

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion

Zur Bewertung beeinflussender Faktoren auf Brandweiterleitungsmechanismen in Bauteilfugen vorgefertigter Holzbauelemente

Dipl.-Ing. René Stein

Vollständiger Abdruck der von der Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Mensinger

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
2. Prof. Dr. Andrea Frangi
Eidgenössische Technische Hochschule Zürich / Schweiz

Die Dissertation wurde am 27.11.2014 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt am 27.04.2015 angenommen.

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Lehrstuhls für Holzbau und Baukonstruktion der Technischen Universität München.

An dieser Stelle möchte ich denjenigen danken, die mich fachlich auf dem Weg zur Fertigstellung der Dissertation begleitet haben.

Im Besonderen möchte ich mich bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter bedanken, der die wissenschaftliche Betreuung meiner Dissertation übernommen und durch seine wertvollen Ratschläge wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Bei Herrn Prof.-Dr. Andrea Frangi von der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich bedanke ich mich für die Übernahme des Koreferates.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Mensinger danke ich für die Übernahme des Vorsitzes bei der Prüfungskommission.

Ich möchte mich an dieser Stelle auch bei den Kollegen am Lehrstuhl für den kooperativen und kollegialen Umgang bedanken. Besonders möchte ich die ‚Gruppe Brandschutz‘ am Lehrstuhl hervorheben, durch die in zahlreichen fachlichen Diskussionen wertvolle Anregungen für die Arbeit entstanden sind.

Bei der Versicherungskammer Bayern, dem Verband der öffentlichen Versicherer, dem Landesinnungsverband des bayerischen Zimmererhandwerks und der Haas Fertigbau GmbH möchte ich mich für die finanzielle und materielle Unterstützung zur Durchführung von Kleinbrandversuchen im Rahmen des Teilprojektes 11 innerhalb des Verbundprojektes ‚Holzbau der Zukunft‘ sowie Großbrandversuchen im Rahmen der ‚Kampagne Brandschutz‘ bedanken. Die Bereitstellung von Brandschadenobjekten und die Brandversuche bilden das grundlegende Fundament der Arbeit. Im Besonderen möchte ich an dieser Stelle Herrn Battran von der Versicherungskammer Bayern für die konstruktiven Anregungen zu Bewertungsgrundsätzen von Bauteilen und Anschlüssen danken.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie für die Unterstützung und Geduld bedanken.

München, im September 2015

René Stein

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit beeinflussenden Faktoren auf Brandweiterleitungsmechanismen in Bauteilfugen vorgefertigter Holzbauelemente. Die Notwendigkeit der Untersuchung ergibt sich aufgrund fehlender brandschutztechnischer Konstruktionsregeln und Prüfstandards für Bauteilanschlüsse sowie der undifferenzierten versicherungstechnischen Einstufung von Holzbaukonstruktionen in versicherungstechnische Gebäudeklassen. Die brandschutztechnische Konzipierung von Bauelementen wird durch die Einbeziehung weiterer Teildisziplinen beeinflusst. Unter anderem können statisch-konstruktive und weitere bauphysikalische Vorgaben (z.B. wärme-, feuchte- und schalltechnische Aspekte) maßgeblich die Bauteilaufbauten und deren Fügung bestimmen. Im Zusammenhang mit den Einflüssen von Leckagen auf die Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilanschlüssen muss ein besonderes Augenmerk auf die Herstellungstoleranzen gelegt werden, die nur mit einer werkseitigen Vorfertigung erreicht werden können.

Stichworte: Bauphysik, Bauteilfugen, Brandweiterleitungsmechanismen, Herstellungstoleranzen, Holzbauelemente, Konstruktionsregeln, Leckagen, Tragwerk, Vorfertigung

Abstract

The thesis deals with the systematic evaluation of influencing factors of fire spread-mechanisms in junctions of pre-fabricated timber assemblies. The necessity of evaluation is given by the absence of construction rules and fire test standards for component connections and by the undifferentiated classification of timber constructions into risk classes by insurance companies. The fire protection design of timber assemblies is influenced by consideration of additional fields. Among other things, structural design or building physics (for instance thermal, moisture and acoustical aspects) largely determine the construction of timber components and their interfaces. In connection with the effects of leakage on the fire resistance of component connections special attention has to be placed on the tolerances, which can be accessed only with pre-fabrication methods.

Keywords: building physics, construction rules, fire spread-mechanisms, junctions, leakage, timber assemblies, pre-fabrication, tolerances, structural design

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
Kurzfassung	1
Abstract	2
Inhaltsverzeichnis	3
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Problemstellung	3
1.3 Zielsetzung und Übersicht	5
1.4 Abgrenzung.....	6
2 Stand der Forschung und Technik	7
2.1 Europäisches Harmonisierungskonzept	7
2.1.1 Grundlegendokument Brandschutz	7
2.1.2 Prüf- und Klassifizierungsnormen zum Feuerwiderstand	8
2.1.3 Berechnungsmethoden zur Bestimmung brandschutztechnischer Leistungseigenschaften von Bauteilen und Bauteilfügungen	12
2.2 Grundsätze der Brandmodellierung in Räumen	14
2.2.1 Charakteristik eines Raumbrandes	14
2.2.2 Brandmodellierung	18
2.2.3 Brandverlauf- und -ausbreitung	19
2.2.4 Thermische Einwirkungen	21
2.3 Analyse und Bewertung der Brandausbreitung in brandgeschädigten Versicherungsobjekten.....	22
2.4 Experimentelle Bestimmung des Brandverhaltens von Holzbauteilen und deren Anschlüssen.....	25
2.4.1 Realbrandversuche.....	25
2.4.1.1 Durchführung der „Kampagne Brandschutz“ in Deutschland	25
2.4.1.2 Brandversuche an Modulhotels in Holzbauweise	28
2.4.1.3 Brandversuche TF2000 in Großbritannien	29
2.4.2 Brandverhalten von Bauteilen in Holzrahmenbauweise und deren Fügungen.....	30
2.4.3 Brandverhalten unbekleideter flächiger Holzbauteile und deren Fügungen.....	31
2.4.3.1 Untersuchungen an Brettsperrholzelementen	31
2.4.3.2 Untersuchungen zum Fugenverhalten an Hohlkastenelementen	33
3 Konstruktionsmethodik und –prinzipien	36
3.1 Methodisches Vorgehen	36
3.1.1 Entwerfen und Konstruieren.....	36
3.1.2 Planungsprozess	37
3.1.3 Lösungsprinzipien.....	39
3.1.4 Fügung.....	41
3.1.4.1 Ansätze aus dem Bauwesen	41

3.1.4.2	Ansätze aus anderen Bereichen.....	44
3.2	Modulares Bauen	46
3.2.1	Modulordnung	46
3.2.2	Modulkategorien	47
3.2.3	Bezugsebenen	50
3.2.4	Rasterkategorien.....	51
3.2.5	Toleranzen	51
3.3	Konstruktionsprinzipien.....	54
3.3.1	Grundlagen	54
3.3.2	Tragwerk	54
3.3.2.1	Tragelemente und Aussteifung.....	54
3.3.2.2	Tragsysteme	57
3.3.2.3	Anchlussausbildungen.....	57
3.3.2.4	Holzbauweisen und -systeme	58
3.3.3	Raumabschluss bzw. -begrenzung	60
3.3.3.1	Begrenzungssysteme	60
3.3.3.2	Einwirkungen	61
3.3.3.3	Luft- und Winddichtheit.....	62
3.3.3.4	Wärmeschutz.....	64
3.3.3.5	Feuchteschutz	68
3.3.3.6	Schallschutz.....	68
4	Theoretische Betrachtungen zum Wärme- und Feuchtetransport.....	70
4.1	Transportmechanismen in Bauteilen.....	70
4.1.1	Allgemein	70
4.1.2	Modellvorstellungen zum gekoppelten Wärme und Stofftransport	71
4.1.3	Wärmeleitung in plattenförmigen Körpern.....	74
4.1.4	Wärmeleitung in Fluiden (Konvektion)	75
4.1.4.1	Allgemein	75
4.1.4.2	Fugenmodell	76
4.1.4.3	Bestimmung der Wärmeübergangszahl α	78
4.1.5	Dampfdiffusion.....	80
4.2	Zustandsänderungen	80
4.2.1	Beschreibung von Gas-Dampf-Gemischen	80
4.2.1.1	Grundlagen	80
4.2.1.2	Zusammensetzung feuchter Luft.....	80
4.2.1.3	Spezifisches Volumen und Enthalpie	81
4.2.1.4	Aufbau des Mollierschen h,x - Diagramms	83
4.2.2	Allgemein	84
4.2.3	Ideale Gase	84

4.3	Zustand Fugeneintritt (Zustand 1).....	85
4.3.1	Statische Verbrennung.....	85
4.3.1.1	Grundlagen.....	85
4.3.1.2	Vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung des Zustandspunktes.....	88
4.3.2	Dynamische Verbrennung.....	90
4.4	Zustandsänderungen des Leckagestroms (Zustände 2, 3 und 4).....	91
4.4.1	Grundlagen.....	91
4.4.2	Beschreibung der Zustandsänderungen.....	92
4.4.2.1	Erwärmung und Abkühlung des Leckagestroms bei konstantem Feuchtegehalt.....	92
4.4.2.2	Adiabate Mischungsprozesse mit feuchter Luft.....	92
4.4.3	Darstellung der Zustandsänderungen im h,x-Diagramm.....	93
4.5	Diskussion der Ergebnisse.....	95
5	Experimentelle und analytische Untersuchungen.....	98
5.1	Grundlagen.....	98
5.2	Leckagemessungen an Anschlussfugen unter normalklimatischen Bedingungen.....	99
5.2.1	Prinzip.....	99
5.2.2	Prüfeinrichtung und -verfahren.....	99
5.2.3	Bestimmung der Leckagekoeffizienten und -exponenten.....	100
5.2.4	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen.....	101
5.2.5	Diskussion der Ergebnisse.....	109
5.3	Leckagemessung unter Brandbedingungen.....	110
5.3.1	Prinzip.....	110
5.3.2	Prüfeinrichtung und -verfahren.....	110
5.3.3	Bestimmung der Leckagerate über die Änderung Rauchgaszusammensetzung.....	111
5.3.4	Ergebnisse an ausgewählten Anschlussfugen.....	112
6	Beeinflussende Faktoren zur Bewertung von Anschlussausbildungen.....	113
6.1	Fugentypen und Brandbarrieren.....	113
6.2	Variation der Anschlussausbildungen.....	116
6.3	Systematik.....	117
7	Beispielhafte Darstellung eines Anschlussdetails.....	121
7.1	Allgemein.....	121
7.2	Bewertung.....	122
7.2.1	Tragwerk.....	122
7.2.2	Einfluss weiterer Funktionsschichten.....	124
8	Zusammenfassung.....	126
8.1	Beeinflussende Faktoren auf Brandweiterleitungsmechanismen.....	126
8.2	Systematik zur Bewertung vorgefertigter Holzbaulemente.....	128
8.3	Ausblick.....	130

9 Literaturverzeichnis	131
Materielle Literatur	131
Vom Verfasser betreute Diplom-, Master- und Bachelorarbeiten.....	138
Immaterielle Quellen	139
Software	139
10 Formelzeichen und Abkürzungen	140
Griechische Buchstaben	140
Große lateinische Buchstaben	141
Kleine lateinische Buchstaben	143
Indizes	145
Anhang.....	147
Anlage 1: Analyse und Bewertung der Brandausbreitung in brandgeschädigten Versicherungsobjekten (zu Abschnitt 2.3)	147
Anlage 2: Analyse und Bewertung der Brandausbreitung nach Realbrandversuchen im Rahmen der Kampagne Brandschutz (zu Kapitel 2.4.1.1).....	151
Anlage 3: Versuche zur Bestimmung der Leckagerate von Anschlüssen in Holzbauweise (zu Kapitel 5.2.3)	153

1 Einleitung

1.1 Motivation

Im Kontext der Klimaerwärmung ist dem nachhaltigen und „zugleich energie- und kohlenstoffeffizienten Einsatz von Rohstoffen und Produkten im Bauwesen eine entscheidende Rolle“ (Holzforschung München, 2010) zuzusprechen. Dies führt zwangsläufig zu einer verstärkten Verwendung des Baustoffes Holz mit seiner immanent positiven Energie- und Kohlenstoffbilanz. In diesem Zusammenhang verfügt Holz über einzigartige Qualitäten sowohl auf seinem Lebensweg vom Wald über die Produktion und Nutzung in Gebäuden als auch über die Option des stofflichen und energetischen Recyclings.

Die gesetzlich verankerten Nachhaltigkeitsstrategien (Bundesregierung, 2012), die auf dem Nachhaltigkeitsdreieck aus wirtschaftlichen, sozialen und umweltbezogenen Maßnahmen aufbauen, führen langsam zu einem Umdenken im Bauwesen. Die Betrachtung des Bauwerkes im Hinblick auf Nachhaltigkeitsindikatoren wie Primärenergieverbrauch, Rohstoffproduktivität oder Treibhausgasemission (Angabe in CO_2 -Äquivalenten) rückt zunehmend in den Bereich der Planungsphase und führt zwangsläufig zu einer verstärkten Auseinandersetzung mit dem Baustoff Holz.

Bei der vielfältigen Verwendung von Holz in Gebäuden bleibt das in den Bäumen gebundene CO_2 über einen langen Zeitraum gespeichert und kann nach dem Ende des Lebenszyklus durch seine stoffliche Recyclingfähigkeit entweder weiter im Kreislauf gehalten oder durch eine kontrollierte thermische Verwertung als gebundener Kohlenstoff in Form von CO_2 und Wärme freigesetzt werden. (Winter, Hafner & Ott 2010) Ein Kubikmeter Holz bindet dabei fast eine Tonne CO_2 in Form von Kohlenstoff (siehe Abbildung 1).

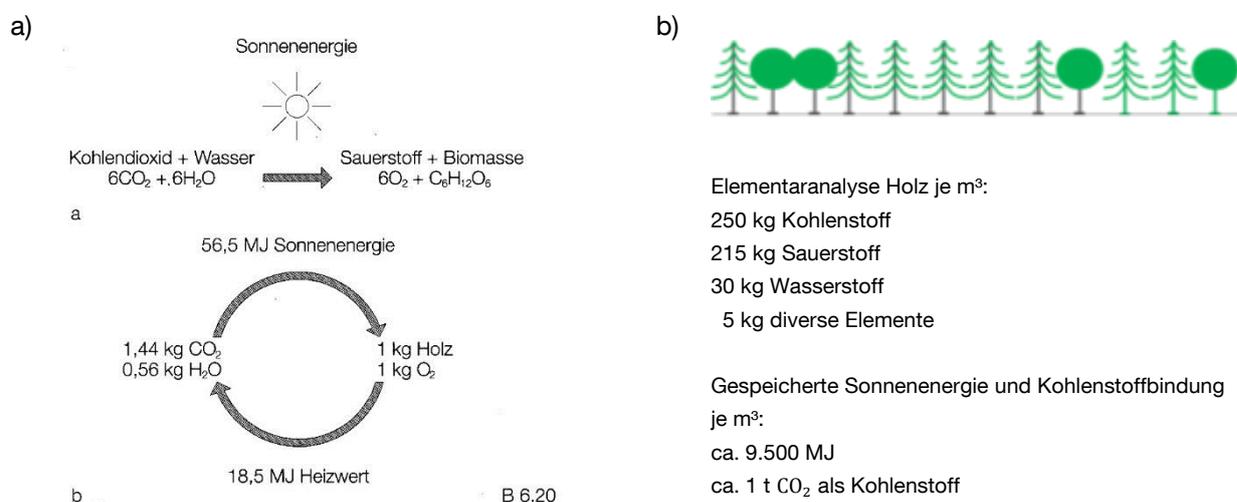


Abbildung 1: Photosynthese und Verbrennung von absolut trockenem Holz, a) Massebilanz und Energieinhalt (Heizwert) bezogen auf 1 kg Holz aus (Hegger M., Auch-Schwelk, Fuchs, & Rosenkranz, 2005), b) Elementarzusammensetzung und Energieinhalt (Heizwert) von 1 m^3 Holz (Holzforschung München, 2010)

Die Verwendung eines der ältesten Bau- und Werkstoffe ist aber immer mit der Erkenntnis verbunden, dass mit dem biogenen (*biogen = biologisch organischen Ursprungs*) Baustoff ein brennbares Produkt vorhanden ist, bei dem im ungünstigen Falle eines Brandereignisses (Schadenfeuer) „die enthaltene Energie in kurzer Zeit freigesetzt und ... oxidierte Materie in Form von Asche und Staub“ (Althaus, 1999) hinterlassen wird.

In der Vergangenheit hat die Brennbarkeit des Baustoffes Holz dazu geführt, dass bauordnungsrechtlich große Hemmnisse für den Einsatz von Holz in Bauwerken aufgebaut wurden. Auch in den versicherungstechnischen Einstufungskriterien, die in der Regel nur die Ausführung der Außenwände und des Daches berücksichtigen, fließen die Leistungseigenschaften von Holzbauteilen nur undifferenziert ein. Darin werden Holzgebäude jeglicher Bauweise und jeglichen Alters derselben versicherungstechnischen Gebäudeklasse zugeordnet. Durch die undifferenzierte Betrachtung ergeben sich in der Endabrechnung jährliche Schadenssummen, die bei Holzgebäuden verglichen mit Massivgebäuden in etwa doppelt so hoch sind. Im Gegensatz dazu unterscheidet sich die Schadeneintrittshäufigkeit nicht. (Stein 2003), (Stein & Winter, 2005)

Die materialspezifische Konzipierung von Bauteilen und einzelnen Bauteilschichten sowie deren Zusammenführung im Anschlussbereich hat einen erheblichen Einfluss auf die brandschutztechnische Qualität und folglich auch auf die Feuerwiderstandsfähigkeit der Gesamtkonstruktion. Erste grundlegende Untersuchungen zu Brandweiterleitungsmechanismen in Holzgebäuden wurden in Zusammenarbeit mit der Versicherungskammer Bayern durchgeführt. In diesem Vorhaben wurden Brandweiterleitungspfade in Abhängigkeit von der Bauweise und dem Alter des jeweiligen Gebäudes identifiziert. (Stein, 2003) Aufbauend auf diesen Kenntnissen wurden im Rahmen der „Kampagne Brandschutz“ (Stein & Winter, 2007) und der „HighTech-Offensive Bayern“ (Stein & Winter, 2008) brandschutztechnisch modifizierte Anschlussdetails getestet.

Die systematische Bewertung der Brandausbreitungspfade in Holzgebäuden mit zugehöriger Schadenscharakteristik soll einen Beitrag dazu leisten, bestehende Hemmnisse und Vorurteile gegenüber der Holzbauweise abzubauen. Des Weiteren soll mit der Arbeit die Voraussetzung geschaffen werden, dass die rasante Weiterentwicklung, die sich in den letzten beiden Jahrzehnten im Bereich der Holzbausysteme vollzogen hat, differenziert und leistungsbezogen in bauaufsichtliche und versicherungstechnische Betrachtungen einfließen kann.

Vor dem Hintergrund eines ressourcenschonenden Umgangs mit dem natürlichen Werkstoff Holz wird der Schichtenaufbau der Bauelemente ganzheitlich unter statisch-konstruktiven und bauphysikalischen Gesichtspunkten hergeleitet und daraus beeinflussende Faktoren auf die brandschutztechnischen Leistungseigenschaften der Bauelemente und deren Anschlüsse abgeleitet. D.h. die Eigenheiten der jeweiligen Bauweise werden bei der Konzipierung der Anschlüsse berücksichtigt. Brandschutztechnische Kompensationsmaßnahmen treten erst hinzu, wenn die bauteilbezogenen Leistungskriterien im Anschlussbereich unterschritten werden.

1.2 Problemstellung

Die brandschutztechnische Leistungsfähigkeit von Holzbauelementen ist auf Grundlage von normativ und experimentell durchgeführten Brandversuchen senkrecht zur Bauteilebene bewertbar. Um aber die Auswirkungen des einzelnen Elementes auf die Gesamtkonstruktion zu ermitteln, müssen die Bauteile inklusive ihrer Anschlussausbildungen in Abhängigkeit von der Brandbeanspruchung sowie der möglichen mehraxialen Brandweiterleitungspfade untersucht werden.

In Abbildung 2 ist schematisch die Hüllfläche eines einseitig brandbeanspruchten Volumenkörpers mit zugehörigen Brandweiterleitungspfaden in und senkrecht zur Richtung der Brandbeanspruchung dargestellt.

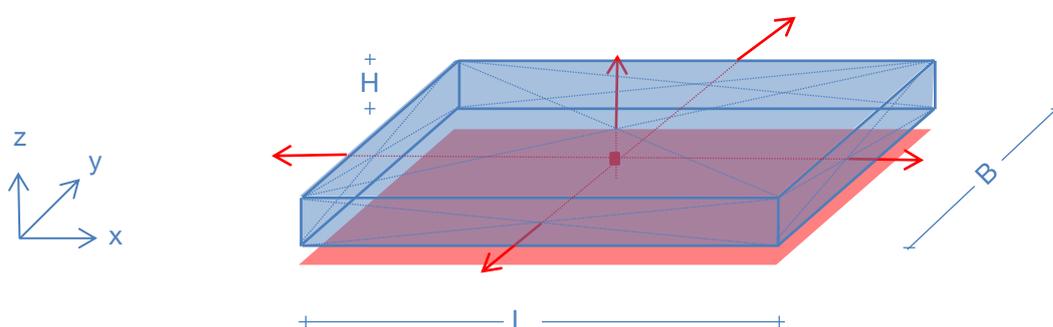


Abbildung 2: Schematische Darstellung der flächigen Brandbeanspruchung eines Bauteils (Volumenkörpers) mit Brandausbreitungspfaden in und senkrecht zur Richtung der Brandbeanspruchung (x-, y- und z-Richtung)

Bauordnungsrechtlich werden tragende und/oder raumabschließende Anforderungen an Bauteile gestellt, die mittels Leistungskriterien definiert werden. Die Leistungskriterien Raumabschluss ‚E‘ und Wärmedämmung ‚I‘ werden gemäß des zugehörigen Prüfverfahrens (DIN EN 1363-1, 2012 und DIN EN 1365-2, 2010) auf der brandabgewandten begrenzenden Fläche (letzte brandschutztechnisch wirksame Schicht des Bauteils) definiert. Bei Einhaltung der Kriterien kann das Bauteil einer entsprechenden Feuerwiderstandsklasse gemäß (DIN EN 13501-2, 2010) zugeordnet werden.

Fügt man das Bauelement in die Gesamtkonstruktion ein, besteht die Möglichkeit, dass die Feuerwiderstandsfähigkeit durch die Brandweiterleitung über die seitlichen Begrenzungsflächen der Konstruktion wesentlich beeinflusst wird. Aus diesem Grund sind die Brandweiterleitungsmöglichkeiten an den seitlichen Begrenzungsflächen in dem Maße einzugrenzen, dass die Leistungsmerkmale der Bauteile in der Fläche nicht konterkariert werden. Dazu muss neben dem Wärme- auch der Stofftransport in Abhängigkeit vom Aufbau des Bauelementes untersucht werden.

Wird das Bauelement nicht aus einem homogenen Baustoff, sondern wie im Holzbau üblich aus mehreren Schichten aufgebaut, entstehen Fugen zwischen den Einzelkomponenten. Diese Fugen, die hinsichtlich Material, Fügungstechnik und Geometrie unterschieden werden können, besitzen einen maßgeblichen Einfluss auf die Feuerwiderstandsfähigkeit des Bauelementes und folglich auf die Gesamtstruktur.

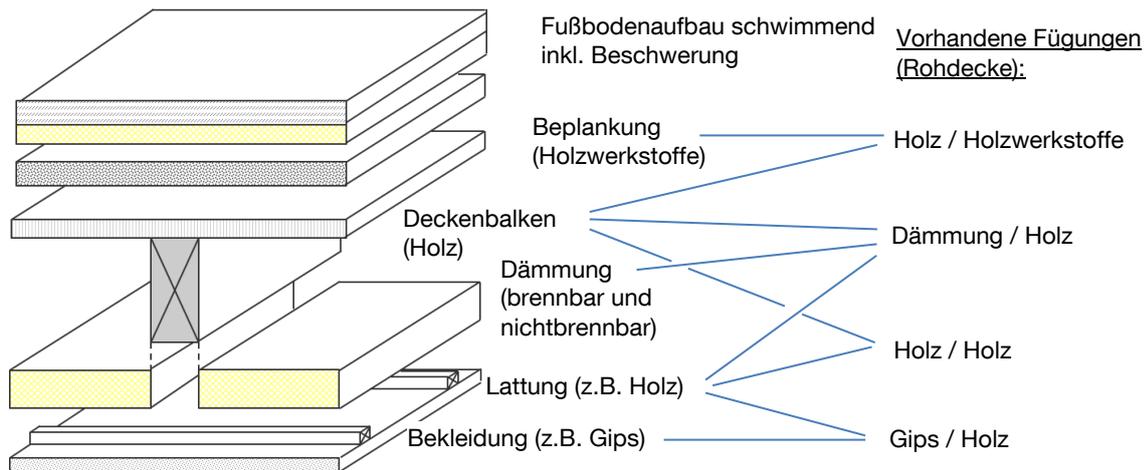


Abbildung 3: Räumliche Darstellung der Schichten eines Elementes in Holzrahmenbauweise zur Visualisierung der Fügungen

In dem iterativen Prozess des Entwerfens und Konstruierens bildet die brandschutztechnische Konzipierung von Bauelementen nur eine Teildisziplin neben zum Beispiel statisch-konstruktiven, weiteren bauphysikalischen und installationstechnischen Aspekten.

In der Regel werden die statisch-konstruktiven Komponenten der Primärstruktur und die Ausbaukomponenten der Sekundärstruktur zugeordnet. Zu den Ausbaukomponenten gehören auch haustechnische Komponenten, welche einzelne oder auch alle Schichten durchdringen können bzw. innerhalb der Schichten verlaufen.

Versicherungstechnisch besteht das grundlegende Problem nach einem Brand in der Bewertung des Schädigungsgrades der Holzkonstruktion. Es soll verhindert werden, dass toxische Brandgase, die sich adsorptiv an Ruß- und Brandrückstände binden, in nicht einsehbare Hohlräume gelangen. Diese schädlichen Rauchgase in der Konstruktion können zu einer nachträglichen Erhöhung der Sanierungskosten führen. Durch die Entwicklung geeigneter Konstruktionen, die ein Eindringen von Brandgasen verhindern bzw. auf ein bestimmtes Maß begrenzen, besteht ein großes Kosteneinsparungspotential für die Versicherungen. Die genauere Beschreibung der Brandweiterleitungsmechanismen hat Einfluss auf die Möglichkeit der Sanierbarkeit brandgeschädigter Holzgebäude und folglich auf das Vertrauensniveau in die Bauweise.

1.3 Zielsetzung und Übersicht

Ein Bewertungsmodell für die Brandbeanspruchbarkeit von Anschlussbereichen in Holzkonstruktionen, das neben dem Wärme- auch den Stofftransport berücksichtigt, wird in der weiteren Bearbeitung in Abhängigkeit von den statisch-konstruktiven und bauphysikalischen Einflussfaktoren aufgestellt. Durch die Komplexität der Brandentwicklung und -ausbreitung in Gebäuden und des Entwurfsprozesses der Gebäude selbst, muss eine Vielzahl brandbeeinflussender Faktoren berücksichtigt werden.

Im Einzelnen werden daher die nachfolgend genannten Punkte untersucht:

- Konstruktionsmethodik und -prinzipien
- Systematische Zusammenstellung der Bausysteme für Gebäude in Holzbauweise
- Identifizierung der Brandpfade mit Schadenscharakteristika durch Auswertung von Brandschäden an realen Brandobjekten und Durchführung von Brandversuchen im Klein- und Großmaßstab
- Bestimmung des Bauteilschadigungsgrades in Abhängigkeit von der Branddauer
- Theoretische Betrachtungen zum Wärme- und Feuchtetransport in Holzbauteilen
- Darstellung beeinflussender Faktoren für Anschlussdetails von vorgefertigten Bauelementen als Grundlage für einen Konstruktionskatalog mit Holzbauteilen mit erhöhter Brandsicherheit

In der Arbeit wird vertiefend auf konvektive Einflüsse eingegangen, die im Bereich von Fügungen zu vorgelegerten Temperaturspitzen und folglich zu einem frühzeitigeren Versagen der Konstruktion gegenüber dem ungeschwächten Bauteilquerschnitt führen können. Qualitativ hochwertig ausgeführte Bauelemente, die einer industriellen oder handwerklichen Vorfertigung bedürfen, müssen Toleranzmaße aufweisen, bei denen konvektive Einflüsse nicht zur maßgeblichen Leistungseigenschaft werden.

Die verbesserte Beurteilung des Brandverhaltens von Holz und Holzkonstruktionen und die Bereitstellung brandschutztechnisch abgestimmter Konstruktionsprinzipien und -lösungen für die Phase des Entwerfens und Konstruierens stellen Schlüsselpositionen dar, um die Anwendungsbereiche von Holz in Bauwerken wesentlich zu erweitern, u.a. bei der Errichtung mehrgeschossiger Gebäude und beim Bauen im Bestand. Mit der vermehrten Verwendung von Holz werden die Ziele des nachhaltigen Wirtschaftens und des erweiterten Klimaschutzes wesentlich unterstützt.

Bei den weiteren Ausführungen wird das Bauelement mit der Ausbildung seiner Begrenzungsflächen in den Mittelpunkt gestellt und eine Einteilung der auftretenden Fugen in bauteil- und objektbezogene Fugen vorgenommen (siehe Kapitel 6.1). Bestimmte Schichten inklusive deren Fugen dienen als Brandbarrieren, die in Abhängigkeit von bauordnungsrechtlichen und versicherungstechnischen Leistungskriterien festgelegt werden.

Zur Beurteilung der Feuerwiderstandsfähigkeit von Holzbauelementen werden vereinfachte additive Rechenmethoden verwendet. Für jede Schicht des Bauteilaufbaus wird zeitabhängig die Wärmedämm- und Schutzwirkung auf der brandabgewandten Seite ermittelt. Da die Wärmedämm- und Schutzwirkung an Grenztemperaturen gekoppelt ist, kann auf die Temperaturentwicklung senkrecht zur Bauteilebene geschlossen und quantitative Aussagen hinsichtlich des Brandfortschrittes und auch des Bauteilschadigungsgrades getroffen werden.

1.4 Abgrenzung

Die Voruntersuchungen zur Ermittlung von Brandweiterleitungsmechanismen und die Realbrandversuche im Rahmen der „Kampagne Brandschutz“ bilden die Grundlage für weitergehende experimentelle Untersuchungen zur Dichtheit von Anschlussausbildungen (vgl. Kapitel 5). Aus den experimentellen Untersuchungen werden weitere Erkenntnisse zu:

- den Brandausbreitungswegen mit zugehöriger Schadenscharakteristika
- dem Verhalten nichtbrennbarer und brennbarer Dämmstoffe in Bauteilen in Holzrahmen- bzw. Holztafelbauweise sowie von Brettsperrholzelementen und
- Leckageraten von Bauteilanschlussfugen

gesammelt. Die Bauteilanschlüsse wurden unter Verwendung von ebenen Bauteilen in Holzrahmen- und Massivholzbauweise (Brettschichtholz- und Brettsperrholzelemente) konzipiert. Die Bauteilaufbauten wurden auf folgende Materialien begrenzt:

- Holz (Konstruktionsvollholz, Brettsperrholz)
- Holzwerkstoffe (OSB, Dreischichtplatte, poröse Faserplatte)
- Gipswerkstoffe (Gipskarton-Feuerschutzplatten und Gipsfaserplatten)
- Glaswolle-, Steinwolle-, Holzfaser- und Zellulosedämmung

Im Hinblick auf die verwendeten Materialien stellt sich die Frage, wie statisch-konstruktive, bauphysikalische sowie fertigungs- und montagetechnologische Gegebenheiten Einfluss auf die Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilanschlüssen in Holzbauweise nehmen. Die Versuchskörper wurden mit handwerklichen Methoden, u.a. Handkreis- und Formatkreissäge hergestellt.

Dies gilt auch in Bezug auf die gegenseitige Beeinflussung der jeweils in den Knotenpunkten angeschlossenen Bauteile. In Form von theoretischen Überlegungen zu dem gekoppelten Wärme- und Stofftransport innerhalb der Anschlussbereiche, verbunden mit experimentellen Untersuchungen, soll ein Beitrag zur Annäherung an die Beantwortung dieser Fragestellung geleistet werden.

Mit der Zusammenstellung der Designvariablen werden die Voraussetzungen für ein Instrumentarium (Katalog, Prüfverfahren und Zertifizierung) für die brandschutztechnische Bewertung von Holzbauerelementen geschaffen, welches sowohl bei Holzbauunternehmen als auch bei Versicherungen eingesetzt werden kann.

2 Stand der Forschung und Technik

2.1 Europäisches Harmonisierungskonzept

Im Rahmen der weiteren Betrachtungen zu den Einflussfaktoren werden die Europäischen Rahmenbedingungen für vorgefertigte Bauteile einschließlich deren Leistungskriterien zusammengestellt.

2.1.1 Grundlegendokument Brandschutz

Ausgehend von der Einhaltung der Tragfähigkeit der Gesamtstruktur werden bauordnungsrechtlich Grenzen zwischen Nutzungseinheiten sowie zwischen Nutzungseinheiten und anders genutzten Räumen gezogen. Dadurch soll die Brandausbreitung auf ein entsprechendes festgelegtes Sicherheitsniveau abgestellt werden. Das Sicherheitsniveau wird in den betrachteten Wohn- und Büronutzungen maßgeblich vom Personenschutz bestimmt. Versicherungstechnisch treten schadenmindernde Aspekte in den Vordergrund, wonach weitere Anforderungen, u.a. an den Schädigungsgrad des Tragwerks nach einem Brand gestellt werden.

Das grundlegende Dokument für die Angabe der Leistung von Bauprodukten in Bezug auf ihre wesentlichen Merkmale und ihre Verwendung in Bauwerken ist die am 01. Juli 2013 in Kraft getretene Bauproduktenverordnung (BauPVO). Sie regelt sowohl das Inverkehrbringen als auch die Bereitstellung von Bauprodukten auf dem Markt durch die Aufstellung von harmonisierten Regeln. Der Brandschutz bildet dabei eine Grundanforderung, die Einfluss auf den Entwurf und die Konstruktion von Bauelementen nimmt. Weitere Grundanforderungen neben dem Brandschutz sind:

- Nr. 1: Mechanische Festigkeit und Standsicherheit
- Nr. 2: Brandschutz
- Nr. 3: Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz
- Nr. 4: Sicherheit und Barrierefreiheit bei der Nutzung
- Nr. 5: Schallschutz
- Nr. 6: Energieeinsparung und Wärmeschutz
- Nr. 7: Nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen

In der BauPVO Art. 2 sind u.a. die Begrifflichkeiten „Bauprodukt“, „Bausatz“, „Wesentliche Merkmale“, „Leistung eines Bauprodukts“ und „Leistungsstufe“ definiert.

Bauprodukt:

„jedes Produkt oder jeden Bausatz, das beziehungsweise hergestellt und in Verkehr gebracht wird, um dauerhaft in Bauwerke oder Teile davon eingebaut zu werden, und dessen Leistung sich auf die Leistung des Bauwerks im Hinblick auf die Grundanforderungen an Bauwerke auswirkt“

Bausatz:

„ein Bauprodukt, das von einem einzigen Hersteller als Satz von mindestens zwei getrennten Komponenten, die zusammengefügt werden müssen, um ins Bauwerk eingefügt zu werden, in Verkehr gebracht wird“

Wesentliche Merkmale:

„diejenigen Merkmale des Bauprodukts, die sich auf die Grundsatzanforderungen beziehen“

Leistung eines Bauproduktes:

„die Leistung in Bezug auf die relevanten Wesentlichen Merkmale eines Bauproduktes, die in Stufen oder Klassen oder in einer Beschreibung ausgedrückt wird“

Leistungsstufe:

„das Ergebnis der Bewertung der Leistung eines Bauproduktes in Bezug auf seine Wesentlichen Merkmale ausgedrückt als Zahlenwert“

Eine genauere Definition für den Brandfall erfolgt in der BauPVO Anhang I. Die darin enthaltenen Anforderungen sind:

- a) Tragfähigkeit während eines bestimmten Zeitraums
- b) Entstehung von Feuer und Rauch während eines bestimmten Zeitraums
- c) Ausbreitung von Feuer und Rauch auf benachbarte Bauwerke
- d) Rettung von Personen (Möglichkeit der Eigen- und Fremdreitung)
- e) Berücksichtigung der Sicherheit der Rettungsmannschaften

Diese Anforderungen finden sich auch in § 14 „Brandschutz“ der Musterbauordnung wieder. Das allgemein bestehende Konzept der europäischen Brandschutznormung für Bauwerke, Bauwerksteile und Produkte umfasst (Hertel, 2000):

- a) Prüf- und Klassifizierungsnormen im Bereich
 - a1) Feuerwiderstand
 - a2) Brandverhalten
 - a3) Bedachungen bei Brandbeanspruchung von außen
- b) Brandschutzregelungen in Produktnormen
- c) Brandschutzbemessung nach Eurocodes
- d) Ingenieurmethoden für den Brandschutz

2.1.2 Prüf- und Klassifizierungsnormen zum Feuerwiderstand

Aus den Prüfnormen zur Bestimmung der Feuerwiderstandsfähigkeit können allgemeine Angaben zu Prüfgeräten, -bedingungen sowie dem Aufbau und der Anordnung der -körper entnommen werden. Die Prüfbedingungen berücksichtigen die Ofenatmosphäre (u.a. Temperatur, Druck) sowie Belastungs- und Auflagerbedingungen des Probekörpers. Als Brandbeanspruchung in ‚Standard‘-Bauwerken mit üblicher Wohn- und Büronutzung wird die Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) als repräsentative Temperaturkurve für eine Vielzahl von möglichen Raumbrandkurven verwendet (siehe Kapitel 2.2.4). Parametrische Brandkurven, die abhängig von Raumgeometrie, Brandlast und Ventilationsbedingungen sind, werden in der Arbeit nicht weiter betrachtet.

In den Prüfnormen wird eine Hauptunterteilung zwischen tragenden und nichttragenden Bauteilen sowie Installationen vorgenommen. Die normativ hinsichtlich des Feuerwiderstandes geprüften Bauteile werden mit Leistungseigenschaften versehen, die in Abhängigkeit von den bauaufsichtlichen Anforderungen zu bestimmten Bauteilaufbauten und -dicken führen (vgl. Tabelle 1 und 2). Die Bauteilaufbauten und -dicken

besitzen wiederum einen Einfluss auf die Ausbildung der Anschlussbereiche. Die einzelnen funktionsbehafteten Schichten können auf unterschiedliche Art und Weise im Anschluss zusammengeführt werden.

Tabelle 1: Zusammenstellung von Bauteilen mit zugehörigen Prüfverfahren und charakteristischen Leistungseigenschaften nach DIN EN 13501-2, ausgenommen Abgasanlagen, Feuerschutztüren und Abschlüsse und ihre Schließvorrichtungen, Rauchschutztüren, Förderanlagen

Bauteile	Funktionen	Prüfverfahren	Charakteristische Leistungseigenschaften
Decken und Dächer	Tragende Bauteile ohne raumabschließende Funktion	(DIN EN 1365-2 2000)	R
Balken		(DIN EN 1365-3 2000)	
Stützen, (Wände)		(DIN EN 1365-4 1999)	
Balkone und Laubengänge		(DIN EN 1365-5 2005)	
Treppen		(DIN EN 1365-6 2005)	
Wände	Tragende Bauteile mit raumabschließender Funktion	(DIN EN 1365-1 2013)	R, E, I, W und M
Decken und Dächer		(DIN EN 1365-2 2000)	
Doppelböden		(DIN EN 1366-6 2005)	
Trennwände	Nichttragende Bauteile oder Teile von Bauwerken	(DIN EN 1364-1 2011)	E, I, W und M
Unterhangdecken		(DIN EN 1364-2 1999)	E, I
Vorhangfassaden - Gesamtausführung		(DIN EN 1364-3 2014)	Brand von Innenseite: E, EW, EI (i→o) Brand von Außenseite: E, EW, EI (o→i)
Vorhangfassaden - Teilausführung		(DIN EN 1364-4 2014)	Brand von Innenseite: E (i→o), E (i↔o), EI (i→o) und EI (i↔o) Horizontale Anschlussfugendichtung: EI: Brand von Außenseite: E (o→i), EI (o→i)
Abschottungen und Durchführungen		(DIN EN 1366-3 2009)	E, I
Bauteilfugen		(DIN EN 1366-4 2008)	E, I
Installationskanäle und Schächte		(DIN EN 1366-5 2010)	E, I
Wand- und Deckenbekleidungen	Brandschutzbekleidung	(DIN EN 14135 2004)	K₁, K₂
Brandschutzbeschichtungen, Platten, Putze und Bekleidungen	Beitrag zum Feuerwiderstand tragender Bauteile	Allgemein: (E DIN EN 13381-1 2008)	Charakterisierungsdaten t_{ch} , β_i , t_i , d_{char} , t_{test}
Membranen horizontal (Unterdecken)		(E DIN EN 13381-2 2012)	
Membranen vertikal (Wandscheiben als Abschirmung)		Speziell Holzbau: (E DIN EN 13381-7 2014)	

Tabelle 2: Hinterlegung der charakteristischen Leistungseigenschaften aus Tabelle 1 mit Leistungskriterien nach DIN EN 13501-2

R - Tragfähigkeit	E – Raumabschluss	I – Wärmedämmung	W – Strahlung	K – Brandschutzwirkung
<u>Begrenzte Verformung:</u> - vertikal: $C = h/100$ - horizontal: $D = L^2(400 d)$ <u>Begrenzte Verformungsrate:</u> - vertikal: $dD/dt = 3h/1000$ - horizontal: $dD/dt = L^2/(9000 d)$	- Entzündung Wattlebausch - Spalte und Öffnungen - Auftreten von andauernden Flammen an der unbeflammten Seite	<u>Begrenzte mittlere und maximale Temperaturerhöhung auf brandabgewandter Seite:</u> - $\Delta t_{mw} \leq 140 \text{ K}$ und - $\Delta t_{ew} \leq 180 \text{ K}$	<u>Begrenzung:</u> $\leq 15 \text{ kW/m}^2$	<u>Begrenzte mittlere und maximale Temperaturerhöhung hinter :</u> - $\Delta t_{mw} \leq 250 \text{ K}$ - $\Delta t_{ew} \leq 270 \text{ K}$ <u>Sichtprüfung:</u> - Trägerplatte unbeschädigt (kein verbranntes, verkohltes, geschmolzenes oder geschrumpftes Material)

DIN EN 1366-4 beinhaltet ein spezielles Prüfverfahren zur Bestimmung der Feuerwiderstandsfähigkeit von linearen Fugenabdichtungen und Brandsperren in Bauteilen sowie Bauteilanschlüssen. Für die Konstruktionen wird eine Europäische Technische Bewertung (ETB) {engl. European Technical Assessment (ETA)} auf Grundlage eines Europäischen Technischen Bewertungsdokumentes (EBD) {engl. European Assessment Document (EAD)} ausgestellt, welches das oben genannte Prüfverfahren vorgibt. Die Notwendigkeit zusätzlicher nationaler Verwendbarkeits- bzw. Anwendbarkeitsnachweise kann der Bauregelliste entnommen werden, die vom Deutschen Institut für Bautechnik herausgegeben wird. Für Fugenkonstruktionen nach DIN EN 1366-4 sind darin hinsichtlich brandschutztechnischer Belange keine weiteren Angaben zur Ausstellung einer zusätzlichen allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) oder eines allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses (abP) enthalten.

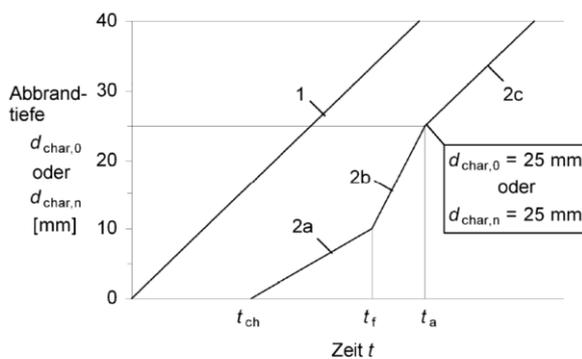
Weitere Leistungskriterien für Anschlussausführungen können den Normen DIN EN 1364-3 und -4, in denen Vorhangfassaden behandelt werden, entnommen werden.

Beide Prüfverfahren für Brandschutzsysteme, d.h. DIN EN 14135 und E DIN EN 13381-7 geben die Fähigkeit einer Wand- und Deckenbekleidung wieder, ein dahinter liegendes Material vor Entzündung, Verkohlungs- und Schädigung zu schützen. Der Unterschied besteht darin, dass DIN EN 14135 den Beitrag des Brandschutzsystems bis zur Entzündung des geschützten Holzbauteils betrachtet und E DIN EN 13381-7 auch die unterschiedlichen Phasen des Abbrandes des Holzes einbezieht.

Wenn die wesentlichen Bestandteile von Holzbauteilen mit Brandschutzbekleidungen geschützt werden, kann in der Regel eine Unterscheidung in mehrere Abbrandphasen der geschützten Holzoberfläche erfolgen (Abbildung 4). Die Zeitdauer bis zum Beginn des Abbrandes t_{ch} ist erreicht, wenn eine Temperatur von 300°C auf der zu schützenden Holzoberfläche gemessen wird. Bis zum Versagen der Brandschutzbekleidung t_f kommt es zu einem verminderten Abbrand. Nach dem Versagen der Brandschutzbekleidung stellt sich durch die Vorwärmung des Holzes eine im Vergleich zu ungeschützten Holzoberflächen höhere Abbrandrate ein. Das Zeitlimit t_a wird erreicht, wenn entweder eine Abbrandtiefe des gleichen ungeschützten Bauteils oder eine Abbrandtiefe von 25 mm gemessen wird. Danach nimmt die Abbrandrate die Werte ungeschützter Bauteile an.

Als Charakterisierungsdaten werden der Beginn des Abbrandes t_{ch} , die Versagenszeit des Brandschutzsystems t_f und die Abbrandraten β_i des geschützten Prüfkörpers vor und nach Versagen der Brandschutzbekleidung sowie des ungeschützten Prüfkörpers in Abhängigkeit von der Abbrandtiefe d_{char} angegeben. In (DIN EN 1995-1-2 2010) sind Verweise auf das Prüfverfahren gemäß E DIN EN 13381-7 enthalten.

ten. Dadurch wird es ermöglicht, Charakterisierungsdaten für neue oder modifizierte Brandschutzbekleidungen zu bestimmen und die Bekleidungen in der Praxis anzuwenden.



Legende

- 1 - Verlauf für während der Branddauer ungeschützte Bauteile mit der ideellen Abbrandrate
- 2 - Verlauf für anfänglich geschützte Bauteile, bei denen der Abbrand vor dem Versagen der Brandschutzbekleidung beginnt:
 - 2a - der Abbrand beginnt bei t_{ch} mit einer abgeminderten Rate, solange die Brandschutzbekleidung noch intakt ist;
 - 2b - nach Abfall der Brandschutzbekleidung beginnt der Abbrand mit erhöhter Rate;
 - 2c - nach Überschreiten der Abbrandtiefe von 25 mm reduziert sich die Abbrandrate auf die Werte nach DIN EN 1995-1-2, Tabelle 3.1

Abbildung 4: Darstellung der Abbrandtiefe in Abhängigkeit von der Zeit $t_{ch} < t_f$ gemäß DIN EN 1995-1-2

Die Brandschutzfunktion ‚K‘ wird in der Regel nicht durch die Temperaturerhöhung $\Delta t_{MW} \leq 250$ K und $\Delta t_{EW} \leq 270$ K bestimmt, sondern von dem Sichtkriterium (als Versagen gilt leichte Braunfärbung), dass von der Arbeitsgruppe der Brandprüfstellen vereinbart wurde. Die durchgeführten eigenen Brandversuche zeigen, dass auch bei einer Braunfärbung oder Entzündung des Holzes hinter der brandschutztechnisch wirksamen Bekleidung bzw. Brandschutzbekleidung, bei gezielten Löschmaßnahmen der Brand schnell unter Kontrolle gebracht wurde. Gestützt wird die Aussage aus den Realbrandversuchen der ‚Kampagne Brandschutz‘, in denen eine Evaluierung des Feuerwehreinsatzes erfolgte. Bei den Löschmaßnahmen wurde darauf geachtet, dass der Löschwassereinsatz auf ein Minimum begrenzt wird. Nach der Brandlöschung wurden die den Brandraum umgebenden Bauteile mit einer Thermografiekamera auf das Vorhandensein möglicher Brandherde untersucht. Bei der Anzeige von erhöhten Temperaturen konnte die Konstruktion gezielt geöffnet und die Brandherde gelöscht werden.

Die Vergleichbarkeit von getesteten Brandschutzbekleidungen kann daher über die in DIN EN 13501-2 angegebenen Leistungseigenschaften hergestellt werden.

2.1.3 Berechnungsmethoden zur Bestimmung brandschutztechnischer Leistungseigenschaften von Bauteilen und Bauteilfügungen

In den letzten Jahren wurden zahlreiche Untersuchungen zur brandschutztechnischen Bewertung der Feuerwiderstandsfähigkeit von tragenden und raumabschließenden Holzbauteilen unter Verwendung von Holz, Holzwerk- und Gipswerkstoffen sowie Glas- und Steinwolle durchgeführt.

Die grundlegenden Untersuchungen von (König & Walleij, 1999), (König, 2000) und (König & Oksanen, 2000) sind in vereinfachten Berechnungsverfahren zur Bestimmung der Tragfähigkeit und des Raumabschlusses von Wand- und Deckenbauteilen in DIN EN 1995-1-2 Anhang C, D und E (DIN EN 1995-1-2, 2010) eingeflossen.

Das Verfahren zur Bestimmung des Raumabschlusses von Bauteilen in Holzrahmenbauweise (Anhang E) ist begrenzt auf eine Feuerwiderstandsdauer ≤ 60 Minuten sowie bestimmte Material- und Schichtaufbauten (vgl. Abbildung 5). Die Regeln gelten für Bekleidungen aus Holzwerkstoffen nach (DIN EN 13986, 2005) und Gipswerkstoffe des Typs A, H und F nach (DIN EN 520, 2009). Als Dämmstoffe können Mineralfaserdämmstoffe nach (DIN EN 13162, 2013) eingesetzt werden. Eine Unterscheidung der Dämmstoffe erfolgt in Stein- und Glaswolle.

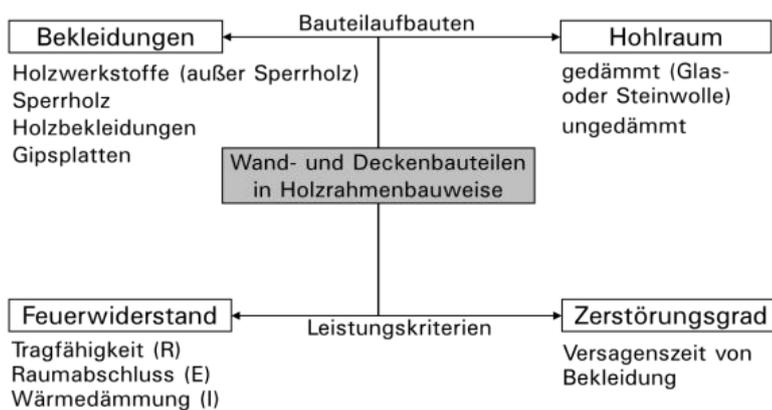
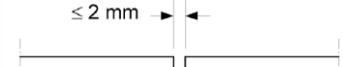
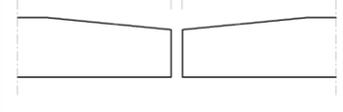
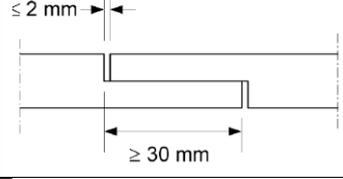
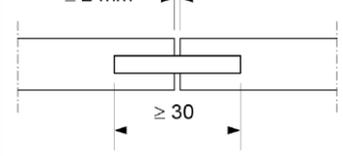
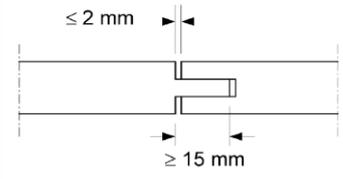
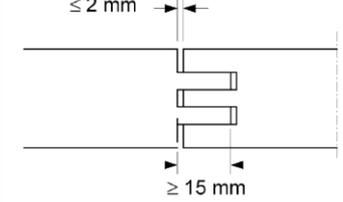


Abbildung 5: Bemessung der Feuerwiderstandsfähigkeit von Bauteilen in Holzrahmenbauweise

Für andere Materialien sind die Charakterisierungsdaten nach dem Prüfverfahren in DIN EN 13381-7 zu ermitteln (vgl. Tabelle 1). Die Materialkennwerte sind in der Regel für eine Brandbeanspruchung gemäß Einheits-Temperaturzeitkurve ermittelt worden. Ausgenommen bei (König & Walleij, 1999) sind Versuche an Holzbauteilen unter parametrischer Brandbeanspruchung zu finden.

In dem Verfahren zur Ermittlung der raumabschließenden Wirkung ‚EI‘ sind Fugenbeiwerte enthalten. Der Vergleich der Werte zeigt eine Vergrößerung des Fugenbeiwertes vom stumpfen Stoß über die Verblattung bis hin zur Nut- und Federverbindung. Der Fugenbeiwert k_j der Nut- und Federverbindungen erhöht sich bei Vergrößerung der Fugenlänge durch Ausbildung einer doppelten Nut- und Federverbindung. Ein weiterer Unterschied besteht bei ungespachtelten Stumpfstößen von Gipsplatten darin, ob die Fuge angeschrägt ist oder nicht. Die Fuge darf einen Spalt von ≤ 2 mm aufweisen.

Tabelle 3: Fugenbeiwerte k_j gemäß DIN EN 1995-1-2 (Anhang E, Tabelle E.6)

Nr.	Fugentyp		Material	Beiwert k_j	
A1		Stumpfstoß	HWS	0,2	
A2			GP (A, H, F)	0,2	ungespachtelt
A3				1,0	gespachtelt
A4			GP (A, H, F)	0,15	ungespachtelt
				1,0	gespachtelt
B		Verblattung	HWS	0,3	
C		N+F	HWS	0,4	
D		N+F	HWS	0,4	
E		N+F	HWS	0,6	

Um das Verfahren zu erweitern, wurde von (Schleifer, 2009) ein modifiziertes Verfahren entwickelt, dessen Schichtenanzahl unbegrenzt ist. Beide Berechnungsmethoden sind additive Verfahren, in denen der Ausfall einzelner Schichten über Temperaturkriterien gesteuert wird. Es wird unterschieden in Wärmedämmwirkung t_{ins} der einzelnen Schichten des Bauteils und der Schutzzeit t_{ch} der Brandschutzbekleidung.

Weitere Untersuchungen zum Brandverhalten an Holz-Beton-Verbund- und Hohlkastenelementen wurden von (Frangi & Fontana, 1999) und (Frangi, 2001) durchgeführt. (Meyn, 2008) untersuchte das Rissverhalten von Gipsplatten als brandraumzugewandte Bekleidung auf Holzrahmenbauelementen. (Just, 2010) führte Untersuchungen zum Brandverhalten von Hohlraumdämmungen aus Glaswolle in Holzrahmenbauelementen durch. Die Untersuchungen wurden mit Ausnahme der Versuche von (Frangi & Fontana, 1999) an unbelasteten Prüfkörpern durchgeführt.

2.2 Grundsätze der Brandmodellierung in Räumen

2.2.1 Charakteristik eines Raumbrandes

Für die brandschutztechnische Bewertung von Anschlüssen ist es notwendig, die Einflussfaktoren auf der Seite der Beanspruchung und der Beanspruchbarkeit zu betrachten. Ein Brand ist ein physikalisches und chemisches Phänomen mit komplexen Zusammenhängen. Er kann sich auf vielfältige Art und Weise, abhängig von Raumgeometrie, der Ventilation und der Brandlast entwickeln. Brände können in verschiedene Phasen in Bezug auf die Temperaturentwicklung (Abbildung 6) und die Druckverhältnisse (Abbildung 7) gegliedert werden. Die nachfolgende Beschreibung der Phasen und Begriffe erfolgt in Anlehnung an (Karlsson & Quintiere, 2000).

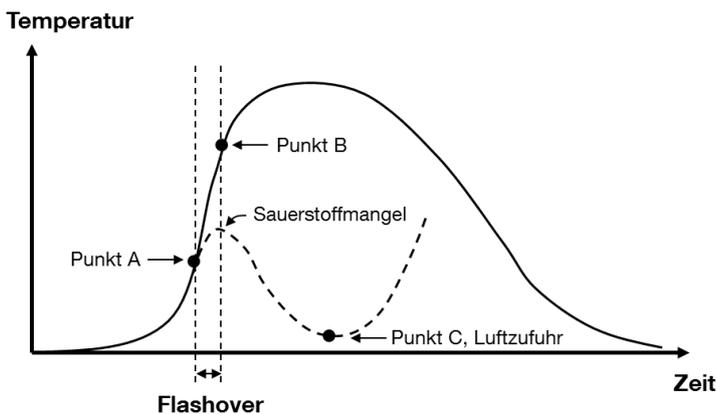


Abbildung 6: Brandentwicklungsmöglichkeiten in Abhängigkeit von Sauerstoffangebot, (Karlsson & Quintiere, 2000)

Wärmeentwicklung:

Entzündung: Nach der Entzündung wächst das Feuer und produziert Energie, meistens durch Flammenausbreitung. In dieser frühen Phase ist von einem brandlastgesteuerten Brand auszugehen. Neben der Erzeugung von Energie, wird eine Variation an toxischen und nichttoxischen Gasen produziert.

Plume: In die heißen Brandgase in und oberhalb des Flammenbereiches werden kältere Gase aus der Umgebung beigemischt. Die geringere Dichte der heißen Gase bewirkt einen Auftrieb. Die Mischung aus Brandprodukten und umgebender Luft erreicht die Decke des Brandraumes, wo eine Schichtung von heißen Gasen entsteht. Das Ergebnis ist, dass sich die Masse des Plumes erhöht und die mittlere Temperatur und Konzentration der Brandprodukte mit der Höhe ansteigen.

Ceiling jet: Wenn der Plume die Decke erreicht, breiten sich die Gase kreisförmig aus. Bei kleineren Räumen erreicht der ceiling jet in der Regel die Umfassungswände des Brandraumes und wird zu einer Abwärtsbewegung entlang der Wände gezwungen. Durch diesen Vorgang wird eine Heißgasschicht unterhalb der Decke erzeugt.

Gastemperaturen: Experimente haben für ein weites Spektrum von Raumbränden gezeigt, dass es angemessen ist, den Brandraum in zwei Zonen zu unterteilen: eine obere Heißgas-

zone aus einer Mischung von Brandprodukten und mitgerissener Luft und einer kalten Zone bestehend aus Luft. Die Eigenschaften der Gase in jeder Zone ändern sich mit der Zeit.

- Heißgasschicht:** Der Plume nimmt weiter Luft aus der unteren Schicht auf und transportiert diese in Richtung der Decke, wodurch die Heißgasschicht wächst und die Grenzschicht weiter in Richtung des Fußbodens wandert.
- Wärmeübertragung:** Wenn die Heißgasschicht absinkt, steigt die Temperatur weiter an und die Wärmeübertragungsprozesse nehmen zu. Wärme wird durch Strahlung und Konvektion von der Heißgasschicht auf die Decke und die mit ihr in Kontakt stehenden Wände übertragen. Wärme aus der Heißgasschicht wird auch in Richtung des Fußbodens und der unteren Wandbereiche abgestrahlt und ein Teil der Wärme wird von der Kaltgasschicht absorbiert.
- Ventilation:** In der Regel werden die Fenster durch ansteigende Brandraumtemperaturen zerstört, wodurch Öffnungen erzeugt werden. Die Heißgase bzw. der Rauch strömen dann nach außen, wenn die Heißgasschicht die Oberkante der Öffnung erreicht. Es wird zwischen unter- und vollventilierten Bränden unterschieden. Bei einem vollventilierten Brand ist das Verbrennungsluftverhältnis $\lambda \geq 1$. Im Vergleich zu unterventilierten Bränden sind die Verbrennungstemperaturen aufgrund der zusätzlich mitgeführten kälteren Luft geringer. Bei einem unterventilierten Brand ist das Verbrennungsluftverhältnis $\lambda < 1$.
- Flashover:** Mit Ausbreitung des Feuers steigen die Temperaturen der Heißgasschicht weiter an, bis ein Stadium erreicht wird, in dem die Strahlungsintensität der Heißgasschicht ausreicht, um alle anderen brennbaren Materialien im Brandraum zu entzünden. Dieser sprunghafte Übergang (Abbildung 6, Phase Punkt A → B) von einem Entstehungsbrand zu einem Vollbrand, der mit einem rapiden Anstieg der Energiefreisetzungsrate verbunden ist, wird Flashover genannt.
- Vollbrand:** In der Vollbrandphase (Abbildung 6, Phase nach Punkt B) schlagen die Flammen aus dem Fenster und alle brennbaren Materialien in dem Brandraum sind in den Brand eingebunden. Der voll entwickelte Brand kann mehrere Stunden andauern, solange Brandlast und Sauerstoff vorhanden sind.
- Sauerstoffmangel:** Für den Fall, dass nur kleine Öffnungen oder nur kleine Undichtigkeiten vorhanden sind, wird die Heißgasschicht schnell über der Flammenregion abfallen und ggf. die Flammen umschließen. Die Sauerstoffzufuhr zur Abbrandzone wird verringert und der Brand kann infolge Sauerstoffmangels erlöschen (Abbildung 6, Phase Punkt A → C). Wenn die Energiefreisetzungsrate sinkt, kann die Pyrolyse mit einer relativ hohen Rate weiterlaufen und verursacht somit die Akkumulation von unverbrannten Gasen im Brandraum. Wenn ein Fenster zerstört wird, strömen die heißen Gase durch den oberen Öffnungsbereich ins Freie und frische Luft im unteren Öffnungsbereich nach innen. Der Brand wächst dann bis zum Flashover an (Abbildung 6, Phase nach Punkt C mit ausreichend Luftzufuhr).

Druckverhältnisse:

Eine zweite Möglichkeit einen Brand in unterschiedliche Phasen einzuteilen, ist die Betrachtung des Stoffstroms durch die Öffnungen {nachfolgende Beschreibung der Stufen in Anlehnung an (Karlsson & Quintiere, 2000)}. Der Stoffstrom ist abhängig von den Druckunterschieden im Bereich der Öffnung. Der äußere Atmosphärendruck p_o wird repräsentiert durch die geneigte Linie, die aufgrund der Luftsäule mit ansteigendem Druck zum Boden zunimmt. Unter der Annahme, dass die Temperatur in und außerhalb des Brandraumes im unteren Bereich gleich ist, besitzen die Linien im unteren Bereich die gleiche Neigung. Die Drucklinie im Raum weist am Übergang zur Heißgasschicht einen Knick auf, da diese leichter ist als Luft.

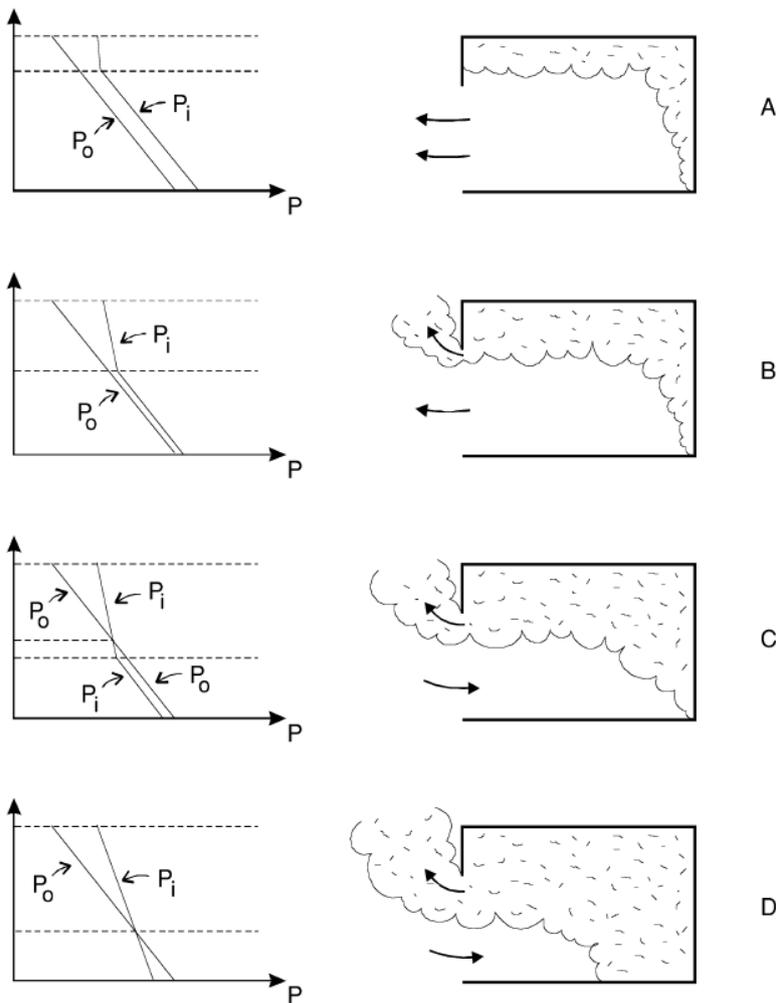


Abbildung 7: Druckprofile im Bereich der Fensteröffnung, (Karlsson & Quintiere, 2000)

Der Druckverlauf auf der Außenseite ist in allen vier Fällen gleich.

- Stufe A: In der ersten Phase des Brandes ist der Druck im Brandraum größer im Vergleich zum Atmosphärendruck. Der Grund ist die Expansion der Heißgase, die ein größeres Volumen im Vergleich zu den kälteren Gasen einnehmen. Wenn sich die Öffnung nicht in Deckenhöhe befindet, werden die kälteren Gase in dem Maße herausgedrückt wie die Heißgase expandieren. Die Druckdifferenz im Bereich der Öffnung ist positiv, wodurch kein Einströmen von Luft, sondern nur ein Ausströmen auftritt.
- Stufe B: Stufe B dauert nur wenige Sekunden und wird meist vernachlässigt. Die Heißschicht hat gerade die Oberkante der Öffnung erreicht und Heißgase beginnen aus der Öffnung zu strömen. Der innere Druck liegt weiterhin über dem Atmosphärendruck. Beide, Kalt- und Heißgase, strömen aus der Öffnung. Es gibt keinen Massestrom in den Brandraum.
- Stufe C: In dieser Phase strömen die Heißgase durch den oberen Öffnungsbereich nach außen und kalte Luft mit gleicher Masse im unteren Bereich nach innen. Diese Phase dauert an, bis der Raum ganz mit Rauch gefüllt ist oder der Flashover erreicht wird.
- Stufe D: Diese Phase wird oft als gut durchmischte Phase bezeichnet. Der Brandraum ist gefüllt mit Heißgasen, die eine durchschnittliche Temperatur besitzen.

Die Phasen A, B und C werden verbunden mit der Entstehungsphase des Brandes und die Phase D mit der Vollbrandphase. In der Regel tritt der Flashover zwischen den Phasen C und D auf.

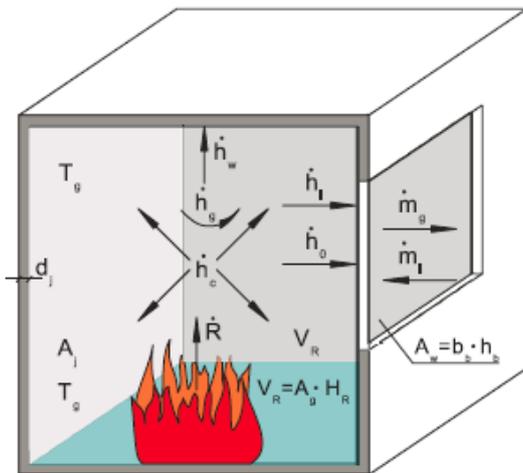
Die Charakteristik der Brände konnte in den Realbrandversuchen zur „Kampagne Brandschutz“ anhand von Temperaturmessungen über die Höhe des Brandraumes und durch Beobachtung des Rauch- und Flammenaustritts im oberen Fensterbereich nachvollzogen werden.

In Abhängigkeit von den Wärme- und Druckverhältnissen erhalten die Bauteile im Brandraum eine ungleichmäßige Beanspruchung. Im Überdruckbereich muss ein besonderes Augenmerk auf die Dichtheit gelegt werden. Über vorhandene Leckagen in Bauteilen und Bauteilanschlüssen werden Heißgase in die Konstruktion gedrückt. An den Wandbauteilen liegt in der Vollbrandphase ein Über- und Unterdruck in Abhängigkeit von der neutralen Ebene an. Bei Vorhandensein von Öffnungen in beiden Bereichen, die innerhalb des Bauteils miteinander in Verbindung stehen, entsteht in Abhängigkeit vom zu überwindenden Strömungswiderstand eine kontinuierlich abwärts gerichtete Heißgasströmung. Bekleidungen können durch die damit verbundene zweiseitige Brandbeanspruchung zu einem früheren Zeitpunkt versagen. Besitzen die Bauteile nur Öffnungen im Überdruckbereich strömen die Heißgase bis zum Erreichen des Druckausgleiches in das Gefach. Voraussetzung hierfür ist, dass in dem Gefach keine weiteren Leckagen vorhanden sind.

2.2.2 Brandmodellierung

Die grundlegende Aufgabe der Brandmodellierung in Räumen besteht darin, die Rauchgastemperaturen über die Energiebilanz zu bestimmen. Abbildung 8 stellt vereinfacht die Energie- und Massebilanz eines Brandraumes dar. Hierbei wird vorausgesetzt, dass die Wärmeverluste durch die eindimensionale instationäre Wärmeleitgleichung beschreibbar sind.

Bei kleineren Brandräumen wird davon ausgegangen, dass der Raum gleichmäßig mit Heißgasen gefüllt ist. Zwischen den umgebenden Bauteilen und den Brandgasen kommt es zu einem radiativen und konvektiven Austausch.



Energiebilanz:

$$\dot{h}_c - (\dot{h}_l + \dot{h}_o + \dot{h}_w + \dot{h}_g + \dot{h}_s) = 0 \quad (2-1)$$

Massebilanz:

$$\dot{m}_g - (\dot{m}_l + \dot{R}) = 0 \quad (2-2)$$

Abbildung 8: Geometrie, Wärme- und Masseströme des Wärmebilanzmodells, aus (Hosser D. , 2009)

In der Arbeit wird der mögliche Energie- und Stoffaustausch über die brandraumumhüllenden Bauteile und Anschlussfugen betrachtet. Ein Stofftransport in und durch die Bauteile tritt auf, wenn neben den vorhandenen Ventilationsöffnungen Leckagen in den vorhandenen Dichtungsebenen auftreten. Dichtungsebenen die innerhalb des Bauteils angeordnet sind, verlieren entweder ihre Funktion nach Erreichen einer Grenztemperatur (siehe Kapitel 3.1.4.2) oder sind bereits im zulässigen Rahmen (siehe Anforderungen an die Luftdichtheit im Kapitel 3.3.3.3) vorhanden.

Den Ausgangszustand für thermodynamische Betrachtungen im Brandraum bildet eine Verbrennungsrechnung, aus der die Verbrennungsgasenthalpie \dot{h}_g und –mengen \dot{m}_g bestimmt werden. Die Brandraumtemperaturen wurden bei den Versuchen zur „Kampagne Brandschutz“ und den Brandversuchen im Rahmen der Hightech-Offensive Bayern nach der Einheits-Temperaturzeitkurve (siehe Kapitel 2.2.4) gesteuert, wodurch der Zustand im Brandraum eindeutig festgelegt ist. Die Verbrennungsrechnung liefert auch den Wasserdampfanteil in den Verbrennungsgasen, welcher die Enthalpie im Vergleich zu trockenen Heißgasen erhöht.

Ausgehend von dem Zustandspunkt im Brandraum werden theoretische Betrachtungen zu den möglichen Zustandsänderungen des Leckagestroms vorgenommen (siehe Kapitel 4). Für genauere Untersuchungen muss ein modifiziertes Prüfverfahren entwickelt werden, welches die Änderungen des Feuchtegehaltes des Heißgasstroms im Bauteil bestimmt.

2.2.3 Brandverlauf- und -ausbreitung

Zur Beschreibung des Brandverhaltens der Bauteile und Bauteilanschlüsse ist neben der qualitativen Beschreibung der Brandszenarien und Brandentstehungsorte eine quantitative Vorgabe der Brandentwicklung in Räumen erforderlich. Sie beschreibt die wesentlichen Brandparameter in ihrer zeitlichen Entwicklung. In Abbildung 9 ist ein natürlich verlaufender Brand in Abhängigkeit von den Brandentwicklungsphasen und den baulichen sowie anlagentechnischen Maßnahmen dargestellt.

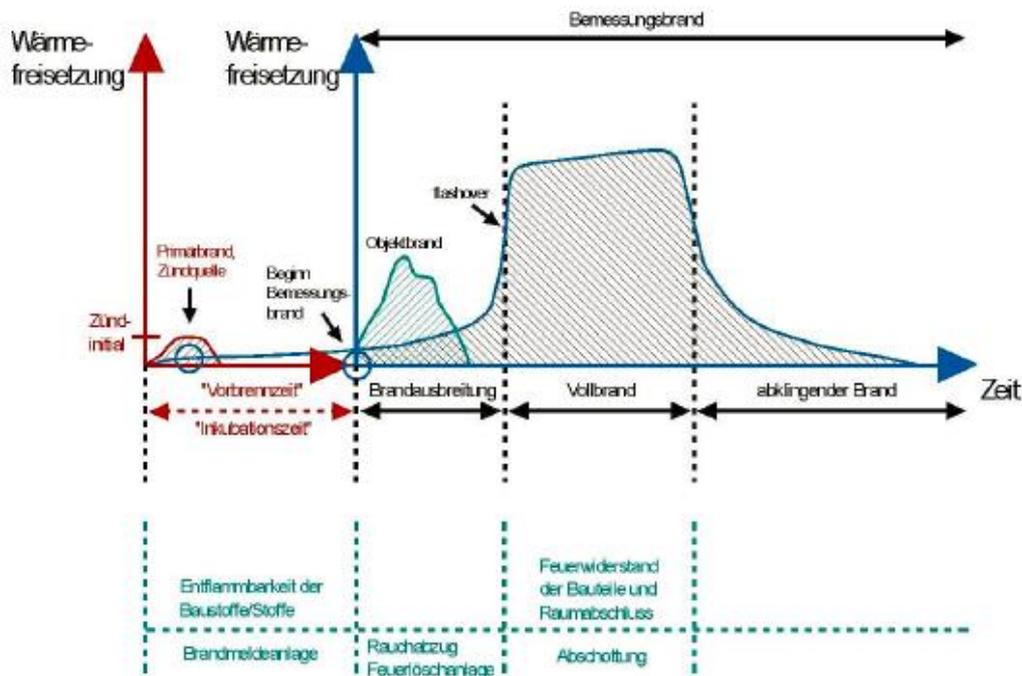


Abbildung 9: Brandentwicklungsphasen bei natürlichen Bränden, aus (Hosser D. , 2009)

Ein wesentliches Kriterium zur Beschreibung des Brandverlaufs ist die Energiefreisetzungsrates. In der Wachstumsphase eines Brandes nimmt die Energiefreisetzung solange zu, bis ein horizontales Plateau in Abhängigkeit von der umgesetzten Brandlast (brandlastgesteuerter Brand) oder den Ventilationsöffnungen (ventilationsgesteuerter Brand) erreicht wird. Wenn es sich um einen ventilationsgesteuerten Brand handelt, reduziert sich dieses Plateau entsprechend dem verfügbaren Luft- bzw. Sauerstoffangebot. Das horizontale Plateau wird durch die Abklingphase begrenzt. Nach (DIN EN 1991-1-2, 2010) beginnt die Abklingphase, wenn 70 % der gesamten Brandlast aufgebraucht sind oder vorher Löschmaßnahmen einsetzen.

Zur Bestimmung der maximalen Wärmefreisetzung in Wohn- und Büroräumen mit einer Fläche < 200 m² kann für brandlastgesteuerte Brände die vereinfachte Gleichung (2-3) verwendet werden (Hosser D. , 2009):

$$Q_{max,f} = 0,25 \cdot A_{Brand} \quad [MW] \quad (2-3)$$

Setzt man in die Gleichung eine Fläche $A_{Brand} = 16,8 \text{ m}^2$ ein, erhält man eine maximale Wärmefreisetzung $Q_{max,f} = 4,2 \text{ MW}$. Die Fläche entspricht derjenigen, welche die Brandräume bei der „Kampagne Brandschutz“ aufwiesen. Berücksichtigt man die Ventilationsbedingungen ergibt sich die maximale Wärmefreisetzung für Wohn- und Büronutzungen nach Gleichung (2-4) (Hosser D. , 2009):

$$Q_{max,v} = 1,21 \cdot A_w \cdot \sqrt{h_w} \quad [\text{MW}] \quad (2-4)$$

Setzt man für den Brandraum zwei Fensteröffnungen (Brandversuch 1) mit den Abmessungen $b \times h = 1,0 \text{ m} \times 1,25 \text{ m}$ an, erhält man eine maximale Energiefreisetzungsrates $Q_{max,v} = 3,4 \text{ MW}$ und mit einer Fensteröffnung (Brandversuch 2) entsprechend die Hälfte. In Abhängigkeit von den Fensteröffnungen ist von ventilationsgesteuerten Bränden auszugehen. Um aber eine Vergleichbarkeit zu normativen Brandversuchen nach Einheits-Temperaturzeitkurve herzustellen, wurde in der Türöffnung ein Ventilator platziert, welcher den Bedarf an zusätzlich benötigtem Luftvolumen bereitstellte. (vgl. Kapitel 2.4.1.1).

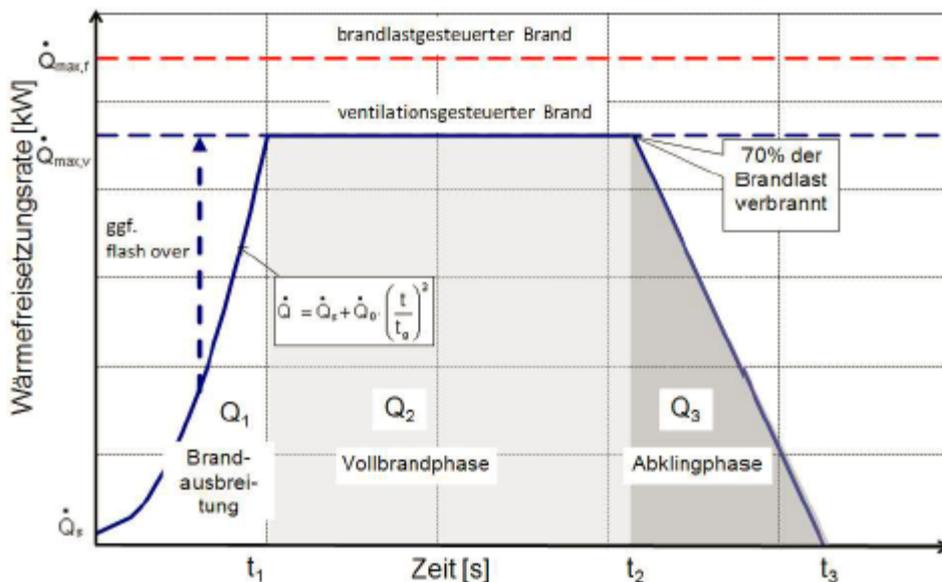


Abbildung 10: Schematisierter Brandverlauf eines natürlichen Brandes mit den Brandphasen: Brandausbreitung, Vollbrand und abklingender Brand, aus (Hosser D. , 2009)

Für übliche Wohn- und Bürogebäude wird gemäß DIN EN 1991-1-2 eine mittlere Wachstumsrate des Brandes vorausgesetzt. Hierfür sind die Werte für die maximale Wärmefreisetzungsrates $RHR_f = 250 \text{ kW/m}^2$ und die Zeit $t_\alpha = 300 \text{ s}$ nach der eine Wärmefreisetzungsrates $\dot{Q} = 1 \text{ MW}$ erreicht ist, vorgegeben. Mit dem Stützpunkt t_α stellt sich das Plateau bei einem brandlastgesteuerten Brand nach einer Zeit $t_1 = 10 \text{ Minuten}$ ein. Unter der Annahme, dass das Plateau bis zum Zeitpunkt $t_2 = 30 \text{ Minuten}$ erhalten bleibt, ergibt sich durch Integration über die Fläche der Wärmefreisetzungsrates die umgesetzte Brandlast $Q_{1-2} = Q_1 + Q_2 \approx 1260 + 5040 = 6300 \text{ MJ}$. Das entspricht einer flächenbezogenen Brandlast $q = 375 \text{ MJ/m}^2$. Für die Brandversuche der „Kampagne Brandschutz“ wurde eine Gesamtbrandlast $Q_{1-3} = 619 \text{ MJ/m}^2$ mittels Holzkrippen aufgebaut. Die verbleibende flächenbezogene Brandlast nach der Zeit $t_2 = 30 \text{ Minuten}$ beträgt $Q_3 = Q_{1-3} - Q_{1-2} = 619 - 375 = 244 \text{ MJ/m}^2$. Zum Zeitpunkt des Löscheinsetzes wurden ca. 60 % der Brandlast aufgebraucht.

Die Brandbeanspruchung wird für einen Brandraum, der durch Umfassungsbauteile (Wände und Decken) begrenzt wird, betrachtet. Besitzen die Umfassungsbauteile keine ausreichende Feuerwiderstandsfähigkeit breitet sich der Brand in angrenzende Räume derselben Nutzungseinheit aus. Gemäß Musterbauordnung (MBO) wird die Größe der Nutzungseinheiten auf eine Fläche $A < 400 \text{ m}^2$ begrenzt. Unterhalb dieser Fläche wird vorausgesetzt, dass die Brände durch die Feuerwehr beherrschbar sind. Eine ausreichende Feuerwiderstandsfähigkeit wird über die Einhaltung des Raumabschlusskriteriums ‚E‘ und ‚I‘ nach DIN EN 13501-2 erreicht (siehe Tabelle 1). Bei Temperaturerhöhungen unterhalb der Leistungskriterien, wird sichergestellt, dass sich Gegenstände auf der brandabgewandten Seite nicht entzünden. Nach Erreichen der daran geknüpften Temperaturkriterien muss mit einer Ausbreitung des Brandes in die angrenzende Räume oder Nutzungseinheiten gerechnet werden. Bei einer Fläche $A > 400 \text{ m}^2$ müssen lokale Brandbeanspruchungen berücksichtigt werden (Hosser D. , 2009).

2.2.4 Thermische Einwirkungen

Für die weiteren Untersuchungen wird die Einheits-Temperaturzeitkurve (ETK) zugrunde gelegt, da in der Regel auch die vorhandenen Rechenverfahren (DIN EN 1995-1-2, 2010) und das modifizierte Verfahren nach Schleifer sowie die darin enthaltenen Materialkennwerte auf dieser nominellen Temperaturzeitkurve beruhen. Nach DIN 1991-1-2, Kapitel 3.2.1 ist die Entwicklung der Gastemperaturen in einem Brandabschnitt nach ETK nach Gleichung (2-5) angegeben:

$$\theta_g = 20 + 345 \log_{10}(8t + 1) \quad (2-5)$$

Im Vergleich zu natürlichen Brandverläufen (vgl. Abbildung 9) verläuft die Einheits-Temperaturzeitkurve mit stetigem Temperaturanstieg. Natürliche Brände dagegen sind wie im Kapitel 2.2.2 beschrieben, abhängig von der Art und Anordnung der Brandlast, der Raumgeometrie und den Ventilationsbedingungen.

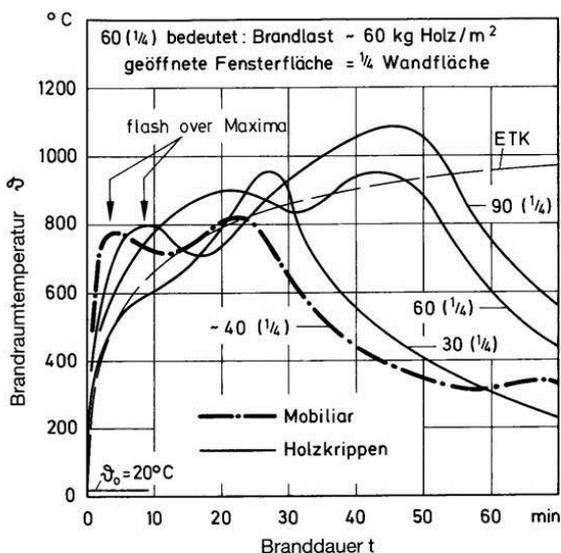


Abbildung 11: Brandraumtemperaturen in Abhängigkeit von der Brandlast und den Öffnungsflächen im Vergleich zur Einheitstemperatur-Zeitkurve. aus (Kordina & Meyer-Ottens, 1994)

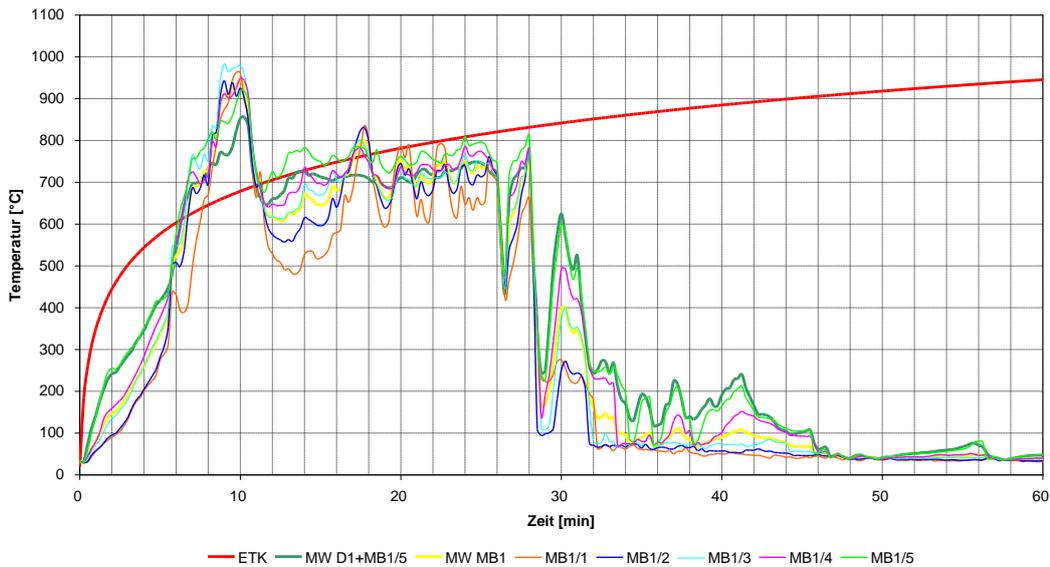


Abbildung 12: Brandraumtemperaturen in Abhängigkeit von der Höhe (Höhen Messpunkte vgl. Abbildung 14) im Vergleich zur Einheitstemperatur-Zeitkurve „Kampagne Brandschutz“ (Brandversuch 1)

In realen Brandräumen ist davon auszugehen, dass erst nach Versagen der Fenster und Türen genügend Luft in den Brandraum nachströmen kann. Dem Umstand geschuldet, dass das Bewertungsverfahren bauaufsichtlich und versicherungstechnisch Anwendung finden soll, wird in der Arbeit der Bemessungsbrand nach Einheits-Temperaturzeitkurve zugrunde gelegt. Bei einer weitergehenden Differenzierung, die erst bei mehrgeschossigen Holzgebäuden und Gebäuden mit besonderer Art und Nutzung, z.B. Beherbergungsstätten als sinnvoll erachtet wird, können brandlast- und ventilationsgesteuerte Brände berücksichtigt werden. Die Brandausbreitung über Öffnungen (z. B. vertikaler Brandüberschlag über Fensteröffnungen) muss gesondert in Abhängigkeit von den definierten Schutzziele betrachtet werden.

2.3 Analyse und Bewertung der Brandausbreitung in brandgeschädigten Versicherungsobjekten

Erste grundlegende Untersuchungen an realen brandgeschädigten Versicherungsobjekten wurden von der Universität Leipzig und der Technischen Universität München in Zusammenarbeit mit der Versicherungskammer Bayern, Abteilung Risk Management in den Jahren 2002/03 durchgeführt. (Stein, 2003)

Das Ziel dieser Untersuchungen war es, erste Hinweise für die wirklichkeitsnahe Beurteilung des Brandverlaufs in Holzgebäuden zu erhalten. Die Analyse der Brandausbreitung in Abhängigkeit von der Gesamtkonstruktion des Gebäudes erfolgte von der Brandentstehung bis zum Beginn der Löscharbeiten. Der Brandverlauf und die Brandausbreitungspfade wurden anhand von Planunterlagen der jeweiligen Holzbau-firmen, Versicherungsunterlagen und einer Dokumentation der Brandobjekte vor Ort nachvollzogen.

In den realen Brandobjekten (Ein- und Zweifamilienhäuser) konnte eine Vielzahl von konstruktiven Schwachstellen in Abhängigkeit vom Brandursprung (Raum- oder Hohlraumbrand) sowie dem Errichtungszeitraum ermittelt werden. Eine weitere Unterscheidung wurde bei den Hohlraumbränden zwischen der Brandentstehung auf der Innen- und Außenseite zur Dämmebene der gebäudeumhüllenden Bauteile getroffen. In Abbildung 13 sind beispielhaft konstruktive Schwachstellen der ausgewerteten Daten dargestellt (vgl. Anhang, Anlage 1, Tabelle A1 und A2).



Abbildung 13: Beispiele zu Brandweiterleitungspfaden

a) Deckenelement mit Brandpfad zwischen Dämmung und Deckenbalken (Brandobjekt I),
 b) Unterdimensionierter Traufkasten mit Brandpfad oberhalb der Fensteröffnungen (Brandobjekt I), c) Deckenelement mit Brandpfad im Deckenhohlraum oberhalb der Dämmung und von dort entlang der Installationen in das darüber liegende Geschoss (Brandobjekt IV), d) Innenwand mit Brandpfad entlang der enthaltenen Installationen aus darunter liegenden Geschoss (Brandobjekt III)

In den Brandobjekten I und II kam es zu Raumbänden infolge defekter elektrischer Geräte. Der Brandursprung befindet sich bei beiden Objekten innerhalb des Gebäudes, die Brandschädigung der Konstruktion dagegen auf beiden Seiten. Auf die brandraumabgewandte Seite gelangte das Feuer über Anschlussfugen, Öffnungen (Fenster und Türen) und bei Brandobjekt II zusätzlich über Installationen.

In den Brandobjekten III und IV kam es zu Hohlraumbränden infolge eines defekten elektrischen Einbauelementes und offenem Feuer. Der Brandursprung befindet sich bei Brandobjekt III außerhalb und bei Brandobjekt IV innerhalb der Gebäudehülle. Die Brandweiterleitung erfolgte bei Brandobjekt III auf die brandabgewandte Dachseite über die Belüftungshohlräume der Dachkonstruktion und in die raumseitige Installationsebene entlang der Installationen und Anschlussfugen. Bei Brandobjekt IV kam es nur zu einer Brandausbreitung innerhalb des Gebäudes.

Durch die Begutachtung der Holzgebäude mit unterschiedlichen Errichtungsjahren 1976 (Brandobjekt I), 1982 (Brandobjekt II), 1983 (Brandobjekt III) und 1990 (Brandobjekt IV) konnten auch Rückschlüsse auf die bauphysikalische Philosophie der Holzbaukonstruktionen und damit der vorgefertigten Holzbaulemente gezogen werden. Das betrifft insbesondere die Anforderungen an die Luftdichtigkeit der Gebäudehülle und die Entwicklung in Richtung vollgedämmter gebäudeumhüllender Holzbaulemente.

Die ermittelten Schwachstellen können unterteilt werden in Brandweiterleitungspfade (Bpf):

- Bpf 1: innerhalb von Bauelementen sowie deren Anschlussfugen,
- Bpf 2: entlang von Installationen,
- Bpf 3: über Öffnungen (u.a. Fenster und Türen) und
- Bpf 4: in untergeordnete Räumen (u.a. nicht ausgebauter Dach- oder Abseitenraum).

Die Brandweiterleitungspfade wurden in Gebäuden ermittelt, an die bauaufsichtlich in der Regel keine brandschutztechnischen Anforderungen gestellt werden. Der Vorteil dieser Analyse ist, dass der Einfluss von statisch-konstruktiven und bauphysikalischen Leistungsanforderungen sowie der Installationsführung auf die Brandweiterleitungsmechanismen in den Vordergrund tritt und direkt untersucht werden kann.

Neben den Brandpfaden wurden auch Brandbarrieren (Bba) identifiziert, die das Grundprinzip einer allseitigen Begrenzung der Bauteile beinhalten. Mit der Ermittlung der Auswirkungen von Raum- und Hohlraumbränden können versicherungstechnische Leistungskriterien erarbeitet und mit den bauordnungsrechtlichen Kriterien verglichen werden.

2.4 Experimentelle Bestimmung des Brandverhaltens von Holzbauteilen und deren Anschlüssen

2.4.1 Realbrandversuche

2.4.1.1 Durchführung der „Kampagne Brandschutz“ in Deutschland

Die „Kampagne Brandschutz“ wurde ins Leben gerufen, um den beteiligten Kreisen, u.a. Bauherren, Planern und Vertretern von Behörden der Bauwirtschaft zu verdeutlichen, dass sich Gebäude in Holzbauweise im Brandfall gleichwertig zu massiven mineralischen Bauweisen verhalten. Auf Grundlage der Voruntersuchungen an brandgeschädigten Versicherungsobjekten (vgl. Kapitel 2.3) wurden brandschutztechnische Maßnahmen zur Eingrenzung der Brandausbreitung konzipiert. Die Auswertung der beiden Brandversuche in Bezug auf die Brandweiterleitungspfade und -barrieren ist mit Darstellung der Details im Anhang in der Anlage 2, Tabellen A3 und A4 enthalten.

In Abbildung 14 ist der Grundriss des Erdgeschosses mit den Wand- und Deckenbezeichnungen dargestellt. Die Querschnitte der Wand- und Deckenaufbauten sind im Untersuchungsbericht zur „Kampagne Brandschutz“ (Stein & Winter, 2007) enthalten.

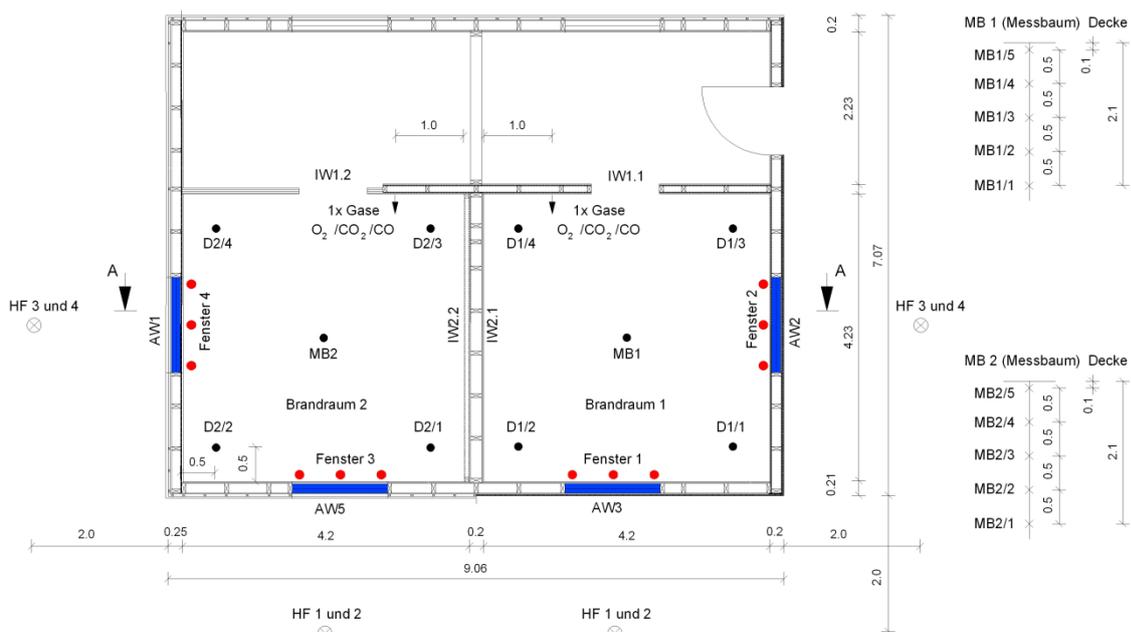


Abbildung 14: Bezeichnung der Bauteile des Versuchsgebäudes

Bei den Holzrahmenbauteilen AW3, AW5 und IW2.1 wurde die Tragkonstruktion durch eine zweilagige nichtbrennbare Bekleidung mit Gipskarton-Feuerschutzplatten (GFK) mit einer Dicke $d = 2 \times 15,0$ mm gekapselt. Die Innenwand IW2.2 wurde beim Brandversuch 2 mit Installationsebene ausgestattet. Insgesamt wurden sieben Gefache ausgeführt, davon drei Gefache ungedämmt und vier Gefache gedämmt. Die innere Bekleidung bildet eine Gipskarton-Feuerschutzplatte mit einer Dicke $d = 12,5$ mm. In den einzelnen Gefachen wurden Hohlwanddosen mit und ohne Gipsummantelung angeordnet. Damit konnte der Einfluss von Hohlwanddosen mit und ohne Gipsummantelung auf den Temperaturverlauf in gedämmten und ungedämmten Gefachen überprüft werden.

Vor dem Brandversuch 2 wurde ein Teil der Innenwand IW1.2 mit einem neu entwickelten Brettsperrholzelement ersetzt. Im Bereich des Brettsperrholzelementes, das brandraumseitig mit einer Gipskarton-Feuerschutzplatten der Dicke $d = 12,5$ mm bekleidet war, wurden ebenfalls Hohlwanddosen mit und ohne Gipsummantelung eingebracht und der Einfluss auf die Brandweiterleitung untersucht. Als Decke kam eine unbekleidete Brettstapeldecke (geklebte Ausführung) zum Einsatz. Die Fugenausbildung bei den Deckenelementen kann dem Anhang entnommen werden.

Die Dachaufbauten wurden nach Herausschlagen der Flammen aus den Fensteröffnungen von außen brandbeansprucht. Während der Brandversuche konnten drei verschiedene Dachaufbauten getestet werden. Beim Dachaufbau DA1 wurde oberhalb der Dämmung eine Unterspannbahn angeordnet. Um die Sparrenoberseite vor Brandeinwirkung zu schützen, wurde beim Dachaufbau DA2 anstatt der Unterspannbahn eine Unterdeckplatte verwendet. Der Dachaufbau DA3 unterscheidet sich von den beiden vorgenannten Dachaufbauten dadurch, dass eine Trennung der Trag- von der Dämmebene erfolgte. Das tragende Brettsperrholzelement liegt auf der Außenwand AW1 auf. Der Dachüberstand wird durch aufgelegte Sparren gebildet, die über die Außenwand AW1 hinaus ragen. Der Stoß des Daches DA2 und DA3 befindet sich mittig über dem Fenster 4, um gleiche Ausgangsbedingungen der Brandbeanspruchung zu erzielen.

Ausgehend von einem Raumbrand wurden folgende Ziele in Abhängigkeit von den Brandweiterleitungspfaden verfolgt: (Stein & Winter, 2007):

- a) Bei ausgewählten Wandbauteilen wird die Tragkonstruktion nicht durch Brandeinwirkung geschädigt.
- b) Die Ausbreitung von Feuer und Rauch über Verbindungsfugen (z.B. Anschluss Innenwand / Decke) wird wirksam durch Brandbarrieren verhindert.
- c) Die Ausbreitung des Brandes durch Fensteröffnungen kann auftreten. Die weitere Ausbreitung in benachbarte Bereiche der Konstruktion wird durch geeignete bauliche Maßnahmen behindert.
- d) Die Feuerwehr achtet beim Löschen auf einen gezielten und minimalen Löschwassereinsatz.
- e) Das Gebäude ist in Teilbereichen so konzipiert, dass beschädigte Bauteile leicht ausgetauscht werden können.

Mit Ausnahme von zwei Details konnten alle anderen Anschlussdetails so konzipiert werden, dass die oben genannten Ziele erreicht wurden. Durch die versetzte Anordnung der Beplankung (Oberkante Beplankung \neq Oberkante Rähm) wurde ein Hohlraum erzeugt, der über den Anschlussbereich AW2 \perp IW1 geführt wurde. Durch diesen grenzübergreifenden Hohlraum kam es, nach Eintritt der Heißgase in den Deckenhohlraum zu einer Weiterleitung auf die brandabgewandten Flurseite (siehe Abbildung 15).



Abbildung 15: Brandbeanspruchung nach 25 Minuten Branddauer und Brandweiterleitung über Fuge entlang des Rähms der Außenwand in angrenzenden Raum (Flur)

Beim ersten Brandversuch wurden die Zielvorgaben, die an die Brandweiterleitung über Fensteröffnungen gestellt wurden nicht eingehalten. Der Brand breitete sich unter- und oberhalb der Unterdeckbahn der Dachkonstruktion aus. Die bauliche Maßnahme mit intumeszierendem Material im Hinterlüftungsspalt und Traufbekleidung des Daches sowie die Anbindung des Stellbrettes an die Traufschalung zum Abschluss der Dachdämmebene waren gegenüber der Dauer und Heftigkeit der Brandbeanspruchung nicht ausreichend.



Abbildung 16: Traufanschluss DA1 ⊥ AW2 auf der Innenseite vor und nach dem ersten Brandversuch

Die Ursache der Brandweiterleitung in den Bereich der Dämmebene war die Fügung des Stellbrettes mit stumpfem Anschlag an die Traufbekleidung. Durch die Brandbeanspruchung wurde die Traufbekleidung nach oben gewölbt und Heißgase konnten durch den sich öffnenden Spalt hindurch treten.

Die Ursache des Nichtauslösens des intumeszierenden Materials waren zu geringe Temperaturen im Bereich der begrenzenden Flächen innerhalb des Hinterlüftungsspalt.

Im zweiten Brandversuch wurden die Zielvorgaben mit modifizierten Dachelementen, zum einen mit Unterdeckplatten und zum anderen mit Aufsparrendämmung, erreicht.

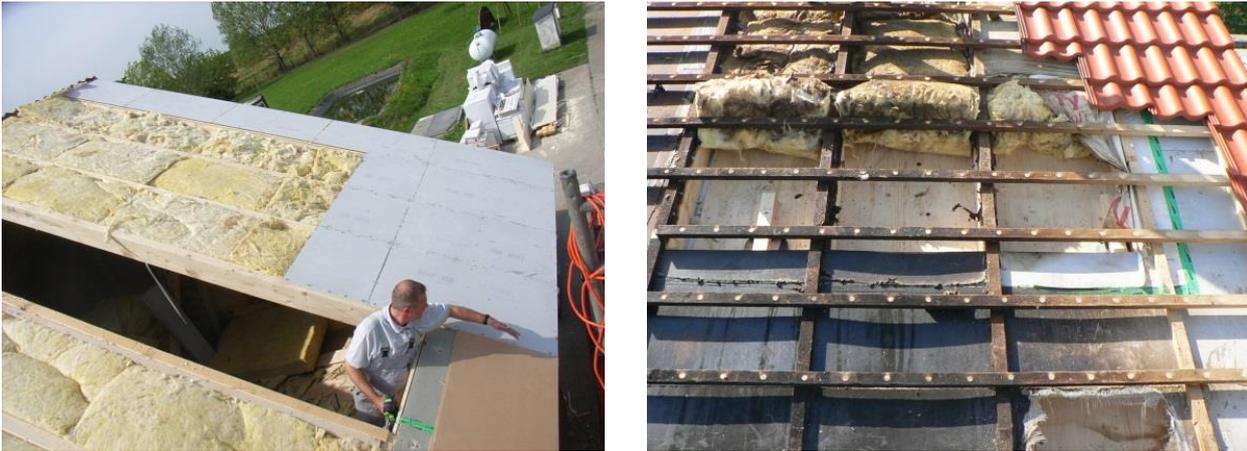


Abbildung 17: Traufanschlussanschluss DA \perp AW vor und nach dem zweiten Brandversuch

Bei der Variante mit Aufsparrendämmung wurden nichtbrennbare Unterdeckplatten verwendet, die in Dachneigung ca. einen Meter hinter die Außenwand geführt wurden. Die Temperaturmessung zeigt, dass sich die Heißgase auf dieser Länge unter die Entzündungstemperatur von Holz abkühlen und eine brennbare Tragkonstruktion in dem darüber liegenden Bereich geschützt wird.

Bei der Variante mit Unterdeckplatten wurde die Trag- und Dämmebene komplett winddicht eingeschlossen. Eine Schädigung der Sparren trat durch aus dem Fenster schlagende Flammen bei beiden Varianten erwartungsgemäß nur im Traufbereich auf. Die Variante mit Aufsparrendämmung bietet hinsichtlich einer Brandschadensanierung den Vorteil, dass die Sparren von der eigentlichen Tragkonstruktion getrennt sind und nach einem Brand leicht ausgetauscht werden können.

2.4.1.2 Brandversuche an Modulhotels in Holzbauweise

In den Brandversuchen wurden grundsätzliche Fragen zum Brandverhalten mehrgeschossiger Holzbauten und spezifische Fragestellungen von Hotelbauten in Holzmodulbauweise geklärt. In einem ersten Schritt wurde der Feuerwiderstand der doppelschaligen Modulwände in Holzrahmenbauweise unter Normbrandbedingungen nach Einheits-Temperaturzeitkurve bestimmt. Hierzu wurden Wandaufbauten in Holzrahmenbauweise mit brennbarer Dämmung sowie brennbarer und nichtbrennbarer Bekleidung für einen Feuerwiderstand ≥ 60 Minuten geprüft. (Fontana, Frangi, & Fetz, 1999)

Auf Grundlage von Vorversuchen erfolgte die Konzipierung der Module mit Außenabmessungen $b \times l = 2,8 \text{ m} \times 6,60 \text{ m}$.

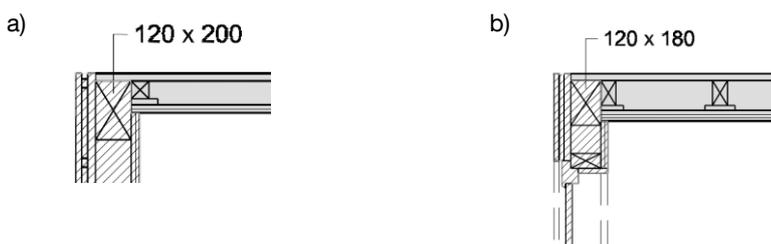


Abbildung 18: Konzipierung der Anschlussdetails (Randquerschnitte in mm),
a) Wand/Wand-Anschluss, b) Wand/Decke-Anschluss

In den Realbrandversuchen wurden typische Brandlasten einer Hotelnutzung (Schaumstoffmatratzen, holzartige Brandlasten etc.) verwendet. Es fanden mehrere Versuche mit der Bestimmung der Brandentwicklung und –weiterleitung in Abhängigkeit einer aktivierten und deaktivierten Sprinkler- und Brandmeldeanlage in ein- und zweigeschossiger Modulordnung statt.

Bei den nicht gesprinklerten Brandversuchen erfolgte ein Brandüberschlag über Öffnung in das obere Modul. Die Bauteile und Anschlussfugen waren derart konstruiert, dass unter Realbrandbedingungen keine Brandweiterleitung stattfand. (Maag & Fontana, 2000)

2.4.1.3 Brandversuche TF2000 in Großbritannien

Im Rahmen des Projektes ‚Timber Frame 2000‘ (TF2000) wurde ein großmaßstäblicher Brandversuch in einem sechsgeschossigen Gebäude durchgeführt. Der Brandursprung befand sich im dritten Geschoss einer ca. 100 m² großen Wohnung. Das obere Plateau der Energiefreisetzungsrate bewegte sich unter Zugrundelegung der Masseverlustmessung bei ungefähr 6 MW. (Lennon & Bullock, 2000)

Aus den Ergebnissen des Realbrandversuchs wurden Konstruktionsempfehlungen für Wand- und Deckenbauteile und deren Anschlüsse abgeleitet. (Grantham & Enjily, 2003)

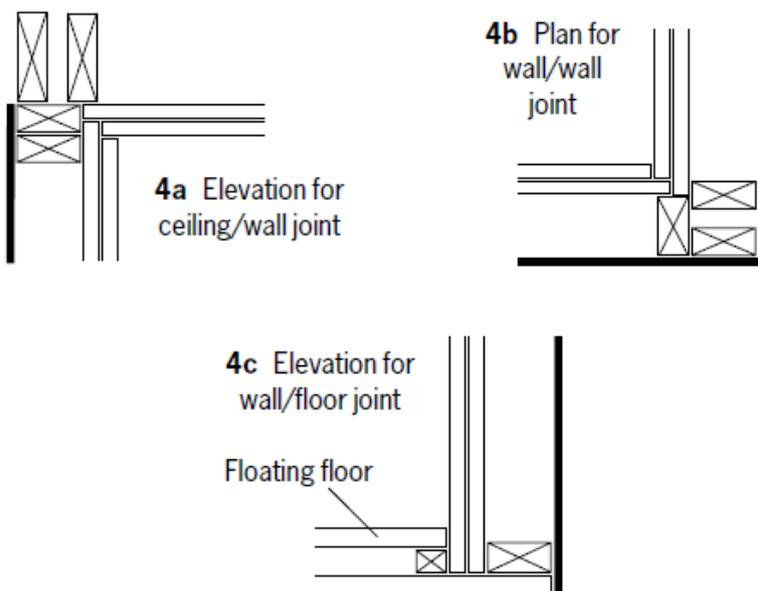


Abbildung 19: Versatz von inneren Bekleidungen an Eckverbindungen, (Bregulla & Enjily, 2004)

2.4.2 Brandverhalten von Bauteilen in Holzrahmenbauweise und deren Fügungen

Am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (IBMB) der TU Braunschweig und der Versuchsanstalt für Holz- und Trockenbau (VHT) wurden Grundlagenuntersuchungen zur Anwendung von mineralisch bekleideten Holzbauteilen in Holzrahmenbauweise in der Gebäudeklasse 4¹ durchgeführt. (Hosser, Dehne, & Zehfuß, 2000), (Hosser, Wesche, et al., 2001) In den Grundlagenuntersuchungen wurden folgende Anforderungen an die tragenden und raumabschließenden Bestandteile von Holzkonstruktionen gestellt:

- Eine Entzündung von tragenden und aussteifenden Teilen von raumabschließenden Wänden und Decken darf während eines Zeitraums von 60 Minuten nicht auftreten. Hierdurch soll ein Brennen innerhalb der Konstruktion mit zeitlich verzögertem Tragfähigkeitsverlust und eine Brandweiterleitung in andere Nutzungseinheiten sicher verhindert werden. In den durchgeführten Versuchen setzte sich die Brandbeanspruchung aus der Brand- und Abkühlphase zusammen. Mit der Annahme, dass in der Regel die Brandlast nach 60 Minuten verbraucht ist, bedarf es hinsichtlich des Aspektes des Tragwerkskollapses keiner Löschmaßnahmen durch die Feuerwehr.
- Die Weiterleitung von Rauch muss insbesondere in Eckbereichen (Anschluss Wand/Wand und Wand/Decke) in dem Maße behindert werden, dass Personen in anderen Nutzungseinheiten nicht gefährdet und die Flucht und Rettung von Nutzern nicht durch Rauchausbreitung in den Rettungswegen beeinträchtigt wird.
- Die Einleitung von Bränden in die Konstruktion über Installationen und die Weiterleitung des Feuers innerhalb der Konstruktion soll ausgeschlossen werden.

Als Kriterium für die Rauchweiterleitung in andere Nutzungseinheiten wurde eine Rauchdichtemessung auf der feuerabgewandten Seite eingeführt. Dort wurde ein einseitig offener Rauchgaskanal mit Abmessungen $b \times h \times l = 20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times l$ luftdicht an das Bauteil angeschlossen. Dem Kanal wird ein definierter Luftvolumenstrom $\dot{V}_{Zu} = 0,1 \text{ m}^3/\text{min}$ zugeführt. Am Ende des Kanals erfolgte die Messung des Transmissionsgrades τ mit einem Rauchdichtegerät nach (DIN 50055, 1989) und der Rauchgaskonzentration (O_2 -, CO_2 - und CO -Gehalt). Die Reduzierung des Transmissionsgrades auf 90 % wurde als hinreichendes Leistungsmerkmal zur Beschränkung des Leckagestroms in benachbarte Nutzungseinheiten angesehen. Die Wand- und Deckenbauteile wurden mit einer Mindestfläche von jeweils sechs Quadratmetern ausgeführt.

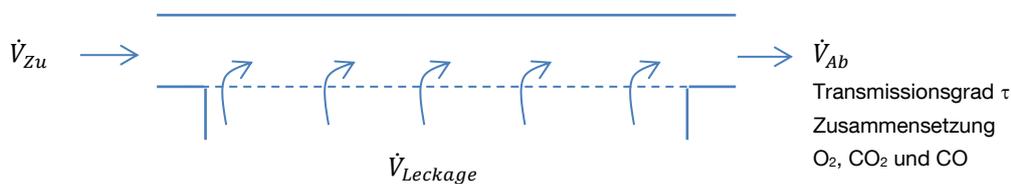


Abbildung 20: Grundprinzip Rauchdichtemessung

¹ Nach MBO werden Gebäude in die Gebäudeklasse 4 eingestuft, deren Fußbodenoberkante (Fertigfußboden) des obersten Geschosses in dem Aufenthaltsräume möglich sind, die Höhe $H = 13,0 \text{ m}$ gegenüber der mittleren Geländehöhe nicht überschreitet. Die Nutzungseinheiten sind auf 400 m^2 beschränkt.

In Anschlussbereichen konnte entsprechend konstruktiver Vorgaben der Durchgang von Rauch und Brandgasen minimiert werden kann. Der Vergleich der geprüften Varianten zeigte einen erheblichen Einfluss der Fugenausbildungen, wobei die Variante mit versetzten Fugen die geringsten Änderungen der Rauchgaskonzentration und des Transmissionsgrades aufwies.

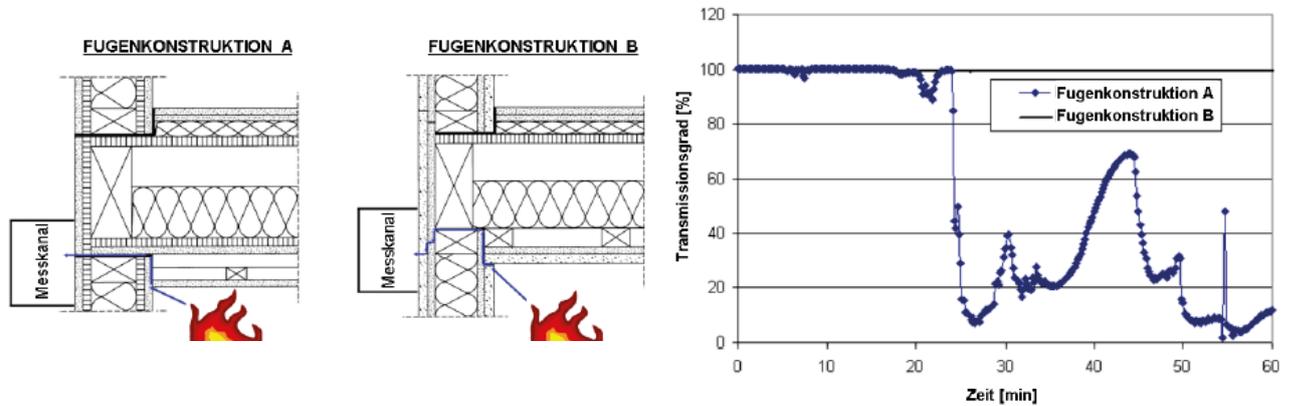


Abbildung 21: Geprüfte Anschlussausbildungen und Transmissionsgrad, aus (Kampmeier, 2008)

Mit den Grundlagenuntersuchungen wurde der Einstieg der Holzbauweise in die Gebäudeklasse 4 geschaffen und in die Muster-Holzbaurichtlinie (M-HFHolzR, 2004) eingebunden. Holzgebäude können damit mit bis zu fünf Geschossen ohne weitere Kompensationsmaßnahmen errichtet werden.

2.4.3 Brandverhalten unbekleideter flächiger Holzbauteile und deren Fügungen

2.4.3.1 Untersuchungen an Brettsperrholzelementen

Das Brandverhalten von Massivholzbauweisen wurde anhand der Temperaturentwicklung in den ungestörten Bereichen des unbekleideten Bauteils sowie in den Elementfugen und in den Eckfugen bestimmt. Nach der Brandbeanspruchung wurde zusätzlich das Löschverhalten der Elemente überprüft. Für die Element- und Eckfugen wurde die Dichtigkeit über den Transmissionsgrad bestimmt.

Die Gleichung (2-6) wird von (Kampmeier & Hosser, 2008) zur Bestimmung der Leckagerate verwendet:

$$\dot{S}_{Fuge} = \frac{\ln\left(\frac{I_0}{I}\right)}{L} \cdot \dot{V} \quad \left[\frac{cm^2}{cm^2} min^{-1} \right] \quad (2-6)$$

Der Wert I_0/I beschreibt das Verhältnis zwischen ungetrübtem und getrübtem Licht. Die Länge L gibt die Lichtmessstrecke an und der Wert $\frac{\dot{V}}{A} = v$ ist die Geschwindigkeit des Volumenstroms im Rauchgaskanal. Die Leckagerate \dot{S}_{Fuge} gibt an, welchen Anteil der Rauch im Luftvolumenstrom besitzt. In Abhängigkeit von dem festgelegten Grenzwert des Transmissionsgrades von 90 % kann entsprechend der Geometrie der Lichtmessstrecke die maximale Leckagerate \dot{S}_{Fuge} ermittelt werden. Die auf die Geometrie der Lichtmessstrecke bezogene Leckagerate wird in den Untersuchungen auf die Fugenlänge bezogen (siehe Abbildung 23). Auf Grundlage von Labor- und Kleinbrandversuchen wurde ein Großbrandversuch durchgeführt. Das

Ziel des Großbrandversuches war die Löschbarkeit der Holzbaulemente bei einem üblichen Löschangriff und die Rauchdichtigkeit der Elementfugen. Die Brandbeanspruchung wurde wie auch bei den Kleinbrandversuchen nach Einheits-Temperaturzeitkurve durchgeführt. Die Holzkonstruktion wurde aus Brett-schichtholz- und Brettspertholzbauteilen zusammengesetzt. Bis auf zwei Wandecken, die mit einer K15 und K30 Brandschutzbekleidung ausgestattet wurden, waren die Bauteile unbekleidet. In der Bewertung wird bemängelt, dass bei Holzkonstruktionen ab einer Länge $L \approx 5\text{ m}$ zu große Fertigungsungenauigkeiten auftreten, die zu einer nicht mehr tolerierbaren Rauchundichtigkeit führen. Bei den Kleinbrandversuchen mit Wandlängen $L \leq 1,5\text{ m}$ tritt diese Problematik nicht in dem Maße auf.

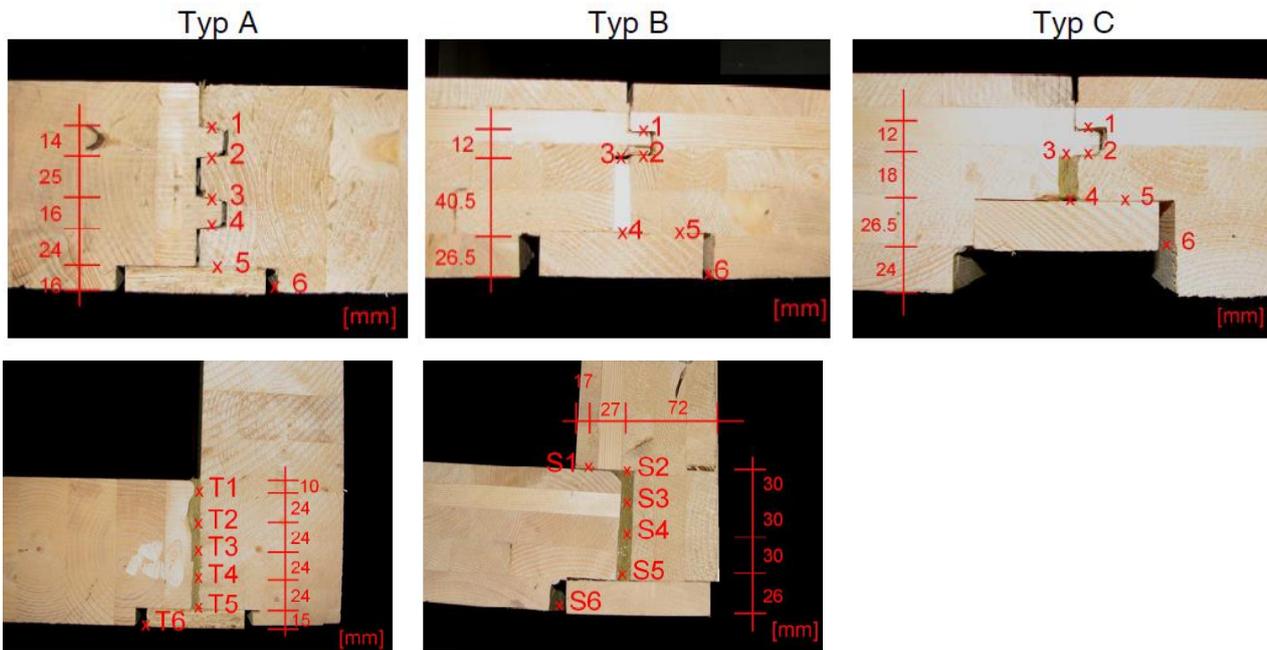


Abbildung 22: Geprüfte Fugenkonstruktionen von Brettspertholzelementen – Elementfugen (oben) und Eckfugen (unten), aus (Kampmeier & Hosser, 2008)

Nach Auffassung der Verfasser wurden die Grenzwerte eingehalten, weil die Rauchundichtigkeiten nicht im Bereich des Rauchgaskanals auftraten und innerhalb des Versuches über 45 Minuten kein Überdruck im Brandofen herrschte. Daraus wurde geschlossen, dass eine Konstruktion aus unbekleideten Elementen in Holzmassivbauweise fehleranfällig und nicht praxisgerecht ist. Aus diesem Grund wird eine zusätzliche Bekleidungsschicht gefordert.

Mit den Brandversuchen konnte belegt werden, dass Massivholzkonstruktionen, ohne vorheriges mechanisches Abtragen der Kohleschicht nicht zum Glimmen neigen. Es wird aber die Empfehlung ausgesprochen, dass nach einem Löschangriff, die Kohleschicht abgetragen werden soll, um einen Glimmvorgang zuverlässig auszuschließen. (Kampmeier & Hosser, 2008)

Für den in Abbildung 23 dargestellten Fugentyp C ist nachfolgend die Temperaturentwicklung und die Leckagerate in Abhängigkeit von der Zeit dargestellt. Das Leistungskriterium der Dichtigkeit wird nach ca. 43 Minuten überschritten. Das Temperaturkriterium $\Delta t_{EW} \leq 180\text{ K}$ wird auf der brandabgewandten Seite eingehalten.

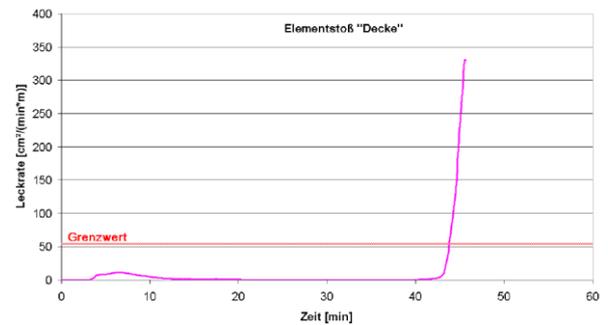
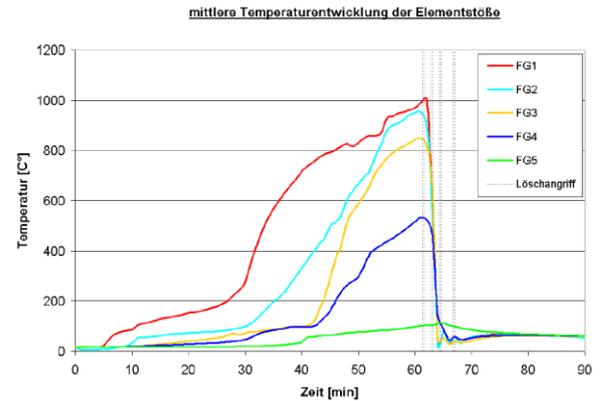
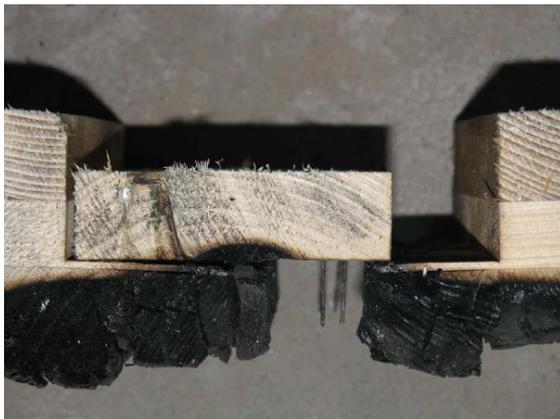
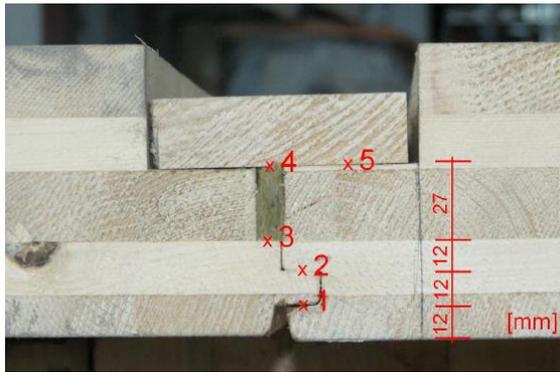


Abbildung 23: Beispielhafte Darstellung der Ergebnisse an der Elementfuge Typ C aus (Kampmeier & Hosser, 2008)

Die Schwierigkeit der Versuchsanordnung besteht darin, dass in dem Leckagestrom neben den Rauchpartikeln auch übersättigter Wasserdampf in Form von Nebel mitgeführt werden kann, der zu einer Verfälschung der Ergebnisse führt.

2.4.3.2 Untersuchungen zum Fugenverhalten an Hohlkastenelementen

Bei der Untersuchung des Brandverhaltens von Hohlkastenelementen wurden in Klein- und Großbrandversuchen die nachfolgenden Fugentypen getestet. (Frangi & Fontana, 1999)

Bei den Brandeinwirkungen von 60 und 90 Minuten zeigte sich bei dem Fugentyp B schon nach fünf Minuten ein starker Rauchaustritt. Durch die geringe Temperaturerhöhung oberhalb der Fremdfeder wurde die notwendige Temperatur zum Aufquellen des Fugendichtungsbandes nicht erreicht. Der Verschluss der Fuge erfolgt nach ca. 16 Minuten, nachdem die Aktivierungstemperatur des Fugendichtungsbandes erreicht wurde. Die Temperatur auf der brandabgewandten Seite nahm dann kontinuierlich ab. An den Fugentypen A und C wurde kein Rauchaustritt registriert.

Tabelle 4: Vergleichende Darstellung von Fugentypen für eine Feuerwiderstandsfähigkeit von 60 Minuten aus (Frangi & Fontana, 1999)

Fugentyp		A		B		C	
Feuerwiderstand 60 Minuten Prüfkörper mit Abmessungen: V1: b x d = 1,15 m x 0,90 m V2: b x d = 5,35 m x 2,84 m							
Versuch		V1	V2	V1	V2	V2	
Maßnahmen							
Geaelflexfedern furniert	b x h = 30 mm x 9 mm	X		X			
Sperrholzfedern			X		X		
Fugendämmung Mineralwolle	b x h = 10 mm x 150 mm	X					
Fugendichtband (willseal firestop, Fa. Illbruck)	b x h = 12 mm x 30 mm			X			
	b x h = 12 mm x 40 mm				X		
Nut- und Kamm- verbindung	Doppelte Ausfüh- rung					X	
Kriterium (R)³⁾ EI		erfüllt		erfüllt²⁾		erfüllt	
Rauch¹⁾		geringfügig		stark		geringfügig	
¹⁾ Sichtkriterium ²⁾ Infolge starken Rauchdurchtritts ab der 5. Minute kam es zu einem Anstieg der Temperatur auf der brandabgewandten Oberfläche (67°C in der 34. Minute). Danach nahm die Temperatur infolge des vollständigen Aufquellens des Dichtungsbandes wieder ab. ³⁾ Bei dem großmaßstäblichen Versuch wurde unter Belastung getestet, wobei die Kriterien der Tragfähigkeit eingehalten wurden.							

Tabelle 5: Vergleichende Darstellung von Fugentypen für eine Feuerwiderstandsfähigkeit von 90 Minuten aus (Frangi & Fontana, 1999)

Fugentyp		A	B	C
Feuerwiderstand 90 Minuten Prüfkörper mit Abmessungen: V3: b x d = 5,35 m x 2,84 m				
Versuch		V3	V3	V3
Maßnahmen				
Sperrholzfedern	b x h = 30 mm x 9 mm	X	X	
Fugendämmung Mineralwolle	b x h = 10 mm x 150 mm	X		
Fugendichtband (willseal firestop, Fa. Illbruck)	b x h = 12 mm x 30 mm		X	
Nut- und Kamm- verbindung	dreifache Ausfüh- rung			X
Kriterium (R)⁴⁾ EI		erfüllt	erfüllt³⁾	erfüllt
Rauch¹⁾		k.A.²⁾	k.A.²⁾	k.A.²⁾
¹⁾ Sichtkriterium ²⁾ keine Angabe ³⁾ Infolge starken Rauchdurchtritts ab der 5. Minute kam es zu einem Anstieg der Temperatur auf der brandabgewandten Oberfläche (55°C in der 52. Minute). Danach nahm die Temperatur infolge des vollständigen Aufquellens des Dichtungsbandes wieder ab (25°C nach 81. Minute). ⁴⁾ Bei dem großmaßstäblichen Versuch wurde unter Belastung getestet, wobei die Kriterien der Tragfähigkeit eingehalten wurden.				

Ein ähnliches Verhalten von intumeszierenden Materialien wurde in den Versuchen zur Kampagne Brandschutz beobachtet. Der Unterschied bestand darin, dass die Aktivierungstemperatur durch die vorhandene Temperaturbeanspruchung nicht erreicht wurde (siehe Kapitel 2.4.1.1). D.h. bei Verwendung von intumeszierenden Materialien zur Abdichtung von Hohlräumen und Fugen muss die Aktivierungstemperatur und das Quellvermögen auf die zu erwartende Brandbeanspruchung abgestimmt werden.

3 Konstruktionsmethodik und –prinzipien

3.1 Methodisches Vorgehen

3.1.1 Entwerfen und Konstruieren

Nach Ackermann (Ackermann, 1993) darf der Prozess des Entwerfens und Konstruierens nicht als unabhängige Tätigkeit aufgefasst werden. Es sind sich gegenseitig bedingende Tätigkeiten, die in interdisziplinärer kooperativer Zusammenarbeit erfolgen sollen. Je nach eingesetzter Entwurfsmethodik und -werkzeugen kann ein unterschiedlicher Grad an Flexibilität, Variabilität, Erweiterbarkeit und Reduzierbarkeit erreicht werden (Dirichlet, 1980).

Definitionen des Begriffs „Entwerfen“:

„Entwerfen ist das Finden von etwas völlig Neuem, noch nie Dagewesenen, ist die Standardleistung von Architekten und vielen Ingenieuren auf allen Maßstabsebenen ihrer Arbeit – von der städtebaulichen Planung bis zur Gestaltung einer Schraubverbindung zwischen Stütze und Platte für eine Museums vitrine oder den Tresen einer Sparkassenfiliale. Wir sind Serienfinder für Unikate mit hohem Anspruch, Künstler mit technischem Wissen zur nützlichen, wirtschaftlichen und kunstvollen Gestaltung des Lebensraumes unserer Gesellschaft. ...

Das Entwerfen für die Serie, für die Eignung zu maschineller Produktion und optimaler Logistik, ist für Bauelemente des Ausbaus mit wachsender Industrialisierung Standard geworden.“ (Althaus, 1999)

„Entwerfen ist das Umsetzen bestimmter Raumbedürfnisse in Zeichnungen für bauliche Gebilde. Entwerfen ist der Prozeß, in dem die komplexen Planungsinhalte in ein gemeinsames Resultat zusammengeführt werden, das als Entwurf bezeichnet wird. ...

„Die Entwurfplanung ist der entscheidende Schritt für den gesamten Planungsprozeß. Dort werden alle Entwurfsgrundlagen und Problemlösungsvorgänge der vorhergehenden Vorplanung zusammengefaßt und für die folgenden Planungsphasen vorbestimmt.“ (Ackermann, 1993)

„Das Entwerfen in der Architektur ist ein komplexer, rationaler wie auch künstlerischer Entstehungsprozess, bei dem verschiedene Randbedingungen (Lage, Raumprogramm, Kosten, Baurecht etc.) betrachtet werden müssen. Das Ergebnis dieses Prozesses ist der Entwurf, der in der Regel mit Mitteln der Architekturdarstellung, u.a. Zeichnungen, Architekturmodellen, Computersimulationen dokumentiert wird.“ (Wikipedia, 2013)

„Entwerfen im Bereich der Konstruktion ist demnach der Teil des Konstruierens, der nach kritischer Klärung der Aufgabe die funktionelle, strukturelle und wirtschaftliche Lösung soweit festlegt und durch weitere Angaben ergänzt, dass ein nachfolgendes Ausarbeiten zur Ausführungsreife eindeutig möglich ist.“ (Ackermann, 1993)

Definition des Begriffs „Konstruieren“:

„... Konstruieren - lat. construere - ist zusammenschichten, zusammensetzen aus einzelnen Teilen ein Ganzes machen.“ (Ackermann, 1993)

„Konstruieren ist eine vorwiegend schöpferische, von Erkenntnissen aus Wissenschaft und Erfahrung getragene, eine optimale Lösung anstrebende Tätigkeit, die das Vorausdenken eines technischen Gebildes vom Entwerfen seines funktionellen und strukturellen Aufbaus bis zum Ausarbeiten fertigungsreifer Unterlagen umfasst“ (Hunig, 1987)

3.1.2 Planungsprozess

Für den gesamten Bauprozess, zu dem die Gestaltung des Bauwerks, die Konstruktion und der Bauablauf zu zählen sind, bildet die Entwurfsplanung die entscheidende Phase, in der Problemlösungsvorgänge der Vorplanung zusammengefasst und für die Folgephasen vorbestimmt werden. In dieser Phase werden Kosten, Zeit und Qualität bestimmt und nachhaltig beeinflusst. Abbildung 24 zeigt die abnehmende Beeinflussbarkeit der Kosten in den nachfolgenden Phasen.

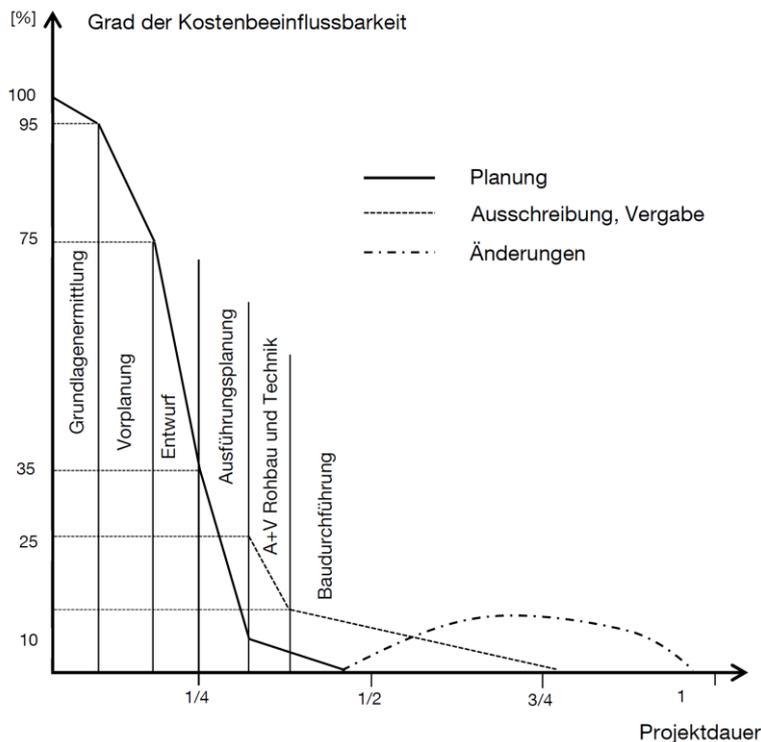


Abbildung 24: Abhängigkeit der Kostenbeeinflussbarkeit von der Bauphase, aus (Knaack, Chung-Klatte, & Hasselbach, 2012)

Die wirtschaftlichen und zeitlichen Vorgaben können nur eingehalten werden, wenn der Ablauf von Fertigungs- und Montageprozessen in der Planung berücksichtigt wurde. Die starke Vernetzung der Planungs- und Bauprozesse macht schon in der Frühphase eines Projektes eine integrative Planung der am Bau Beteiligten notwendig.

Innerhalb der Planungsphase müssen nach Ausarbeitung einer Zielvorstellung unter Berücksichtigung von gegebenen Randbedingungen (u.a. Lebensbedingungen, Nutzungsgewohnheiten und Zusammenhänge von Landschaft und gebauter Umgebung) die zugehörigen Fakten (Funktionen, Konstruktionen, Tragwerke und deren Fügungen, Bauweisen, Baustoffe, Herstellungsmethoden, Gesetze, Kosten) in geordneter Weise ermittelt, beurteilt und umgesetzt werden. (Ackermann, 1993)

In Abbildung 25 und 26 sind schematische Darstellungen zur Zusammenarbeit zwischen Ingenieuren und Architekten sowie den Entwurf beeinflussende Kriterien ersichtlich.

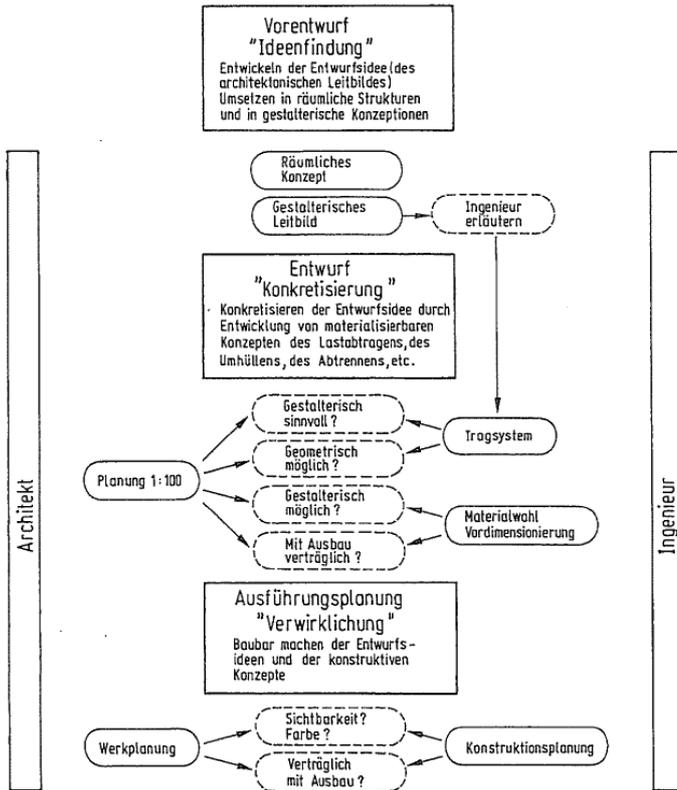


Abbildung 25: Integrativer Planungsablauf von architektonisch anspruchsvollen Bauwerken, aus (Scheer & Andresen, 1995)

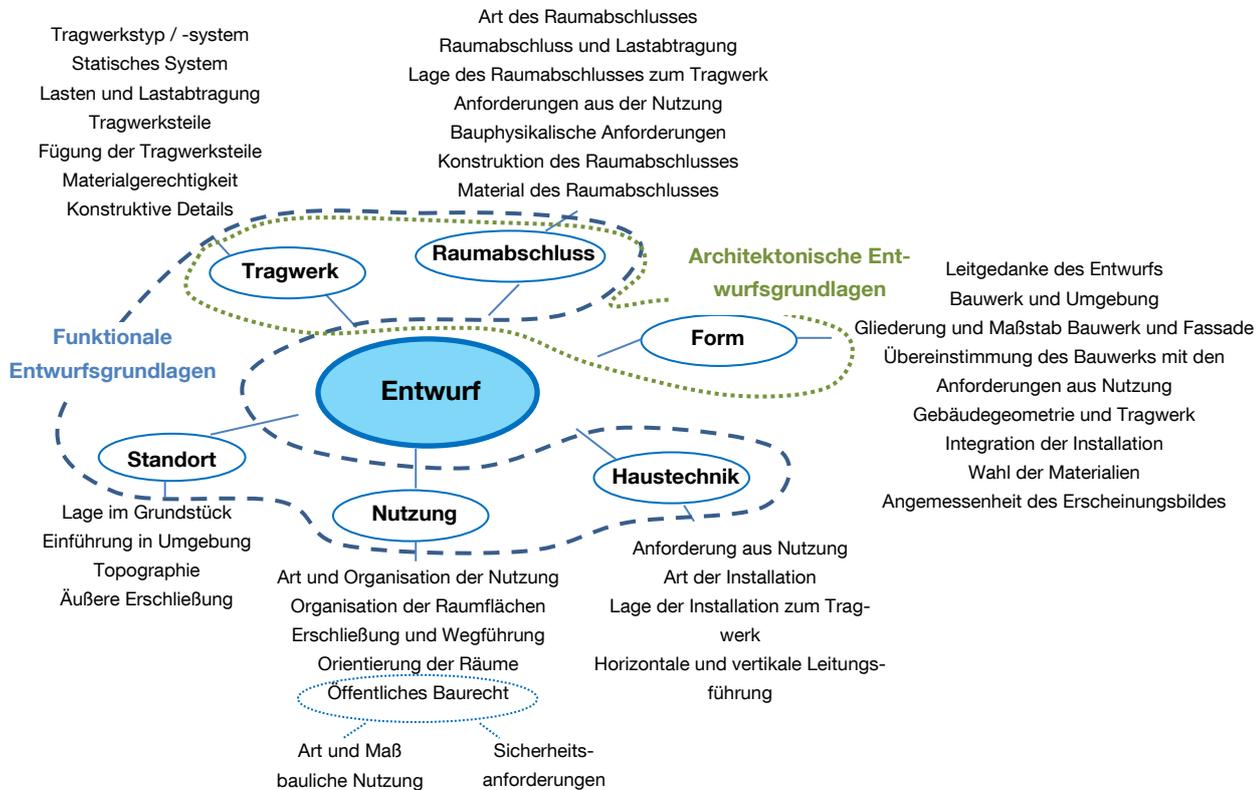


Abbildung 26: Beurteilungskriterien von Bauwerken aus (Ackermann, 1993) mit hervorgehobener Unterteilung in funktionale und architektonische Grundlagen nach (Franke & Deckelmann, 2002)

Nach (Franke & Deckelmann, 2002) kann der Entwurf in funktionale und architektonische Grundlagen unterteilt werden. Die funktionalen Grundlagen bilden dabei den quasi unveränderlichen Teil des Entwurfs. Dazu gehören das öffentliche Baurecht, der Standort, die vorgesehene Nutzung und die Haustechnik. Der architektonische Entwurf wird verbunden mit einem kreativen und schöpferischen Prozess, der auf drei Ebenen bearbeitet wird, der Auseinandersetzung zwischen Architektur und Umwelt, dem Finden des Themas und der Idee der Bauaufgabe sowie der architektonischen Gestaltung mit den Elementen Raum (Proportion und Gliederung), Konstruktion (Tragwerk und Material) und Umschließung (Gestalt der Fassade).

Unter Verwendung von ‚Planungssystemen‘ können die Prozesse deterministisch gesteuert werden. Der Nachteil der Systeme ist, dass im Vergleich zu ‚Konstruktionssystemen‘ nur ein geringer Einfluss auf das Kosten-, Zeit- und Qualitätsmanagement genommen werden kann. Der Vorteil gegenüber ‚Konstruktionssystemen‘ ist, dass sie auf architektonische Varianten eingehen können.

Der Planungsprozess bei Konstruktionssystemen wird unter konstruktiven und logistischen Gesichtspunkten des Fertigungs- und Montageprozesses determiniert. *„Die größte Schwierigkeit besteht darin, eine individuelle architektonische Planung in den standardisierten Bauprozess eines solchen modulbasierten Systems zu übersetzen“.* (Knaack, Chung-Klatte, & Hasselbach, 2012)

Ein geeigneteres Mittel stellen ‚computergestützte Planungssysteme‘ dar, welche ein Bauwerk ausgehend von einem individuellen Architekturentwurf in Module zerlegen, die in einem integrativen Prozess wieder zusammengefügt werden. Das System vertritt die Grundthese, dass jedes Bauwerk in einem hohen Maße aus Wiederholungen von Serien von Einzelteilen besteht. (Knaack, Chung-Klatte, & Hasselbach, 2012)

3.1.3 Lösungsprinzipien

Die Aufstellung eines Bewertungsmodells zum Einfluss statisch-konstruktiver, bauphysikalischer und installationstechnischer Aspekte auf die Brandweiterleitungspfade innerhalb von vorgefertigten Holzelementen, *„... geht Hand in Hand mit der Entwicklung eines Lösungsvorschlages; Informationen kann man nur dann sinnvoll sammeln, wenn man an einem Lösungsprinzip orientiert ist, und ein Lösungsprinzip kann man nur in dem Maße entwickeln, wie man über das Problem informiert ist usw.“* (Rittel, 1992)

D.h. der Entwurfs- und Konstruktionsprozess ist ein iterativer Vorgang. In dem Prozess werden Variablen und Beziehungen der Variablen untereinander aufgestellt, an die zur Problemlösung ein Bewertungsfilter angelegt wird. Als Strategien zur Problemlösung werden von (Rittel, 1992) u.a. der „Scanning Process“ sowie die ein- und mehrstufige Alternativenbildung aufgezählt.

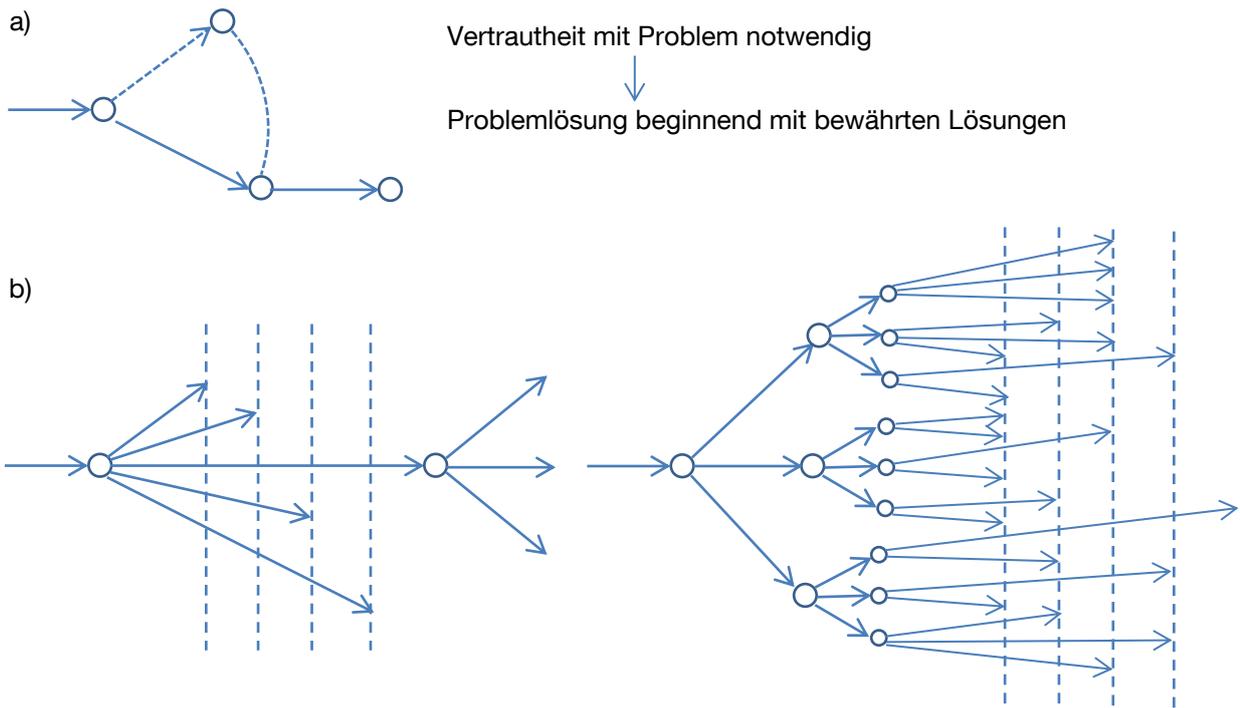


Abbildung 27 Erzeugung und Reduktion von Varietät

a) „Scanning Process“, b) ein- und mehrstufige Alternativenbildung, aus (Rittel, 1992)

Am Ende dieses Prozesses steht das ‚objektbezogene modularisierte Bauelement‘. Es beinhaltet alle Entscheidungen, die im Rahmen des vorangestellten Prozesses getroffen wurden. Um diese Prozesse nachvollziehbar zu gestalten und die Ergebnisse auf eine begründete Basis zu stellen, ist ein methodisches Vorgehen beim Entwerfen und Konstruieren mit computergestützten Methoden unumgänglich.

„Hierbei erhofft man sich eine bessere Messbarkeit des Konstruktionsprozesses, eine Beschleunigung desselben und vor allem fokussiert die Konstruktionsmethodik neuartige Produkte. Kritiker beklagen allerdings aufgrund der Formalisierung einen Verlust an Kreativität im Konstruktionsprozess.“
(Wikipedia, 2013)

Das Entwerfen und Konstruieren muss immer in einem gemeinsamen Kontext betrachtet werden, da qualitativ hochwertige Bauwerke nur aus der Zusammenarbeit zwischen Ingenieuren und Architekten sowie weiteren Fachleuten resultieren. Die Planungsbeteiligten müssen ein bestimmtes Grundverständnis aufbringen, der Ausführungsplaner für funktionale Zusammenhänge des Gebäudes und die architektonischen Absichten des Entwerfers und der Entwerfende für die technischen Zusammenhänge.

3.1.4 Fügung

3.1.4.1 Ansätze aus dem Bauwesen

Die Gestalt eines Baukörpers ergibt sich nach (Hauschild, 2003) aus zwei unterschiedlichen Entwurfsansätzen:

1. Die Gestalt entsteht aus der Summe der Einzelkomponenten.
2. Die Einzelkomponenten werden in eine feststehende Gestalt eingefügt.

Die zweite Variante wird mit der Methode der computergestützten Planungssysteme realisiert. Um den Einfluss der Einzelkomponenten auf Brandweiterleitungsmechanismen zu bestimmen, gibt es die Möglichkeit die Bauteile in ihre Konstruktionsebenen und -arbeitsfelder zu unterteilen.

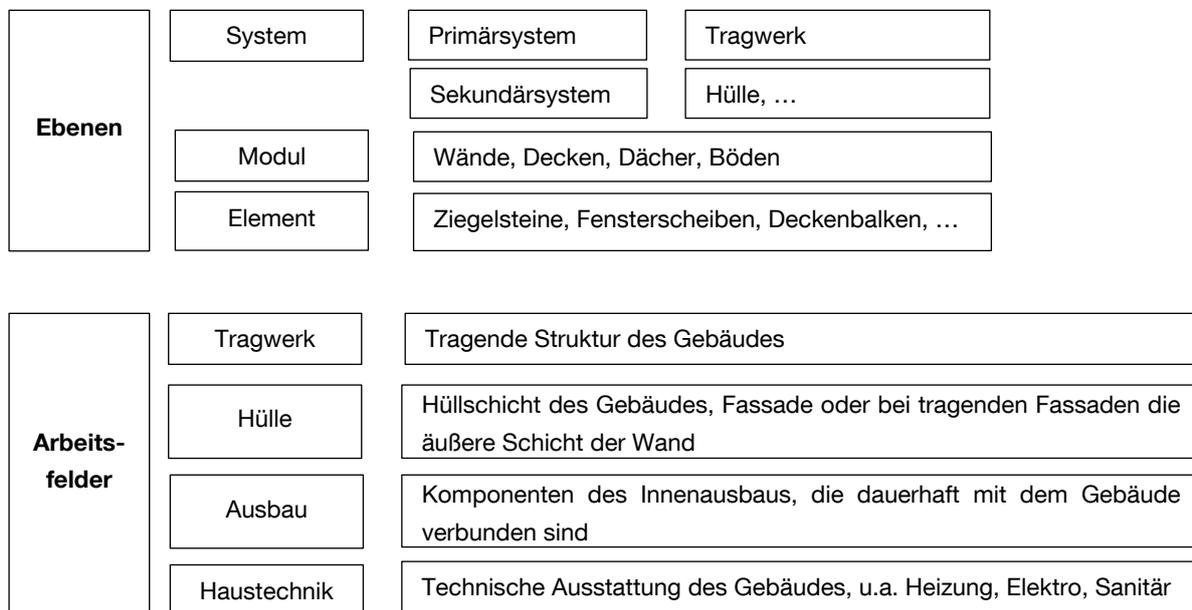


Abbildung 28: Ebenen und Arbeitsfelder der Konstruktion, nach (Knaack, Chung-Klatte, & Hasselbach, 2012)

In Analogie zur Zergliederung kann ein System auch als geometrische Fügung dargestellt werden. In diesem Fall wird die Konstruktion aus dem Knoten im Raum oder alternativ aus dem raumbildenden Modul heraus entwickelt. (Knaack, Chung-Klatte, & Hasselbach, 2012)

Die konstruktive Entwicklung kann demnach bei Holzskelettbaukonstruktionen aus dem Knoten und bei Holzrahmenbaukonstruktionen aus der geometrischen Fügung raumbildender Module entwickelt werden.

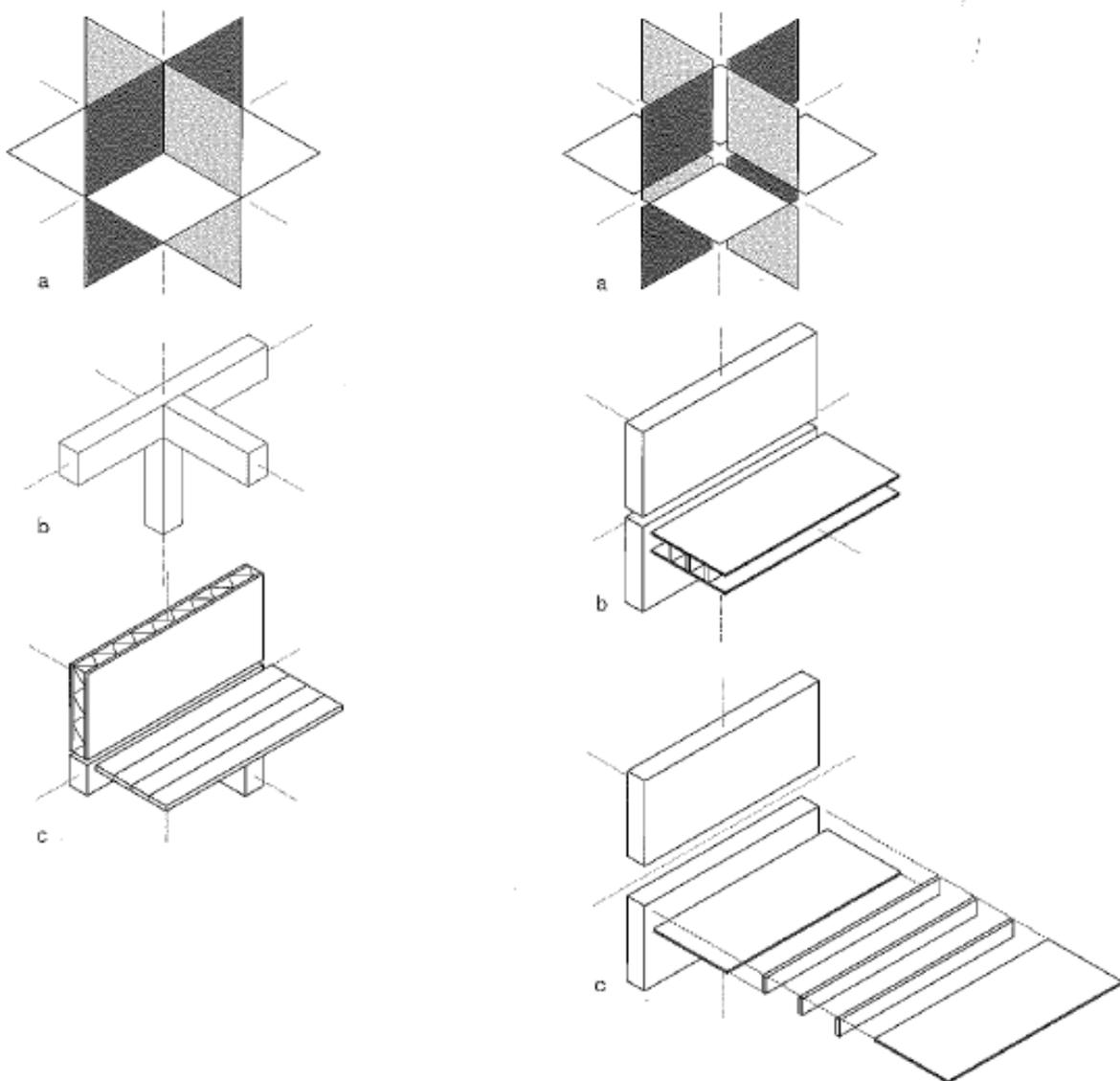


Abbildung 29: Entwicklung der Konstruktion aus dem Knoten (links) oder raumbildenden Modul (rechts) (Knaack, Chung-Klatte, & Hasselbach, 2012)

In Abhängigkeit von den einzelnen Ebenen umfasst ein Bauwerk Verbindungen und zu verbindende Teile aus Primär- und Sekundärstruktur sowie Modulen und Elementen. Die Fügung der Module kann mit einer integrierten Verbindung oder einem zusätzlichen Verbindungsstück zum Zwecke einer problemlosen Montage erfolgen. Die Verbindungselemente zum Zusammenfügen weisen im Allgemeinen die Form der anzuschließenden Bauteile und ihren angrenzenden Oberflächen auf. Es kann zwischen punktförmigen (nodalen), linearen und ebenen (planaren) Grundformen unterschieden werden. (Knaack, Chung-Klatte, & Hasselbach, 2012)

Die Kernaufgabe des Konstruierens ist es, die Funktionsschichten der Bauteile in dem Anschlussbereich zu verbinden. Die Funktionen, u.a. die Luftdichtheit müssen auch im Bereich der Fügung dauerhaft erhal-

ten bleiben. Die dichtende, absorbierende oder durchlässige Funktion, kann durch die Position sowie den Form- und Materialschluss der Fuge erreicht werden.

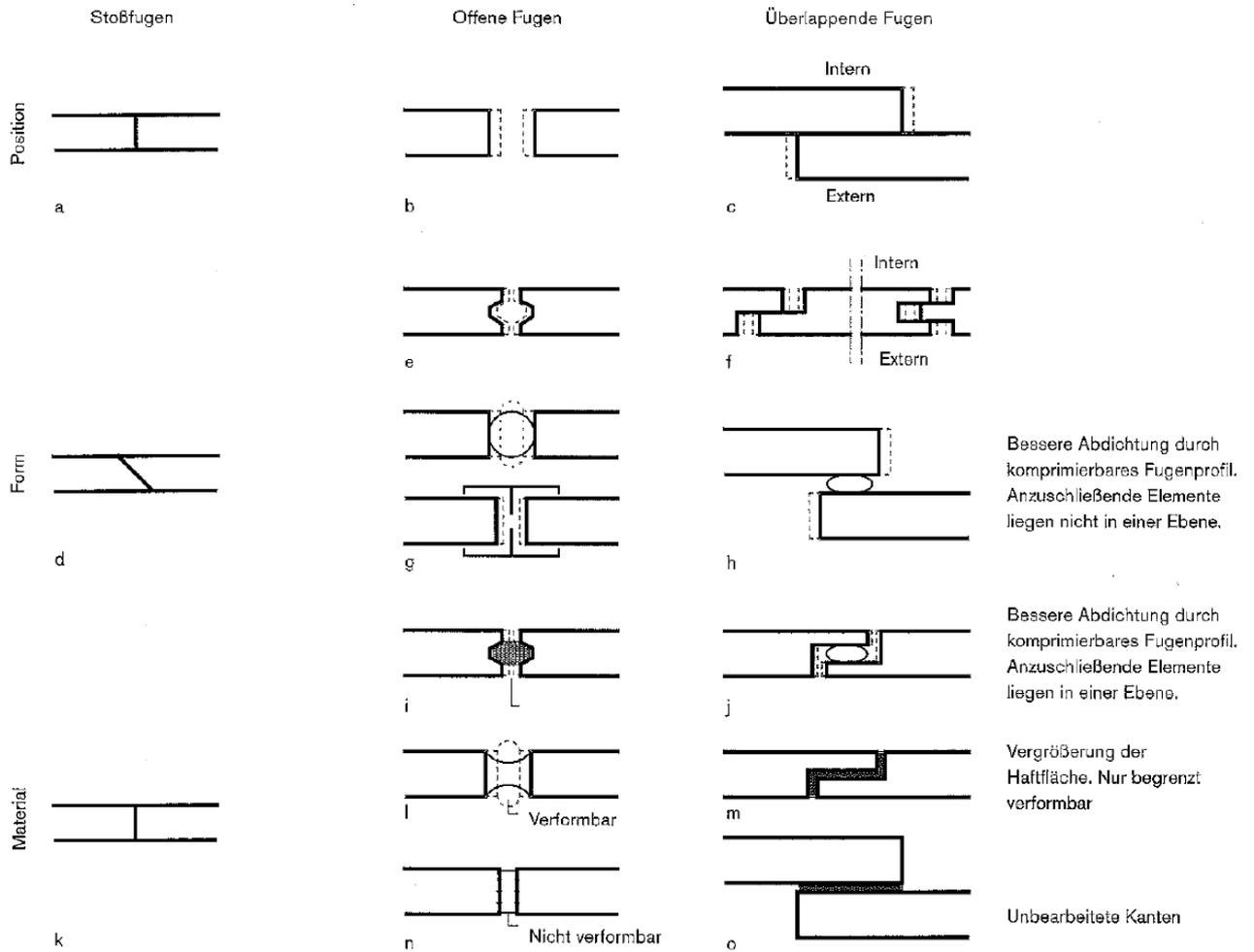


Abbildung 30: Fugentypen im Überblick aus (Meijs & Knaack, 2009)

3.1.4.2 Ansätze aus anderen Bereichen

Der Exkurs dient dazu, die Abdichtungsprinzipien anderer Bereiche aufzunehmen und ggf. auf brandbeanspruchte Fügungen im Holzbau zu übertragen. Höhere Temperaturen können im Bereich hydraulischer und pneumatischer Antriebe auftreten, die flüssige oder gasförmige Druckmedien zur Kräfteübertragung nutzen. Auf den Dichtvorgang wirkt sich u.a. aus (Ebertshäuser, 1993):

- Bewegungsgeschwindigkeit
- Temperatur
- Viskosität und andere Eigenschaften des Druckmediums
- Form und physikalische Eigenschaften des Dichtelementes
- Rauheit und Gestalt der beteiligten Oberflächen
- Einbausituation

Die Kombination aller Einflussgrößen bestimmt den tribologischen Vorgang und damit auch die Dichteigenschaften. Nach (Ebertshäuser, 1993) werden unterschieden:

- Spaltdichtungen und
- Berührungsdichtungen

Bei der Spaltdichtung wird der Strömungsweg so lang und schmal wie möglich konzipiert, dass der Austritt eines Mediums auf ein Minimum reduziert wird. Diese Art der Dichtungen wird verwendet, wenn ein sehr geringer Druck an der Fügung anliegt. Bei gasförmigen Druckmedien können undurchlässige Spaltabdichtungen durch Spermedien erreicht werden.

Werden höhere Anforderungen an die Leckagerate gestellt, kommen Berührungsdichtungen zum Einsatz. Der Spalt wird durch Aufbringung einer Vorspannung theoretisch vollständig geschlossen. „Werden Deckel und Körper eines Druckbehälters >>fugenlos<< zusammengesetzt, so bleiben wegen der Oberflächenunebenheiten geringfügig Fugen bestehen.“ (Ebertshäuser, 1993)

Das Abströmen des anstehenden Fluids kann hier nur durch zusätzliche Bauteile, z.B. Weichdichtungen erfolgen. Gegenüber Spaltdichtungen sind sie wirtschaftlicher und zuverlässiger.

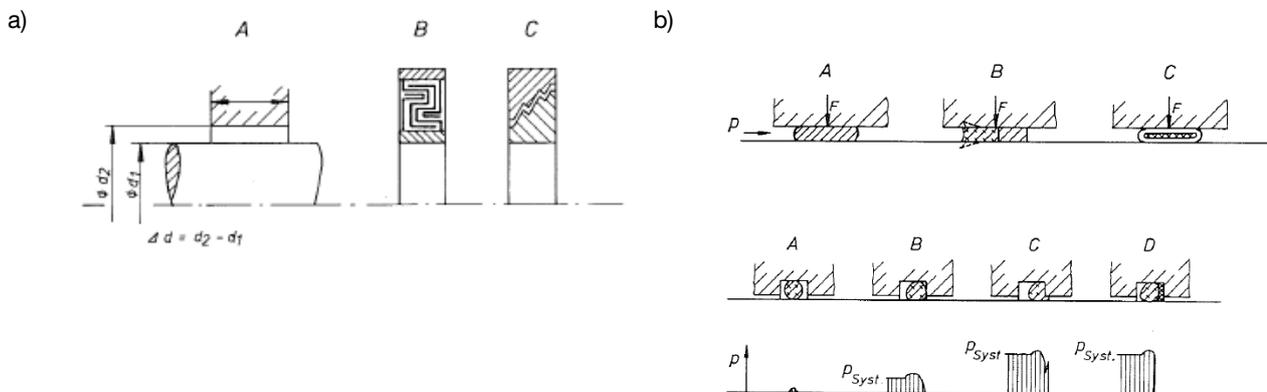


Abbildung 31: Beispiele a) Spaltdichtungen, b) Berührungsdichtungen

Die Höhe des Strömungsquerschnittes wird bei den Spaltdichtungen durch die Konstruktion und die Toleranzen der beteiligten Dichtflächen vorgegeben. Die mathematische Beschreibung der Bedingungen im Dichtspalt erfolgt mit Gleichung (3-1):

$$\dot{V} = \pi \cdot d \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot v \cdot h - \frac{1}{12} \cdot \frac{dp}{dx} \cdot \frac{h^3}{\eta} \right) \tag{3-1}$$

Die Gleichung (3-1) zeigt die Einflussfaktoren Druckgradient, Höhe des Spaltes und Viskosität des Druckmediums. Bei der Übertragung auf Fügungen im Holzbau fällt der Geschwindigkeitsterm weg.

Einen wesentlichen Schub in der Dichtungstechnik lieferte die Entwicklung der O-Ringe, die einfach in ihrer Handhabung sind. Bei der Temperaturbeständigkeit der O-Ringe müssen die Temperaturbereiche der verschiedenen Elastomer-Werkstoffe beachtet werden. Gegenüber der Langzeitbelastung von 1000 Stunden können kurzzeitig belastete Elastomere höheren Temperaturen widerstehen. Die Abbildungen 32 und 33 zeigen den richtigen Einbau von O-Ringen und die Temperaturbeständigkeit in Abhängigkeit von der Betriebsdauer.

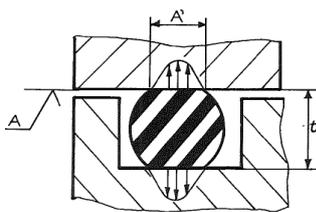


Bild 3.2.3: Querschnittsverpressung mit Anpressungsverlauf
 A' = Dichtzone
 A = Kontaktfläche, Dichtfläche
 t = Nuttiefe

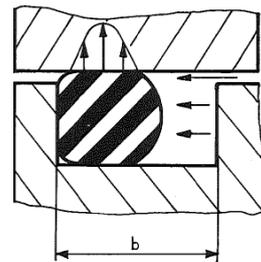


Bild 3.2.4: Der konstruktiv richtige O-Ring-Einbau, druckbeaufschlagt
 b = Nutbreite

Abbildung 32: Konstruktiv richtiger Einbau von O-Ringen, aus (Ebertshäuser, 1993)

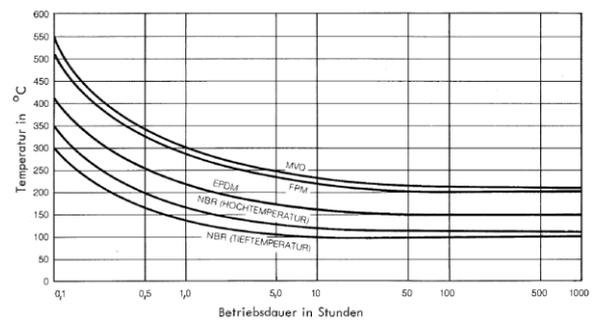
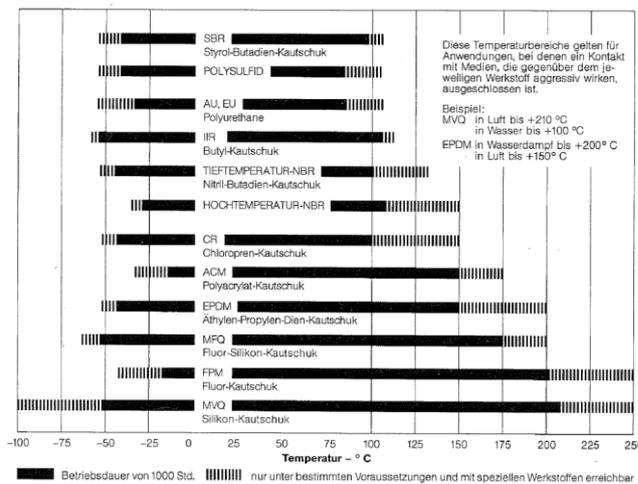


Abbildung 33: Temperaturbereiche von Elastomer-Werkstoffen unter Langzeit- und Kurzzeitbelastung, aus (Ebertshäuser, 1993)

EPDM-Dichtungen, die auch im Holzbau verwendet werden, besitzen eine Temperaturbeständigkeit unter Kurzzeitbelastung von bis zu 410°C (vgl. Abbildung 33). Bei Langzeitbeanspruchung verringert sich die Temperaturbeständigkeit auf 150°C. Im Vergleich zu EPDM-Dichtungen ist für Butyl-Kautschuk (IIR) eine geringere Temperaturbeständigkeit von ca. 115°C angegeben.

Bei den Kleinbrandversuchen (Stein, 2008) wurden zur Herstellung der Luftdichtheitsebene Klebebänder² und Silikonschnüre³ mit einem Durchmesser $d = 4 \text{ mm}$ verwendet. Entsprechend der Produktdatenblätter der Hersteller ist die Temperaturbeständigkeit für die Klebebänder bis 100°C und für das Silikon bis 120°C angegeben.

3.2 Modulares Bauen

3.2.1 Modulordnung

Die Voraussetzungen für das elementierte Bauen wurden mit (DIN 18000, 1984) geschaffen. Der grundlegende Bestandteil und Vorteil einer Modulordnung ist ein Koordinationssystem, mit dem die räumliche Lage und Größe von Bauelementen und deren Anschlussflächen festgelegt werden kann. Einzelteile müssen nicht modular sein, sondern nur die daraus erstellten Bauteile.

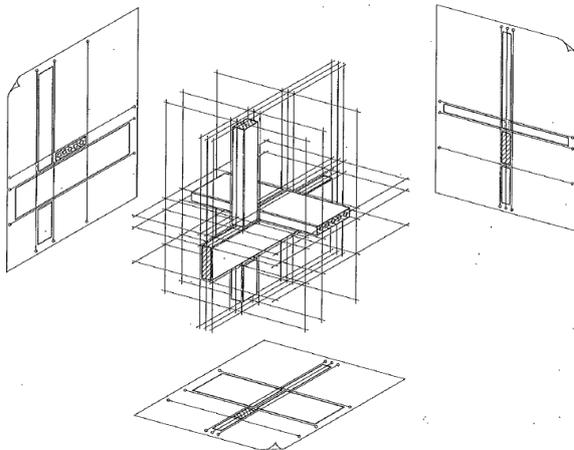
Aus dem Koordinationssystem können nachfolgend die Koordinationsräume, Koordinationsebenen und -geraden sowie -punkte abgeleitet werden (vgl. Abbildung 34). Ein modulares Raumraster baut sich als gleichmäßige Folge von Ebenen auf, deren Abstände aus einem einheitlichem Maßstab, nämlich dem Grundmodul oder dem Vielfachen eines ganzzahligen Moduls aufgebaut sind. Der Abstand der einzelnen Ebenen kann in den Dimensionsrichtungen x , y und z des Raumrasters variieren. Das Raster stellt dabei nur ein geometrisches Hilfsmittel für einen Entwurf dar. Es wird so festgelegt, dass eine optimale Funktionserfüllung der zugeordneten Bauelemente möglich ist. Das Koordinationssystem (Planungsraster) kann als beliebiges Vielfaches des Rastermaßes gewählt werden.

„Ein Koordinationssystem ist immer objektspezifisch, ein Raster immer objektneutral. Das bedeutet, dass in der Regel zunächst ein Entwurfskonzept vorhanden sein sollte, bevor ein Koordinationssystem festgelegt wird.“ (Kerschkamp & Portmann, 1988)

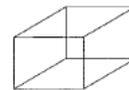
² Produkt: Siga-Sicrall® (Spezialpapier verstärkt mit PE-Schutzschicht) von der Firma Siga / 6017 Ruswil (CH)

³ Produkt: Knauf Bau-Silicon (Silikon) von der Firma Knauf / D-97343 Iphofen (D)

Koordinationsystem



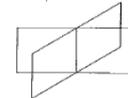
Koordinationsraum
(begrenzt von sechs Ebenen)



Koordinations Ebene



Koordinationsgerade
(Schnittlinie zweier Ebenen)



Koordinationspunkt
(Schnittpunkt dreier Ebenen)

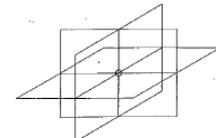


Abbildung 34: Modulares Koordinationssystem mit vertikalen und horizontalen Rasterebenen, aus DIN 18000

3.2.2 Modulkategorien

In Tabelle 6 sind verschiedene Modulkategorien aufgeführt. Konrad Wachsmann (Wachsmann, 1959) beschreibt das Modul als „abstrakte Grundeinheit eines Meßwertes, der durch Multiplikation, Subtraktion oder Division das geometrische System einer gedachten modularen Ordnung zahlenmäßig bestimmt.“

Tabelle 6: Modulkategorien nach K. Wachsmann (Wachsmann, 1959)

Modulkategorien	Abhängigkeiten und Beschreibung
Material	<ul style="list-style-type: none"> - Rohstoffmaße - Produktionstechnische Bedingungen - Qualitative Eigenschaften - Technische Anwendungsmöglichkeiten - Marktbedarf - Ökonomische Umstände
Leistung	Verhältnis von Material und günstiger Ausnutzung, im Sinne von: <ul style="list-style-type: none"> - Statischen Eigenschaften - Produktionstechnischen und wirtschaftliche Bedingungen
Geometrie	<ul style="list-style-type: none"> - Bestimmung des proportionalen Systems, indem sich Konstruktion, das einzelne Element und die gesamte Planung bewegen - Angabe der inneren Elastizität und Variationsfähigkeit der gewählten modularen Ordnung - Entwicklung dazugehöriger proportionaler Serien von Komponenten

Fortsetzung Tabelle 6:

<p>Bewegung</p>	<p>... abhängig von Bedingungen physikalischer Natur, die sich aus Transport, Lagerung und Montage auf der Baustelle ergeben</p> <p>Wesentliche Einflüsse:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Leistungsfähigkeit Hebewerkzeuge - Laderaummaße der Transportmittel - Logistik der Bauelemente - Leichte Handhabbarkeit <p>Vorgänge in der Fabrik im Sinne einer kontrollierten Bewegung wirken sich kaum auf Dimensionen der Bauelemente aus</p>
<p>Konstruktion</p>	<p>... bestimmt Beziehungen und Lage aller Bauteile, die sich als lasttragende Konstruktionselemente von den füllenden Elementen unterscheiden</p> <p>Bei einfachen System abhängig von statischen Bedingungen (Spannweite, Auskragung, Konstruktionshöhe)</p>
<p>Element</p>	<p>... bestimmt Maßverhältnisse aller Objekte mit flächendeckenden Charakteristiken</p> <ul style="list-style-type: none"> - undurchsichtige und durchsichtige Elemente, Rahmenelemente, gekrümmte Elemente, in den Raum entwickelte, dreidimensionale Elemente, last- und nichtlastabtragende Elemente, bewegliche und unbewegliche Elemente
<p>Verbindung</p>	<ul style="list-style-type: none"> - bestimmt die Position jedes direkten Anschlusspunktes, in Abhängigkeit des gewählten Systems der tragenden Konstruktion und der füllenden Elemente - symmetrisches oder asymmetrisches Verhältnis zu den Moduln der Konstruktion und der Elemente
<p>Komponenten</p>	<p>... bestimmt Proportion der zusätzlichen Teile, die nicht in den Kategorien Konstruktion und Elemente enthalten sind, z.B. Treppen</p>
<p>Toleranz</p>	<p>... bestimmt Position der Verbindungen, die in notwendigen Intervallen Maßverschiebungen erlauben, die durch Akkumulation kleiner Ungenauigkeiten entstanden sind, auszugleichen</p> <p>Abhängig von:</p> <ul style="list-style-type: none"> zulässiger Unterbrechung der Konstruktionen mit elastischen Zonen, ohne das Gefüge in seiner Festigkeit zu stören <p>Mittel des Ausgleichs:</p> <ul style="list-style-type: none"> - korrigierende Komponenten - mechanische Korrekturen - zeitliche Disposition (Verbindung von Elementen in Gruppen in Intervallen mit nachfolgender endgültiger Verbindung in den durch Toleranzmodule festgelegten Gebieten)
<p>Installation</p>	<p>... bestimmt die Beziehung der Lage der vier Hauptkategorien Rohr, Kabel, Schacht und Anschluss im gesamten Systemgefüge des Bauwerks</p> <p>Weitere Unterteilung: Licht, Kommunikation, Heizung, Kühlung, Ventilation, Kalt- und Warmwasser, Zuleitung, Ableitung, Gas, Luft</p>

Fortsetzung Tabelle 6:

Einrichtung	... bestimmt dimensionale, proportionale Ordnung aller fest eingebauten zusätzlichen Gegenstände und Objekte, die nicht Teil der Konstruktion sind, z.B. Einbauschränke, Küchen- und Badezimmersausstattung
Planung	... ist Summe aller Resultate, zu denen die Untersuchungen in den Modulkategorien geführt haben ... können, aber müssen nicht Achsenlinien sein ... müssen gedachte Ordnung eines Systems bestimmen

Der Grundmodul wird im Holzbau in der Grundrissebene nach dem oktametrischen Maßsystem mit 12,5 cm angegeben. Ausgehend von diesem Grundmodul M werden Multimodule 3 M, 6 M und 12 M bestimmt. Die Festlegung bestimmter Maßwerte aus den Modulreihen als Vorzugsmaße richtet sich nach der optimalen Größe der Bauelemente der verschiedenen Subsysteme (z.B. Trag- und Ausbausystem).

Der Grundmodul basiert wie auch im Massivbau auf den Abmessungen der handelsüblichen Einbauelemente. Die Höhenmaße dagegen können keinem einheitlichen Raster zugeordnet werden. Sie richten sich zum einen nach den handelsüblichen Abmessungen der Beplankungs- und Bekleidungsmaterialien und zum anderen nach der erforderlichen Aufbauhöhe der Decken, bestehend aus Roh- und Ausbaukonstruktion. (BDZ, 2007)

3.2.3 Bezugsebenen

Nach Ackermann können „...Maße aus zwei Gesetzmäßigkeiten abgeleitet werden:

1. Maße, die Bezug zwischen den Teilen des Bauwerks herstellen.
2. Maße, die ihre Bedingungen aus der Eigengesetzlichkeit des Baumaterials haben. Sie ergeben sich aus den natürlichen Gegebenheiten des Materials, Transportgrößen und Möglichkeiten der Verarbeitung des Baustoffes.“ (Ackermann, 1993)

Für die Maßkoordination der Teile des Bauwerks, d.h. der Bauelemente zum Raster, gibt es die Möglichkeiten der Anordnung im Achs- und Grenzbezug sowie neben den Rasterlinien.

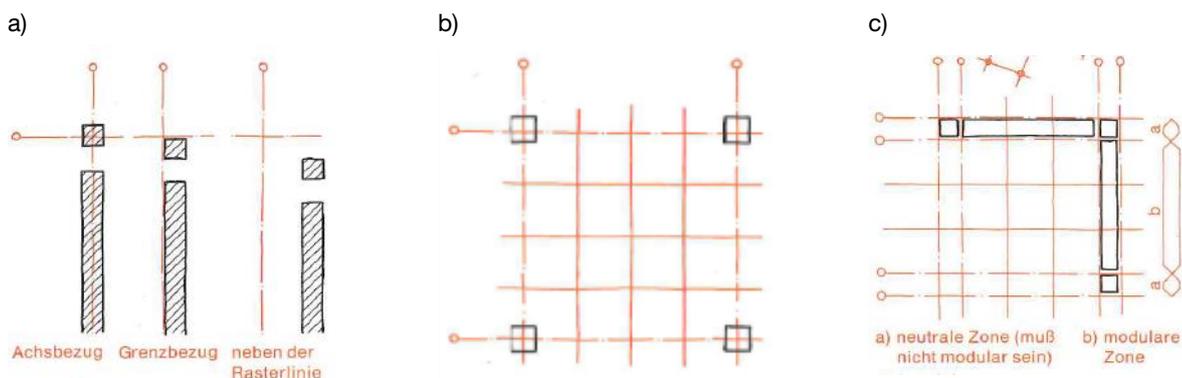


Abbildung 35: Zuordnung vom Bauelement zum Raster (Bezugsebenen)

a) Möglichkeiten, b) Bauelemente im Achsbezug, c) Bauelemente im Grenzbezug

Aus der Erfahrung heraus ist es vorteilhaft stabförmige Bauteile, z.B. des Skelettbaus, im Achsbezug anzuordnen (vgl. Abbildung 35b). In diesem Fall wird die Schnittlinie zweier Koordinationsebenen mit der Mittelachse der Stützen zusammengelegt. Die Dimension der Bauteile wird im Raster nicht aufgegriffen. Ordnet man dagegen gleichlange Wandelemente im Achsbezug an, entstehen Überschneidungen an Ecken, Abzweigungen und Kreuzungen. Diese Verkürzungen der Wandelemente führen zu Sonderelementen, die im Zuge des industrialisierten Bauens möglichst zu vermeiden sind. Abhilfe schafft hier die Ausbildung eines Bandrasters (vgl. Abbildung 35c). Durch diese Variante der Rasterausbildung können Material- und Freizonen definiert werden. Im Bereich des Bandes werden Wandelemente einschließlich der enthaltenen Öffnungen platziert. Die von den Materialzonen umschlossenen neutralen Zonen (Freizonen) dienen der Ausweisung des nutzbaren Raumes im Gebäude, einschließlich möglicher Untergliederungen, z.B. Einbauten. Die Dimension des Bandes richtet sich nach der Breite der gerasterten Bauelemente, welche abhängig von den jeweiligen Konstruktionsstufen, z.B. der Tragwerks- oder Ausbauelemente, ist. Der Grenzbezug der Bauelemente erfordert einen erhöhten Aufwand in der Knotenkonzipierung.

Bei Überlagerungen mehrerer Raster wird ein Haupt- und Nebenraster (auch Primär- und Sekundärraster) definiert. Der Haupt- und Nebenraster entsteht durch unterschiedliche Anforderungen an die geometrische Modulation oder Vorrangigkeit des Systems.

3.2.4 Rasterkategorien

Nach (Ackermann, 1993) werden folgende Raster als Ordnungssystem durch die Bauplanung geführt:

1. Nutzungsraster

... wird aus der Nutzung möglichst gleich großer Teile abgeleitet, infolge dessen sich die Raumgrößen ergeben.

2. Tragwerksraster

... bestimmt die Lage der tragenden Teile der Konstruktion, z.B. Stützen, Geschossdecken und tragende Wände.

3. Ausbauraster

... bestimmt die Position der Teile des Ausbaus, z.B. Trennwände, abgehängte Decke, und Außenwände, soweit sie nicht zur tragenden Konstruktion gehören. Eingeschlossen sind auch Tür- und Brüstungshöhen sowie lichte Raumhöhen.

4. Installationsraster

... bestimmt die Lage der Installationen zur Ver- und Entsorgung des Gebäudes. Er legt die geometrische Zuordnung von verschiedenen Installationsstraßen im Deckenhohlraum, die horizontale und vertikale Verteilung und die Lage der Verbrauchsstellen fest.

3.2.5 Toleranzen

Die ortsunabhängige Vorfertigung von Produkten in verschiedenen Fertigungsstätten erfordert eine Planung der zulässigen Toleranzen. Die Maße der Modulreihen können nicht ohne Berücksichtigung geplanter Ausgleichsmöglichkeiten von Ungenauigkeiten übernommen werden.

Die Abmessungen der Elemente sind dabei um ein bestimmtes Istmaß kleiner oder größer als ihr modulares Nennmaß. In der Fertigung ist das in den Zeichnungen eingetragene Nennmaß bei wirtschaftlich vertretbarem Aufwand nur mit einer bestimmten Genauigkeit erzielbar. Für die Herstellung wird ein Spielraum (Toleranz) für das Maß des zu fertigenden Werkstücks (Grenzabmaß) vorgegeben.

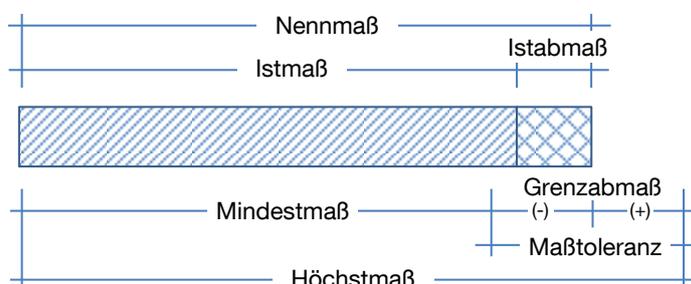


Abbildung 6: Begriffe zu Herstellungstoleranzen

Durch die Einhaltung der Toleranzen wird ein funktionsgerechtes Zusammenfügen von Bauelementen des Roh- und Ausbaus, ohne nachträgliche Anpassungsarbeiten infolge der Größe, Gestalt und Lage von Bauteilen in Bauwerken ermöglicht.

Die Maßtoleranzen können in folgende Toleranzarten eingeteilt werden:

- Maßtoleranzen der Fertigung
- Maßtoleranzen der Montage
- Maßtoleranzen der Absteckung oder des Aufmaßes am Bau
- Maßtoleranzen durch Formänderungen von Bauteilen (Temperaturdehnung, Schwinden, Kriechen)

In (DIN 18202, 2013) sind baustoffunabhängige Toleranzen festgelegt, die beim Einsatz in Bauwerken eingehalten werden müssen. Die normativ angegebenen Toleranzen stellen die für Standardleistungen erreichbare Genauigkeit dar. Andere Genauigkeiten können von den am Bau Beteiligten zusätzlich vereinbart werden. Die Einhaltung hoher Genauigkeitsanforderungen führt zu einem erhöhten Herstellungsaufwand, der technisch begründbar sein muss.

Tabelle 7: Grenzabmaße im Grund- und Aufriss (Auszug aus DIN 18202, Tabelle 1)

Zeile	Bezug	Grenzabweichungen in mm bei Nennmaßen in m			
		über 1,0 bis 3,0	über 3,0 bis 6,0	über 6,0 bis 15,0	über 15,0 bis 30,0
1	Maße im Grundriss, z.B. Längen, Breiten, Achs- und Rastermaße	± 12	± 16	± 20	± 24
2	Maße im Aufriss, z.B. Geschosshöhen	± 16	± 16	± 20	± 30
3	Lichte Maße im Grundriss, z.B. Maße zwischen Stützen	± 16	± 20	± 24	± 30
4	Lichte Maße im Aufriss, z.B. unter Decken	± 20	± 20	± 30	--

Tabelle 8: Grenzwerte für Winkelabweichungen (Auszug aus DIN 18202, Tabelle 2)

Zeile	Bezug	Stichmaße als Grenzwerte in mm bei Nennmaßen in m			
		über 1 bis 3 m	über 3 bis 6	über 6 bis 15	über 15 bis 30
1	Vertikale, horizontale und geneigte Flächen	8	12	16	20

Tabelle 9: Grenzwerte für Ebenheitsabweichungen (Auszug aus DIN 18202, Tabelle 3)

Zeile	Bezug	Stichmaße als Grenzwerte in mm bei Nennmaßen in m			
		1,0	4,0	10,0	15,0
1	Nichtflächenfertige Oberseiten von Decken	15	20	25	30
2a	Nichtflächenfertige Oberseiten von Decken zur Aufnahme von Bodenaufbauten	8	12	15	20

Die vorgegebenen Maßtoleranzen müssen auch bei Mischbauweisen eingehalten werden. Das gilt auch für ein vor Ort hergestelltes Tragwerk an dem vorgefertigte Ausbauelemente befestigt werden. Das führt dazu, dass Bausysteme immer auch Ausgleichselemente beinhalten. Je integrativer die Anschlussprobleme gelöst werden, umso vielfältiger wird die Anwendbarkeit des Systems. Werte für zeit- und lastabhängige Verformungen, auch aus Temperaturänderungen, sind gesondert zu berücksichtigen. Speziell für vorgefertigte Holzbauteile sind Grenzabweichungen in (DIN 18203-3, 2008) angegeben.

Tabelle 10: Grenzabweichungen für Träger, Binder und Stützen (Auszug aus DIN 18203-3, Tabelle 1)

Zeile	Träger, Binder, Stützen		Messbezugsfuchte [%]	Grenzabweichungen in mm bei Nennmaßen in m						
				bis 0,1	über 0,1 bis 0,4	über 0,4 bis 0,8	über 0,8 bis 2,0	über 2,0 bis 6,0	über 6,0 bis 20,0	
1	Breite und Höhe	Vollholz	Sägerauh	20	+3 -1 ^a	+4 -2 ^a	--			
2			Gehobelt, egalisiert		± 1 ^b	± 1,5 ^b	--			
3		Holzwerkstoffe		10	± 1 ^b	± 1,5 ^b	--			
4		Zusammengesetzte Querschnitte		20	wie Vollholz		+5 -2	+6 -3	+8 -4	--
5		Balkenschichtholz		15	± 1 ^b	± 1,5 ^b	--			
6		Einteilige Brett-schicht-Holzbauteile ^d	Breite	12	± 2 ^c		+1 % -0,5 %			--
			Höhe		+4 -2 ^c					
7	Längen und Abstände (z.B. zwischen Bohrungen)		wie Zeilen 1 bis 6	± 2 ^c			± 0,1 % ^c			

^a entspricht DIN EN 336: 2003-09, Maßtoleranzklasse 1
^b entspricht DIN EN 336:2003-09, Maßtoleranzklasse 2
^c entspricht DIN EN 390:1995-03
^d Brettschichtholz wird zunehmend auch flachkant eingesetzt (z.B. als BS-Holz-Decke). Die Höhe wird immer senkrecht und die Breite immer parallel zu den Flächenverklebungen gemessen.

Tabelle 11: Grenzabweichungen für Tafeln (Auszug aus DIN 18203-3, Tabelle 2)

Zeile	Tafeln	Mess- bezugs- feuchte [%]	Grenzabweichungen in mm bei Nennmaßen in m				
			bis 0,1	über 0,1 bis 0,4	über 0,4	bis 1,0	über 1,0
1	Breite, Höhe (Kantenlänge) und Öffnungen	Siehe Zeile 1 bis 6 aus Tabelle 1	--	--	--	± 2	± 2 % des Nennmaßes Max. ± 5
2	Dicke		+2 -1	+3 -2	+4 -2	--	--

Für die Winkelabweichungen in der Länge, Breite und Dicke von Holztafeln wird auf die Maßtoleranzen in DIN 18202 verwiesen.

3.3 Konstruktionsprinzipien

3.3.1 Grundlagen

Die Konstruktion eines Bauwerks setzt sich aus den Teilaspekten Tragwerk, Raumabschluss bzw. -begrenzung und Haustechnik zusammen. Die Anforderungen, die an die Arbeitsfelder gestellt werden, gehen differenziert in die Konstruktion ein. In der Regel wird in einem ersten Schritt das Tragwerk im vorliegenden Grund- und Aufriss entwickelt. Die Bestimmung der Tragwerkselemente zur Aufnahme der Einwirkungen, u.a. Eigen-, Nutz- und Windlasten bedingen noch keine Abgeschlossenheit eines Raumes zu einem anders genutzten Raum oder der Gebäudehülle zur äußeren Umgebung, z.B. Skelettbausysteme. Für den Raumabschluss bzw. -begrenzung wird zwischen einem Innen-/Außen und Innen-/Innenbezug unterschieden. An die Bauteile werden Anforderungen gestellt, die sich aus den äußeren und inneren nutzungsbedingten Randbedingungen ergeben.

Zu den vorgenannten Aspekten treten haustechnische Installationen, die in den Raumabschluss bzw. die -begrenzung eingreifen.

Die äußere geometrische Form der Bauteile bildet dabei die Basis für die drei Teilaspekte. Üblich ist die Verwendung ebener flächiger Bauteile. Eine weitere Aufgliederung der äußeren geometrischen Form erfolgt in die innere Struktur mit der Ausbildung von Funktionsschichten.

3.3.2 Tragwerk

3.3.2.1 Tragelemente und Aussteifung

Jedes Tragelement besitzt drei Dimensionen. Vernachlässigt man z.B. bei einem Stab die Höhe und Breite gegenüber der Länge ($h, b \ll l$), erhält man ein linienförmiges eindimensionales Tragelement. Die Unterscheidung nach der Form führt zur Einteilung in punkt-, linien-, flächen- und raumförmige Elemente. Aus der Struktur der inneren Geometrie kann durch Addition, Knicken und Krümmen ein Element der nächsthöheren Dimension gebildet werden. (Führer, Ingendaaij, & Stein, 1984)

In Abbildung 36 erfolgt eine Einteilung der Tragwerkselemente nach:

1. der äußeren Geometrie, der Form und der inneren Geometrie der Struktur sowie
2. den Beanspruchungen, für die sie ausgelegt sind.

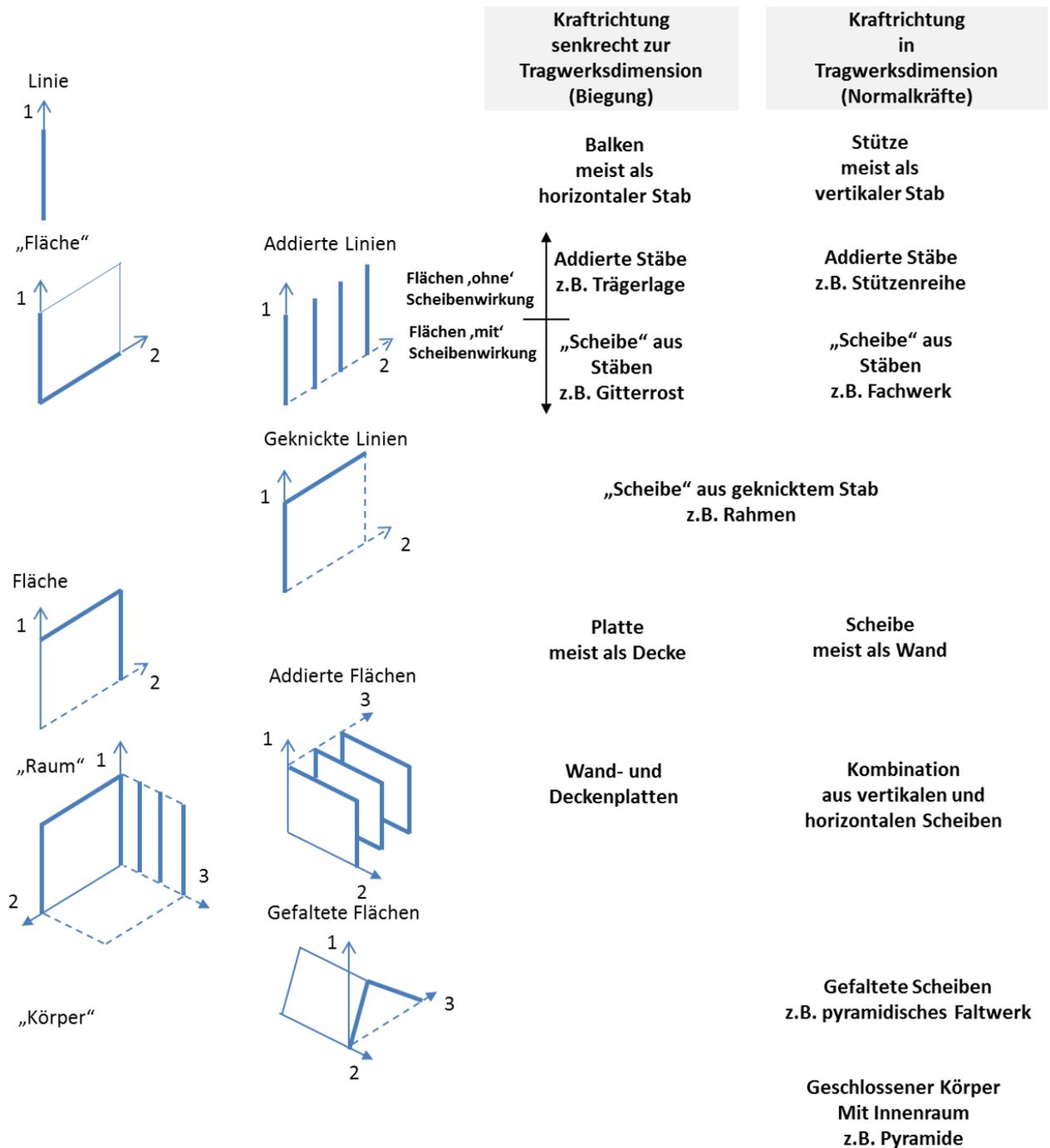


Abbildung 36: Einteilung der Tragwerkselemente aus (Führer, Ingendaaij, & Stein, 1984), ohne gekrümmte Linien und Flächen

„Ein ‚Raum‘ wird gebildet durch Kombination von vertikalen und horizontalen Scheiben, die echte oder simulierte Flächen sein können.“ (Führer, Ingendaaj, & Stein, 1984) Die Grundelemente bilden Stab, Platte, Scheibe und Körper. In den seltenen Fällen besteht die Konstruktion nur aus einer der genannten Elementarten.

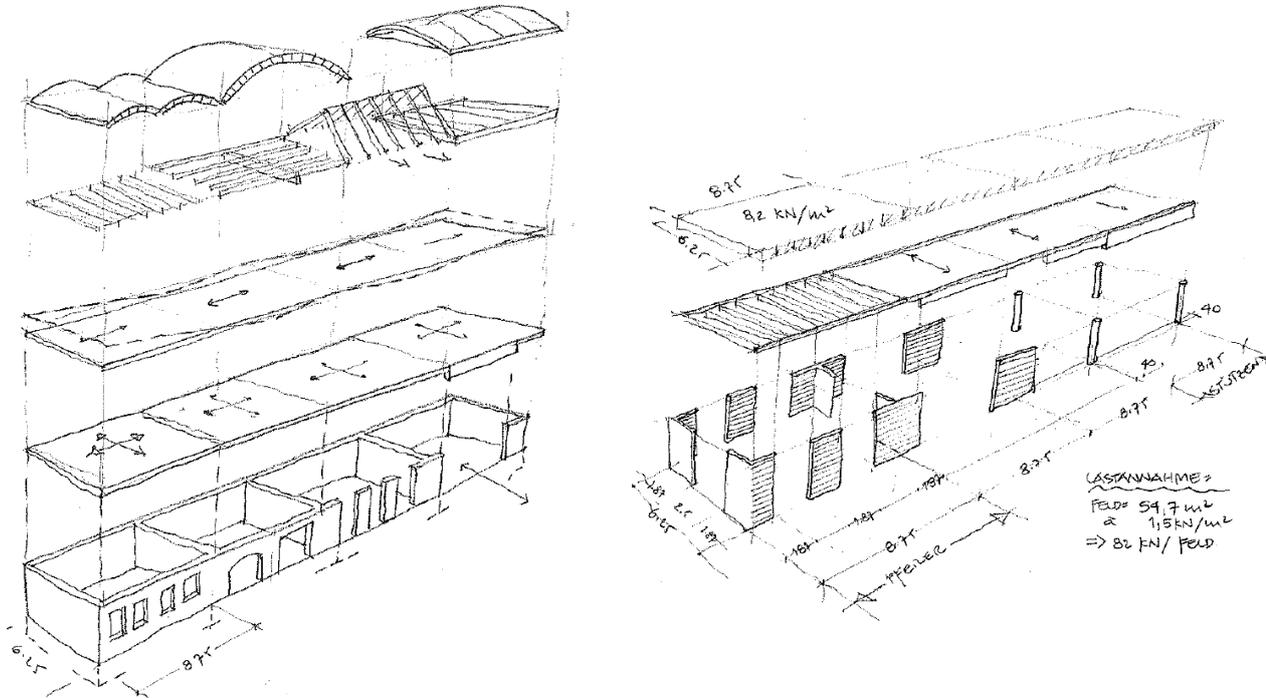


Abbildung 37: Räumliches Tragwerk in Massivbauweise (links) und Skelettbauweise (rechts) aus verschiedenen Tragwerkselementen, u.a. Stäbe, Platte und Scheibe aus (Hauschild, 2003)

Die Mindestaussteifung eines Raumes wird hergestellt, wenn eine horizontale (Decken-)Scheibe und mindestens drei vertikalen Scheiben vorhanden sind. Die vertikalen Scheiben dürfen sich dabei nicht in einem Punkt schneiden und nicht alle parallel zueinander stehen. Ohne Deckenscheibe müssen mindestens vier Wandscheiben vorhanden sein, von denen sich nicht mehr als jeweils zwei Scheiben in einem Punkt schneiden.

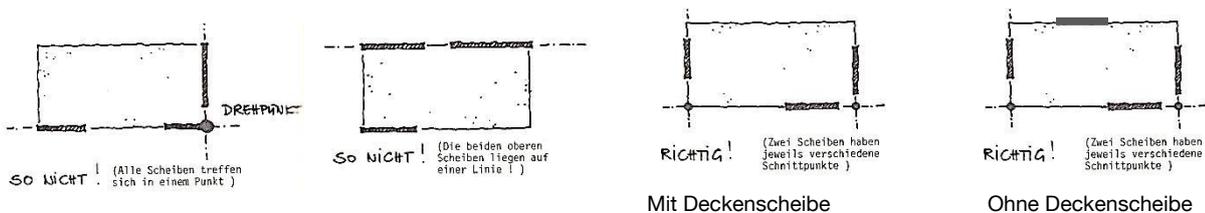


Abbildung 38: Räumliche Mindestaussteifung, aus (Führer, Ingendaaj, & Stein, 1984)

3.3.2.2 Tragsysteme

Elemente und ihre Anordnung charakterisieren das Konstruktionsprinzip. Bei Geschossbauten wird nach der geometrischen Form zwischen Scheiben- und Skelettbauten unterschieden. Nach der Ausrichtung der Scheiben und Träger lassen sich längs und quer gerichtete sowie gekreuzte Systeme entwickeln. Hinzu tritt die Ausführung von trägerlosen punktgestützten Systemen bei Skelettbauten.

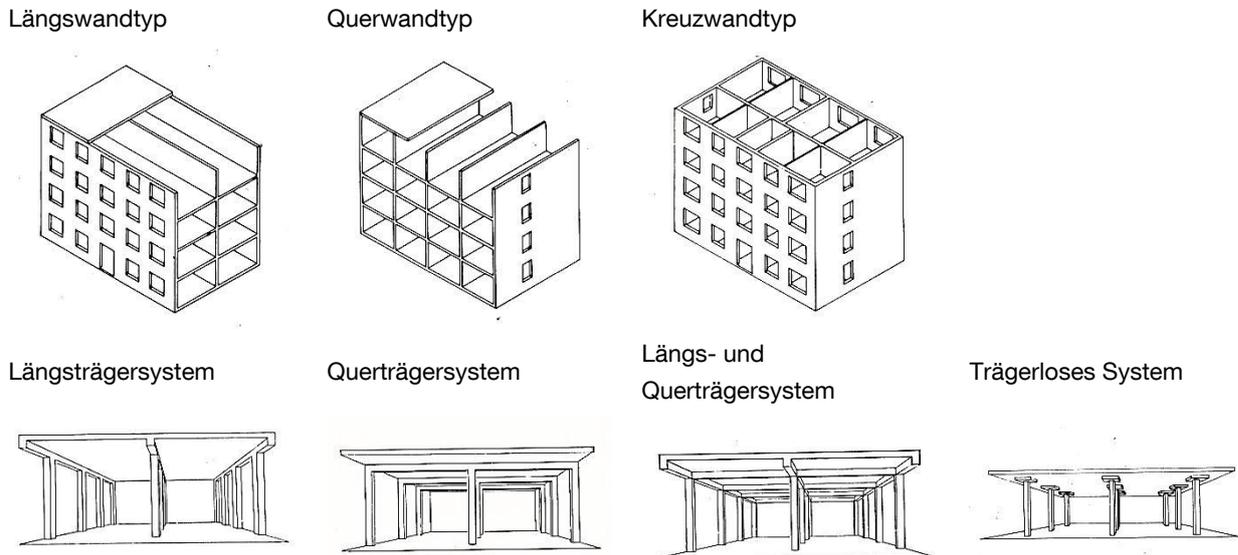


Abbildung 39: Konstruktionsprinzipien und Tragsysteme, aus (Ackermann, 1993)

Der Aufbau innerhalb des Deckensystems lässt sich entsprechend der Anordnung der Platte gegenüber den Haupt- und Nebenträgern gliedern. Das Verhältnis der Plattenabmessungen und die Art der Auflagerung bestimmt, ob die Platte die Lasten ein- oder zweiachsig abträgt.

Bei den Holz-Verbundsystemen (Rippen- und Hohlkastendecken) erhalten die stabförmigen Tragwerksteile (Balken) mit den flächigen Tragwerksteilen (Platte) eine kraftschlüssige Verbindung, wodurch die Tragfähigkeit und Steifigkeit erhöht wird. Die Verbindungsfuge vorgefertigter aneinandergereihter Deckenelemente muss, wenn eine Scheibenwirkung erforderlich ist, entsprechende Schubkräfte aufnehmen.

3.3.2.3 Anschlussausbildungen

Mögliche Anschlussausbildungen von linearen und flächigen Tragwerkselementen sind nachfolgend dargestellt. Die Anschlüsse von linearen Elementen untereinander werden nicht weiter verfolgt, da sie keine raumabschließende Wirkung besitzen.

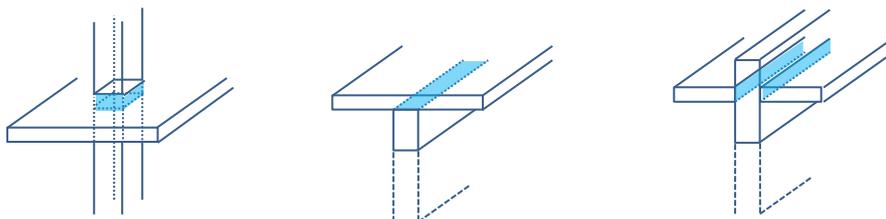


Abbildung 40: Beispielhafte Darstellung der Fügungen von Tragwerkselementen

An den Anschlüssen werden Fugen generiert, die brandschutztechnisch bewertet werden müssen. Ebene Anschlussflächen bilden ebene Fugen, die entsprechend der vorhandenen Maßtoleranzen eine entsprechende Breite besitzen. Die minimale Fugentiefe ergibt sich aus den Abmessungen der Bauteile. Weitere Fugenformen können geknickt bzw. abgetrepppt oder gekrümmt sein (siehe Kapitel 6.1).

3.3.2.4 Holzbauweisen und -systeme

Um qualitativ hochwertige Bauwerke mit geringen Toleranzen zu erstellen, wurden Fertigungsprozesse entwickelt, die bei Wohn- und Bürogebäuden in der Regel in einem Herstellwerk durchgeführt werden. Dabei wird nicht allein auf die industrielle Vorfertigung gesetzt, sondern auch die Möglichkeiten der handwerklichen Vorfertigung unter Verwendung von computergestützten Planungs- und Fertigungsmethoden mit einbezogen. Der Unterschied zwischen industrieller und handwerklicher Vorfertigung wird dabei in dem Vorfertigungsgrad, der Modulation der Elemente und den eingesetzten technischen Methoden gesehen. Die Gemeinsamkeit besteht in der Einhaltung hoher Qualitäts- und Güteansprüche, deren Umsetzung im Rahmen der bauaufsichtlichen Anforderungen nach Bauregelliste A Teil 1, lfd. Nr. 3.3.2.2 „Beidseitig bekleidete oder beplankte nicht geklebte Wand-, Decken- und Dachelemente, z. B. Tafелеlemente für Holzhäuser in Tafelbauart“ und A Teil 2, lfd. Nr. 2.44 „Hochfeuerhemmende Bauteile, deren tragende, aussteifende und raumabschließende Teile aus Holz oder Holzwerkstoffen bestehen und die allseitig eine brandschutztechnisch wirksame Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen haben“ sowie auf freiwilliger Basis in einer RAL-Gütegemeinschaft von einer unabhängigen Institution überwacht und zertifiziert wird.

In Abbildung 41 sind verschiedenartige Holzbauweisen dargestellt, die sich zwischen handwerklicher und industrieller Herstellung bewegen. Die Bauweisen zeichnen sich durch ihre besondere Art und Weise der Konstruktionsherstellung aus.

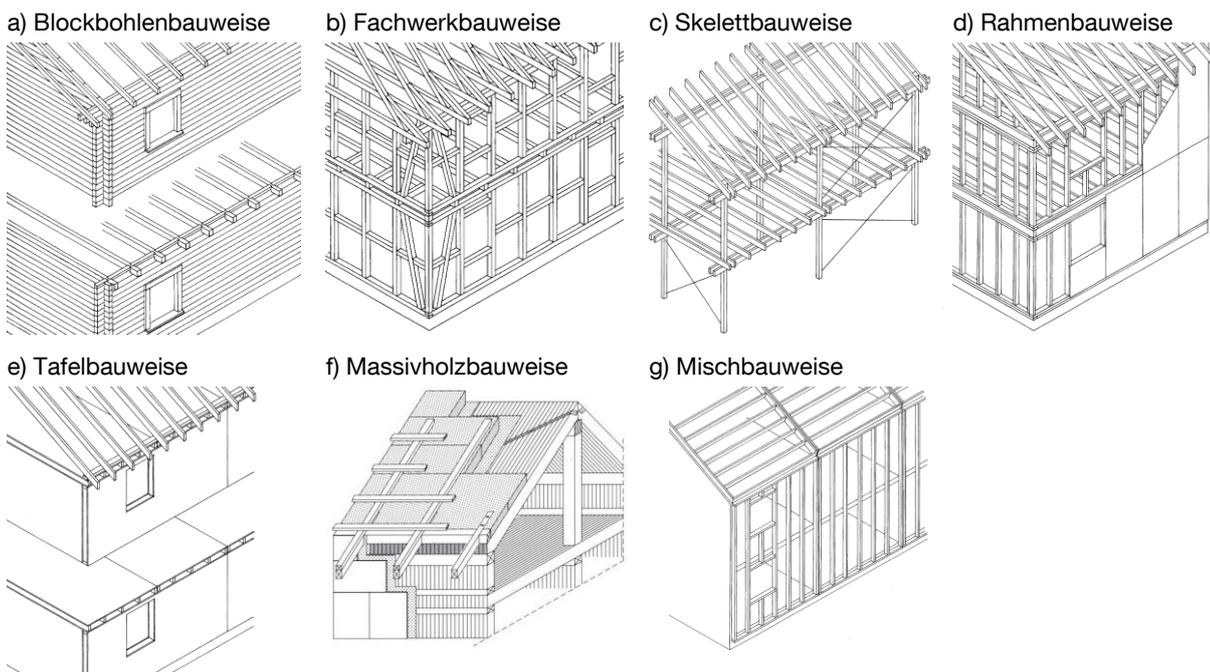
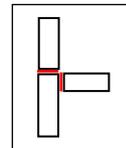
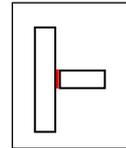
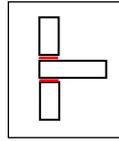


Abbildung 41: Schematische Darstellung der Bauweisen, Bilder a bis f entnommen aus (Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, 1998)

Eine weitere Unterscheidung kann nach der Montageart erfolgen, welche die Lage der objektbezogenen Anschlussfugen vorgibt.

- Plattform-Bauweise
→ geschossweise Auflagerung der Decken auf Wänden
- Balloon-Bauweise
→ geschossweise Anbindung der Decken an mindestens zweigeschossige Wände
- Quasi-Balloon-Bauweise
→ geschossweise Anbindung der Decken an geschossübergreifende Wand



Um die Wettbewerbsfähigkeit des Holzbaus zu erhalten bzw. weiter auszubauen wird eine ständige Rationalisierung angestrebt. Dieser Prozess spiegelt sich in der Entwicklung von innovativen Holzbauprodukten, computergestützten Planungs- und Fertigungsmethoden sowie erweiterten Montagetechniken wieder. Vor allem computergestützte Planungs- und Fertigungsmethoden führen heute nicht mehr zwangsläufig zu Serienbildungen gleicher Elemente. Elemente können im Gesamtgefüge entwickelt, gefertigt und montiert werden. Der Weg weist dabei vom stabförmigen System in Richtung der flächigen Systeme.

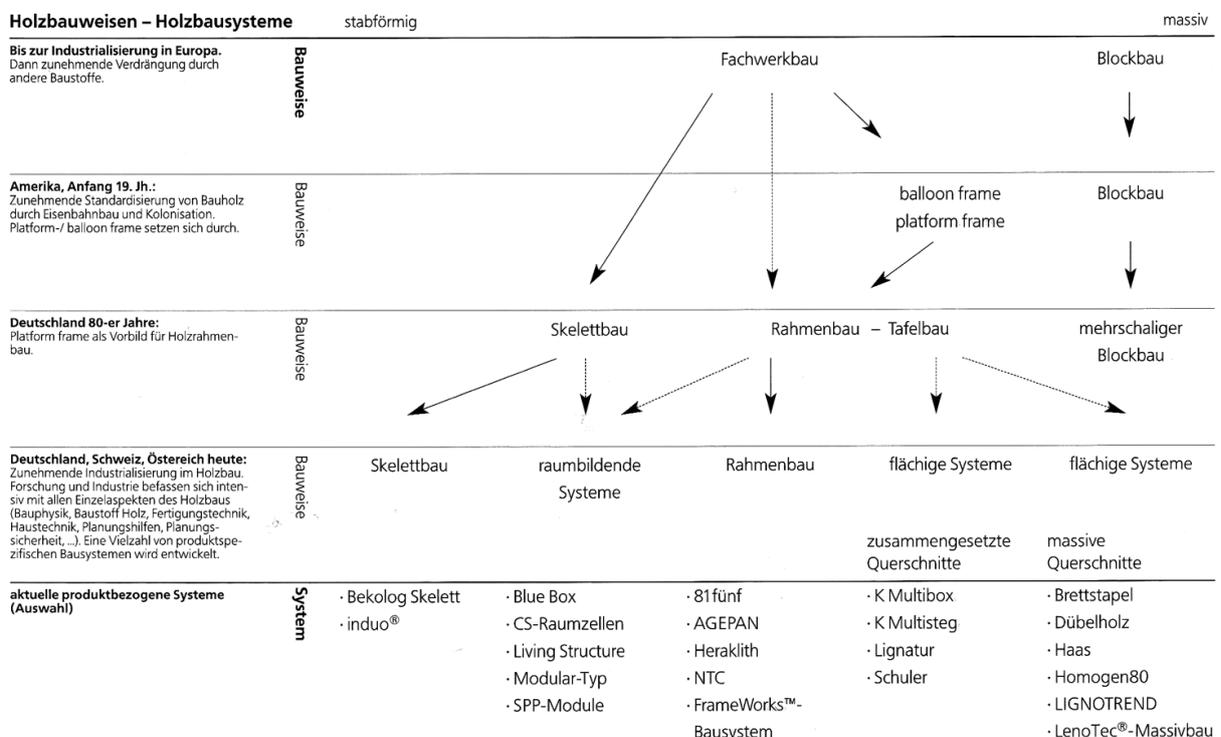


Abbildung 42: Typologische Entwicklung der Holzbauweisen und Systeme, aus (Cheret, Grohe, & Müller, 2000)

Der Schritt von der Bauweise zum System wird getan, wenn für die Integration weiterer Teilaspekte, u.a. Bauphysik und Haustechnik eine umfassende Produktkonzeption vorliegt. Die aktuell vorhandenen Holzbausysteme sind in der Regel als offene Systeme mit objektbezogenen Modulen (Wand, Decke und Dach) konzipiert. (Cheret, Grohe, & Müller, 2000)

Geschlossene Systeme, wie das in den Nachkriegsjahren von Wachsmann (Wachsmann, 1959) entwickelte ‚General Panel System‘ konnten sich aufgrund der begrenzten Auswechslungs-, Ergänzungs- und Erweiterungsmöglichkeiten am Markt nicht durchsetzen.

Abbildung 43 zeigt eine systematische Einteilung der Wand- und Deckensysteme im Holzbau.

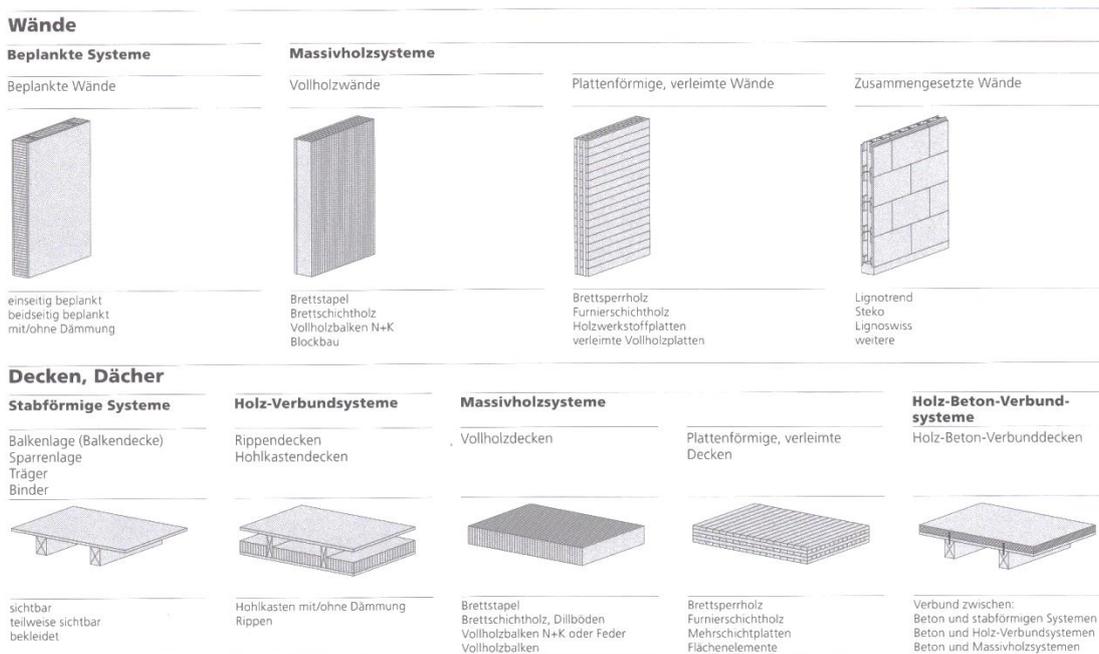


Abbildung 43: Übersicht Wand- und Deckensysteme aus (Kolb, 2007)

Die Entwicklung der Systeme erfolgt nach funktionalen Anforderungen, welche die Module und Elemente des Systems bzw. deren Funktionsschichten und damit das System selbst aufnehmen müssen. Die Aufnahme weiterer Funktionen führt zur Modifizierung bestehender Bauteile und zur weiteren Differenzierung der einzelnen Teile der Systeme, wodurch die Komplexität eines Bauwerks als Summe seiner Teile und Systeme zunimmt. (Staub, Dörrhöfer, & Rosenthal, 2008)

3.3.3 Raumabschluss bzw. -begrenzung

3.3.3.1 Begrenzungssysteme

Die Anforderungen an raumabschließende Bauteile, die den Außen- oder angrenzenden Innenraum abgrenzen, ergeben sich aus der Nutzung, Konstruktion und Form. Nach (Ackermann, 1993) können prinzipiell zwei Gruppen von Begrenzungssystemen unterschieden werden:

- Raumabschluss mit Innen-Außen-Beziehung
- Raumabschluss mit Innen-Innen-Beziehung

Tabelle 12: Begrenzungssysteme (Ackermann, 1993)

	Beziehung Innen-Außen	Beziehung Innen-Innen
Vertikal	Außenwand Fassade	Raumtrennwände
Horizontal	Bodenplatte Flachdach	Geschossdecken
Geneigt	Geneigte Dächer	Geneigte Decken

Tabelle 13: Wesentliche Anforderungen an innere und äußere Abschlüsse in Abhängigkeit von Konstruktion, Nutzung und Form (Ackermann, 1993)

Bezug	Nutzung	Konstruktion	Form
Außen	Raubegrenzung Lebensdauer Unterhalt Alterung Schutz vor Witterung und Immissionen	Lastabtrag Fertigung Montage Demontage	Erscheinungsbild Maßstäblichkeit Detailausbildung Oberfläche Farbe
Innen	Belichtung Ausblick Möblierbarkeit Raumklima Flexibilität Variabilität Sonnenschutz	Herstellbarkeit Montage Trennwandanschlüsse Schutz vor Emission (Schall und Dampf)	Raumwirkung Optischer Anschluss Gliederung Licht, Schatten Oberflächenbeschaffenheit

3.3.3.2 Einwirkungen

Die Reihenfolge der Bauteilschichten wird vorrangig durch die hygrothermische Beanspruchung entsprechend der aktuellen Anforderungen an hohe Dämmstandards, die luft- und winddichte Gebäudehülle sowie rationeller und dauerhafter Anschlüsse der Bauelemente bestimmt. (Kolb, 2007) Durch Einhaltung der Standards soll ein behagliches und hygienisches Raumklima geschaffen werden.

Die physikalischen Grundlagen des Wärme- und Feuchtetransportes sowie der Schallausbreitung, die der Bauphysik zugrunde liegen, werden für Bauwerke so aufbereitet, dass brauchbare Aussagen bezüglich ihres thermischen und feuchtemäßigen Verhaltens möglich sind.

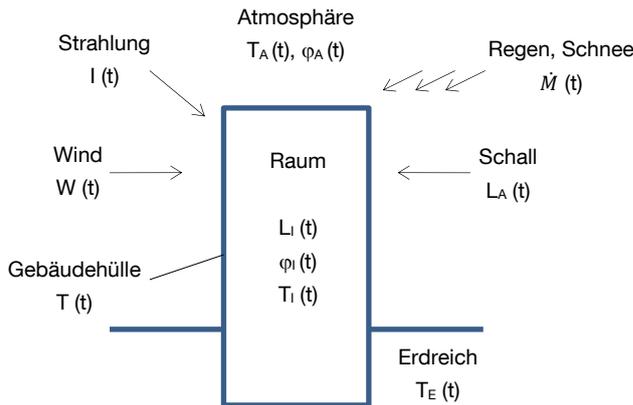


Abbildung 44: Einwirkende Lasten auf ein Gebäude (Innen-/ Außenbezug) aus (Hilbig, 1999)

3.3.3.3 Luft- und Winddichtheit

Gemäß EnEV § 6 wird gefordert, „...dass zu errichtende Gebäude so auszuführen sind, dass die wärmeübertragende Umfassungsfläche einschließlich der Fugen dauerhaft luftundurchlässig entsprechend den anerkannten Regel der Technik ist“. Die Anforderungen an die Luftdichtheit der Gebäudehülle sollen insbesondere dazu beitragen, unnötige Wärmeverluste und Bauschäden zu vermeiden. Darüber hinaus ist der Einfluss der Luftdichtheit auf Aspekte wie z.B. Schallschutz, Brandschutz, Feuchteschutz und Behaglichkeit zu beachten. (Kuhnhenne, 2009) Die Winddichtheit stellt sicher, dass keine Außenluft in die äußere Schicht der Konstruktion eindringen und damit eine Auskühlung dieser Bereiche bewirken kann. Zur Bewertung der Dichtheit des Gebäudes wurde der sogenannte „Blower Door-Test“ entwickelt. Die maßgebende Kenngröße des Blower Door-Tests ist die Luftwechselrate n_{50} . Die Größe beschreibt die Luftwechselrate bei einer mechanisch erzeugten Druckdifferenz von 50 Pa.

$$n_{50} = \frac{\dot{V}_{50}}{V} \tag{3-2}$$

Mit steigender Gebäudeeffizienz nehmen auch die Anforderungen an die Luftdichtheit zu. Wird die Luftdichtigkeit mit einer Blower Door-Messung nachgewiesen, werden nach Energieeinsparverordnung (EnEV) und DIN 4108-7 Anforderungen an die Luftwechselrate n_{50} gestellt (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Luftwechselrate n_{50} , aus (Hubweber & Schmidt, 2009)

Ausbaustandard	n_{50} (h ⁻¹)
Ohne raumluftechnische Anlage	3,0
Mit raumluftechnischer Anlage	1,5
Passivhäuser	0,6

Für das Konstruieren wurden sehr vereinfachte aber wirksame Konstruktionsprinzipien für eine luftdichte Gebäudehülle aufgestellt (Otto & Ringeler, 2004):

Konstruktionsprinzip I

„Der Verlauf der Luftdichtheitsebene in den Bauteilen der Gebäudehülle muss von einem Stift, ohne ein einziges Mal abzusetzen, abgefahren werden können.“

Konstruktionsprinzip II

„Einer Ebene muss die abdichtende Funktion zugeordnet werden. Mehrere nicht ausreichend dichte Ebenen hintereinander ergeben keine ausreichende Luftdichtheit.“

Besondere Sorgfalt ist auf die Durchführung von Kanälen, Elektroleitungen, Rohren, Installationsschächten und Kaminen zu legen. Die Öffnungen können Verbindungen zu benachbarten Hohlräumen in Bauteilen schaffen, zum Beispiel innerhalb von Deckenkonstruktionen in Holzrahmenbauweise. Rohrdurchführungen können mit vorkonfektionierten Manschetten oder vor Ort hergestellten Manschetten aus reißfest armierten Klebebändern abgedichtet werden. Die Schritte zur Erzielung einer luftdichten Gebäudehülle können wie folgt definiert werden (Otto & Ringeler, 2004):

- Festlegung des Luftdichtigkeitskonzeptes beim Gebäudeentwurf
- Verwendung ausreichend luftdichter Materialien für die Luftdichtheitsebene
- Sorgfältige Planung aller Stöße, Anschlüsse und Durchdringungen
- Durchführung einer Blower Door-Messung vor dem Endausbau (um Nachbesserungsarbeiten zu ermöglichen)

Ist vor dem Außenbauteil eine Installationsebene vorhanden, stellt der Einbau von Elektroinstallationen keine Gefahr dar. Durchstößt die Hohlwanddose die Durchdringung, sind elastische Dichtungen bei Kabeldurchführungen und luftdichte Hohlwanddosen zu verwenden. Zur Herstellung eines luftdichten Bauteils muss die abdichtende Funktion einer Bauteilschicht zugeordnet werden. Materialien dieser Schicht dürfen eine Luftdurchlässigkeit $q_{50, Baustoff} \leq 0,1 \text{ m}^3 / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$ aufweisen.

Tabelle 15: Typische Materialien, die in Holzhäusern verwendet werden, aus (Otto & Ringeler, 2004)

Baustoff	Luftdurchlässigkeit $q_{50, \text{Baustoff}} [\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})]$
Gipskarton-Bauplatte	0,002 bis 0,03
Sperrholz	0,004 bis 0,02
Spanplatten, MDF	0,05 bis 0,22
Hartfaserplatten	0,001 bis 0,003
Holzweichfaserplatten	2,0 bis 3,5
Diverse Holzarten als geschlossene Fläche	bis 0,0003
Unterspannbahn	1,0
PE-Folie 0,1 mm	0,0015
Bitumenpappe	0,008 bis 0,02
Baupappe	0,01 bis 3,0
Mineralwolle	13 bis 150
Hartschaumplatte	0,003 bis 1,1
Holzwohle-Leichtbauplatten	950 bis 6600
Holzfaserdämmplatten bituminert	1,1 bis 2,3

3.3.3.4 Wärmeschutz

Die Anforderungen an den Wärmeschutz sind in (DIN 4108-2, 2013) und der aktuellen Energieeinsparverordnung (EnEV, 2014) verankert. DIN 4108-2 enthält Angaben für den winterlichen Wärmeschutz mit Mindestwerten der Wärmedurchlasswiderstände R der Bauteile und der raumseitigen Oberflächentemperatur θ_{si} bzw. dem Temperaturfaktor f_{RSi} im Bereich von Wärmebrücken sowie den luftdichtheitsbedingten Fugendurchlasskoeffizienten a von Bauteilfugen und zu öffnenden Bauteilen in der Gebäudehülle.

Zu niedrige raumseitige Oberflächentemperaturen führen zu einem erhöhten Risiko für Schimmelpilzbildung. Weitere Anforderungen werden an den sommerlichen Wärmeschutz gestellt.

Für den winterlichen Wärmeschutz werden folgende Unterscheidungen bei den Bauteilen getroffen:

- 1) Außenwände
- 2) Wohnungstrennwände und Wände zwischen fremdgenutzten Räumen
- 3) Treppenraumwände
- 4) Wohnungstrenndecken und Decken zwischen fremdgenutzten Räumen
- 5) Unterer Abschluss nicht unterkellerten Aufenthaltsräume
- 6) Decken unter nicht ausgebauten Dachräumen
- 7) Kellerdecken und Decken gegen abgeschlossenen unbeheizten Hausflur
- 8) Decken (auch Dächer), die Aufenthaltsräume gegen die Außenluft abgrenzen

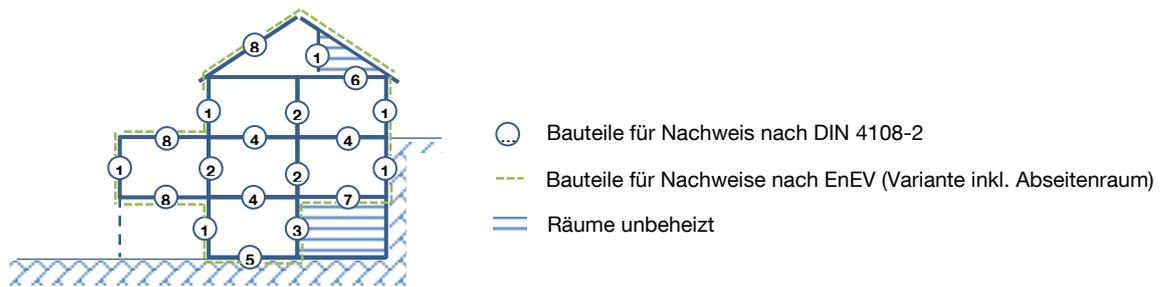


Abbildung 45: Anforderungen an Bauteile nach DIN 4108-2 und EnEV

Im Vergleich zur EnEV, welche die Gebäudehülle betrachtet, werden nach DIN 4108-2 auch Mindestanforderungen an innenliegende Bauteile, z.B. Wohnungstrennwände, gestellt. Für Bauteile mit einer flächenbezogenen Masse unter 100 kg/m^2 wird ein erhöhter Wärmedurchlasswiderstand $R = 1,75 \text{ m}^2\text{K/W}$ gefordert. Für Rahmen- und Skelettbauarten muss ein mittlerer Wärmedurchlasswiderstand $R = 1,0 \text{ m}^2\text{K/W}$ und der vorgenannte Mindestwert im gedämmten Gefachbereich eingehalten werden. Die maßgebende Größe für die Bewertung von Bauteilen ist der Wärmedurchgangskoeffizient U , der sich aus dem Kehrwert des Wärmedurchgangswiderstandes R_T des jeweiligen Bauteils bestimmt.

$$U = \frac{1}{R_T} \quad [W/(m^2 \cdot K)] \quad (3-3)$$

In R_T gehen der innere und äußere Wärmeübergangswiderstand R_{si} und R_{se} des Bauteils zur Umgebung und der Wärmedurchlasswiderstand R der einzelnen Schichten, gebildet aus dem Quotienten der jeweiligen Schichtdicke d_i und Wärmeleitfähigkeit λ_i , ein.

$$R_T = R_{si} + R + R_{se} \quad (3-4)$$

mit: R_{si}, R_{se} aus DIN 4108-2

$$R = \sum R_i = \sum_{i=1}^n \frac{d_i}{\lambda_i}$$

Für nichthomogene Querschnitte, z.B. Holzrahmenbauelemente, muss ein mittlerer Wärmedurchlasswiderstand R_T gemäß dem in (DIN EN ISO 6946, 2008) angegebenen Näherungsverfahren ermittelt werden. Für den Wärmedurchgangswiderstand wird ein oberer und unterer Grenzwert berechnet, der sich auf die flächenanteilige Mittelung aller Schichten und jeder einzelnen Schicht bezieht.

$$R_T = (R'_T + R''_T)/2 \quad (3-5)$$

$$\text{mit: } R'_T = \frac{1}{\frac{f_a}{R_{Ta}} + \frac{f_b}{R_{Tb}} + \dots + \frac{f_n}{R_{Tn}}}$$

$$R''_T = R_{si} + \sum_{j=1}^n R_j + R_{se} \quad R_j = \frac{1}{\frac{f_a}{R_{aj}} + \frac{f_b}{R_{bj}} + \dots + \frac{f_n}{R_{nj}}}$$

Tabelle 16 gibt Orientierungswerte für Energiestandards an, die reine Dämmstoffdicken ohne Berücksichtigung des Einflusses inhomogener Schichten beinhalten. Die Dämmstoffdicken haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Bauteildicke im Innen-/Außenbezug und damit auf die Anschlussausführungen.

Tabelle 16: Anforderungen an Dächer und Wände, erforderliche U-Werte und beispielhafte Dämmdicken d (für $\lambda = 0,04 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, aus (Hubweber & Schmidt, 2009)

Bauteil		Mindestwärmeschutz gemäß DIN 4108-2	EnEV 2007 (Erneuerung)	EnEV 2007 (Neubau)	KfW-60-Standard ¹⁾	KfW-40-Standard ¹⁾	Passivhaus-Standard
Wand	U (W/m ² K)	0,83	0,35	ca. 0,25	ca. 0,20	ca. 0,15	< 0,15
	d (cm)	4	11	16	20	26	> 30
Dach	U (W/m ² K)	1,11	0,30	ca. 0,22	ca. 0,20	ca. 0,15	< 0,15
	d (cm)	3	13	18	20	26	> 30
¹⁾ Der KfW-60- bzw. KfW-40-Standard benennt einen zulässigen Primärenergiebedarf von 60 bzw. 40 kWh/(m ² a) sowie verschärfte Anforderungen an den Transmissionswärmeverlust.							

Die EnEV gibt für Wohngebäude Höchstwerte des spezifischen Transmissionswärmeverlustes H_T' und für Nicht-Wohngebäude Höchstwerte des mittleren Wärmedurchgangskoeffizienten \bar{U} vor. Die Anforderungen an den Transmissionswärmeverlust der Gebäudehülle werden zusammen mit der Gebäudetechnik betrachtet, wodurch der Wärmedurchgangskoeffizient in einem bestimmten Bereich variieren kann.

Das Wärmedämmniveau ist in Wohngebäuden in den letzten Jahrzehnten stetig angestiegen. Durch den Anstieg fällt der Transmissionswärmeverlust im Bereich von Wärmebrücken immer mehr ins Gewicht, da die Einsparungen in der Fläche im Verhältnis zum Bereich von Wärmebrücken steigen. Mit Einführung der EnEV 2002 wurde erstmals eine Berücksichtigung der energetischen Verluste von Wärmebrücken bei der Bilanzierung gefordert. (Hauser & Stiegel, 2008) Die zusätzlich durch Wärmebrücken auftretenden Transmissionswärmeverluste werden gekennzeichnet durch Wärmebrückenverlustkoeffizienten:

- Linienförmige Wärmebrücken ψ [W/K]
 → ψ_a – außenmaßbezogen; ψ_i – innenmaßbezogen
- Punktförmige Wärmebrücken χ [W/(m·K)]

Die Mindestanforderung nach DIN 4108-2 ist gegeben durch den Temperaturfaktor f_{Rsi} .

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \tag{3-6}$$

Setzt man die Randbedingungen Raumlufttemperatur $\theta_i = 20^\circ\text{C}$ und Außenlufttemperatur $\theta_e = -5^\circ\text{C}$ und den Grenzwert $f_{Rsi} = 0,7$ in Gleichung (3-6) ein, erhält man eine raumseitige Oberflächentemperatur $\theta_{si} = 12,6^\circ\text{C}$. Wird die Temperatur überschritten, ist nicht mit einer Schimmelpilzbildung zu rechnen. Für die Bestimmung des Wärmebrückenverlustkoeffizienten gibt es drei verschiedene Möglichkeiten:

1. Vereinfachtes Verfahren mit pauschalem Wärmebrückenzuschlag $\Delta U_{WB} = 0,10 \text{ W/(m}^2\text{K)}$ ohne besonderen Nachweis

2. Vereinfachtes Verfahren mit pauschalem Wärmebrückenzuschlag $\Delta U_{WB} = 0,05 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ und Nachweis der Gleichwertigkeit zu DIN 4108-2, Beiblatt 2
3. Detailliertes Verfahren mit Einzelnachweis $\Delta U_{WB} = \frac{\sum_i F_{x,i} \cdot l_i \cdot \psi_i}{A_{ges}}$

Speziell für den Holzbau, in dem Werte $\Delta U_{WB} < 0,01 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ erreicht werden, würde das Potential mit dem vereinfachten Verfahren nicht ausgenutzt. Abbildung 46 zeigt den Einfluss der Länge a des Dämmschotts bei einem Plattform-Anschluss auf den innenmaßbezogenen Wärmebrückenverlustkoeffizienten. Je größer die Länge a gewählt wird, umso geringer ist der Wärmebrückenverlustkoeffizient.

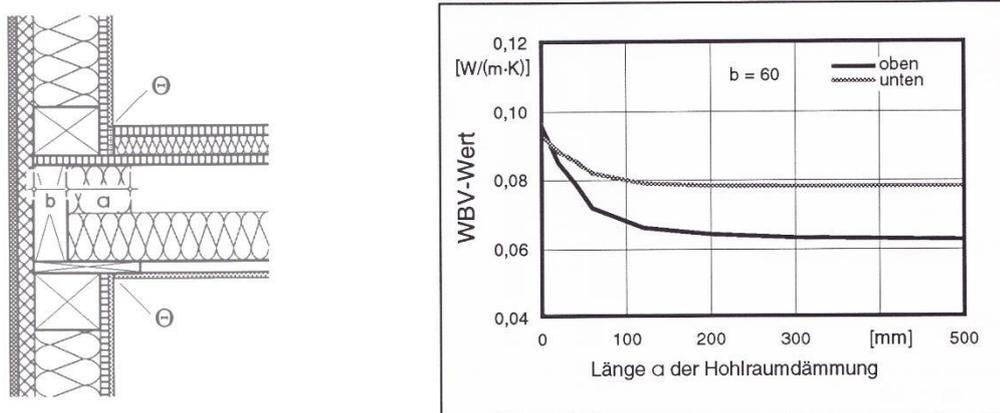


Abbildung 46: Einfluss auf den Wärmebrückenverlustwert bzw. -koeffizienten am Beispiel des Anschlusses Außenwand an Decke aus (Hauser & Stiegel, 1992)

Aus wärmetechnischen Gesichtspunkten werden Anforderungen an die Luftdichtheit der Gebäudehülle gestellt, um Wärmeverluste durch ungewollte Undichtigkeiten zu vermeiden, insbesondere im Bereich von Fügungen. Folgende Fugendurchlasskoeffizienten müssen eingehalten werden:

- Bauteilfuge $\leq 0,1 \text{ m}^3/\text{mh}(\text{daPa}^{2/3})$
- Fenster und Außentüren mit Funktionsfugen $a \leq 2,0 \text{ m}^3/\text{mh}(\text{daPa}^{2/3})$

Die Luftdichtheit von Bauteilen kann nach (DIN EN 12114, 2000) und von Gebäuden nach (DIN EN 13829, 2001) nachgewiesen werden. Die wärmeschutztechnischen Anforderungen wirken sich damit maßgeblich auf den konvektiven Wärmetransport unter Brandeinwirkung aus. Mit dem hohen Dämmstandard werden an den Fügungen mit Innen-/Außenbezug längere Fugen geschaffen, die durch die Forderungen einer maximalen Luftwechselrate und eines Fugendurchlasskoeffizienten abgedichtet werden müssen. Die Reduzierung des Wärmebrückenverlustkoeffizienten durch die vollständige Füllung des Deckengefaches mit einem formstabilen Dämmstoff führt zu einer Erhöhung der brandschutztechnischen Leistungsfähigkeit des Anschlusses. Nach Versagen der Deckenbekleidung und nachfolgendem Herausfallen der Dämmung erhält der Randbalken bei Nichtvorhandensein des Dämmschotts eine direkte Brandbeanspruchung, woraus eine geringere Feuerwiderstandsfähigkeit folgt.

3.3.3.5 Feuchteschutz

Feuchteschutzmaßnahmen sind alle Maßnahmen, die einer unzuträglichen Feuchteeinwirkung durch äußere und nutzungsbedingte Einflüsse entgegenwirken. Zu den Feuchteeinwirkungen zählen Einflüsse aus der Witterung, dem Feuchtegehalt der Konstruktion in der Bau- und Nutzungsphase sowie aus Dampfdiffusion und Konvektion. Die Maßnahmen gegen eine unzuträgliche Feuchteerhöhung bilden das verbindende Element zwischen dem Feuchte-, Wärme- und Holzschutz.

Die Grundprinzipien um Holzkonstruktionen dauerhaft vor Feuchteschäden zu schützen sind nachfolgend aufgeführt (Hubweber & Schmidt, 2009):

- 1) Der Feuchtegehalt eines Bauteils muss so eingestellt werden, dass nur der Betrag an Feuchte eindringt, der auch wieder ausdiffundieren kann.
- 2) Der Feuchtegehalt (Tauwasser) muss derart begrenzt werden, dass die Dämmwirkung und Dauerhaftigkeit nicht beeinträchtigt werden.
- 3) Die Konstruktion soll innen so diffusionsbremsend wie nötig und außen so diffusionsoffen wie nötig konzipiert werden.

Erfahrungsgemäß fällt kein Tauwasser aus, wenn der nachfolgende Wert der diffusionsäquivalenten Luftschichtdicke eingehalten wird (Hubweber & Schmidt, 2009):

$$s_{d,i}/s_{d,a} \geq 6 \tag{3-7}$$

In der Regel besitzen diffusionsoffene Holzrahmenbaukonstruktionen eine diffusionsäquivalente Luftschichtdicke $s_{d,i} = 3 \dots 10$ auf der Innenseite. Der rechnerische Nachweis des klimabedingten Feuchteschutzes kann mit dem in (DIN 4108-3, 2012) enthaltenen stationären Glaser-Verfahren geführt werden. Dynamische Verfahren sind in (DIN EN 15026, 2007) beschrieben.

3.3.3.6 Schallschutz

In dem Vorhaben zur Integration des Holz- und Skelettbaus in die DIN 4109 (Scholl & Bietz, 2004) sind Wand- und Deckenbauteile sowie flankierende Bauteile in Form eines Bauteilkataloges enthalten.

Wände	Decken	Flankierende Bauteile
Innenwände (ohne und mit Vorsatzschale)	Estrichaufbau ggf. Rohdeckenbeschwerung	Längsschalldämmung von Außenwänden in horizontaler Richtung (ohne und mit Vorsatzschale)
Gebäudetrennwände	Rohdecke	
Außenwände (ohne und mit Vorsatzschale)	ggf. Unterdecke	Horizontale Flankenübertragung (Luftschall) von Holzbalkendecken mit Unterdecke

Abbildung 47: Definition der Bauteilgruppen (ohne Dächer)

Gegenstand der Untersuchungen war ein Vorschlag eines Prognoseverfahrens für die Luft- und Trittschalldämmung im Leichtbau und die Verifizierung des Verfahrens anhand von Messergebnissen ausgeführter Vorhaben.

Die Schalldämmung von Bauteilen wird nach (DIN EN ISO 10140-1, 2012) und (DIN EN ISO 10140-2 bis 5, 2010) gemessen sowie nach (DIN EN ISO 717-1, 2006) bewertet. Nach (DIN 4109, 1989) werden folgende Kennwerte für die Luft- und Trittschalldämmung angegeben:

R'_{W} : bewertetes Schalldämm-Maß [dB] mit Schallübertragung über flankierende Bauteile (eingebauter Zustand)

R_W : bewertetes Schalldämm-Maß [dB] mit Schallübertragung über flankierende Bauteile

$L'_{n,w}$: bewerteter Normtrittschallpegel unter Berücksichtigung aller Schallnebenwege

Weitere Kenngrößen treten hinzu, wenn es um die Bewertung von Bauteilen oder um die Beurteilung von Messwerten geht:

$R_{W,R}$: Rechenwert des bewerteten Schalldämm-Maßes [dB] ohne Schallübertragung über flankierende Bauteile nach der DIN 4109 (aus Prüfwert einer Konstruktion)

$R_{L,w,R}$: Rechenwert des bewerteten Schalldämm-Maßes [dB] ohne Schallübertragung über das trennende Bauteil

$R'_{W,R}$: Resultierendes bewertetes Schalldämm-Maß [dB] unter Beteiligung der trennenden und flankierende Bauteile

Nach DIN EN ISO 717 gewonnenen Schallmesswerte können zur Einbeziehung der subjektiven menschlichen Wahrnehmung mit folgenden Spektrum-Anpassungswerten versehen werden:

C : Spektrum-Anpassungswert für Geräusche, die innerhalb des Gebäudes entstehen (Luftschalldämmung)

C_{tr} : Spektrum-Anpassungswert für Verkehrsgeräusche, die von außen kommen (Luftschalldämmung)

C_i : Spektrum-Anpassungswert bei Decken, welcher Pegelspitzen im tieffrequenten Bereich besser bewertet (Trittschalldämmung)

Die Spektrum-Anpassungswerte finden in Deutschland noch keine Anwendung.

4 Theoretische Betrachtungen zum Wärme- und Feuchtetransport

4.1 Transportmechanismen in Bauteilen

4.1.1 Allgemein

Die Grundprinzipien der Wärmeübertragung sind Konduktion, Konvektion und Strahlung. Nußelt (Nußelt, 1915) beschreibt die ersten beiden Arten als voneinander abhängige Erscheinungen und unterscheidet zwischen Wärmeleitung in einem Festkörper oder ruhenden Fluid sowie Wärmeleitung von einer Oberfläche zu einem bewegten Fluid (Konvektion).

Für poröse Körper wurde von Künzel (Künzel, 1994) ein erweitertes Verfahren zur Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in mehrschichtigen Bauteilen aufgestellt. Luftströmungen durch Fugen und andere Undichtigkeiten wurden in der Arbeit nicht behandelt, da sie nur schwer quantifizierbar sind.

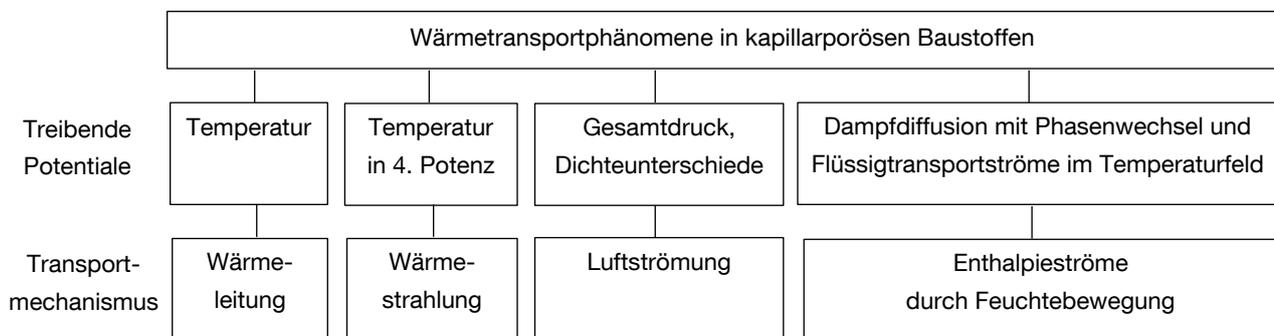


Abbildung 48: Zusammenstellung der in der Praxis vorkommenden Wärmetransportmechanismen mit treibenden Potentialen und Transportmechanismen aus (Künzel, 1994)

Eine Zusammenstellung der wichtigsten Feuchtetransportphänomene kann Abbildung 49 entnommen werden. Die farblich hervorgehobenen Bereiche sind bauphysikalisch relevant.

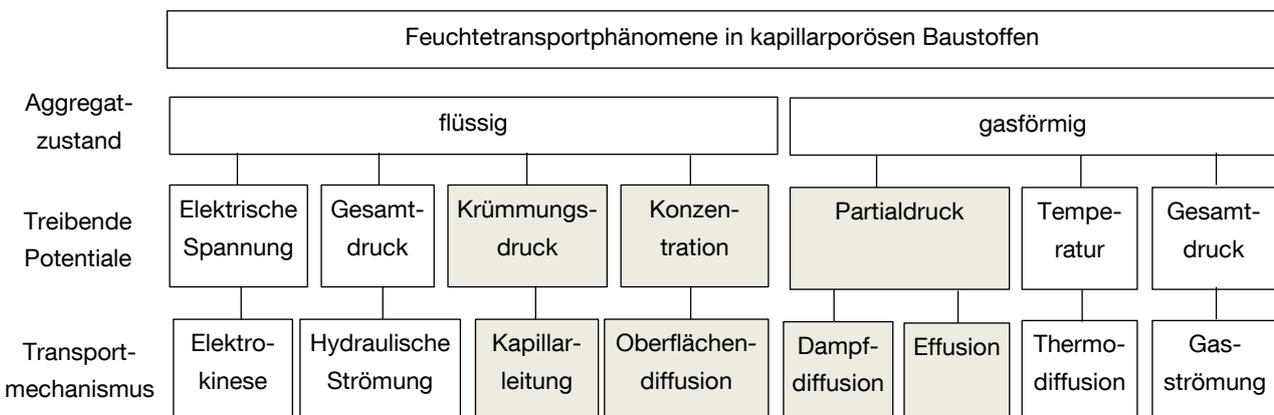
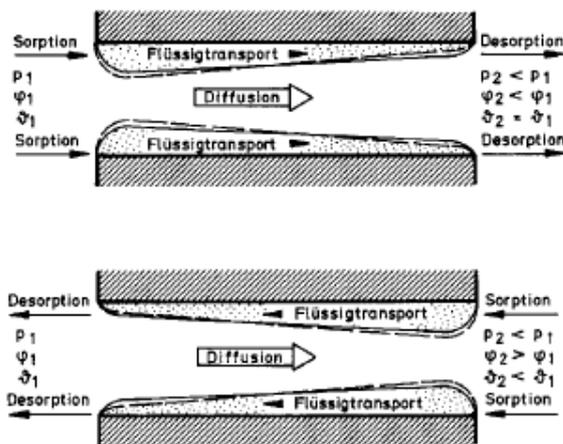


Abbildung 49: Schematische Übersicht über Feuchtetransportphänomene in kapillarporösen Baustoffen aus (Krus, 1995)

Liegt ein Partialdampfdruckgradient über dem Prüfkörper vor, stellt sich entlang des Gradienten ein Dampfdiffusionsstransport ein, der von der Sorptionsfeuchte unbeeinflusst ist. Entlang der Kapillare (siehe Abbildung 50) findet unter isothermen Bedingungen zum einen ein Diffusionsstransport aufgrund des Partialdruckgefälles in gasförmiger Phase und zum anderen infolge des Sorptionsfeuchtegradienten ein Flüssigkeitstransport im Sorbatfilm in gleicher Richtung statt. Bei nichtisothermen Bedingungen können die Transportmechanismen gegenläufig sein, wobei die Herstellung des Sorptionsgleichgewichts im Vergleich zur Diffusion sehr schnell abläuft. (Krus, 1995)



Modell für den überlagerten Flüssig- und Dampftransport im Porenraum hygroskopischer Baustoffe bei isothermen (oben) und nichtisothermen (unten) Randbedingungen. Die gestrichelte Linie stellt das Sorptionsfeuchtegleichgewicht dar, das sich ohne Flüssigtransport in der sorbierten Phase einstellen würde. Die durchgezogene Linie zeigt das sich aufgrund des Flüssigtransport einstellende dynamische Gleichgewicht. Der Flüssigmassenstrom wird durch Sorption auf der Seite höherer Luftfeuchten und Desorption auf der Seite niedrigerer Luftfeuchten aufrecht erhalten.

p_1, p_2 Wasserdampfpartialdruck auf beiden Seiten

φ_1, φ_2 relative Luftfeuchte auf beiden Seiten

ϑ_1, ϑ_2 Lufttemperatur auf beiden Seiten

Abbildung 50: Modell für überlagerten Flüssigkeits- und Dampftransport im Porenraum hygroskopischer Baustoffe bei isothermen (oben) und nicht isothermen (unten) Randbedingungen (Krus, Dissertation 1995)

Die Betrachtung der thermodynamischen Grundlagen ist notwendig, um aus den Prinzipien des Wärme- und Stofftransportes Konstruktionsvorgaben für bauteil- und objektbezogene Fugen abzuleiten. (vgl. Kapitel 6.1). Die oben genannten Transportmechanismen wurden unter Zugrundelegung normaler bauphysikalischer Randbedingungen untersucht. Bei Brandereignissen treten u.a. Gefügeänderungen des Materials sowie in Abhängigkeit vom Versagen der Dichtheitsebene der Bauteile zusätzlich Heißgasströmungen hinzu.

4.1.2 Modellvorstellungen zum gekoppelten Wärme und Stofftransport

Ähnliche Bedingungen wie im Anfangsstadium eines Brandes liegen bei Heißpressprozessen von Holzwerkstoffen vor. Den wichtigsten Wärmeübertragungsmechanismus innerhalb der feuchten Matte im Heißpressprozess bildet der konvektive Wärmetransport, der bei abnehmender Feuchte von der zunehmenden Konduktion überlagert wird (Meyer, 2007). Die Konduktion innerhalb der Matte wird nach Verdampfung des freien Wassers zum Haupttransportmechanismus, da die aufzubringende Desorptionsenthalpie für eine weitere Konvektion höher gegenüber der Konduktion ist. Beide Wärmetransportmechanismen laufen gleichzeitig ab und bedingen sich gegenseitig. Selbst im feuchten Zustand der Matte ist die Konduktion Voraussetzung für die Konvektion. Bei der Mattentrocknung erfolgt ein Massen- oder auch Stofftransport vertikal zur Mattenoberfläche in Richtung der Plattenmitte und horizontal in Mattenebene

hauptsächlich in Richtung der seitlichen Plattenkanten, immer dem Gasdruckgradienten folgend. Die Dampfbewegung in Mattenmitte wird auch als Siedewelle bezeichnet.

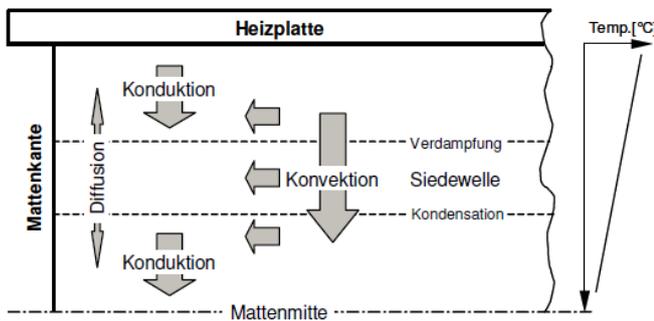


Abbildung 51: Schematische Darstellung des Stoff- und Wärmetransportes, aus (Meyer, 2007)

Die Front des verdampfenden Wassers kondensiert in kühleren Schichten und gibt damit die latent gespeicherte Verdampfungswärme wieder ab. Folglich steigt die Temperatur in dieser Schicht relativ schnell an. Durch den sich ausbildenden Temperaturgradienten zu tiefer liegenden Schichten werden diese zunächst konduktiv erwärmt. Sobald das kondensierende Wasser erneut verdampft wird, kommt es zu einer konvektiven Erwärmung der tieferliegenden Schichten. (Rackwitz 1954)

In Abbildung 52 ist neben dem Konzentrationsverlauf die Sättigungskonzentration eines beliebigen Dampfes in der Wand eingezeichnet. (Filounek, 2006) macht aus Gründen der Übersichtlichkeit mehrere Vereinfachungen. Er setzt für die Wärmeleitfähigkeit des trockenen und durchfeuchteten Materials denselben Wert an. Durch die Änderung des Temperaturfeldes würde sich auch die Dampfdruckkurve ändern. Weiterhin wird der Diffusionskoeffizient im durchfeuchteten Material unendlich klein und in den Bereichen mit Kondensat auf Null gesetzt. Die Diffusion läuft bis zur Kurve der Sättigungskonzentration. Schneidet sich beide Kurven kondensiert der Dampf. Links vom Schnittpunkt kann die Konzentration weiter ansteigen. Rechts verläuft die Konzentration entlang der Sättigungskonzentration.

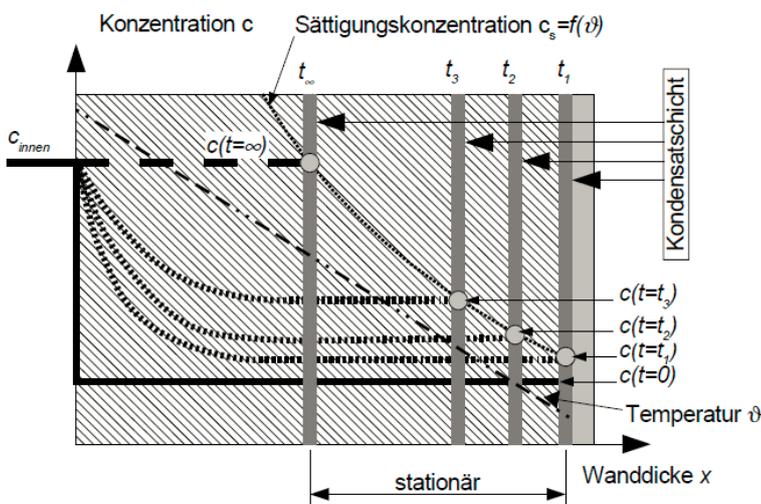


Abbildung 52: Diffusion mit Kondensation, Kondensat „verblockt“ die Poren, nach (Filounek, 2006)

In Realität kommt es durch den Eintrag von Feuchte in das Bauteil zu einer Änderung des Temperaturfeldes, was folglich wieder zu einer Änderung des Diffusionskoeffizienten führt. Infolge der höheren Wärmeleitfähigkeit des feuchten Materials erhöht sich auch die Temperatur auf der bauteilabgewandten Seite. Filounek betrachtet die Wände von Industrieöfen, durch die beispielbezogen trockene Luft und Wasserdampf mit einem bestimmten Partialdruck (trocken, 0,2 bar, 0,4 bar, 0,8 bar) diffundieren.

Nach (van der Heijden, 2011) gibt es in Bauteilen aus Beton, drei mögliche Mechanismen, die hinter Betonabplatzungen stehen.

- 1) Temperaturgradient
- 2) Dehydration
- 3) Hoher Dampfdruck, hervorgerufen durch Verdampfen und Dehydration

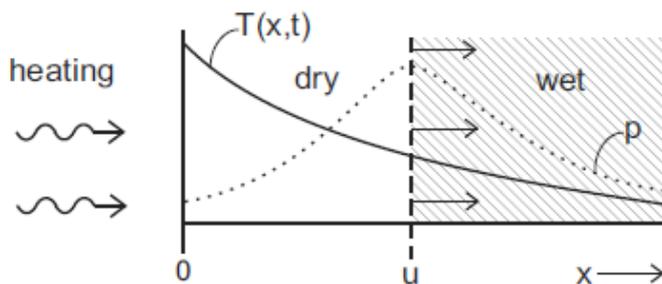


Abbildung 53: Schematische Darstellung des Dampftransportes, aus (van der Heijden, 2011)

Infolge der Wärmezufuhr steigt die Temperatur $T(x,t)$ auf der brandzugewandten Schicht des Bauteils. Die Erhöhung der Temperatur bewirkt eine Trocknungsfront, die in Richtung des Temperaturgradienten wandert. In dem Modell wird angenommen, dass die Trocknungsfront eine scharfe Abgrenzung an der Stelle $x = u(t)$ besitzt und das Material in einen trockenen und feuchten Bereich unterteilt werden kann. Dem Modell liegen folgende Annahmen zugrunde:

- 1) Die Temperatur T [°C] im Material ist unabhängig von der Trocknungsfront. Dadurch kann die latente Wärme der Flüssigkeit im Vergleich zur Erwärmung der Festkörpermatrix vernachlässigt werden. Das trifft auf Materialien mit einer geringen Porosität zu.
- 2) Der Wassergehalt im feuchten Bereich wird als konstant vorausgesetzt.
- 3) Der höchste Druck herrscht an der Trocknungsfront. Der Wasserdampf in dem trockenen Bereich kann durch das Porengefüge wandern und an der inneren Bauteiloberfläche, an der annähernd Atmosphärendruck vorliegt, entweichen. Durch den anliegenden Druckgradienten muss der Druck von der Trocknungsfront zur inneren Oberfläche kontinuierlich sinken.
- 4) Der Transport des Wassers wird angenommen als zähflüssige Strömung, die durch den Druckgradienten angetrieben wird.
- 5) Der Transport erfolgt hauptsächlich durch die größeren Poren. In dieser Größenordnung der Porengröße, der Temperaturen und Drücke kann der Weg des Dampfes mit dem Kontinuumsregime beschrieben werden (Knudsen-Zahl $< 0,1$, die Molekülgröße ist wesentlich kleiner als die Porengröße).
- 6) Der Dampf tritt nur in der Gasphase auf.

Für diese Situation kann die Temperatur $T = T(x, t)$ theoretisch ermittelt werden:

$$T(x, t) = T_0 + \frac{2F_0}{K} \left(\sqrt{\frac{kt}{\pi}} \exp\left(\frac{-x^2}{4kt}\right) - \frac{x}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{2\sqrt{kt}}\right) \right) \quad (4-1)$$

Der Trocknungsprozess ist sehr viel langsamer als der Verdampfungsprozess. Wenn die Trocknungsfront eine Distanz du in der Zeit dt erreicht, wird eine flächenbezogene Feuchtemenge $nS_0 du$ verdampft, wobei n die Porosität darstellt. Der Massestrom J_v kann nach dem Gesetz von DARCY behandelt werden.

$$J_v = qe = \frac{k}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \frac{p}{RT} \quad (4-2)$$

Die folgende Differentialgleichung beschreibt die Position der Trocknungsfront:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{kV_m}{2\mu RTnS} \frac{\Delta p}{u} \quad (4-3)$$

In Gleichung (4-3) sind verschiedene Parameter enthalten, von denen die Permeabilität der Wichtigste ist. Die Geschwindigkeit der Trocknungsfront ist proportional zur Permeabilität. Hohe Drücke bewirken ein schnelles Durchschreiten des Wasserdampfes. In Materialien mit hoher Porosität und Feuchtegehalt bewegt sich die Trocknungsfront langsamer, weil ein höherer Betrag an Wasser verdampft werden muss. Dieser Prozess findet parallel zu der im Bauteil auftretenden Siedewelle, welcher innerhalb poröser Körper auftritt, statt. Die Wasserdampffront wandert durch das Bauteil und erzeugt eine trockene und feuchte Region (Zone). An der Front wird Wasserdampf produziert, was mit einer Erhöhung des Dampfdruckes einhergeht.

4.1.3 Wärmeleitung in plattenförmigen Körpern

In Abhängigkeit von der Größe des Wärmestroms stellen sich Temperaturen in den einzelnen Bauteilschichten ein. Beim stationären Wärmetransport besitzt die Temperatur eine lineare Abhängigkeit vom Wärmedurchlasswiderstand der einzelnen Schichten und damit von der Schichtdicke x und deren Wärmeleitfähigkeit λ {siehe Gleichung (4-4)}.

$$\frac{d\vartheta}{dx} = \frac{\dot{Q}}{-\lambda \cdot A} \quad (4-4)$$

Bei instationärer Wärmeleitung ändert sich die Temperatur im Körper in Abhängigkeit vom Ort und der Zeit. Mit der Annahme eines eindimensionalen Wärmestroms, d.h. seitlich wird keine Wärme transferiert, entspricht die Änderung des Wärmestroms der zeitlichen Änderung des Wärmeinhalts (Enthalpie) des Materials (von Böckh & Wetzels, 2009).

Die Differentialgleichung für die zeitliche und örtliche Temperaturverteilung in der Platte lautet:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} \quad \text{mit:} \quad a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (4-5)$$

Die Differentialgleichung zeigt, dass die Temperaturleitfähigkeit a der einzige Stoffwert ist, der den zeitlichen Verlauf der Temperaturentwicklung bestimmt. Zur Lösung der Gleichung müssen noch der Ausgangszustand des Bauteils und die Beeinflussung durch die Umgebungsbedingungen (siehe Abbildung 54) festgelegt werden. In der Regel ist die Lösung der Gleichung (4-5) nur numerisch bestimmbar.

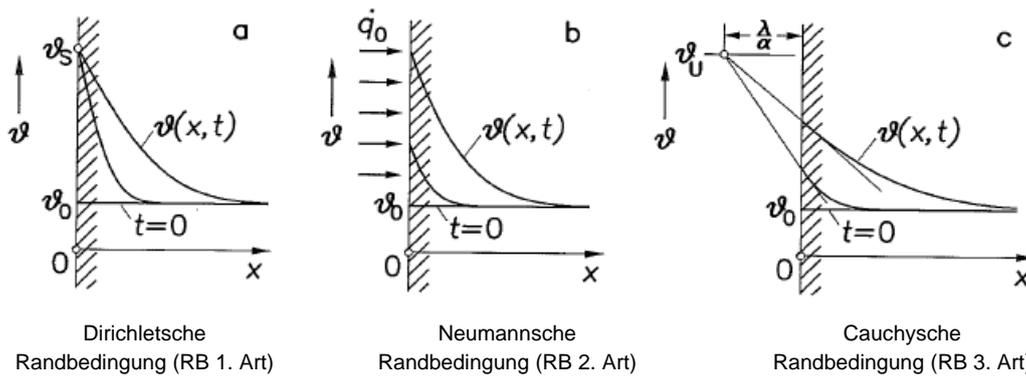


Abbildung 54: Erwärmung eines halbumendlichen Körpers bei unterschiedlichen Randbedingungen an der Oberfläche $x = 0$, a) sprunghafte Erhöhung auf die Temperatur ϑ_s , b) konstante Wärmestromdichte \dot{q}_0 , c) Wärmeübergang von einem Fluid mit $\vartheta = \vartheta_u$, aus (Baehr & Stephan, 2010)

Die Randbedingung 3. Art kann angesetzt werden, wenn ein Fluid an einem Bauteil entlang strömt. Das Verhältnis aus der Wärmeleitfähigkeit und dem Wärmeübergangskoeffizienten λ/α ist gleich dem Verhältnis der charakteristischen Länge und der Biot-Zahl L_0/Bi . Eine kleine Biot-Zahl Bi bedeutet, dass der Wärmeleitwiderstand im Körper sehr viel kleiner gegenüber dem Wärmeübergangswiderstand an seiner Oberfläche ist. Die Temperaturdifferenz $(\vartheta_o - \vartheta_u)$ ist groß gegenüber der Temperaturdifferenz im Körper. Für große Biot-Zahlen gilt das Entgegengesetzte.

4.1.4 Wärmeleitung in Fluiden (Konvektion)

4.1.4.1 Allgemein

Die Wärmeübertragung durch Konvektion erfolgt durch Temperaturunterschiede in Stoffströmen, welche durch einen Druckgradienten aufrechterhalten werden (von Böckh & Wetzel, 2009). Der wesentliche Unterschied in Bezug auf die Wärmeleitung in ruhenden Körpern ist die sich in Abhängigkeit von der Leckagerate einstellende Strömung innerhalb des Bauteils. Es ist dabei unerheblich, ob Leckagen nur zu Strömungen innerhalb des Bauteils oder durch das Bauteil führen. Durch den Heißgastransport tragen beide Varianten zu einer Temperaturerhöhung in tiefer gelegenen Schichten eines Bauteils bei. Ist in dem Heißgasstrom Wasserdampf enthalten, der die Taupunkttemperatur unterschreitet, führt die infolge Kondensation übertragene latente Wärme zu einer weiteren Steigerung der Temperaturen im Bauteil. Die Feuerwiderstandsfähigkeit wird in Abhängigkeit von der Leckagerate maßgeblich beeinflusst.

4.1.4.2 Fugenmodell

Der erste Hauptsatz der Thermodynamik beschreibt das Naturgesetz der Erhaltung der Energie und dient damit als Grundlage für die Bilanzierung von Stoffströmen. Sind die Dichtheitsebenen (u.a. Luft- und Winddichtung) von Holzbauteilen intakt und Öffnungen geschlossen, liegt in den üblichen Druckbereichen in einem Brandraum ein annähernd geschlossenes System vor. Treten Leckagen in Abhängigkeit vom Brandfortschritt auf, geht das anfänglich geschlossene in ein offenes System über.

Um Rückschlüsse auf die Wärmeübertragung im Anschlussbereich zu ziehen, muss der Wärmeübergangskoeffizient α bestimmt werden. Abbildung 55 zeigt hierzu die Energiebilanz in einem Kanalabschnitt unter Vernachlässigung der potentiellen und kinetischen Energie. Danach ist die Änderung innerhalb des Enthalpiestroms gleich der Wärmeabgabe bzw. -zugabe entlang des Kanalabschnittes.

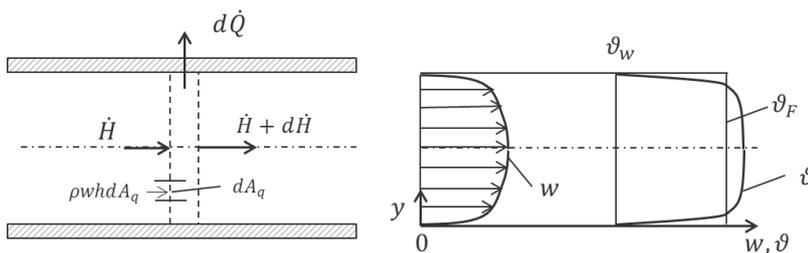


Abbildung 55: Energiebilanz für einen Kanalabschnitt (links) sowie Verlauf der Strömungsgeschwindigkeit w und Temperatur ϑ im Kanalquerschnitt (rechts), aus (Baehr & Stephan, 2010)

In dem Kanal wird vereinfachend ein Gas-Dampf-Gemisch angenommen (vgl. Kapitel 4.2.1), dem über die Kanalwand (fugenbegrenzende Materialien) Wärme entzogen oder zugeführt wird. Ein Wärmetransport vom Fluid in die Kanalwand stellt sich ein, wenn die Fluidtemperatur größer als die Kanalwandtemperatur ist. Das Fluid wird dann gekühlt. Der von dem Fluid an die Kanalwand übertragene Wärmestrom ist:

$$d\dot{Q} = \alpha \cdot (\vartheta_w - \vartheta_F) \cdot dA \tag{4-6}$$

Die Energiebilanz lautet:

$$d\dot{Q} = (\dot{H} + d\dot{H}) - \dot{H} = d\dot{H} \tag{4-7}$$

Der übergehende Wärmestrom bewirkt eine Änderung des Enthalpiestroms \dot{H} , der aus dem Produkt des Massestroms \dot{M} und der spezifischen Enthalpie $h(\vartheta)$ gebildet wird.

$$\dot{H} = \int_{A_q} \rho \cdot w \cdot h(\vartheta) \cdot dA_q = \dot{M} \cdot h(\vartheta) \tag{4-8}$$

In den Fügungen sind die Temperaturen des Fluids und die Temperatur der Wand nicht konstant. Zur Bestimmung der Stoffwerte des Fluids wird eine mittlere Temperatur $\vartheta_m = (\vartheta_{ein} + \vartheta_{aus})/2$ verwendet. Unter Brandbeanspruchung wird ein hoher Temperaturgradient zwischen Fugeneintritt und -austritt erzeugt. Bei den Brandversuchen, in denen Undichtigkeiten vorhanden waren (siehe Kapitel 5.3), wurde ein Maximalwert der mittleren Temperatur $\vartheta_m = 350^\circ\text{C}$ ermittelt, die als Grundlage für die Stoffwerte in den

weiteren theoretischen Betrachtungen herangezogen wird. Die Stoffwerte sind nachfolgend angegeben (VDI-GVC, 2013):

Rohdichte: $\rho = 0,5587 \text{ kg/m}^3$

Spezifische Wärmekapazität: $c_p = 1057 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$

Wärmeleitfähigkeit: $\lambda = 47,37 \cdot 10^{-3} \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$

Kinematische Viskosität: $\nu = 56,52 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Prandtl-Zahl: $Pr = 0,7046$

Temperaturleitfähigkeit: $a = 80,22 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$

Bei der Durchströmung von kompressiblen Fluiden in Spalten mit konstantem Querschnitt liegt bei genauer Betrachtung eine Expansionsströmung im Unterdruckbereich vor.

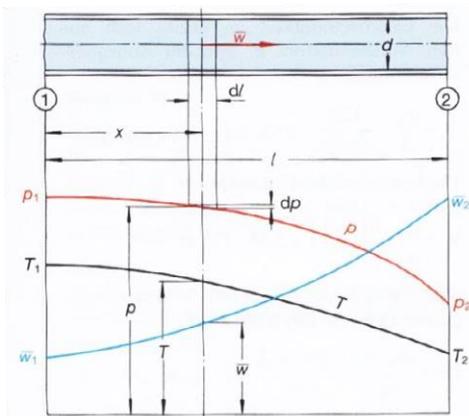


Abbildung 56: Druck-, Geschwindigkeits- und Temperaturverlauf bei kompressibler Unterschallströmung, aus (Bohl & Elmendorf, 2005)

Der Druck nimmt infolge der Reibungsverluste in Strömungsrichtung ab. Mit steigender Geschwindigkeit ergeben sich gegenüber inkompressibler Strömung verstärkte Druckverluste. Um eine näherungsweise Bestimmung des Druckabfalls vorzunehmen, müssen folgende Vereinfachungen getroffen werden (Bohl & Elmendorf, 2005):

- Die Rohrreibungszahl λ ist konstant und berechnet sich aus der Reynoldszahl.
- Die Temperatur T wird durch eine mittlere Temperatur $\bar{T} = \frac{T_1 + T_2}{2}$ ersetzt.
- Die Beschleunigungskräfte infolge der Geschwindigkeitszunahme werden vernachlässigt.

Danach ergibt sich folgende Gleichung:

$$\frac{p_1^2 - p_2^2}{2p_1} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \varrho_1 \frac{\bar{w}_1^2}{2} \cdot \frac{\bar{T}}{T} \quad (4-9)$$

4.1.4.3 Bestimmung der Wärmeübergangszahl α

Die Berechnung der Wärmeübergangszahl α ist abhängig von den Strömungsformen und der Orientierung der Wärmeübertragungsflächen. Experimentell kann der Wert bestimmt werden, wenn der Massestrom sowie die Wand- und Fluidtemperaturen am Eintritts- und Ausgangsquerschnitt bekannt sind. Der Bezug eines Rohres zum ebenen Spalt, der bei Fugen in Holzkonstruktionen anzusetzen ist, kann durch Integration der wärmeübertragenden Kanalfächen hergestellt werden. (Baehr & Stephan, 2010)

Für die theoretischen Betrachtungen des mittleren Wärmeübergangskoeffizienten wird angenommen, dass eine konstante Wandtemperatur entlang der Fuge vorliegt sowie eine thermisch und hydrodynamisch ausgebildete Laminarströmung vorhanden ist. Für den gesamten Bereich $0 \leq Re Pr d_i/l \leq \infty$ gibt Gleichung (4-10) die mittleren Nußelt-Zahlen mit einer Abweichung $< 1\%$ wieder. (VDI-GVC, 2013)

$$Nu_{m,\vartheta} = \left[Nu_{m,\vartheta,1}^3 + 0,7^3 + (Nu_{x,\vartheta,2} - 0,7)^3 \right]^{1/3} \quad (4-10)$$

$$\text{mit: } Nu_{x,\vartheta,1} = 3,66$$

$$Nu_{x,\vartheta,2} = 1,615(Re Pr d_i/l)^{1/3}$$

Die Nußelt-Zahl Nu ist dabei abhängig von der Reynolds-Zahl Re , den Stoffeigenschaften ausgedrückt durch die Prandtl-Zahl Pr und der Geometrie mit dem Verhältnis Rohrdurchmesser zur Rohrlänge d_i/l .

$$Re = \frac{w \cdot d}{\nu} = \frac{\dot{m} \cdot d}{A \cdot \eta} \quad (4-11)$$

$$Pr = \frac{\nu}{a} = \frac{\eta \cdot c_p}{\lambda} \quad (4-12)$$

Mit der Reynolds-Zahl, die das Verhältnis zwischen Trägheits- und Reibungskräften darstellt, wird überprüft, ob laminare oder turbulente Strömungsbedingungen vorliegen. Die Betrachtungen werden im Bereich der laminaren Strömung (Reynolds-Zahlen $Re < 2300$) durchgeführt. Liegen keine isothermen Bedingungen vor, ist die Reynolds-Zahl von der kinematischen Viskosität abhängig. Mit steigender Temperatur nimmt die kinematische Viskosität zu und damit die Reynolds-Zahl ab.

Mit Bekanntsein der Nußelt-Zahl folgt dann der mittlere Wärmeübergangskoeffizient nach Gleichung (4-13):

$$\alpha_m = \frac{Nu_m \cdot \lambda}{l} \tag{4-13}$$

Die Wärmestromdichte kann für praktische Berechnungen nach Gleichung (4-14) unter Zugrundelegung der logarithmischen Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_{ln}$ ermittelt werden.

$$\dot{q} = \alpha_m \Delta\vartheta_{ln} \tag{4-14}$$

mit:
$$\Delta\vartheta_{ln} = \frac{(\vartheta_w - \vartheta_E) - (\vartheta_w - \vartheta_A)}{\ln \frac{\vartheta_w - \vartheta_E}{\vartheta_w - \vartheta_A}}$$

In Abbildung 57 ist die Auswertung der Gleichung (4-14) für eine konstante Wandtemperatur ϑ_w in Abhängigkeit von der Fugengeometrie d_i/l und der Reynolds-Zahl Re bei der mittleren Fluidtemperatur $(\vartheta_w - \vartheta_E)/2$ dargestellt.

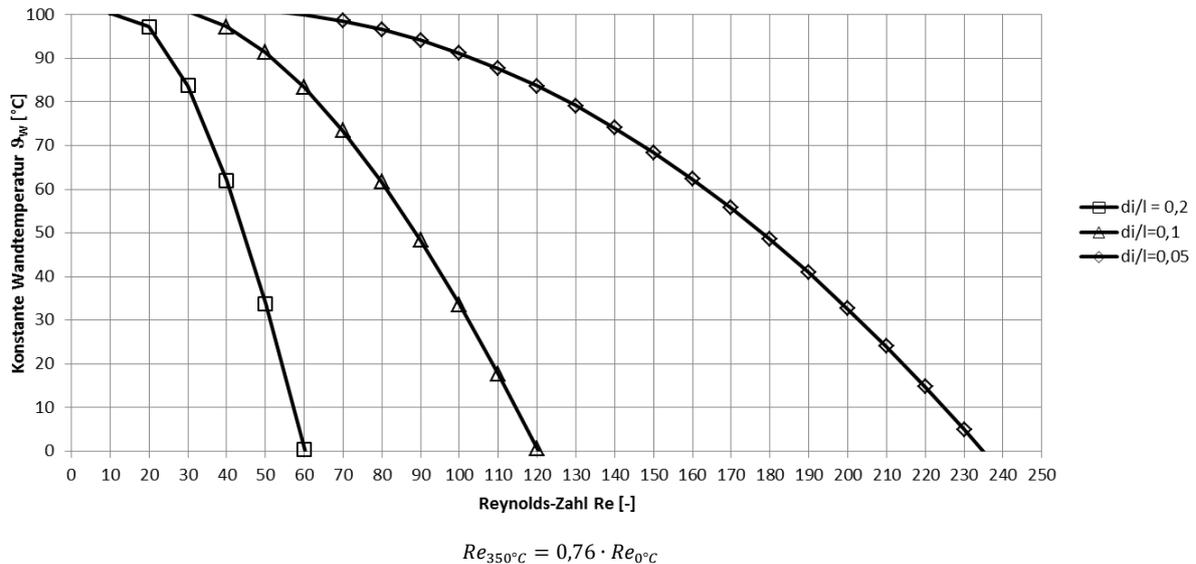


Abbildung 57: Temperaturen ϑ_w der Kanalwand in Abhängigkeit von der Fugengeometrie bei einer mittleren Fluidtemperatur $(\vartheta_A - \vartheta_E)/2 = 350^\circ C$, gebildet aus einer Eintrittstemperatur $\vartheta_E = 600^\circ C$ und Austrittstemperatur $\vartheta_A = 100^\circ C$

Das Diagramm zeigt, dass der Temperaturgradient nur bei sehr geringen Reynolds-Zahlen, d.h. im laminaren Bereich, erreicht wird. Die Untergrenze bildet die übliche Ausgangstemperatur der Kanalwand $\vartheta_{w,A} = 20^\circ C$. Unterhalb dieser Wandtemperatur müsste der Fluidstrom gekühlt werden, um den Temperaturgradienten zu erreichen. Der Bezug des Diagramms zu den Dichtheitsversuchen unter Normaltemperatur kann mit dem Faktor 0,76 hergestellt werden.

4.1.5 Dampfdiffusion

Diffusion stellt einen Stofftransport von A nach B infolge eines Konzentrationsunterschiedes in Gasen, Flüssigkeiten und Festkörpern dar. Der Vorgang der Diffusion führt zu einem Konzentrationsausgleich, d.h. Atome, Moleküle und Gase wandern von der Umgebung mit höherer Konzentration zur Umgebung mit niedrigerer Konzentration. Auf dem Weg können sie physikalisch (adsorptiv) oder chemisch (Reaktion) gebunden werden, wodurch eine Verringerung des Diffusionsstroms bewirkt wird. (Reinhardt, 2010)

Die zeitlich veränderliche Diffusion kann mit dem 2. Fickschen Gesetz beschrieben werden. Für den ein-dimensionalen Fall gilt:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (4-15)$$

Die Front bis zu der die Konzentrationsänderung vorgedrungen ist, kann näherungsweise ermittelt werden, wenn der gekrümmte Konzentrationsverlauf durch eine Gerade angenähert wird. Die Eindringfront liegt dann bei:

$$x = 4 \left(\frac{Dt}{\pi} \right)^{1/2} \approx 2,25\sqrt{Dt} \quad (4-16)$$

4.2 Zustandsänderungen

4.2.1 Beschreibung von Gas-Dampf-Gemischen

4.2.1.1 Grundlagen

Neben der Komponente ‚Dampf‘, der im betrachteten Druck- und Temperaturbereich kondensieren oder verdunsten kann, bleiben die übrigen Komponenten in ihrer Menge unverändert und werden als Komponentengruppe ‚Gas‘ zusammengefasst. In den niedrigen Druckbereichen, die in der Phase eines voll entwickelten Brandes zu erwarten sind (vgl. Kapitel 5.2.1), können Gas und Dampf als ein Gemisch idealer Gase behandelt werden. Von besonderer Bedeutung ist hierbei das Gesetz von Dalton, nachdem die Summe der Partialdrücke gleich dem Gesamtdruck des Gemisches ist. (Cerbe & Wilhelms, 2008) Demnach muss bei feuchter Luft der Wasserdampf- vom Gesamtdruck abgezogen und der verbleibende Druck im Verhältnis der Gasanteile der trockenen Luft aufgeteilt werden.

4.2.1.2 Zusammensetzung feuchter Luft

Feuchte Luft ist ein Gemisch aus trockener Luft und H₂O. Trockene Luft setzt sich aus ca. 21 Vol.-% Sauerstoff, 78 Vol.-% Stickstoff, 1 Vol.-% Argon, ca. 0,003 Vol.-% Kohlendioxid und weiteren Spurenelementen zusammen. (Cerbe & Wilhelms, 2008) Die Beschreibung der Zusammensetzung feuchter Luft kann mit der absoluten und relativen Feuchte sowie Feuchtebeladung beschrieben werden. Bei der Betrachtung von Strömungsprozessen wird vorzugsweise die Feuchtebeladung verwendet. Die Angabe des Feuchtegehaltes besitzt den Vorteil, dass eine konstante Bezugsgröße mit dem Massestrom der trockenen Luft \dot{m}_l vorhanden ist. Die absolute Feuchte beschreibt die in der Luft tatsächlich enthaltene Wassermenge und

wird als Wasserdampfpartialdichte ϱ_d^* oder bei Erreichen des Maximums als Sättigungspartialdichte ϱ_s^* angegeben. Die Sättigungsgrößen ϱ_s^* und p_s können aus Wasserdampf Tafeln {u.a. (VDI-GVC, 2013), (Cerbe & Wilhelms, 2008)} entnommen werden.

$$\varrho_d^* = \frac{m_d}{V_{Mi}} = \frac{\varphi \cdot p_s}{R_{H_2O} \cdot T} \quad \text{für } p_d^* < p_s \quad (4-17)$$

$$\varrho_s^* = \frac{p_s}{R_{H_2O} \cdot T} \quad \text{für } p_d^* = p_s \quad (4-18)$$

Daraus kann man die Partialdichte der trockenen Luft ϱ_l^* , die Gemischdichte von nebelfreier feuchter Luft ϱ_{Mi} ableiten:

$$\varrho_l^* = \frac{m_l}{V_{Mi}} = \frac{p - \varphi \cdot p_s}{R_l \cdot T} \quad (4-19)$$

$$\varrho_{Mi} = \frac{m_{Mi}}{V_{Mi}} = \varrho_d^* + \varrho_l^* = \varphi \varrho_s^* + \frac{p - \varphi \cdot p_s}{R_l \cdot T} \quad \text{für } m_{kon} = 0 \text{ und } m_{H_2O} = m_d \quad (4-20)$$

Die relative Feuchte φ wird bei einer gegebenen Temperatur aus dem Verhältnis zwischen Wasserdampf- (absoluter Feuchte) und Sättigungspartialdichte oder Wasserdampf- und Sättigungsdruck ermittelt.

$$\varphi = \frac{\varrho_d^*}{\varrho_s^*} = \frac{p_d^*}{p_s} \quad (4-21)$$

Der Feuchtegehalt x gibt die Beladung trockener Luft mit H_2O in Form von Wasserdampf, Wasser (Nebel) oder Eis (Eisnebel) an. Der Feuchtegehalt kann aus den messbaren Größen Temperatur t , relativer Feuchte φ und Gesamtdruck p bestimmt werden. Die Gleichungen des Feuchtegehaltes für ungesättigte feuchte Luft $p_d^* < p_s$ und gesättigte feuchte Luft $p_d^* = p_s$ lauten:

$$x = \frac{m_d}{m_l} = \frac{M_{H_2O}}{M_l} \frac{p_d^*}{p - p_d^*} = 0,622 \frac{\varphi \cdot p_s}{p - \varphi \cdot p_s} \quad \text{für } p_d^* < p_s \text{ } (\varphi < 1) \quad (4-22)$$

$$x_s = \frac{M_{H_2O}}{M_l} \frac{p_s}{p - p_s} = 0,622 \frac{p_s}{p - p_s} \quad \text{für } p_d^* = p_s \text{ } (\varphi = 1, m_{kon} = 0) \quad (4-23)$$

4.2.1.3 Spezifisches Volumen und Enthalpie

Bei Verwendung des Feuchtegehaltes x wird das spezifische Volumen der beladenen (feuchten) Luft verwendet:

$$v_{1+x} = \frac{V_{Mi}}{m_l} \quad (4-24)$$

Der Index $1 + x$ besagt, dass der Wert der spezifischen Enthalpie die Enthalpie des enthaltenen Wassers mit einschließt (1 kg trockene Luft + x kg Wasser). Unter Einbeziehung der thermischen Zustandsgleichung für das spezifische Volumen der ungemischten Stoffe $v_i = R_i \cdot T/p$ und der spezifischen Gaskonstante $R_i = R_M/M_i$ folgt:

$$v_{1+x} = \frac{R_l \cdot T}{p} + x \frac{R_{H_2O} \cdot T}{p} = \frac{R_l \cdot T}{p} \left(1 + x \frac{R_{H_2O}}{R_l} \right) \quad (4-25)$$

Wie beim spezifischen Volumen feuchter Luft bezieht man die Enthalpie der beladenen (feuchten) Luft ebenfalls auf die Masse der trockenen Luft:

$$h_{1+x} = \frac{H_{Mi}}{m_l} \quad (4-26)$$

Mit den spezifischen Enthalpien der ungemischten Stoffe $h_l = \frac{H_l}{m_l}$ und $h_{H_2O} = \frac{H_{H_2O}}{m_{H_2O}}$ erhält man die spezifische Enthalpie der beladenen (feuchten) Luft:

$$h_{1+x} = h_l + x(h_{H_2O}) \quad (4-27)$$

In Abhängigkeit vom Enthalpienullpunkt $h_n = 0$ bei $t_n = 0^\circ\text{C}$ für trockene Luft und flüssiges H_2O ergibt sich:

$$h_{1+x} = c_{pl} \cdot t + x(r_{0^\circ\text{C}} + c_{pd} \cdot t) \quad \text{für } x \leq x_s \quad (4-28)$$

Für den Fall übersättigter Luft $x > x_s$ besteht das Gemisch aus der Masse trockener Luft m_l , aus gesättigten Wasserdampf mit der Masse $m_l \cdot x_s$ und aus Wasser mit der Masse $m_l \cdot (x - x_s)$. In diesem Zustand muss die spezifische Enthalpie der gesättigten Luft $x = x_s$ um die auf m_l bezogene Enthalpie des Wassers ergänzt werden.

$$\begin{aligned} h_{1+x} &= (h_{1+x})_s + (x - x_s) \\ &= c_{pl} \cdot t + x_s(r_{0^\circ\text{C}} + c_{pd} \cdot t) + (x - x_s) \cdot c_w \cdot t \end{aligned} \quad \text{für } x > x_s, t \geq 0^\circ\text{C} \quad (4-29)$$

Die Zustandsänderungen des Leakagestroms werden anhand des Feuchtegehaltes x und der Enthalpie h_{1+x} im Mollierschen h,x -Diagramm aufgetragen, um Rückschlüsse auf die Wärmeabgabe innerhalb der Fügungen zu ziehen (siehe Kapitel 4.4.3).

4.2.1.4 Aufbau des Mollierschen h,x - Diagramms

Nach (Krischer & Kast, 1992) können Verbrennungsgase in einem Temperaturbereich bis 1000°C wie Luft behandelt werden. Die Enthalpien sind in diesem Bereich praktisch gleich. Erst bei 2000°C ist die Enthalpie der Verbrennungsgase um 3,5 % größer als diejenige der Luft.

In der Regel wird das Diagramm mit schiefwinkligen Koordinaten angewendet, so dass alle Isenthalpen (Linien gleicher spezifischer Enthalpie) parallel zur Abszisse $h = 0$ verlaufen. Der zwischen der spezifischen Enthalpie h_{1+x} und dem Feuchtegehalt x bestehende lineare Zusammenhang führt dazu, dass alle Isothermen $t = konst$ als gerade Linien erscheinen.

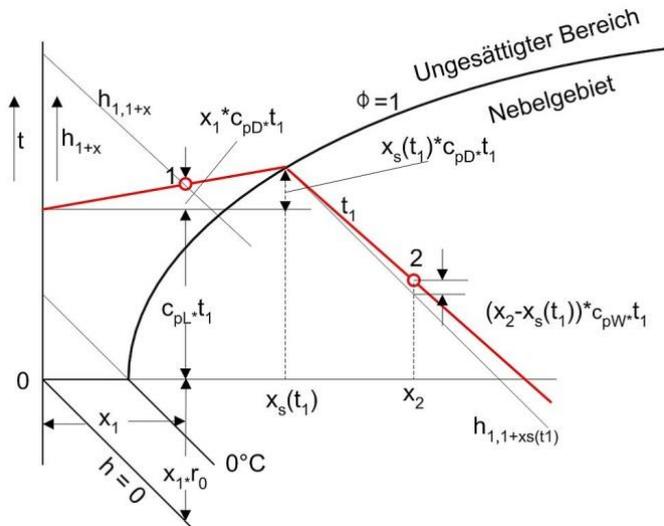


Abbildung 58: h,x -Diagramm mit schiefwinkligen Koordinaten, aus (Wikipedia, 2014)

Die Isenthalpen sind in den Mischungsgebieten unterschiedlich geneigt. Die Geradenstücke besitzen im ungesättigten Bereich $x \leq x_s$ den Anstieg $\frac{dh_{1+x}}{dx} = r_0 \cdot c + c_{pd} \cdot t$ und im übersättigten Bereich $x > x_s, t \geq 0^{\circ}\text{C}$ den Anstieg $\frac{dh_{1+x}}{dx} = c_w \cdot t$. Auf der Dampfsättigungslinie $\phi = 1$ wird dadurch ein Knick erzeugt. Das Gebiet der Übersättigung bezeichnet man als Nebelgebiet. Neben der Sättigungslinie $\phi = 1$ können weitere Kurven konstanter relativer Feuchte ϕ nach Gleichung (4-23) im ungesättigten Gebiet eingezeichnet werden. Der übersättigte Zustand tritt auf, wenn der Wasserdampfpartialdruck im Leakagestrom die Dampfsättigungskurve unterschreitet. In dem Leakagestrom wird dann das mitgeführte Wasser als Nebel sichtbar. Entsprechend des Anteils Wasserdampf x_s und Nebel $x - x_s$ im Leakagestrom und der Aufnahmefähigkeit des durch den Rauchgaskanal geführten Luftstroms \dot{m}_L kann das kondensierte Wasser (Nebel) ganz oder teilweise in den dampfförmigen Zustand zurück geführt werden.

Der mit Wasserdampf beladene Leakagestrom gelangt bei Vorhandensein von Undichtigkeiten als Leakagestrom \dot{V}_{Leck} durch die Bauteilfugen in den bei den Brandversuchen vorgelagerten Rauchgaskanal. Im Rauchgaskanal ergibt sich eine Mischung aus dem Leakage- mit dem in den Rauchgaskanal zugeführten Luftstrom. Daraus ergeben sich vier Zustände (vgl. Abbildung 4.4.1):

- Zustand 1- Eintritt Fuge (Brandraum)
- Zustand 2 - Austritt Fuge (brandraumabgewandte Seite Bauteil bzw. Bauteilfuge)

- Zustand 3 - Eintritt Rauchgaskanal
- Zustand 4 - Austritt Rauchgaskanal

Zur Benutzung des Diagramms, d.h. zur Festlegung des Zustandes 1 muss die Enthalpie h_{1+x} und der Feuchtegehalt x des Verbrennungsgasstroms auf Grundlage einer Verbrennungsrechnung ermittelt werden (siehe Kapitel 4.3.1).

4.2.2 Allgemein

Gelangen Heißgase über Leckagen in tiefere Bereiche der Konstruktion müssen zwei Aspekte untersucht werden, zum einen die Möglichkeit der Abkühlung unterhalb des Taupunktes t_τ und der Wärmeübergang an angrenzende Bauteile durch die Kondensation des Dampfes im Spalt. Die Gaskomponente kann nicht beliebig viel Wasserdampf aufnehmen. In Abhängigkeit vom Partialdruck des Wasserdampfes werden der ungesättigte, gesättigte und übersättigte Zustand unterschieden. Der Partialdruck eines ungesättigten Gas-Dampf-Gemisches bleibt bei isobarer Abkühlung solange konstant, bis die Taupunkttemperatur t_τ ($p_d^* = p_s$) erreicht wird. Das Gemisch ist dann gesättigt und es beginnt Kondensatbildung. Bei weiterer isobarer Abkühlung fällt zunehmend Kondensat aus, wobei der Sättigungszustand in der Gasphase erhalten bleibt. Der Partialdruck des Dampfes folgt dabei der Dampfsättigungskurve. In diesem übersättigten Zustand liegen Gas- und Kondensatphase vor.

4.2.3 Ideale Gase

Die Verknüpfung der thermischen Zustandsgrößen erfolgt durch thermische Zustandsgleichungen. Für ein ideales Gas lautet die masse- und stoffbezogene Zustandsgleichung:

$$p V = p v M = m R_i T \quad (4-30)$$

$$p V = n R_m T \quad (4-31)$$

Nach dem Gesetz von Avogadro enthalten ideale Gase bei gleichem Volumen, Druck und Temperatur dieselbe Molekülanzahl. Für den physikalischen Normzustand (*Temperatur* $t_n = 0$, *Gesamtdruck* $p_n = 1,01325 \text{ bar}$) wird das abgerundete Normvolumen $V_{mn} = 22,41 \text{ m}^3/\text{kmol}$ angegeben. (Cerbe & Wilhelms, 2008) Das Normvolumen V_n kann aus Gleichung (4-32) berechnet werden:

$$V_n = n \cdot V_{mn} \quad (4-32)$$

4.3 Zustand Fugeneintritt (Zustand 1)

4.3.1 Statische Verbrennung

4.3.1.1 Grundlagen

Die Statik der Verbrennung betrachtet die Stoff- und Energiemengen im Anfangs- und Endzustand der Verbrennung unter den Bedingungen der Stöchiometrie, nicht aber den Verlauf und die Geschwindigkeit der Verbrennung. Die spezifischen Volumina und sich daraus ergebende Masse- und Volumenströme sind wichtige Ausgangsgrößen für die Auslegung eines Brandofens.

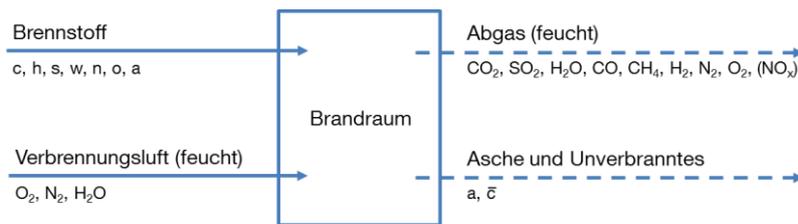


Abbildung 59: Stoffbilanzen bei einem Brand mit festen und flüssigen Brennstoffen, in Anlehnung an (Cerbe & Wilhelms, 2008)

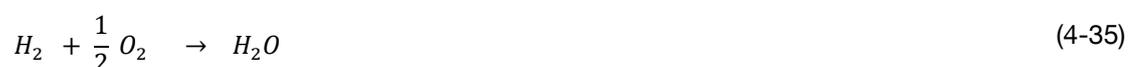
Die bei der Verbrennung beteiligten Massenanteile der Stoffe Kohlenstoff c , Wasserstoff h , Schwefel s , Sauerstoff o , Stickstoff n , Asche a und Wasser w werden durch eine Elementaranalyse ermittelt.

$$c + h + s + o + n + a + w = 1 \quad (4-33)$$

Angaben zur Zusammensetzung von Brennstoffen können aus verschiedenen Werken entnommen werden, u.a. (Boie, 1957), (Richter & Zschernig, 2002), (Cerbe & Wilhelms, 2008) oder (Watter, 2013). Zur Bestimmung der trockenen und feuchten Verbrennungsgasmenge wurde die Angaben für Heizöl EL, das bei den Kleinbrandversuchen verwendet wurde, aus (Cerbe & Wilhelms, 2008) entnommen. Zum Vergleich wurde die Elementaranalyse für lufttrockenes Holz hinzugefügt.

- Heizöl EL
 $c = 86,6$ $h = 13$ $n = 0,015$ $s \leq 0,1$ $w = 0,008$
- Holz lufttrocken
 $c = 44$ $h = 5$ $o = 35$ $n = 0,5$ $s < 0,04$ $a = 0,5$ $w = 15$

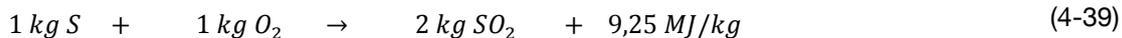
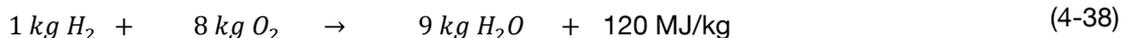
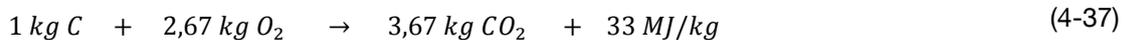
Die Reaktionsgleichungen der an der Verbrennung beteiligten Brennstoffelemente Kohlenstoff C , Wasserstoff H_2 und Schwefel S mit Sauerstoff O_2 als Oxidationsmittel lauten:





Aus den Reaktionsgleichungen kann unter Berücksichtigung der Molekulargewichte die Mol-, Masse- und Volumenbilanz bestimmt werden. Der Berechnung zugrunde gelegt ist das Normvolumen $V_{mn} = 22,41 \text{ m}^3$ (vgl. Ausführungen in Kapitel 4.2.3). Die in der Realität vorhandenen geringen Abweichungen der Stoffe zu diesem Wert können bei technischen Prozessen aufgrund der notwendigen Genauigkeit vernachlässigt werden (Richter & Zschernig, 2002). Die Umrechnung der ermittelten Werte auf Betriebsbedingungen erfolgt mit den Zustandsgleichungen für ideale Gase (Kapitel 4.2.3).

In den nachfolgenden Gleichungen ist die Standardbildungsenthalpie $\Delta H_{\text{Reaktion}}^0$, bezogen auf Standardbedingungen ($p = 1,013 \text{ bar}, t = 25^\circ\text{C}$) angegeben. Die Bildungsenthalpie ist eine thermodynamische Zustandsgröße aus der unter Berücksichtigung der Elementaranalyse der Brennwert und Brennwert ermittelt werden kann. (Watter, 2013).



Der Brennwert H_o ist die bei vollkommener Verbrennung freigesetzte Wärme. In der Regel bezieht sich der Brennwert auf die Mengeneinheit der Anfangs- und Endprodukte bei gleicher Temperatur. Der Brennwert ist gleichzusetzen mit der Standardverbrennungsenthalpie ΔH_m der allgemeinen Thermodynamik. Die spezifische Verdampfungsenthalpie r im Abgas ergibt sich aus den Masseanteilen h im Wasserstoff H und w im Wasser H_2O des Brennstoffes. (Richter & Zschernig, 2002) Für den Brennwert H_o in [MJ/kg] ergibt sich danach die Beziehung:

$$H_o = H_u + r \cdot x_{H_2O} = H_u + r (9 h + w) \quad (4-40)$$

Der Heizwert H_u ist die bei vollkommener Verbrennung frei gesetzte Wärme, bei der das vorliegende Wasser gedanklich dampfförmig und die spezifische Verdampfungsenthalpie r im Abgas verbleibt. Die spezifische Verdampfungsenthalpie des Wassers im Abgas ist demnach die Differenz zwischen Brennwert H_o und Heizwert H_u . (Richter & Zschernig, 2002) Der Heizwert H_u [MJ/kg] kann mit den nachfolgenden Näherungsgleichungen (Boie, 1957) aus der Elementaranalyse der Brennstoffe abgeschätzt werden:

Feste Brennstoffe:

$$H_u = 34,83 c + 93,87 h + 10,47 s + 6,28 n - 10,80 o - 2,45 w \quad (4-41)$$

Flüssige Brennstoffe:

$$H_u = 35,17 c + 94,20 h + 10,47 (s + o) \quad (4-42)$$

Für die Brennstoffe ‚Heizöl EL‘ und ‚Holz lufttrocken‘ wurden aus (Cerbe & Wilhelms, 2008) folgende Werte entnommen:

- Heizwerte $H_{u,Heizöl EL} = 42,8 \text{ MJ/kg}$ $H_{u,Holz atro} = 15,5 \text{ MJ/kg}$
- Brennwerte $H_{o,Heizöl EL} = 45,9 \text{ MJ/kg}$ $H_{o,Holz atro} = 17,7 \text{ MJ/kg}$
- Wasseranteil $x_{H_2O,Heizöl EL} = 1,26$ $x_{H_2O,Holz atro} = 0,90$

Der Mindestluftbedarf kann auf Grundlage der Elementaranalyse nach Gleichung (4-44) oder näherungsweise mit bekanntem Heizwert nach Gleichung (4-45) bestimmt werden. Je höher der Heizwert von Brennstoffen ist, je höher ist auch der Luftbedarf. Da bei einem Brand Luft das Oxidationsmittel bildet, muss in der Bilanzierung zu jeder Volumeneinheit O_2 das 3,762-fache Volumen N_2 dazu addiert werden.

$$o_{min} = 2,67 \cdot c + 8 \cdot h + s - o \quad (4-43)$$

$$l_{min} = \frac{o_{min}}{0,232} \quad (4-44)$$

$$l_{min} = 0,33[\text{kg}_L/\text{MJ}] \cdot h_u \quad (4-45)$$

Nach Gleichung (4-45) ergeben sich die Mindestluftmengen für die Verbrennung von ‚Heizöl EL‘ mit $l_{min} = 14,1 \text{ kg}_L/\text{kg}_B$ und ‚Holz‘ $l_{min} = 5,2 \text{ kg}_L/\text{kg}_B$. In der Praxis ist ein leicht erhöhter Luftanteil ($\lambda > 1$) erforderlich, um eine optimale Energieumsetzung zu erreichen. Zu wenig Luft ($\lambda < 1$) wiederum führt zu einer unvollkommenen Verbrennung.

$$\lambda = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_{Lmin}} = \frac{\dot{m}_L}{\dot{m}_B \cdot l_{min}} \approx 1,4 \dots 1,8 \quad (4-46)$$

Unter den Voraussetzungen einer stöchiometrischen Verbrennung kann das Verbrennungsgas CO_2 , SO_2 , H_2O , N_2 und O_2 enthalten. Die auf die Brenngasmenge bezogene feuchte Abgasmenge m_{fA} ist dann (Watter, 2013):

$$m_{fA} = m_{CO_2} + m_{SO_2} + m_{H_2O} + m_{N_2} + m_{O_2} \quad (4-47)$$

Die massebezogenen Anteile m_i ergeben sich je kg Brennstoff aus der Elementaranalyse zu:

$$\begin{array}{llll}
 m_{CO_2} = 3,664 \cdot C & & \frac{kg\ CO_2}{kg\ B} & \\
 m_{SO_2} = 2 \cdot S & & \frac{kg\ SO_2}{kg\ B} & \\
 m_{H_2O} = 9H + W & & \frac{kg\ H_2O}{kg\ B} & \\
 m_{N_2} = \xi_{N_2}^L \cdot \lambda \cdot l_{min} + N & \xi_{N_2}^L = 0,768 & \frac{kg\ N_2}{kg\ B} & \\
 m_{O_2} = \xi_{O_2}^L \cdot (\lambda - 1) \cdot l_{min} & \xi_{N_2}^L = 0,232 & \frac{kg\ O_2}{kg\ B} &
 \end{array} \quad (4-48)$$

Der Feuchtegehalt setzt sich zusammen aus der Verbrennung des im Brennstoff enthaltenen Wasserstoffs und aus dem im Brennstoff gebundenen Wasser sowie dem Wassergehalt der Verbrennungsluft. Die trockene Verbrennungsgasmenge ergibt sich ohne den Wasserdampfanteil zu:

$$m_{tA} = m_{fA} - m_{H_2O} \quad (4-49)$$

In die Gleichungen gehen die massebezogenen Anteile (M.-%) ein. Die Elementaranalyse von ‚Heizöl EL‘ setzt sich nach (Cerbe & Wilhelms, 2008) aus Kohlenstoff $c = 0,86$, Wasserstoff $h = 0,134$ und Schwefel $s = 0,1$, Stickstoff $n = 0,015$ und Wasser $w = 0,008$ zusammen. Die massebezogenen Verbrennungsprodukte ergeben sich dann gemäß der vorangestellten Gleichungen zu:

- Mindestluftbedarf [Gl. (4-44)]: $l_{min} = \frac{o_{min}}{0,232} = \frac{3,48}{0,232} = 15,02 \frac{kg\ L}{kg\ B}$
- Feuchte Mindestverbrennungsmenge ($\lambda = 1$) [Gl. (4-47)]: $m_{fA} = 16,08 \frac{kg\ f\ A}{kg\ B}$
- Wasserdampfanteil [Gl. (4-48)]: $m_{H_2O} = 1,18 \frac{kg\ H_2O}{kg\ B}$
(ohne Feuchtegehalt Verbrennungsluft)
- Trockene Mindestverbrennungsmenge [Gl. (4-49)]: $m_{tA} = 14,9 \frac{kg\ t\ A}{kg\ B}$

4.3.1.2 Vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung des Zustandspunktes

Erfolgt die Verbrennung mit der Mindestluftmenge $l_{min}(= g_{L,min})$, die zur theoretischen Verbrennung notwendig ist, entsteht eine luftfreie trockene Rauchgasmenge $m_t (= g_G)$ die mit der entstandenen Wasserdampfmenge $m_{H_2O} (= \Delta g_D)$ beladen ist. (Krischer & Kast, 1992) Für den Brennstoff ‚Heizöl EL‘ wird feuchte Verbrennungsluft mit einer Temperatur $t = 20\ ^\circ C$ und relativen Luftfeuchte $\varphi = 50\ \%$ unter einem Gesamtdruck $p = 1,0\ bar$ zugeführt. Mit Gleichung (4-22) kann daraus eine massebezogene Feuchtebelastung

ung $x_L = 0,00736 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg t L}}$ ermittelt werden. In unseren Breiten liegt der massebezogene Feuchtegehalt zwischen 0,005 kg/kg (extrem trockene Luft) und 0,02 kg/kg (extrem feuchte Luft). (Richter & Zschernig, 2002)

Nach (Krischer & Kast, 1992) kann die trockene Verbrennungsgasmenge g_G und die Wasserdampfbelastung x_G vereinfacht nach Gleichungen (4-50) und (4-51) ermittelt werden:

$$g_G = \frac{H_o}{h_G} \quad (4-50)$$

$$x_G = x_L + \Delta x_{V,h} + \Delta x_{V,w} \quad (4-51)$$

Die Berechnung unter Verwendung der Gleichungen und Tabellenwerte aus (Krischer & Kast, 1992) ergibt:

- Trockene Mindestverbrennungsmenge [Gl. (4-50)]: $g_G = 14,13 \frac{\text{kg t A}}{\text{kg B}}$
- Wasserdampfanteil [Gl. (4-51)]: $x_G = 0,00736 + 0,0828 + 0,0006 = 0,09 \frac{\text{kg H}_2\text{O}}{\text{kg B}}$

Zur Anwendung des h,x-Diagramms muss noch die Verbrennungsgasenthalpie h_G in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt werden. Unter Vernachlässigung der Enthalpie des Brennstoffs und der Asche sowie der größenordnungsmäßigen Gleichheit von g_G und $g_{L,min}$ erhält man:

$$h_G = h_L + \frac{H_o}{g_G} = h_L + \Delta h_V \quad [\text{kJ/kg}] \quad (4-52)$$

Zur Orientierung werden von (Krischer & Kast, 1992) folgende Werte für $g_G - g_{L,min}$ und Enthalpiezunahme der Abgase durch Verbrennung Δh_V angegeben:

- Technische Heizöle: $g_G - g_{L,min} \approx 0$ (Wertebereich -0,35 und +0,45)
 $\Delta h_V = 3214 \text{ kJ/kg}$ (Heizöl EL)
- Feste Brennstoffe: $g_G - g_{L,min} \approx 0,5$ (Wertebereich 0,2 und 0,8)
 $\Delta h_V = 3140 \text{ kJ/kg}$ (Holz)

Die Berechnung unter Verwendung der Gleichungen und Tabellenwerte ergibt eine Rauchgasenthalpie $h_G = 38,8 + 3214 = 3252,8 \frac{\text{kJ t A}}{\text{kg B}}$.

4.3.2 Dynamische Verbrennung

Der zeitliche Verlauf der Verbrennung ist bei den experimentellen Brandversuchen mit der Einheits-Temperaturzeitkurve und den Prüfbedingungen nach DIN EN 1363-1 vorgegeben. Der Prüfofen wurde so betrieben, dass sich im oberen Bereich des Brandraums ein Überdruck $p_{\ddot{u}} = 20 Pa$ einstellt. Im kleinen Brandofen konnte die Anforderung aufgrund der Steuerungsmöglichkeiten nicht immer eingehalten werden. Es wurden kurzzeitige Druckspitzen $p_{\ddot{u}} \leq 40 Pa$ gemessen.

DIN EN 1363-1 gibt vor, dass Prüfkörper aus nichtbrennbaren Bestandteilen in einer Ofenatmosphäre mit einem Mindestsauerstoffanteil von 4 % zu prüfen sind. Dieser Wert wurde auch in den Versuchen mit Prüfkörpern, die brennbare Bestandteile beinhalten, annähernd eingehalten.

Bei der Betrachtung von konvektiven Vorgängen können in einfacher Weise die Zustandsgrößen auf der brandraumzugewandten und –abgewandten Seite ermittelt werden. Auf der brandraumzugewandten Seite wird die Enthalpie der Heißgase unter Berücksichtigung der Wasserdampfbeladung x der Verbrennungsgase ermittelt. (siehe Kapitel 4.3.1.2)

4.4 Zustandsänderungen des Leckagestroms (Zustände 2, 3 und 4)

4.4.1 Grundlagen

Abbildung 60 zeigt die zu untersuchenden Zustände des Leckagestroms. Die Enthalpie des Zustandes 1 wurde im Rahmen der statischen Verbrennungsrechnung bestimmt. Der Zustand 3 des in den Messkanal eintretenden Luftstroms ist ebenfalls bekannt.

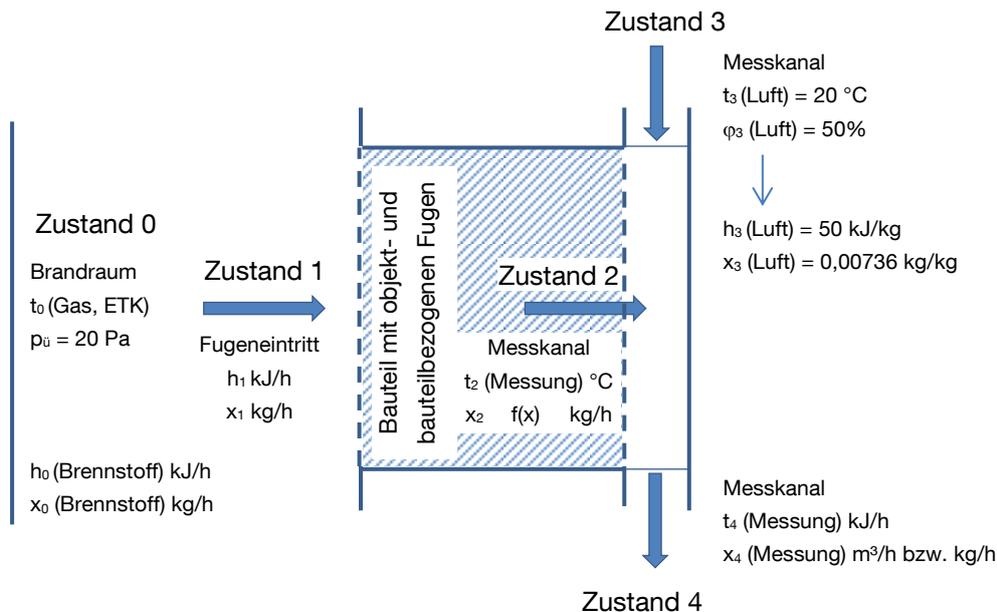


Abbildung 60: Schematische Darstellung der Zustände i des Leckagestroms

Die Änderung der Zustände 2 und 4 müssen fallweise in Abhängigkeit von der Änderung der Feuchtebelastung des Leckagestroms untersucht werden:

$$F1: x_1 = x_2 \quad F2: x_1 > x_2 \quad F3: x_1 < x_2$$

Der Grund für die theoretischen Betrachtungen ist die Feuchteabgabe und -aufnahme des Leckagestroms innerhalb des Bauteils, für dessen Ermittlung ein modifiziertes Prüfverfahren entwickelt werden muss. Im ersten Fall wird die Abkühlung des Leckagestroms bei konstantem Feuchtegehalt betrachtet. Im zweiten Fall verringert sich der Feuchtegehalt des Leckagestroms durch Kondensation oder adsorptive Vorgänge. Im dritten Fall steigt der Feuchtegehalt durch die Beimischung von flüssigen oder dampfförmigen Wasser. Die möglichen Zustandsänderungen werden nachfolgend im h,x -Diagramm dargestellt.

4.4.2 Beschreibung der Zustandsänderungen

4.4.2.1 Erwärmung und Abkühlung des Leckagestroms bei konstantem Feuchtegehalt

Im h,x -Diagramm liegt der Anfangs- und Endzustand senkrecht übereinander, wenn feuchte Luft bei konstantem Gesamtdruck p erwärmt oder abgekühlt wird, ohne dass sich der Wassergehalt x ändert. In diesem Fall gilt für den nach dem 1. Hauptsatz der Thermodynamik zuzuführenden oder abzuführenden Wärmestrom:

$$\dot{Q}_{12} = \dot{m}_l \cdot [(h_{1+x})_2 - (h_{1+x})_1] \quad (4-53)$$

Die spezifische Enthalpiedifferenz kann im h,x -Diagramm unmittelbar als Strecke abgegriffen werden. Unterschreitet die Luft bei der Abkühlung den Taupunkt ($\varphi = 1$), kann der kondensierende H_2O -Anteil Δx ebenfalls aus dem h,x -Diagramm abgelesen werden.

$$\Delta x = \frac{m_{kon}}{m_l} = x_1 - x_s \quad (4-54)$$

Die Temperatur und der Feuchtegehalt sind auf der Brandraumseite bekannt. Der Eintrag von Wärme erfolgt in Abhängigkeit von der Höhe des Leckagestroms $\dot{m}_{Leck} = \dot{m}_l$.

- Zustand 0 (Brenner): $(h_{1+x})_0 = 3253 \frac{kJ t A}{kg B}$ $x_{1.1} = 0,09 \frac{kg H_2O}{kg B}$
- Zustand 1 (Fugeneintritt $\vartheta = 600^\circ C$): $(h_{1+x})_1 = 980 \frac{kJ t A}{kg B}$ $x_{1.2} = x_{1.1}$
- Zustand 2 (Fugenaustritt $\vartheta = 100^\circ C$): $(h_{1+x})_2 = 310 \frac{kJ t A}{kg B}$ $x_2 = x_{1.2}$

Der Massestrom \dot{m}_l muss auf die mittlere Fluidtemperatur zwischen Fugeneintritt und -austritt bezogen werden. Mit der Reduzierung der Temperatur des Leckagestroms ist eine Wärmeabgabe innerhalb des Bauteils verbunden.

4.4.2.2 Adiabate Mischungsprozesse mit feuchter Luft

Die Masse- und Energiebilanz einer isobaren und adiabaten Mischung von zwei Luftströmen \dot{m}_{l1} und \dot{m}_{l2} kann unter Berücksichtigung des jeweiligen Feuchtegehalts x_i und der zugehörigen Enthalpie $(h_{1+x})_i$ nach Gleichungen (4-55) und (4-56) unter Vernachlässigung der kinetischen und potentiellen Energie ermittelt werden.

$$\frac{\dot{m}_{l1}}{\dot{m}_{l2}} = \frac{x_3 - x_2}{x_1 - x_3} \quad (4-55)$$

$$(\dot{m}_{l1} + \dot{m}_{l2})(h_{1+x})_3 = \dot{m}_{l1}(h_{1+x})_1 + \dot{m}_{l2}(h_{1+x})_2 \quad (4-56)$$

Im h,x -Diagramm liegt der Mischungspunkt 3 auf der Verbindungsgerade zwischen den Zustandspunkten 1 und 2. Der Mischungsprozess kann hier innerhalb des Bauteils durch Zuführung weiterer Luft- oder Dampfströme aus Nebenfugen oder Diffusions- und Sorptionsprozessen der die Fuge umschließenden Materialien stattfinden (siehe Kapitel 4.1.2). Ein weiterer Mischvorgang findet im Rauchgaskanal durch Mischung des Luft- und Leckagestroms statt. Der Luftstrom kann bei gleichbleibender Temperatur den Wasserdampfgehalt Δx aus dem Leckagestrom aufnehmen, bevor Tauwasser in Form von Nebel ausfällt.

Die Änderung des Feuchtegehalts durch die adiabate Zumischung von Wasser in flüssiger oder dampfförmiger Form zum beladenen Luftmassenstrom \dot{m}_l im Zustand x_1 und $(h_{1+x})_1$ kann nach Gleichung (4-57) ermittelt werden. Aus Gleichung (4-58) ergibt sich die Energiebilanz.

$$\Delta x = x_2 - x_1 = \frac{\Delta \dot{m}_{H_2O}}{\dot{m}_l} \quad (4-57)$$

$$\dot{m}_l (h_{1+x})_2 = \dot{m}_l (h_{1+x})_1 + \Delta \dot{m}_{H_2O} h_{H_2O} \quad (4-58)$$

Durch die Umstellung der Gleichung (4-58) nach h_{H_2O} kann die Richtung der Zustandsänderung bestimmt werden und am Randmaßstab im h,x -Diagramm abgelesen werden.

$$\frac{\Delta h_{1+x}}{\Delta x} = \frac{(h_{1+x})_2 - (h_{1+x})_1}{x_2 - x_1} = h_{H_2O} \quad (4-59)$$

Für die Aggregatzustände sind unterschiedliche Enthalpien einzusetzen.

$$h_{H_2O} = h_d = r_{0^\circ C} + c_{pd} t_{H_2O} \quad \text{dampfförmiges Wasser} \quad (4-60)$$

$$h_{H_2O} = h_w = c_w t_{H_2O} \quad \text{flüssiges Wasser} \quad (4-61)$$

4.4.3 Darstellung der Zustandsänderungen im h,x -Diagramm

Von dem Ausgangszustand im Brandraum (Zustand 0) können theoretisch weitere Zustände i in Abhängigkeit von der Änderung des Feuchtegehalts des Leckagestroms entstehen. Die Zustandsänderungen des Heißgasstroms bestimmen sich wie folgt:

- Zustand 1 - Abkühlung ohne Kondensation bis zum Fugeneintritt
- Zustand 2a - Abkühlung ohne Kondensation
- Zustand 2b - Abkühlung bis ins Nebelgebiet mit Kondensation
- Zustand 3a - Entfeuchtung durch Oberflächenkühlung
- Zustand 3b - Entfeuchtung durch Sorption entlang Isenthalpe

- Zustand 4a - Adiabate Befeuchtung entlang der Nebelisothermen (z.B. Sprühnebel)
- Zustand 4b - Adiabate Befeuchtung mit Dampf (theoretischer Fall)
- Zustand 5 - Mischung von Luftströmen

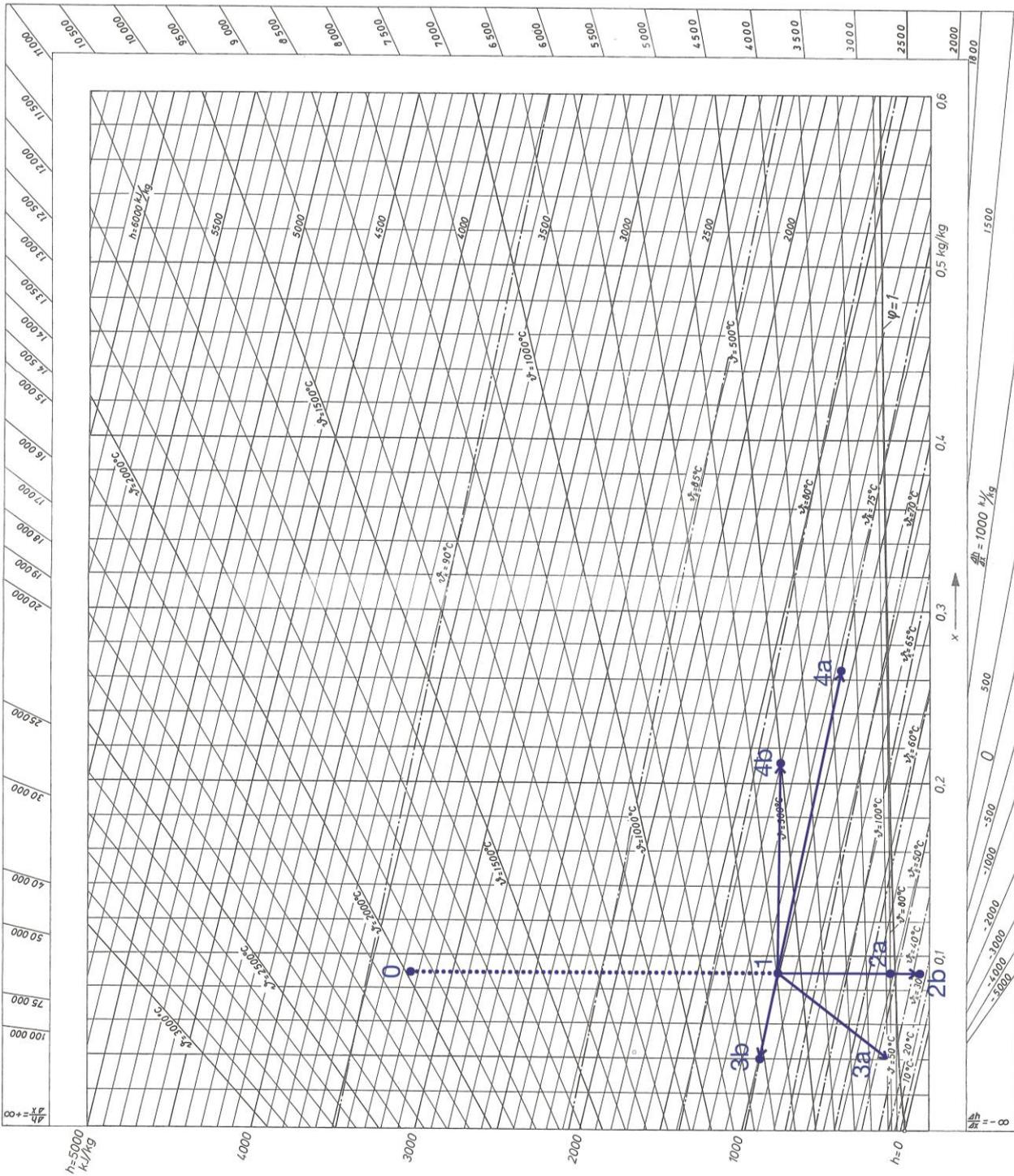


Abbildung 61: h,x-Diagramm mit Zuständen 0 und 1 sowie Zustandsänderungen nach 3a, 3b, 4a und 4b (Zustand 5 ist nicht dargestellt, siehe Kapitel 4.4.2.2)

Mit der Darstellung der Zustandsänderungen vom Zustand 1 ausgehend, können drei mögliche Varianten identifiziert werden, in denen eine Abkühlung des Leckagestroms auftritt. Das sind die adiabate Befeuchtung mit Wassernebel (*Strecke 13a*), die Abkühlung mit und ohne Kondensation (*Strecke 12a und 12b*) sowie eine Entfeuchtung des Leckagestroms durch Oberflächenkühlung (*Strecke 14a*).

Entsprechend der Temperaturmessungen ist davon auszugehen, dass die o.g. Formen der Zustandsänderungen alle auftreten. Bei Undichtigkeiten in der Anfangsphase eines Brandes sind auf der brandabgewandten Seite Temperaturen unterhalb des Taupunktes der Heißgase vorhanden, wodurch der Zustand 2b erreicht wird.

Nach weiterem Brandfortschritt und zunehmender Enthalpie der Heißgase wird ausgefallenes Wasser wieder verdampft und die Temperaturen im Inneren des Bauteils steigen weiter an. Die Brandversuche im kleinen Brandofen haben gezeigt, dass Tauwasser in der Konstruktion ausfällt und auch bei Vorhandensein eines Leckagestroms die Heißgase innerhalb des Bauteils auf Temperaturen $\leq 100^\circ\text{C}$ abgekühlt werden.

4.5 Diskussion der Ergebnisse

Die vereinfachten Betrachtungen zum Wärmeübergangskoeffizienten α zeigen, dass die Abkühlung des Heißgasstroms in Bezug auf die geringen Fugentiefen nicht allein auf einer erzwungenen Strömung von Gasen und Dämpfen basiert. Berücksichtigt man die in Tabelle 17 angegebenen Wärmeübertragungskoeffizienten α , führt nur die Kondensation des gesättigten Dampfes oder Filmkondensation an den kanalbegrenzenden Flächen zu höheren Wärmeübergangskoeffizienten. Erreichbare und in der Praxis übliche Wärmeübergangskoeffizienten α sind in Tabelle 17 angegeben.

Tabelle 17: Wärmeübergangskoeffizienten (Anhaltswerte),
aus (Cerbe & Wilhelms, 2008)

Strömungsmedium		Wärmeübergangskoeffizient	
		α $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$	
		Erreichbare Werte	Praxisübliche Werte
1	Gase und Dämpfe		
	Frei Strömung	5...25	8...15
	Erzwungene Strömung	12...120	20...60
2	Wasser		
	Frei Strömung	70...700	200...400
	Erzwungene Strömung	600...12.000	2.000...4.000
	Verdampfung	2.000...12.000	ca. 4000
	Filmkondensation	4.000...12.000	ca. 6000
	Tropfenkondensation	35.000...45.000	--
3	Zähe Flüssigkeiten		
	Erzwungene Strömung	60...600	300...400

Folglich muss festgehalten werden, dass der Heißgasstrom mit einem bestimmten Wassergehalt x beladen ist. Kommt der Dampf mit den fugenbegrenzenden Materialien in Berührung, deren Temperatur geringer als die Sättigungstemperatur des Dampfes ist, wird der Dampf verflüssigt. Das entstehende Kondensat wird weiter abgekühlt, so dass sich weiter Dampf auf dem vorher gebildeten Kondensat niederschlagen kann.

Vom Mechanismus her kann der Vorgang in mehrere Schritte unterteilt werden. Der Dampf gelangt infolge der Strömung (konvektiver Transport) und Molekularbewegungen (diffusiver Transport) zur Phasengrenze. „Im nächsten Schritt kondensiert der Dampf an der Phasengrenze und anschließend wird die an der Phasengrenze frei werdende Kondensationsenthalpie durch Leitung und Konvektion an die unterkühlte Wand transportiert. Dementsprechend sind drei hintereinander geschaltete Teilwiderstände zu überwinden: Der Wärmewiderstand in der Dampfphase, der Wärmewiderstand beim Übertritt des Dampfes in die flüssige Phase und der Wärmewiderstand in der flüssigen Phase. Von diesen Teilwiderständen ist meistens der in der flüssigen Phase entscheidend.“ (Baehr & Stephan, 2010)

In Abhängigkeit der Orientierung einer zweiphasigen Strömung in einem unbeheizten Rohr, können die in *Abbildung 62* gezeigten charakteristischen Strömungsformen auftreten.

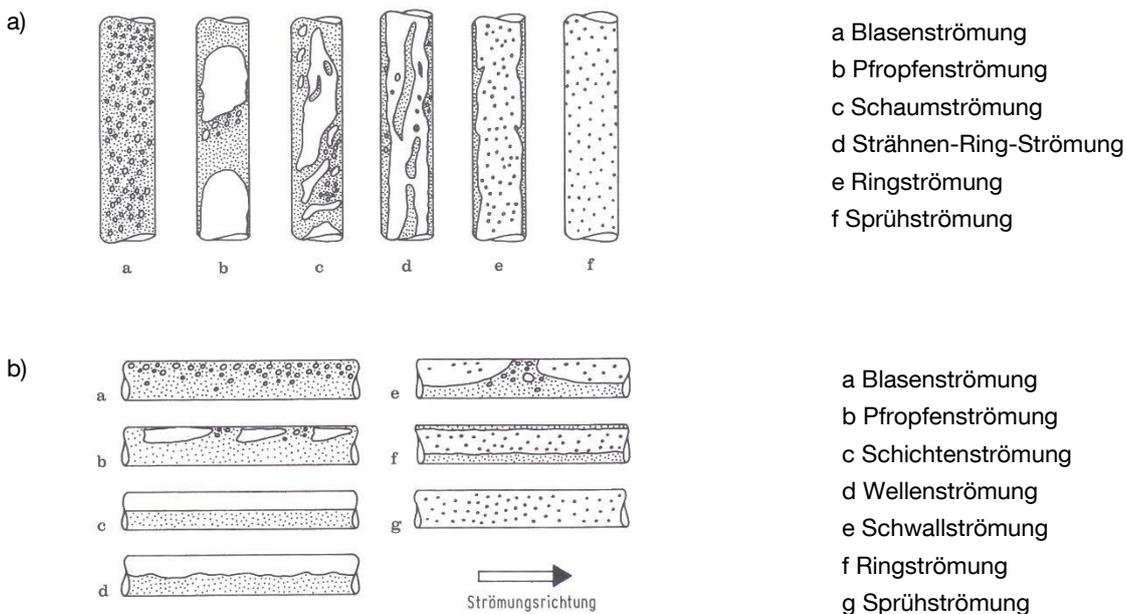


Abbildung 62: Strömungsformen in unbeheizten Rohren, a) Senkrechtes Rohr, b) Waagerechtes Rohr, aus (Baehr & Stephan, 2010)

Bei kleinen Geschwindigkeiten bilden sich Strömungsformen aus, die im senkrechten Rohr nicht zu beobachten sind. Die Phasen können hier vollständig getrennt sein (*Abbildung 62 b-c*). Erhöht sich die Gas- oder Dampfgeschwindigkeit treten Wellen auf (*Abbildung 62 b-d*) und bei weiterer Steigerung kommt es zur Schwallbildung (*Abbildung 62 b-e*).

„Alle diese Erscheinungsformen der Zweiphasenströmung beobachtet man nicht nur im kreisrunden Rohr, sondern auch in Kanälen oder anderen Querschnitten ...“ (Baehr & Stephan, 2010)

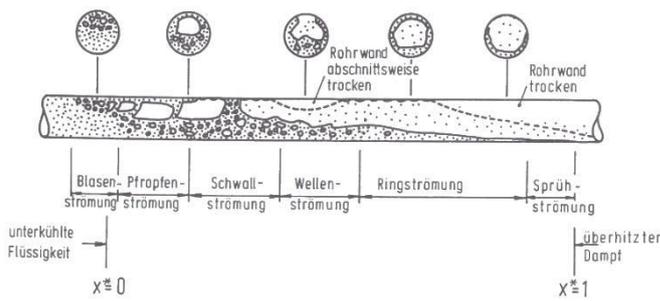


Abb. 4.49: Strömungsformen im waagerechten Verdampferrohr nach Collier [4.85]

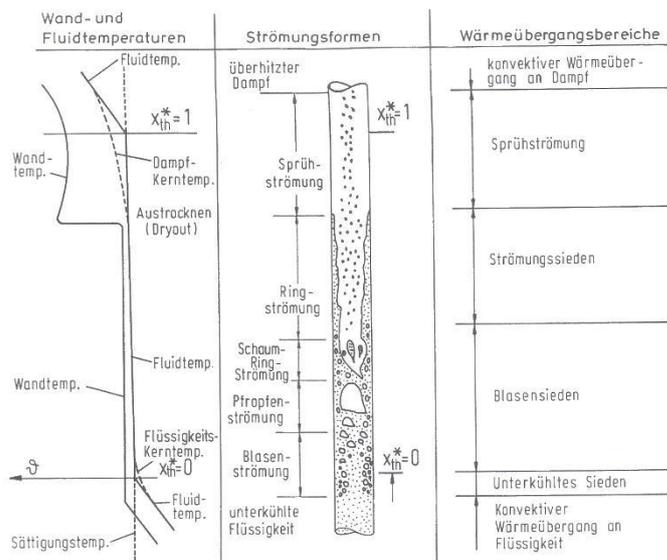


Abb. 4.56: Wand- und Fluidtemperaturen, Strömungsformen und zugehörige Wärmeübergangsbereiche, beheiztes Rohr

Abbildung 63: Strömungsformen im senkrechten und waagerechten beheizten Rohr, aus (Baehr & Stephan, 2010)

Die reine Dampf- bzw. Kondensatströmung geht ab einer gewissen Rohrlänge in eine Kondensatströmung über. Bei senkrechter Dampfströmung entsteht ein reiner Kondensatstrom, der entgegengesetzt zur Dampfströmung gerichtet ist. Beim Gegenstrom kann das Kondensat bei zu hohen Dampfgeschwindigkeiten aufgestaut werden, wodurch die Rohre verstopfen können. Dies führt zu Fluktuationen. Um die Fluktuation auszuschließen, muss die kritische Weberzahl $We_c < 0,01$ sein. (von Böckh & Wetzel, 2009)

Bei vorhandenen Undichtigkeiten spielt der Wärmeübergangskoeffizient eine wichtige Rolle. Die durchtretenden Gase müssen im Bereich der Spalte auf bestimmte Temperaturen abgekühlt werden, so dass keine Entzündung in benachbarten Bereichen stattfindet.

Die Fügungen müssen so geplant und gefertigt werden, dass dem Heißgasdurchtritt ein möglichst großer Widerstand entgegengesetzt wird (siehe Abbildung 64).

5 Experimentelle und analytische Untersuchungen

5.1 Grundlagen

Die Abhängigkeiten des Volumenstroms \dot{V} sind nachfolgend gegenüber dem Druckunterschied $\Delta p = p_2 - p_1$, dem Radius r_0 , der Rohr- bzw. Fugenlänge l und die dynamische Viskosität η dargestellt.

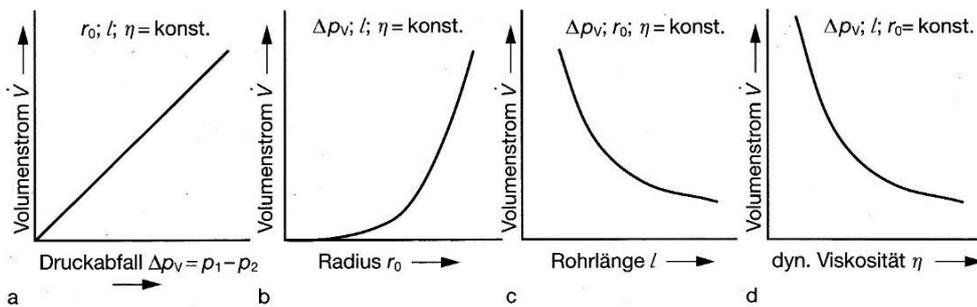


Abbildung 64: Abhängigkeiten des Volumenstroms bei Vorhandensein einer laminaren Strömung entnommen aus (Bohl & Elmendorf, 2005)

Das Ziel für die Konzipierung der Fugen lässt sich daraus ableiten. Um den Leckagestrom so gering wie möglich zu halten, müssen kleine Durchmesser, lange Rohr- bzw. Spaltlängen und eine große dynamische Viskosität vorliegen. Die Abbildung müssen auf ebene Spalte, die in den Konstruktionen vorhanden sind, übertragen werden. Dazu wird unter Normaltemperatur der hydraulische Durchmesser d_{hyd} verwendet. Die Fugenausbildung muss gewährleisten, dass Längenänderungen der sie begrenzenden Bauteile zwangsfrei aufgenommen werden. Ferner dürfen Unebenheiten in den Flankenoberflächen, Fertigungstoleranzen der Bauteile und Montageungenauigkeiten zu keiner Verschlechterung der Fugeigenschaften führen.

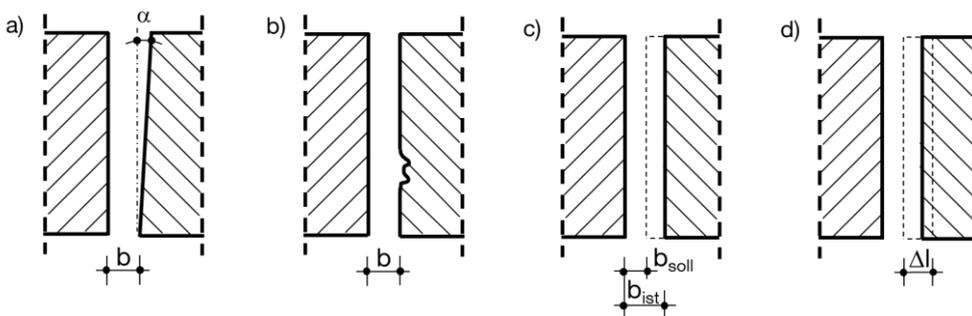


Abbildung 65: Nichteinhaltung vorgegebener Fugenbreiten; a) nicht parallele Fugenflanken, b) unebene Fugenflanken, c) Montageungenauigkeiten, d) Bauteillängenänderung durch Schwinden, Feuchte- und Temperaturdehnungen, aus (Cziesielski, Raabe, & Szabunia, 1981)

In den Untersuchungen zu bauphysikalischen Eigenschaften von Fugen in Holzskelettbaukonstruktionen (Cziesielski, Raabe, & Szabunia, 1981) wurden Materialien verwendet, die durch ihre Kompressibilität (Stauchungs- und Dehnungsvermögen) die in *Abbildung 65* gezeigten Toleranzen aufnehmen können.

5.2 Leckagemessungen an Anschlussfugen unter normalklimatischen Bedingungen

5.2.1 Prinzip

Nach bisherigen Erfahrungen ist bei einem Schadenfeuer – abgesehen von kurzen Druckspitzen bis 50 Pa – mit Drücken von bis zu 20 Pa zu rechnen (Schatz, 1981). Es ist daher vertretbar, die Leckageuntersuchungen auf einem Druckunterschied $\Delta p \leq 50 \text{ Pa}$ zu beschränken. Die Prüfung der Luftdichtheit der Anschlussfuge unter Normaltemperatur erfolgt ohne die erste Bekleidungsstufe der Decke, um den Einfluss von Brandbarrieren innerhalb Anschlusses näher zu untersuchen.

Die Prüfungen wurden in Anlehnung an DIN EN 12114 durchgeführt. An der fertigungsbedingten Anschlussfuge von zwei Prüfkörpern (Bauteile 1 und 2, vgl. Abbildung 66) wurde eine Serie von Differenzdruckstufen $5 \text{ Pa} \leq \Delta p \leq 50 \text{ Pa}$ jeweils über eine Zeitspanne (Messdauer) $t = 300 \text{ s}$ angelegt. Die maximale Strömungsgeschwindigkeit w_{max} des Geschwindigkeitsfeldes wurde mit einer Abtastrate $\Delta t = 2 \text{ s}$ für jede Differenzdruckstufe aufgezeichnet. Die Durchflussmessung erfolgte in einem vor der Anschlussfuge gelagerten Rauchgaskanal. Diese Art der Messung wurde gewählt, um einen besseren Bezug zu den Brandversuchen, bei denen der Rauchgaskanal ebenfalls auf der brandabgewandten Seite der Anschlussfuge angebracht wurde, herzustellen. Im Gegensatz hierzu erfolgt die Durchflussmessung nach DIN EN 12114 zwischen dem Ventilator und dem luftdichten Prüfstand.

Aus der numerischen Integration des Geschwindigkeitsprofils über den Querschnitt des Rauchgaskanals erhält man den zeitlichen Mittelwert des Volumenstroms $\dot{V} = \bar{w} \cdot A$. Die Messung erfolge im Bereich eines kreisförmigen Messquerschnittes $A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0,1^2}{4} = 7,85 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, in dem bei entsprechender Dichtheit der Anschlussfuge eine voll ausgebildeten laminaren Rohrströmung vorlag.

5.2.2 Prüfeinrichtung und -verfahren

Die Prüfeinrichtung wurde aus folgenden Teilen zusammengesetzt:

- a) Prüfstand zur Aufnahme des Prüfkörpers
- b) Einrichtung zum Anlegen von einstellbaren Druckdifferenzen in dem Prüfstand (stufenlos regelbarer Ventilator)
- c) Geräte zur Messung des Luftvolumenstroms und der angelegten Druckdifferenz mit einer Messgenauigkeit von $\pm 5 \%$
- d) Material zum Abdichten aller Fugen der Probekörper zum Prüfstand (u.a. Klebeband)

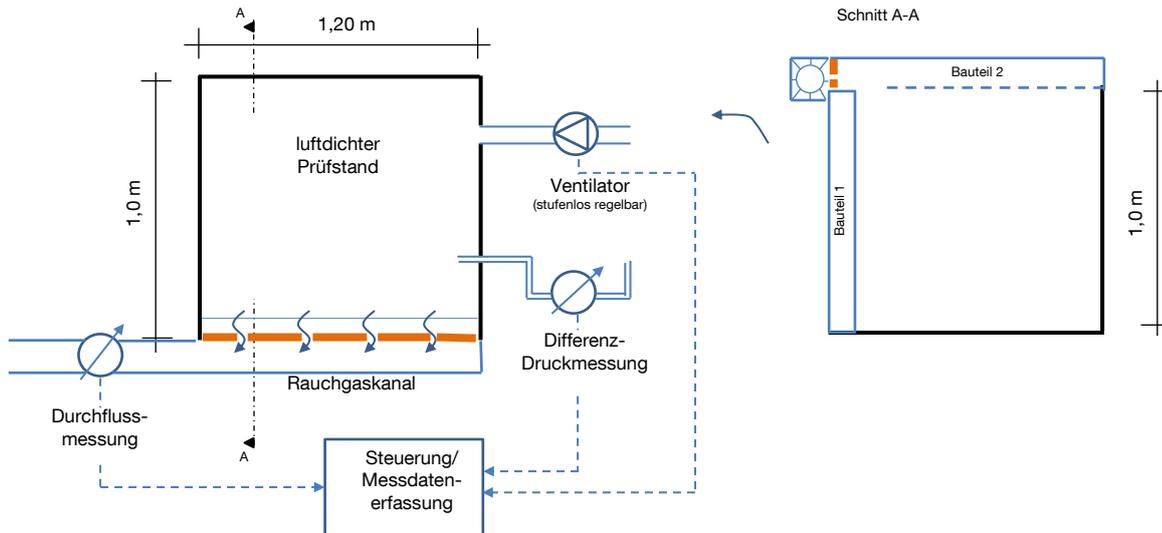


Abbildung 66: Prinzipskizze der Prüfeinrichtung

Die Prüfeinrichtung wurde in einem klimatisierten Prüfraum aufgestellt:

Temperatur $t_{\text{Labor}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, Umgebungsdruck $p_{\text{Labor}} = 1,01325 \text{ bar}$ und relative Luftfeuchte $\varphi_{\text{Labor}} = 50 \%$

Die Abweichungen von den zugrunde gelegten Laborbedingungen wiesen Werte $\leq 3\%$ auf. Eine Korrektur wurde dennoch vorgenommen, um die Messabweichungen gegenüber den Laborbedingungen und der daraus ermittelten Durchlässigkeit \dot{V} zu minimieren. Die hieraus ermittelten Werte wurden auf dann auf den Normzustand bezogen:

Temperatur $t_n = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, Umgebungsdruck $p_n = 1,01325 \text{ bar}$ und relative Luftfeuchte $\varphi_n = 0 \%$

5.2.3 Bestimmung der Leckagekoeffizienten und -exponenten

Bei den Versuchen wurden zwei Merkmale, die Druckdifferenz Δp und die Luftdurchlässigkeit \dot{V} gemessen. Um die Abhängigkeiten der beiden Merkmale zu erhalten, wurden die gemessenen Wertepaare (x_i, y_i) einer Regressions- und Korrelationsanalyse unterzogen. Durch die Regressionsanalyse wird die Art und durch die Korrelationsanalyse der Grad des Zusammenhangs zwischen den Merkmalen hergestellt. (Gellert, Küstner, Hellwich, & Kästner, 1968)

Im Allgemeinen wird folgende Näherungsgleichung zur Ermittlung der Volumenströme herangezogen:

$$\dot{V}(p) = C \cdot \Delta p^n \quad (5-1)$$

Untersuchungen zu Fugenabdichtungen im Holzbau (Cziesielski, Raabe, & Szabunia, 1981), zur Quantifizierung von Leckagen in Gebäuden in Holzbauart (Hall, Geißler, & Hauser, 2000) und Verfahren in verschiedenen Prüfnormen zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden {(E DIN EN ISO 9972,

2012) bzw. (DIN EN 13829, 2001)) und Bauteilen {(DIN EN 12114, 2000) und (E DIN EN 1026, 2013)) basieren in der Regel auf dieser Näherungsgleichung.

Die Gleichung zeigt, dass der Luftvolumenstrom \dot{V} nicht direkt proportional zu der Druckdifferenz Δp ist, da mit größer werdender Druckdifferenz die Strömungsgeschwindigkeit und damit auch die Reibungsverluste in der Fuge zunehmen. Alle abgeleiteten Größen sind abhängig von der Abschätzung des anschlussbezogenen Fugendurchlasskoeffizienten C und des -exponenten n . Zur Auswertung der Variablen \dot{V} und Δp wird die o.g. Näherungsgleichung linearisiert, indem beide Seiten logarithmiert werden. Zum Abschluss wurden die ermittelten Wertepaare einer Regressions- und Korrelationsanalyse mit Angabe der Konfidenzintervalle unterzogen. Für die Ermittlung des Konfidenzintervalls wird die t-Verteilung angesetzt. Bei der t-Verteilung wird im Allgemeinen eine Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 5\%$ und der Freiheitsgrad f , der an die Stelle des Stichprobenumfangs n tritt, verwendet. Der Freiheitsgrad f bildet sich aus der Differenz des Stichprobenumfangs n und der Anzahl der zur Berechnung verwendeten Maßzahlen m . Mit wachsendem Stichprobenumfang nähert sich die t-Verteilung an die Normalverteilung an. (Gellert, Küstner, Hellwich, & Kästner, 1968)

Die Ergebnisse der Regressions- und Korrelationsanalyse der geprüften Anschlüsse unter Normaltemperatur (siehe Anhang, Anlage 3) bilden die Grundlage für die vergleichende Bewertung des Gesamtanschlusses und der einzelnen Anschlussfugen.

Bezogen auf die Fugenlänge erhält man folgende Gleichung:

$$\dot{V}(p) = a \cdot l \cdot \Delta p^n \quad (5-2)$$

Die Luftdichtheit von Fugen kann durch den längenbezogenen Fugendurchlasskoeffizienten a beschrieben werden. Der a -Wert entspricht der Luftmenge in m^3 , die während einer Stunde durch einen Meter Fugenlänge bei einer Luftdruckdifferenz von einem Pascal zwischen in Richtung des Druckgradienten hindurchströmt.

5.2.4 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

Die Luftdurchlässigkeit von Anschlussfugen wurde an ausgewählten Holzkonstruktionen in Plattform- und Quasi-Balloon-Bauweise unter Variation möglicher Brandbarrieren bestimmt. Die Brandbarrieren mit geringen Durchlassraten wurden in den nachfolgenden Brandversuchen eingesetzt.

Tabelle 18: Darstellung der Fugen in Abhängigkeit von dem Anschluss und dem Deckenquerschnitt

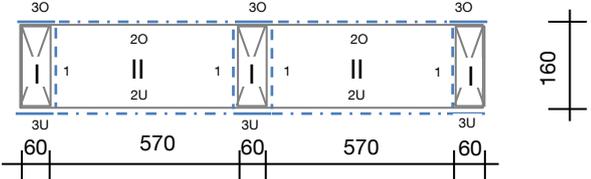
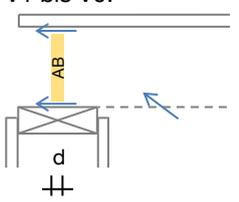
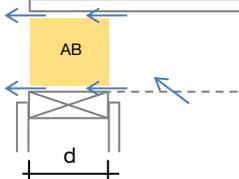
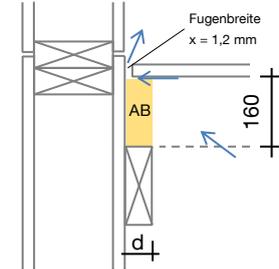
<p>Querschnitt Decke inkl. Fugen im Anschlussbereich</p>  <p>Maße [mm]</p>	<p><u>Plattform-Bauweise</u></p> <p>V1 bis V9:</p>  <p>V10 bis V12:</p> 	$\dot{V}_{L_1} = \dot{V}_{L_2} = \dot{V}_{L_3} \neq 0$ $\dot{V}_{L_2} = \dot{V}_{L_{2O}} + \dot{V}_{L_{2U}}$
	<p><u>Balloon-Bauweise</u></p> <p>V13 bis V18:</p>  <p>V19: Austausch Holzbal-kendecke durch Brett-sperrholzelement d = 131 mm</p>	$\dot{V}_{L_{2O}} = \dot{V}_{L_{3O}} \neq 0$
<p><u>Flächen:</u> $A_{ges} = 3 \cdot A_I + 2 \cdot A_{II} = 0,192 \text{ m}^2$ $A_I = 0,0288 \text{ m}^2$ $A_{II} = 0,1632 \text{ m}^2$</p>		
<p><u>Fugen:</u> $L_{ges} = 4 \cdot L_1 + 4 \cdot L_2 + 6 \cdot L_3 = 3,04 \text{ m}$ $L_1 = 0,64 \text{ m}$ $L_2 = 2,28 \text{ m}$ $L_3 = 0,36 \text{ m}$</p>		

Tabelle 19: Versuche zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit \dot{V} von verschiedenen Brandbarrieren bei Anschlüssen in Plattform-Bauweise

Versuch	Luftdurchlässigkeit Fugen	Brandbarriere (Bba)				Bemerkung	
		Grund- variante	Zusatzmaßnahmen				
			1	2	3		4
V1	$\dot{V}_{L_1} + \dot{V}_{L_2}$ $\dot{V}_{L_3} = 0$	OSB d = 22mm		x Fuge 3			Zuschnitt OSB mit Handkreissäge
V2	$\dot{V}_{L_1} + \dot{V}_{L_2}$ $\dot{V}_{L_3} = 0$			x Fuge 3			Zuschnitt OSB mit Formatkreissäge
V3	\dot{V}_{L_2} $\dot{V}_{L_3} = \dot{V}_{L_1} = 0$			x Fuge 1, 3			
V4	$\dot{V}_{L_3} = \dot{V}_{L_1} = \dot{V}_{L_2} = 0$			x Fuge 1, 2, 3			
V5	$\dot{V}_{L_1} + \dot{V}_{L_3}$ $\dot{V}_{L_2} = 0$				x Fuge 2		
V6	\dot{V}_{L_2} $\dot{V}_{L_2} = \dot{V}_{L_3} = 0$			x Fuge 3	x Fuge 2		
V7	$\dot{V}_{L_1} + \dot{V}_{L_2}$ $\dot{V}_{L_3} = 0$	SB d = 21 mm		x Fuge 3			Durch die geringere Dicke der porösen Faserplatte konnte sich die Platte im Bereich der Einnu- tung verformen.
V8	$\dot{V}_{L_3} = \dot{V}_{L_1} = \dot{V}_{L_2} = 0$			x Fuge 1, 2, 3			
V9	\dot{V}_{L_2} $\dot{V}_{L_3} = \dot{V}_{L_1} = 0$			x Fuge 1, 3			
V10	$\dot{V}_{L_1} + \dot{V}_{L_2}$ $\dot{V}_{L_3} = 0$	HF d = 160 mm		x Fuge 3			Herstellung des Schottes aus zwei Dicken: d ₁ + d ₂ = 100 + 60 = 160 mm
V11		GF d = 160 mm					
V12		Z d = 160 mm					

Erläuterung:
 Bba: 1 – keine, 2 - Klebeband, 3 – Dichtungsband, 4 – Dämmung
 OSB – Oriented Strand Board OSB/3 ungeschliffen DIN EN 300 ($\rho = 600 \text{ kg/m}^3$)
 SB – Poröse Faserdämmplatte DIN EN 316 ($\rho = 250 \text{ kg/m}^3$)
 HF – Holzfaser-Dämmplatten DIN EN 13171 ($\rho = 55 \text{ kg/m}^3$)
 GF – Glasfaserdämmstoff DIN EN 13162 ($\rho = 15 \text{ kg/m}^3$)
 Z – Zellulose-Dämmplatten ETA 03/0057 ($\rho = 70 \text{ kg/m}^3$)

Tabelle 20: Versuche zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit \dot{V} von verschiedenen Brandbarrieren bei Anschlüssen in Balloon-Bauweise

Versuch	Luftdurchlässigkeit Fugen	Brandbarriere (Bba)				Bemerkung		
		Grund- variante	Zusatzmaßnahmen					
			1	2	3		4	
V13	\dot{V}_{L_2O}	OSB d = 22 Fugenbreite $\bar{x} = 1,2 \text{ mm}$ OSB- Bepankung zur Decke	x				Befestigung Deckenbalken Spax-S Senkkopf d x l = 6 x 240 mm e = 570 mm	
V14				x Fuge 2O			--	
V15							x SB Fuge 2O	Oberhalb Fuge, Randdämmstreifen Fußbodenaufbau. Fugentiefe: l = 60 mm
V16							x GF Fuge 2O	Unterhalb Fuge, Fugentiefe l = 60 mm
V17							x Z Fuge 2O	
V18							x HF Fuge 2O	
V19			$\dot{V}_{L_2U} + \dot{V}_{L_3U}$	BSP d = 131 mm	x			

Erläuterung:
 Bba: 1 – keine, 2 - Klebeband, 3 – Dichtungsband, 4 – Dämmung
 OSB – Oriented Strand Board OSB/3 ungeschliffen DIN EN 300 ($\rho = 600 \text{ kg/m}^3$)
 SB – Poröse Faserdämmplatte DIN EN 316 ($\rho = 250 \text{ kg/m}^3$)
 HF – Holzfaser-Dämmplatten DIN EN 13171 ($\rho = 55 \text{ kg/m}^3$)
 GF – Glasfaserdämmstoff DIN EN 13162 ($\rho = 15 \text{ kg/m}^3$)
 Z – Zellulose-Dämmplatten ETA 03/0057 ($\rho = 70 \text{ kg/m}^3$)
 BSP – Brettsperrholz Z-9.1-680

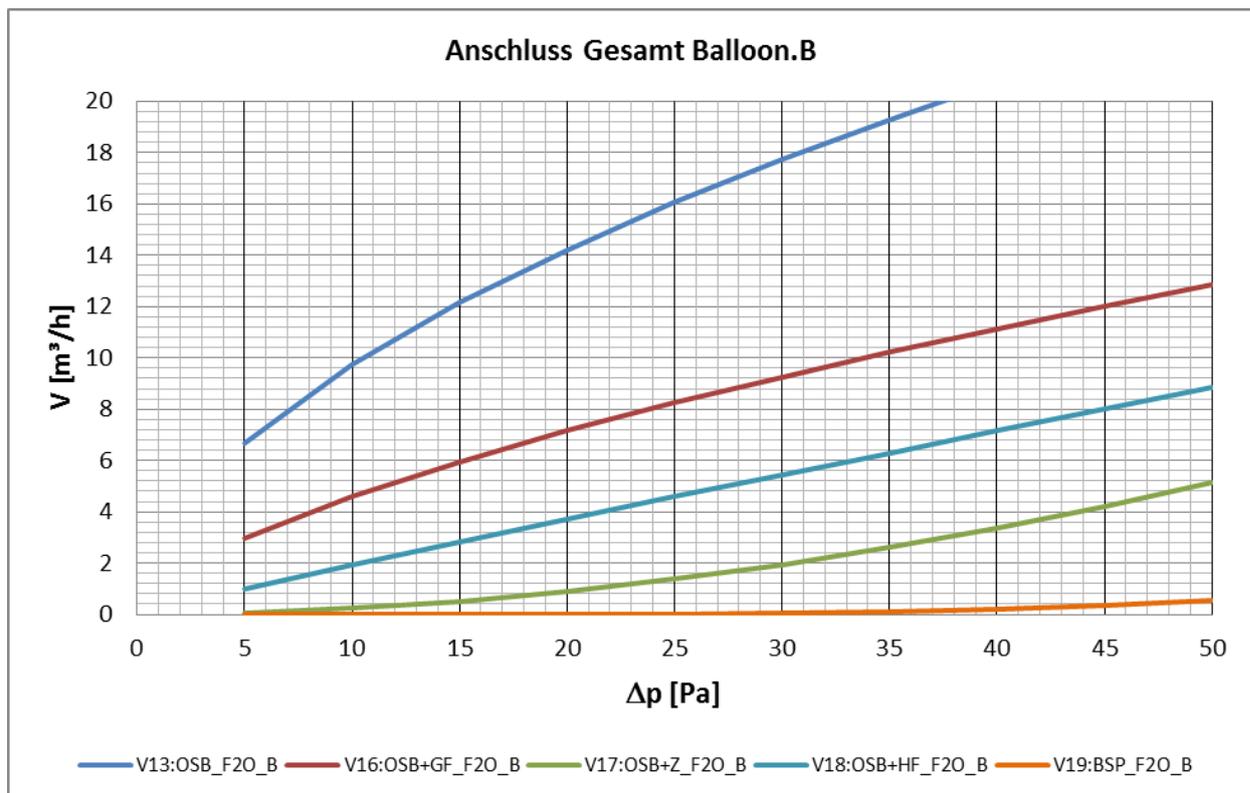
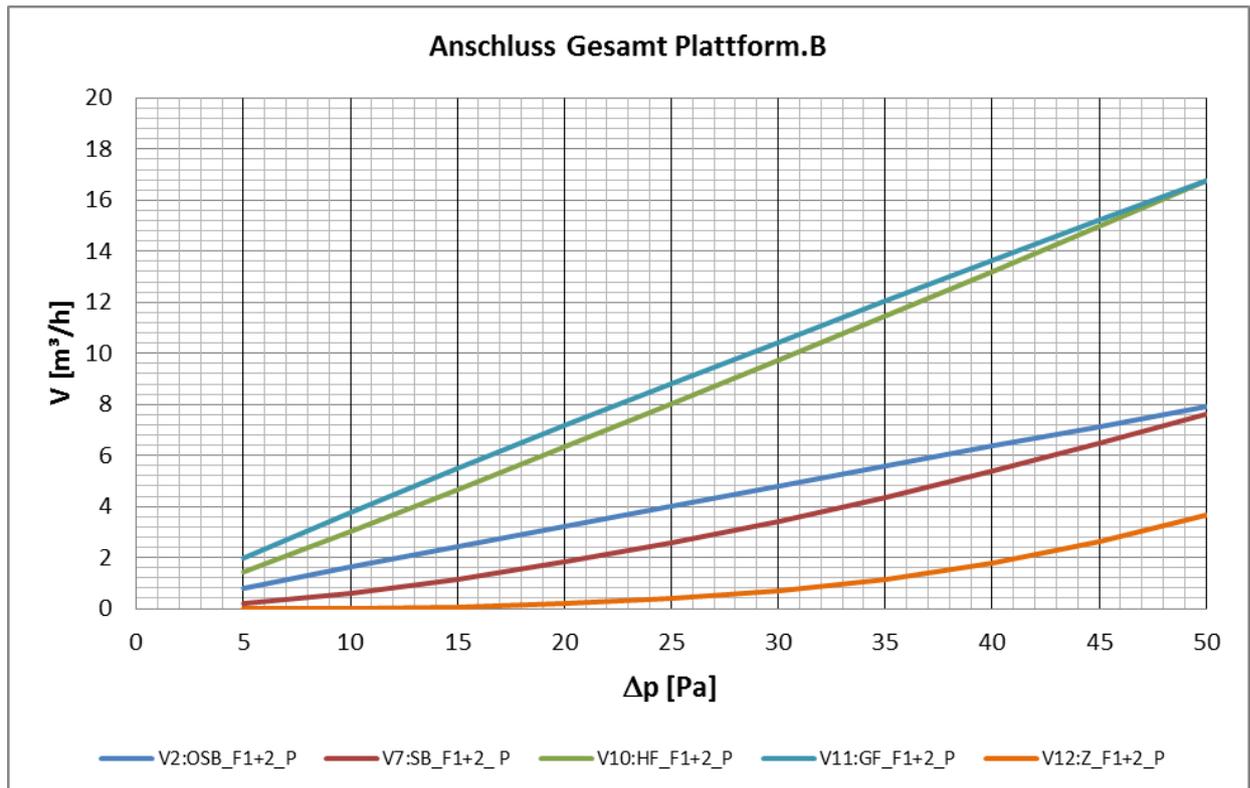


Abbildung 67: Leckagerate \dot{V} bezogen auf die geprüften Anschlüsse in Plattform- und Balloon-Bauweise

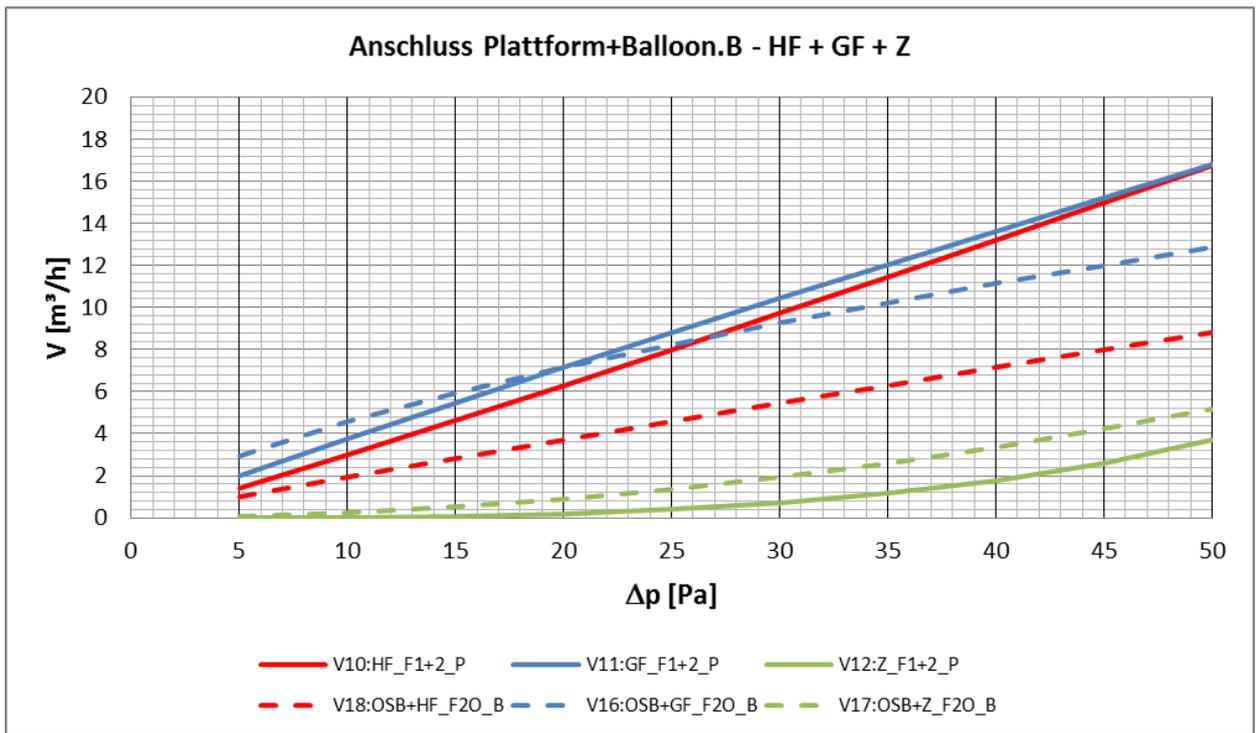
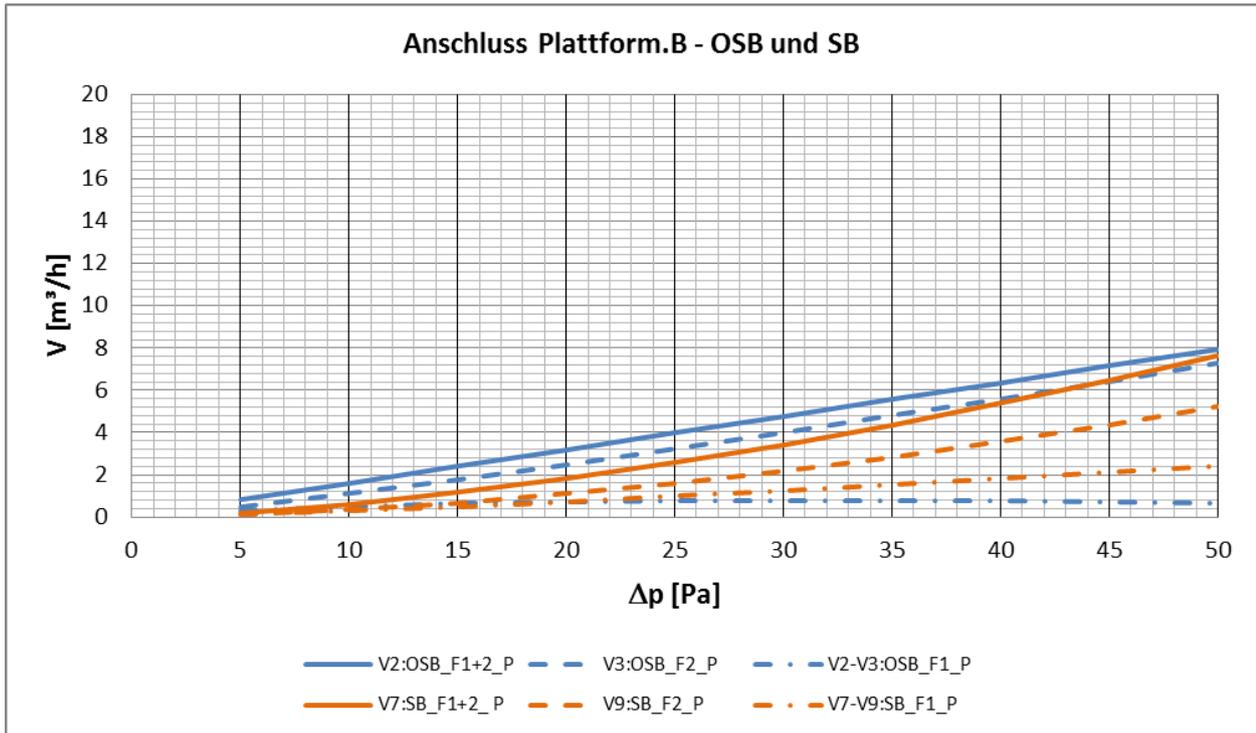
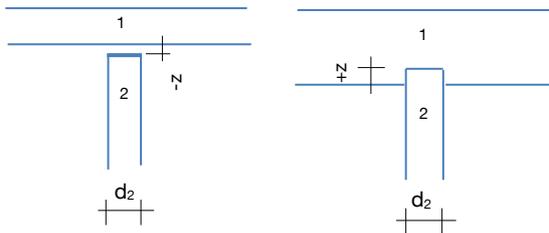


Abbildung 68: Leckagerate \dot{V} bezogen auf die geprüften Anschlussfugen

Tabelle 21: Bezogene Luftdurchlässigkeit \dot{V} [$m^3/(h \cdot m)$] bei Überdruck $\Delta p = 20 Pa$ an den geprüften Fugentypen bei Anschlüssen in Plattform- und Balloon-Bauweise (ohne Klebe- und Dichtungsbänder)

Bezeichnung	Fügung			Bauteile Brandbarriere		Luftdurchlässigkeit \dot{V} $\Delta p = 20 Pa$ (m^3/h)
	Bauteile		Fuge	1	2	
	Form	(z) [mm]	Form			
1a.OSB_P	T	+15	U	Holz	OSB	1,10
1b.SB_P	T	+15	U	Holz	SB	1,13
2a.OSB_P	T	0	I	Holz/OSB	OSB	1,22
2b.SB_P	T	0	I	Holz/OSB	SB	0,54
2c.HF_P	L	0	I	Holz/OSB	HF	2,36
2d.GF_P	L	0	I	Holz/OSB	GF	2,67
2e.Z_P	L	0	I	Holz/OSB	Z	0,07
2f.Holz_P	L	0	I	Holz	Holz	0,02
3a.Holz_B	L	0	L	Holz	Holz	0,01
4a.OSB_B	T	-1,2	I	OSB	OSB	13,93
4b.OSB+GF_B	T	-1,2	L	OSB	OSB	7,01
4c.OSB+Z_B	T	-1,2	L	OSB	OSB	0,87
4d.OSB+HF_B	T	-1,2	L	OSB	OSB	3,63

Erläuterung:



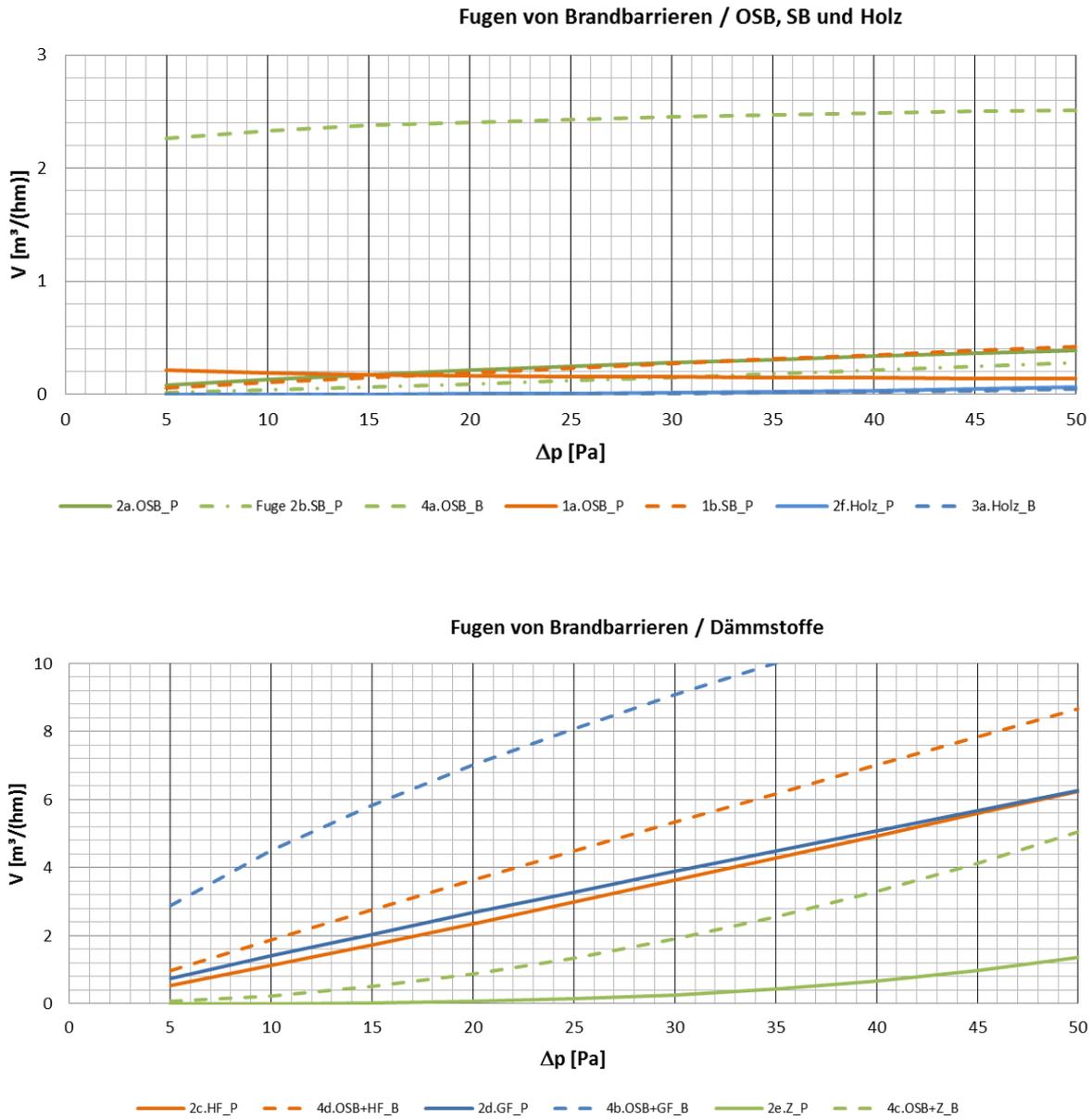


Abbildung 69: Leckagerate \dot{V} bezogen auf die Brandbarrieren und Fugenformen

5.2.5 Diskussion der Ergebnisse

Die Gesamtunsicherheit einer Prüfung mit Überdruck hängt von vielen Faktoren ab. Für jede abgeleitete Größe muss ein Schätzwert ihres Vertrauensintervalls in die Datenanalyse mit einbezogen werden. Die Genauigkeit von Bezugswerten kann durch Fehlerfortpflanzungsrechnung abgeschätzt werden. Nach E DIN EN ISO 9972 liegt die Unsicherheit typischerweise zwischen 5 % und 10 %.

Zu der vorgenannten Unsicherheit kommt noch die Messunsicherheit, die im Wesentlichen durch folgende Effekte und Einflüsse bestimmt wird:

- Verdrängungseffekt des Geschwindigkeitsmessgerätes und seiner Halterung im Messquerschnitt
- Geschwindigkeitsgradient quer zur Strömungsrichtung, insbesondere in Wandnähe
- im Zu- und Auslauf des Messquerschnittes störende Strömungen, z.B. durch Drall, Umlenkung, Verzögerung, Beschleunigung oder Pulsation
- Ungleichförmigkeitsgrad U des Geschwindigkeitsprofils

Bei Vorhandensein einer gleichförmigen Zu- und Abströmung zum Messquerschnitt und einem sehr kleinen Unförmigkeitsgrad des Geschwindigkeitsfeldes liegt die Messunsicherheit bei einem Wert ≤ 3 %. (Bohl & Elmendorf, 2005)

Die geprüften Anschluss- und Fugenvariationen (vgl. Tabelle 18, 19 und 20) zeigen zum einen den Bereich der Luft- bzw. Heißgasdurchlässigkeit und zum anderen die Funktionsfähigkeit einer Abdichtungsmaßnahme. Die einfachste und effektivste Maßnahme ist die Verwendung von Materialkombinationen, die eine bestimmte Leckagerate sicherstellen. Hierunter zählen auch Fügungen mit stumpf aneinander gestoßenen Flächen. Geringe Durchlassraten besitzen die Materialkombinationen Holz / Holz und Holz / Zellulose-dämmung bei einer Fugenlänge $L = 160 \text{ mm}$. Verglichen mit den Kombinationen Holz / Holzfaserdämmung und Holz / Glasfaserdämmung wies die Leckagerate der Kombination Holz / Zellulose einen ungefähr 30-fach geringeren Wert der Durchlässigkeit bei einer Druckdifferenz $\Delta p = 20 \text{ Pa}$ auf.

Bei der Ausbildung einer Einnutung der Materialkombinationen Holz / OSB und Holz / poröse Faserplatten (SB) mit einer Nuttiefe von 15 mm kann die Durchlässigkeit nochmals um 50 % reduziert werden.

Mit zusätzlich aufgebrachten Klebebändern, Dichtungsbändern und -schnüren sowie der Abdeckung der Fuge mit entsprechenden Materialien (z.B. poröse Faserplatte mit einer Rohdichte $\rho \geq 250 \text{ kg/m}^3$) konnte eine Luftdichtheit unterhalb des messbaren Bereichs erreicht werden.

5.3 Leckagemessung unter Brandbedingungen

5.3.1 Prinzip

Zur Messung der Leckagen unter Brandbedingungen wurde das Versuchsprinzip zur Bestimmung der Luftdurchlässigkeit unter Normaltemperatur gewählt, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Die Brandversuche wurden an üblichen Konstruktionen in Holzrahmen- und Massivholzbauweise durchgeführt.

5.3.2 Prüfeinrichtung und -verfahren

Die Prüfeinrichtung wurde aus folgenden Teilen zusammengesetzt:

- Brandprüfstand (kleiner Brandofen) zur Aufnahme der Prüfkörper
- Steuerung der Brandraumtemperatur $t(ETK)$ und vorgegebener Druckdifferenz $\Delta p = 20 Pa$ über die Brennstoff- und Luftzufuhr sowie Drosselklappe
- Geräte zur Messung der Temperaturen im Prüfofen (Messgenauigkeiten $\pm 15\text{ }^\circ\text{C}$), auf der unbebrannten Seite (Messgenauigkeiten $\pm 4\text{ }^\circ\text{C}$) und sonstige Temperaturmessungen im Prüfkörper und Rauchgaskanal (Messgenauigkeiten $\pm 10\text{ }^\circ\text{C}$) sowie der Druckdifferenz im Prüfofen (Messgenauigkeiten $\pm 2 Pa$)
- Zusätzliche Geräte zur Messung des Transmissionsgrades τ und der Luft- bzw. Rauchgaszusammensetzung mit Komponenten O_2, CO_2, CO (Messgenauigkeiten $\pm 2\text{ }%$)
- Material zum Abdichten aller Fugen der Probekörper zum Prüfstand (z.B. nichtbrennbare Dämmung)

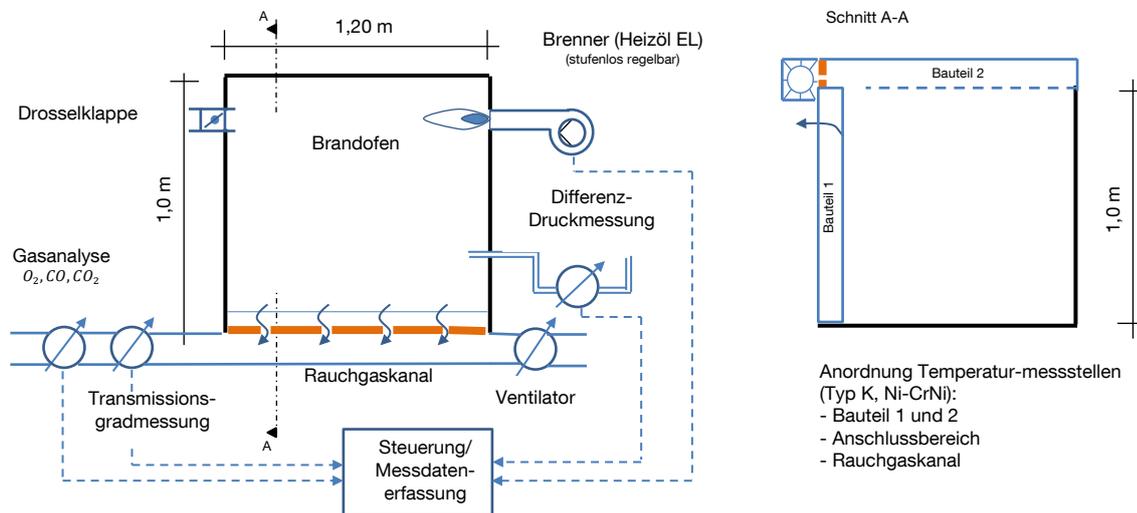


Abbildung 70: Prinzipskizze der Prüfeinrichtung

Die Prüfeinrichtung wurde in einem Prüfraum mit folgenden klimatischen Bedingungen aufgestellt:

Temperatur $t_{Labor} = 20\text{ }^\circ\text{C}$, Umgebungsdruck $p_{Labor} = 1,01325\text{ bar}$ und relative Luftfeuchte $\varphi_{Labor} = 50\text{ }%$

Abweichungen von den klimatischen Bedingungen wurden über Korrekturfaktoren berücksichtigt.

5.3.3 Bestimmung der Leckagerate über die Änderung Rauchgaszusammensetzung

Die Leckagerate wird gebildet aus dem Gesetz der Masseerhaltung. Der im Rauchgaskanal gemessene Volumenstrom ergibt sich aus der Addition des Zuluft- und Leckagestroms.

$$\dot{V}^S = \dot{V}^0 + \Delta\dot{V} \tag{5-3}$$

Mit den bekannten Anteilen der Komponenten i gilt:

$$X_i^S \cdot \dot{V}^S = X_i^0 \cdot \dot{V}^0 + X_i^k \cdot \Delta\dot{V} \tag{5-4}$$

Die Bestimmung der Leckagerate $\Delta\dot{V}$ der durch die Fugen tretenden Brandgase ergibt sich dann zu:

$$\Delta\dot{V} = \dot{V}^0 \cdot \frac{X_i^S - X_i^0}{X_i^k - X_i^S} \tag{5-5}$$

Gleichung (5-5) setzt voraus, dass innerhalb der Fuge keine Änderung der Rauchgaszusammensetzung stattfindet oder diese zu vernachlässigen ist. Als Einzelkomponente wurde Sauerstoff $i = O_2$ zur Auswertung der Versuche gewählt. In dem Rauchgaskanal erfolgte zusätzlich die Messung des Transmissionsgrades und der Temperatur des Rauchgasstroms. Über die Rauchgastemperatur wurde eine Korrektur auf die Bedingungen unter Normaltemperatur vorgenommen.

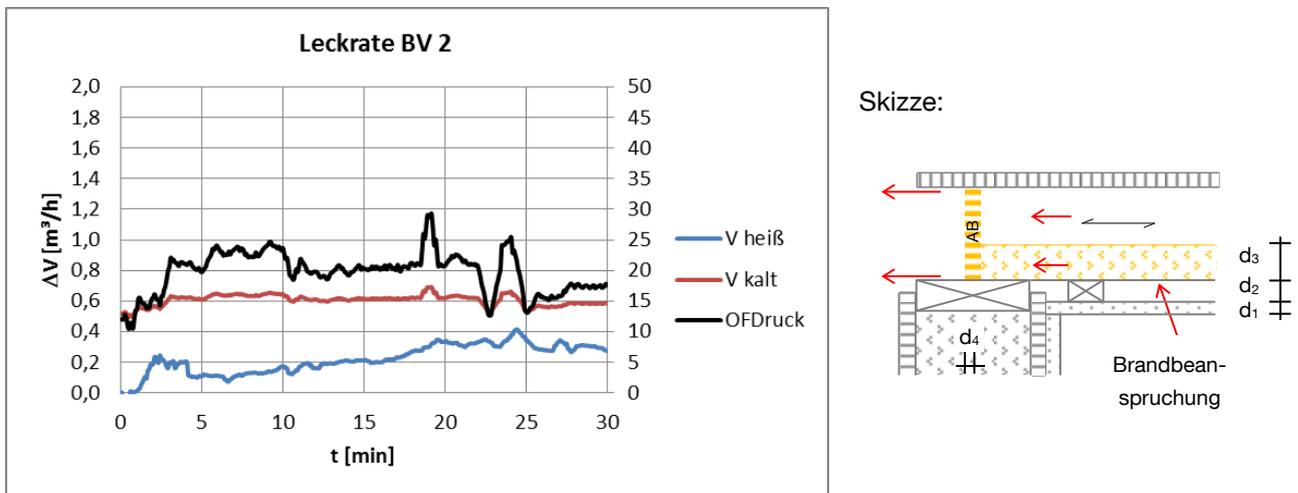
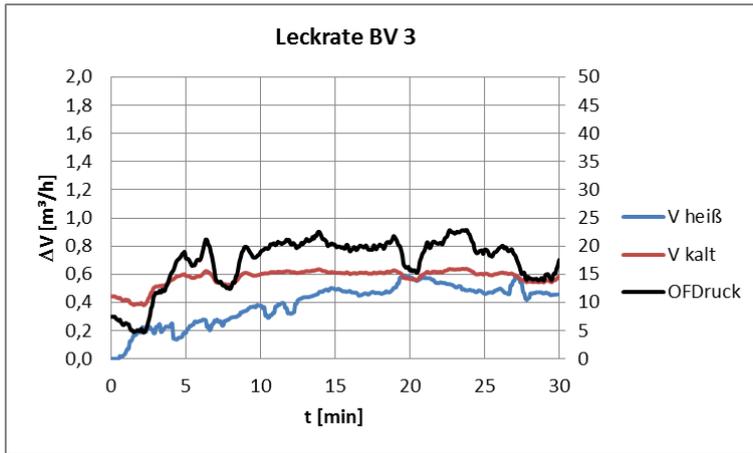


Abbildung 71: Leckagerate an Bauteilanschlüssen in Plattformbauweise, Brandbarriere OSB $d_4 = 22 \text{ mm}$ mit seitlicher Einnutung 15 mm in Deckenbalken und unterem und oberem Abdichtungsband und Deckenaufbau $d_1 = 12,5 \text{ mm}$ Gipskarton-Feuerschutzplatte, Lattung $b_2/d_2=50/30 \text{ mm}^2$ und Holzfaserdämmung $d_3 = 100 \text{ mm}$



Skizze:

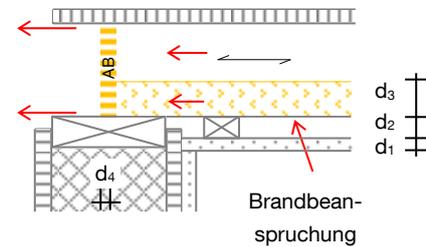


Abbildung 72: Leckagerate an Bauteilanschlüssen in Plattformbauweise, Brandbarriere OSB $d_4 = 22 \text{ mm}$ mit seitlicher Einnutung 15 mm in Deckenbalken und unterem und oberem Abdichtungsband und Deckenaufbau $d_1 = 12,5 \text{ mm}$ Gipskarton-Feuerschutzplatte, Lattung $b_2/d_2=50/30 \text{ mm}^2$ und Glasfaserdämmung $d_3 = 100 \text{ mm}$

Der Vergleich zeigt, dass sich die Leckagerate unter Brandbedingungen an die Leckagerate normalklimatischer Bedingungen annähert. Die Brandbarriere, eine OSB-Platte mit seitlicher Einnutung sowie unterem und oberem Dichtungsband wird am Anfang des Brandes durch die noch vorhandene Deckenbekleidung und Gefachdämmung geschützt. In den Versuchen unter Normaltemperatur wurde ermittelt, dass die Fügung mit der eingenuiteten OSB eine bestimmte Luftdurchlässigkeit besitzt. Die Leckagerate nähert sich in dem Maße an, indem die vorgelagerten Zusatzmaßnahmen, d.h. die Deckenbekleidung und Gefachdämmung ihre Wirkung verlieren.

5.3.4 Ergebnisse an ausgewählten Anschlussfugen

Alle Brandversuche mit abgeklebten und abgedichteten Fugen zeigen, dass die Feuerwiderstandsfähigkeit während der Messdauer nicht negativ beeinflusst wurde. D.h. die Leckagerate war über die gesamte Branddauer nahezu Null. Die Brandversuche mit Anschlüssen geringerer Dichtigkeit - ohne Abklebung oder Abdichtungsband - zeigen, dass die unter Normaltemperaturen gemessene Luftdurchlässigkeit einen Maximalwert darstellt und der Leckagestrom entsprechend der vorgelagerten Widerstände R dieser Grenze entgegenstrebt. In den Versuchen war die Brandbarriere noch intakt. Das heißt eine Vergleichbarkeit mit den Messungen unter Normaltemperatur ist gegeben.

Auf der brandabgewandten Seite der Anschlussbereiche wurden in allen Brandversuchen über die Versuchsdauer von 30 bzw. 45 Minuten Temperaturen $t_i \leq 100^\circ\text{C}$ gemessen. (Stein, 2008)

6 Beeinflussende Faktoren zur Bewertung von Anschlussausbildungen

6.1 Fugentypen und Brandbarrieren

Um eine Bewertung der Bauteile und Anschlüsse bei vorgefertigten Bauteilen vorzunehmen, wird folgende Einteilung der Fugen festgelegt:

a) Bauteilbezogene Fugen ... werden material- und bauweisenabhängig in den einzelnen Schichten eines Bauteils erzeugt. Die Anzahl und Orientierung der Fugen ist abhängig von den üblichen Querschnitts- und Plattenabmessungen.

b) Objektbezogene Fugen ... werden an den Umrandungsflächen der Bauteile erzeugt. Die Fügung erfolgt auf der Baustelle am Objekt.

Durch das Zusammenfügen der Bauteile auf der Baustelle werden objektbezogene Fugen zu:

b1) Bauteilintegrierten Objektfugen

b2) Anschlussfugen

Zur Vermeidung des Einflusses der bauteil- auf die objektbezogenen Anschlussfugen, werden zum einen ein Abgeschlossenheitsprinzip der Bauteile in und senkrecht zur Bauteilebene und zum anderen Brandbarriereebenen in Abhängigkeit von bauaufsichtlichen und versicherungstechnischen Anforderungen festgelegt.

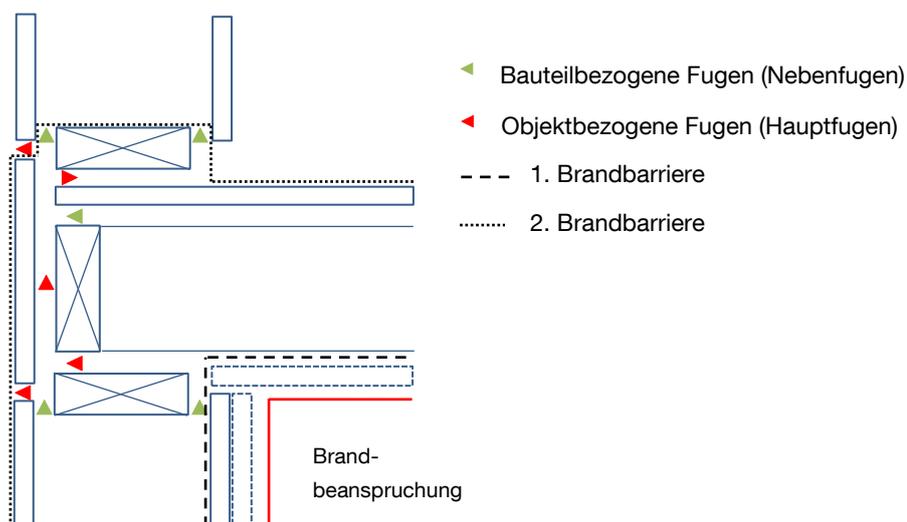


Abbildung 73: Schematische Darstellung des Barrieremodells am Anschlussbereich

Die Anforderungen ergeben sich aus der Analyse von brandgeschädigten Holzgebäuden (siehe Kapitel 2.3 und 2.4), theoretischen Betrachtungen zu Enthalpieänderungen im Leckagestrom (siehe Kapitel 4) sowie der Durchführung von klein- und großmaßstäblichen Dichtheits- und Brandversuchen (siehe Kapitel 5.2, 5.3 und 2.4.1), die an Bauteilen und deren Anschlussfugen durchgeführt wurden. Bei den Analysen zeigte

sich ein maßgeblicher Einfluss durchgehender Fugen auf die Brandweiterleitung innerhalb des Bauteils und durch das Bauteil in benachbarte Bereiche. Das Abgeschlossenheitsprinzip der Bauteile bedeutet, dass eine Brandweiterleitung innerhalb des Bauteils behindert wird. Dazu müssen die Seitenflächen und die brandabgewandte Oberfläche der Elemente rauchdicht ausgeführt werden. In Abbildung 73 bilden bei den Holzrahmenbauwänden Schwelle, Rähm und seitliche Stiele die Begrenzung. Bei der Decke werden Randbalken bzw. -bohlen angeordnet.

Die Redundanz von Bauteilen und Bauteilanschlüssen kann durch die Ausführung von zwei Brandbarriereebenen erhöht werden. Die Ausbildung nur einer Ebene muss in Abhängigkeit von der Brandbeanspruchung und der Lage im Bauteil und der Temperaturbeständigkeit des Dichtmaterials geprüft werden. In jedem Fall ist bei dieser Variante ein erhöhtes Maß an Sorgfalt bei der Planung und Ausführung notwendig.

Die Festlegung der Brandbarriereebene oder -ebenen besitzt einen Einfluss auf die konvektiven Vorgänge im Bauteil. Nach Kapitel 3.1.4.2 können die Dichtungstypen in

- Spaltdichtungen und
- Berührungsdichtung

eingeteilt werden. Im Bauwesen kommen ebenfalls Kombinationen aus Spalt- und Berührungsdichtungen zum Einsatz. Mit allen drei Dichtungstypen sind Feuerwiderstandsdauern von bis zu 90 Minuten erzielbar (vgl. Tabellen 4 und 5).

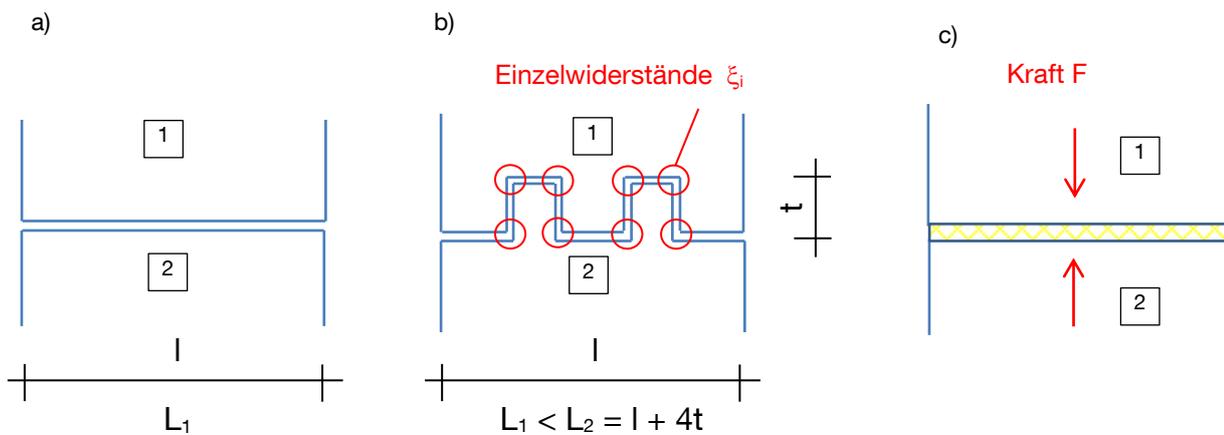


Abbildung 74: Darstellung der Dichtungsprinzipien, a) Spaltdichtungen ohne Maßnahme, b) verbesserte Spaltdichtung mit Nut- und Feder-Verbindung, c) Berührungsdichtung mit Dämmmaterial

Die Festlegung der Dichtungsmaßnahmen erfolgt in Abhängigkeit von der Brandbeanspruchung und der Temperaturentwicklung im Bauteil bzw. dem Anschlussbereich. Die Möglichkeiten der Brandeinwirkung sind in Abbildung 75 dargestellt.

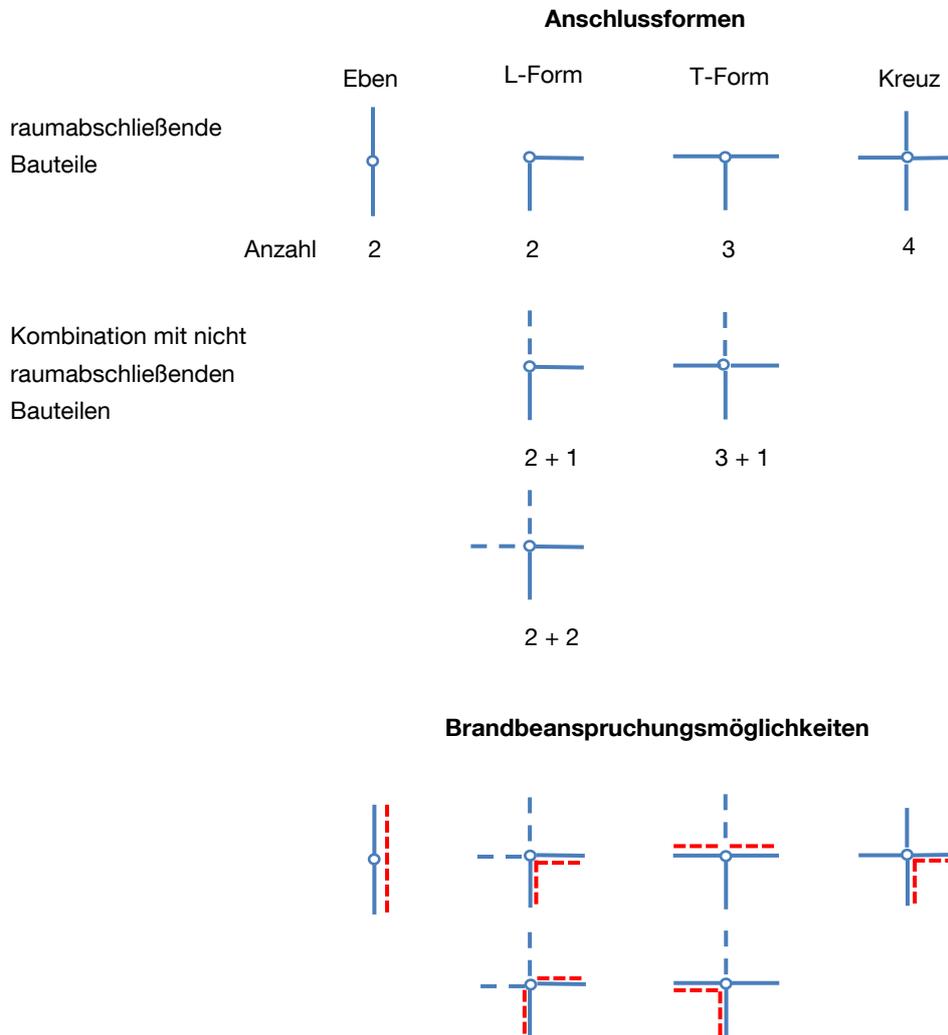


Abbildung 75: Anschlussformen und Brandbeanspruchungsmöglichkeiten

Wenn alle Bauteile mit raumabschließender Wirkung in einem Anschluss zusammengeführt werden, gibt es sechs verschiedene Möglichkeiten der Brandbeanspruchung. Bei der Anordnung im Bauwerk können die Anschlüsse in 90°-Schritten um den Mittelpunkt gedreht werden.

Weitere Anschlussvarianten entstehen, wenn nichtraumabschließende Bauteile (lineare oder flächige Bauteile) in den Anschluss eingreifen. Da nichtraumabschließende Bauteile eine zweiseitige Brandbeanspruchung erhalten, verändern sich die Brandbeanspruchungsmöglichkeiten nicht. Nur im Bereich der Einbindung des nichtraumabschließenden Bauteils kann es zu einem höheren oder geringeren Temperatureintrag in den Anschlussbereich kommen.

6.2 Variation der Anschlussausbildungen

Die Variation der Anschluss- und Fugenausbildungen ist abhängig von der Anzahl und dem Aufbau der angeschlossenen Bauteile. An einem Knoten ist die Anzahl auf vier ebene oder raumbildende Bauteile begrenzt. Die Definition des Anschlussbereiches erfolgt durch die gedachte Verlängerung der Begrenzungsebenen der Bauteile.

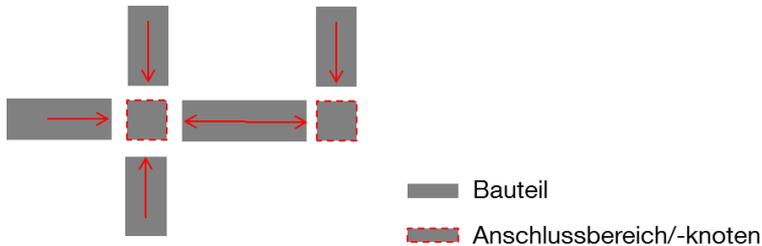


Abbildung 76: Definition des Anschlussbereiches / -knotens

In dem Anschlussbereich können die einzelnen Bauteilschichten auf unterschiedliche Art und Weise zusammengeführt werden. Betrachtet man die einzelnen Funktionsschichten der anzuschließenden Bauteile, kann der Anschlussbereich ebenfalls in verschiedene Funktionsbereiche untergliedert werden. Unter Berücksichtigung auf ihre Verträglichkeit reduzieren sich die Varianten. Hier können u.a. logische, physische, technische Constraints (logische Zwänge) angesetzt werden (Rittel, 1992). Dazu zählen:

1) Geometrische Aspekte:

Bei den experimentellen Untersuchungen wurden, abgesehen vom Traufanschluss geneigter Dächer, nur ebene Bauteile mit orthogonal eingreifenden Schichten betrachtet.

2) Konstruktive und bauphysikalische Aspekte:

Die Konzipierung des Anschlussbereiches erfolgt ausgehend von der Fügung der anzuschließenden Tragwerksbestandteile, gefolgt von der Integration der bauphysikalischen Schichten. Die Anordnung der bauphysikalischen Schichten wiederum wird durch die Temperatur- und Feuchtebeanspruchung bestimmt. Ein wesentlicher Aspekt ist die Anordnung der Dämmebene oder -ebenen in Bezug auf das Tragwerk. Es besteht die Möglichkeiten der nicht integrierten, teilintegrierten und voll integrierten Dämmung. Die Dämmebene wiederum besitzt ihrerseits einen Einfluss auf die Platzierung der Luft- und Winddichtheitsebene.

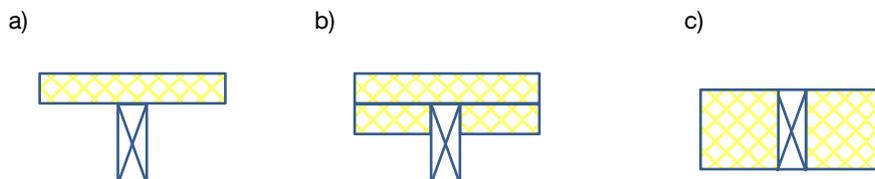
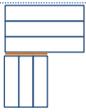
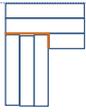
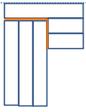
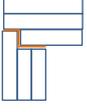
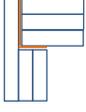
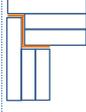
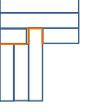
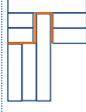
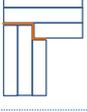
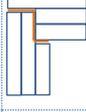
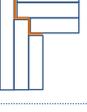
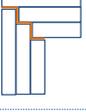
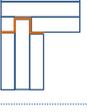
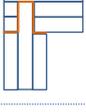


Abbildung 77: Integration Tragwerk und Dämmung, a) nicht integriert, b) teilintegriert, c) voll integriert

Das Einbinden der Funktionsschichten hat Auswirkungen auf die Fugenausbildung. Tabelle 22 zeigt Anschlussvariationen von zwei flächigen Bauteilen (Wand und Decke), die aus jeweils drei Schichten aufgebaut sind. Neben der ebenen Fugenausbildung gibt es die Möglichkeit abgetreppte Fugen zu erzeugen.

Letztere Möglichkeit führt entsprechend der hydraulischen Grundlagen zu einer Erhöhung der Strömungswiderstände und damit zu einer Verringerung des Volumenstroms. Die Fügungen müssen so konstruiert werden, dass ein Druckabfall $\Delta p = 20Pa$ erzeugt wird.

Tabelle 22: Variation eines Anschlusses mit zwei tragenden dreischichtigen Elementen, z.B. Brettsperrholzelemente (BSP) oder Holz-Beton-Verbundelemente

Varianten	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fugenform	eben				abgetreppt					
Abtreppung	keine	1	2	1	2	3	4		3	4
Fugentiefe t_F	$3 \cdot d_i$	$4 \cdot d_i$			$5 \cdot d_i$				$7 \cdot d_i$	
A										
B										
C										
D										
E										
F										

Nimmt man für die jeweils drei Schichten der Tragelemente die gleiche Dicke d_i an, kann eine Unterscheidung in sechs Fugenformen A bis F abhängig von der Anzahl der Abtreppungen und Längen getroffen werden. Die Reduzierung der Varianten erfolgt, indem die Lastweiterleitung von dem horizontalen Deckenelement auf das vertikale Wandelement ohne zusätzliche Hilfsmittel erfolgt, alle neun Anschlussfelder belegt sein müssen und die Elemente aus einem Stück bestehen. Das setzt voraus, dass sich mindestens eine Schicht des Deckenelementes im Anschlussbereich befinden muss. Aus den Vorgaben lassen sich 15 Varianten ableiten. Eine weitere Reduzierung erfolgt über die Material- und Steifigkeitseigenschaften der verwendeten Materialien, u.a. Querzug im Bereich der Ausklinkung (Varianten A2, A4, B6, B9 und E8) und Auflagerpressung (alle Varianten).

6.3 Systematik

Die in den vorangegangenen Kapiteln angestellten Überlegungen führen zu einer Systematik der Bauteil- und Anschlussbewertung unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren auf die Brandweiterleitung. Nachfolgend wird die Systematik in einzelne Schritte untergliedert.

1) Globale Betrachtung: a) Standort, b) Nutzung, c) Form

2) Lokale Betrachtung:

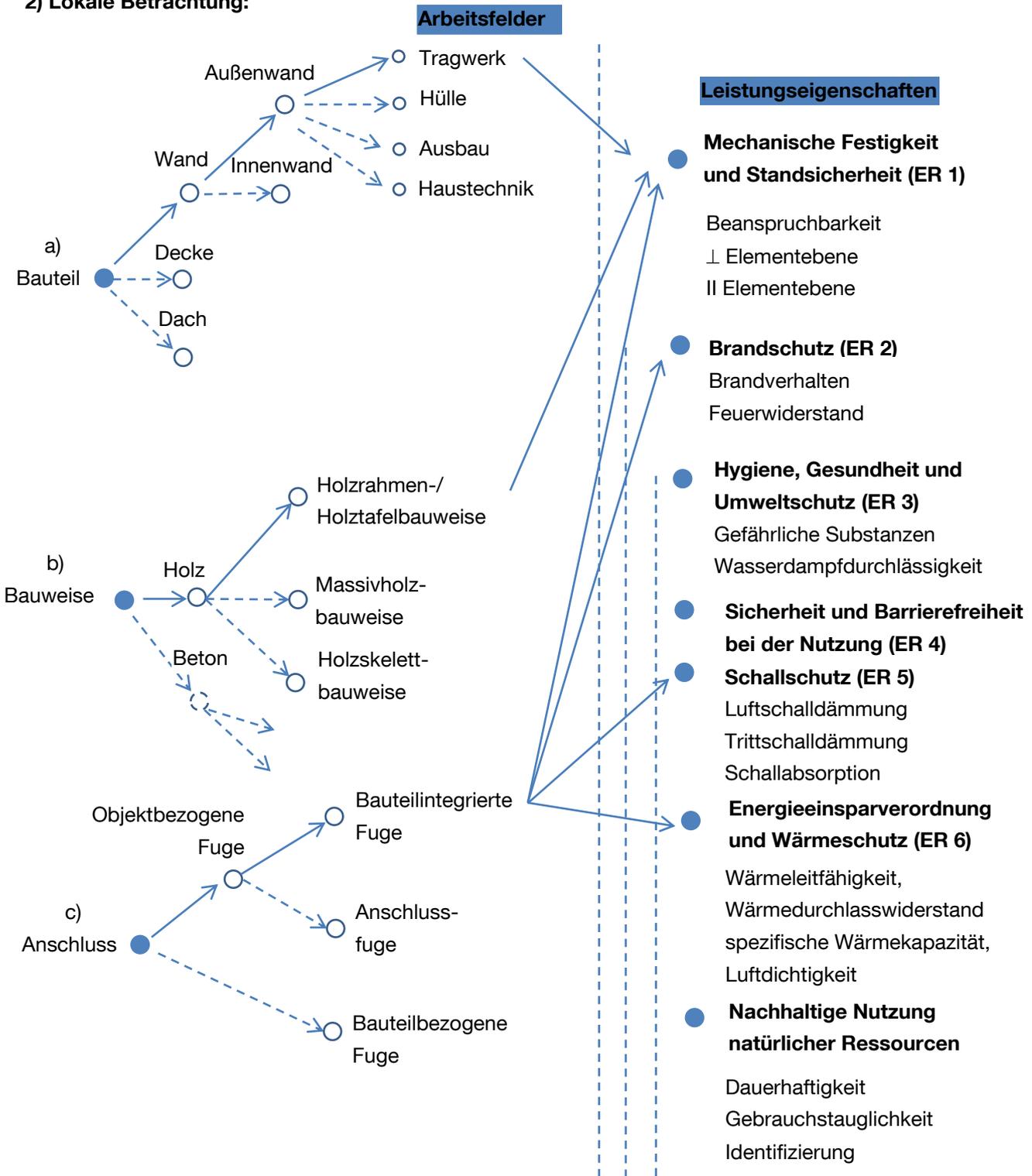


Abbildung 78: Anwendung des Modells der mehrstufigen Alternativenbildung

Die Brandweiterleitung innerhalb objektbezogener Fugen muss immer in Abhängigkeit der Einbindung von bauteilbezogenen Fugen betrachtet werden. Das bedeutet, dass bereichsweise angeordnete Schutzmaßnahmen innerhalb der Hauptwege nicht in jedem Fall ausreichend sind. Bauteilbezogene Fugen sind der

einzelnen Bauteilschicht zugeordnet. Sie können in und rechtwinklig zur Bauteilebene verlaufen und entsprechend der Bauweise typisiert werden. Ist die Fugenform festgelegt, wird die Lage innerhalb des Bauteils definiert. In Abhängigkeit von der Temperaturentwicklung im Bauteil, die abhängig von der Schichtung der Bauteile ist, werden die Fugen zeitabhängig beansprucht.

3) Nachweise: a Beanspruchung, b Beanspruchbarkeit

Zu 3a: Beanspruchung durch Brandeinwirkung

Die Brandbeanspruchung der Bauteile und Anschlussbereiche ist abhängig von dem festgelegten Bemessungsbrand und von der Art der Beanspruchung (ein- bzw. mehrseitig). Die experimentellen Untersuchungen wurden unter Zugrundelegung der Einheits-Temperaturzeitkurve durchgeführt.

Zu 3b: Brandbeanspruchbarkeit

Die Beanspruchbarkeit definiert sich aus den bauaufsichtlichen und versicherungstechnischen Anforderungen. Als brandschutztechnische Versagenskriterien werden die Leistungskriterien R, E und I angesetzt. Die Übertragung der raumabschließenden Kriterien ‚E‘ und ‚I‘ auf den Anschlussbereich bedeutet, dass dort ebenfalls eine durchgehende Schicht auf der brandabgewandten Seite vorhanden sein muss.

Der Raumabschluss von Bauteilen kann entsprechend DIN EN 1995-1-2, Anhang E mit einem additiven Verfahren ermittelt werden. Für die einzelnen Bauteilschichten kann auf Grundlage des additiven Verfahrens der Grundwert der Wärmedämmeigenschaft $t_{ins,0,i}$ und die Versagenszeit der Brandschutzbekleidung t_f angegeben werden. Mit der Versagenszeit t_f kann ein direkter Bezug zur Temperaturentwicklung im Bauteil und damit aus versicherungstechnischer Sicht ein Bezug zum Schädigungsgrad der Bauteile hergestellt werden. Die bauaufsichtlichen Anforderungen ergeben sich in Abhängigkeit von der Geschossigkeit, der Art der Nutzung und Anzahl der Nutzungseinheiten. Eine entscheidende Rolle für die Anschlussausbildung spielt die vertikale und horizontale Abgrenzung der Nutzungseinheiten.

Normativ ist kein Grenzwert der Rauchdichtigkeit für Bauteile und damit auch der Anschlüsse vorgesehen. Die Bestimmung des Grenzwertes über den Transmissionsgrad (vgl. Kapitel 2.4.3) kann entsprechend der theoretischen Untersuchungen in Kapitel 4 nicht mit hinreichender Genauigkeit angesetzt werden. Der bei auftretenden Undichtigkeiten durchtretende Heißgasstrom, der gegebenenfalls mit Wasser in Form von Wasserdampf und Nebel beladen ist, verfälscht den Transmissionsgrad.

Aus diesem Grund werden vorerst zwei Varianten in den Vordergrund gestellt.

1. Ausbildung von zwei Dichtungsebenen auf entgegengesetzten Seiten
2. Ausbildung von einer Dichtungsebene, unter Berücksichtigung der Temperaturbeanspruchung im Querschnitt

Bei flächigen Tragwerkselementen besteht die Möglichkeit, eine raumabschließende Wirkung bereits durch die Elemente selbst zu erreichen. Bauweisen bei denen flächige Bauteile aus einer Reihe linearer Bauteile (z.B. Stützenreihe Holzrahmenbauwand) generiert werden, ist nur in den Bereichen eine raumabschließende Wirkung denkbar, die zur Aussteifung des Gebäudes herangezogen werden. Das ist der Fall bei Deckenscheiben und bei Wandscheiben mit einer Breite $\geq 1,0$ m. Der Vorteil dieser Betrachtungsweise ist, dass die Feuerwiderstandsfähigkeit von Holzkonstruktionen ausgehend von ihrem Grundtraggerüst bewer-

tet werden kann. Alle weiteren Schichten führen dann in der Regel zu einer Verbesserung der Bauteile und Bauteilanschlüsse. Das Bauelement wird hierzu in einem ersten Schritt aus der Konstruktion herausgetrennt und isoliert hinsichtlich der Geometrie, Schichtung und Fügungen betrachtet.

4) Qualitäts- und Gütesicherung

Die qualitative Ausführung von Bauelementen hat einen entscheidenden Einfluss auf die Feuerwiderstandsfähigkeit einer Konstruktion. Die Sicherstellung der Qualität im Holzhausbau erfolgt durch die verschiedenen Formen der Überwachung und Zertifizierung (siehe Kapitel 3.3.2.4).

7 Beispielhafte Darstellung eines Anschlussdetails

7.1 Allgemein

Nachfolgend wird ein Anschluss in Plattform-Bauweise, in dem Holzrahmenbauelemente zusammengeführt werden, untersucht. Die Bauteile können in Abhängigkeit des Vorfertigungsgrades und der Montagefolge separiert werden. Die bauteil- und objektbezogenen Anschlussfugen werden dadurch deutlich hervorgehoben.

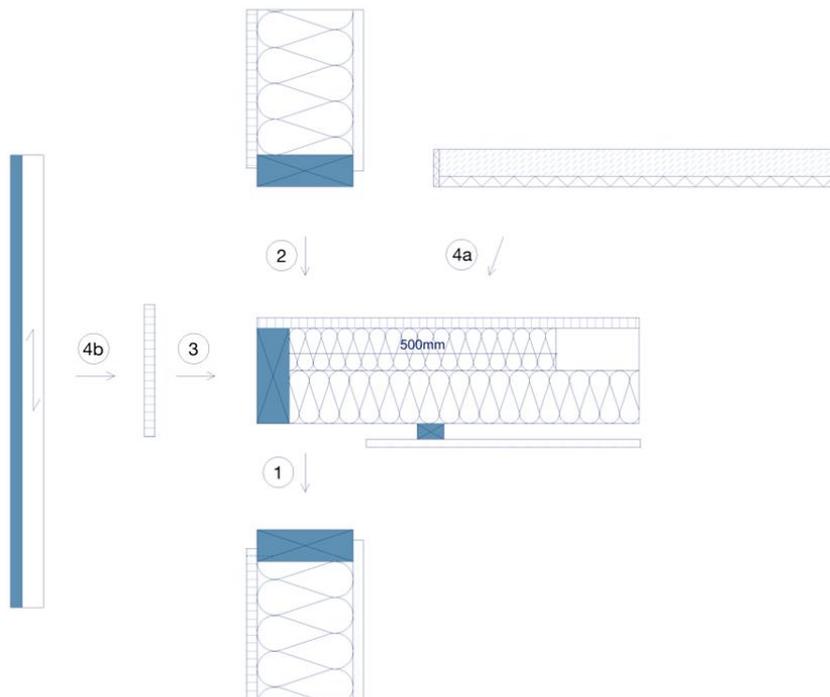


Abbildung 79: Anschluss in Plattformbauweise - Montagefolge

Für die eingreifenden Wand- und Deckenbauteile werden die beeinflussenden Kennwerte unter normalen Umgebungsbedingungen ermittelt. Hierzu zählen die Tragfähigkeit, Wärmeschutz (U-Wert, EnEV), Feuchteschutz (Glaser-Verfahren oder dynamische Verfahren), Luft- und Winddichtheit (Materialien q_{50} und Gebäude n_{50}), Schallschutz (R_w und L_n) und Brandschutz (REI oder EI, t_{ins} und t_i). Daraus folgen die Schichtdicken der Bauteile.

Im zweiten Schritt erfolgt die Konzipierung des Anschlussbereiches. In dem Anschlussbereich werden ebenfalls die Kennwerte aus Tragfähigkeit, Wärmeschutz (ψ , f_{Rsi}), Feuchteschutz, Luft- und Winddichtheit, Schallschutz ($D_{n,f,w}$, $L_{n,f,w}$) und Brandschutz untersucht.

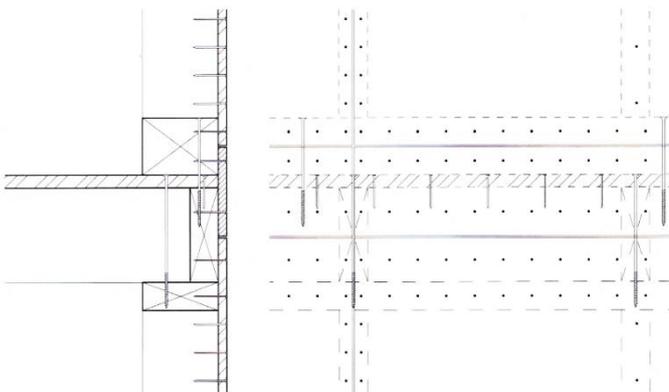
7.2 Bewertung

7.2.1 Tragwerk

Abbildung 80 zeigt einen Deckenanschluss in Plattformbauweise. Die Deckenbalken werden entsprechend des Achsmaßes, der Spannweite und Belastung ermittelt. Bei Holzbalkendecken in Wohngebäuden können übliche Deckenhöhen $220 \text{ mm} < h \leq 320 \text{ mm}$ in Abhängigkeit von der Spannweite $4 \text{ m} < l \leq 6 \text{ m}$ angegeben werden. (Kolb, 2007)

Die Fugen können im Vergleich zur dazwischen liegenden Verblockung reduziert werden, wenn der Randbalken durchläuft. Der Anschlussbereich ist abhängig von der Anordnung der statisch wirksamen Bekleidung der aussteifenden Wände.

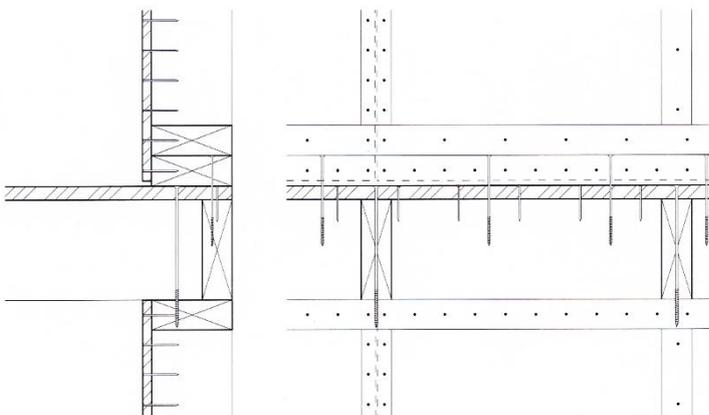
a)



Übertragung von Schub- und Zugkräften:

kraftschlüssige Verbindung aus streifenförmigen Holzwerkstoffplatten und Verbindungsmitteln

b)



Übertragung von Schub- und Zugkräften:

Verbindungsmittel

Abbildung 80: Anschluss Decke \perp Außenwand, a) durchgehende außenliegende statisch wirksame Bekleidung, b) nicht durchgehende innenliegende statisch wirksame Bekleidung aus (Kolb, 2007)

Die Unterschiede, die sich aus der statisch wirksamen Bekleidung ergeben, können übersichtlich in einem elektrischen Widerstandsmodell dargestellt werden. Die Widerstände werden aktiviert, wenn die Deckenbekleidung versagt oder sich deren Fügung im Anschlussbereich öffnet. Im Bereich oberhalb des Rähms sind die Widerstände R1 und R2 parallel und nachfolgend die Widerstände R3 und R4 in Reihe geschaltet. Bei parallel geschalteten Widerständen müssen die Einzelverluste bei $\Delta p = konst.$ und bei hintereinander geschalteten Widerständen bei $\Delta \dot{V} = konst.$ addiert werden (Bohl & Wagner, 1978).

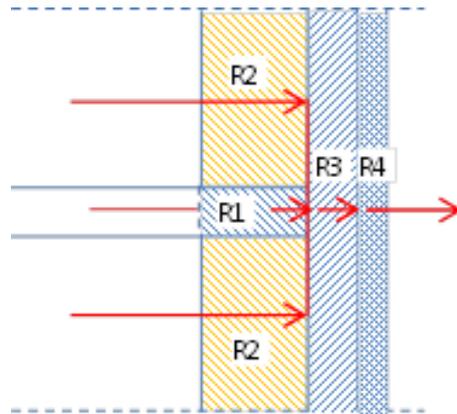
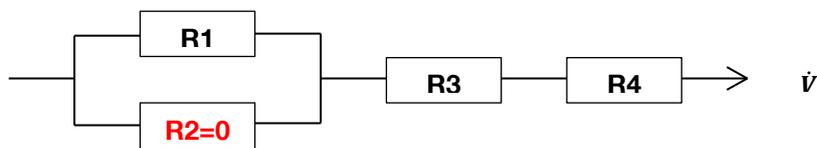


Abbildung 81: Horizontalschnitt Anschlussbereich (Höhe Deckenbalken) mit Einzelwiderständen gegenüber Rauchdurchlässigkeit: R1 = Deckenbalken / Rähm + obere Bekleidung, R2 = Gefachdämmung / Deckenbalken + Rähm + obere Bekleidung, R3 = Randbalken/Rähm + obere Bekleidung und R4 = Randbalken/äußere statisch wirksame Bekleidung

In Bauteilanschlüssen sind unterschiedliche Widerstände hintereinander geschaltet. Für die Varianten a und b in Abbildung 80 ergeben sich folgende Widerstandsmodelle für die Bestimmung des Volumensstroms \dot{V} .

a)



b)

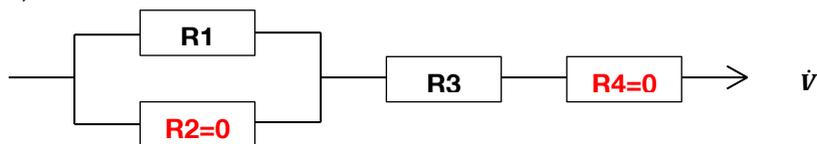


Abbildung 82: Widerstandsmodelle für die statische Grundkonstruktion des Anschlusses Decke \perp Außenwand, a) durchgehende außenliegende statisch wirksame Bekleidung, b) nicht durchgehende innenliegende statisch wirksame Bekleidung

Der Gesamtwiderstand ergibt sich bei parallel geschalteten Widerständen aus:

Parallelschaltung :
$$\frac{1}{\sqrt{R_{1,2}}} = \frac{1}{\sqrt{R_1}} + \frac{1}{\sqrt{R_2}}$$

Reihenschaltung:
$$R = R_{1,2} + R_3 + R_4$$

Die Gesamtdruckverluste berechnen sich zu: $\Delta p = R \cdot \dot{V}^2$

$$\Delta p_V = \left(\sum \zeta + \lambda \frac{L}{d} \right) \frac{\rho}{2} \bar{w}^2 = \left(\sum \zeta + \lambda \frac{L}{d} \right) \frac{\rho}{2} \frac{\dot{V}^2}{A^2}$$

Bei laminarer Strömung sind die Reibungszahlen für das Rohr $\lambda_{Rohr} = 64/Re$ und den Spalt $\lambda_{Spalt} = 96/Re$. D.h. je kleiner Re ist, umso größer ist die Reibungszahl λ . Die Druckminderung wird bei kürzeren Rohr- bzw. Spaltlängen maßgeblich durch die Einbauten mit ξ_i bestimmt. Die Widerstandsbeiwerte betragen für einen scharfkantigen Einlauf $\xi = 0,5$ und für eine Rohrkrümmung $\xi = 1,6$. (Bohl & Elmendorf, 2005) D.h. je mehr Abtreppungen in der Fügung vorhanden sind, umso größer wird der Druckabfall.

Erwartungsgemäß weist die Variante mit nicht durchgehender statisch wirksamer Bekleidung die größere Durchlässigkeit bei sonst gleicher Fugenausbildung auf. Die Widerstände gegenüber dem Heißgasdurchtritt vergrößern sich in dem Maße, in dem die Grundtragstruktur durch weitere Funktionsschichten geschützt wird.

7.2.2 Einfluss weiterer Funktionsschichten

Aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten führen die an Bauelemente gestellten Leistungskriterien dazu, dass einer Schicht mehrere Funktionen zugeordnet werden. Zum Beispiel müssen die Luft- und Winddichtigkeitsebene im Bauteilverbund ebenfalls gewährleisten, dass kein unzulässig hoher Tauwasserausfall in den Bauelementen auftritt. Zur Vermeidung des Tauwasserausfalls muss ein bestimmtes Dampfdruckgefälle in der Konstruktion aufgebaut werden. Konvektionseinflüsse auf das Innere des Bauteils werden unter normal-klimatischen Bedingungen durch die Ausführung einer Luft- und Winddichtigkeitsebene vermieden. Idealerweise werden getrennte Ebenen ausgeführt, die Luftdichtigkeitsebene auf der raumzugewandten Seite und die Winddichtigkeitsebene auf der raumabgewandten Seite der gebäudeumhüllenden Bauteile.

Kommen bei der Herstellung der Dichtungsebene Holzwerkstoffplatten zum Einsatz, können je nach Typ der Holzwerkstoffe weitere Funktionen übernommen werden, u.a. statische-konstruktive und wärmedämmende Funktionen. Von besonderer Bedeutung ist die Ausbildung von Fugen, für die dieselben Leistungskriterien gelten wie diejenigen in ungestörten Bereichen.

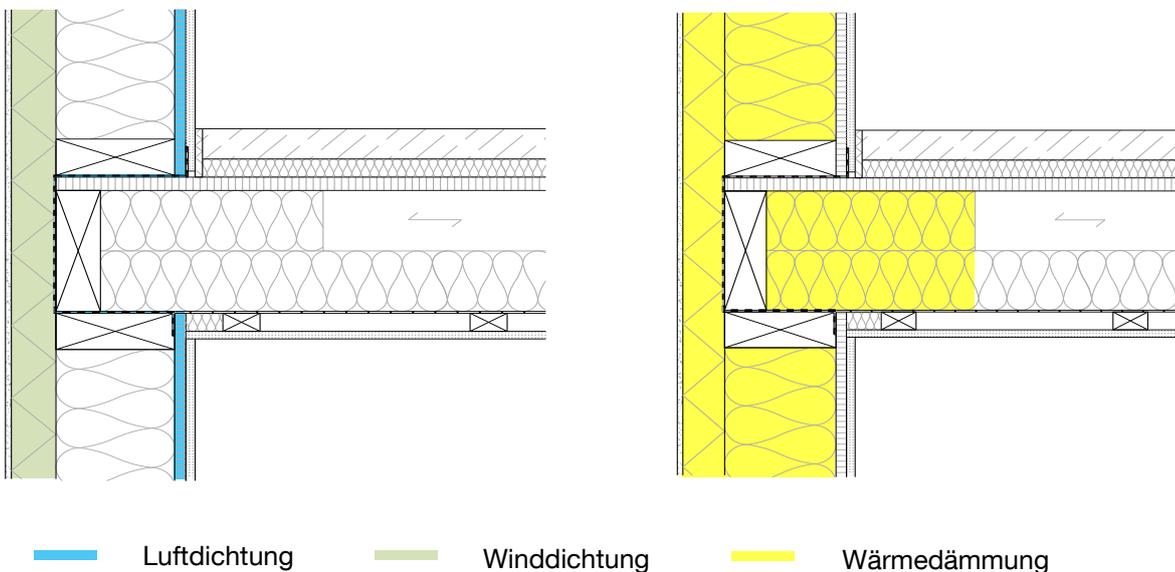


Abbildung 83: Verknüpfung von Funktionsschichten im Anschluss mit hervorgehobener Luft- und Winddichtungsschicht

In dem in Abbildung 83 gezeigten Anschluss sind die Dichtungs- und Wärmedämmschichten hervorgehoben. Nachdem der Schrumpfungsprozess der brandraumzugewandten Gipsplatten einsetzt, können sich Heißgase über schlecht konzipierte Fugen oder Installationsöffnungen in der Konstruktion verteilen. Die

Ausbreitung von Heißgasen erfolgt in Abhängigkeit von den Widerständen der Materialfügungen und der Brandbarrieren in den Bauteilen und Anschlussbereichen.

Wenn die jeweilige Dichtungsschicht einen Funktionsverlust erleidet, können Heißgase in Abhängigkeit von der Permeabilität und Fügungsqualität der Materialien in nachfolgende Bereiche gelangen. Der Funktionsverlust der Dichtungsebene ist dabei abhängig von der Schichtung und der Temperaturänderung innerhalb der Bauteile. In Abhängigkeit vom Wärmedurchgang durch ein Bauteil in der Fläche und im Anschlussbereich soll ein Überschreiten der Grenztemperatur des Dichtungsmaterials vermieden werden. Unter Berücksichtigung der Ausbaukonstruktion erweitert sich das Widerstandsmodell in Abbildung 82 um das Dämmschott und die Deckenbekleidung (vgl. Abbildung 84).



Abbildung 84: Widerstandsmodelle für die statische Grundkonstruktion und Ausbaukonstruktion des Anschlusses Decke \perp Außenwand

8 Zusammenfassung

8.1 Beeinflussende Faktoren auf Brandweiterleitungsmechanismen

Die brandschutztechnische Qualität und folglich die Feuerwiderstandsfähigkeit der Gesamtkonstruktion ist abhängig von der materialspezifischen Konzipierung der additiv aufgebauten Holzbauteile und der Zusammenführung der einzelnen Bauteilschichten im Anschlussbereich. Die Konzipierung von Bauteilfugen wurde in Bezug auf die nachfolgend aufgeführten brandbeeinflussenden Faktoren untersucht

- Konstruktionsmethodik und -prinzipien
- Systematische Zusammenstellung der Bausysteme für Gebäude in Holzbauweise
- Identifizierung der Brandpfade mit Schadenscharakteristika durch Auswertung von Brandschäden an realen Brandobjekten und Durchführung von Brandversuchen im Klein- und Großmaßstab
- Bestimmung des Bauteilschadigungsgrades in Abhängigkeit von der Branddauer
- Theoretische Betrachtungen zum Wärme- und Feuchtetransport in Holzbauteilen
- Darstellung beeinflussender Faktoren für Anschlussdetails von vorgefertigten Bauelementen als Grundlage für einen Konstruktionskatalog mit Holzbauteilen mit erhöhter Brandsicherheit

Der Prozess des Entwerfens und Konstruierens wurde vor dem Hintergrund eines ressourcenschonenden Umgangs mit dem natürlichen Werkstoff Holz in üblichen Holzbauweisen und –systemen untersucht. Der Planungsprozess kann in einen architektonischen und funktionalen Bereich aufgeteilt werden, wobei die ermittelten Hauptkriterien Standort, Nutzung, Tragwerk, Raumabschluss, Haustechnik und Form sich in Teilen übergreifen können (vgl. Abbildung 26). Die Entwurfsplanung ist hierbei die entscheidende Phase, in der die Problemlösungsvorgänge der Vorplanung zusammengefasst und für die Folgephasen vorbestimmt werden. Die Kosten, Zeit und Qualität werden in dieser Phase wesentlich vorherbestimmt (vgl. Abbildung 24). Die entwickelte Systematik der Bauteil- und Anschlussbewertung dient als Grundlage für einen Konstruktions- und Maßnahmenkatalog, der für diese Phase maßgebliche Informationen bereitstellt.

In der Arbeit wurden vorgefertigte Bauteile untersucht, die eine entsprechende Qualität der Fügungen in Abhängigkeit von Fertigungs-, Transport- und Montageprozessen erwarten lassen. Die starke Vernetzung der Planungs- und Bauprozesse führt dazu, dass schon in der Frühphase eines Projektes eine integrative Planung der am Bau Beteiligten zur Erreichung der Zielvorgaben notwendig ist. Im Vergleich zu deterministischen Planungssystemen stellen computergestützte Planungssysteme ein geeignetes Mittel dar, welche den iterativen Prozess eines individuellen Architektorentwurfs mit modulbasierten Funktionseinheiten unterstützen. Dieses System vertritt die Grundthese, dass jedes Bauwerk in hohem Maße aus Wiederholungen von Serien von Einzelteilen besteht. Diese Wiederholungen von Serien von Einzelteilen sowie Anschlussvarianten wurden in Abhängigkeit der verschiedenen Holzbauweisen herausgearbeitet sowie hinsichtlich der Konstruktionsprinzipien untersucht und bewertet.

Die Ableitung von brandschutzbasierten Konstruktionsvorgaben für bauteil- und objektbezogene Fugen wurde auf Grundlage von theoretischen und experimentellen Untersuchungen ermittelt (vgl. Kapitel 4 und 5). Die theoretischen Betrachtungen beruhen auf den Wärmeübertragungsmechanismen, die in Wärmeleitung in einem Festkörper oder ruhenden Fluid, Wärmeleitung von einer Oberfläche zu einem bewegten Fluid (Konvektion) und Wärmestrahlung unterteilt werden können. Dieser Einteilung geht voraus, dass Konduktion und Konvektion voneinander abhängige Erscheinungen sind (Nußelt, 1915).

Für die Transportmechanismen unter normalen raumklimatischen Randbedingungen sind eine Vielzahl von Untersuchungen vorhanden. Das betrifft auch die Übertragungsmechanismen beim gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport (vgl. Kapitel 4.1.1). Die Forschung zur Ermittlung der Wärmeübertragungsmechanismen in porösen Körpern und Fügungen unter Brandeinwirkung steht noch am Anfang (vgl. Kapitel 4.1.2).

Die in Kapitel 4.1.4.3 durchgeführten vereinfachten Berechnungen zeigen die Abhängigkeit der Temperatur ϑ_w der Kanalwand von der Fugengeometrie d_i/l und der mittleren Fluidtemperatur $(\vartheta_A - \vartheta_E)/2 = 350^\circ\text{C}$, die aus einer Eintrittstemperatur $\vartheta_E = 600^\circ\text{C}$ und Austrittstemperatur $\vartheta_A = 100^\circ\text{C}$ gebildet wurde (vgl. Abbildung 57). Der Temperaturgradient beinhaltet Maximalwerte, die bei den kleinmaßstäblichen Brandversuchen gemessen wurden. Der in dem Diagramm angegebene Temperaturgradient wird nur bei sehr geringen Reynolds-Zahlen im laminaren Bereich erreicht. Je kleiner der Verhältniswert d_i/l ist, umso größer können die Reynolds-Zahlen sein. Das heißt, die Fügungen müssen so geplant und gefertigt werden, dass dem Heißgasdurchtritt ein möglichst großer Widerstand entgegengesetzt wird. Mit dem Bekanntsein von Leckageraten von einzelnen Bauteilfugen kann über ein Widerstandsmodell der Gesamtwiderstand in Abhängigkeit von Parallel- und Reihenschaltungen bestimmt werden. Die theoretische Anwendung wurde als schematischer Vergleich für zwei Anschlüsse in den Abbildungen 81 und 82 dargestellt.

Die experimentellen Untersuchungen an Bauteil- und Anschlussfugen unter normalklimatischen Bedingungen und Brandeinwirkung zeigen, dass entsprechende dichte Bauteilfugen mit vorgefertigten Bauteilen realisierbar sind. Bei vorhandenen Undichtigkeiten spielt der Wärmeübergangskoeffizient α eine wichtige Rolle. Die durchtretenden Gase müssen im Bereich der Spalte auf bestimmte Temperaturen abgekühlt werden, so dass keine Entzündung oder Überschreitung der festgelegten Temperaturkriterien in benachbarten Bereichen stattfindet. Die vereinfachten Betrachtungen zum Wärmeübergangskoeffizienten α zeigen, dass die Abkühlung des Heißgasstroms in Bezug auf die geringen Fugentiefen nicht allein auf einer erzwungenen Strömung von Gasen und Dämpfen basiert. Berücksichtigt man die in Tabelle 17 angegebenen Wärmeübertragungskoeffizienten α , führt nur die Kondensation des gesättigten Dampfes oder Filmkondensation an den kanalbegrenzenden Flächen zu höheren Wärmeübergangskoeffizienten.

Als graphische Darstellungsmöglichkeit für konvektive Vorgänge wurde das h,x -Diagramm gewählt, mit dem übersichtlich die Enthalpie h eines Luft- oder Heißgasstroms in Bezug zum absoluten Feuchtegehalt x dargestellt werden kann. In dem h,x -Diagramm können ausgehend vom Anfangszustand notwendige Maßnahmen zur Reduzierung der Heißgastemperaturen abgeleitet werden. Um den Ausgangszustand festzulegen, wurden Verbrennungsrechnungen für einen mit Heizöl betriebenen Brandofen durchgeführt (vgl. Kapitel 4.3.1). Die statische Verbrennung liefert Stoff- und Energiemengen im Anfangs- und Endzustand der Verbrennung unter den Bedingungen der Stöchiometrie, nicht aber den Verlauf und die Geschwindigkeit der Verbrennung. In Abhängigkeit von der Leckagerate können im Verhältnis der ermittelten feuchten Rauchgasmengen im Brandofen die in das Bauteilinnere eingeleiteten Wasserdampfmengen bestimmt werden.

Ein wesentlicher Aspekt für die systematische Bewertung stellt die eindeutige Zuordnung von Bauteilfugen zu den Holzbauteilen und -systemen sowie deren Anschlusssituationen dar.

8.2 Systematik zur Bewertung vorgefertigter Holzbauelemente

Die in Kapitel 6.3 beschriebene Bewertungssystematik wurde in globale und lokale Aspekte gegliedert. In die globale Betrachtung gehen die Aspekte Standort, Nutzung und Form ein. Die lokalen Betrachtungen beziehen sich auf die Hauptkategorien Bauteile, Bauweise und Anschlüsse. Zur Ermittlung der Leistungseigenschaften wird zur Problemlösung ein Bewertungsfilter angelegt, der die Beanspruchbarkeiten der vorgefertigten Bauprodukte beinhaltet. Die Beanspruchbarkeiten ergeben sich aus den bauaufsichtlichen und versicherungstechnisch gestellten Anforderungen an Bauwerke. Als Strategie zur Problemlösung wurde die mehrstufige Alternativenbildung gewählt (vgl. Kapitel 3.1.3), mit der ein direkter Bezug der Bauteil- und Anschlussvarianten zu den erforderlichen Leistungseigenschaften hergestellt werden kann. Am Ende dieses iterativen Prozesses steht das ‚objektbezogene modularisierte Bauelement‘, welches in allgemeiner Form in einem Konstruktionskatalog eingebunden werden kann. Dabei sind ‚computergestützte Methoden‘ ein unumgängliches Instrument, um die Prozesse nachvollziehbar darzustellen. Die Systematik erlaubt die weitere Differenzierung der Hauptkriterien, z. B. die Unterteilung der Bauteile in die Unterkategorien Wand, Decke und Dach sowie ihre Konstruktionsebenen oder -arbeitsfelder (vgl. Kapitel 3.1.4). Die Ebenen werden dabei aus dem System, Modul und Element gebildet. Die Arbeitsfelder unterteilen sich in das Tragwerk, die Hülle, den Ausbau und die Haustechnik.

Die wesentliche Weiterentwicklung der brandschutztechnischen Bewertung von Bauteilfugen ist die neue Definition von bauteil- und objektbezogenen Fugen. Mit der Definition wurde die Voraussetzung geschaffen, dass eine systematische Zuordnung und Bewertung von Fügungen in Bauteilen und Anschlüssen vorgenommen werden kann. Für die Bauteile wird ein Abgeschlossenheitsprinzip in und senkrecht zur Bauteilebene und Brandbarrieren gefordert. Das Abgeschlossenheitsprinzip der Bauteile bedeutet, dass eine Brandweiterleitung sowohl innerhalb des Bauteils als auch zwischen bauteil- auf objektbezogene Fugen eingegrenzt wird. Dazu müssen die Seitenflächen und die brandabgewandte Oberfläche der Elemente rauchdicht ausgeführt werden.

Zusätzlich werden Brandbarrieren in Abhängigkeit von bauaufsichtlichen und versicherungstechnischen Anforderungen ausgebildet und mit den bauphysikalisch erforderlichen Dichtungsebenen, i.d.R. der Luft- und Winddichtheitsebene, verknüpft. Die Festlegung der Dichtungsmaßnahmen erfolgt in Abhängigkeit von der Brandbeanspruchung und der Temperaturentwicklung im Bauteil bzw. dem Anschlussbereich. Mögliche Anschlussformen und Brandbeanspruchungsmöglichkeiten sind in Abbildung 75 dargestellt. Für den Anschluss von mindestens zwei raumabschließenden Bauteilen wurden sechs verschiedene Möglichkeiten der Brandbeanspruchung identifiziert. In den durchgeführten Brandversuchen konnte nachgewiesen werden, dass neben den Fugenversätzen auch durchgehende Fugen mit Zusatzmaßnahmen zu einer ausreichenden Dichtheit führen.

Die Dichtungsebenen werden in Abhängigkeit von der Branddauer aktiviert und verlieren ihre Eigenschaften bei Erreichen der zugeordneten Versagenstemperaturen. Da die Ebenen teilweise auch aus zusätzlich aufgetragenen Klebebändern, Dichtungsbändern und –schnüren hergestellt werden, muss die Versagenstemperatur in diesen Bereichen in Abhängigkeit der verwendeten Materialien angepasst werden. Zum Beispiel wird für übliche Klebebänder und Silikonschnüre eine Temperaturbeständigkeit ≥ 100 °C angegeben (vgl. Kapitel 3.1.4.2). Die Festlegung der Brandbarriereebene oder -ebenen besitzt einen Einfluss auf die konvektiven Vorgänge im Bauteil. Mit dieser Betrachtungsweise wird wirksam verhindert, dass ein frühzeitiges Versagen in den Anschlussbereiche in Bezug zur Feuerwiderstandsfähigkeit der Bauteile auftritt.

Das grundlegende Dokument für die Angabe der Leistung von Bauprodukten in Bezug auf ihre wesentlichen Merkmale und ihre Verwendung in Bauwerken ist die Bauproduktenverordnung (BauPVO). Der Brandschutz bildet darin eine Grundsatzanforderung. Der Bezug zur BauPVO bietet den weiteren Vorteil, dass für die Herstellung derartiger Bauprodukte Pflichten für die Wirtschaftsakteure definiert werden. U.a. muss der Hersteller eine Leistungserklärung erstellen und i.d.R. eine CE-Kennzeichnung auf den Produkten anbringen.

Die harmonisierten technischen Spezifikationen (harmonisierte Normen sowie Europäische Bewertungsdokumente und darauf basierende Europäisch Technische Bewertungen) enthalten Angaben zur Bewertung der Überprüfung der Leistungsbeständigkeit. Das bedeutet, dass die Hersteller bzw. die Herstellwerke in Abhängigkeit von den Auswirkungen auf die Gesundheit und Sicherheit von Menschen sowie auf die Umwelt in ein Konformitätssystem eingestuft und dementsprechend bei den Systemen 1+, 1 und 2+ durch eine notifizierte Stelle überwacht und zertifiziert werden. Dieser Punkt bildet eine wesentliche Voraussetzung für die zukünftige Qualitäts- und Gütesicherung von vorgefertigten Bauprodukten auf europäischer Ebene. National treten weitere bauaufsichtliche Anforderungen nach Bauregelliste A Teil 1, lfd. Nr. 3.3.2.2 „*Beidseitig bekleidete oder beplankte nicht geklebte Wand-, Decken- und Dachelemente, z. B. Tafелеlemente für Holzhäuser in Tafelbauart*“ und A Teil 2, lfd. Nr. 2.44 „*Hochfeuerhemmende Bauteile, deren tragende, aussteifende und raumabschließende Teile aus Holz oder Holzwerkstoffen bestehen und die allseitig eine brand-schutztechnisch wirksame Bekleidung aus nichtbrennbaren Baustoffen (Brandschutzbekleidung) und Dämmstoffe aus nichtbrennbaren Baustoffen haben*“ sowie auf freiwilliger Basis gestellte Anforderungen im Rahmen einer RAL-Güteüberwachung hinzu. Durch diese Zertifizierungen werden die hohen Qualitäts- und Güteansprüche an und durch die Holzbauunternehmen sichergestellt. Die Einbindung dieser Ansprüche in europäische Normen und Spezifikationen ist derzeit in Bearbeitung. Das vereinbarte Maß kann aufgrund der Vielzahl der beteiligten Länder noch nicht abgeschätzt werden.

Die Konzipierung der Bauteilfugen wird in Abhängigkeit von der Feuerwiderstandsfähigkeit der Bauteile betrachtet. Die wesentlichen Versagenskriterien von Bauteilen sind die Tragfähigkeit ‚R‘, der Raumabschluss ‚E‘ und die Wärmedämmung ‚I‘ (vgl. Tabelle 1 und 2). Danach wird das Versagen von Bauteilen mit Undichtigkeiten, die einen Rauchdurchtritt nach sich ziehen, über Temperaturkriterien und die Entzündung eines Wattlebauschs bestimmt. Normativ ist kein Grenzwert der Rauchdichtigkeit für Bauteile vorgesehen. Für Anschlusssituationen gibt es normativ ein Prüfverfahren für linearen Fugenabdichtungen und Brandsperrern in Bauteilen gemäß DIN EN 1366-4 und für nichttragende Elemente nach DIN EN 1364-3 und -4 (vgl. Tabelle 1). Darin sind die Leistungskriterien ebenfalls mit einer Begrenzung des Temperaturanstiegs auf der brandabgewandten Seite verbunden. Das bedeutet, dass es derzeit kein Prüfverfahren für die Bewertung der Dichtheit von Bauteilanschlüssen gibt.

Die Bestimmung des Grenzwertes über den Transmissionsgrad (vgl. Kapitel 2.4.3) kann entsprechend der theoretischen und experimentellen Untersuchungen (vgl. Kapitel 4 und 5), nicht mit hinreichender Genauigkeit festgelegt werden. Der feuchtebeladene Heißgasstrom, der über Leckagen in den Rauchgaskanal gelangt, kann den Transmissionsgrad verfälschen, wenn eine Abkühlung bis ins Nebelgebiet auftritt. Aus diesem Grund wurden vorerst zwei vereinfachte Varianten zur Erreichung der Rauchdichtheit vorgeschlagen:

1. Ausbildung von zwei Dichtungsebenen auf entgegengesetzten Seiten oder
2. Ausbildung von einer Dichtungsebene, unter Berücksichtigung der Temperaturbeanspruchung im Bauteil bzw. Anschluss.

8.3 Ausblick

Bei den untersuchten Holzkonstruktionen wurden verschiedene Anschlusssituationen mit einer begrenzten Anzahl an Materialien getestet. Der Versuchsaufbau unter Brandbeanspruchung wurde gewählt, um eine Vergleichbarkeit zu bereits durchgeführten Brandversuchen an Anschlussfugen herstellen zu können (vgl. Kapitel 2.4.2 und 2.4.3). Um eine weitere differenzierte Bewertung vorzunehmen zu können, müssen weitere Materialien in Abhängigkeit verschiedener Fugengeometrien und Bemessungsbrände getestet werden. Der Prüfstand bzw. das Prüfverfahren muss derart konzipiert werden, dass der gekoppelte Wärme- und Feuchttransport realitätsnah erfasst wird. Abbildung 60 liefert einen Überblick über die aufzunehmenden Messdaten. Ein besonderes Augenmerk muss auf die Gaszusammensetzung und die Feuchteabgabe und -aufnahme des Heißgasstroms gelegt werden. Durch die Minimierung der konvektiven Wärmeübertragung können Holzbaukonstruktionen im Bereich von Fügungen weiter optimiert werden.

Über die Bestimmung der Leckagerate in Verbindung mit der Rauchgaszusammensetzung können auch Aussagen über eine mögliche Rauchgasintoxikation von Personen in brandraumabgewandten Nutzungseinheiten erfolgen. Hierdurch können definierte Undichtigkeiten in der Konstruktion zugelassen werden, die zu einem wirtschaftlich vertretbaren Herstellungs- und Montageaufwand beitragen.

Die Systematik dient auch als Grundlage für einen Konstruktionskatalog für Holzhäuser mit erhöhter Brandsicherheit, den Holzbauunternehmen und Versicherungen verwenden können. Dazu werden neben den bauaufsichtlich einzuhaltenden Anforderungen auch versicherungstechnische Anforderungen an Bauteile und Anschlüsse gestellt:

1. Die Tragkonstruktion eines Gebäudes wird nicht vom Brand erfasst bzw. geschädigt. Dazu muss die Versagenszeit der Brandschutzbekleidung t_f so eingestellt werden, dass eine Entzündung in einer definierten Zeit nicht stattfindet.
2. Die Tragkonstruktion des Gebäudes wird vom Brand erfasst bzw. geschädigt. In diesem Fall müssen die geschädigten Bauteile leicht ausgetauscht bzw. entfernt werden können.

Die vertiefte Betrachtung der Wechselwirkungen des Wärme- und Stofftransports in Bauteilfugen sowie die Angabe der Rauchdichtigkeit von Anschlussfugen eröffnet weitere Optimierungsmöglichkeiten für Holzbauteile und deren bauteil- und objektbezogene Fugen. Hierdurch wird der Herstellungsaufwand reduziert und ein zusätzlicher Beitrag zu einem ressourcenschonenden Umgang mit dem Werkstoff Holz geleistet.

9 Literaturverzeichnis

Das Literaturverzeichnis ist in fünf Abschnitte geteilt: Materielle Literatur, Normen und Zulassungen, vom Verfasser betreute Diplom-, Master- und Bachelorarbeiten, Immaterielle Quellen sowie Software

Materielle Literatur

- Ackermann, K. (1993). *Grundlagen für das Entwerfen und Konstruieren*. Stuttgart: Karl Krämer.
- Althaus, D. (1999). *Fibel zum konstruktiven Entwerfen - Über den spielerischen Umgang mit Physik und Materie*. Berlin: Bauwerk.
- Baehr, H. D., & Stephan, K. (2010). *Wärme- und Stoffübertragung*. Heidelberg: Springer.
- BDZ. (2007). *Holzrahmenbau. Bund Deutscher Zimmermeister*, Hrsg. Karlsruhe: Bruder.
- Bohl, W., & Elmendorf, W. (2005). *Technische Strömungslehre*. Würzburg: Vogel.
- Bohl, W., & Wagner, W. (1978). *Technische Strömungslehre - Aufgaben und Lösungen; Beispiele aus der Praxis*. Würzburg: Vogel.
- Boie, W. (1957). *Vom Brennstoff zum Brenngas - Feuerungstechnisches Rechnen mit Brennstoffkenngrößen und seine Vereinfachung mit Mitteln der Statistik*. Leipzig: Teubner.
- Bregulla, J., & Enjily, E. (2004). *Structural fire engineering design: materials behaviour - timber*. BRE Digest.
- Bundesregierung. (2012). *Nationale Nachhaltigkeitsstrategie - Fortschrittsbericht 2012*. Berlin: Bundes- und Informationsamt der Bundesregierung.
- Cerbe, G., & Wilhelms, G. (2008). *Technische Thermodynamik - Theoretische Grundlagen und praktische Anwendungen*. München: Hanser.
- Cheret, P., Grohe, G., & Müller, A. (2000). *Holzbausysteme. holzbau handbuch - Reihe 1 Teil 1 Folge 4*. Holzabsatzfonds, Hrsg. Bonn.
- Cziesielski, E., Raabe, B., & Szabunia, R. (1981). *Fugen im Holzskelettbau. Abschlussbericht, Technische Universität Berlin - Institut für Baukonstruktionen und Festigkeit*. Berlin.
- Ebertshäuser, H. (1993). *Dichtungen für die Fluidtechnik*. Mainz: Vereinigte Fachverlage.
- EnEV (2014). *Energieeinsparverordnung*. Bonn: Bundesgesetzblatt.
- Filounek, A. (2006). *Schutz von Ofenwänden vor Schädigung durch Kondensate*. Dissertation, Technische Universität Freiberg, Fakultät für Maschinenbau, Verfahrens- und Energietechnik, Freiberg.
- Fontana, M., Frangi, A., & Fetz, C. (1999). *Brandversuche an Holzmodulwänden*. Abschlussbericht, ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, Zürich.
- Frangi, A. (2001). *Brandverhalten von Holz-Beton-Verbunddecken*. Abschlussbericht, ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, Zürich.
- Frangi, A., & Fontana, M. (1999). *Zum Brandverhalten von Holzdecken aus Hohlkastenelementen*. Abschlussbericht, ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, Zürich.
- Franke, L., & Deckelmann, G. (2002). *Baukonstruktion im Planungsprozess*. Braunschweig: Vieweg.

- Führer, W., Ingendaaij, S., & Stein, F. (1984). *Der Entwurf von Tragwerken - Hilfen zur Gestaltung und Optimierung*. Köln: Müller.
- Gellert, W., Küstner, H., Hellwich, M., & Kästner, H. (1968). *Kleine Enzyklopädie Mathematik*. Leipzig: VEB Bibliographisches Institut.
- Grantham, R., & Enjily, V. (2003). *Multi-storey timber frame buildings - a design guide*. London: BRE.
- Hall, M., Geißler, A., & Hauser, G. (2000). *Quantifizierung einzelner Leckagen und Leckagewegen bei Gebäuden in Holzbauart. Abschlussbericht - Teil 1, Universität Gesamthochschule Kassel, Fachgebiet Bauphysik, Kassel*.
- Hauschild, M. (2003). *Konstruieren im Raum - Eine Baukonstruktionslehre zum Studium*. München: Callwey.
- Hauser, G., & Stiegel, H. (1992). *Wärmebrückenatlas für den Holzbau*. Wiesbaden: Bauverlag.
- Hauser, G., & Stiegel, H. (2008). *Wärmebrücken. holzbau handbuch - Reihe 3 Teil 2 Folge 7. Holzabsatzfonds, Hrsg. Bonn*.
- Hegger, M., Auch-Schwelk, V., Fuchs, M., & Rosenkranz, T. (2005). *Baustoff Atlas*. Basel: Birkhäuser.
- Hertel, H. (2000). *Grundlegendokument Brandschutz und die zukünftigen Auswirkungen. Promat-Fachbeitrag*.
- Hilbig, G. (1999). *Grundlagen der Bauphysik, Wärme, Feuchte und Schall*. München: Fachbuchverlag Leipzig.
- Holzforschung München (2010). *Bauen mit Holz = aktiver Klimaschutz. Leitfaden, Technische Universität München, Holzforschung München*. München.
- Hosser, D. (2009). *Leitfaden Ingenieurmethoden des Brandschutzes*. Braunschweig: Vereinigung zur Förderung des Deutschen Brandschutzes e.V. (vfdB).
- Hosser, D., Dehne, M., & Zehfuß, J. (2000). *Theoretische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen zum Brandschutz bei mehrgeschossigen Gebäuden in Holzbauweise, Stufe 2 (Bauteilversuche) und Stufe 3 (Empfehlungen). Abschlussbericht zur Stufe 2 - Bauteilversuche, TU Braunschweig - Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Braunschweig*.
- Hosser, D., Wesche, J., Dehne, M., Becker, K., & Tichelmann, K. (2001). *Theoretische und experimentelle Grundlagenuntersuchungen zum Brandschutz bei Gebäuden der Gebäudeklasse 4 in Holzbauweise. Abschlussbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Braunschweig*.
- Hubweber, C., & Schmidt, D. (2009). *Holzrahmenbau. holzbau handbuch Reihe 1 Teil 1 Folge 7. Holzabsatzfonds, Hrsg. Bonn*.
- Hunig, A. (1987). *Das Schaffen des Ingenieurs - Beiträge zu einer Philosophie der Technik*. Düsseldorf: VDI.
- Just, A. (2010). *Structural fire design of timber frame assemblies insulated by glass wool and covered by gypsum plasterboards. Thesis, Tallinn University of Technology - Department of Civil Engineering, Chair of Building Physics and Architecture. Tallinn*.
- Kampmeier, B. (2008). *Risikogerechte Brandschutzlösungen für den mehrgeschossigen Holzbau. Dissertation, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Braunschweig*.

- Kampmeier, B., & Hosser, D. (2008). *Bewertung des Brandverhaltens unbekleideter flächiger massiver Holzbauteile im Hinblick auf die Einsatzmöglichkeiten im mehrgeschossigen Holzbau unter Berücksichtigung des geltenden nationalen Sicherheitsniveaus sowie der DIN EN 1995-1-2. Abschlussbericht, TU Braunschweig - Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Braunschweig.*
- Karlsson, B., & Quintiere, J. (2000). *Enclosure fire dynamics.* Boca Raton: CRC Press.
- Kerschkamp, F., & Portmann, D. (1988). *Allgemeine Grundsätze zur Maßkoordinierung im Bauwesen: Erläuterungen zu DIN 18800 (DIN-Fachbericht, 8. Ausg.).* Berlin: Beuth.
- Knaack, U., Chung-Klatte, S., & Hasselbach, R. (2012). *Systembau - Prinzipien und Konstruktion.* Basel: Birkhäuser.
- Kolb, J. (2007). *Holzbau mit System - Tragkonstruktion und Schichtaufbau der Bauteile.* Basel: Birkhäuser.
- König, J. (2000). *A design model for load-carrying timber frame members in walls and floors exposed to Fire.* CIB-W18/33-16-2, Delft.
- König, J., & Oksanen, T. (2000). *A review of component additive methods used for the determination of fire resistance of separating light timber frame construction.* CIB-W18/33-16-2, Delft.
- König, J., & Walleij, L. (1999). *One-dimensional charring of timber exposed to standard and parametric fires in initially unprotected and postprotected situations.* Stockholm: Trätek.
- Kordina, K., & Meyer-Ottens, C. (1994). *Holz-Brandschutz-Handbuch.* München: Deutsche Gesellschaft für Holzforschung e.V.
- Krischer, O., & Kast, W. (1992). *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik.* Berlin: Springer.
- Krus, M. (1995). *Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe - Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken.* Dissertation, Universität Stuttgart Fakultät Bauingenieur und Vermessungswesen, Stuttgart.
- Kuhnhenne, M. (2009). *Energetische Qualität von Gebäudehüllen.* Dissertation, RWTH Aachen - Lehrstuhl für Stahlbau und Leichtmetallbau, Aachen.
- Künzel, H. (1994). *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten.* Dissertation, Universität Stuttgart Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, Stuttgart.
- Lennon, T., & Bullock, M. (2000). *The Fire Resistance of Timber Frame Buildings.* London: BRE.
- Maag, T., & Fontana, M. (2000). *Brandversuche an Modulhotels in Holzbauweise. Abschlussbericht, ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, Zürich.*
- Meijs, M., & Knaack, U. (2009). *Bauteile und Verbindungen - Prinzipien der Konstruktion.* Berlin: Birkhäuser.
- Meyer, N. (2007). *Einfluss von Druckänderungen während des Heißpressprozesses auf die mechanischen Eigenschaften von Holzwerkstoffen.* Dissertation, Universität Hamburg, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften - Department Biologie, Hamburg.

- Meyn, W. (2008). *Experimentelle und numerische Analyse des thermischen sowie Grundlagen des strukturmechanischen Verhaltens von Holzrahmenwänden bei thermischer instationärer Einwirkung unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens*. Dissertation, Universität Leipzig - Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau, Leipzig.
- M-HFHolzR, 2. (2004). *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise – M-HFHolzR*.
- Nußelt, W. (1915). *Das Grundgesetz des Wärmeübergangs*. Gesundheitsingenieur Bd 38, S. 477-482.
- Otto, F., & Ringeler, M. (2004). *Funktionsschichten und Anschlüsse für den Holzhausbau*. holzbau handbuch Reihe 1 Teil 1 Folge 8. Holzabsatzfonds, Hrsg. Bonn.
- Rackwitz, G. (1954). *Ein Beitrag zur Kenntnis der Vorgänge bei der Verleimung von Holzspänen zu Spanholzplatten in beheizten hydraulischen Pressen*. Dissertation, Technische Hochschule Braunschweig, Braunschweig.
- Reinhardt, H.-W. (2010). *Ingenieurbaustoffe*. Berlin: Ernst & Sohn.
- Richter, W., & Zschernig, J. (2002). *Handbuch der Heizungstechnik*. (B. H. GmbH, Hrsg.) Berlin: Beuth.
- Rittel, H. (1992). *Planen - Entwerfen - Design*. Stuttgart: Kohlhammer.
- Schatz, H. (1981). *Brand- und Löschversuche mit gasförmigen Löschmitteln - Teil 7: Vergleichende Untersuchungen der Löschwirksamkeit von Kohlendioxid, Halon 1211 und Halon 1301 bei einem Entstehungsbrand mit festen und flüssigen Brandgütern*. Abschlussbericht, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe.
- Scheer, C., & Andresen, K. (1995). *Holzbau-Taschenbuch - Band 1: Grundlagen, Entwurf, Bemessung und Konstruktionen*. Berlin: Ernst & Sohn.
- Schleifer, V. (2009). *Zum Verhalten von raumabschließenden mehrschichtigen Holzbauteilen im Brandfall*. Dissertation, ETH Zürich, Zürich.
- Scholl, W., & Bietz, H. (2004). *Integration des Holz- und Skelettbaus in die neue DIN 4109*. Abschlussbericht, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig.
- Staib, G., Dörrhöfer, A., & Rosenthal, M. (2008). *Elemente + Systeme - Modulares Bauen - Entwurf, Konstruktion, Neue Technologien*. Basel: Birkhäuser.
- Stein, R. (2003). *Vergleichende Bewertung der Brandausbreitung bei Gebäuden in Holz- und Massivbauweise*. Diplomarbeit, Universität Leipzig, Wirtschaftswissenschaftliche Fakultät, Lehrstuhl für Stahl- und Holzbau, Leipzig.
- Stein, R., & Winter, S. (2005). *Untersuchung zur Einstufung von güteüberwachten, handwerklich gefertigten Holzgebäuden mit nicht brennbaren Beplankungen in die Bauartklasse II von Gebäudeversicherungen und deren Gleichsetzung bei den Versicherungsprämien mit Fertighäusern*. Abschlussbericht, Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, München.
- Stein, R., & Winter, S. (2007). *Untersuchung von brandschutztechnisch optimierten Wand- und Deckenaufbauten im Rahmen der Kampagne Brandschutz*. Untersuchungsbericht zur "Kampagne Brandschutz", Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, München.

- Stein, R., & Winter, S. (2008). *Mechanismen der Brandweiterleitung bei Gebäuden in Holzbauweise - Erstellung eines Konstruktionskataloges für "Holzhäuser mit erhöhter Brandsicherheit"*. Holzbau der Zukunft - Teilprojekt 11, Abschlussbericht, Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, München.
- Stein, R., & Winter, S. (2008). *Untersuchung von Bauteilanschlüssen in Holzbauweise im Rahmen der "Hightech-Offensive Bayern"*. Untersuchungsbericht, Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, München.
- van der Heijden, G. (2011). *NMR imaging of moisture inside heated porous building materials*. Thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven.
- VDI-GVC. (2013). *VDI-Wärmeatlas*. Berlin Heidelberg: Springer.
- von Böckh, P., & Wetzel, T. (2009, 3., bearb. Aufl.). *Wärmeübertragung - Grundlagen und Praxis*. Heidelberg: Springer.
- Wachsmann, K. (1959). *Wendepunkte im Bauen*. Wiesbaden: Krausskopf.
- Watter, H. (2013). *Regenerative Energiesysteme - Systemtechnik und Beispiele nachhaltiger Energiesysteme aus der Praxis*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Winter, S. (1995). *Aussteifung von Tragwerken (Beitrag E14)*. STEP/EUROFORTECH, Step 2.
- Winter, S., Hafner, A., & Ott, S. (2010). *Nachhaltiges Bauen und Sanieren - Öffentlicher Gebäude*. Kissing: Weka.
- Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg (1998). *Holzbausysteme im Wohnungsbau*. Stuttgart.

Zitierte Normen und Zulassungen

- DIN 18000 (1984). *DIN 18000:1984-05, Modulordnung im Bauwesen*. Berlin: DIN.
- DIN 18202 (2013). *DIN 18202:2013-04, Toleranzen im Hochbau - Bauwerke*. Berlin: DIN.
- DIN 18203-3 (2008). *DIN 18203-3:2008-08, Toleranzen im Hochbau - Teil 3: Bauteile aus Holz und Holzwerkstoffen*. Berlin: DIN.
- DIN 4108-2 (2013). *DIN 4108-2:2013-02, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 2: Mindestanforderungen an den Wärmeschutz*. Berlin: DIN.
- DIN 4108-3 (2012). *DIN 4108-3:2012-01, Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden - Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz - Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung*. Berlin: DIN.
- DIN 4109 (1989). *DIN 4109:1989-11, Schallschutz im Hochbau; Anforderungen und Nachweise*. Berlin: DIN.
- DIN 50055 (1989). *DIN 50055:1989-03, Lichtmessstrecke für Rauchentwicklungsprüfungen*. Berlin: DIN.
- DIN EN 300 (2006). *DIN EN 300:2006-09, Platten aus langen, flachen, ausgerichteten Spänen (OSB) - Definitionen, Klassifizierung und Anforderungen*. Berlin: DIN.
- DIN EN 316 (2009). *DIN EN 316:2009-07, Holzfaserverplatten - Definition, Klassifizierung und Kurzzeichen*. Berlin: DIN.
- DIN EN 12114 (2000). *DIN EN 12114:2000-04, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Luftdurchlässigkeit von Bauteilen - Laborprüfverfahren*. Berlin: DIN.
- DIN EN 13171 (2013). *DIN EN 13171:2013-03, Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Holzfasern (WF) – Spezifikation*. Berlin: DIN.
- DIN EN 13162 (2013). *DIN EN 13162:2013-03, Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW) - Spezifikation*. Berlin: DIN.
- DIN EN 13501-2 (2010). *DIN EN 13501-2:2010-12, Klassifizierung von Bauprodukten und Bauarten zu ihrem Brandverhalten - Teil 2: Klassifizierung mit den Ergebnissen aus den Feuerwiderstandsprüfungen, mit Ausnahme von Lüftungsanlagen*. Berlin: DIN.
- DIN EN 1363-1 (2012). *DIN EN 1363-1:2012, Feuerwiderstandsprüfungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen*. Berlin: DIN.
- DIN EN 1364-1 (2011). *DIN EN 1364-1:2011-11: Feuerwiderstandsprüfungen für nichttragende Bauteile - Teil 1: Wände*. Berlin: DIN.
- DIN EN 1364-2 (1999). *DIN EN 1364-2:1999-10: Feuerwiderstandsprüfungen für nichttragende Bauteile - Teil 2: Unterdecken*. Berlin: DIN.
- DIN EN 1364-3 (2014). *DIN EN 1364-3:2014-05, Feuerwiderstandsprüfungen für nichttragende Bauteile - Teil 3: Vorhangfassaden - Gesamtausführung*. Berlin : DIN.
- DIN EN 1364-4 (2014). *DIN EN 1364-4:2014-05, Feuerwiderstandsprüfungen für nichttragende Bauteile - Teil 4: Vorhangfassaden - Teilausführung*. Berlin: DIN.
- DIN EN 1365-1 (2013). *DIN EN 1365-1:2013-02+AC:2013, Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile - Teil 1: Wände*. Berlin: DIN.

- DIN EN 1365-2 (2000). *DIN EN 1365-2:2012-12, Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile - Teil 2: Decken und Dächer*. Berlin: DIN.
- DIN EN 1365-3 (2000). *DIN EN 1365-3:2000-02, Feuerwiderstandsprüfung für tragende Bauteile - Teil 3: Balken*. Berlin: DIN.
- DIN EN 1365-4 (1999). *DIN EN 1365-4:1999-10: Feuerwiderstandsprüfung für tragende Bauteile - Teil 4: Stützen*. Berlin: DIN.
- DIN EN 1365-5 (2005). *DIN EN 1365-5:2005-02, Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile - Teil 5: Balkone und Laubengänge*. Berlin: DIN.
- DIN EN 1365-6 (2005). *DIN EN 1365-6:2005-02, Feuerwiderstandsprüfungen für tragende Bauteile - Teil 6: Treppen*. Berlin: DIN.
- DIN EN 1366-3 (2009). *DIN EN 1366-3:2009-07, Feuerwiderstandsprüfungen für Installationen - Teil 3: Abschottungen*. Berlin: DIN.
- DIN EN 1366-4 (2008). *DIN EN 1366-4:2010-08, Feuerwiderstandsprüfungen für Installationen - Teil 4: Abdichtungssysteme für Bauteilfugen*. Berlin: DIN.
- DIN EN 1366-5 (2010). *DIN EN 1366-5:2010-06, Feuerwiderstandsprüfungen für Installationen - Teil 5: Installationskanäle und -schächte*. Berlin: DIN.
- DIN EN 1366-6 (2005). *DIN EN 1366-6:2005-02, Feuerwiderstandsprüfungen für Installationen - Teil 6: Doppel- und Hohlböden*. Berlin: DIN.
- DIN EN 13829 (2001). *DIN EN 13829:2001-02, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden - Differenzdruckverfahren*. Berlin: DIN.
- DIN EN 13986 (2005). *DIN EN 13986:2005-03, Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen - Eigenschaften, Bewertung der Konformität und Kennzeichn.* Berlin: DIN.
- DIN EN 14135 (2004). *DIN EN 14135:2004-11, Brandschutzbekleidungen - Bestimmung der Brandschutzwirkung*. Berlin: DIN.
- DIN EN 15026 (2007). *DIN EN 15026:2007-07, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Bauteilen und Bauelementen - Bewertung der Feuchteübertragung durch numerische Simulation*. Berlin: DIN.
- DIN EN 1991-1-2 (2010). *DIN EN 1991-1-2:2010-12, Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke - Teil 1-2: Allgemeine Einwirkungen - Brandeinwirkungen auf Tragwerke*. Berlin: DIN.
- DIN EN 1995-1-2 (2010). *DIN EN 1995-1-2:2010-12, Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-2: Allgemeine Regeln - Tragwerksbemessung für den Brandfall*. Berlin: DIN .
- DIN EN 520 (2009). *DIN 520:2009-12, Gipsplatten - Begriffe, Anforderungen und Prüfverfahren*. Berlin: DIN.
- DIN EN ISO 10140-1 (2012). *DIN EN ISO 10140-1:2012-05, Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 1: Anwendungsregeln für bestimmte Produkte*. Berlin: DIN.
- DIN EN ISO 10140-2 bis 5 (2010). *DIN EN ISO 10140-2 bis 5:2010-12, Akustik - Messung der Schalldämmung von Bauteilen im Prüfstand - Teil 2: Messung der Luftschalldämmung, Teil 3: Messung der Trittschalldämmung, Teil 4: Messverfahren und Anforderungen, Teil 5: Anforderungen an Prüfstände und Prüfeinrichtungen*. Berlin: DIN.

- DIN EN ISO 717-1 (2006). *DIN EN ISO 717-1 und 2:2006:2006-11, Akustik – Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen – Teil 1: Luftschalldämmung, Teil 2: Trittschalldämmung*. Berlin: DIN.
- DIN EN ISO 6946 (2008). *DIN EN ISO 6946, Bauteile - Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient – Berechnungsverfahren*. Berlin: DIN.
- E DIN EN 1026 (2013). *E DIN EN 1026:2013-04, Fenster und Türen - Luftdurchlässigkeit - Prüfverfahren*. Berlin: DIN
- E DIN EN 13381-1 (2008). *E DIN EN 13381-1:2008-12, Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen - Teil 1: Horizontal angeordnete Brandschutzbekleidungen*. Berlin: DIN.
- E DIN EN 13381-2 (2012). *E DIN EN 13381-2:2012-05, Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen - Teil 2: Vertikal angeordnete Brandschutzbekleidungen*. Berlin: DIN.
- E DIN EN 13381-7 (2014). *E DIN EN 13381-7:2014-12, Prüfverfahren zur Bestimmung des Beitrages zum Feuerwiderstand von tragenden Bauteilen - Teil 7: Brandschutzmaßnahmen für Holzbauteile*. Berlin: DIN.
- E DIN EN ISO 9972 (2012). *E DIN EN ISO 9972:2010-07, Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden - Differenzdruckverfahren*. Berlin: DIN.
- ETA-03/0057 (2006). flexCL® - Wärmedämmplatte aus Zellulose- und Polyesterfasern. Geltungsdauer vom 15.08.2016 bis 23.02.2014. Berga: Homatherm GmbH.
- Z-9.1-680 (2007). HMS – Element. Geltungsdauer vom 10.01.2007 bis 31.01.2012. Falkenberg: Haas Fertigbau GmbH; HMS Bausysteme GmbH.

Vom Verfasser betreute Diplom-, Master- und Bachelorarbeiten

- Carra, M. (2013). Thermische Untersuchungen an Holzfaserdämmstoffen bzw. Werkstoffen in Verbindung mit Phasenwechselmaterialien. Bachelorarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- Belkner, M. (2012). Erarbeitung eines Sanierungskonzeptes Hydraulikhalle TUM - Berücksichtigung baukonstruktiver, bauphysikalischer und brandschutztechnischer Gesichtspunkte. Masterarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. (Mitbetreuung Eva Bodemer)
- Aderbauer, C. (2012). Ermittlung materialspezifischer Eigenschaften modifizierter Holzwerkstoffplatten unter Brandeinwirkung. Bachelorarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- Atzinger, H. (2011). Brandverhalten von Holzfaser-Wärmedämmverbundsystemen, Glimmfähigkeit und Glimmbrandsperren. Bachelorarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. (Mitbetreuung Norman Werther, Michael Merk)

- Kathe, F. (2011). Optimierungsvorschläge von Konstruktionsdetails mehrgeschossiger Holzgebäude der Gebäudeklassen 4 + 5 hinsichtlich wärme- und brandschutztechnischer Gesichtspunkte. Bachelorarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- Fast, J. (2010). LifeCycleTower – Entwicklung eines Holzhochhauses unter Berücksichtigung brandschutz- und tragwerkstechnischer Aspekte. Masterarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- Belkner, M. (2010). Ermittlung der Wiederherstellungskosten von Holzgebäuden nach Bränden in Abhängigkeit von der Holzbauweise. Bachelorarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- Meyer, C. (2010). Einfluss des abwehrenden Brandschutzes auf die Kapselung von Holzgebäuden der Gebäudeklasse 4 unter Berücksichtigung des Personen- und Sachwertschutzes. Bachelorarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.
- Zieringer, F. J. (2009). Entwicklung eines Rechenverfahrens für die „heiße Bemessung“ von Lignotrend – Brettsperrholzelementen. Diplomarbeit. Technische Universität München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.

Immaterielle Quellen

Wikipedia. (15.08.2013). Von <http://de.wikipedia.org/wiki/Konstruktionsmethodik> abgerufen

Wikipedia. (24.05.2014). Von <http://de.wikipedia.org/wiki/Mollier-h-x-Diagramm> abgerufen

Software

Excel Tabellenkalkulationsprogramm, Release 2010, Microsoft Corp., Redmond/WA, 2010

10 Formelzeichen und Abkürzungen

Griechische Buchstaben

Δ	Änderung; Differenz
θ_g	Gastemperaturen im Brandabschnitt
θ_m	Oberflächentemperatur Bauteil
θ_r	wirksame Strahlungstemperatur des Brandes
Φ	Konfigurationsfaktor (Vereinfachung ETK $\Phi=1,0$ nach DIN EN 1991-1-2)
α_c	Wärmeübergangskoeffizient (Vereinfachung ETK $\alpha_c = 25 \text{ W/m}^2\text{K}$ nach DIN EN 1991-1-2)
β	Bemessungswert der Abbrandrate bei Normbrandbeanspruchung
ε_m	Emissivität Bauteiloberfläche (Vereinfachung ETK $\varepsilon_m = 0,8$ nach DIN EN 1991-1-2)
ε_f	Emissivität Feuer (Vereinfachung ETK $\varepsilon_f = 1,0$ nach DIN EN 1991-1-2)
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante ($=5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)
λ	Wärmeleitfähigkeit
η	dynamische Viskosität
θ_{si}	raumseitige Oberflächentemperatur
θ_i	Raumlufttemperatur
θ_e	Außenlufttemperatur
χ	linienförmige Wärmebrücke
ψ	punktförmige Wärmebrücke
ψ_i	innenmaßbezogene punktförmige Wärmebrücke
ψ_a	außenmaßbezogene punktförmige Wärmebrücke
τ	Transmissionsgrad
ρ_g	Rohdichte Heißgase
ρ_a	Rohdichte Luft (Atmosphäre)
χ	Stöchiometriefaktor
ϑ_w	Temperatur Wand
ϑ_F	Temperatur Fluid
μ	kinematische Viskosität des Dampfes ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
τ	Schubspannung
ϱ^*	Partialdichte
φ	relative Feuchte
$\hat{\sigma}_\varepsilon^2$	Residualvarianz
$\hat{\sigma}_{\beta_1}, \hat{\sigma}_{\beta_0}$	Standardfehler β_1 und β_0
$\hat{\sigma}_{\hat{E}(Y X=x)}$	Konfidenzintervall

Große lateinische Buchstaben

A	Querschnittsfläche, bezogene Fläche
A_R, A_{Brand}	Grundfläche Brandraum
A_w	Fläche Ventilationsöffnungen
C	Festigkeitsklasse
CO	Kohlenmonoxid
CO_2	Kohlendioxid
D	Diffusionskoeffizient
E	Raumabschluss (Brandschutz)
$E(X Y)$	Bedingte Erwartungswerte Variable Y gegenüber Variable X
F	Kraft
q (bzw. F_0)	Wärmestromdichte
H	Enthalpie
H_o	Brennwert
H_u	Heizwert
H_R	Höhe Brandraum
I	Wärmedämmung (Brandschutz)
J_v	Dampf-Massestrom
K	Brandschutzwirkung (Brandschutzfunktion einer Brandschutzbekleidung)
K	Permeabilitätskoeffizient
L	Länge
M	Widerstand gegen mechanische Beanspruchung (Brandschutz)
N	Gesamtanzahl
Nu	Nußelt-Zahl
$Nu_{d,lam}$	Nußelt-Zahl laminar
O_2	Sauerstoff
Pr	Prandtl-Zahl
Q	Wärme
\dot{Q}	Wärmestrom
$Q_{max,B}$	Maximale Wärmefreisetzung brandlastgesteuerter Brand
$Q_{max,V}$	Maximale Wärmefreisetzung ventilationsgesteuerter Brand
Q_1	Wärmefreisetzungsrates Brandausbreitungsphase
Q_2	Wärmefreisetzungsrates Vollbrandphase
Q_3	Wärmefreisetzungsrates Abklingphase
R	Tragfähigkeit (Brandschutz)
R	Widerstand, Wärmeübergangswiderstand
R_T	Wärmeübergangswiderstand mehrschichtiger Bauteile

Formelzeichen und Abkürzungen

R_{si}	<i>Wärmeübergangswiderstand innen</i>
R_{se}	<i>Wärmeübergangswiderstand außen</i>
R_i	<i>Wärmeübergangswiderstand der jeweiligen Schicht</i>
R_i	<i>individuelle Gaskonstante</i>
R_m	<i>molare Gaskonstante</i>
\dot{R}	<i>umgesetzte Brandlast pro Zeiteinheit</i>
Re	<i>Reynolds-Zahl</i>
S	<i>Entropie</i>
S_0	<i>Dampf-Massestrom</i>
T_g	<i>absolute Temperatur Heißgase</i>
T_a	<i>absolute Lufttemperatur (Atmosphäre)</i>
T	<i>thermodynamische Temperatur</i>
T_0	<i>absolute Ausgangstemperatur</i>
T_s	<i>absolute Oberflächentemperatur</i>
U	<i>Wärmedurchgangskoeffizient</i>
ΔU_{WB}	<i>Wärmebrückenzuschlag pauschal</i>
U	<i>Umfang</i>
\dot{V}_K	<i>Konvektiver Massefluss</i>
V_m	<i>Molares Volumen flüssiges Wasser</i>
\dot{V}^0	<i>Zuluftstrom in den Messkanal</i>
V	<i>Volumen, Luftvolumen</i>
\dot{V}_{50}	<i>Volumenstrom bei Druckunterschied von 50 Pa</i>
V_R	<i>Volumen Brandraum</i>
\dot{V}_{Zu}	<i>Volumenstrom Eingang Rauchgaskanal</i>
\dot{V}_{Ab}	<i>Volumenstrom Ausgang Rauchgaskanal</i>
\dot{V}_{Leck}	<i>Leckagestrom</i>
V_n	<i>Normvolumen</i>
V_{mn}	<i>molares Normvolumen</i>
W	<i>Strahlung (Brandschutz)</i>
W_{diss}	<i>Dissipationsenergie</i>
X_i^0	<i>Anteil der Komponente i in der Zuluft</i>
X_i^s	<i>Anteil der Komponente i in der Abluft</i>
X_i^k	<i>Anteil der Komponente i im Rauchgas (und Brandraum)</i>
X	<i>Grundmodul</i>
X	<i>Komponenten</i>

Kleine lateinische Buchstaben

a	<i>Fugendurchlasskoeffizient</i>
a	<i>Asche</i>
a (κ)	<i>Temperaturleitfähigkeit</i>
b	<i>Breite</i>
b	<i>Wärmeeindringkoeffizient</i>
c	<i>Konzentration</i>
c	<i>Kohlenstoff</i>
c_v	<i>spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen</i>
c_p	<i>spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck</i>
d_{char}	<i>Bemessungswert der Abbrandtiefe</i>
d	<i>Dicke</i>
d	<i>Durchmesser</i>
d_{hyd}	<i>hydraulischer Durchmesser</i>
e	<i>Abstand</i>
f_{Rsi}	<i>Temperaturfaktor</i>
f	<i>Funktionsbeiwert</i>
g	<i>Fallbeschleunigung</i>
g_g	<i>luftfreie trockene Rauchgas-/Abgasmenge, Verbrennungsgasmenge</i>
$g_{L,min}$	<i>minimale Verbrennungsluftmenge</i>
Δg_D	<i>Wasserdampfmenge im Abgas</i>
h_w	<i>gemittelte Höhe Ventilationsöffnungen</i>
\dot{h}_c	<i>freigesetzte Energie pro Zeiteinheit durch Verbrennung</i>
\dot{h}_l	<i>abströmende Energie pro Zeiteinheit der Rauchgase durch Gaswechsel (Konvektion Öffnungen)</i>
\dot{h}_o	<i>entzogene Energie pro Zeiteinheit durch Fensterstrahlung</i>
\dot{h}_w	<i>abgegebene Energie pro Zeiteinheit durch Konvektion und Strahlung an Umfassungsbauteile</i>
\dot{h}_g	<i>gespeicherte Energie der Rauchgase pro Zeiteinheit im Brandraum, welche die Brandraumtemperatur bestimmt</i>
\dot{h}_s	<i>sonstige verlorene Energieanteile pro Zeiteinheit (z.B. Speicherenergie von Einbauten)</i>
$\dot{h}_{net,c}$	<i>konvektiver Anteil des Netto-Wärmestroms</i>
$\dot{h}_{net,r}$	<i>radiativer Anteil des Netto-Wärmestroms</i>
h	<i>Höhe</i>
h	<i>Wasserstoff</i>
h	<i>spezifische Enthalpie</i>
h_B	<i>Enthalpie Brennstoff</i>
h_A	<i>Enthalpie Asche</i>

Δh_V	Enthalpiezunahme der Abgase durch Verbrennung
h_L	Enthalpie Luft
h_{Abg}	Enthalpie Abgas
h_w	gemittelte Höhe der Ventilationsöffnung
$i \rightarrow o$	Brandbeanspruchung von innen nach außen ($i = in, o = out$)
k	spezifische Permeabilität (m^2)
k_j	Fugenbeiwert nach DIN EN 1995-1-2
l_{min}	Mindestluftbedarf
l	Länge
\dot{m}_g	aus dem Brandraum strömende Rauchgasmenge pro Zeiteinheit
\dot{m}_l	in den Brandraum einströmende Frischluftmenge pro Zeiteinheit
m	Masse
n	Porosität
n	Stoffmenge (auch Molmenge)
n	Stickstoff
n_{50}	Luftwechsellrate bei Druckunterschied von 50 Pa
$o \rightarrow i$	Brandbeanspruchung von außen nach innen ($i = in, o = out$)
o	Sauerstoff
p	Druck
p_n	Druck im Normzustand
Δp	Druckdifferenz
p_i	Innendruck
p_o	Atmosphärendruck
q_0	Wärmestrom
q_{50}	Luftdurchlässigkeit bei Druckunterschied von 50 Pa
r	Radius
r	spezifische Verdampfungsenthalpie
s	spezifische Entropie
s	Schwefel
s_x, s_y	Varianzen
s_{xy}	Covarianz
s	Spalttiefe
t_a	Zeitdauer bis zum Überschreiten der Abbrandtiefe von 25 mm
t_{ch}	Zeitdauer bis zum Beginn des Abbrandes eines geschützten Bauteils (Verzögerung des Beginns des Abbrandes infolge einer Brandschutzbekleidung)
t_{ins}	Zeitdauer bis zum Beginn einer Temperaturerhöhung auf der nicht brandbeanspruchten Seite eines Bauteils
t_f	Versagenszeit der Brandschutzbekleidung

t_{test}	Brandversuchsdauer	
t	Temperatur	
t_{α}	Stützpunkt Energiefreisetzung (Erreichen von 1 MW)	
t	Zeit	
t_n	Temperatur im Normzustand	
u	spezifische innere Energie	
v	spezifisches Volumen	
v_f, v_{tr}	Abgasmenge, feucht, trocken	
v	spezifisches Volumen	
w	Wasser	
w, c	Geschwindigkeit	
w	Wasseranteil Brennstoff	
x, y	Koordinaten in x- und y-Richtung	
\bar{x}, \bar{y}	Mittelwerte	
Δx_V	Gesamt-Wassergehalt aus Verbrennung	$\Delta x_V = \frac{\Delta g_D}{g_G}$
x_L	Wassergehalt Verbrennungsluft	
$\Delta x_{V,h}$	Wassergehalt aus Verbrennung Wasserstoff	
$\Delta x_{V,w}$	Wassergehalt aus im Brennstoff gebundenem Wasser	
x	Feuchtegehalt feuchter Luft	
z	Höhe	

Indizes

0	Zustand bei 0 K oder 0 °C
0	indimensionale Abbrandrate
1	vor der Zustandsänderung
2	nach der Zustandsänderung
12	Änderung vom Zustand 1 nach 2
*	Partialgröße Gemisch
·	zeitliche Ableitung eines Wertes, z.B. Massestrom \dot{m}
—	Mittelwert
‘	siedende Flüssigkeit
“	Sattdampf
a	Abgas, Verbrennungsgas
c	durch Verbrennung freigesetzte Energie
f	feucht
D, d	Dampf (hier Wasserdampf)

Formelzeichen und Abkürzungen

G, g	Rauchgas
H_2O	Wasser
i	innen
kon	<i>Kondensation im Abgas</i>
lam	<i>laminar</i>
L, l	Luft
Mi	<i>Mischungswert</i>
max	<i>Maximum</i>
min	<i>Minimum</i>
n	physikalischer Normalzustand (0°C, 1,01325 bar)
n	ideelle Abbrandrate
o, a	außen
tr	<i>trocken</i>
s	Sättigungszustand
w	Wasser
τ	<i>Taupunkt</i>
ξ	Rohrreibungszahl

Anhang

**Anlage 1: Analyse und Bewertung der Brandausbreitung in brandgeschädigten Versicherungsobjekten
(zu Abschnitt 2.3)**

Tabelle A1: Brandweiterleitungspfade und -schädigung nach Raumbränden

Brand-objekt	Nr. I (A) / Baujahr 1976 eingeschossig, mit nicht ausgebautem Dachgeschoss					
Primär- brand	Brandursache / -entstehungsort	Elektrische Geräte (Fernseher) / Raumbrand EG (Wohnzimmer)				
Brand- weiter- leitung	Anschluss: Nummer_Form Bauteile	Ans1_Platt DE ⊥ AW	Ans2_Q-Bal DE II AW	Ans3_Platt DE ⊥ IW	Ans4_Platt DE II IW	
	Detailskizze					
	Brandpfad Brandbarriere	Bba 1	Bpf 3	Bpf 1	Bpf 1	Bpf 1
Ursache	AW EG k.B.	Traufkasten ↓ Unterdimen- sionierung N+F-Schalung	AW EG k.B.	IW EG k.B.	IW EG k.B.	IW EG k.B.
	Decke ↓ allseitige Begrenzung des Decken- hohlraumes mit lage- gesicherter Dämmung	Decke ↓ keine Begrenzung der unterseitiger Lattung am Anschluss Außenwand Giebel Dach ↓ Bauelement innenseitig nicht geschlossen in Verbindung mit Fügung durch eine nicht kompressible Dämmung mit Schwelle/ Randbalken	Decke ↓ Fügung durch nicht kompressible Dämmung und Deckenbalken	Decke ↓ keine Begrenzung der unterseitiger Lattung am Anschluss		
Sekun- där- brände	Benachbarte Bereiche: Raum Hohlraum Fassade	keine	Hohlraum: Dachelemente oberhalb Dämmebene	Raum: Dachelemente unterhalb Dämmebene	Hohlraum: Decke	Hohlraum: Decke

Fortsetzung Tabelle A1:

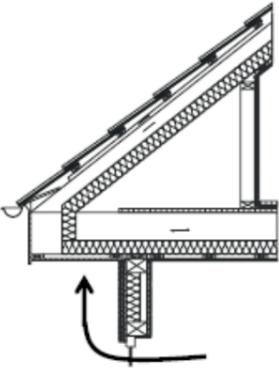
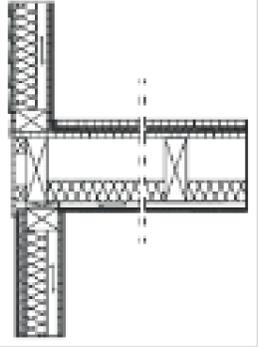
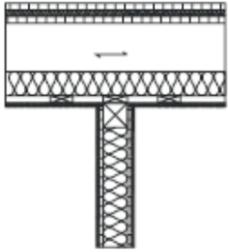
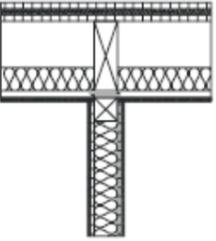
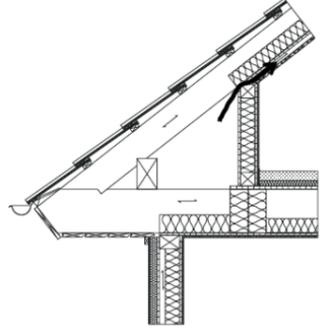
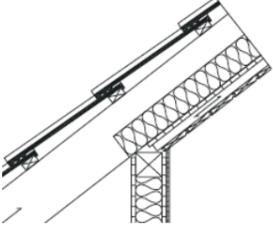
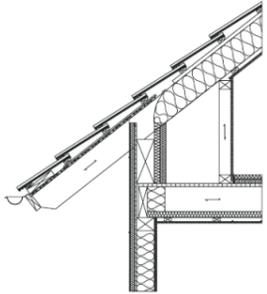
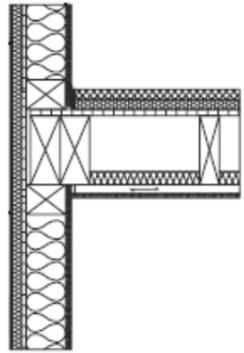
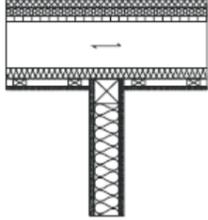
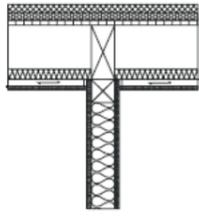
Objekt / Baujahr	II (C) / 1982 zweigeschossig, mit ausgebautem Dachgeschoss						
Primär- brand	Brandursache / -entstehungsort	Elektrische Geräte (Nachtischlampe) / Raumbrand EG (Schlafzimmer)					
Brand- weiter- leitung	Anschluss Nummer Bauteile	Ans5_Platt DE ⊥ AW	Ans6_Platt DE II AW	Ans7_Platt DE ⊥ IW	Ans8_Platt DE II IW	Ans9_Platt IW ^{EG} II DE II IW ^{OG}	
	Detailskizze						
	Brandpfad Brandbarriere	Bpf 1	Bpf 3	Bba 1	Bpf 1	Bpf 1	Bpf 4
Ursache	Decke EG ↓ Hohlräume grenzüber- greifend, offene Verbindung zum Abseitenraum	Traufkasten ↓ Unter- dimen- sionierung N+F- Schalung	AW EG, OG und Decke ↓ geschlossene Bauteile	IW EG k.B. Decke ↓ Fügung durch nicht kompressible Dämmung und Deckenbalken	IW EG k.B. Decke ↓ keine Begrenzung der unterseitiger Lattung am Anschluss	IW EG und OG ↓ keine Abschottung an Kabelbündeln (Elektroinstallation)	
Sekun- där- brände	Benachbarte Bereiche: Raum Hohlraum Fassade	Hohlraum: Dachele- mente ober- halb Dämm- ebene	Hohlraum: Dachele- mente ober- halb Dämm- ebene	keine	Hohlraum: Decke	Hohlraum: Decke	Raum: Austritt aus Steckdo- sen Dachgeschoss

Tabelle A2: Brandweiterleitungspfade und -schädigung nach Hohlraumbränden

Objekt / Baujahr	III (B) / 1983 zweigeschossig, mit ausgebautem Dachgeschoss					
Primärbrand	Brandursache / -entstehungsort	Offenes Feuer (Außenkamin) / Hohlraumbrand EG (Terrasse)				
Brandweiterleitung	Anschluss Nummer_Form Bauteile	Ans10_Platt DE ⊥ AW		Ans11_Platt DA ⊥ IW ^{Abseite}	-	-
	Detailskizze				-	-
	Brandpfad Brandbarriere	Bpf 4	Bba 1	Bpf 1	-	-
	Ursache	Traufe ↓ Hohlräume grenz- übergreifend, offene Ver- bindung Be- lüftungsebene Dach- elemente	Decke EG ↓ Begrenzung des Decken- hohlraumes mit Dämmung- schott	Dach ↓ nicht kompressible Dämmung und Rähm Abseite bzw. fehlende Befestigung	-	-
Sekundärbrände	Benachbarte Bereiche: Raum Hohlraum Fassade	Hohlraum: brandab- gewandte Dachseite außerhalb Dämmebene	Keine	Hohlraum: Installationsebene Dachelemente	-	-

Fortsetzung Tabelle A2:

Objekt / Baujahr	IV (B) / 1990 zweigeschossig, mit ausgebautem Dachgeschoss						
Primärbrand	Brandursache / -entstehungsort	Elektrische Installation (Bereich Durchdringung Deckenspot) / Hohlraumbrand EG (Wohnzimmer)					
Brandweiterleitung	Anschluss Nummer_Form Bauteile	Ans12_Platt DE ⊥ AW	Ans13_Platt DE II AW	Ans14_Platt DE ⊥ IW	Ans15_Platt DE II IW	Ans16_Platt DA ⊥ IW ^{Abseite}	
	Detailskizze						
	Brandpfad Brandbarriere	Bba 1	Bpf 3	Bba 1	Bpf 1	Bba 1	Bpf 2
	Ursache	AW EG - Decke ↓ Hohlräume nicht grenzübergreifend keine offene Verbindung zu angrenzenden Bereichen	Brandraumtemperaturen zu niedrig	AW EG k.B. Decke ↓ Hohlräume nicht grenzübergreifend, keine offene Verbindung zu angrenzenden Bereichen	IW EG k.B. Fügung ↓ nicht kompressible Dämmung und Deckenbalken	Installation ↓ entlang Kabelbündel Elektroinstallation	Installation ↓ entlang Kabelbündel Elektroinstallation
Sekundärbrände	Benachbarte Bereiche: Raum Hohlraum Fassade	Hohlraum: brandabgewandte Dachseite außerhalb Dämmebene	keine	keine	Hohlraum: Decke Raum: Räume im Obergeschoss in Verbindung zu Gefach	keine	Hohlraum: Abseite und Installationsebene Dach Raum: Austritt aus Steckdosen Dachgeschoss

Erläuterungen Abkürzungen:

Ans – Anschluss

Platt – Plattformbauweise, Bal – Balloon-Bauweise, Q-Bal – Quasi-Balloon-Bauweise

DE – Decke, AW – Außenwand, IW – Innenwand

Spannrichtung der Decke, senkrecht (⊥) und parallel (||),

Bpf – Brandpfade, Bba – Brandbarriere, k.B. – kein Beitrag

Anlage 2: Analyse und Bewertung der Brandausbreitung nach Realbrandversuchen im Rahmen der Kampagne Brandschutz (zu Kapitel 2.4.1.1)

Tabelle A3: Brandweiterleitungspfade und –schädigung nach Raumbränden mit modifizierten Anschlussdetails

Objekt / Baujahr	V / 2006 zweigeschossig, mit ausgebautem Dachgeschoss						
Primärbrand	Brandlast / -entstehungsort	Entzündung von Holzrippen / Raumbrand EG (Raum 1)					
Brandweiterleitung	Anschluss Nummer_Form Bauteile	Ans 16_Platt DE ⊥ AW	Ans17_Platt DE II IW	Ans19_Platt DE ⊥ IW	Ans20_Platt DE II IW	Ans21_Platt DA1 ⊥ AW	Ans22_Platt DA1 II AW
	Detailskizze						
	Brandpfad Brandbarriere	Bba 1	Bba 1	Bba 1	Bba 1	Bpf 3	Bba 1
	Ursache	Jeweils beidseitig geschlossene Elemente ↓ Montagefugen im Anschlussbereich hinterlegt	Dach ↓ Belüftungsebene oberhalb Sparren entlang Abdichtungsbahn ↓ Unterhalb Belüftungsebene ↓ Stellbrett ohne luftdichte Abklebung, Durchbrand seitliche Einnutung und oberer stumpfer Stoß	Entfernung Fenster von Traufe ↓ Temperaturen im Bereich des Ortgangs zu gering			
Sekundärbrände	Benachbarte Bereiche: Raum Hohlraum Fassade	Fassade über Fenster	Fassade über Fenster	keine	keine	Hohlraum: Dachelemente unter- und oberhalb Abdichtungsbahn	Fassade über Fenster

Tabelle A3: Brandweiterleitungspfade und -schädigung nach Raumbränden mit modifizierten Anschlussdetails

Objekt / Baujahr	V / 2006 zweigeschossig, mit ausgebautem Dachgeschoss										
Primärbrand	Brandlast / -entstehungsort	Entzündung von Holzkrippen / Raumbrand EG (Raum 2)									
Brandweiterleitung	Anschluss Nummer_Form Bauteile	Ans24_Platt DE2 ⊥ AW	Ans25_Platt DE2 II AW	Ans26_Platt DE2 ⊥ IW	Ans27_Platt DE2 II IW	Ans28_Platt DA2 ⊥ AW	Ans29_Platt DA3 ⊥ AW	Ans30_Platt DA3 II AW			
	Detailskizze										
	Brandpfad Brandbarriere	Bba 1	Bba 1	Bba 1	Bba 2	Bpf 1	Bba 2	Bpf 1	Bba 3	Bba 1	
Ursache	Jeweils beidseitig geschlossene Elemente ↓ Montagefugen im Anschlussbereich hinterlegt	Jeweils beidseitig geschlossene Elemente ↓ Montagefugen im Anschlussbereich hinterlegt	Jeweils beidseitig geschlossene Elemente ↓ Montagefugen im Anschlussbereich hinterlegt	Jeweils beidseitig geschlossene Elemente ↓ Montagefugen im Anschlussbereich ausgefüllt (Estrichdämmsteifen aus Mineralfaser Schmelzpunkt ≥ 1000 °C)	Dach ↓ Belüftungsebene oberhalb Sparren entlang Hinterlüftungspalt	Verwendung von Untendeckplatten anstatt Unterdeckbahn und Ausführung einer luft-/winddichten Abklebung an den Fugen der Stellbretter und Verbindung mit der Traufbekleidung im Abstand e ≤ 150 mm	Dach ↓ Belüftungsebene oberhalb Sparren entlang Hinterlüftungspalt Bba 3: Tragwerk (Sparren)	Trennung der Trag- von Dämmebene Traufsparren bilden sekundäres leicht austauschbares Tragwerk	Siehe Anschluss: Ans 25_Platt DE2 II AW		
Sekundärbrände	Benachbarte Bereiche: Raum Hohlraum Fassade	keine	Keine (Fenster mit Brandschutzverglasung)	keine	keine	Hohlraum: Hinterlüftungsspalt	keine Schädigung Tragwerk, ausgenommen im Traufbereich	Hohlraum: Hinterlüftungsspalt	keine Schädigung Tragwerk	keine	

Anlage 3: Versuche zur Bestimmung der Leckagerate von Anschlüssen in Holzbauweise (zu Kapitel 5.2.3)

Die Regressions- und Korrelationsanalyse wurde auf Grundlage der Brandversuche an Bauteilanschlüssen in Holzbauweise durchgeführt. (Stein & Winter, 2008) Die Geometrie der geprüften Anschlüsse ist in Tabelle 18 und die Versuche inklusive der Modifikationen in den Tabellen 19 und 20 im Kapitel 5.2.3 dargestellt.

1) Linearisierung der Näherungsgleichung:

$$x_i = \ln(\Delta p_i) \quad \text{und} \quad y_i = \ln(\dot{V}_i) \quad \text{für } i = 1 \dots N \quad N - \text{Gesamtanzahl der Prüfablesungen}$$

$$y = \ln(C) + nx$$

2) Abschätzung der Mittelwerte:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad \text{und} \quad \bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i$$

3) Abschätzung der Varianzen und Kovarianz:

$$s_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad s_y^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2$$

$$s_{xy} = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})$$

4) Abschätzung der Koeffizienten:

$$n = \frac{s_{xy}}{s_x^2}$$

$$\ln(C) = \bar{y} - n\bar{x} \quad C = \exp(\bar{y} - n\bar{x})$$

5) Schätzung bedingte Erwartungswerte Steigung und Achsenabschnitt:

$$y = \ln(C) + nx \rightarrow E(X|Y) = \beta_0 + \beta_1 \cdot X$$

Residualvarianz

$$\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = \frac{\sum_{m=1}^n e_m^2}{n-2} = \frac{\sum_{m=1}^n (y_m - \hat{y}_m)^2}{n-2}$$

Standardfehler β_1 und β_0

$$\hat{\sigma}_{\beta_1}^2 = \frac{\hat{\sigma}_\varepsilon^2}{\sum_{m=1}^n (x_m - \bar{x})^2} = \frac{\hat{\sigma}_\varepsilon^2}{n \cdot s_x^2}$$

$$\hat{\sigma}_{\beta_1} = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}_\varepsilon^2}{n \cdot s_x^2}}$$

$$\hat{\sigma}_{\beta_0}^2 = \hat{\sigma}_\varepsilon^2 \cdot \frac{\sum_{m=1}^n x_m^2}{n \cdot \sum_{m=1}^n (x_m - \bar{x})^2} = \hat{\sigma}_\varepsilon^2 \cdot \frac{s_x^2 + \bar{x}^2}{n \cdot s_x^2}$$

$$\hat{\sigma}_{\beta_0} = \hat{\sigma}_\varepsilon \cdot \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \frac{s_x^2 + \bar{x}^2}{s_x^2}}$$

6) Bestimmung Konfidenzintervall:

$$\hat{\sigma}_{\hat{E}(Y|X=x)} = \hat{\sigma}_\varepsilon \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{n \cdot s_x^2}}$$

$$\hat{y} \pm t_{(1-\frac{\alpha}{2}; n-2)} \cdot \hat{\sigma}_{\hat{E}(Y|X=x)}$$

