrochen ist (Küche)	10–20 % der Wiederbeschaffungskosten einer Wohneinheit 20–35 % des Innenwerts einer Einheit
Betriebsunterbrechung Betriebsunterbrechung[3]		100 % für 2 bis 4 Monate

Hinweis:
Die angegebenen Prozentsätze berücksichtigen keine zusätzlichen Kosten im Zusammenhang mit vorübergehender Unterbringung, wie z. B. die Anmietung alternativer Wohneinheiten während der Zeit, in der die betroffene Wohnung nicht zur Verfügung steht.

7.4 Szenariovergleich – Fallstudie Nr. 2

Im Gegensatz zur Stahlbetonkonstruktion führt das MFL-Szenario mit Holzbauweise zu einem strukturellen Brand, bei dem das Gebäude selbst zur Brandausbreitung beiträgt. Dies führt zu einer deutlich längeren Branddauer, einer unkontrollierten Ausbreitung des Feuers über mehrere Wohneinheiten hinweg und umfangreichen strukturellen Schäden. Folglich ist das MFL-Szenario durch einen nahezu vollständigen Verlust des Gebäudes und erheblich längere Wiederherstellungszeiten gekennzeichnet. Die direkten Schäden in der Holzbauweise sind durchweg höher und erreichen unter vergleichbaren Bedingungen Werte, die bis zu etwa dem Doppelten der im Stahlbetonszenario beobachteten Werte betragen, was die schwerwiegenden wirtschaftlichen Auswirkungen der Brennbarkeit des Tragwerks verdeutlicht.

Es muss betont werden, dass in allen MFL-Szenarien das Fehlen aktiver Brandbekämpfung und externer Eingriffe der dominierende Faktor für den Schaden ist. Unter diesen Bedingungen beeinflusst das Tragwerksystem in erster Linie den Verlauf des Brandes und die Wiederherstellbarkeit des Gebäudes nach dem Brand, weniger jedoch die Entzündung oder die frühe Brandentwicklung.

Selbst unter NLE-Bedingungen weisen Holzkonstruktionen aufgrund ihrer inhärenten Brennbarkeit eine höhere Anfälligkeit auf. In diesem Fall sind auch die direkten Schäden deutlich höher – fast doppelt so hoch wie im Stahlbetonszenario –, was hauptsächlich auf das Fehlen von Schutzsystemen in den Wohneinheiten zurückzuführen ist, wodurch die Eindämmung des Brandes verzögert wird und der Einsatz der Feuerwehr zur primären Schadensminderungsmaßnahme wird.

	Gebäudeschäden		Hausrat und Ausstattung Schaden		Gesamt Sachschaden	Betriebsunterbrechung (Nutzungsausfall) Schaden		Gesamtbetrag Sachschaden + Betriebsunterbrechung
MFL – RC	40–50 %	~€0,6 Mio.	100 %	~0,2 Mio. €	ca. 0,8 Mio. €	100 % für 9 Monate	k. A.	ca. 0,8 Mio. €
MFL – Holz	100 %	ca. 1,2 Mio. €	100 %	ca. 0,8 Mio. €	ca. 2 Mio. €	100 % für 18 Monate	k. A.	ca. 2 Mio. €
NLE – RC	5 %	ca. 0,03 Mio. €	15–30 %	ca. 0,04 Mio.	ca. 0,07 Mio. €	100 % 1 bis 2 Monate	k. A.	ca. 0,07 Mio. €
NLE – Holz	10–20 %	ca. 0,12 Mio. €	20–35 %	ca. 0,06 Mio. €	ca. 0,18 Mio. €	100 % 2 bis 4 Monate	k. A.	ca. 0,18 Mio. €

8. Fallstudie Nr. 3: Lager

8.1 Beschreibung der Anlage

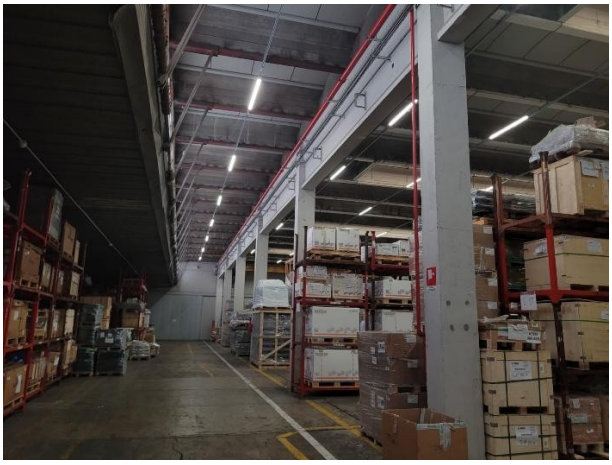
Die dritte Fallstudie betrifft ein Industrie-Lagerhaus zur Lagerung von Gütern, das als einstöckiges Gebäude mit einer für Logistik- und Lagerabläufe optimierten funktionalen Raumaufteilung konzipiert ist. Die Anlage zeichnet sich durch ein regelmäßiges Raster und eine offene Innenraumgestaltung aus, was einen effizienten Materialumschlag und eine effiziente Lagerverwaltung ermöglicht.

Das Gebäude ist als ein einziger Brandabschnitt organisiert, ohne interne Unterteilung in mehrere Brandbereiche. Die Lageranordnung basiert auf durchgehenden vertikalen Regalsystemen, die sich über die gesamte Lagerfläche erstrecken und eine Lagerung mit hoher Dichte ermöglichen. Bei den gelagerten Materialien handelt es sich um gemischte Güter, darunter palettierte Waren, Verpackungsmaterialien und Kunststoffkomponenten, was zu einer erheblichen und gleichmäßig verteilten Brandlast führt.

Das Lager verfügt über eine Bruttogeschossfläche von ca. 5.000 m² und eine lichte Innenhöhe von 9 m, was eine vertikale Lagerung unter Wahrung der betrieblichen Zugänglichkeit ermöglicht. Das Gebäude umfasst Be- und Entladerampen, die mit Industrietoren ausgestattet sind, sowie begrenzte Nebenbereiche wie Technikräume und Servicebereiche, die sich entlang des Gebäudeumfangs befinden.

Zu den Brandschutzsystemen gehören eine automatische Brandmeldeanlage, manuelle Alarmsysteme und eine für Lagerräume ausgelegte automatische Sprinkleranlage. Diese Systeme gewährleisten unter normalen Betriebsbedingungen die frühzeitige Erkennung und Bekämpfung von Bränden.

Aus betrieblicher Sicht wird das Lager kontinuierlich genutzt, wobei die Lagerregale stark ausgelastet sind und ein schneller Warenumschlag stattfindet. Die Anlage ist Teil eines standortübergreifenden Betriebs, und der auf ihre Tätigkeit entfallende Jahresumsatz, der als Referenzwert für die Quantifizierung des Betriebsausfalls herangezogen wird, liegt in der Größenordnung von 3 Millionen Euro. Der Wiederaufbauwert des Gebäudes beläuft sich auf etwa 4,5 Millionen Euro, wovon 3,0 Millionen Euro auf die Hoch- und Tiefbauarbeiten entfallen, während der Wert der gelagerten Waren, Regale und Fördertechnik auf etwa 2,5 Millionen Euro geschätzt wird, was zu einem gesamten Wert des gefährdeten Vermögens von etwa 7,0 Millionen Euro, ohne Berücksichtigung indirekter wirtschaftlicher Auswirkungen.



Posten	Wiederbeschaffungswert in Euro (€)
Bauarbeiten	3.000.000
Technische Anlagen	900.000
Elektroinstallation	400.000
Technische Kosten: Inbetriebnahme, Bauaufsicht…	200.000
Maschinen und Waren	2.500.000
Gesamt	7.000.000

Insgesamt stellt die Anlage ein modernes, hochwertiges Logistikobjekt dar, das sich durch eine erhebliche Konzentration brennbarer Lagerbestände in einem einzigen großen Raum, ein vollständig vorgefertigtes und nicht brennbares Tragwerksystem, eine dokumentierte interne Brandschutztrennung der Klasse EI 120 zum Schutz des Büro- und Technikflügels sowie ein aktives Schutzkonzept auf der Grundlage von automatischer Löschung, Früherkennung und externem Eingreifen auszeichnet.

8.1.1 Ist-Zustand – Stahlbetonkonstruktion

Das Gebäude wurde in Stahlbetonbauweise errichtet. Das Fundamentsystem besteht aus Stahlbetonfundamenten, die für die Aufnahme vertikaler und horizontaler Lasten ausgelegt sind. Das vertikale Tragwerk setzt sich aus Stahlbetonstützen zusammen, die nach einem regelmäßigen Stützraster angeordnet sind.

Das Dachsystem wird aus nicht brennbaren Fertigteilen realisiert, kombiniert mit Dämmschichten und Abdichtungsbahnen. Die Außenwände bestehen aus Betonfertigteilplatten, die eine robuste und nicht brennbare Gebäudehülle bilden.

Die Gebäudehülle besteht aus vorgefertigten Beton-Sandwichelementen, bei denen der Dämmkern vollständig zwischen zwei Betonschichten eingeschlossen ist, sodass beide Seiten nicht brennbar sind. Innerhalb des zweistöckigen Flügels wird das Zwischengeschoss durch vorgespannte Betonelemente gebildet, die nach REI 60 zertifiziert sind. Die für die tragenden Hauptelemente der Halle angegebene Feuerwiderstandsklasse beträgt R 60. Die in Abschnitt 8.1 beschriebene innere Trennung zwischen der Lagerhalle und dem Flügel wird durch vollhohe Stahlbetonfertigteilwände der Klasse EI 120 realisiert, die physikalische, nicht brennbare Brandschutzbarrieren bilden, die integraler Bestandteil des Tragwerks sind und unabhängig von angebrachten Verkleidungen oder wartungsintensiven Bauteilen sind.

Aus brandschutztechnischer Sicht ist das Tragwerksystem vollständig nicht brennbar (Brandverhaltensklasse A1) und trägt nicht zur Brandlast der Brandabschnitte bei. Die Brandentwicklung wird daher ausschließlich durch die gelagerten Inhalte bestimmt, während die Konstruktion als stabilisierendes, nicht am Brandvorgang beteiligtes Element wirkt, dessen Zerstörungsmechanismen im Brandfall in Abschnitt 2.3.1 beschrieben sind.

8.1.2 Simuliert – Holzkonstruktion

In der alternativen Konfiguration wird das Lagerhaus unter Verwendung eines Holztragwerks realisiert; im Einklang mit den in Abschnitt 5 dargelegten vergleichenden Entwurfsannahmen wird diese Konfiguration als kontrollierter Materialersatz entwickelt. Bei der Holzkonfiguration wird von einem vollständigen Massivholzbau ausgegangen. Das vertikale Tragwerk besteht aus Brettschichtholzstützen, die Dachkonstruktion wird durch doppelt geneigte Brettschichtholzträger gleicher Spannweite gebildet, die eine Dachkonstruktion aus Brettsperrholzplatten (CLT) tragen, die mit derselben Dämm- und Abdichtungsschicht versehen sind; das Zwischengeschoss und der Treppenkern des Flügels werden ebenfalls als aus CLT angenommen. Die Gebäudehülle wird mit vorgefertigten Wandelementen auf Holzbasis mit gleichwertiger Dämmleistung realisiert, und die innere Trennwand der Klasse EI 120 zwischen der Lagerhalle und dem Flügel wird durch gekapselte CLT-Platten realisiert, die nominell dieselbe Klassifizierung erreichen. Das Fundamentsystem bleibt, wie bei Holzgebäuden üblich, aus Stahlbeton und hat keinen Einfluss auf die analysierten Brandszenarien.

Aus brandschutztechnischer Sicht ist das Tragwerkssystem brennbar und kann aktiv am Brandverlauf beteiligt sein. Bei Brandbeanspruchung beginnen Holzbauteile zu verkohlen, was zu einer fortschreitenden Verringerung des wirksamen Querschnitts und einer entsprechenden Abnahme der Tragfähigkeit führt.

Es wird davon ausgegangen, dass die brandtechnische Bemessung der Holzkonstruktion gemäß EN 1995-1-2 erfolgt, basierend auf der Überprüfung des verbleibenden wirksamen Querschnitts anhand der in Abschnitt 2.3.2 behandelten Verkohlungsmodelle. Um die für das tatsächliche Gebäude dokumentierten Feuerwiderstandsklassen nominell zu erreichen, wird davon ausgegangen, dass die tragenden Bauteile und die Brandabschnittswände durch eine Verkleidung aus Gipskartonplatten geschützt sind, die bei Bedarf durch opfernde Verkohlungsschichten ergänzt wird. Der Vergleich geht daher nicht von unverkleidetem, ungeschütztem Holz aus, sondern von einem normkonformen Gebäude, bei dem die geforderten Werte bereits in der Planungsphase durch die Kombination aus Verkohlungswiderstand und Schutzverkleidungen erfüllt werden.

Für die Zwecke der vergleichenden Analyse wird gemäß der in Abschnitt 5 dargelegten Methodik der Wiederaufbauwert der Holzbauweise als gleich dem des Stahlbetongebäudes angenommen. Eine Massivholzlösung, die dieselben Feuerwiderstandsklassen erreicht, wäre in der tatsächlichen Baupraxis mit höheren Kosten verbunden als die Referenzlösung aus Fertigbeton, vor allem aufgrund des Tragwerkssystems sowie der zum Schutz der tragenden Elemente erforderlichen Gipsplattenverkleidung und Opferschichten. Der Wert der gelagerten Güter, der Regale und Fördertechnik, die Lageranordnung sowie die aktiven Schutzsysteme bleiben im Vergleich zum tatsächlichen Gebäude unverändert.

8.2 Szenarien für den maximal vorhersehbaren Schaden (MFL)

8.2.1 MFL-Szenario für Stahlbeton

Das Szenario des maximal vorhersehbaren Schadens berücksichtigt einen schweren, unkontrollierten Brand in einer einstöckigen Industriehalle, die zu Lagerzwecken genutzt wird. Es wird davon ausgegangen, dass das Gebäude mit einem Stahlbeton-Tragsystem realisiert ist, einschließlich Stützen, Trägern und Dachelementen, das eine hohe Feuerwiderstandsfähigkeit und Nichtbrennbarkeit gewährleistet.

Es wird angenommen, dass der Brand aufgrund typischer industrieller Zündquellen (z. B. elektrische Störungen, überhitzte Geräte oder versehentliche Entzündung von Lagergut) in einem Lagerbereich entsteht. Angesichts der Lagerfunktion hängt die Brandlast in erster Linie mit der Art und Anordnung der gelagerten Materialien (z. B. palettierte Güter, Verpackungsmaterialien, Kunststoffe) zusammen, was zu einer hohen und konzentrierten Brennstofflast führen kann. Unter den MFL-Annahmen werden keine aktiven Brandschutzsysteme als wirksam angesehen (z. B. Ausfall der Sprinkleranlage), und es findet kein Einsatz der Feuerwehr statt. Der Brand kann sich daher bis zum vollständigen Abbrennen der gesamten vorhandenen Brandlast entfalten. Nach der Entzündung breitet sich das Feuer aufgrund des Vorhandenseins brennbarer Güter und möglicher vertikaler Lagerkonfigurationen rasch innerhalb des Lagerbereichs aus. Die Branddynamik wird stark von der Lagergeometrie, den Belüftungsbedingungen und der Brandlastdichte beeinflusst.
Trotz der Schwere des Brandes trägt das Stahlbetontragwerk nicht zur Brandlast bei und spielt eine entscheidende Rolle bei der Begrenzung der baulichen Folgen. Es wird erwartet, dass tragende Bauteile aufgrund ihrer inhärenten Feuerwiderstandsfähigkeit ihre Stabilität über einen erheblichen Zeitraum aufrechterhalten. Bei längerer Einwirkung hoher Temperaturen können jedoch lokale Schäden auftreten, darunter: Abplatzen der Betondecke, Verringerung der mechanischen Eigenschaften und lokaler Verfall von Bauteilen. Unter extremen Bedingungen können teilweise strukturelle Schäden oder ein lokaler Dacheinsturz nicht ausgeschlossen werden, insbesondere in Bereichen, die der höchsten thermischen Belastung ausgesetzt sind. Ein vollständiger Einsturz der Konstruktion ist jedoch im Allgemeinen nicht zu erwarten. Am Ende des Brandes werden die Schäden in erster Linie durch den Verlust von Lagergut und innerbetrieblicher Ausrüstung bestimmt, während davon ausgegangen wird, dass das Tragwerk je nach Schweregrad und Dauer der Einwirkung teilweise wiederherstellbar bleibt.

Unter diesen Umständen ist der Sachschaden zwar schwerwiegend, beschränkt sich jedoch auf die Lagerhalle. Es wird davon ausgegangen, dass die gelagerten Güter, die Regalsysteme und die Fördertechnik innerhalb der Halle zerstört oder nicht mehr wiederherstellbar sind, wobei der Schaden auf 85–90 % des Versicherungswerts von Maschinen und Gütern geschätzt wird, was etwa 2,2 Millionen Euro entspricht. Die Gebäudeschäden umfassen den Abriss und Wiederaufbau der Dachkonstruktion der am stärksten betroffenen Felder, den Austausch verformter oder abgeplatzter Bauteile, die Wiederherstellung der Fassadenplatten in den vom Brand betroffenen Bereichen sowie den vollständigen Austausch der Haustechnik der Halle, während der Flügel lediglich gereinigt und geringfügig instand gesetzt werden muss. Die gebäudebezogenen Schäden werden auf 50–70 % des Wiederbeschaffungswerts des Gebäudes geschätzt, was etwa 2,7 Millionen Euro entspricht.

Es wird mit erheblichen Betriebsunterbrechungen gerechnet, die zu einem vollständigen Betriebsstillstand von 70 % führen und voraussichtlich 6 bis 9 Monate andauern werden. Die damit verbundenen finanziellen Auswirkungen, einschließlich Einnahmeausfällen und zusätzlicher Betriebskosten, lassen sich auf etwa 2 Millionen Euro schätzen.

MFL-Szenario für Stahlbeton		
	Betroffener Bereich	**% Schaden**
Immobilien Schaden	Gesamtes Gebäude	50–70 % der Wiederbeschaffungskosten des Gebäudes 85–90 % der Maschinen und Waren
Betriebsunterbrechung Betriebsunterbrechung[3]		70 % für 6 bis 9 Monate

Hinweis:
Die angegebenen Prozentsätze berücksichtigen keine möglichen Schadensminderungsmaßnahmen wie die Anmietung zusätzlicher Räumlichkeiten und/oder die vorübergehende Verlagerung des Betriebs in Räumlichkeiten Dritter.

8.2.2 MFL-Szenario für Holz

Das MFL-Szenario wird unter denselben Randbedingungen definiert, wie sie für den Fall mit Stahlbeton beschrieben wurden, wobei ein schwerer Brand im Lagerbereich des Gebäudes entsteht und sich ohne aktive Brandschutzsysteme und ohne Eingreifen der Feuerwehr ausbreitet. Wie bereits erwähnt, wird davon ausgegangen, dass das Gebäude vollständig in Holzbauweise errichtet ist, einschließlich der tragenden Elemente und der inneren Bauteile.

Das Lager zeichnet sich durch eine hochverdichtete vertikale Lagerung mit durchgehenden Regalsystemen und einer erheblichen Brandlast aus, die mit den gelagerten Gütern und Verpackungsmaterialien verbunden ist. Nach der Entzündung greift das Feuer rasch auf die gelagerten Materialien über, was zu einer schnellen horizontalen und vertikalen Brandausbreitung im gesamten Lagerbereich führt.

Aufgrund der Holzbauweise beschränkt sich der Brand nicht auf die bewegliche Brandlast. Nach einer gewissen Zeit tragen die Bauteile aktiv zur Brandentwicklung bei. Die fortschreitende Zersetzung der Holzbauteile durch Verkohlung, verbunden mit dem Versagen von Verbindungen und dem Aufbrechen von Fugen, legt kontinuierlich neue brennbare Oberflächen frei, wodurch der Brand aufrechterhalten und verstärkt wird.

Die Brandausbreitung erstreckt sich rasch über das gesamte Gebäude durch eine Kombination aus dem Einbezug gelagerter Güter, dem Beitrag der Tragkonstruktion zum Brand, der Kontinuität brennbarer Elemente und dem Fehlen einer wirksamen Brandabschnittsbildung.

Mit fortschreitendem Brand wird die Tragfähigkeit der Holzkonstruktion aufgrund von Querschnittsverlusten durch Verkohlung zunehmend verringert. Diese Zersetzung führt zu einer zunehmenden strukturellen Instabilität, zunächst auf lokaler Ebene und anschließend auf mehrere Bauteile ausgeweitet, was letztendlich zu einem teilweisen und schließlich zum vollständigen Einsturz des Gebäudes führt. Der Einsturz trägt weiter zur Brandentwicklung bei, indem er zusätzliche brennbare Oberflächen freilegt und die Belüftungsbedingungen innerhalb des Brandabschnitts verbessert.

Aus statischer Sicht verläuft der Versagensprozess nicht unbedingt plötzlich. Während der Abkling- und Abkühlphase können verbleibende Temperaturgradienten in Verbindung mit den bereits verringerten Querschnitten der Holzbauteile verzögerte Einsturzmechanismen oder eine weitere Verschlechterung der Tragfähigkeit auslösen. Diese Effekte können auch nach der Hochphase des Brandes auftreten und zur allgemeinen Instabilität des Bauwerks beitragen.

Am Ende des Ereignisses entwickelt sich der Brand zu einem Szenario, bei dem die gesamte Konstruktion vom Feuer erfasst ist und das Gebäude selbst als Brennstoff dient. Infolgedessen wird davon ausgegangen, dass das Lagerhaus vollständig zerstört ist und keine wiederverwertbaren Bauteile mehr vorhanden sind.

Aus quantitativer Sicht führt das MFL-Szenario zum Totalschaden der Anlage. Der Sachschaden wird auf 100 % der Wiederbeschaffungskosten des Gebäudes geschätzt, was etwa 4,5 Millionen Euro entspricht.

Es wird davon ausgegangen, dass die gelagerten Güter fast vollständig zerstört sind (100 % des Lagerwerts), was einem geschätzten Verlust in der Größenordnung von 2,5 Millionen Euro entspricht, was die hohe Lagerdichte und den vollständigen Brandbefall widerspiegelt.

Es wird mit einem vollständigen Betriebsausfall von 100 % gerechnet, verbunden mit einer langwierigen Wiederherstellungsphase aufgrund der erforderlichen vollständigen Wiederaufbaumaßnahmen. Die Ausfallzeit wird auf 12–15 Monate geschätzt, mit damit verbundenen finanziellen Verlusten von über 3 Millionen Euro, abhängig vom Umfang des Betriebs und dem Zeitplan für den Wiederaufbau und ohne Berücksichtigung der Möglichkeit, zusätzliche Räumlichkeiten anzumieten und/oder den Betrieb vorübergehend in Räumlichkeiten Dritter zu verlegen.

MFL Timber – Szenario		
	Betroffene Fläche	**% Schaden**
Gebäude Schaden	Gesamtes Gebäude	100 % der Wiederbeschaffungskosten des Gebäudes 100 % der Maschinen und Waren
Betriebsunterbrechung Betriebsunterbrechung[3]		100 % für 12 bis 15 Monate

Hinweis:
Die angegebenen Prozentsätze berücksichtigen keine möglichen Abhilfemaßnahmen wie die Anmietung zusätzlicher Räumlichkeiten und/oder die vorübergehende Verlagerung des Betriebs in Räumlichkeiten Dritter.

8.3 Szenarien zur normalen Verlustwahrscheinlichkeit (NLE)

8.3.1 NLE-Szenario für Stahlbeton

Das NLE-Szenario geht von einem lokal begrenzten Brand aus, der innerhalb des Lagerbereichs unter den zuvor definierten Randbedingungen entsteht, wobei zusätzlich von einer voll funktionsfähigen automatischen Sprinkleranlage ausgegangen wird. Das Lager zeichnet sich durch eine hochverdichtete vertikale Lagerung aus, was zu einer erheblichen, aber konzentrierten Brandlast führt.

Nach der Entzündung wird der Brand rasch erkannt und durch die Sprinkleranlage unter Kontrolle gebracht, wodurch die Ausbreitung des Feuers begrenzt und ein Flashover verhindert wird. Die Brandentwicklung bleibt auf den unmittelbaren Entstehungsbereich beschränkt, wobei nur eine begrenzte Anzahl von Lagerregalen betroffen ist.

Das Stahlbetontragwerk wird in seiner Tragfähigkeit nicht beeinträchtigt, da die thermische Belastung nicht ausreicht, um strukturelle Schäden zu verursachen.

Am Ende des Ereignisses beschränken sich die Schäden auf einen kleinen Teil der gelagerten Waren und auf einzelne Bereiche des Lagers, ohne Auswirkungen auf die strukturelle Integrität und mit nur geringfügigem Sanierungsaufwand.

Aus quantitativer Sicht führt das NLE-Szenario zu geringfügigen und stark lokal begrenzten Schäden. Der Sachschaden wird auf 2–3 % der gesamten Wiederbeschaffungskosten des Gebäudes geschätzt, was etwa 0,1 Millionen Euro entspricht.

Die gelagerten Güter sind im Entstehungsbereich teilweise betroffen, wobei die Verluste auf 5–10 % des Lagerwerts geschätzt werden, was etwa 0,1 bis 0,3 Millionen Euro entspricht.

Die Betriebsunterbrechung dürfte begrenzt sein; die Betriebsbeeinträchtigung wird auf 5–10 % für eine Dauer von 4 Wochen geschätzt, hauptsächlich aufgrund von Aufräumarbeiten, dem Ersatz beschädigter Güter und lokalen Systemüberprüfungen. Die damit verbundenen finanziellen Auswirkungen werden auf 0,15 bis 0,3 Millionen Euro geschätzt.

NLE-Szenario „Stahlbeton“		
	Betroffener Bereich	**% Schaden**
Immobilien Schaden	Gesamtes Gebäude	2–3 % der Wiederbeschaffungskosten des Gebäudes 5–10 % der Maschinen und Waren
Betriebsunterbrechung Betriebsunterbrechung[3]		5–10 % für 1 Monat

Hinweis:
Die angegebenen Prozentsätze berücksichtigen keine möglichen Abhilfemaßnahmen wie die Anmietung zusätzlicher Räumlichkeiten und/oder die vorübergehende Verlagerung des Betriebs in Räumlichkeiten Dritter.

8.3.2 NLE-Szenario für das Holzlager

Das NLE-Szenario für das Holzlager wird unter denselben Randbedingungen wie die Stahlbetonkonstruktion definiert, wodurch eine vollständige Vergleichbarkeit hinsichtlich der Zündquelle, der Brandlast und der Wirksamkeit der Brandschutzsysteme gewährleistet ist. Es wird davon ausgegangen, dass der Brand innerhalb des Lagerbereichs in einer vertikalen Regalanordnung mit hoher Lagerdichte entsteht, wobei die automatischen Sprinkleranlagen wie vorgesehen funktionieren.

Nach der Entzündung wird die Brandentwicklung zunächst durch die gelagerten Güter und Verpackungsmaterialien vorangetrieben. Aufgrund der hohen Lagerdichte breitet sich das Feuer innerhalb der ersten Regalebenen rasch aus; die Sprinkler werden jedoch innerhalb kurzer Zeit aktiviert, wodurch eine weitere vertikale und horizontale Ausbreitung begrenzt wird. Infolgedessen bleibt der Brand auf eine begrenzte Anzahl von Lagerfächern beschränkt, wodurch der Übergang zu einem voll entwickelten Raumbrand verhindert wird.

Im Gegensatz zur Stahlbetonkonstruktion führt das Holztragwerkssystem selbst unter kontrollierten Bedingungen zu einer potenziellen Wechselwirkung mit dem Brand. In den frühen Phasen bleiben die Bauteile durch Umhüllungsschichten geschützt; eine lokale Beschädigung dieser Schichten kann jedoch dazu führen, dass Holzoberflächen erhöhten Temperaturen ausgesetzt werden. An den betroffenen Stellen kann es zu einer begrenzten Verkohlung kommen, was zu einer geringfügigen Beeinträchtigung der Bauteile führt, ohne dass es zu einem Brand mit Einbeziehung der Tragkonstruktion kommt.

Neben thermischen Einwirkungen stellt die Auslösung von Sprinklern einen relevanten Schadensmechanismus in Holzkonstruktionen dar. Das Eindringen von Wasser in Verbindungen, Fugen und verdeckte Hohlräume kann zu einer Feuchtigkeitsansammlung führen, die nicht sofort erkennbar ist und eine gezielte Inspektion, Trocknung sowie in einigen Fällen den punktuellen Austausch betroffener Bauteile erfordert.

Am Ende des Ereignisses beschränken sich die Schäden in erster Linie auf eine begrenzte Anzahl von Lagerregalen, Teile des Holztragwerks direkt über dem Brandbereich sowie auf Bereiche, die von Rauch und Wasser betroffen sind.

Aus quantitativer Sicht werden die Gebäudeschäden auf 8–12 % der gesamten Wiederbeschaffungskosten geschätzt, was etwa 0,4 bis 0,6 Millionen Euro entspricht. Die gelagerten Güter sind im Entstehungsbereich teilweise betroffen, wobei die Verluste auf 10–15 % des gesamten Lagerwerts geschätzt werden, was etwa 0,3 bis 0,4 Millionen Euro entspricht.

Der Betriebsausfall bleibt begrenzt, ist jedoch im Vergleich zur Stahlbetonkonstruktion etwas höher, da für die Begutachtung, Trocknung und Reparatur der Holzbauteile zusätzlicher Zeitaufwand erforderlich ist. Die Betriebsunterbrechung wird auf 10–15 % bei einer Dauer von 1 bis 2 Monaten geschätzt, was etwa 0,3 bis 0,45 Millionen Euro entspricht.

NLE-Holzszenario		
	Betroffene Fläche	**% Schaden**
Immobilien Schaden	Gesamtes Gebäude	8–12 % der Wiederbeschaffungskosten des Gebäudes 10–15 % der Maschinen und Waren
Betriebsunterbrechung Betriebsunterbrechung[3]		10–15 % für 1 bis 2 Monate

Hinweis:
Die angegebenen Prozentsätze berücksichtigen keine möglichen Abhilfemaßnahmen wie die Anmietung zusätzlicher Räumlichkeiten und/oder die vorübergehende Verlagerung des Betriebs in Räumlichkeiten Dritter.

8.4 Szenariovergleich – Fallstudie Nr. 3

Die vergleichende Bewertung zwischen den Bauweisen aus Stahlbeton (RC) und Holz bestätigt, dass die Unterschiede im Schadensverhalten unter Bedingungen der normalen Schadenserwartung (NLE) begrenzt sind, während sie in Szenarien mit maximal vorhersehbarem Schaden (MFL) deutlich ausgeprägter werden. Unter der Annahme, dass Brandschutzsysteme – einschließlich Früherkennung und automatischer Sprinklerauslösung gemäß den Auslegungsgrundsätzen der NFPA 13 – effektiv funktionieren, bleibt die Brandentwicklung unter Kontrolle und auf den Entstehungsort beschränkt. Bei beiden Tragwerkskonstruktionen breitet sich das Ereignis nicht weiter aus, und der Schaden beschränkt sich in erster Linie auf gelagerte Waren, lokale Regalsysteme und bestimmte Gebäudeteile. Unter diesen Bedingungen kommt es bei den Tragwerkssystemen zu keiner nennenswerten thermischen Beeinträchtigung, und die Gesamtstabilität bleibt vollständig erhalten. Infolgedessen bleiben die Unterschiede zwischen den beiden Konfigurationen marginal, wobei bei der Holzbaulösung etwas stärkere Auswirkungen zu beobachten sind, die hauptsächlich auf lokale Auswirkungen der Wassereinwirkung und umfangreichere Inspektionsanforderungen nach dem Ereignis zurückzuführen sind. Es ist anzumerken, dass ohne das Vorhandensein automatischer Feuerlöschanlagen der Unterschied zwischen den beiden NLE-Szenarien deutlich stärker zugunsten des tatsächlichen Falls (Stahlbetonszenario) ausfallen würde.

Ein wesentlich anderes Verhalten zeigt sich unter MFL-Bedingungen, bei denen Brandschutzsysteme als unwirksam angenommen werden und keine externen Löschmaßnahmen berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang weist die Stahlbetonkonstruktion aufgrund ihrer Nichtbrennbarkeit und thermischen Trägheit ein hohes Maß an inhärenter Feuerwiderstandsfähigkeit auf. Obwohl es bei längerer Einwirkung hoher Temperaturen zu lokalem Abplatzen und Materialverschleiß kommen kann, wird erwartet, dass das gesamte Tragwerkssystem über einen erheblichen Zeitraum weitgehend stabil bleibt. Dadurch wird der Brand auf ein brennstoffgetriebenes Ereignis beschränkt, das in erster Linie von den gelagerten Gütern bestimmt wird, was zu einem Szenario mit hohen, aber vergleichsweise begrenzten Schäden führt. Die Folge ist eine teilweise Wiederherstellbarkeit des Tragwerks und ein effizienterer Wiederaufbauprozess nach dem Brand mit kürzeren Gesamtstillstandszeiten und einem geringeren Risiko von Betriebsunterbrechungen.

Im Gegensatz dazu zeigt die Holzbauweise unter denselben MFL-Bedingungen ein deutlich anderes Brandverhalten. Die Brennbarkeit des Tragwerks führt zu einer fortschreitenden Einbeziehung tragender Elemente, wobei Verkohlung, Versagen von Verbindungen und der Verlust der Querschnittstragfähigkeit eine kontinuierliche Eskalation der Brandschwere bewirken. Diese Einbeziehung des Tragwerks in den Brand führt zu einem sich selbst erhaltenden Verbrennungsprozess, der letztendlich zum vollständigen Einsturz des Gebäudes führt. Der Einsturz beschleunigt die Brandausbreitung zusätzlich, indem er weitere brennbare Oberflächen freilegt und die Belüftungsbedingungen verbessert.

Aus Sicht der Schadenshöhe führt dieses strukturelle Verhalten im Vergleich zum Fall mit Stahlbeton zu deutlich schwerwiegenderen Folgen. Der Sachschaden reicht bis zum vollständigen Wiederaufbau des Gebäudes, während sich der Betriebsausfall aufgrund der erforderlichen vollständigen Abriss- und Wiederaufbauarbeiten erheblich verlängert. Insgesamt bestätigt die Analyse, dass zwar das Verhalten unter kontrollierten Brandbedingungen weitgehend vergleichbar bleibt, die Wahl des Tragwerkssystems jedoch in extremen Schadensszenarien zu einem entscheidenden Unterscheidungsfaktor wird, wobei Stahlbeton hinsichtlich der Verhinderung eines brandbedingten Einsturzes, der Schadensbegrenzung und der Wiederherstellungszeit ein wesentlich widerstandsfähigeres Tragwerk bietet.

	Gebäudeschäden		Maschinen- und Sachschäden		Gesamt schaden Schaden	Betriebsunterbrechungsschäden		Gesamt-Sach- und Betriebsunterbrechungsschäden
MFL – Haftpflicht	50–70 %	ca. 2,7 Mio. €	85–90 %	ca. 2,2 Mio. €	ca. 4,9 Mio. €	70 % für 6 bis 9 Monate	ca. 2,1 Mio. €	~7 Mio. €
MFL – Holz	100 %	ca. 4,5 Mio. €	100 %	ca. 2,5 Mio. €	~7 Mio. €	100 % für 15 Monate	ca. 3 Mio. €	ca. 10 Mio. €
NLE – RC	2–3 %	ca. 0,1 Mio. €	5–10 %	ca. 0,2 Mio.	ca. 0,3 Mio. €	5–10 % für 1 Monat	ca. 0,2 Mio.	ca. 0,5 Mio. €
NLE – Holz	8–12 %	ca. 0,5 Mio. €	10–15 %	ca. 0,3 Mio. €	ca. 0,8 Mio. €	10–15 % für 1 bis 2 Monate	ca. 0,4 Mio. €	ca. 1,2 Mio. €

9. Fallstudie Nr. 4: Schulgebäude

9.1 Beschreibung der Anlage

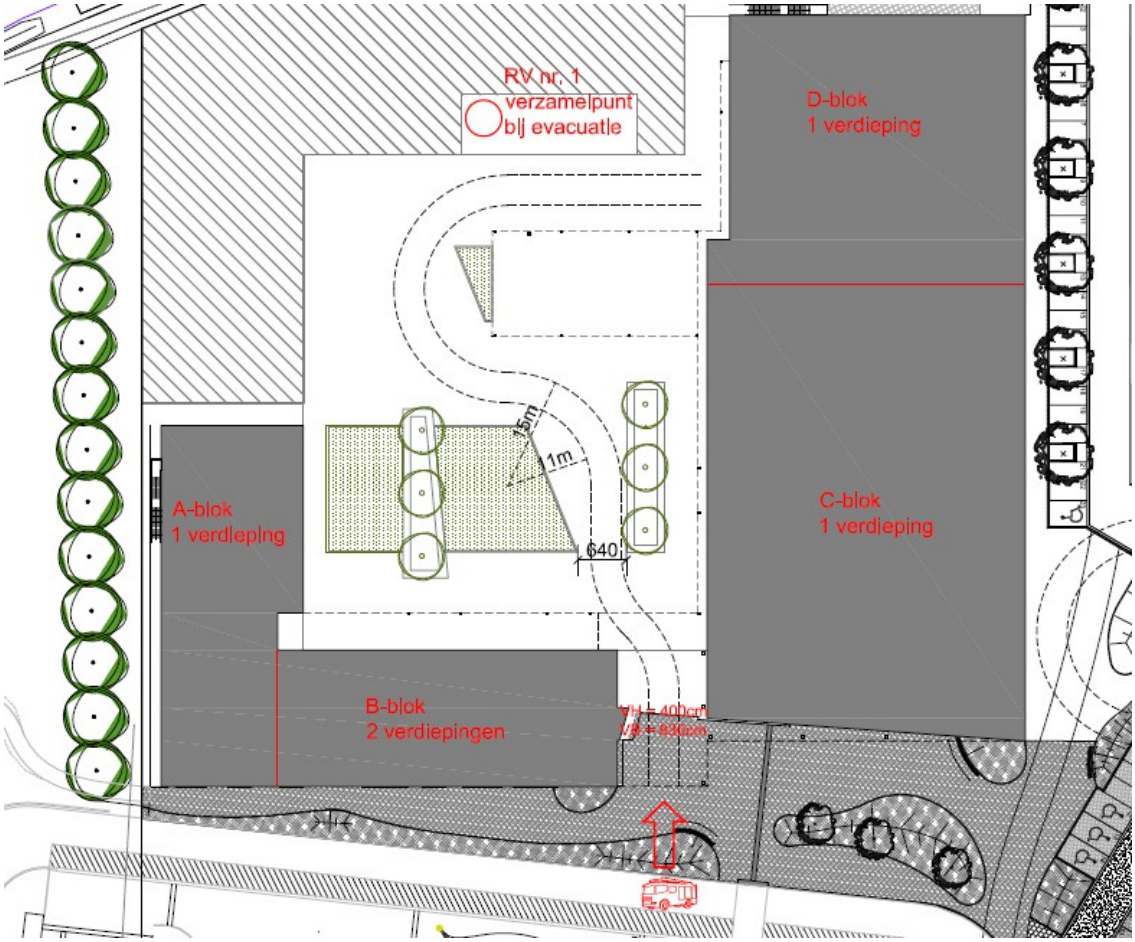
Die vierte Fallstudie betrifft eine technische Sekundarschule in Belgien, die zwischen 2014 und 2016 im Rahmen eines öffentlichen DBFM-Schulbauprogramms errichtet und durch einen vollständigen Satz von Bestandszeichnungen für Architektur und Tragwerk dokumentiert wurde. Die Campusgestaltung, die zertifizierte Brandschutzleistung der Bauteile und das Vorhandensein technischer Werkstätten machen diese Anlage besonders repräsentativ für den Umfang des Projekts.

Die Schule ist als Campus mit vier miteinander verbundenen Blöcken (A, B, C und D) angelegt, die um einen zentralen Innenhof angeordnet sind, mit zwei ausgewiesenen Sammelplätzen im Außenbereich. Block A (Erdgeschoss + 1 Obergeschoss) beherbergt die Mensa, einen großen, einräumigen Speisesaal von ca. 468 m², sowie Lehrerzimmer und Sanitäranlagen. Block B (Erdgeschoss + 2 Obergeschosse) beherbergt die allgemeinen Unterrichtsräume sowie im Erdgeschoss einen Hörsaal und die Schülerbetreuung; sein typisches Stockwerk bildet einen einzelnen Brandabschnitt von ca. 890–1.030 m². Die Blöcke C und D (Erdgeschoss + 1 Stockwerk, mit einem hohen, einräumigen Erdgeschoss) beherbergen das technische Herzstück der Schule: die Metall- und Schweißwerkstätten (ein einzelner Brandabschnitt von ca. 1.588 m², der größte des gesamten Komplexes), die Holzwerkstätten (ca. 1.398 m²) sowie die dazugehörigen Lager- und Technikbereiche. Im ersten Obergeschoss der Blöcke C und D befinden sich weitere Unterrichtsräume (Brandabschnitte von 1.141 m² und 600 m²).

Die gesamte Bruttogeschossfläche des Komplexes beträgt etwa 9.500–10.000 m². Die typische Geschosshöhe beträgt in den Unterrichtsblöcken 3,85 m, während die Werkstatthalle eine Innenhöhe von ca. 4,9 m bei einer Dachhöhe von +9,40 m erreicht. Das Dach der Werkstatt verfügt über eine sich wiederholende Anordnung von Polycarbonat-Oberlichtern (jeweils ca. 9,00 × 2,40 m), die die Produktionsbereiche mit Tageslicht versorgen, sowie über eine Photovoltaikanlage auf dem Dach mit einer Leistung von ca. 131 kWp.

Aus Sicht der Belegung handelt es sich um eine Bildungseinrichtung mittlerer Dichte mit einer Auslegungsbelegung in der Größenordnung von 1.800 bis 2.000 Personen, die auf die einzelnen Bereiche verteilt sind. Die Brandlasten sind in den Unterrichtsblöcken moderat und verteilt (Möbel, Unterrichtsmaterialien, IT-Ausstattung), während sie in den Werkstattblöcken, in denen Maschinen, Rohstoffe (Holzprofile, Stahlbleche), Fertigerzeugnisse, Schmierstoffe und Verpackungen vorhanden sind, deutlich höher und konzentrierter sind.

Ein besonderes Merkmal dieser Einrichtung ist das Vorhandensein spezieller technischer Risiken, die typischerweise mit der technischen Ausbildung verbunden sind: ein eigenes Schweißzentrum im Erdgeschoss von Block C, ausgestattet mit Schweißkabinen, lokalen Absauganlagen und einem ortsfesten Gasversorgungsnetz, das von einem separaten Gasraum und einem externen Gasflaschenlager gespeist wird; Holzstaubabsauganlagen für den Maschinenpark der Holzwerkstätten (Blöcke C und D); sowie ein Druckluftversorgungsnetz. Diese Anlagen, die in den Bestandszeichnungen der Haustechnik vollständig dokumentiert sind, stellen sowohl glaubwürdige Zündquellen als auch Faktoren dar, die die Brandentwicklung in schwerwiegenden Szenarien beeinflussen können.



Aus brandschutztechnischer Sicht ist das Gebäude mit einer vollständigen automatischen Brandmeldeanlage ausgestattet, die aus optischen und Ionisations-Rauchmeldern im gesamten Gebäude besteht und durch Gasmelder mit lokalen Warnleuchten in den Werkstätten und Gasbereichen, manuelle Feuermelder hinter Glasbruchscheiben, Alarmhörner sowie eine Schnittstelle zur Feuerwehr ergänzt wird. Die Erstbekämpfungsmittel bestehen aus an der Wand montierten Schlauchhaspeln, die in feuerbeständigen Nischen untergebracht sind, sowie tragbaren ABC-Feuerlöschern; natürliche Rauchabzugsklappen sind vorhanden. Entsprechend der gängigen europäischen Praxis für Schulgebäude ist kein automatischer Sprinklerschutz installiert. Die Anfahrtszeit der örtlichen Feuerwehr beträgt etwa 8 Minuten, ein Parameter, der in den nachfolgend entwickelten Szenarien zur normalen Verlustwahrscheinlichkeit eine zentrale Rolle spielt. Das Brandschutzkonzept des Gebäudes stützt sich daher auf die Kombination aus Früherkennung, schnellem Eingreifen von außen und einer robusten passiven Brandabschnittsstrategie.

Der Wiederaufbauwert des Gebäudes wird auf etwa 20 Millionen Euro geschätzt, während sich der Versicherungswert des Gebäudeinhalts (Möbel, Werkstattmaschinen, Lehr- und IT-Ausstattung) auf fast 4,5 Millionen Euro beläuft, was zu einem gesamten exponierten Vermögenswert von etwa 24,5 Millionen Euro führt, ohne Berücksichtigung indirekter wirtschaftlicher Auswirkungen.

Posten	Wiederbeschaffungswert in Euro (€)
Bauarbeiten	15.500.000
Technische Anlagen	2.200.000
Elektroinstallation	1.500.000
Technische Kosten: Inbetriebnahme, Bauaufsicht…	800.000
Einrichtung und Ausstattung	4.400.000
Gesamt	24.400.000

Insgesamt stellt die Einrichtung eine moderne, hochwertige öffentliche Bildungseinrichtung dar, die sich durch eine klare Trennung zwischen stark frequentierten Unterrichtsbereichen und Werkstattbereichen mit hoher Brandlast, eine dokumentierte und zertifizierte passive Brandschutzstrategie sowie ein aktives Schutzkonzept auszeichnet, das eher auf Erkennung und externem Eingreifen als auf automatischer Löschung basiert. Diese Kombination macht die Fallstudie besonders geeignet, um zu beurteilen, wie die Wahl des Baumaterials den Brandverlauf, das Ausmaß der Schäden und die Wiederherstellungszeit in einer Gebäudenutzungsart (Schulen) beeinflusst, in der Massivholzkonstruktionen europaweit das schnellste Marktwachstum verzeichnen.

9.1.1 Ist-Zustand – Stahlbetonkonstruktion

Das Gebäude wurde mit einem vollständig vorgefertigten Stahlbeton-Tragsystem realisiert. Das vertikale Tragwerk besteht aus vorgefertigten Stahlbetonsäulen und vorgefertigten Kernwänden an den Treppen- und Technikschächten, ergänzt durch tragende vorgefertigte Wandpaneele. Die horizontalen Tragwerke bestehen aus vorgespannten Hohlkernplatten, die mit einer vor Ort gegossenen Stahlbeton-Decke ergänzt werden und so eine Membranwirkung sowie eine wirksame horizontale Brandabschnittsbildung zwischen den Stockwerken gewährleisten. Die Dachkonstruktionen über den weitgespannten Bereichen werden mit tieferen vorgespannten Hohlkernelementen der Serien SPHS 320 und SPHS 400 realisiert, wodurch Spannweiten in der Größenordnung von 10,6 m über den Werkstatthallen erreicht werden. Vorgefertigte vorgespannte Träger in Rechteck- und Längsprofilausführung vervollständigen den Rahmen mit Tiefen von bis zu 1.335 mm und Einzel-Längen von bis zu 17,8 m in den Werkstattfeldern. Die Betonfestigkeitsklassen betragen C30/37 für Stützen und Wandelemente sowie C50/60 bis C60/75 für die vorgespannten Elemente. Stahlbauteile kommen nur in untergeordneten Positionen vor, wie beispielsweise bei Stürzen und Vordachstützen, sowie in Form von freistehenden Leichtbaukonstruktionen aus Stahl, die Nebenfunktionen erfüllen.

Aus Sicht des Brandschutzes weisen die Bestandsbauzeichnungen aller Blöcke ausdrücklich eine Feuerwiderstandsdauer der Konstruktion von 1 Stunde (R60) aus, und die Fertigungstabellen der Fertigteilelemente geben die 60-minütige Feuerwiderstandsdauer auf der Ebene der einzelnen Elemente an. Das Brandverhalten des Tragwerks ist daher nicht bloß eine Bemessungsannahme, sondern ein zertifiziertes Merkmal der gelieferten Produkte, das durch die intrinsischen Eigenschaften der Elemente (Betondeckung, Querschnittsmasse und die geringe Wärmeleitfähigkeit von Beton) erreicht wird, ohne auf aufgebrachte Schutzsysteme angewiesen zu sein – im Einklang mit dem in Abschnitt 2 erörterten Rahmenkonzept.

Ein besonders relevantes Merkmal dieser Anlage ist die Umsetzung der inneren Brandabschnittsgrenzen innerhalb des Werkstattblocks. Die Trennung zwischen den Hauptwerkstattabschnitten wird durch spezielle vorgefertigte Stahlbeton-Brandschutzwände mit einer Dicke von 140 mm erreicht, die sich über die gesamte Höhe des Gebäudes bis zur Dachoberkante (+9,40 m) erstrecken. Diese Wände bilden physische, nicht brennbare Brandbarrieren, die integraler Bestandteil des Tragwerks sind und nicht von Verkleidungen, vor Ort durchgeführten Fugenabdichtungen oder wartungsintensiven Bauteilen abhängig sind. Zusammen mit den REI60-Innenraumtrennwänden, den Brandschutztüren und der brandschutzgeprüften Verglasung zum Schutz des Innenraums setzen sie die in Abschnitt 9.1 beschriebene Brandabschnittsgestaltung um.

Die Gebäudehülle besteht aus vorgefertigten Beton-Sandwichplatten, für die in den Bestandszeichnungen eine Feuerwiderstandsdauer von 30 Minuten angegeben ist. Die Außenflächen der Gebäudehülle sind somit nicht brennbare Betonoberflächen, wodurch der Beitrag der Fassaden zur Ausbreitung des Feuers nach außen begrenzt wird. Die einzigen nennenswerten brennbaren Bauteile der Gebäudehülle sind die über die Werkstattleiter verteilten Polycarbonat-Oberlichter und die Polycarbonat-Vordächer der überdachten Außenbereiche; diese Elemente dienen in Extremfällen als bevorzugte Versagensstellen für die Rauch- und Flammenableitung durch das Dach, beeinträchtigen jedoch nicht die tragende Funktion der darunterliegenden Hohlkern-Dachkonstruktion.

Aus brandschutztechnischer Sicht ist das Tragwerksystem vollständig nicht brennbar (Brandverhaltensklasse A1) und trägt nicht zur Brandlast der Brandabschnitte bei. Die Brandentwicklung wird daher ausschließlich durch den Inhalt bestimmt, während die Konstruktion als stabilisierendes, nicht am Brandvorgang beteiligtes Element fungiert, dessen Zersetzungsmechanismen im Brandfall denen entsprechen, die in Abschnitt 2.3.1 beschrieben sind: fortschreitende und vorhersehbare Abnahme der mechanischen Eigenschaften mit steigender Temperatur, hohe thermische Trägheit der massiven vorgespannten Querschnitte und mögliches lokales Abplatzen, ohne plötzlichen Verlust der Tragfähigkeit. Die Kombination aus einem R60-zertifizierten Rahmen, vollhohen Betonbrandwänden im Bereich mit der höchsten Brandlast und einer durch die Hohlkerndecken gewährleisteten Trennung der einzelnen Stockwerke schafft ein robustes passives Rahmenwerk, das in der Lage ist, selbst einen schweren Brand auf den Entstehungsraum zu beschränken und die Gesamtstabilität des Campus zu bewahren – Bedingungen, die sowohl das erwartete Schadensausmaß als auch die in den folgenden Szenarien bewertete Wiederherstellbarkeit nach einem Brand direkt beeinflussen.

9.1.2 Simulation – Holzbauweise

In der alternativen Konfiguration wird davon ausgegangen, dass die Schule unter Verwendung eines vollständig auf Holz basierenden Tragwerkssystems realisiert wird, das repräsentativ für die zeitgemäße Holzverbundbauweise bei Bildungsgebäuden ist. In Übereinstimmung mit den in Abschnitt 5 dargelegten vergleichenden Entwurfsannahmen wird diese Konfiguration als kontrollierter Materialersatz entwickelt: Das Gebäude behält die gleiche Gesamtgeometrie, die gleichen Volumina, Geschosshöhen, das gleiche Tragraster, die gleiche Spannweitenanordnung, die gleichen Brandabschnittsgrenzen und die gleichen Gesamtabmessungen wie das tatsächliche Gebäude aus Stahlbetonfertigteilen bei. Lediglich das Material des tragenden Systems wird variiert, sodass der Vergleich den Einfluss des Brandverhaltens des Baumaterials isoliert betrachtet.

Der Umfang und die Grenzen dieser Annahme müssen von vornherein klar sein. Das Ziel dieser Studie ist es weder, einen endgültigen tragwerkstechnischen Entwurf für die Holzschule zu entwickeln, noch die Bemessung der Bauteile, die Detailgestaltung der Verbindungen, die Steifigkeit, das dynamische Verhalten oder die Fundamentlasten zu optimieren. Solche Aspekte, die sich zwischen einem Beton- und einem Holzgebäude zu Recht unterscheiden würden, werden bewusst nicht

untersucht. Die Substitution ist ein Modellierungsinstrument der Brandtechnik: Zwei geometrisch identische Gebäude werden ausschließlich verglichen, um zu beobachten, wie sich ein Brand gleicher Ursache und mit gleichem Brennstoff entwickelt, wenn die umgebende tragende Struktur im einen Fall nicht brennbar und im anderen Fall brennbar ist. Die geometrische Äquivalenz ist eine bewusste Randbedingung der Analyse und keine Behauptung, dass die beiden Konstruktionen mechanisch austauschbar sind; sie wird genau deshalb gewählt, um die Brandabschnittsvolumina, die Belüftungsbedingungen und die freiliegenden Oberflächen zwischen den beiden Konfigurationen konstant zu halten.

Bei der Holzkonfiguration wird von einem vollständigen Massivholzbau ausgegangen. Das vertikale Tragwerk besteht aus Wandpaneelen aus Brettsperrholz (CLT), die sowohl die Tragfähigkeit für die Eigenlast als auch die Steifigkeit in der Ebene für die Gesamtstabilität gewährleisten. Die Zwischenböden und die weitgespannten Dächer der Werkstatt- und Speisebereiche werden mit CLT-Bodenplatten sowie Brettschichtholz-Trägern und -Stützen ausgeführt, deren Abmessungen innerhalb der für den Holzbau typischen Bereiche für die jeweiligen Spannweiten liegen; die Treppen- und Schachtkerne werden ebenfalls aus CLT angenommen. Das Fundamentsystem bleibt aus Stahlbeton, wie es bei Holzgebäuden üblich ist; es ist das einzige Element, das beiden Konfigurationen gemeinsam ist, und hat keinen Einfluss auf die analysierten Brandszenarien.

Die brandtechnische Auslegung der Holzkonfiguration erfolgt gemäß EN 1995-1-2 auf der Grundlage der Überprüfung des verbleibenden wirksamen Querschnitts anhand der in Abschnitt 2.3.2 erörterten Verkohlungsmodelle. Um die für das tatsächliche Gebäude dokumentierten Feuerwiderstandsklassen zu erreichen, wird davon ausgegangen, dass die Holzbauteile durch passive Brandschutzsysteme geschützt sind, die der aktuellen Praxis der Brandauslegung von Holzbauten entsprechen, hauptsächlich durch eine Verkapselung der tragenden Bauteile und der Brandabschnittswände mit Gipskartonplatten, gegebenenfalls ergänzt durch opfernde Verkohlungsschichten. Der Vergleich geht nicht von unverkleidetem, ungeschütztem Holz aus, sondern von einem normkonformen Gebäude, bei dem die geforderten Brandschutzklassen bereits in der Planungsphase durch die Kombination aus Verkohlungswiderstand und Schutzverkleidungen nominell erfüllt werden.

Die detaillierte Dimensionierung der Schutzschichten, die Auslegung der Verbindungen und die Fugengestaltung gehen über den Rahmen dieser vergleichenden Bewertung hinaus und werden anhand verallgemeinerter ingenieurtechnischer Annahmen behandelt, die mit den aktuellen Methoden der Brandschutzauslegung für Massivholzbau im Einklang stehen. Die so definierte Konfiguration bietet einen kontrollierten und methodisch transparenten Rahmen: eine geometrisch identische, normkonforme, vollständig ummantelte Holzschule im Vergleich zur tatsächlichen Schule aus Betonfertigteilen, mit dem alleinigen Ziel, den Einfluss der strukturellen Brennbarkeit auf den Brandverlauf, das Ausmaß der Schäden, Sachschäden, Betriebsunterbrechungen und die Wiederherstellbarkeit nach einem Brand zu bewerten.

9.2 Szenarien für den maximal vorhersehbaren Schaden (MFL)

9.2.1 MFL-Szenario für Stahlbeton

Für das untersuchte Schulgebäude wird das MFL-Szenario gemäß der in Abschnitt 4 definierten deterministischen, konservativen Methodik entwickelt, wobei NFPA-basierte brandtechnische Annahmen zur Brandentstehung und -entwicklung mit der FM Global-Logik zur Schadensbewertung für Sachschäden und Betriebsunterbrechungen kombiniert werden. Im Einklang mit der MFL-Definition wird davon ausgegangen, dass alle aktiven und funktionsfähigen Schutzmaßnahmen nicht verfügbar oder unwirksam sind. Das automatische Brandmelde- und Alarmsystem führt also nicht zu einem rechtzeitigen Eingreifen, die Feuerlöschschläuche

und tragbare Feuerlöscher werden nicht effektiv eingesetzt, und die achtminütige Anfahrzeit der Feuerwehr führt nicht zu einer frühzeitigen Eindämmung des Brandes während seiner kritischen Ausbreitungsphase. Es wird daher davon ausgegangen, dass sich der Brand ungehindert ausbreitet, bis er durch die Begrenzungen des Entstehungsraums oder durch den Verbrauch des verfügbaren Brennstoffs gestoppt wird.

Als Brandabschnitt wird die Metall- und Schweißwerkstatt im Erdgeschoss von Block C angenommen, die den größten einzelnen Brandabschnitt des Komplexes (ca. 1.588 m^2) und den Bereich mit der höchsten und ungünstigsten Brandlast darstellt. Als Ursache für die Entzündung wird eine Heißarbeit im Schweißzentrum angenommen – eine plausible und gut dokumentierte Zündquelle angesichts des fest installierten Gasverteilungsnetzes, der Schweißkabinen und des Vorhandenseins brennbarer Materialien, Schmiermittel und Verpackungen in unmittelbarer Nähe. Diese Annahme verortet den Brand in dem Brandabschnitt mit der größten Brennstofflast, der größten exponierten Fläche und der höchsten Wertkonzentration und steht im Einklang mit dem in der Bestandsdokumentation ermittelten besonderen Risikoprofil.

Nach der Entzündung breitet sich das Feuer mit hoher Wachstumsrate aus, unterstützt durch die brennbaren Inhalte der Werkstatt (Holzbestände und Fertigprodukte, Kunststoffe, Verpackungen, Schmierstoffe) und lokal beschleunigt durch das Gasverteilungsnetz, das die Schweißstationen versorgt. Heiße Gase sammeln sich unter dem Dach an, und ohne wirksame Brandbekämpfung werden im Entstehungsraum Flash-Over-Bedingungen erreicht, wobei die Temperaturen in den oberen Schichten Werte von 900–1000 °C erreichen und die anhaltende thermische Belastung deutlich länger als eine Stunde andauert. Die Polycarbonat-Oberlichter versagen frühzeitig, wodurch Rauch und heiße Gase durch das Dach entweichen und zusätzlicher Sauerstoff eindringt, der den voll entwickelten Brand aufrechterhält. Der Brand dauert so lange an, bis die brennbaren Inhalte der Werkstatt weitgehend verbrannt sind.

Aus bautechnischer Sicht trägt der Rahmen aus Stahlbetonfertigteilen nicht zur Brandlast bei und ist zu keinem Zeitpunkt an der Verbrennung beteiligt, obwohl er einer starken thermischen Belastung ausgesetzt ist. Die Oberflächenschichten von Stützen, Trägern und Hohlkern-Dachelementen verlieren gemäß den in Abschnitt
2.3.1. Der Vorspann- und Bewehrungsstahl verliert schrittweise an Streckgrenze, wenn die Stahltemperaturen etwa 400–500 °C überschreiten, und in den am stärksten beanspruchten Bereichen kann es zu Abplatzungen der Betondeckung kommen. Diese Mechanismen entwickeln sich schrittweise und nicht plötzlich. Die hohe thermische Trägheit der massiven Querschnitte begrenzt die Eindringtiefe der Wärme, ein wesentlicher Teil jedes Querschnitts bleibt unterhalb der kritischen Temperaturen, und die statische Unbestimmtheit des Fertigteilrahmens ermöglicht eine Spannungsverteilung. Zwar ist ein begrenzter, lokaler Einsturz einzelner Hohlkern-Dachelemente in der heißesten Zone ein vorhersehbares Ergebnis, doch wird die globale strukturelle Stabilität von Block C und des gesamten Campus dadurch nicht beeinträchtigt.

Das entscheidende Merkmal dieser Konfiguration ist das Verhalten der Brandabschnitte. Die 140 mm dicken, über die gesamte Höhe reichenden Brandschutzwände aus Fertigbeton, die die Werkstattabschnitte voneinander trennen, bilden zusammen mit den Trennwänden, den Hohlkerndecken mit tragender Aufschüttung und den Brandschutztüren inhärente, nicht brennbare Barrieren, die nicht von der Integrität der angebrachten Verkleidungen abhängen. Unter MFL-Bedingungen behalten sie ihre Trennfunktion für die Dauer des voll entwickelten Brandes bei, begrenzen das Ereignis auf den Entstehungsraum und verhindern eine horizontale Ausbreitung auf die angrenzenden Holzwerkstätten sowie eine vertikale Ausbreitung auf die oberen Unterrichtsgeschosse. Der Brand wird letztendlich durch die Kombination aus Brennstoffmangel und dem Fortbestehen der umgebenden

nicht brennbaren Brandabschnitte. Die übrigen Blöcke der Schule (A, B sowie die oberen Stockwerke von C und D) bleiben baulich intakt und von direkter Einwirkung des Feuers unberührt, wobei sich der Schaden höchstens auf die Rauchausbreitung durch undichte Durchführungen beschränkt.

Unter diesen Umständen ist der Sachschaden zwar schwerwiegend, aber begrenzt. Es wird davon ausgegangen, dass die Einrichtungsgegenstände der Werkstatt zerstört sind, und die direkt dem Feuer ausgesetzten Bauteile (die Hohlkern-Dachkonstruktion von Block C sowie die am stärksten exponierten Träger und Stützenköpfe) müssen abgerissen und wieder aufgebaut werden. Außerhalb des Brandherdes beschränkt sich der Gebäudeschaden auf eine lokale Rauchverschmutzung. Auf dieser Grundlage werden die gebäudebezogenen Schäden auf etwa 25–30 % des Wiederbeschaffungswerts des Gebäudes geschätzt, was den Wiederaufbau des Daches und der Tragkonstruktion des Werkstattbereichs sowie die Reinigung und Wiederherstellung der rauchgeschädigten Oberflächen an anderen Stellen widerspiegelt. Die Schäden am Inventar werden auf etwa 35–40 % des versicherten Inventarwerts geschätzt und konzentrieren sich auf die hochwertigen Maschinen und Anlagen der Werkstatt in Block C.

Die Betriebsunterbrechungskomponente für ein Schulgebäude wird anhand der Zeit ausgedrückt, die zur Wiederherstellung der vollen Betriebsfähigkeit erforderlich ist, und nicht als Einnahmeausfall. Die baulichen Schäden beschränken sich auf einen einzigen Block, und die modulare Campusgestaltung ermöglicht es, den Unterricht in den nicht betroffenen Blöcken fortzusetzen, während der Werkstattblock wieder aufgebaut wird. Die vollständige Wiederherstellung des Werkstattblocks – einschließlich bautechnischer Begutachtung, Abriss, Wiederaufbau, Neuinstallation der technischen Versorgungsnetze (Gas, Rauch- und Staubabsaugung, Druckluft, Elektrik) sowie Neuausstattung – wird voraussichtlich einen Zeitraum in der Größenordnung von 9 bis 12 Monaten in Anspruch nehmen.

Die nicht brennbare Bauweise trägt daher nicht zur Ausweitung des Ereignisses bei. Ihre Nichtbrennbarkeit, thermische Robustheit und inhärente Brandabschnittsbildung beschränken den Schaden auf den Ursprungsbrandabschnitt, bewahren die Gesamtstabilität des Campus und bestimmen einen Wiederherstellungsprozess, der in erster Linie durch die Instandsetzung eines einzelnen Blocks und nicht durch den Wiederaufbau des gesamten Gebäudes bestimmt wird.

MFL-Szenario mit Stahlbeton		
	Betroffener Bereich	**% Schaden**
Objekt Schaden	Block C – Metall- und Schweißbereich	25–30 % der Wiederbeschaffungskosten des Gebäudes 35–40 % des Wertes von Hausrat und Ausrüstung
Betriebsunterbrechung Betriebsunterbrechung[3]		100 % der Fläche für 9 bis 12 Monate

Hinweis:
Die Prozentsätze berücksichtigen nicht die zusätzlichen Kosten im Zusammenhang mit der vorübergehenden Verlagerung des Unterrichts (z. B. Anmietung und Aufstellung von provisorischen Unterrichtsmodulen, Transport und Logistik).

9.2.2 Szenario „Holz-MFL“

Das Szenario für den maximal vorhersehbaren Verlust bei der Holzkonfiguration wurde unter genau denselben Annahmen entwickelt, die in Abschnitt 9.2.1 zugrunde gelegt wurden. Die Entzündung erfolgt infolge von Heißarbeiten in der Schweißwerkstatt im Erdgeschoss von Block C.

Der Entstehungsraum ist dieselbe Metall- und Schweißwerkstatt mit einer Fläche von ca. 1.588 m²; die brennbaren Inhalte und die Lüftungsbedingungen bleiben unverändert, und es wird davon ausgegangen, dass alle aktiven und funktionsfähigen Brandschutzmaßnahmen nicht vorhanden oder unwirksam sind. Die einzige Variable ist die tragende Konstruktion, die gemäß Abschnitt 9.1.2 aus CLT-Holzwand- und -Bodenplatten sowie Brettschichtholzträgern und -stützen besteht, geschützt durch eine Gipsplattenverkleidung, die so dimensioniert ist, dass sie nominell die für das tatsächliche Gebäude dokumentierte Brandschutzklasse R60 erreicht.

Die Anfangsphase des Brandes ist konstruktionsbedingt identisch mit der in Abschnitt 9.2.1 beschriebenen: schnelles Ausbreiten über den Werkstattboden, angefacht durch die brennbaren Einrichtungsgegenstände, wobei sich heiße Gase unter dem Dach ansammeln, im Entstehungsraum werden Flashover-Bedingungen erreicht, die Temperaturen in den oberen Schichten nähern sich 900–1.000 °C an, und es kommt zu einem vorzeitigen Versagen der Polycarbonat-Oberlichter. Während dieser Phase erfüllt die Einhausung ihre beabsichtigte Funktion, und das Ereignis bleibt vorübergehend ein durch den Inhalt bestimmter Brand.

Die entscheidende Entwicklung des Szenarios tritt ein, wenn die voll entwickelte Phase über die nominelle Schutzdauer der Verkleidungen hinausgeht. Bei anhaltender Einwirkung nach dem Flashover von deutlich mehr als einer Stunde kalzinieren die Gipsplatten zunehmend, schrumpfen und reißen, und es kommt zum Abfallen der Platten an Fugen, Befestigungen und Kanten – den bekannten Schwachstellen jedes angewandten Schutzsystems, wie in Abschnitt 2.3.2 erläutert.

Da die MFL keine Schutzschichten berücksichtigt, deren Leistung von der Verarbeitungsqualität, der Kontinuität und der Instandhaltung abhängt, muss der lokale Durchbruch der Kapselung als vorhersehbares Ereignis angesehen werden. Überall dort, wo die Verkleidungen verloren gehen, entzünden sich die Holzoberflächen und beginnen zu verkohlen; das Vorrücken der Verkohlungsfront zu den Klebeflächen der kreuzweise laminierten Platten kann die Ablösung verkohlter Lamellen auslösen, wodurch frisches Holz freigelegt wird und es zu der in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen schrittweisen Regeneration des Brennstoffs kommt.

Ab diesem Zeitpunkt wird die tragende Konstruktion selbst Teil des verfügbaren Brennstoffs. Die freiliegenden Wand-, Decken- und Balkenoberflächen fügen der Brennstofflast des Inhalts eine erhebliche und verteilte Brennstofflast hinzu, wodurch sich die Brandfläche, die Strahlungsbelastung innerhalb des Brandabschnitts und die gesamte Wärmefreisetzungsrate erhöhen. Der Zustand der Brennstofferschöpfung, der andernfalls einen durch den Inhalt bestimmten Brand innerhalb des Ursprungsraums beenden würde, wird hinausgezögert, und die voll entwickelte Phase wird genau in dem Zeitraum verlängert, in dem die Brandabschnittsbildung ihre Funktion erfüllen muss. Durch die beschädigten Dachfensteröffnungen dringende Flammen setzen die Holzdachelemente zusätzlich direkt frei und schaffen so einen externen Ausbreitungsweg über das Werkstattdach.

Die entscheidende Folge betrifft die Brandabschnittsbildung. Die inneren Brandabschnittsgrenzen des Werkstattflügels werden durch gekapselte CLT-Platten gebildet, deren Trennfunktion von der Unversehrtheit der Verkleidungen abhängt. Sobald die Schutzplatten auf der Brandseite verloren gehen, entzünden sich die Trennelemente selbst und verlieren an Querschnitt, während Plattenfugen, Verbindungszonen und Versorgungsdurchführungen bevorzugte Ausbreitungswege für heiße Gase und Flammen darstellen.

Der Verlust der Trennfunktion ist daher eine vorhersehbare Folge, und das Feuer breitet sich horizontal in die angrenzenden Holzwerkstätten (ca. 1.398 m²) aus, wo das gelagerte Holz, der Maschinenpark und die Holzstaubabsauganlagen ein außerordentlich günstiges Sekundärbrennbett bieten, sowie vertikal durch die Wand-Boden-Übergänge und verdeckte Hohlräume in die Unterrichtsräume im ersten Obergeschoss der Blöcke C und D (ca. 1.141 m² bzw. 600 m²). Es ist daher von einer Einbeziehung des gesamten Werkstattflügels auszugehen. Angesichts der Verbindung der vier Blöcke rund um den Innenhof sind die Blöcke A und B zumindest einer starken Rauch- und Wärmeausbreitung ausgesetzt, und eine Ausbreitung des Brandes an den Schnittstellen kann nicht ausgeschlossen werden.

Teilweise Einstürze von Boden- und Dachelementen innerhalb der vom Brand betroffenen Bereiche sind vorhersehbar, und die Gesamtstabilität des Werkstattflügels ist beeinträchtigt. In Übereinstimmung mit dem in Abschnitt 2.3.2 erörterten Ausbrennverhalten bleibt die Konstruktion während und nach der Abklingphase anfällig: In den verkohlten Schichten, den verdeckten Hohlräumen und den Klebeverbindungen hält die Schwelbrandverbrennung an, und verzögerte strukturelle Versagen während der Abkühlphase sind eine dokumentierte Möglichkeit. Diese Phänomene zwingen die Feuerwehr zu defensivem Einsatz, verhindern eine sichere Innenlöschung, bergen ein konkretes Risiko der Wiederentzündung und erfordern letztendlich den Abriss der vom Brand betroffenen Holzkonstruktion, da die Resttragfähigkeit verkohlter und delaminierter Bauteile und Verbindungen nicht zuverlässig überprüft oder wirtschaftlich wiederhergestellt werden kann.

Der Sachschaden erstreckt sich weit über den Ursprungsbrandraum hinaus. Der Inhalt des gesamten Werkstattflügels ist zerstört, der Inhalt der übrigen Blöcke weist eine weitreichende Rauch- und Hitzekontamination auf, die Holzkonstruktion der Blöcke C und D erfordert einen vollständigen Abriss und Wiederaufbau, und die übrigen Blöcke erfordern umfangreiche Sanierungsmaßnahmen an Oberflächen, Verkleidungen und Installationen. Auf dieser Grundlage werden die gebäudebezogenen Schäden auf etwa 75–85 % des Wiederbeschaffungswerts des Gebäudes geschätzt, was im ungünstigsten, aber dennoch vorhersehbaren Fall an die Schwelle eines vollständigen Wiederaufbaus der Schule heranreicht. Die Schäden am Inventar werden auf etwa 85–90 % des versicherten Inventarwerts geschätzt, was die Zerstörung der hochwertigen Werkstattausrüstung in den Blöcken C und D sowie die Kontamination von Unterrichtsmaterialien und IT-Ausrüstung in den übrigen Blöcken widerspiegelt.

Die Betriebsunterbrechungskomponente wird entsprechend erweitert. Der Verlust des gesamten Werkstattflügels, die Kontamination der übrigen Blöcke und die Umwandlung des gesamten Geländes in eine Abbruch- und Wiederaufbaustelle unterbinden weitgehend die Betriebskontinuität pro Block, die die Campus-Anordnung ansonsten ermöglichen würde.

Die vollständige Wiederherstellung, bestehend aus dem baulichen Abriss der Blöcke C und D unter den Sicherheitsauflagen, die durch eine teilweise eingestürzte und zu Schwelbränden neigende Struktur auferlegt sind, der Neugestaltung und dem Wiederaufbau des Flügels, der Neuinstallation der technischen Versorgungsnetze, der Neuausstattung der Werkstätten und der Sanierung der Blöcke A und B, wird voraussichtlich 18 bis 24 Monate in Anspruch nehmen.

Die brennbare Konstruktion ist daher ein entscheidender Faktor für die Ausbreitung des Brandereignisses: Sie nährt das Feuer, nachdem der Inhalt verbrannt ist, verwandelt die Brandabschnittsgrenzen in brennbare Elemente und überträgt die MFL-Beendigungsbedingung von der Ebene des Ursprungsbrandabschnitts auf die Ebene des Gebäudeflügels.

MFL-Holzszenario		
	Betroffener Bereich	**% Schaden**
Sachschaden	Gesamtes Gebäude	75–85 % der Wiederbeschaffungskosten des Gebäudes 85–90 % des Hausrats und der Ausstattung
Betriebs Betriebsunterbrechung[3]		100 % für 18 bis 24 Monate

Hinweis:
Die Prozentsätze berücksichtigen nicht die zusätzlichen Kosten im Zusammenhang mit der vorübergehenden Verlegung des Unterrichts (z. B. Miete und Aufstellung von provisorischen Unterrichtsmodulen, Transport und Logistik).

9.3 Szenarien zur normalen Verlustwahrscheinlichkeit (NLE)

9.3.1 NLE-Szenario für Stahlbeton

Das Szenario der normalen Verlustwahrscheinlichkeit beschreibt das plausible, statistisch repräsentative Brandereignis für die Einrichtung, bewertet gemäß der Methodik in Abschnitt 4 unter der Annahme, dass alle Schutzschichten wie vorgesehen funktionieren. Die Zündquelle und der Entstehungsraum entsprechen denen der MFL-Szenarien, nämlich eine Zündung durch Heißarbeiten in der Schweißzentrale der Metall- und Schweißwerkstatt im Erdgeschoss von Block C, sodass der Vergleich zwischen den Szenarien den Einfluss der Schutzschichten und nicht den der Zündhypothese isoliert.

In dieser Konfiguration entwickelt sich das Ereignis zu einem lokal begrenzten Vorfall. Der Brand betrifft brennbare Materialien in unmittelbarer Nähe der Schweißstation und breitet sich in der Anfangsphase lokal aus. Das automatische Brandmeldesystem, das in diesem Bereich durch Gasmelder unterstützt wird, erkennt den Brand innerhalb weniger Minuten nach der Entzündung und löst den Alarm sowie die Benachrichtigung der Feuerwehr aus.

Geschultes Personal greift mit den an der Wand montierten Schlauchaufrollern und tragbaren Feuerlöschern ein und begrenzt so die Ausbreitung des Brandes, während die Feuerwehr den Einsatzort innerhalb ihrer dokumentierten Anfahrzeit von acht Minuten erreicht und die Löscharbeiten noch während der Ausbreitungsphase abschließt – lange bevor es in dem 1.588 m² großen Brandabschnitt zu einem Flashover kommen kann. Die natürlichen Rauchabzugsklappen begrenzen die Rauchansammlung im Werkstattraum.

Die Tragwerks- und Brandabschnittssysteme werden nicht wesentlich beansprucht. Die thermische Belastung bleibt lokal begrenzt und von kurzer Dauer, weit unterhalb der R60-Widerstandsfähigkeit des Fertigteilrahmens, und die Oberflächen von Stützen, Trägern und Hohlkernelementen im betroffenen Bereich weisen höchstens oberflächliche Rußablagerungen und geringfügige lokale Schäden auf, ohne Verlust der mechanischen Tragfähigkeit und ohne Notwendigkeit eines strukturellen Austauschs.

Die nicht brennbaren Betonoberflächen können ohne eingreifende Maßnahmen begutachtet, gereinigt und wiederhergestellt werden, und die Brandabschnittsgrenzen müssen keine über die übliche Rauchabtrennung hinausgehende Funktion erfüllen. Die Schäden betreffen daher vorwiegend das Inventar und sind rauchbedingt. Die ursprüngliche Schweißkabine sowie die Ausrüstung und Materialien in ihrer Umgebung sind verloren gegangen oder müssen wiederaufbereitet werden, und die Rauchablagerungen beeinträchtigen einen Teil des Werkstattinventars, die Oberflächen und die freiliegenden Installationen des Brandabschnitts, einschließlich einer punktuellen Reinigung der Lüftungs- und Absaugnetze. Auf dieser Grundlage werden die gebäudebezogenen Schäden auf etwa unter 5 % des Wiederbeschaffungswerts des Gebäudes geschätzt, was im Wesentlichen mit der Reinigung und Wiederherstellung von Oberflächen, Versorgungsleitungen und lokalen Reparaturen innerhalb des Brandherdes zusammenhängt. Die Schäden am Inventar werden auf etwa 5–10 % des versicherten Inventarwerts geschätzt und konzentrieren sich auf den Schweißbereich sowie auf die vom Rauch betroffenen Geräte der Werkstatt.

Der Betriebsausfall ist begrenzt und räumlich auf den Brandherd beschränkt. Der Lehrbetrieb in den Blöcken A, B und D sowie in den oberen Etagen von Block C kann unmittelbar nach dem Ereignis wieder aufgenommen werden, da sich weder Feuer noch nennenswerter Rauch über den Brandherd hinaus ausgebreitet haben.

Die Wiederherstellung der Metall- und Schweißwerkstatt, einschließlich Reinigung, Reparatur von Oberflächen und Versorgungsleitungen, Austausch der beschädigten Ausrüstung sowie Wiederinbetriebnahme der Gas- und Absaugnetze, wird voraussichtlich etwa 1 bis 2 Monate in Anspruch nehmen. Aus versicherungstechnischer Sicht handelt es sich bei dem Ereignis um einen gewöhnlichen und vollständig erstattungsfähigen Schaden, was auf die Kombination aus frühzeitiger Erkennung, schnellem Eingreifen von außen und einer nicht brennbaren Bausubstanz zurückzuführen ist, die weder zum Brand beiträgt noch bauliche Maßnahmen nach dem Brand erfordert.

NLE-Szenario „Stahlbeton“		
	Betroffener Bereich	**% Schaden**
Gebäude Schaden	Block C – Metall- und Schweißbereich	0–5 % der Wiederbeschaffungskosten des Gebäudes 5–10 % des Wertes von Hausrat und Ausrüstung
Betriebsunterbrechung Betriebsunterbrechung[3]		100 % der Fläche für 1 bis 2 Monate

Hinweis:
Die Prozentsätze berücksichtigen nicht die zusätzlichen Kosten im Zusammenhang mit der vorübergehenden Verlagerung des Unterrichts (z. B. Anmietung und Aufbau von provisorischen Unterrichtsmodulen, Transport und Logistik).

9.3.2 NLE-Szenario für Holz

Das Szenario zur normalen Verlustwahrscheinlichkeit für die Holzbauweise wurde unter denselben Annahmen entwickelt, die in Abschnitt 9.3.1 zugrunde gelegt wurden. Die Zündquelle und der Entstehungsraum bleiben unverändert, alle Schutzschichten erfüllen ihre vorgesehene Funktion, und der Hergang des Ereignisses ist identisch: Erkennung in der Entstehungsphase, erster Einsatz mit Schlauchrollen und Feuerlöschern, Eintreffen der Feuerwehr innerhalb von acht Minuten und Löschung während der Wachstumsphase, lange bevor es im Werkstattbereich zu einem Flashover kommen kann.

In einem ordnungsgemäß geschützten Massivholzgebäude beeinträchtigt ein in diesem Stadium unter Kontrolle gebrachtes Ereignis nicht die Tragfunktion der Konstruktion, und es ist zu erwarten, dass die Gipskarton-Einkapselung die Holzelemente für die begrenzte Dauer der Einwirkung vor dem Feuer schützt.

Der Unterschied zum vorliegenden Gebäude betrifft den Zustand der Konstruktion nach dem Brand und den Umfang der Wiederherstellungsarbeiten. Die Verkapselung im Entstehungsbereich ist während der Brandbekämpfung direkter Flammeneinwirkung, lokaler Hitze und mechanischer Beanspruchung ausgesetzt und wird durch das Löschwasser benetzt. Selbst wenn die Verkleidungen ordnungsgemäß funktioniert haben, kann ihre Schutzwirkung in der betroffenen Zone nicht mehr vorausgesetzt werden, und die von den Platten und den darunterliegenden Paneelen aufgenommene Feuchtigkeit muss beseitigt werden, um Probleme mit der Dimensionsstabilität und der Dauerhaftigkeit des Holzes zu vermeiden. Darüber hinaus kann nicht allein durch eine Sichtprüfung festgestellt werden, dass die tragenden Elemente hinter den beschädigten Verkleidungen unbeeinträchtigt sind. Die Platten im und um den Entstehungsbereich müssen entfernt werden, um sicherzustellen, dass keine örtliche Verkohlung und keine Schwelherde an Fugen, Durchführungen und verdeckten Hohlräumen vorliegen – eine Überprüfung, die bei einer nicht brennbaren Konstruktion keine Entsprechung hat und die die Maßnahmen über die direkt beschädigten Oberflächen hinaus ausdehnt. Werden oberflächliche Verkohlungen festgestellt, werden die betroffenen Schichten repariert oder die Plattenoberflächen lokal erneuert, und das gesamte Kapselungssystem wird anschließend wiederhergestellt, um das zertifizierte Brandverhalten des Brandabschnitts wiederherzustellen.

Die Brand- und Rauchschäden am Inventar entsprechen im Wesentlichen denen bei der Stahlbetonausführung, da das Ereignis im Ausmaß identisch ist: Die ursprüngliche Schweißkabine und die nahegelegenen Geräte sind verloren gegangen oder müssen instand gesetzt werden, und Rauchablagerungen beeinträchtigen einen Teil des Werkstattinventars und der Anlagen. Die gebäudebezogenen Schäden fallen jedoch etwas höher aus, da sie neben der Reinigung und Wiederherstellung der Oberflächen und Versorgungsleitungen, die beiden Bauweisen gemeinsam sind, auch das Abtragen, Prüfen, Trocknen und Wiederaufbauen der Kapselung sowie die lokale Reparatur von Holzoberflächen umfassen. Auf dieser Grundlage werden die gebäudebezogenen Schäden auf etwa 5–10 % des Wiederbeschaffungswerts des Gebäudes und die Schäden am Inventar auf etwa 5–10 % des versicherten Inventarwerts geschätzt.

Bei der Betriebsunterbrechung gilt dieselbe Logik. Der Lehrbetrieb in den nicht betroffenen Gebäudeteilen wird sofort wieder aufgenommen, während die Wiederherstellung der Metall- und Schweißwerkstatt neben Reinigung, Reparaturen und Neuausstattung auch das Öffnen und Überprüfen der gekapselten Struktur, das Trocknen der durchnässten Elemente und den zertifizierten Wiederaufbau der Schutzauskleidungen umfassen muss. Die Zeit, die erforderlich ist, um die volle Betriebsfähigkeit der betroffenen Werkstatt wiederherzustellen, wird auf etwa 1 bis 3 Monate geschätzt. Das Ereignis bleibt in beiden Konfigurationen ein gewöhnlicher und vollständig ersetzbarer Schaden; im Holzgebäude verursacht jedoch selbst ein erfolgreich eingedämmter Brand einen Überprüfungs- und Wiederherstellungsaufwand für die Struktur selbst, was sich in dem mäßig höheren Sachschaden und der längeren Wiederherstellungsdauer widerspiegelt.

NLE-Holzszenario		
	Betroffener Bereich	**% Schaden**
Sachschaden Schaden	Block C – Metall- und Schweißbereich	5–10 % der Wiederbeschaffungskosten des Gebäudes 5–10 % des Wertes von Hausrat und Ausrüstung
Betriebsunterbrechung[3]		100 % der Fläche für 1 bis 3 Monate

Hinweis:
Die Prozentsätze berücksichtigen nicht die zusätzlichen Kosten im Zusammenhang mit der vorübergehenden Verlagerung des Unterrichts (z. B. Anmietung und Aufbau von provisorischen Unterrichtsmodulen, Transport und Logistik).

9.4 Szenariovergleich – Fallstudie Nr. 4

Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden baulichen Lösungen, die mit den oben genannten Szenarien untersucht werden sollten, liegt in der Art ihrer Feuerwiderstandsfähigkeit. Im Stahlbetongebäude sind die Feuerwiderstandsklassen und Brandabschnittsgrenzen inhärente, nicht brennbare Eigenschaften der Konstruktion selbst, wie sie beispielsweise durch die 140 mm dicken, über die gesamte Höhe reichenden vorgefertigten Betonbrandwände dargestellt werden, die den Werkstattblock umschließen. Bei der Holzalternative werden gleichwertige Feuerwiderstandsklassen durch eine Kapselungsstrategie erreicht, die auf ein brennbares Tragwerkssystem angewendet wird. Die tragende Konstruktion erfüllt die vorgeschriebenen R60-Anforderungen nur so lange, wie die Schutzverkleidungen durchgehend, korrekt installiert und während der gesamten Auslegungsbranddauer wirksam sind.

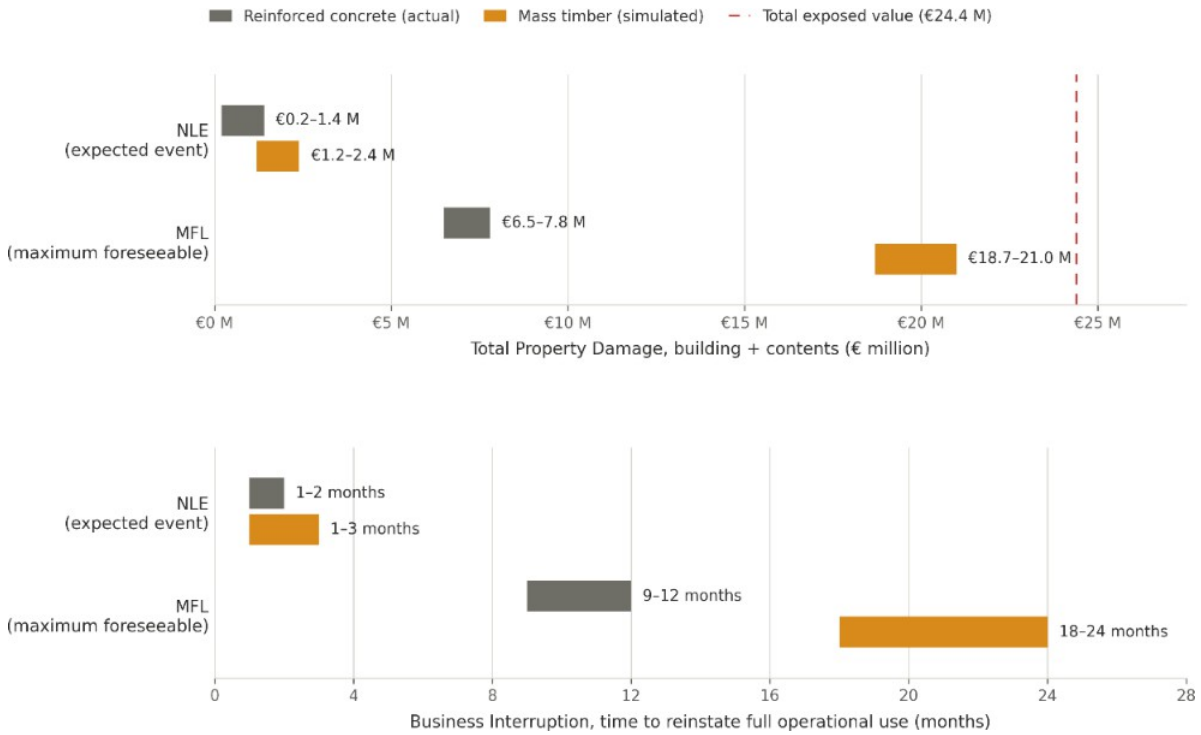
Das Brandverhalten der Holzlösung hängt daher von der Integrität des Schutzsystems und von der Gültigkeit des angenommenen Verkohlungsverhaltens nach einem etwaigen Durchbruch dieses Schutzes ab. Wie in den Abschnitten 2.3.2 und 2.4 erörtert, stellt diese Abhängigkeit den grundlegenden Unterschied zwischen den beiden Tragwerkssystemen unter Brandbedingungen dar.

Die vier Szenarien unterscheiden sich nur durch eine einzige kontrollierte Variable: das Baustoffmaterial. Gebäudegeometrie, Brandabschnittsbildung, Nutzung, Zündquelle und Schutzstrategie bleiben in jedem Fall identisch, sodass etwaige Unterschiede im Ergebnis ausschließlich auf das Verhalten des tragenden Systems während der Brandbelastung zurückgeführt werden können. Die Ergebnisse folgen einem einheitlichen Muster: Die beiden Alternativen weisen nahezu gleichwertige Leistungen auf, solange die Schutzschichten wirksam bleiben, weichen jedoch deutlich voneinander ab, sobald diese Schichten versagen.

Unter MFL-Bedingungen, bei denen kein aktiver Brandschutz die Brandausbreitung begrenzt, wird der Baustoff durch zwei unterschiedliche Mechanismen zum entscheidenden Faktor für das Ausmaß des Schadens.

Der erste Mechanismus betrifft den verfügbaren Brennstoff. Im Stahlbetonbau beschränkt sich der brennbare Brennstoff auf den Inhalt des Brandabschnitts, sodass der Brand nach dem Verbrauch dieses Brennstoffs abklingen kann. In der Holzkonstruktion hingegen wird das tragende System selbst zu einer zusätzlichen Brennstoffquelle, nachdem die Einhausung versagt hat. Die Erschöpfung des Brennstoffs wird daher verzögert, was den voll entwickelten Brand genau dann verlängert, wenn die Brandabschnittsgrenzen ihre Trennfunktion aufrechterhalten müssen.

Der zweite Mechanismus betrifft die Brandabschnittsbildung. Im bestehenden Gebäude besteht die kritische Brandabschnittsgrenze aus einer 140 mm dicken, über die gesamte Höhe reichenden Brandschutzwand aus Betonfertigteilen – einer von Natur aus nicht brennbaren Barriere, deren Leistungsfähigkeit nicht von aufgebrachten Schutzsystemen oder wartungsintensiven Bauteilen abhängt. Bei der Holzbauvariante wird die entsprechende Grenze durch eine ummantelte CLT-Wand gebildet, deren Brandschutzfunktion von der Unversehrtheit der Schutzverkleidungen abhängt und die nach deren Versagen selbst brennbar wird. Folglich breitet sich der Brand, der im Stahlbetongebäude auf einen einzigen, 1.588 m² großen Brandabschnitt beschränkt bleibt, bei der Holzlösung im gesamten Werkstattflügel aus, was zum Einsturz der dem Feuer ausgesetzten tragenden Bauteile, zu einer verbleibenden strukturellen Anfälligkeit während der Abkühlphase und zum anschließenden Abriss des betroffenen Gebäudeteils führt.



Grafik 3: Spannen der MFL- und NLE-Szenarien (Fallstudie Nr. 4), angewendet auf den vorläufigen Wiederbeschaffungswert des Gebäudes von 20 Mio. € sowie auf den versicherten Hausratwert von 4,4 Mio. €. Die Zeiträume und Prozentsätze berücksichtigen keine Kosten für eine vorübergehende Unterbringung

Eine weitere Überlegung betrifft die Geometrie des Gebäudes aus der Fallstudie. Die Schule erstreckt sich horizontal über vier miteinander verbundene Blöcke – ein Grundriss, der die vertikale Brandausbreitung begrenzt und das Ereignis in der Stahlbetonkonstruktion auf einen einzigen Brandabschnitt beschränkt. Die meisten Schulen sind jedoch mehrstöckige Gebäude, bei denen der Nachteil eines brennbaren Tragwerks erheblich größer wäre. Wenn tragende Wände und Decken auch die Brandabschnittsgrenzen zwischen den Stockwerken bilden, würde ein Versagen der Brandabschnittsbegrenzung einen vertikalen Brandweg durch die Konstruktion selbst schaffen, wodurch das Gebäude dem nach oben ausbreitenden Feuer ausgesetzt wäre. Die hier untersuchte Konfiguration stellt daher eher einen vergleichsweise günstigen Fall für die Holzbaulösung dar als ein Worst-Case-Szenario.

Die gleiche Geometrie begrenzt zudem die Sekundäreffekte des Brandes. Über die direkten Auswirkungen der Verbrennung hinaus würden Rauchbelastung und Löschwasser in einem mehrstöckigen Holzbau erheblich größere Schäden verursachen. Das bei der Brandbekämpfung eingesetzte Wasser würde durch Bodenanschlüsse, Plattenfugen und Versorgungsdurchführungen wandern, sich in den Holzkonstruktionen der unteren Stockwerke ansammeln und sowohl die Trocknungsmaßnahmen als auch die Wiederherstellungsarbeiten verlängern. In einem überwiegend horizontal ausgerichteten Gebäude bleiben diese Auswirkungen weitgehend auf die Etage beschränkt, in der der Brand entstanden ist.

Unter NLE-Bedingungen wird der Brand in beiden baulichen Lösungen bereits in der Ausbreitungsphase unter Kontrolle gebracht, und die Schäden bleiben begrenzt und vollständig behebbar. Die Schäden am Hausrat sind identisch, da das Ausmaß der Brandbeeinträchtigung in beiden Fällen gleich ist. Die Holzbauweise verursacht dennoch etwas größere Gebäudeschäden, da die Wiederherstellung die Entfernung der Kapselung, die Überprüfung auf verdeckte Verkohlung und Schwelbrand, die Trocknung wasserbeschädigter Holzelemente sowie den Wiederaufbau der Schutzverkleidungen erfordert. Folglich steigen die Gebäudeschäden auf 5–10 % im Vergleich zu 0–5 % bei der Stahlbetonlösung, während sich die Wiederherstellungsdauer auf 1–3 Monate statt 1–2 Monate verlängert.

Die quantitativen Auswirkungen werden im Folgenden zusammengefasst, indem die Prozentsätze des Szenarios auf einen Gebäudewiederbeschaffungswert von 20 Millionen Euro und einen Hausratwert von etwa 4,4 Millionen Euro angewendet werden.

	Gebäudeschaden		Hausrat & Ausstattung Schaden		Gesamtwert des Eigentums Schaden	Betriebsunterbrechungsschaden		Gesamt PD + BI
MFL – Haftpflicht	25–30 %	ca. 5,5 Mio. €	35–40 %	ca. 1,6 Mio. €	ca. 7,1 Mio. €	100 % von Block C für 9 bis 12 Monate	k. A.	ca. 7,1 Mio. €
MFL – Holz	75–85 %	ca. 16 Mio. €	85–90 %	ca. 3,8 Mio. €	ca. 19,8 Mio. €	100 % Gesamter Bau. über 18 bis 24 Monate	k. A.	ca. 19,8 Mio. €
NLE – RC	0–5 %	ca. 1 Mio. €	5–10 %	ca. 0,3 Mio. €	ca. 1,3 Mio. €	100 % von Block C 1 bis 2 Monate	k. A.	ca. 1,3 Mio. €
NLE – Holz	5–10 %	ca. 1,5 Mio. €	5–10 %	ca. 0,3 Mio. €	ca. 1,8 Mio. €	100 % von Block C 1 bis 3 Monate	k. A.	ca. 1,8 Mio. €

10. Fallstudie Nr. 5: Mehrstöckiges Wohngebäude

10.1 Beschreibung des Objekts

Die fünfte Fallstudie betrifft ein mehrstöckiges Wohngebäude in Finnland, das als Mietwohnungen genutzt wird und anhand der vollständigen statischen Bemessungsgrundlage sowie der architektonischen Zeichnungen dokumentiert ist. Das Gebäude gehört zur Brandklasse P1, der anspruchsvollsten Klasse der finnischen Klassifizierung, in der die Konstruktion einen vollständigen Brand ohne Einsturz überstehen muss, und wurde als vollständig vorgefertigtes Stahlbeton-Wand-Rahmen-System realisiert – eine für den zeitgenössischen nordischen Wohnungsbau typische Bauweise. Im Vergleich zu den vorangegangenen Fallstudien weist die Anlage ein anderes Risikoprofil auf: Die Schlafbelegung verteilt sich auf eine große Anzahl kleiner, einzeln abgeschotteter Wohneinheiten, wobei das Schutzkonzept eher auf passive Abschottung und Frühwarnung als auf automatische Löschanlagen setzt.

Das Gebäude umfasst acht Stockwerke und ein Untergeschoss mit einer Gesamthöhe von 23,2 m über dem Boden und einer Bruttogeschossfläche von 4.340 m². Zwei Treppenhäuser, die jeweils von einem Aufzug bedient werden, unterteilen das Gebäude in zwei Abschnitte mit sieben bzw. sechs Wohnetagen, was insgesamt 52 Wohnungen ergibt. Im Untergeschoss befinden sich die Gemeinschaftseinrichtungen, ein Clubraum, eine Sauna und Waschküchen, Technikräume sowie die Mieterabstellräume, von denen sich ein Teil innerhalb des Zivilschutzraums der Klasse S1 befindet, während Kinderwagen- und Geräteraum auf der Eingangsebene untergebracht sind. Parkplätze stehen in einer separaten Anlage außerhalb des Gebäudes zur Verfügung, sodass innerhalb des Gebäudes keine Brandlast durch Fahrzeuge vorhanden ist. Die Wohnungen sind an den Hauptfassaden mit verglasten Balkonen ausgestattet.

Was die Brandabschnittsstrategie betrifft, so bildet jede Wohnung einen eigenständigen Brandabschnitt der Klasse EI 60, das Untergeschoss ist nach EI 60 abgetrennt, die Mieterverlageräume sind nach EI 90 umschlossen, die Balkone sind nach EI 30 abgetrennt und die Treppenhausschächte nach EI 30. Die Bemessungsbrandlast ist im gesamten Gebäude einheitlich und liegt nur in den Mieterabstellräumen über dem Standard, wo die tragenden Bauteile entsprechend mit R 120 bewertet sind, während die allgemeine Anforderung bei R 60 liegt. Versorgungsdurchführungen durch die Brandabschnittsgrenzen sind mit zertifizierten Brandschutzsystemen der Klassen EI 60 bis EI 120 abgedichtet.

Das einzige brennbare Element der Konstruktion ist das Dach. Über der Stahlbetondecke des obersten Geschosses wird das Wasserdach von Holzbindern getragen, die eine durchgehende Holzplattenkonstruktion und eine zweilagige Bitumenbahn stützen, während die auf der Decke verlegte Wärmedämmung aus nicht brennbarer Glaswolle besteht. Der dadurch entstehende Kaltdachraum ist durch Brandschutzwände der Klasse EI 30 unterteilt, und das Dach ist baulich für eine zukünftige Photovoltaikanlage vorbereitet, obwohl zum Zeitpunkt dieser Bewertung noch keine Anlage installiert ist.

Das Konzept des aktiven Brandschutzes entspricht den nationalen Anforderungen für diese Nutzungsart. Das Gebäude ist nicht mit einer automatischen Sprinkleranlage ausgestattet. Die Frühwarnung erfolgt durch netzbetriebene, batteriegestützte Rauchmelder in jeder Wohnung mit einer Dichte von einem Melder pro 60 m²; die Rauchabführung erfolgt über spezielle, zu öffnende Vorrichtungen am oberen Ende beider Treppenhäuser sowie über Rauchabzugsschächte, die die Mieterlagerräume und den Schutzraum versorgen. Die städtische Feuerwehr ist vom Stadtgebiet aus im Einsatz und hat eine Anfahrtszeit von etwa 15 Minuten.

Das Gebäude ist vollständig vermietet und kontinuierlich bewohnt. Der Wiederaufbauwert wird auf etwa 9,2 Millionen Euro geschätzt, der Wert des Eigentums der Bewohner und der gemeinschaftlichen Einrichtungen auf etwa 1,8 Millionen Euro, was einen gesamten exponierten Vermögenswert von etwa 11 Millionen Euro ergibt, während das mit dem Betriebsausfall verbundene Mietausfallrisiko einem jährlichen Mieteinkommen von etwa 0,45 Millionen Euro entspricht, zu dem die Kosten für die Unterbringung der betroffenen Haushalte hinzugerechnet werden müssen.

Posten	Wiederbeschaffungswert in Euro (€)
Bauarbeiten	7.070.000
Technische Anlagen	1.120.000
Elektroinstallation	600.000
Technische Kosten: Inbetriebnahme, Bauaufsicht…	430.000
Einrichtung und Ausstattung	1.800.000
Gesamt	11.020.000

10.1.1 Ausführung – Stahlbetonkonstruktion mit Holzdach

Das Gebäude wurde als vollständig vorgefertigtes Stahlbeton-Wand-Rahmen-System realisiert. Vertikale Lasten werden von vorgefertigten Betonwänden aufgenommen, die gleichzeitig die Wohnungen voneinander und von den Gemeinschaftsräumen trennen; die Decken bestehen aus massiven Stahlbetonplatten. Die gleichen Elemente, die das Gebäude tragen, bilden somit auch dessen Brandabschnittsgrenzen, sodass die in Abschnitt 10.1 beschriebene zellartige Unterteilung in EI 60-Einheiten durch die tragende Konstruktion selbst und nicht durch nachträglich eingebaute Trennwände erreicht wird. Die Außenwände bestehen aus vorgefertigten Sandwichplatten mit einem nicht brennbaren Mineralwollkern, der zwischen zwei Betonschalen eingeklemmt ist, die Treppenhäuser sind vorgefertigte Betonelemente, und das Untergeschoss, einschließlich der Abstellräume und des Schutzraums, ist durch schwerere Stahlbetonwände mit einer Feuerwiderstandsklasse von bis zu R 120 umschlossen, wo die höhere Brandlast dies erfordert.

Der einzige brennbare Teil der Konstruktion ist das Dach. Über der durchgehenden Stahlbetondecke, die das oberste Stockwerk abdeckt, wird das Wasserdach von Holzbindern getragen, die eine Holzplattenkonstruktion und eine zweilagige Bitumenbahn stützen, während die auf der Decke verlegte Dämmung aus nicht brennbarer Glaswolle besteht. Der dadurch entstehende Kaltsparrenraum liegt vollständig außerhalb des Wohnraums, ist durch die Betondecke von diesem getrennt und wird durch Brandschutzwände der Klasse EI 30 unterteilt, die die horizontale Ausbreitung eines darin entstehenden Brandes begrenzen.

Aus brandschutztechnischer Sicht ist das Tragwerk innerhalb des bewohnten Raums vollständig nicht brennbar und trägt nicht zur Brandlast bei, sodass ein etwaiger Brand durch den Inhalt des Entstehungsraums begrenzt wird, typischerweise eine einzelne Wohnung mit einer Brandlast unter 600 MJ/m². Die Zersetzung der Betonelemente im Brandfall folgt den in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen progressiven und vorhersehbaren Mechanismen, und die zellartige Wand-Decken-Konfiguration bietet ein hohes Maß an Redundanz und Robustheit gegenüber lokalen Schäden. Die brennbare Dachkonstruktion stellt die einzige Abweichung von diesem Profil dar, und ihre Lage über der Betonplatte in Verbindung mit den Brandschutzabschnitten im Dachgeschoss beschränkt ihre Relevanz auf Szenarien, in denen das Feuer das Dachgeschoss selbst erreicht oder dort seinen Ursprung hat – ein Punkt, der in den Schadensschätzungsszenarien ausdrücklich untersucht wird.

10.1.2 Simuliert – Holzbauweise

In der alternativen Konfiguration wird davon ausgegangen, dass das Gebäude unter Verwendung eines Massivholz-Tragsystems errichtet wurde, das für den zeitgenössischen mehrgeschossigen Holzwohnbau repräsentativ ist. In Übereinstimmung mit der in Abschnitt 5 dargelegten Vergleichsmethode ist die Substitution rein materieller Natur. Das Gebäude behält dieselbe Geometrie, dieselbe Anzahl an Stockwerken und Wohnungen, dieselbe zellartige Raumaufteilung, dieselbe Treppenhausanordnung und dasselbe Schutzkonzept bei, das auf Brandabschnitten und Frühwarnung ohne automatische Löschanlagen basiert, sodass die Unterschiede im Ergebnis allein auf das Baumaterial zurückgeführt werden können.

Die tragenden Wände, die die Wohnungen voneinander trennen, die Deckenplatten, die Treppenhäuser und die Außenwandelemente werden aus Brettsperrholz (CLT) angenommen, während das Dach die Holzfachwerkkonstruktion des tatsächlichen Gebäudes beibehält. Die Fundamente, das Untergeschoss und der Zivilschutzraum bleiben aus Stahlbeton, wie es für den Bau unterhalb des Geländeniveaus erforderlich ist, und haben keinen Einfluss auf die analysierten Szenarien. Es wird davon ausgegangen, dass die brandtechnische Auslegung gemäß EN 1995-1-2 erfolgt, wobei die tragenden Bauteile durch eine Verkapselung aus Gipskartonplatten geschützt sind, die bei Bedarf durch opfernde Verkohlungsschichten ergänzt wird, um nominell die gleichen Klassifizierungen wie beim tatsächlichen Gebäude zu erreichen, nämlich R 60 und EI 60 im Allgemeinen sowie R 120 mit EI 90-Umschließungen in den Lagerbereichen. Der Vergleich geht daher von einem normkonformen Holzbau aus, nicht von einem ungeschützten.

Die Substitution verändert jedoch die Beschaffenheit der Brandabschnittsgrenzen. In diesem Gebäude fallen die Trennelemente mit der tragenden Konstruktion zusammen, und in der Holzbauweise wird jede Wohnungswand, jeder Boden und jede Treppenhausumschließung zu einem brennbaren Element, dessen Trenn- und Tragfunktionen von der Unversehrtheit der verwendeten Verkleidungen abhängen, wobei Fugen zwischen den Platten und Versorgungsdurchführungen als potenzielle Schwachstellen eines ansonsten nominell gleichwertigen Systems wirken. Für die Vergleichszwecke dieser Studie weisen beide

Ausführungen denselben Wiederaufbauwert, der dem für das tatsächliche Stahlbetongebäude festgelegten Wert entspricht und sich auf etwa 9,2 Millionen Euro beläuft. Bei dieser Wahl wird bewusst der Kostenaufschlag außer Acht gelassen, den eine echte Massivholz-Alternative mit sich bringen würde, bei der die tragenden Elemente durch eine Verkapselung mit Gipskartonplatten und Opferschichten geschützt werden müssen, um gleichwertige Feuerwiderstandsklassen zu erreichen. Der Hausrat und die Mietertragsbasis werden ebenfalls konstant gehalten.

10.2 Szenarien für den maximal vorhersehbaren Schaden (MFL)

10.2.1 MFL-Szenario für Stahlbeton

Für das untersuchte Mehrfamilienhaus wird das Szenario des maximal vorhersehbaren Schadens gemäß der in Abschnitt 4 definierten deterministischen und konservativen Methodik entwickelt. Im Einklang mit der MFL-Definition wird davon ausgegangen, dass alle aktiven und funktionsfähigen Schutzmaßnahmen nicht verfügbar oder unwirksam sind. Das Gebäude verfügt über keine automatische Brandbekämpfung, die netzbetriebenen Rauchmelder führen nicht zu einem rechtzeitigen Eingreifen, und die Feuerwehr kann den Brand während seiner kritischen Ausbreitungsphase nicht unter Kontrolle bringen. Es wird daher angenommen, dass sich der Brand ungehindert ausbreitet, bis er entweder durch die Grenzen eines unüberwindbaren, nicht brennbaren Brandabschnitts oder durch den Verbrauch des verfügbaren Brennstoffs gestoppt wird.

Als Brandherd wird eine einzelne Wohnung in einem der obersten Wohnstockwerke angenommen. Durch diese Wahl befindet sich der Brandherd in unmittelbarer Nähe zum einzigen brennbaren Bauteil des Gebäudes, dem Holzdach, und ermöglicht es, im Rahmen des Szenarios sowohl das Potenzial der vertikalen Ausbreitung als auch die Wechselwirkung mit dem Dachgeschoss zu untersuchen. Es wird davon ausgegangen, dass die Entzündung von einer typischen Quelle innerhalb der Wohnung ausgeht, und die frühe Brandentwicklung wird durch die bewegliche Brandlast der Wohnung – bestehend aus Möbeln, Oberflächen und Hausrat – bestimmt. Ohne jegliche Löschmaßnahmen breitet sich der Brand so lange aus, bis der Hausrat vollständig verbrannt ist.

Das entscheidende Merkmal dieser Konfiguration ist die Art des dem Brand zur Verfügung stehenden Brennstoffs. Das Wandgerüst aus Stahlbetonfertigteilen ist nicht brennbar, gemäß EN 13501-1 als A1 klassifiziert, und trägt zu keinem Zeitpunkt zur Brandlast bei. Die tragenden Wände, die die Ursprungswohnung von den Nachbarwohnungen trennen, sowie die massiven Stahlbetondecken darüber und darunter nehmen nicht an der Verbrennung teil und tragen nicht zur freigesetzten Energie bei. Der verfügbare Brennstoff entspricht daher ausschließlich dem Inhalt des Brandabschnitts, und der voll entwickelte Brand tendiert innerhalb der Ursprungswohnung zum Ausbrennen, sobald dieser Inhalt aufgebraucht ist.

Die Ausbreitung des Brandes über die Ursprungswohnung hinaus wird eher durch den äußeren Verlauf als durch die bauliche Struktur bestimmt. Wenn die Fenster versagen und die nach EI 30 getrennten verglasten Balkone ihre Integrität verlieren, schießen Flammen durch die Öffnungen und treffen auf die Fassade sowie auf die unmittelbar darüber liegenden und angrenzenden Wohnungen. Durch zerbrochene Fenster und äußere Flammenausbreitung kann das Feuer in die Wohnungen im darüberliegenden Stockwerk und, in geringerem Maße, in die seitlich angrenzenden Wohnungen auf derselben Ebene eindringen, was zu schweren Bränden der Einrichtungsgegenstände in diesen Einheiten führt. Die inneren Brandabschnittsgrenzen halten jedoch stand. Da die Trennwände und die Deckenplatten selbst tragende Stahlbetonelemente sind, verhalten sich die Grenzen zwischen den Wohnungen wie inhärente, nicht brennbare Barrieren, deren Leistungsfähigkeit nicht von aufgebrachten Verkleidungen, von der Abdichtung der

Fugen, die vor Ort ausgeführt wurden, oder von wartungsempfindlichen Bauteilen ab. Eine horizontale Ausbreitung durch die Trennwände und eine vertikale Ausbreitung durch die Decken findet nicht statt, und das Ereignis entwickelt sich zu einer Ansammlung einzeln brennender Brandabschnitte und nicht zu einem einzigen, zusammenhängenden Brand, der das gesamte Gebäude erfasst.

Das Zusammenspiel mit dem Holzdach wird explizit untersucht, da der Brand nahe der Gebäudeoberkante entsteht. Über den obersten Wohnungen trennt die durchgehende Stahlbetondecke den Wohnbereich vom kalten Dachboden, wo sich die einzigen brennbaren Bauteile der Konstruktion befinden, nämlich die Holzbinder, die Holzplatten und die Bitumenbahn, die über einer nicht brennbaren Glaswolle-Dämmung verlegt ist. Damit das Feuer auf das Dach übergreift, muss es zunächst die Betonplatte überwinden oder umgehen – entweder durch undichte Durchführungen oder am Rand – und den Dachbodenraum erreichen. Sollte dies geschehen, entzündet sich das Holzdach über dem betroffenen Bereich und brennt, wobei die Brandschutzwände im Dachboden mit der Feuerwiderstandsklasse EI 30 die horizontale Ausbreitung des Brandes auf den Bereich über dem Brandherd begrenzen. Die Folgen dieses Brandausbruchs beschränken sich auf die Dachkonstruktion selbst. Die Dachstühle und die Dachkonstruktion verkohlen und können einstürzen, doch sie stürzen auf die darunterliegende Stahlbetonplatte, die die darunter liegenden Wohnungen weiterhin schützt. Der Verlust des brennbaren Daches ist zwar wirtschaftlich relevant, breitet sich jedoch nicht in den bewohnten Bereich aus und beeinträchtigt nicht die Stabilität des Tragwerks.

Aus statischer Sicht ist der Rahmen aus Stahlbetonfertigteilen in den betroffenen Brandabschnitten einer starken thermischen Belastung ausgesetzt, verhält sich jedoch gemäß den in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen progressiven und vorhersehbaren Mechanismen. Die Oberflächenschichten der Wände und Decken verlieren gemäß den temperaturabhängigen Zersetzungsmodellen der EN 1992-1-2 an Festigkeit und Steifigkeit; die Bewehrung verliert zunehmend an Streckgrenze, wenn die Stahltemperaturen etwa 400 bis 500 °C überschreiten, und in den am stärksten exponierten Bereichen kann es zu lokalem Abplatzen der Betondeckung kommen. Diese Mechanismen entwickeln sich eher allmählich als plötzlich. Die hohe thermische Trägheit und die geringe Wärmeleitfähigkeit der massiven Fertigteilquerschnitte begrenzen die Eindringtiefe der Wärme, sodass ein wesentlicher Teil jedes Querschnitts unterhalb der kritischen Temperaturen bleibt, und die Redundanz der zellartigen Wand- und Deckenanordnung ermöglicht eine Lastumverteilung um jedes lokal geschwächte Bauteil herum. Das beobachtete Verhalten entspricht genau den Anforderungen der finnischen P1-Klassifizierung, nach der das Bauwerk den vollständigen Durchbrennen des Brandes ohne Einsturz überstehen muss. Eine globale strukturelle Instabilität ist nicht absehbar, und in keiner Phase des Brandereignisses wird ein Mechanismus des fortschreitenden Einsturzes ausgelöst.

Der Brand wird letztendlich durch das Zusammenwirken von Brennstoffmangel und dem Fortbestehen der umgebenden nicht brennbaren Brandabschnitte gestoppt. Sobald der Inhalt der betroffenen Wohnungen und das brennbare Dach über dem betroffenen Bereich verbrannt sind, steht dem Feuer kein weiterer Brennstoff mehr zur Verfügung, und die Stahlbetonwände, die zu keinem Zeitpunkt durchbrochen wurden, schränken die Ausbreitung der Brandrückstände weiterhin ein. Die übrigen Wohnungen des Gebäudes, die über die beiden Treppenhäuser erschlossen und durch eigene EI-60-Trennwände geschützt sind, bleiben baulich intakt und sind höchstens von Rauchausbreitung durch undichte Durchführungen und über die gemeinsamen Verkehrsflächen betroffen.

Unter diesen Umständen ist der Sachschaden zwar schwerwiegend, aber räumlich begrenzt. Die Ausgangswohnung ist vollständig zerstört, die unmittelbar darüber und daneben liegenden Wohnungen weisen schwere Brand-, Hitze- und Rauchschäden auf, und das Holzdach über dem betroffenen Bereich ist verloren gegangen, während Rauch

und die Verbrennungsprodukte über die Treppenhäuser und die Versorgungsdurchführungen einen größeren Teil des Gebäudes kontaminieren. Auf dieser Grundlage werden die gebäudebezogenen Schäden auf etwa 25 bis 30 % des Wiederbeschaffungswerts des Gebäudes geschätzt, was den Wiederaufbau der betroffenen Wohnungen und des betroffenen Dachbereichs sowie die Reinigung und Wiederherstellung der rauchgeschädigten Oberflächen und Versorgungsleitungen an anderen Stellen widerspiegelt. Die Schäden am Hausrat und an der Gemeinschaftseinrichtung werden auf etwa 15 bis 20 % des versicherten Hausratwerts geschätzt, wobei der Totalschaden in den direkt betroffenen Wohnungen mit der weitreichenden Rauchverschmutzung im gesamten Gebäude kombiniert wird.

Der Betriebsausfall für diese Nutzung bemisst sich anhand der entgangenen Mieteinnahmen während des Zeitraums, der für die Wiederherstellung des betroffenen Gebäudeteils erforderlich ist; hinzu kommen die Kosten für die Unterbringung der betroffenen Haushalte. Da das tragende Gerüst intakt bleibt und sich die Schäden auf eine begrenzte Anzahl von Wohnungen sowie auf das Dach beschränken, besteht die Wiederherstellung hauptsächlich aus Innenausbauarbeiten und dem Wiederaufbau der Dachkonstruktion und nicht aus baulichen Maßnahmen; für die betroffenen Einheiten wird ein Zeitraum in der Größenordnung von 6 bis 9 Monaten veranschlagt, während die übrigen Wohnungen wieder vermietet werden können, sobald die Rauchbeseitigung in den Gemeinschaftsbereichen abgeschlossen ist. Die nicht brennbare Bauweise trägt daher nicht zur Ausweitung des Ereignisses bei. Ihre Nichtbrennbarkeit, ihre thermische Robustheit und die durch die tragenden Wände und Decken gebotene intrinsische Brandabschnittsbildung beschränken den Schaden auf die direkt vom Feuer betroffenen Wohnungen, bewahren die Gesamtstabilität des Gebäudes gemäß seiner P1-Klassifizierung und ermöglichen einen Wiederherstellungsprozess, der sich auf die Instandsetzung eines begrenzten Bereichs konzentriert und nicht auf den Wiederaufbau des gesamten Gebäudes.

MFL-Szenario mit Stahlbeton		
	Betroffener Bereich	**% Schaden**
Objekt Schaden	Ursprüngliche Wohnung, angrenzende Einheiten, Dach	25–30 % der Wiederbeschaffungskosten des Gebäudes 15–20 % des Wertes von Hausrat und Ausstattung
Betriebsunterbrechung[3]		75 % für 6 bis 9 Monate

Hinweis:
Die angegebenen Prozentsätze berücksichtigen weder mögliche Schadensminderungsmaßnahmen noch die zusätzlichen Kosten im Zusammenhang mit der vorübergehenden Unterbringung der betroffenen Haushalte während der Zeit, in der die Wohnungen nicht bewohnbar sind.

10.2.2 MFL-Szenario für Holzbauweise

Das Szenario des maximal vorhersehbaren Schadens für die Holzbauweise wurde unter genau denselben Annahmen entwickelt, die in Abschnitt 10.2.1 zugrunde gelegt wurden. Der Brandherd ist dieselbe Wohnung in einem der obersten Wohnstockwerke, die Zündquelle und die bewegliche Brandlast der Wohnung bleiben unverändert, und es wird davon ausgegangen, dass alle aktiven und funktionsfähigen Brandschutzmaßnahmen nicht verfügbar oder unwirksam sind. Die einzige Variable ist die tragende Konstruktion, die gemäß Abschnitt 10.1.2 aus Wand- und Deckenplatten sowie Treppenkernen aus kreuzweise laminiertem Holz besteht, die durch eine Gipsplattenverkleidung geschützt sind, deren Dimensionierung nominell darauf ausgelegt ist, die für das Gebäude dokumentierten Klassifizierungen R 60 und EI 60 zu erreichen.

Die Anfangsphase des Brandes entwickelt sich innerhalb der Ursprungswohnung, wird durch die Möbel, die Oberflächenverkleidungen und den Hausrat genährt und wächst zu einem voll entwickelten Raumbrand heran, bei dem die Temperaturen in den oberen Schichten Werte von 900 bis 1000 °C erreichen. Während dieser Phase erfüllt die Ummantelung ihre beabsichtigte Funktion, die Holzoberflächen bleiben abgeschirmt und es handelt sich vorübergehend um einen durch den Hausrat bestimmten Brand.

Der Wendepunkt tritt ein, sobald das Feuer den durch die Ummantelung gebotenen Schutz überdauert. Ohne Löschmaßnahmen, die es aufhalten könnten, wird die Gipskartonverkleidung von der freiliegenden Seite her allmählich verzehrt, verliert an den Plattenfugen und Befestigungslinien an Zusammenhalt und löst sich schließlich vollständig ab, sodass das von ihr geschützte Holz dem Brand im Brandabschnitt in der in Abschnitt 2.3.2 beschriebenen Weise ausgesetzt ist. Überall dort, wo die Verkleidungen verloren gehen, entzünden sich die Holzoberflächen und beginnen zu verkohlen; und wenn die Verkohlungsfront die Klebeflächen der kreuzweise laminierten Platten erreicht, kann dies eine Delaminierung der verkohlten Lamellen auslösen, wodurch frisches Holz darunter freigelegt wird und eine schrittweise Regeneration des Brennstoffs entsteht, die das Ausbrennen verzögert, anstatt es zu beschleunigen.

Ab diesem Zeitpunkt wird die Konstruktion selbst Teil des verfügbaren Brennstoffs, und ihre Rolle in dieser Konfiguration ist entscheidend, da die lasttragenden Elemente dieselben sind, die die Wohnungen voneinander trennen. Die Wände, die die Wohnung begrenzen, sowie die darüber und darunter liegenden Deckenplatten sind gleichzeitig tragend und trennend, und sobald die Kapselung durchbrochen ist, wird jede von ihnen gleichzeitig zu einer brennbaren Oberfläche und zu einem tragenden Element, das an Querschnitt verliert. Beide Funktionen – die Trennung der Brandabschnitte und die Tragfähigkeit des Gebäudes – hängen daher von einer Schutzschicht ab, die die MFL über ihre nominelle Dauer hinaus nicht berücksichtigt.

Der Verlust der Trennfunktion bestimmt die Ausbreitung. Sobald die Verkleidungen auf der Brandseite versagen, entzünden sich die Trennwände und die Bodenplatten und verlieren ihre Integrität, während die Fugen zwischen den Platten, die Übergänge von Wand zu Boden und die Durchführungen für Versorgungsleitungen bevorzugte Wege für heiße Gase und Flammen darstellen. Das Feuer breitet sich durch die Konstruktion aus, horizontal in die angrenzenden Wohnungen auf derselben Etage und, was noch bedeutender ist, vertikal über die Etagenübergänge in die darüber liegenden Wohnungen. Da sich das Gebäude über acht Stockwerke erstreckt, ist der vertikale Ausbreitungsweg der dominierende, und das Feuer steigt von einer Wohnebene zur nächsten entlang genau jener Elemente empor, die eigentlich dazu bestimmt sind, diese voneinander zu trennen, wodurch die oberen Wohnungen nacheinander dem Feuer ausgesetzt werden, während die sie umgebende Struktur verbrennt. Das Holzdach, das von unten durch das nun durch die Struktur vordringende Feuer erreicht wird, wird in das Geschehen einbezogen und bildet einen durchgehenden brennbaren Ausbreitungsweg am oberen Ende des Gebäudes.

Die baulichen Folgen stehen im Mittelpunkt dieses Szenarios. Da die Kreuzschichtplatten durch Verkohlung an Querschnitt verlieren, nähern sich die Deckenplatten der betroffenen Stockwerke dem Verlust ihrer Tragfähigkeit, und das Versagen einer Decke überträgt ihre Last sowie ihre brennenden Trümmer auf das darunterliegende Stockwerk, das bereits durch das in der Struktur aufsteigende Feuer geschwächt ist. Damit sind die Voraussetzungen für einen fortschreitenden vertikalen Einsturz des betroffenen Abschnitts gegeben, bei dem der Verlust eines Stockwerks den Verlust der darunterliegenden Stockwerke nach sich zieht.

In Übereinstimmung mit dem in Abschnitt 2.3.2 erörterten Ausbrennverhalten bleibt das Bauwerk während und nach der Abklingphase anfällig, da innerhalb der verkohlten Schichten, an den Wand-Boden-Anschlüssen und in den verdeckten Hohlräumen eine Schwelbrandbildung fortbesteht und verzögerte strukturelle Versagen während der Abkühlphase als Möglichkeit dokumentiert sind. Das Fortbestehen dieser Phänomene birgt ein konkretes Risiko der Wiederentzündung und macht letztendlich den Abriss der vom Brand betroffenen Holzkonstruktion erforderlich, da die Resttragfähigkeit verkohlter und delaminierter Platten sowie ihrer Verbindungen weder zuverlässig überprüft noch wirtschaftlich wiederhergestellt werden kann.

Der Sachschaden erstreckt sich weit über den Ursprungsbrandabschnitt hinaus. Die Ursprungswohnung sowie die durch die vertikale und horizontale Ausbreitung betroffenen Wohnungen sind zerstört; die Struktur des betroffenen Abschnitts erfordert nach dem teilweisen Einsturz und der verbleibenden Anfälligkeit der verkohlten Bauteile einen vollständigen Abriss und Wiederaufbau; das Holzdach über dem betroffenen Bereich ist verloren, und die übrigen Wohnungen sind durch die Treppenhäuser und die Versorgungsdurchführungen einer weitreichenden Rauch-, Hitze- und Wasserverschmutzung ausgesetzt. Auf dieser Grundlage werden die gebäudebezogenen Schäden auf etwa 90 bis 100 % des Wiederbeschaffungswerts des Gebäudes geschätzt, was im ungünstigsten, aber dennoch vorhersehbaren Fall an die Schwelle eines vollständigen Wiederaufbaus des Gebäudes heranreicht. Die Schäden am Hausrat und an der Gemeinschaftseinrichtung werden auf etwa 100 % des versicherten Hausratwerts geschätzt, was die Zerstörung in den direkt betroffenen Wohnungen und die umfangreiche Kontamination der übrigen Wohneinheiten widerspiegelt.

Der Betriebsausfall ist entsprechend umfangreich. Die Betroffenheit des gesamten Gebäudes, der durch den Einsturz und die Unmöglichkeit, die Resttragfähigkeit der Holzbauteile zu überprüfen, erzwungene strukturelle Abriss sowie der Verlust oder die Kontamination der Wohnungen über den direkt vom Brand betroffenen Bereich hinaus machen eine wohnungweise Wiederherstellung, die die zellartige Anordnung sonst ermöglichen würde, gänzlich unmöglich. Die Wiederherstellung läuft in der Praxis auf den Wiederaufbau des Gebäudes hinaus, einschließlich des Abrisses der vom Brand betroffenen Struktur unter den Sicherheitsauflagen, die durch einen teilweise eingestürzten und zu Schwelbränden neigenden Holzrahmen auferlegt sind, des Wiederaufbaus des tragenden Systems, die Wiederherstellung der technischen Versorgungsnetze sowie die Fertigstellung der Wohnungen. Die dafür benötigte Zeit wird auf etwa 24 bis 30 Monate geschätzt; während dieser Zeit erstreckt sich der Verlust an Mieteinnahmen auf das gesamte Gebäude, und die Unterbringung aller betroffenen Haushalte in Notunterkünften verlängert sich entsprechend.

MFL-Holzszenario		
	Betroffener Bereich	**% Schaden**
Immobilie Schaden	Gesamtes Gebäude	90–100 % der Wiederbeschaffungskosten des Gebäudes 100 % des Hausrats und der Betriebsausstattung
Betriebsunterbrechung[3]		100 % für 24 bis 30 Monate

Hinweis:
Die angegebenen Prozentsätze berücksichtigen weder mögliche Schadensminderungsmaßnahmen noch die zusätzlichen Kosten im Zusammenhang mit der vorübergehenden Unterbringung der betroffenen Haushalte während der Zeit, in der die Wohnungen nicht bewohnbar sind.

10.3 Szenarien zur normalen Schadenerwartung (NLE)

10.3.1 NLE-Szenario für Stahlbeton

Das Szenario zur normalen Verlustwahrscheinlichkeit geht von derselben Ausgangswohnung aus wie der MFL-Fall, sodass der Unterschied im Ergebnis ausschließlich auf die Schutzmaßnahmen zurückzuführen ist, wobei das Schutzkonzept nun wie vorgesehen funktioniert. Der Brand entsteht an einer typischen Quelle in einem Wohngebäude und breitet sich innerhalb der Wohnung aus, angefacht durch die dort vorhandene bewegliche Brandlast. Die netzbetriebenen Rauchmelder sind mit einer Auslegungsdichte von einem Melder pro 60 Quadratmeter installiert und sorgen für eine Frühwarnung, wodurch die Bewohner alarmiert und die kommunale Feuerwehr benachrichtigt wird, die den Einsatzort innerhalb ihrer dokumentierten Anfahrtszeit erreicht. Der Einsatz erfolgt während der Ausbreitungsphase des Brandes, bevor die Wohnung vollständig in Brand steht, und der Brand wird innerhalb der Ursprungswohnung unter Kontrolle gebracht und gelöscht.

Die thermische Belastung des Bauwerks ist daher sowohl hinsichtlich der Intensität als auch der Dauer begrenzt. Die vorgefertigten Stahlbetonwände und die massiven Deckenplatten, die die Wohnung begrenzen und für eine Feuerwiderstandsklasse R 60 ausgelegt sind – was die Anforderungen bei einem in seiner Wachstumsphase eingedämmten Brand bei weitem übersteigt –, erfahren höchstens eine oberflächliche Erwärmung, wobei die Oberflächentemperaturen lokal ansteigen, die Kerntemperaturen jedoch aufgrund der hohen thermischen Trägheit und der geringen Wärmeleitfähigkeit der Querschnitte niedrig bleiben, was mit den in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen progressiven Mechanismen übereinstimmt. Es tritt keine Verringerung der Tragfähigkeit ein, die Brandabschnittsgrenzen müssen keine über die übliche Trennung hinausgehende Funktion erfüllen, und die Tragwerks- und Brandabschnittsysteme werden nicht wesentlich beansprucht.

Der Schaden wird folglich vor allem durch den Hausrat der Brandwohnung und durch Rauch verursacht. Die Möbel und Oberflächenausstattungen innerhalb der Wohnung werden durch den direkten Brand beschädigt oder zerstört, und Rauchablagerungen beeinträchtigen die angrenzenden Räume derselben Wohnung sowie in begrenztem Umfang die über die Eingangstür erreichbaren gemeinsamen Verkehrsflächen, was eine Reinigung und teilweise Sanierung erforderlich macht. Die nicht brennbaren Betonoberflächen können ohne eingreifende Maßnahmen begutachtet, gereinigt und wiederhergestellt werden.

Auf dieser Grundlage werden die gebäudebezogenen Schäden auf etwa 0 bis 2 % des Wiederbeschaffungswerts des Gebäudes geschätzt, was im Wesentlichen mit der Reinigung und Wiederherstellung von Oberflächen und Versorgungsleitungen innerhalb und unmittelbar um den Brandherd herum verbunden ist. Die Schäden am Hausrat und an der Gemeinschaftseinrichtung werden auf etwa 1 bis 4 % des versicherten Hausratwerts geschätzt und konzentrieren sich auf die Ursprungswohnung, wobei die Rauchbelastung darüber hinaus begrenzt ist.

Der Betriebsausfall ist begrenzt und räumlich auf den Brandherd beschränkt. Die übrigen Wohnungen des Gebäudes sind abgesehen von geringfügigen Rauchablagerungen in den Gemeinschaftsbereichen nicht betroffen und bleiben bewohnt oder sind sofort wieder vermietbar, sodass der Verlust an Mieteinnahmen die einzelne Ursprungswohnung während des für deren Reinigung, Reparatur und Sanierung erforderlichen Zeitraums betrifft, der auf etwa 1 bis 2 Monate geschätzt wird. Das Ereignis bleibt versicherungstechnisch ein gewöhnlicher und vollständig ersetzbarer Schaden, der durch das frühzeitige Ansprechen des Erkennungs- und Warnsystems sowie durch das schnelle Eingreifen von außen begrenzt und durch eine nicht brennbare Bausubstanz eingeschränkt wird, die weder zum Brand beiträgt noch bauliche Maßnahmen nach dem Brand erfordert.

NLE-Szenario mit Stahlbeton		
	Betroffener Bereich	**% Schaden**
Sachschaden	Eine Wohnung	0–2 % der Wiederbeschaffungskosten des Gebäudes 1–4 % des Hausrats und der Ausstattung
Betriebsunterbrechung Betriebsunterbrechung[3]		2 % für 1 bis 2 Monate

Hinweis:
Die angegebenen Prozentsätze berücksichtigen weder mögliche Schadensminderungsmaßnahmen noch die zusätzlichen Kosten im Zusammenhang mit der vorübergehenden Unterbringung der betroffenen Haushalte während der Zeit, in der die Wohnungen nicht bewohnbar sind.

10.3.2 NLE-Szenario für Holzbauweise

Das Szenario der normalen Verlustwahrscheinlichkeit für die Holzbauweise geht von derselben Ausgangswohnung und demselben Schutzkonzept aus, das wie vorgesehen funktioniert, sodass der Ablauf des Ereignisses mit dem in Abschnitt 10.3.1 identisch ist. Der Brand entsteht innerhalb der Wohnung, die Rauchmelder geben eine Frühwarnung, und die städtische Feuerwehr erreicht den Einsatzort innerhalb ihrer dokumentierten Anfahrtszeit, wodurch sie den Brand in seiner Wachstumsphase unter Kontrolle bringt und löscht, bevor die Wohnung vollständig in Brand gerät.

Da der Brand in diesem Stadium unter Kontrolle gebracht wird, wird die tragende Funktion des Bauwerks nicht beeinträchtigt. Die Verkleidung aus Gipskartonplatten, die nur einer begrenzten und kurzzeitigen thermischen Einwirkung ausgesetzt ist, schützt die Brettsperrholzelemente während des gesamten Vorfalls, sodass die Wände und der Boden, die die Wohnung begrenzen, ihren Querschnitt und ihre Trennwirkung behalten und eine Ausbreitung über die Ursprungswohnung hinaus nicht stattfindet.

Die Schäden betreffen vor allem den Hausrat und sind, wie bei jedem kontrollierten Wohnungsbrand, auf Rauch zurückzuführen. Das Besondere an der Holzbauweise liegt im Zustand der Konstruktion nach dem Brand. Die Verkleidung in dem direkt dem Feuer ausgesetzten Bereich ist Flammeneinwirkung, lokaler Erwärmung und den mechanischen Belastungen durch die Löschmaßnahmen ausgesetzt und wird durch das Löschwasser benetzt. Selbst dort, wo die Verkleidungen ordnungsgemäß funktioniert haben, kann ihre Schutzwirkung in der betroffenen Zone nicht mehr vorausgesetzt werden, und die von den Platten und dem dahinterliegenden Holz aufgenommene Feuchtigkeit muss beseitigt werden, um die für Holz typischen Probleme hinsichtlich Maßhaltigkeit und Haltbarkeit zu vermeiden.

Die tragenden Bauteile hinter den beschädigten Verkleidungen können nicht allein durch eine Sichtprüfung als unbeeinträchtigt eingestuft werden. Die Platten im und um den Entstehungsbereich müssen entfernt werden, um das Fehlen lokaler Verkohlung und von Schwelherden an den Plattenfugen, den Wand-Boden-Übergängen und den verdeckten Hohlräumen zu überprüfen – eine Überprüfung, die in einer nicht brennbaren Konstruktion keine Entsprechung hat und die den Eingriff über die direkt beschädigten Oberflächen hinaus ausdehnt, im Einklang mit der in Abschnitt 2.4 erörterten Abhängigkeit von der Integrität des Schutzes. Werden oberflächliche Verkohlungen festgestellt, werden die betroffenen Schichten repariert oder die Plattenoberflächen lokal wiederhergestellt, und das gesamte Kapselungssystem wird anschließend wieder aufgebaut, um das zertifizierte Brandverhalten des Brandabschnitts wiederherzustellen.

Auf dieser Grundlage werden die gebäudebezogenen Schäden auf etwa 2 bis 5 % des Wiederbeschaffungswerts des Gebäudes geschätzt; darin enthalten sind das Abtragen, die Überprüfung, die Trocknung und der zertifizierte Wiederaufbau der Kapselung sowie die lokale Reparatur der Holzoberflächen, zusätzlich zur Reinigung und Wiederherstellung der Oberflächen und Versorgungsleitungen innerhalb und um den Ursprungsbrandabschnitt herum. Der Schaden am Hausrat und an der Gemeinschaftseinrichtung wird auf etwa 1 bis 4 % des versicherten Hausratwerts geschätzt und konzentriert sich auf die Ursprungswohnung, wobei die Rauchbelastung darüber hinaus begrenzt ist.

Der Betriebsausfall folgt derselben Logik. Der Verlust an Mieteinnahmen betrifft die Ursprungswohnung, deren Wiederherstellung neben der Reinigung, den Reparaturen und der Sanierung auch das Öffnen und die Überprüfung der eingekapselten Struktur, die Trocknung der durchnässten Elemente und den zertifizierten Wiederaufbau der Schutzverkleidungen umfassen muss. Der Zeitraum, der erforderlich ist, um die Wohnung wieder nutzbar zu machen, wird auf etwa 2 bis 3 Monate geschätzt. Das Ereignis bleibt ein gewöhnlicher und vollständig erstattungsfähiger Schaden, bei dem selbst ein erfolgreich eingedämmter Brand einen Überprüfungs- und Wiederherstellungsaufwand für das Gebäude selbst verursacht, der sich in den Gebäudeschäden und in der Dauer der Wiederherstellung widerspiegelt.

NLE-Holzszenario		
	Betroffener Bereich	**% Schaden**
Immobilie Schaden	Eine Wohnung	2–5 % der Wiederbeschaffungskosten des Gebäudes 1–4 % des Wertes von Hausrat und Einrichtungsgegenständen
Betriebsunterbrechung Betriebsunterbrechung[3]		2–5 % für 2 bis 3 Monate

Hinweis:
Die angegebenen Prozentsätze berücksichtigen weder mögliche Schadensminderungsmaßnahmen noch die zusätzlichen Kosten im Zusammenhang mit der vorübergehenden Unterbringung der betroffenen Haushalte während der Zeit, in der die Wohnungen nicht bewohnbar sind.

10.4 Szenariovergleich – Fallstudie Nr. 5

In den vier Szenarien wird jeweils eine einzige kontrollierte Variable isoliert betrachtet. Die Gebäudegeometrie, die Aufteilung in zweiundfünfzig Wohnungen, die Einrichtung, die Zündquelle und die Brandschutzstrategie auf der Grundlage von Brandabschnitten und Frühwarnung bleiben unverändert; lediglich das Material des tragenden Systems variiert. Im Gegensatz zu den vorherigen Fallstudien stützt sich dieses Wohngebäude jedoch sowohl für die statische Tragfähigkeit als auch für die Brandabschnittsbildung auf dieselben Elemente. Die Stahlbetonwände und -decken dienen gleichzeitig als tragende Konstruktion und als feuerbeständige Trennwände zwischen benachbarten Wohnungen und Stockwerken. Der Ersatz von Stahlbeton durch Holz verändert daher nicht nur das Tragwerksystem, sondern auch die Wirksamkeit der Brandabschnittsgrenzen, wodurch diese Doppelfunktion zum entscheidenden Faktor für die unterschiedlichen Brandverläufe wird.

Unter NLE-Bedingungen zeigen die beiden baulichen Lösungen ein ähnliches Verhalten. Der Brand wird während seiner Ausbreitungsphase unter Kontrolle gebracht, bevor die Ursprungswohnung vollständig erfasst wird, und das Tragwerk wird nicht wesentlich beeinträchtigt. Die Schäden am Hausrat sind identisch, da der Brand auf die Ursprungswohnung beschränkt bleibt und es darüber hinaus nur zu einer begrenzten Rauchbelastung kommt. Die Holzlösung führt dennoch zu einem leichten Anstieg der Gebäudeschäden. Selbst nach erfolgreicher Brandbekämpfung erfordert die Wiederherstellung die Entfernung und Begutachtung der Kapselung, die Überprüfung auf verdeckte Verkohlung und Schwelbrand, die Trocknung wasserbeschädigter Holzelemente sowie den zertifizierten Wiederaufbau der Schutzverkleidungen – Maßnahmen, für die es in einer nicht brennbaren Konstruktion keine Entsprechung gibt. Folglich steigt der Gebäudeschaden auf 2–5 %, verglichen mit 0–2 % bei der Stahlbetonlösung, während sich die Wiederherstellung der betroffenen Wohnung auf 2–3 Monate statt auf 1–2 Monate verlängert. In beiden Fällen handelt es sich jedoch weiterhin um einen gewöhnlichen und vollständig ersetzbaren Schaden.

Der Unterschied wird unter MFL-Bedingungen grundlegend, bei denen kein aktiver Schutz die Brandausbreitung begrenzt und nicht davon ausgegangen wird, dass die Kapselung über ihre nominelle Feuerwiderstandsdauer hinaus wirksam bleibt. Zwei Mechanismen bestimmen dann die Abweichung. Erstens trägt das Tragwerksystem unterschiedlich zur verfügbaren Brennstoffmenge bei. Im Stahlbetongebäude beschränkt sich die Verbrennung auf den Hausrat, und das Feuer erlischt von selbst, sobald dieser Brennstoff aufgebraucht ist. Im Holzgebäude hingegen wird die Konstruktion selbst nach Versagen der Einhausung zu einer zusätzlichen Brennstoffquelle. Wenn die Verkohlungsfront die Klebeflächen der Brettsperrholzplatten erreicht, legt die Delaminierung frische Holzoberflächen frei, was das Ausbrennen verzögert und die Dauer des voll entwickelten Brandes verlängert.

Der zweite Mechanismus betrifft die Brandabschnittsbildung. Im Stahlbetongebäude bilden die Wände und Deckenplatten von Natur aus nicht brennbare Barrieren, deren Brandtrennfähigkeit unabhängig von eingesetzten Schutzsystemen oder wartungsintensiven Bauteilen ist. Der Brand bleibt daher auf eine begrenzte Gruppe von Wohnungen beschränkt, ohne sich über den Tragrahmen auszubreiten. Bei der Holzbaulösung übernehmen dieselben Elemente gleichzeitig die tragende Funktion und die Brandabschnittsbildung. Sobald die Kapselung versagt, werden sie sowohl brennbar als auch zunehmend geschwächt, wodurch sich die tragenden und brandabschnittsbildenden Funktionen gemeinsam verschlechtern.

Die Folgen werden durch die Geometrie des Gebäudes verstärkt, wodurch sich diese Fallstudie von der zuvor analysierten horizontalen Schule unterscheidet. Hier erstreckt sich die Struktur vertikal über acht Stockwerke, sodass die Brandausbreitung in erster Linie die Deckenkonstruktionen betrifft, die aufeinanderfolgende Wohnebenen verbinden. Im Stahlbetongebäude behalten die Deckenplatten ihre Integrität und verhindern so eine vertikale Brandausbreitung. Selbst das brennbare Holzdach stürzt auf die darüberliegende Betonplatte ein, ohne die darunter liegenden Wohnungen zu beeinträchtigen, wodurch die Struktur einen vollständigen Brand überstehen kann – ganz im Sinne der Ziele der finnischen P1-Klassifizierung.

Bei der Holzbauweise hingegen sind die Deckenkonstruktionen sowohl brennbar als auch tragend. Das Feuer breitet sich vertikal durch die tragenden Elemente aus, die eigentlich dazu dienen, aufeinanderfolgende Stockwerke voneinander zu trennen, während der Versagen einer Decke sowohl die Last als auch brennende Trümmer auf die darunterliegende, geschwächte Ebene überträgt. Diese Bedingungen schaffen das Potenzial für einen fortschreitenden vertikalen Einsturz des betroffenen Gebäudeteils. Die Holzkonstruktion erfüllt daher das P1-Ziel nur so lange, wie die Kapselung wirksam bleibt; unter MFL-Bedingungen trifft diese Annahme nicht mehr zu, wodurch die Einhaltung der Anforderungen eher bedingt als inhärent ist.

Dieser Unterschied zeigt sich am deutlichsten bei der Wiederherstellbarkeit nach einem Brand. Im Stahlbetongebäude bleibt der Schaden auf eine begrenzte Anzahl von Wohnungen beschränkt, sodass die nicht betroffenen Wohnungen baulich intakt bleiben und nach der Sanierung der Gemeinschaftsbereiche wieder genutzt werden können. Die Wiederherstellung basiert daher auf der Sanierung eines definierten Teils des Gebäudes und nicht auf einem vollständigen Wiederaufbau. Im Gegensatz dazu wird das Ereignis zu einem gebäudeweiten Totalverlust, sobald sich das Feuer durch die Holzkonstruktion ausbreitet. Ein teilweiser Einsturz und die Unmöglichkeit, die Resttragfähigkeit verkohlter und delaminierter Bauteile sowie ihrer Verbindungen zu überprüfen, machen den Abriss des betroffenen Gebäudes erforderlich.

Die vertikale Anordnung verstärkt zudem die Folgeschäden. Rauch und Löschwasser dringen durch Deckenübergänge, Plattenfugen und Versorgungsdurchführungen in die unteren Stockwerke ein, sammeln sich in den Holzkonstruktionen an und verlängern sowohl die Trocknungsmaßnahmen als auch die Wiederherstellungsarbeiten. Im Vergleich zu der zuvor untersuchten horizontalen Schulanlage führt die vertikale Konfiguration daher zu einer schwerwiegenderen Brandentwicklung in Verbindung mit wesentlich größeren Rauch- und Wasserschäden.

Der Betriebsausfall in dieser Nutzungsart besteht in erster Linie aus entgangenen Mieteinnahmen sowie den Kosten für die Unterbringung der vertriebenen Mieter. Anders als bei den industriellen Fallstudien sind die jährlichen Mieteinnahmen im Vergleich zum Wiederaufbauwert relativ gering, sodass der Betriebsausfall in finanzieller Hinsicht deutlich geringer ausfällt als der Sachschaden, insbesondere unter NLE-Bedingungen. Der aussagekräftigere Indikator ist daher die Anzahl der aus dem Gebrauch genommenen Wohnungen und die Dauer ihrer Nichtverfügbarkeit. Unter NLE-Bedingungen bleibt die betroffene Wohnung bei beiden baulichen Lösungen für 1 bis 3 Monate nicht nutzbar. Im Holzbau können die Überprüfung und die Wiederherstellung der Kapselung in den an die betroffene Wohnung angrenzenden Einheiten den Nutzungsausfall auf eine kleine Anzahl benachbarter Wohnungen ausweiten, wodurch sich der Anteil der vorübergehend aus dem Verkehr gezogenen Wohnungen leicht erhöht.

Unter den Bedingungen des maximal vorhersehbaren Schadens beschränkt sich der physische Schaden im Stahlbetongebäude zwar auf eine Gruppe von Wohnungen, doch führt die Instandsetzung dieser Gruppe zusammen mit der vorübergehenden Sperrung des betroffenen Treppenhauses, der gemeinschaftlich genutzten Einrichtungen und der Rauch- und Wasserschäden ausgesetzten Wohnungen dazu, dass der größte Teil des Gebäudes für etwa 6 bis 9 Monate nicht nutzbar ist. Nur die Wohnungen, die über das nicht betroffene Treppenhaus erschlossen und vom Ereignis unberührt geblieben sind, werden früher wieder nutzbar. Bei der Holzbauweise hingegen entgehen während der für den Wiederaufbau erforderlichen 24 bis 30 Monate die Mieteinnahmen des gesamten Gebäudes.

Die quantitativen Auswirkungen werden im Folgenden zusammengefasst, indem die Prozentsätze des Szenarios auf einen Wiederaufbauwert des Gebäudes von etwa 9,2 Millionen Euro und einen Hausratwert von etwa 1,8 Millionen Euro angewendet werden.

	Gebäudeschäden		Hausrat & Ausstattung Schaden		Gesamtschaden Schaden	Betriebsunterbrechungsschaden		Gesamt PD + BI
MFL – Haftpflicht	25–30 %	ca. 2,5 Mio. €	15–20 %	ca. 0,3 Mio. €	ca. 2,8 Mio. €	75 % des gesamten Bauvolumens für 6 bis 9 Monate	ca. 0,3 Mio. €	ca. 3,1 Mio. €
MFL – Holz	90–100 %	ca. 8,8 Mio. €	100 %	ca. 1,8 Mio. €	ca. 10,6 Mio. €	100 % des gesamten Bauvorhabens über 24 bis 30 Monate	ca. 1 Mio. €	ca. 11,6 Mio. €
NLE – RC	0–2 %	ca. 0,1 Mio. €	1–4 %	ca. 0,05 Mio. €	ca. 0,15 Mio. €	2 % der gesamten Baukosten 1 bis 2 Monate	ca. 1.000 €	ca. 0,15 Mio. €
NLE – Holz	2–5 %	ca. 0,3 Mio. €	1–4 %	ca. 0,05 Mio. €	ca. 0,35 Mio. €	2–5 % der gesamten Baukosten 2 bis 3 Monate	ca. 2.000 €	ca. 0,35 Mio. €

11. Vergleichende Betrachtung der 5 Fälle und Schlussfolgerungen

11.1 Fallübergreifende vergleichende Analyse

Die fünf Fallstudien wurden nicht als eigenständige Beispiele konzipiert, sondern als strukturierte Stichprobe des europäischen Gebäudebestands, die so ausgewählt wurde, dass aus ihrem Vergleich allgemeine Schlussfolgerungen gezogen werden können und nicht nur Beobachtungen, die nur für das einzelne Gebäude gelten. Sie umfassen Industrie-, Wohn- und Bildungsgebäude, einstöckige und mehrstöckige Bauwerke mit bis zu acht Stockwerken, offene Einraum-Grundrisse und fein unterteilte Zellen sowie Schutzkonzepte, die von vollautomatischer Löschung bis hin zu reiner Erkennung und externem Eingreifen reichen. Werden sie nicht nacheinander, sondern gemeinsam betrachtet, lässt sich das Verhalten der beiden Baustoffe von den besonderen Gegebenheiten der einzelnen Gebäude abgrenzen. Die folgende Tabelle fasst die Ergebnisse der einzelnen Fallstudien entlang der Dimensionen zusammen, auf die die Diskussion eingehen wird.

Fallstudie	Nutzungsart	NLE Ergebnis	MFL Ergebnis	RC Wiederherstellbarkeit	Holzverwertbarkeit	Dominanter Einflussfaktor
CS#1 Automatisiertes Lager	Industrie	Vergleichbar	In beiden Bereichen stark, bei Holz stärker	Reparatur und Neuausstattung	Abriss und Wiederaufbau	Betriebsabhängigkeit und struktureller Brennstoffverbrauch
CS#2 Reihenhäuser	Wohnungsbau	Vergleichbar	Abweichend	Teilweise Sanierung, Wohneinheiten erhalten	Kompletter Wiederaufbau	Verlust der Brandabschnittsbildung zwischen den Wohneinheiten
CS#3 Lagerhalle	Industrie	Vergleichbar	Hoher Anteil an beidem, insgesamt aus Holz	Teilweise Wiederverwendung des Rahmens, Instandsetzung	Vollständiger Abriss	Brennbares Bauwerk in einem einzigen Raum
CS#4 Schulgelände	Bildung	Vergleichbar	Große Abweichung	Reparatur des Kompartiments	Flügelrekonstruktion	Intrinsische versus bedingte Kompartimentierung
CS#5 Wohnhaus	Wohngebäude	Vergleichbar	Extreme Abweichung	Sanierung eines Gebäudekomplexes	Gebäudeumbau	Vertikale Ausbreitung, Struktur als Grenze

Obwohl sich die fünf Fallstudien hinsichtlich der Nutzung, der Geometrie, der Inhaltsstoffe und der Brandszenarien unterscheiden, zeigt sich bei allen ein einheitliches Muster. Im NLE-Szenario verhalten sich die beiden Materialien gleich, während sie im MFL-Szenario voneinander abweichen – und zwar in einem Ausmaß, das nicht konstant ist, sondern je nach Gebäudetyp variiert. Im weiteren Verlauf dieses Kapitels wird dargelegt, dass dieses Muster durch die Rolle des Baustoffs im Brandverlauf bestimmt wird, es wird aufgezeigt, warum dessen Ausmaß von der Nutzung und der Geometrie abhängt, und es werden die Konsequenzen für Sachschäden, Betriebsunterbrechungen und die Wiederherstellbarkeit nach einem Brand abgeleitet.

11.2 Die Rolle des Baustoffs

Die vergleichende Analyse zeigt, dass der entscheidende Faktor zwischen den beiden baulichen Lösungen weder der Gebäudetyp, noch die Nutzung noch der Inhalt ist – all diese Faktoren wurden in jeder Fallstudie konstant gehalten –, sondern die Rolle, die das Baustoffmaterial bei der Brandentwicklung und den Folgen eines Brandes spielt. In allen fünf Fallstudien kommt dieser Einfluss durch vier wiederkehrende Mechanismen zum Ausdruck.

Der erste Mechanismus betrifft den verfügbaren Brennstoff. Stahlbeton, der gemäß EN 13501-1 als A1 klassifiziert ist, ist nicht brennbar und trägt nicht zur Brandlast bei. Die Brandentwicklung hängt daher ausschließlich vom Inhalt des Brandabschnitts ab und schreitet naturgemäß in Richtung Ausbrennen fort, sobald dieser Brennstoff aufgebraucht ist. Ist hingegen die Ummantelung einer Holzkonstruktion einmal beschädigt, wird das Tragwerksystem selbst zu einer zusätzlichen Brennstoffquelle. Die Verkohlung erreicht nach und nach die Klebeflächen von Holzwerkstoffen, wo es durch Delaminierung zu freiliegenden, brennbaren Oberflächen kommen kann, was die Verbrennung verlängert und das Ausbrennen verzögert. Infolgedessen bleibt der Brand im Stahlbetongebäude durch eine feste Brennstoffmenge begrenzt, während im Holzgebäude die Konstruktion selbst zur Aufrechterhaltung des Brandwachstums beiträgt.

Der zweite Mechanismus betrifft die Brandabschnittsbildung. In drei der fünf Fallstudien definieren die tragenden Elemente gleichzeitig die Brandabschnittsgrenzen. Der Ersatz von Stahlbeton durch Holz verändert daher nicht nur das Tragwerksystem, sondern auch die Beschaffenheit der Brandschutzbarrieren. Bei der Stahlbetonlösung ist die Brandabschnittsbildung eine inhärente Eigenschaft der Konstruktion selbst. Bei der Holzlösung beruhen gleichwertige Feuerwiderstandsklassen auf der fortbestehenden Integrität der Ummantelung. Sobald dieser Schutz verloren geht, verschlechtern sich die tragenden und trennenden Funktionen gleichzeitig, und die Gleichwertigkeit zwischen den beiden Systemen besteht nicht mehr.

Der dritte Mechanismus ist die strukturelle Robustheit und ihre Vorhersagbarkeit. Das Brandverhalten von Stahlbeton verläuft progressiv, ist in der Norm EN 1992-1-2 gut charakterisiert und durch umfangreiche experimentelle Nachweise gestützt, was zu einer allmählichen Verringerung der Tragfähigkeit führt. Die Resttragfähigkeit von Holz hängt jedoch von Annahmen hinsichtlich der Verkohlungsraten, der Haftfestigkeit, des Verhaltens der Verbindungen und der Wirksamkeit des passiven Brandschutzes ab. Diese Mechanismen werden in der Bemessung durch vereinfachte Modelle abgebildet, deren Gültigkeit vom tatsächlichen Brandszenario abhängt. Zudem bleiben Holzbauwerke während der Abkühlphase anfällig, da sich verzögerte Versagensmechanismen auch nach dem Erlöschen des sichtbaren Feuers weiterentwickeln können.

Der vierte Mechanismus betrifft die Wiederherstellbarkeit nach einem Brand. Stahlbetonkonstruktionen, die einer starken Brandbelastung standhalten, behalten in der Regel eine ausreichende Resttragfähigkeit, um eine Instandsetzung der betroffenen Bereiche zu ermöglichen. Holzkonstruktionen hingegen, die über die Wirksamkeit ihrer Schutzsysteme hinaus verbrannt sind, lassen sich aufgrund verdeckter Schäden, umfangreicher Verkohlung und Unsicherheiten hinsichtlich der Resttragfähigkeit der Bauteile und ihrer Verbindungen oft nicht zuverlässig auf ihre weitere Gebrauchstauglichkeit hin beurteilen. Folglich verlagert sich die Wiederherstellung häufig von der Instandsetzung hin zum Abriss und Wiederaufbau. Diese Unterscheidung ist nicht nur eine Folge unterschiedlicher Instandsetzungsstrategien, sondern das direkte wirtschaftliche Ergebnis der vorangegangenen drei Mechanismen.

11.3 Einfluss der Nutzung

Während die zugrunde liegenden Brandmechanismen unverändert bleiben, hängt die Art und Weise, wie sich der Schaden darstellt, von der Nutzung des Gebäudes ab, und die fünf Fälle zeigen, dass sich die dominierende Komponente des Schadens je nach Nutzung verschiebt. In den industriellen Fällen konzentrieren sich der Wert und die Anfälligkeit eher auf den Betrieb als auf die Bausubstanz, sodass die Betriebsunterbrechung den Sachschaden erreichen oder sogar übersteigen kann – am deutlichsten im hochautomatisierten Lager, wo die gegenseitige Abhängigkeit der Lager- und Fördersysteme einen Teilbetrieb während des Wiederaufbaus unmöglich macht und die Betriebsunterbrechung über den Sachschaden hinaus treibt. In den Wohnfällen konzentriert sich das Risiko auf das Gebäude und den Hausrat, während die Einkommensbasis im Verhältnis zum Wiederaufbauwert gering ist, sodass der Sachschaden überwiegt und die Betriebsunterbrechung, ausgedrückt als Mietausfall, strukturell eine Größenordnung darunter bleibt. Der Bildungsfall (Schule) nimmt eine Zwischenposition ein, in der das relevante Maß weder Gewinn noch Miete ist, sondern die Kontinuität einer öffentlichen Dienstleistung, sodass der Betriebsausfall eher durch die Dauer und das Ausmaß der Unterbrechung des Unterrichts als durch einen Geldbetrag ausgedrückt wird.

Diese Abhängigkeit von der Nutzung schwächt den Vergleich nicht, sondern verfeinert ihn. Die Wahl des Baumaterials wirkt sich bei jedem Gebäude auf dieselben vier Mechanismen aus, doch die Folgen dieser Mechanismen werden je nach Nutzung unterschiedlich ausgewertet, und eine ausschließlich auf Sachschäden beschränkte Bewertung würde die Auswirkungen bei Industriegebäuden unterschätzen und deren Charakter bei institutionellen Gebäuden falsch darstellen.

11.4 Einfluss der Geometrie

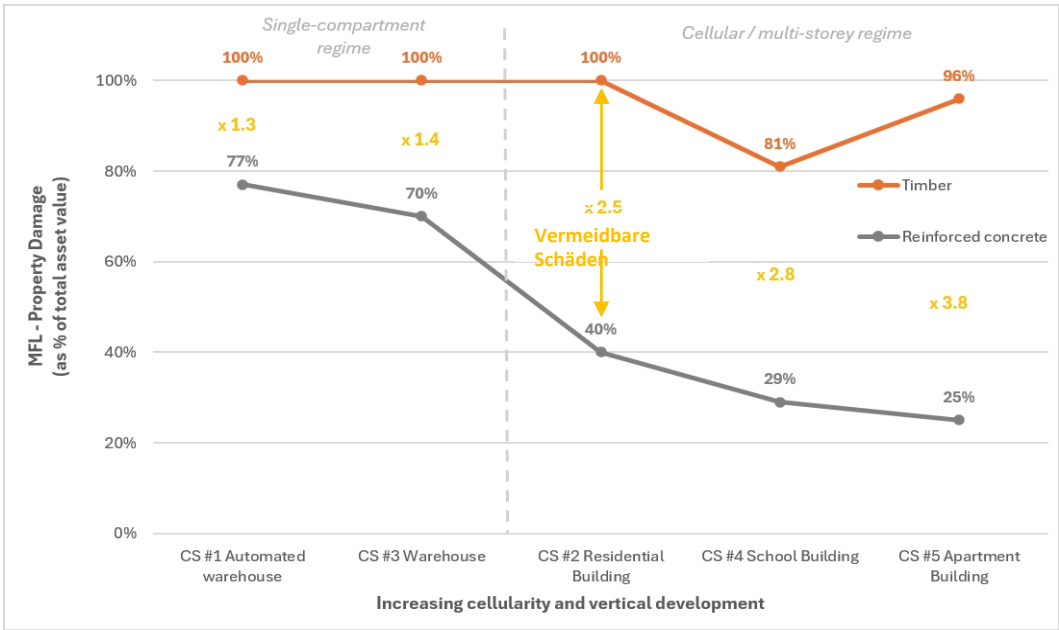
Der Vergleich zeigt, dass die Abweichung zwischen Stahlbeton- und Holzkonstruktionen unter der Annahme des maximal vorhersehbaren Schadens (MFL) in erster Linie von der Gebäudgeometrie und nicht von der Nutzung bestimmt wird. Genauer gesagt nimmt sie in dem Maße zu, in dem das Tragwerk gleichzeitig auch die Brandabschnittsgrenzen bildet.

In allen fünf Fallstudien verursachen die Holzkonstruktionen unter MFL-Bedingungen durchweg Sachschäden zwischen etwa 80 % und 100 % des versicherten Vermögenswerts, weitgehend unabhängig von der Nutzung oder der Gebäudehöhe. Die Stahlbetonlösungen hingegen reichen von etwa 75 % des Vermögenswerts im offenen Lagerhaus bis zu nur 25 % im stark unterteilten mehrstöckigen Wohngebäude. Der Vorteil der nicht brennbaren Konstruktion liegt daher nicht darin, eine Entzündung zu verhindern oder die frühen Stadien der Brandentwicklung einzudämmen – wo beide baulichen Lösungen ähnlich abschneiden –, sondern darin, die Brandabschnittsbildung während eines voll entwickelten Brandes aufrechtzuerhalten und dadurch den Anteil des betroffenen Gebäudeteils zu begrenzen.

Fallstudie	Gebäudegeometrie	Brandabschnittsstrategie	Sachschaden bei Stahlbeton (% des Gebäudewertes)	Holz: Sachschaden (% des Vermögenswerts)	Verhältnis Holz/Stahlbeton
CS#1 Automatisiertes Lager	Einstöckig, offen gestaltet	Ein einziger Brandbereich	~77 %	~100 %	1,3
CS#2 Reihenhäuser	Niedrige Mehrfamilienhäuser	Gemeinschaftsmauern	~40 %	~100 %	2,5
CS#3 Lagerhalle	Einstöckig	Einzelraum	~70 %	~100 %	1,4
CS#4 Schulgelände	Horizontal, stark unterteilt	Brandwände in voller Höhe	~29 %	~81 %	2,8
CS#5 Wohnhaus	Achtgeschossiges Gebäude mit zellförmiger Aufteilung	Struktur, die mit den Brandabschnittsgrenzen übereinstimmt	~25 %	~96 %	3,8

Die in dieser Tabelle angegebenen Prozentsätze drücken den gesamten Sachschaden (Gebäudeschaden und Hausratschaden zusammen) als Anteil am gesamten exponierten Vermögenswert aus, der in der Beschreibung der jeweiligen Fallstudie angegeben ist, d. h. an der Summe aus dem Wiederaufbauwert des Gebäudes und dem Versicherungswert des Hausrats.

Das Verhältnis zwischen den beiden baulichen Lösungen ist in großen, offenen Industriegebäuden am geringsten, in denen sich der Brand innerhalb eines einzigen Brandabschnitts ausbreitet und der Hauptbrennstoff eher die gelagerte Ware als die Konstruktion selbst ist, sodass Stahlbeton nur eine begrenzte Verringerung der Sachschäden bietet und sein Hauptvorteil stattdessen in der strukturellen Stabilität und der Wiederherstellbarkeit nach einem Brand liegt. Je wirksamer die Brandabschnittsbildung ist, desto deutlicher vergrößert sich der Unterschied. Stahlbeton bewahrt die Integrität der Brandschutzbarrieren und beschränkt den Schaden auf einen begrenzten Teil des Gebäudes, während das brennbare Tragwerkssystem eben diese Barrieren zunehmend beeinträchtigt und eine Ausbreitung des Feuers über den Ursprungsbrandabschnitt hinaus ermöglicht. Die größte Abweichung tritt in vertikal angelegten Gebäuden auf, in denen die Deckenkonstruktionen gleichzeitig als tragende Elemente und zur Brandabschnittsbildung dienen und deren Versagen nicht nur eine vertikale Brandausbreitung zulässt, sondern auch die Voraussetzungen für ein fortschreitendes Einstürzen schafft. Über die fünf Fälle hinweg steigt das Verhältnis der Schäden bei Holzbauweise zu denen bei Stahlbetonbauweise daher von etwa 1,3 im offenen Lagerhaus auf fast 4 im achtstöckigen Wohnhaus, wie in der folgenden Grafik dargestellt. Die gleiche Geometrie verstärkt zudem Sekundärschäden, da Rauch und Löschwasser durch Bodenanschlüsse und Versorgungsdurchführungen in die darunterliegenden Stockwerke gelangen und so die Trocknungs- und Wiederherstellungsarbeiten verlängern.



Grafik 4, MFL: Holz im Vergleich zu Stahlbeton in den fünf Fallstudien

Diese Erkenntnis geht über die einzelnen Fallstudien hinaus. Sie deutet darauf hin, dass der Vorteil eines nicht brennbaren Tragwerks in großen, offenen Industriegebäuden, in denen die Brandabschnittsbildung nur eine begrenzte Rolle spielt, am geringsten ist und in stark unterteilten und mehrstöckigen Gebäuden, in denen das Tragwerk auch die Brandabschnitte definiert, am größten ist. Dies sind auch die Gebäudetypen, in denen die Massivholzbauweise derzeit am schnellsten zunimmt, wodurch der Zusammenhang zwischen Baustoff, Geometrie und Brandabschnittsbildung für zukünftige Brandrisikobewertungen besonders relevant wird.

11.5 Sachschaden versus Betriebsunterbrechung

Die beiden Komponenten des Schadens entwickeln sich nicht parallel, und ihre Beziehung hat für die versicherungstechnische Auswertung der Ergebnisse eine besondere Bedeutung. In Wohn- und institutionellen Gebäuden bestimmt der Sachschaden die Gesamtsumme, und der Betriebsausfall – ob als Mietausfall oder als Ausfall einer öffentlichen Dienstleistung gemessen – bleibt vergleichsweise gering. In hochautomatisierten Industrieanlagen kann sich das Verhältnis umkehren, und der Betriebsausfall wird zur größeren Komponente, da die Wiederherstellung eher durch die Zeit begrenzt ist, die für die Beschaffung und Wiederinbetriebnahme spezialisierter Systeme benötigt wird, als durch die physische Wiederherstellung der Bausubstanz.

Eine weitere, weniger offensichtliche Konsequenz betrifft die Korrelation des Schadens innerhalb eines einzelnen Risikos. Bei einem Porenbetongebäude ist das maximal vorhersehbare Ereignis eine Reihe unabhängiger Teilbereichsschäden, die durch die baulichen Grenzen voneinander entkoppelt sind, sodass der Schaden für das Risiko nur einen Bruchteil seines Gesamtwerts ausmacht. Bei einer Holzkonstruktion führt der Wegfall dieser Grenzen dazu, dass dasselbe Ereignis zu einem einzigen korrelierten Schaden wird, der sich dem vollen Versicherungswert annähert, wodurch sich der wahrscheinliche Höchstschaden des einzelnen Risikos in Richtung seines gesamten Risikos erhöht. Für ein aus solchen Risiken bestehendes Portfolio ist dieser Unterschied von wesentlicher Bedeutung, da er nicht nur den erwarteten Schaden, sondern auch den „Tail“ der Gesamtverteilung beeinflusst, gegen den Kapital vorgehalten wird.

11.6 Technische Implikationen

Die Analyse legt nicht nahe, dass Holzgebäude die vorgeschriebenen Feuerwiderstandsklassen nicht erreichen können. Unter den zugrunde gelegten Annahmen wurden die Holzkonstruktionen als normkonform und vollständig gekapselt betrachtet, und unter dem erwarteten Brand verhielten sie sich entsprechend. Die Studie zeigt jedoch, dass identische Feuerwiderstandsklassen nicht zwangsläufig ein gleichwertiges Brandverhalten unter schweren Brandszenarien bedeuten. Ein Stahlbetonbauteil und ein ummanteltes Holzbauteil können beide dieselbe R- oder REI-Klassifizierung erfüllen. Die Feuerwiderstandsfähigkeit von Stahlbeton ist jedoch eine inhärente Eigenschaft des Baustoffs, während die der Holzlösung von der anhaltenden Wirksamkeit eines angebrachten Schutzsystems abhängt. Szenarien mit maximal vorhersehbaren Verlusten stellen ausdrücklich Bedingungen dar, unter denen diese Annahme nicht mehr zutrifft.

Der Vergleich zeigt daher, dass identische behördliche Klassifizierungen mit erheblich unterschiedlichen Ausmaßen an Sachschäden, Betriebsunterbrechungen und Wiederherstellbarkeit nach einem Brand einhergehen können. Dies sollte weder als Einschränkung des aktuellen regulatorischen Rahmens noch als Argument gegen den Holzbau interpretiert werden. Vielmehr wird dadurch deutlich, dass Feuerwiderstandsklassen die Einhaltung vorgeschriebener Planungsanforderungen beschreiben, jedoch die Robustheit des Tragverhaltens nicht vollständig charakterisieren, wenn die Brandbedingungen die bei der Planung zugrunde gelegten Annahmen übersteigen. Aus risikotechnischer Sicht sollte das Baumaterial daher als unabhängiger Determinant für schwere Schadensfolgen betrachtet werden und nicht als neutrale Variable, sobald gleichwertige Feuerwiderstandsklassen nachgewiesen wurden.

11.7 Einschränkungen

Die Ergebnisse dieser Studie sollten im Rahmen der angewandten Methodik interpretiert werden. Die Holzkonstruktionen wurden unter Verwendung eines vereinfachten Materialersetzungsansatzes entwickelt, bei dem die Geometrie, das Gebäudevolumen, die Aufteilung der Brandabschnitte, die Nutzung, der Gebäudeinhalt und die Brandschutzstrategie der ursprünglichen Stahlbetongebäude beibehalten wurden, während lediglich das Baumaterial variiert wurde. Es wurde keine strukturelle Neugestaltung vorgenommen, und Unterschiede bei den Bauteildimensionen, der Verbindungskonstruktion und der Gesamtsteifigkeit, die normalerweise bei einem speziell für diesen Zweck entworfenen Holzbau auftreten würden, wurden bewusst ausgeschlossen, um den Einfluss des Baustoffs auf das Brandverhalten zu isolieren.

Die Szenarien sind deterministisch und stellen eher plausible Extremereignisse als probabilistische Vorhersagen dar. Folglich basieren die geschätzten Werte für Sachschäden und Betriebsunterbrechungen auf ingenieurtechnischem Ermessen, etablierten brandschutztechnischen Grundsätzen und der Praxis der Schadensbewertung in der Versicherungsbranche und nicht auf statistischen Häufigkeitsanalysen. Die Bewertung beschränkt sich auf Sachschäden und Betriebsunterbrechungen. Sie befasst sich nicht mit Personensicherheit, Evakuierung, dem Einsatz der Feuerwehr, Umweltauswirkungen oder dem im Wiederaufbau nach dem Brand gebundenen Kohlenstoff.

Zudem werden Betriebsunterbrechungen anhand nutzungsspezifischer Kennzahlen bewertet, nämlich Industriegewinn, Mieteinnahmen und Kontinuität öffentlicher Dienstleistungen. Diese Kennzahlen sind zwar für die jeweilige Fallstudie angemessen, lassen sich jedoch nicht direkt zwischen verschiedenen Nutzungsarten vergleichen. Aus diesem Grund stützt sich der fallübergreifende Vergleich in erster Linie auf Sachschäden, wobei Betriebsunterbrechungen im Kontext des jeweiligen Gebäudetyps interpretiert werden.

Diese Einschränkungen wirken sich auf die Genauigkeit der numerischen Schätzungen aus, nicht jedoch auf die Konsistenz der zugrunde liegenden Trends. Über alle fünf Fallstudien hinweg zeigen sich trotz der Unterschiede in der Nutzung, der Geometrie und der Bewertungsmethodik dieselben Zusammenhänge zwischen Baumaterial, Brandverlauf, Brandabschnittsbildung, Wiederherstellbarkeit und wirtschaftlichem Verlust, was die allgemeine Gültigkeit der vergleichenden Schlussfolgerungen im Rahmen der zugrunde gelegten Annahmen untermauert.

11.8 Schlussfolgerungen

In dieser Studie wurde das Brandverhalten von Stahlbeton und normkonformen, gekapselten Holzbauwerken unter den Gesichtspunkten Sachschaden, Betriebsunterbrechung und Wiederherstellbarkeit nach einem Brand verglichen. Mithilfe einer kontrollierten Materialersetzungsmethode, die auf fünf repräsentative europäische Fallstudien angewendet wurde, isolierte die Analyse den Einfluss des Baustoffs unter Beibehaltung gleichwertiger Gebäudegeometrie, Nutzung, Brandszenarien und Schutzstrategien. Die Schäden wurden anhand eines etablierten versicherungstechnischen Rahmens bewertet, der auf der Unterscheidung zwischen der normalen Schadenserwartung (Normal Loss Expectancy, NLE) und dem maximal vorhersehbaren Schaden (Maximum Foreseeable Loss, MFL) basiert.

Die beiden Tragwerkssysteme reagieren auf Brandbelastung durch unterschiedliche Mechanismen, und jedes wird anhand von auf diesen Mechanismen aufbauenden Bemessungsmodellen überprüft. Bei Stahlbeton behält der Querschnitt seine Geometrie bei und verliert mit steigender Temperatur schrittweise an Festigkeit, sodass eine Resttragfähigkeit erhalten bleibt und nach dem Abkühlen bewertet werden kann, sofern nicht durch Abplatzungen ein Teil der Deckschicht oder des Querschnitts entfernt wurde. Bei ummanteltem Holz wird der Querschnitt an allen Stellen, an denen der Schutz verloren geht, durch Verkohlung schrittweise verringert, und das entfernte Material kehrt nicht zurück. Beide Bemessungsmodelle sind konservativ und auf eine Standardbrandbelastung kalibriert, die eher die Referenzbedingung für die Klassifizierung darstellt als eine Nachbildung eines natürlichen Brandes.

Es wurde festgestellt, dass das Zusammenspiel zwischen dem Baustoff und der Brandschutzstrategie des Gebäudes davon abhängt, inwieweit die Konstruktion auch die Funktion der Brandabschnittsbildung erfüllt. Dort, wo tragende und trennende Elemente zusammenfallen, hängt das Verhalten des Brandabschnitts vom Verhalten der Konstruktion ab. In beiden Systemen muss das Brandverhalten über die gesamte Nutzungsdauer aufrechterhalten werden; der Unterschied liegt in der Anzahl und Art der Bauteile, deren Zustand erhalten bleiben muss – vom Betondeckmantel und der Abdichtung von Versorgungsdurchführungen im einen Fall bis hin zu Schutzauskleidungen, Einkapselungssystemen und eben dieser Abdichtung im anderen.

In allen fünf Fallstudien zeigten die beiden Lösungen unter NLE-Bedingungen weitgehend vergleichbares Verhalten. Unter MFL-Bedingungen wichen ihre Verhaltensweisen durchweg voneinander ab, da das Baumaterial vier Aspekte des Brandverhaltens beeinflusste, nämlich den im Brandabschnitt verfügbaren Brennstoff, die Robustheit der Brandabschnittsbildung, die strukturelle Stabilität und die Wiederherstellbarkeit nach dem Brand. Die Abweichung nahm systematisch mit dem Ausmaß zu, in dem das Tragwerkssystem auch die Funktion der Brandabschnittsbildung erfüllte, und erreichte ihr Maximum im mehrgeschossigen Wohngebäude, wo die Deckenkonstruktionen gleichzeitig tragende Funktion und Brandabschnittsbildung erfüllten, sowie ihr Minimum im großen, offenen Industriegebäude, wo sich der Brand innerhalb eines einzigen Brandabschnitts ausbreitet und der gelagerte Inhalt den vorherrschenden Brennstoff darstellt.

Die Ergebnisse deuten daher darauf hin, dass die durch identische Feuerwiderstandsklassen festgelegte Gleichwertigkeit unter den bei der Klassifizierung angenommenen Bedingungen gilt, jedoch nicht zwangsläufig erhalten bleibt, sobald diese Bedingungen nicht mehr erfüllt sind. Im Rahmen der in dieser Studie zugrunde gelegten Annahmen war die Stahlbetonlösung in keinem der fünf Fälle mit höheren Sachschäden oder Betriebsunterbrechungen verbunden als die entsprechende Holzlösung, und der Unterschied konzentrierte sich auf die Szenarien mit schweren Schäden in den stark unterteilten Gebäuden. Dort, wo die Konstruktion keine Trennfunktion erfüllt und die Brandlast durch den Inhalt bestimmt wird, hatte die Wahl des Baumaterials nur einen begrenzten Einfluss auf das Ergebnis.

Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Lösungen liegt daher nicht in ihrer zu erwartenden Leistungsfähigkeit bei gewöhnlichen Brandereignissen, sondern in der Schwere und der Wiederherstellbarkeit extremer Schäden, sobald die der Brandschutzauslegung zugrunde liegenden Annahmen nicht mehr erfüllt sind. Aus brandschutztechnischer und versicherungstechnischer Sicht erfordert die Bewertung der Widerstandsfähigkeit eines Gebäudes nicht nur die Prüfung, ob eine vorgeschriebene Feuerwiderstandsklasse erreicht wird, sondern auch, wie viele Bedingungen erfüllt bleiben müssen, damit diese Leistung auch dann noch gegeben ist, wenn ein realer Brand vom Planungsszenario abweicht.

Annahmen und Einschränkungen der Studie

Die in diesem Dokument dargestellten Daten und Bewertungen basieren auf den zum Zeitpunkt der Analyse verfügbaren Informationen, auf den Eigenschaften des untersuchten Gebäudes und auf den zugrunde gelegten Szenarioannahmen. Jegliche Änderungen der Werte, der Gebäudekonfiguration, der gelagerten Güter oder der Betriebsbedingungen können zu Abweichungen bei den geschätzten Ergebnissen führen.

Die Schadensbewertungen und Szenarien wurden in Übereinstimmung mit den allgemein für Szenarien der „Normal Loss Expectancy“ (NLE) und des „Maximum Foreseeable Loss“ (MFL) geltenden Definitionen entwickelt. Folglich sollten die Ergebnisse als indikative technische Schätzungen interpretiert werden, die Größenordnungen ausdrücken, und nicht als punktuelle Bewertungen.

Dieses Dokument dient ausschließlich analytischen und vergleichenden Zwecken und stellt weder eine Versicherungsbewertung noch eine Garantie für die Schäden dar, die im Falle eines tatsächlichen Brandereignisses tatsächlich entstehen könnten. Dementsprechend lehnen die Autoren jegliche Verantwortung für Abweichungen zwischen den dargestellten Schätzungen und den Schäden ab, die sich aus realen Umständen oder aus Änderungen der berücksichtigten Bedingungen ergeben können.

12. Literaturverzeichnis

EN 1991-1-2: Eurocode 1 – Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen – Einwirkungen auf brandbefallene Tragwerke

EN 1992-1-2: Eurocode 2 – Bemessung von Betonkonstruktionen – Teil 1-2: Brandbemessung EN

1995-1-2: Eurocode 5 – Bemessung von Holzkonstruktionen – Teil 1-2: Brandbemessung

EN 13501-1: Brandklassifizierung von Bauprodukten und Bauelementen – Brandverhaltenstests

EN 13501-2: Brandklassifizierung von Bauprodukten und Bauelementen – Klassifizierung anhand von Daten aus Feuerwiderstandsprüfungen

Verordnung (EU) Nr. 305/2011, 3110/2024 – Bauprodukteverordnung (CPR) NFPA 13, 72 und 220

Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018). Ministerialdekret vom 17.

Januar 2018 Genehmigtes Dokument B zu den Bauvorschriften

Musterbauordnung (MBO)

Boverkets byggregler (BBR) OIB-

Richtlinie 2: Brandschutz

OIB-Richtlinie 2.1: Brandschutz bei Betriebsgebäuden

FIB, *Bulletin 38: Brandschutzbemessung von Betonkonstruktionen – Werkstoffe, Konstruktionen und Modellierung*, 2007

FIB, *Bulletin 46: Brandschutzbemessung von Betonkonstruktionen – Tragverhalten und Bewertung*, 2008

FIB, *Modellcode*, 2010 CEB,

Bulletin 208, 1991

Kodur, V. *Eigenschaften von Beton bei erhöhten Temperaturen*, 2014

Buchanan, A.H., Abu, A.K. *Tragwerksplanung für den Brandschutz*, 2017

SFPE, *Handbuch der Brandschutztechnik*, 2016

Brandon, D., Östman, B., *Brandschutzherausforderungen bei hohen Holzgebäuden*, 2018

Fire Protection Research Foundation, *Brandschutzherausforderungen bei hohen Holzgebäuden*, 2020

Hadden, R.M. et al., *Auswirkungen … von Raumbränden mit freiliegendem Holz*, 2017

Klippel, M., Schmid, J., *„Auslegung von Holzbauwerken, die einem Brand ausgesetzt sind*“, 2019

Frangi, A., Fontana, M., *Brandverhalten von Brettsperrholzkonstruktionen,* 2018 Frangi, A. et al.,

Natürlicher Brandversuch im Originalmaßstab an einem dreistöckigen XLam-Holzgebäude, 2008

Östman, B., Brandon, D., Frangi, A., *Brandschutztechnik in Holzgebäuden*, 2017 Lange, D. et al., *Haftverhalten und Delaminierung bei CLT unter Brandbeanspruchung*, 2014 Tawfik, T.A., *Einfluss von Nachbrand-Aushärtungsprozessen auf die Eigenschaften…*, 2025 Drysdale, D., *Eine Einführung in die Branddynamik*, 2011

Hertz, K.D., *Grenzen der Abplatzung von brandbeaufschlagtem Beton*, 2003

McGregor, C.J., *Beitrag von Brettsperrholzplatten zu Raumbränden*, 2013 Robert, F. et al., *Natürliche Brandversuche an GLT-Stützen einschließlich der Abkühlphase*, 2023 Gernay, T., et al., *Experimentelle … während der Abkühlphase eines Brandes: Holzstützen*, 2022 Gernay, T., *Feuerwiderstand und Durchbrennwiderstand von Holzstützen*, 2021

Renard, S. et al., *Tragverhalten von Holzstützen … Brandversuche in Brandabschnitten*, 2025 Lennon, T. et al., *Tragwerksbrandwiderstand … Verbrennung, Probleme und Auswirkungen*, 2025

Johansson, N., et al., *Brandschutzbeständigkeit von imprägnierten Holzfassaden, Ergebnisse von Prüfungen gemäß SP Fire 105*, Universität Lund, 2026