Thomas Engel
Katharina Moosmüller
Norman Werther

Brandgefahr durch Elektroinstallationen in modernen mehrgeschossigen Holzgebäuden

Ein Drittel aller Brände in Gebäuden lassen sich auf so genannte Elektrobrände zurückzuführen. Eine, spätestens seit Einführung der DIN VDE 0100-420 im Jahr 2016 und der allgemeinen Forderung zur Verwendung von Brandschutzschutzschaltern (AFDDs) in Holzgebäuden, diskutierte Frage ist, ob die brennbare Konstruktion ein erhöhtes Risiko bei Elektrobränden darstellt und folglich Holzgebäude spezieller geschützt werden müssen. Im Rahmen der nachfolgend beschriebenen Untersuchung wurde diese Fragestellung für moderne mehrgeschossige Gebäude aus Holz untersucht. Brennbare Dämmstoffe waren nicht Teil des Untersuchungsumfangs. Im Rahmen der Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass das Risiko eines Auftretens von Elektrobränden innerhalb der Konstruktion verhältnismäßig gering ist und die vorhandenen Schutzeinrichtungen eines Hausanschlusses einen Teil möglicher Defekte bereits abdecken. Als maßgebendes Einwirkungsszenario wurde ein Lichtbogen ermittelt. Bei allen durchgeführten Versuchen trat ein Selbstverlöschen auf. Eine Notwendigkeit von AFDDs in Standardgebäude ließ sich nach Auswertung der Versuche nicht erkennen.

Keywords: Brandschutz; Holzbau; Elektroinstallation, Elektrobrand, Installationsleitung

Fire hazard due to electrical installations in modern multi-storey timber buildings: *Currently one third of all fires are due to electrical fires. An relevant question that has been raised, at the latest since the introduction of DIN VDE 0100-420 in 2016 and the general demand for arc fault detection devices (AFDDs) in timber buildings, is whether the combustible construction represents an increased fire hazard in the case of electrical fires and whether timber buildings therefore require more special protection. Within the scope of the study presented in this article that question was investigated for modern multi-storey timber buildings. Combustible insulation materials were not part of the scope of the investigation. In the course of the investigation it could be proven that the risk of an occurrence of electrical fires within the construction is low and that the existing protective devices of a building installation already cover a part of possible defects. An electric arc was determined as the decisive impact scenario. In all tests carried out, self-extinguishing occurred. After evaluation of the tests, it was not possible to identify a need for AFDDs in standard buildings.*

Keywords Fire protection; timber construction; electrical installation, electrical fire, installation cable

1 Grundlagen

1.1 Brandgefahr durch Elektrizität

Das Institut für Schadenverhütung und Schadenforschung der öffentlichen Versicherer e.V. führt seit mehreren Jahren Brandursachenermittlungen (ca. 1.000 – 2.000 Stück pro Jahr) durch. Im Wesentlichen werden Brände untersucht, die erhebliche Schäden in und an Gebäuden verursacht haben. Die statistische Auswertung dieser Schadensdatenbank ergibt für die Jahre 2002 – 2019, dass 32 % aller untersuchten Brände auf die Ursache „Elektrizität“ zurückzuführen sind [2].

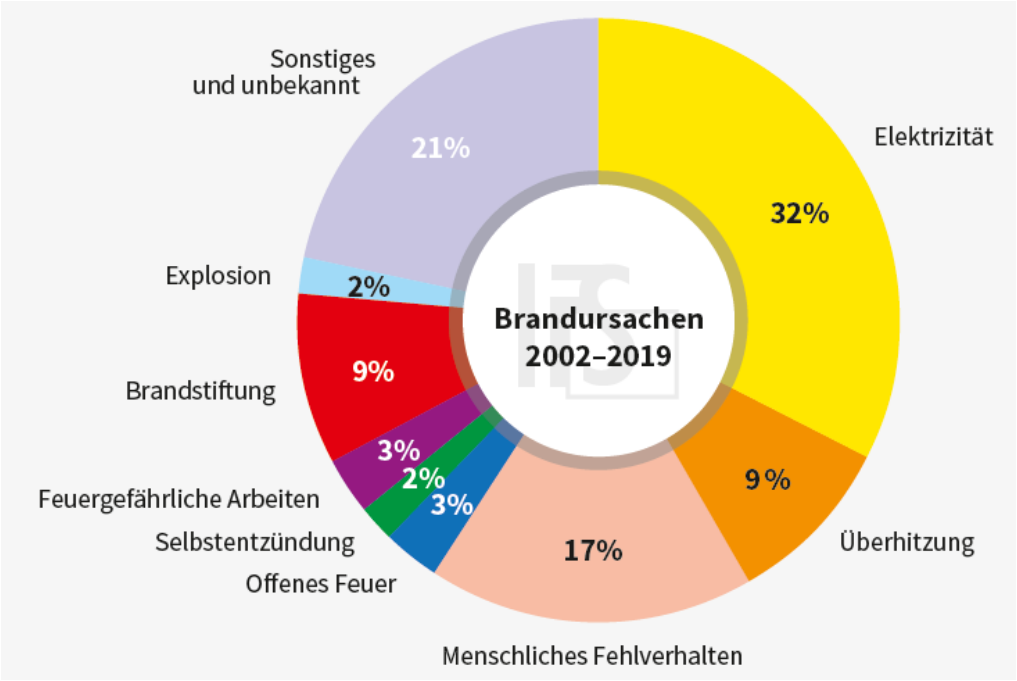

Bild 1 Brandursachenstatistik für die Jahre 2002 bis 2019 Quelle [2] Fire cause statistics for the years 2002 to 2019

Auswertungen geben Rückschlüsse auf die Unterteilung der elektrischen Brandursachen. Dabei ist der Großteil der elektrotechnisch verursachten Brände eindeutig auf die Elektrogeräte zurückzuführen [3]:

- 53 % durch Elektrogeräte (z.B. Wäschetrockner, Waschmaschinen, Kühl- und Gefrierschränke und Geschirrspüler)
- 27 % durch Elektroinstallation (z.B. Überlastung, Mehrfachsteckdosen, fehlerhafte Klemmverbindungen, Kabelbruch und Beschädigung von elektrischen Leitungsisolationen)
- 20 % durch Anlagen bzw. Sonstiges (z.B. Energiespeicher (Lithium-Ionen) und Photovoltaikanlagen)

Bei vielen Brandereignissen ist jedoch eine genaue Zuordnung der Brandursache durch den hohen Zerstörungsgrad

oder durch Löscharbeiten oft nur schwer ermittelbar.

1.2 Brandschutztechnische Risikobeurteilung für Elektrobrände in Holzgebäude

Um speziell die Gefahr von Elektrobränden in Holzgebäuden, insbesondere die Hypothese, dass der brennbare Baustoff Holz das Risiko durch ein höheres Schadensausmaß bzw. eine schnellere Ausbreitung erhöht, zu untersuchen, ist es notwendig eine Differenzierung der Brandursachen hinsichtlich ihrer Relevanz für die brennbare Konstruktion vorzunehmen.

Für die separate Untersuchung der Brandgefahr durch Elektroinstallationen in modernen mehrgeschossigen Holzgebäuden sind daher nur die Fälle maßgebend, die in direktem Zusammenhang mit der Wand- und Deckenkonstruktion stehen. Bei einem Brand infolge der Überhitzung einer Waschmaschine ist es beispielsweise zunächst irrelevant, ob es sich bei dem Gebäude um eine brennbare oder nichtbrennbare Konstruktion handelt. Die mobile Brandlast im Raum ist primär für die Raumbrandentwicklung verantwortlich. Wird dagegen ein Brand innerhalb einer Holztafelbauwand durch die Elektroinstallation ausgelöst, kann das Brandverhalten der Konstruktion einen entscheidenden Einfluss auf den Brandverlauf nehmen [1].

Gliedert man die Brandursachen für Elektrobrände nach dem Ort des Auftretens ergeben sich folgenden drei Kategorien:

- Brand außerhalb des Gebäudes respektive im Freien
- Brand innerhalb des Raumes
- Brand innerhalb der Konstruktion bzw. des Bauteils

Der Baustoff Holz nimmt bei Elektrobränden außerhalb des Gebäudes keine signifikante Rolle ein. Beispielsweise eine brennende Werbetafel an der Außenwand wird unabhängig vom Baustoff der Konstruktion durch die allgemeinen bauordnungsrechtlichen Vorgaben an Außenwandbekleidungen begrenzt.

Ein Elektrobrand innerhalb des Raumes findet „vor der Steckdose“ statt, also außerhalb der brennbaren Konstruktion. Die mobile Brandlast im Raum führt unabhängig vom Baustoff zu einem entwickelten Raumbrand. Diese Kategorie weist mit Blick auf das Kapitel zuvor das größte Brandentstehungsrisiko auf (Elektrogerät, Elektroinstallation in Form von Leitungsquetschungen und Mehrfachsteckdosen im Raum und Anlagen). Sichtbare Holzoberflächen in Räumen können den Brandverlauf partiell begünstigen, haben jedoch keinen Einfluss auf die Brandgefahr durch Elektroinstallationen. Ein raumseitiger Einbrand in die Konstruktion wird unter Berücksichtigung der konstruktiven Erfordernisse für Wand und Deckenbekleidungen sowie der brandschutztechnischen Vorgaben

(*M-HFHHolzR*. [4]) an Bauteile, Einbauten und Durchdringungen und deren Ausführung nach allgemeinen Verwendbarkeitsnachweisen oder technischer Regeln unterbunden.

Ein Elektrobrand innerhalb der Konstruktion, hervorgerufen durch technische Defekte und Beschädigungen von Versorgungsleitungen und Klemmstellen, weist die größte Relevanz für die hier zu untersuchende Thematik auf. Im Falle eines Brandes kann so die Brennbarkeit der eingesetzten, umgebenden Baustoffe mitverantwortlich für den Verlauf und die Auswirkungen sein. Brennbare Dämmstoffe waren mit Fokus auf die Gebäudeklasse 4 und 5 nicht Teil des Untersuchungsumfangs.

Innerhalb der Konstruktion kann ein Brand durch nachfolgende Ursachen entstehen:

- Beschädigte Leitungsisolation durch Nägel, Schraube, Nagetier etc.
- Leitungsquetschung durch zu eng geschlagene Befestigungsklammern
- Kabelbruch durch zu enge Verlegeradien
- Lose Kontakte durch schlecht montierte Schalter, Steckdosen etc.

Die letzten drei Aspekte lassen sich auf eine fehlerhafte Ausführung der Elektroinstallation zurückführen, die beim Einsatz von Fachfirmen eine Ausnahme und nicht die Regel darstellen.

1.3 Brandentstehungsmechanismen in Niederspannungsanlagen

Die Untersuchung der Brandentstehungsmechanismen und die Bewertung der vorhandenen Schutzeinrichtungen stellt die Basis für die weiteren Untersuchungen dar.

Bei der Untersuchung der Brandgefahr in modernen mehrgeschossigen Holzgebäuden wird von elektrischen Einrichtungen in Standardgebäuden (z.B. Wohnungen) ausgegangen, die dem heutigen Standard entspricht. Ein Leitungsschutzschalter (LS-Schalter) und ein Fehlerstrom-Schutzschalter (FI-Schutzschalter) sind folglich vorhanden.

Als grundlegende brandauslösende Mechanismen gelten bei Elektrobränden die Lichtbögen und Kontaktfehler, die auf Grund von Kriechstromwärme oder Gasentladung entstehen [5].

Bei Lichtbögen handelt es sich um eine kontinuierliche Gasentladung zwischen zwei stromführenden Elektroden, die bei einer ausreichenden Stromstärke und bei einer ausreichenden Ionisierung des Raumes zwischen den beiden Elektroden auftritt [5,6]. Lichtbögen lassen sich von elektrischen Funken wie folgt abgrenzen. Elektrische Funken sind als elektrischer Durchschlag eines Gases zwischen zwei Elektroden definiert, bei dem ein kurzer Lichtblitz

einhergeht. Entscheidend ist dabei jedoch die Dauer des elektrotechnischen Phänomens. Ein Lichtbogen ist ein anhaltendes Ereignis, wohingegen elektrische Funken nur vorübergehend auftreten [6]. Ein Lichtbogen, auch Fehlerlichtbogen oder Bogenentladung genannt, tritt erst bei einer Mindeststromstärke von einem Ampere auf [5].

Als Hauptursachen für die Entstehung von Lichtbögen in einem Stromkreis gelten die folgenden Aspekte [5,6]:

- Karbonisation / Verkohlung der Isolierung zwischen den gegeneinander isolierten Leitungen oder innerhalb einer einzelnen Leitung
- Kurzschlüsse
- Kondenswasserbildung (Feuchtigkeit)
- Trennung stromdurchflossener Kontakte
- Schmelzen eines stromdurchflossenen Leiters

Bild 2 zeigt die verschiedenen Phasen 1 – 5 von der Entstehung bis hin zur Entzündung eines Fehlerlichtbogens.

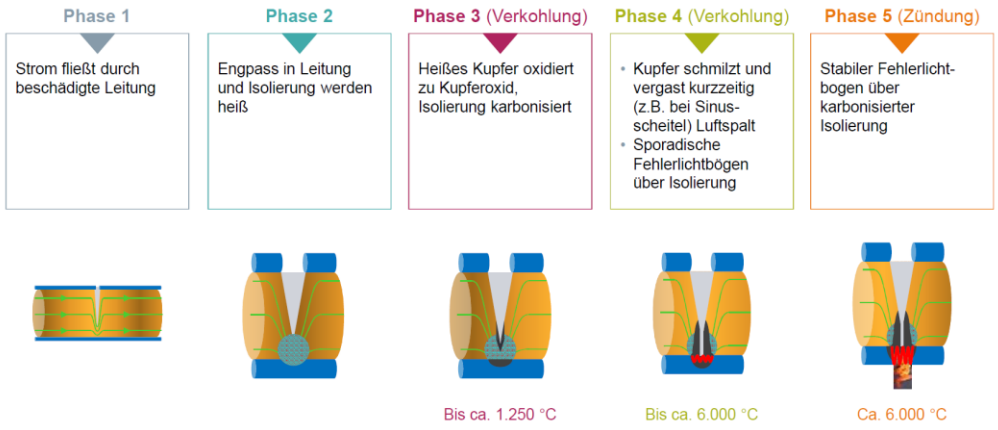

Bild 2 Entstehung von Fehlerlichtbögen innerhalb der Elektroinstallation Quelle [7] Development of fault arcs within the electrical installation

Die im Zusammenhang mit Fehlerlichtbögen auftretenden Temperaturen variieren stark von ca. 6.500 K bis hin zu 50.000 K. Entscheidender Faktor ist dabei die vorhandene Stromstärke. Liegt diese unter einem Wert von 4,5 A tritt eine annähernd konstante Temperatur des Fehlerlichtbogens von 6.500 K auf. Bei Stromstärken größer 4,5 A berechnet sich die Temperatur nach der folgenden Formel [6].

$$Temperatur\ T\ [K] = 4010 + 1658\ ln\ (I)\ für\ I > 4{,}5\ A$$

mit: I – Stromstärke in Amper

Wird eine maximale Stromstärke von 16 A bei Hausanschlüssen im Niederspannungsbereich angenommen, ergibt

sich demnach für den Fehlerlichtbogen eine Temperatur von ca. 8.300 °C.

In Bezug auf die Brenndauer des Fehlerlichtbogens finden sich in der einschlägigen Fachliteratur häufig gar keine bzw. sehr unspezifische Angaben. Dies lässt sich auf das komplexe Zusammenwirken unterschiedlicher Einflussparameter zurückführen. Es ist von Werten von ca. 100 Millisekunden bis hin zu maximal wenigen Sekunden auszugehen. [5,6].

Lichtbögen lassen sich in serielle und parallele (Fehlerlicht)bögen unterscheiden.

Parallele Fehlerlichtbögen

Parallele Fehlerlichtbögen treten zwischen dem Außenleiter (L) und dem Neutralleiter (N) bzw. zwischen dem Außenleiter (L) und dem Schutzleiter (PE) „Erde“ auf. Somit resultiert der Fehlerlichtbogen hier aus dem Überschlag zwischen zwei Leitern [8]. Die häufigsten Ursachen für die Entstehung des parallelen Lichtbogens sind [7]:

- Nagel/Schraube etc. zwischen zwei Leitern
- gequetschte Leitung
- zu kleiner Biegeradius

Bei einem Überschlag zwischen dem Außenleiter (L) und Schutzleiter (PE) wird der parallele Fehlerlichtbogen von einem FI-Schutzschalter detektiert und die Stromzufuhr unterbrochen. Problematischer sind jedoch die Überschläge zwischen Außenleiter (L) und Neutralleiter (N). Je nach Höhe des Fehlerstroms wird hierbei der Leitungsschutzschalter “Sicherung“ ausgelöst und der Stromkreis wird durch die Schutzeinrichtung unterbrochen. Liegt der Fehlerstrom jedoch unterhalb des Auslösewertes, kann der Schutzschalter den Störlichtbogen nicht erkennen und unterbricht demnach auch die Stromzufuhr nicht. Dadurch kann sich der Fehlerlichtbogen ungehindert ausbilden [8].

Serielle Fehlerlichtbögen

Neben den Überschlägen zwischen Außenleiter (L) und Schutzleiter (PE) bzw. Neutralleiter (N) treten auch Fehlerströme innerhalb des Außenleiters (L) oder des Neutralleiters (N) auf. Diese werden als serielle Fehlerlichtbögen in (L) oder (N) bezeichnet und resultieren aus den nachfolgenden Ursachen [7]:

- lose Kontakte oder Anschlüsse
- UV-Strahlung

Engel; Moosmüller; Werther (2020) Brandgefahr durch Elektroinstallationen in modernen mehrgeschossigen Holzgebäuden. https://doi.org/10.1002/bate.202000076

- Nagetierverbiss
- abgeknickte Stecker oder Leitungen

Der Fehlerlichtbogen tritt infolge einer Fehlstelle und einem in Reihe liegenden Verbraucher auf. FI-Schalter können derartige Fehlerströme nicht detektieren, da kein Ableitstrom zur Erde vorhanden ist. Auch LS-Schutzeinrichtungen lösen in diesen Fällen nicht aus, da der benötigte Grenzwert nicht erreicht wird. Somit bilden die seriellen Fehlerlichtbögen das größte Gefahrenpotential und damit auch das größte Brandentstehungsrisiko, da sie von herkömmlichen Schutzeinrichtungen in Standardgebäuden nicht erkannt werden [8].

1.4 Fehlerlichtbogen-Schutzschalter (AFDD)

Durch die gängigen Schutzeinrichtungen in Haus-Niederspannungsanlagen (FI- und LS-Schutzschalter) werden zahlreiche Gefahrenpotentiale in elektrischen Installationen erkannt. Diese Schutzeinrichtungen können jedoch serielle und parallele Fehlerlichtbögen nicht vollständig ausschließen, da die Stör- bzw. Überströme nicht detektiert werden können. Einzig der parallele Fehlerlichtbogen zwischen Außenleiter (L) und Schutzleiter (PE) wird grundsätzlich immer vom Fehlerstromschutzschalter (FI) erkannt.

Maßgebend für die weitere Untersuchung sind daher die nachfolgenden Arten von Fehlerlichtbögen:

- paralleler Fehlerlichtbogen zwischen Außenleiter (L) und Neutralleiter (N) bei Unterschreitung des Auslösegrenzwertes der Schutzeinrichtung
- serieller Fehlerlichtbogen im Außenleiter (L)
- serieller Fehlerlichtbogen im Neutralleiter (N)

Zur Erkennung derartiger Fehlerströme wurden sog. Fehlerlichtbogen-Schutzeinrichtungen bzw. Arc Fault Detection Devices (kurz AFDDs), häufig auch als Brandschutzschalter bezeichnet, entwickelt.

Bei AFDDS werden die aktiven Leiter (Außenleiter und Neutralleiter) durch die AFD-unit geführt, wobei der Außenleiter (L) mit den beiden nachfolgend aufgeführten Sensoren verbunden ist:

- Stromsensor: Erfassung der nieder- bzw. netzfrequenten Signale
- HF-Sensor: Erfassung der hochfrequenten Signale

Durch die beiden Sensoren werden somit dauerhaft das Hochfrequenz-Rauschen (HF-Rauschen) und das Stromsignal überwacht. Diese Informationen werden mittels Analogelektronik aufbereitet und an den Mikrocontroller

weitergegeben. Ausschlaggebend ist dabei vor allem die HF-Leistung des Stroms, die „die Leistung des Lichtbogens bei einer definierten Frequenz und Bandbreite“ [9] repräsentiert. Werden durch den Mikrocontroller die Kriterien für das Vorliegen eines Fehlerlichtbogens erkannt und es handelt sich dabei nicht um einen betriebsbedingt notwendigen bzw. gewollten Lichtbogen (z.B. Einschaltstrom bei Elektromotoren, Lichtschalter usw.) gibt dieser ein Auslösesignal an den Schaltmechanismus weiter, um das Netz vom fehlerhaften Anlagenteil zu trennen, vgl. Bild 3 [9].

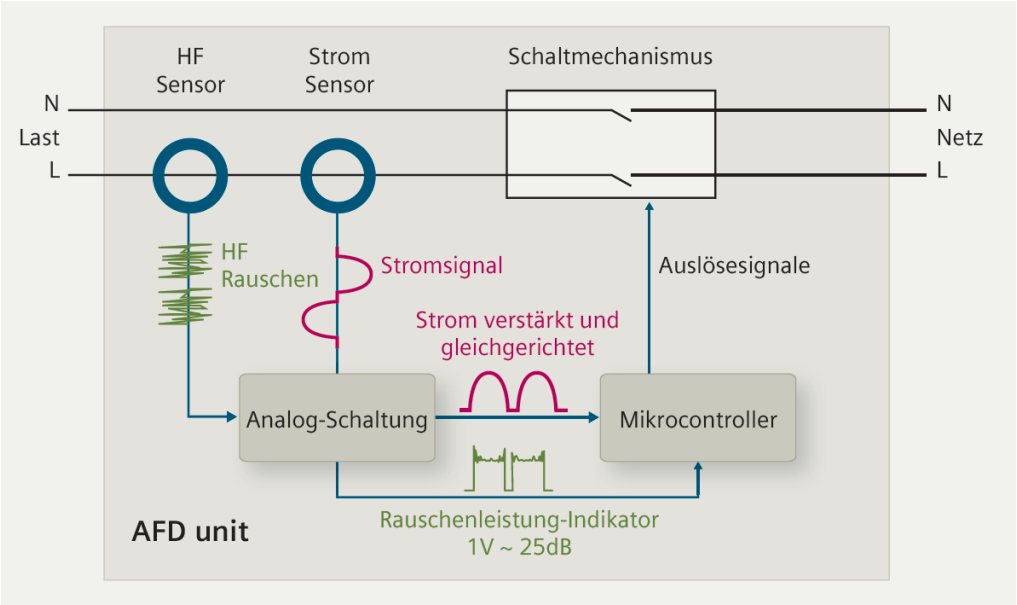

Bild 3 Prinzipieller Aufbau AFDD am Beispiel des 5SM6 der Fa. Siemens Quelle: [9] Basic structure of AFDD using the example of the 5SM6 from Siemens

Mit Einführung der DIN VDE 0100-420:2016-02 im Jahr 2016 wurden pauschal für Neuanlagen, Erweiterungen und Änderungen an Bestandsanlagen AFDDs bei *„Gebäuden, die überwiegend aus brennbaren Baustoffen bestehen (z. B. Holzhäuser und Gebäude in Leichtbauweise/Fertighäuser)“* gefordert [11]. Auch wenn diese Norm keine bauaufsichtliche Forderung darstellt, wurde sie durch die Fachplaner über eine Vermutungserwähnung im Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) §49 nahezu konsequent umgesetzt. Dies führte zu deutlichen Mehrkosten bei Holzgebäuden. Im Oktober 2019 wurde diese Forderung zwar mit Neuerscheinung der Norm gestrichen bzw. nur noch für Räume, deren Bauteile keinen planmäßigen Feuerwiderstand aufweisen, empfohlen und fortan eine Risikobewertung gefordert [12], die grundlegende Frage welchen Einfluss ein brennbarer Baustoff bei Elektrobränden innerhalb der Konstruktion einnimmt blieb jedoch in den Köpfen bestehen.

2 Versuchsreihe zur Untersuchung der Brandgefahr durch Elektrizität in Holzbauelementen

2.1 Ziele der Untersuchung

Das Ziel der Untersuchung ist es nachzuweisen, ob der Baustoff Holz eine Brandentstehung innerhalb der Konstruktion bzw. des Bauteils begünstigt und ob folglich AFDDs in modernen Standardgebäuden in Holzbauweise über den bisherigen Sachstand hinaus zu einer weiteren signifikanten Erhöhung des brandschutztechnischen Schutzniveaus beitragen.

2.2 Versuchskonzeption

Zur konstanten Lichtbogenerzeugung in diesen Versuchen wurde eine isolierte Kupferader mit einem Leiterquerschnitt von 1,5 mm² durchtrennt und die beiden Kontaktstellen mit Hilfe von Schraubklemmen mit Graphitstäben verbunden, vgl. Bild 4. Auf die Graphitelektroden wurde zurückgegriffen, da sich die Ionisierung bei einem in der Praxis auftretenden Lichtbogen über einen längeren Zeitraum (teilweise Tage –Wochen) ziehen kann. Dies ist jedoch im Versuchsaufbau nur schwer nachzustellen bzw. zu steuern [1]. Die Graphitelektroden erwärmen sich auf rund 3.000 °C und das dazwischen entstehende Plasma (Lichtbogen) erreicht dabei Temperaturen bis 10.000 °C [10]. Dies entspricht der Temperatur der in der Praxis auftretenden Lichtbögen.

Bild 4 Graphitelektroden zur planmäßigen Lichtbogenerzeugung [1] Graphite electrodes for scheduled arc generation

Der Schaltkreis der Versuchsanordnung wurde aus den nachfolgenden Komponenten gebildet, vgl. Bild 5 [1].

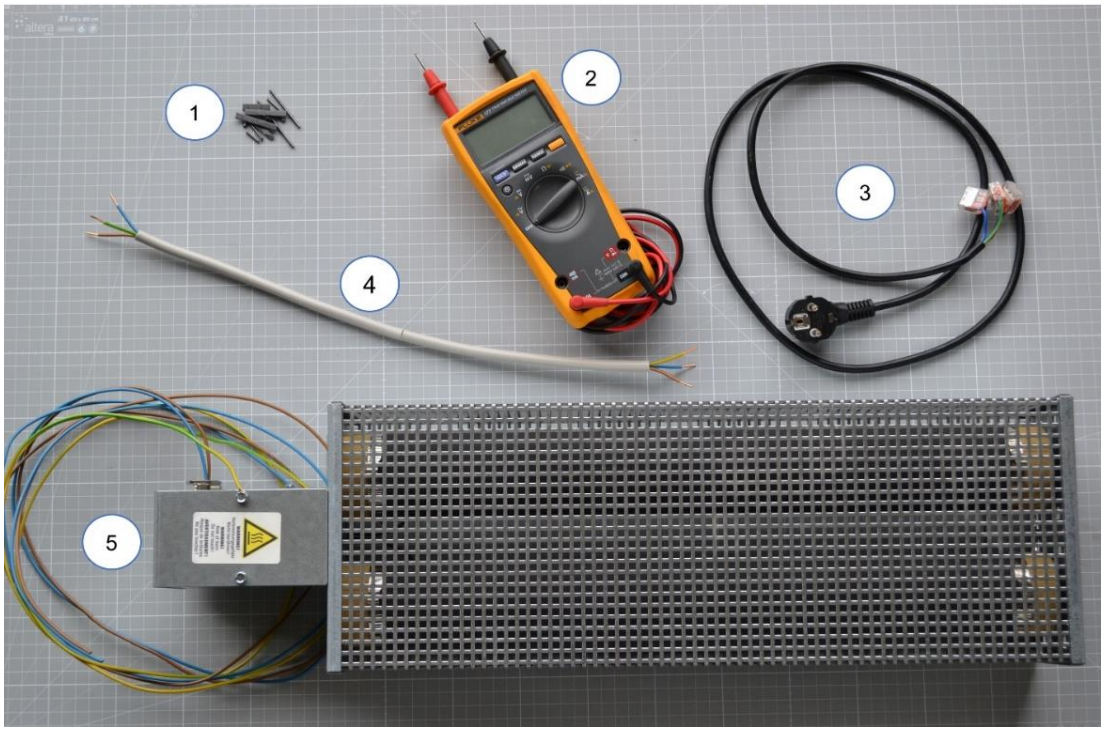

Bild 5 Einzelkomponenten des grundlegenden Schaltkreises zur Versuchsdurchführung [1] Individual components of the basic circuit

Komponente 1: Graphitelektroden

Bleistiftminen mit dem Härtegrad 2B.

Komponente 2: Multimeter Fluke 177

Prüfung des geschlossenen Stromkreises.

Komponente 3: Anschluss an den Hausstrom

Hausstromanschluss maximale Spannung 230 V ± 23 V und Stromstärke von 16 A je Stromkreis. FI-Schalter mit 30 mA Auslösegrenzwert und LS-Schalter im Stromkreis vorhanden.

Komponente 4: elektrische Installationsleitung

Dreiadrige elektrische Installationsleitung des Typs NYM-J nach VDE 0250 Teil 204 (Leitermaterial: Kupfer, Leiterquerschnitt: 1,5 mm², Mantelmaterial: Polyvinylchlorid (PVC)) mit Außenleiter, Neutralleiter und Schutzleiter, nachfolgend als PVC-Kabel bezeichnet.

Alternativ wurde bei den Versuchen eine dreiadrige elektrische Installationsleitung des Typs NHXMH-J (Leitermaterial: Kupfer, Leiterquerschnitt: 1,5 mm², Mantelmaterial: Außenmantel aus halogenfreiem Polymer) verwendet, nachfolgend als halogenfreies Kabel bezeichnet.

Komponente 5: Widerstand bzw. Verbraucher

Externer Bremswiderstand des Typs AX2090-BW80-1600 mit einer Leistung von ca. 1.600 W und einen Widerstand von 33 Ω. Daraus ergibt sich eine Stromstärke von 6,97 A.

Aus diesen Komponenten wurden die zwei nachfolgenden Schaltkreise konzipiert [1]:

Einfacher Schaltkreis

Zur Lichtbogenerzeugung wird nur ein einzelner Leiter verwendet. Der Neutralleiter und der Schutzleiter sind nicht vom Einfluss des Fehlerlichtbogens betroffen. Diese beiden Leiter (PE und N) werden direkt vom Hausanschluss zum externen Bremswiderstand geführt. Der Außenleiter L wird durchtrennt und mit den beiden Graphitelektroden versehen, vgl. Bild 6. Durch diese Versuchsanordnung kann der Lichtbogen längere Zeit aufrechterhalten werden, da weder der FI-Schalter noch der LS-Schalter auslösen.

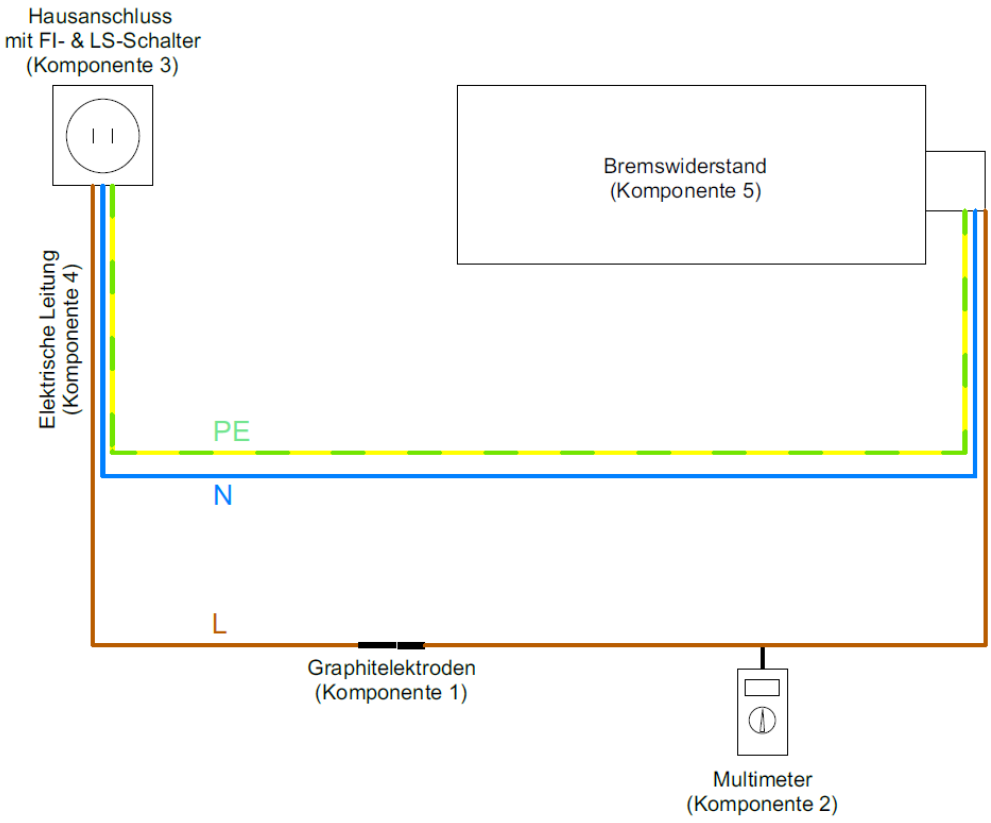

Bild 6 Schaltkreis zur Lichtbogenerzeugung mit einem Leiter [1] Circuit for arc generation with one conductor

Dreiadriger Schaltkreis

Bei dieser Anordnung wird der äußere Mantel der Installationsleitung geöffnet und die drei einzel-isolierten Adern (L, N und PE) freigelegt. Die Kupferader des Außenleiters wird durchtrennt und somit ein Elektrodenabstand in L hergestellt, vgl. Bild 7.

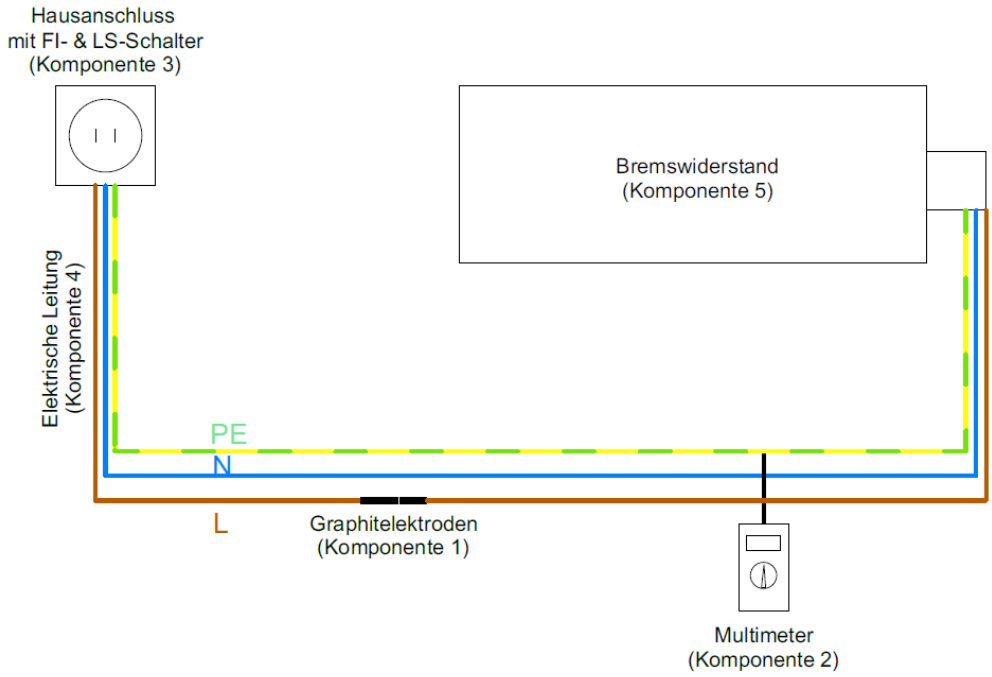

Bild 7 Schaltkreis zur Lichtbogenerzeugung mit einer dreiadrigen Installationsleitung [1] Circuit for arc generation with a three-wire installation line

Zur Erzeugung des seriellen Fehlerlichtbogens wird Graphit in die Lücke zwischen den beiden Elektroden des Außenleiters eingebracht, vgl. Bild 8. Nach dem Einfügen des Graphits wird der Kabelmantel durch Zusammenschieben wieder geschlossen. Der Lichtbogen tritt hier direkt in der dreiadrigen Installationsleitung auf. Folglich werden auch der Schutz- bzw. Neutralleiter auf Grund der thermischen Einwirkung beschädigt, was zu einem Auslösen der Schutzeinrichtungen des Hausanschlusses führt. Mit diesem Aufbau kann die Dauer des seriellen Lichtbogens im Außenleiter (L) nachgewiesen werden.

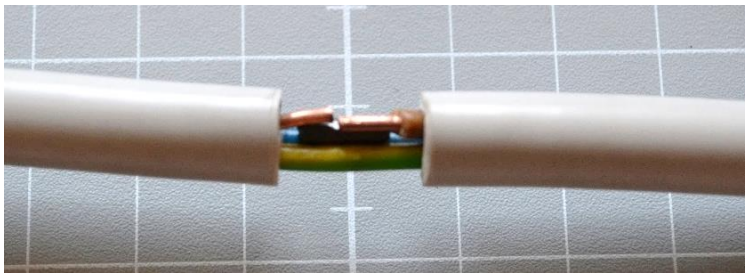

Bild 8 Anordnung der Graphitzugabe zwischen den beiden Kontaktstellen des Außenleiters [1] Arrangement of the graphite addition between the two contact points of the outer conductor

2.3 Prüfkörper

Im Rahmen der Versuche kamen folgende Materialien als anliegende bzw. umgebende Baustoffe zur Installationsleitung hin zum Einsatz [1]:

- **Konstruktionsvollholz**: KVH Fichte (Querschnitt 60 × 120 mm, Länge 400 mm) mit einer mittleren Rohdichte von 460 kg/m³ und einer mittleren Holzfeuchte von 12 %
- **Holzwerkstoffplatte**: OSB-3-Platte mit einer Stärke von 15 mm, einer Rohdichte von 600 kg/m³ und einer mittleren Holzfeuchte von 9 %
- **Dämmstoff 1**: Mineralwolle-Dämmstoff (Glaswolle) nach DIN EN 13162 (200 × 200 × 100 mm) klassifiziert als A1 nichtbrennbar ohne Neigung zum kontinuierlichen Schwelen
- **Dämmstoff 2**: Mineralwolle Dämmstoff nach DIN EN 13162 (200 × 200 × 100 mm) klassifiziert als A1 nichtbrennbar ohne Neigung zum kontinuierlichen Schwelen und einem Schmelzpunkt von > 1.000 °C

3 Experimentelle Untersuchungen und Ergebnisse

3.1 Erzeugung des Lichtbogens und Temperaturnachweis

Im einfachen Schaltkreis wurde ein versuchstechnischer Fehlerleichtbogen mit den Graphitelektroden erzeugt und im indirekten Temperaturnachweis unter Betrachtung des Erreichens der Schmelzpunkttemperatur von Kupfer (1.084 °C) und Wolfram (3.422°C) Temperaturen von über 3.400 °C nachgewiesen [1].

3.2 Dauer eines seriellen Lichtbogens innerhalb des Außenleiters

Ziel dieses Versuches war es, die Dauer eines seriellen Lichtbogens innerhalb eines Außenleiters zu ermitteln. Dafür wurde der Lichtbogen direkt am dreiadrigen Kabel (Typ NYM-J) erzeugt. Durch die dabei entstehende

Temperatur wird nach einer gewissen Zeit die Isolierung des Neutral- und/oder Schutzleiters beschädigt und die entsprechenden Schutzeinrichtungen des Hausanschlusses (FI- und LS-Schalter) unterbrechen den Stromfluss. Als Ergebnis der Versuche wurde die Einwirkdauer des Fehlerlichtbogens in den nachfolgenden Versuchen auf 20 Sekunden bestimmt, vgl. Tab. 1 [1].

Tab. 1 Dauer des seriellen Lichtbogens [1] Duration of the serial arc

Lfd. Nr.	Dauer bis zum Auftreten des ersten Lichtbogens [s]	Dauer des seriellen Lichtbogens ab auftreten [s]	Gesamtdauer bis zum Auslösen der Schutzvorrichtung [s]	Schutzvorrichtung
1	19,5	12,4	31,9	LS-Schalter
2	1,3	13,0	14,3	FI-Schalter
3	1,1	18,4	19,4	LS-Schalter
4	1,7	3,2	4,8	LS-Schalter

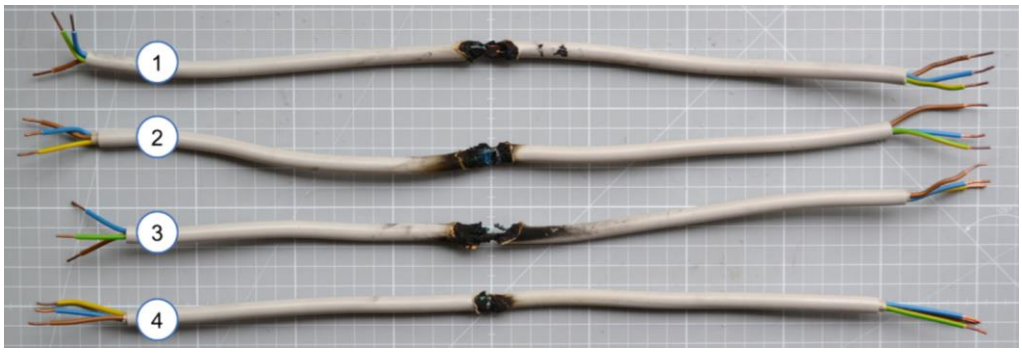

Bild 9 Elektrische Installationsleitungen nach Beendigung des Versuches [1] Electrical installation lines after completion of the test

3.3 Einwirkung des Lichtbogens auf das KVH, die Holzwerkstoffplatte und die Dämmung

In dieser Versuchsanordnung wurde die Entzündbarkeit der in Kap. 2.3 beschriebenen Bestandteile (KVH, OSB, Dämmung 1 und 2) einer Holztafelkonstruktion separat unter Einwirkung eines Fehlerlichtbogens mit der zuvor abgeleiteten maximalen Einwirkungszeit konservativ für einen Wert von 20 Sek. überprüft. Für die Durchführung des Versuches wurde der einfache Schaltkreis verwendet.

Bei der Einwirkung des Lichtbogens auf die unterschiedlichen Prüfkörper wurden drei unterschiedliche Anordnungen gewählt, vgl. Bild 10.

Engel; Moosmüller; Werther (2020) Brandgefahr durch Elektroinstallationen in modernen mehrgeschossigen Holzgebäuden. https://doi.org/10.1002/bate.202000076

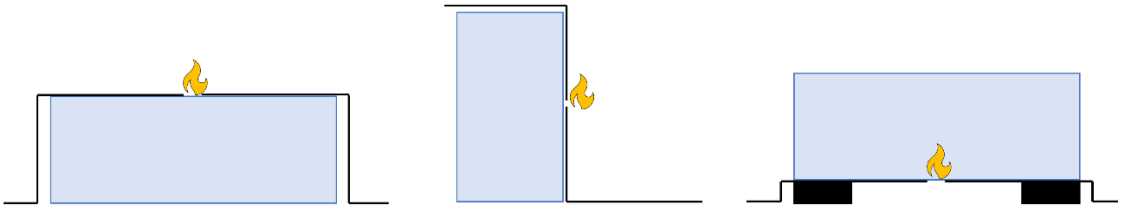

Bild 10 Anordnung der Prüfkörper (v.l.n.r.): Prüfkörper waagrecht – Lichtbogenerzeugung an der Oberseite des Prüfkörpers, Prüfkörper senkrecht – Lichtbogenerzeugung parallel zum Prüfkörper; Prüfkörper waagrecht – Lichtbogenerzeugung an der Unterseite des Prüfkörpers [1] Arrangement of test pieces (from left to right): test piece horizontal - arc generation at the top of the test piece, test piece vertical - arc generation parallel to the test piece; test piece horizontal - arc generation at the bottom of the test piece

Alle Prüfkörper wiesen zwar nach den Versuchen Verkohlungsflächen (KVH und OSB) bzw. Schmelzbereiche (Dämmstoff 1&2) auf, verhielten sich jedoch insgesamt nach Ende der Einwirkung des Lichtbogens und einer Beobachtungszeit als selbstverlöschend. Die kurzzeitige Entzündung während der Einwirkung beschränkte sich auf eine sehr begrenzte Fläche um das Zündinitial, vgl. Bild 11 [1]. In diesem Zusammenhang darf angemerkt werden, dass der gewählte Versuchsaufbau bezüglich des freien Zugangs von Luftsauerstoff als kritischer Fall anzusehen ist, da in der praktischen Anwendung innerhalb von Bauteilen abgeschlossenen Bedingungen vorliegen.

Bild 11 Prüfkörper nach Versuch: (v.l.n.r.): KVH, OSB bei Anordnung senkrecht und Dämmung 1 und 2 Test specimen after test: (from left to right): Solid structural timber, OSB with vertical arrangement and insulation 1 and 2

3.4 Lichtbogenerzeugung im dreiadrigen Kabel befestigt auf KVH

In diesem Versuch wurde ein Lichtbogen direkt in der dreiadrigen Elektroinstallationsleitung (vgl. Bild 8), die an einem KVH-Prüfkörper mit entsprechenden Befestigungsklammern angebracht war, erzeugt. Die Elektroinstallationsleitung selbst stellt somit eine weitere Brandlast auf der Einwirkungsseite dar. Die Versuchsanordnung ist in Bild 12 dargestellt. Der Neutral- bzw. Schutzleiter wurde räumlich getrennt vom Prüfkörper angeordnet. Somit

wurde gewährleistet, dass die Sicherungseinrichtungen des Hausanschlusses die Stromversorgung nicht unterbrechen und gleichzeitig die zusätzliche Brandlast der Leitung zur Verfügung stand. Als Installationsleitungen kamen bei diesem Versuch sowohl PVC-Kabel, als auch halogenfreie Kabel zum Einsatz. Die Versuche endeten jeweils, wenn kein Strom mehr durch den Außenleiter (L) floss, sprich das jeweilige Kabel durch die Einwirkung punktuell zerstört war, vgl. Tab. 2. Die Prüfkörper nach Ende des Versuchs sind in Bild 14 dargestellt. Die PVC-Kabel zeigten im Gegensatz zu den halogenfreien Kabeln eine höhere Entzündbarkeit und eine damit einhergehende stärkere Rauchentwicklung. Im Gegensatz dazu hielt der Fehlerlichtbogen bei den halogenfreien Kabeln deutlich kürzer an und die Entflammungszeit und die Rauchentwicklung war deutlich geringer. Alle Prüfkörper wiesen nach den Versuchen Verkohlungsflächen auf, verhielten sich insgesamt aber als selbstverlöschend [1].

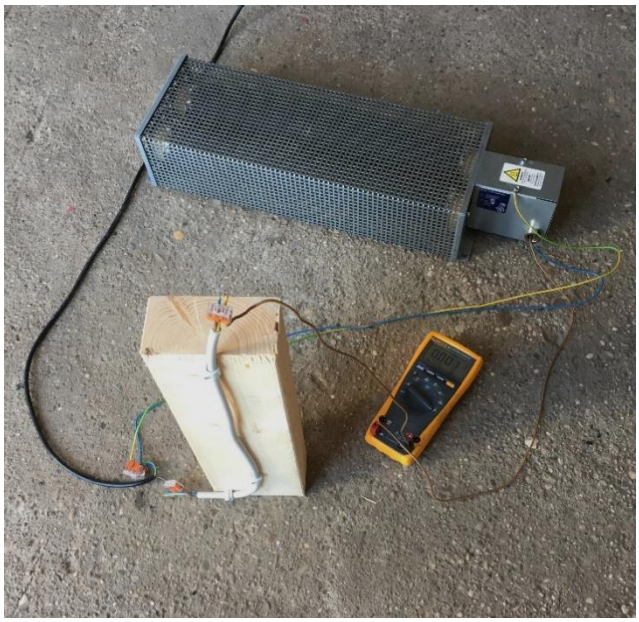

Bild 12 **Versuchsanordnung senkrecht mit einer PVC-Elektroinstallation [1]**
Test arrangement vertical with a PVC electrical installation

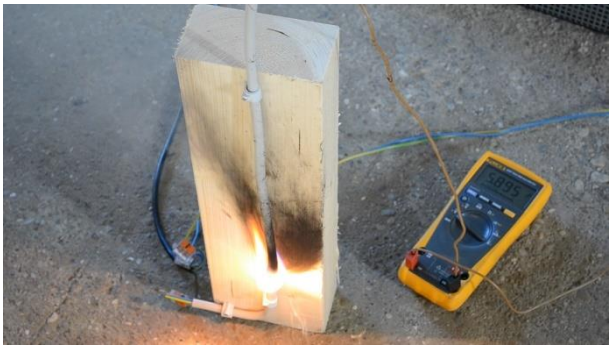

Bild 13 **Lichtbogen bei der senkrechten Anordnung des PVC-Kabels [1]**
Arcing during vertical arrangement of the PVC cable

Tab. 2 Dauer der Versuche und Lichtbögen am KVH [1] Duration of tests and arcs at the solid structural timber

Lfd. Nr.	Kabeltyp	Anordnung	Dauer des Lichtbogens [s]	Selbständiges Erlöschen des Prüfkörpers nach einer Gesamtzeit von [s]
1	PVC	waagrecht	46	171
2	PVC	senkrecht	83	174
3	halogenfrei	waagrecht	17	24
4	halogenfrei	senkrecht	12	Keine Entzündung

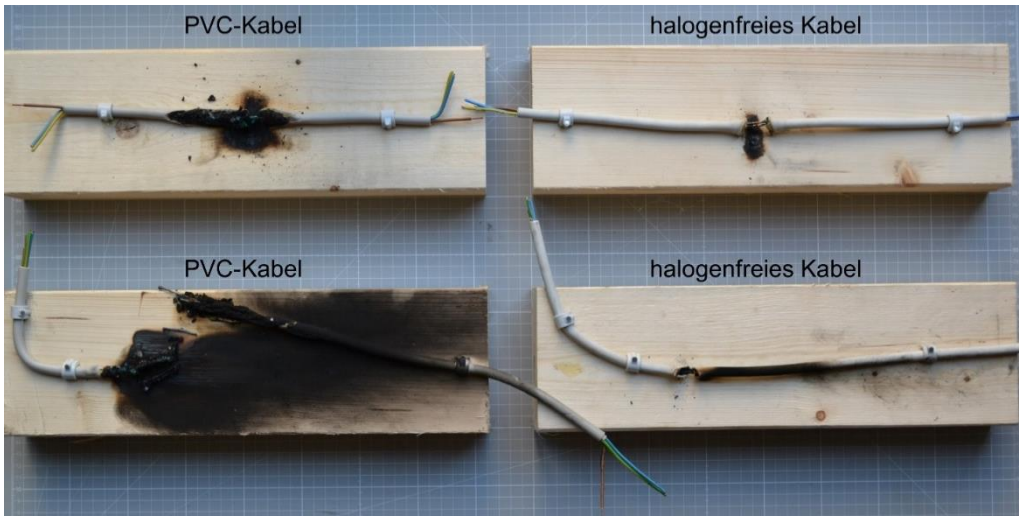

Bild 14 Prüfkörper nach Lichtbogenerzeugung (oben waagrechte, unten senkrechte Anordnung) [1] Test specimen after arc generation (horizontal arrangement above, vertical arrangement below)

3.5 Wirkung von Lichtbögen in einem geschlossenen Holztafelelement

Abschließend wurde die Wirkung von Lichtbögen innerhalb einer Holztafelbaukonstruktion geprüft. Hierzu wurde eine Holztafelbaukonstruktion (Abmessungen: Höhe 125 cm, Breite 74,5 cm, Tiefe 17,5 cm) aus den in Kap. 2.3 genannten Komponenten gefertigt, vgl. Bild 15. Auch in diesem Versuch wurde der Neutral- bzw. Schutzleiter getrennt vom Prüfkörper angeordnet, um zu gewährleistet, dass die Sicherungseinrichtungen des Hausanschlusses die Stromversorgung nicht unterbrechen. Die Holztafelelemente wurden aufrechtstehend als Wand während der Versuche angeordnet. Es wurden folgenden drei Varianten untersucht [1]:

- PVC-Kabel mittig zwischen den beiden KVH-Ständern auf der Dämmung
- PVC-Kabel direkt entlang des KVH-Ständers

- Halogenfreies Kabel direkt entlang des KVH-Ständers.

Die Versuchsdauer ist in Tab. 3 und die 30 Minuten nach Versuchsende geöffneten Prüfkörper in Bild 16- Bild 18 dargestellt.

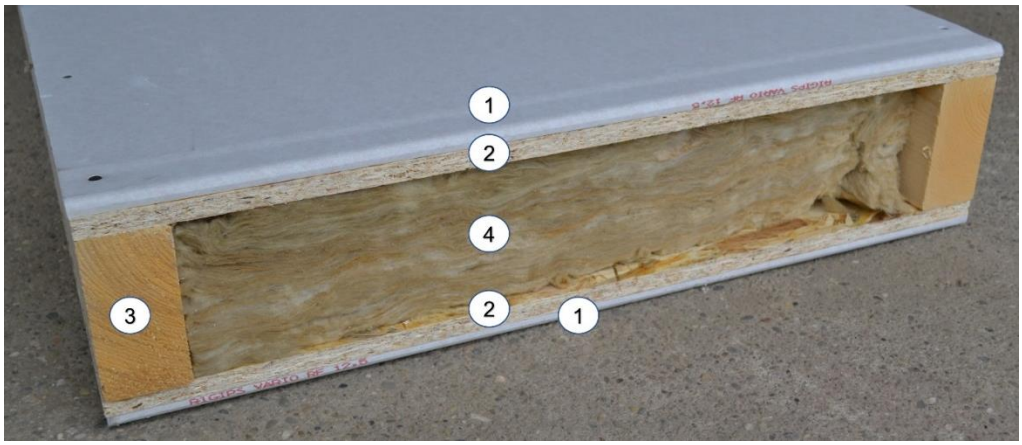

Bild 15 **Aufbau der Holztafelbauwand: (1) Gipskartonplatte 12,5 mm, (2) OSB 15 mm, (3) KVH 60 × 120 mm, (4) Mineralwolle Dämmstoff [1]**
Construction of the timber frame wall: (1) plasterboard 12.5 mm, (2) OSB 15 mm, (3) KVH 60 × 120 mm, (4) mineral wool insulation

Tab. 3 **Dauer der Versuche und Lichtbögen in der Holztafelbauwand [1]** **Duration of experiments and arcs in the timber frame wall**

Lfd. Nr.	Kabeltyp	Anordnung des Kabels	Auftreten von Lichtbögen bis Prüfsekunde [s]	Versuchsdauer [s]	Ist der Prüfkörper selbsterloschen, folglich keine Löschmaßnahmen notwendig
1	PVC	mittig	1200.	Abbruch nach 1200	ja
2	PVC	am Ständert	1200.	Abbruch nach 1200	ja
3	halogenfrei	am Ständert	22.	Kein Stromfluss mehr ab 22	ja, keine Verkohlung sichtbar

Bild 16 Prüfkörper mit mittig verlegtem PVC-Kabel nach Öffnung und Lichtbogeneinwirkung [1] Test specimen with centrally laid PVC cable after opening and exposure to arcing

Bild 17 Prüfkörper mit am Ständer verlegtem PVC-Kabel nach Öffnung und Lichtbogeneinwirkung [1] Test specimen with PVC cable laid on stud after opening and exposure to arcing

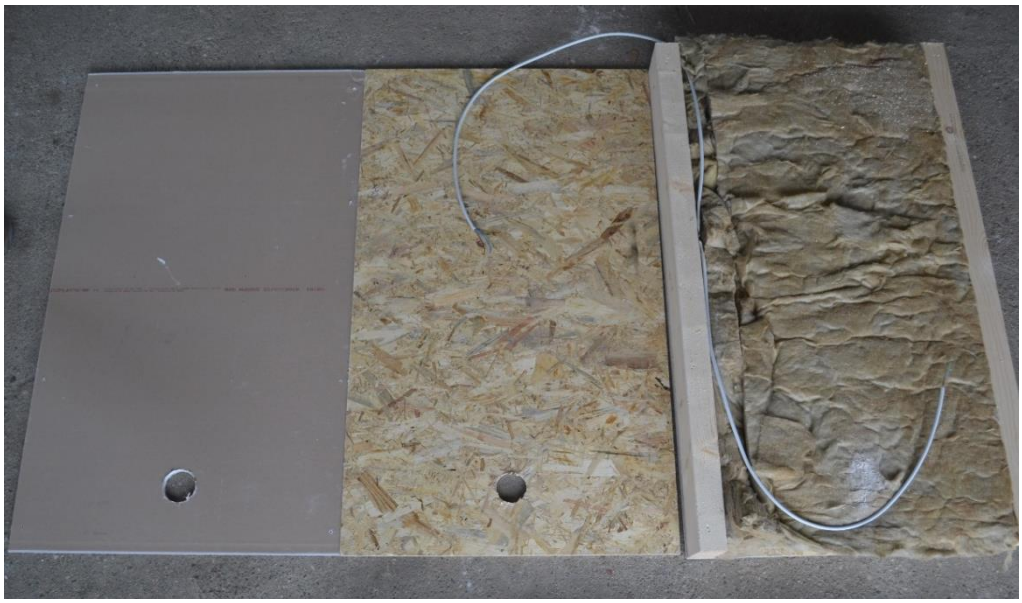

Bild 18 Prüfkörper mit am Ständer verlegtem halogenfreien Kabel nach Öffnung und Lichtbogeneinwirkung [1] Test specimen with halogen-free cable laid on the stud after opening and exposure to arcing

Bei beiden Varianten mit PVC-Kabel wurde eine Versuchsdauer von 20 Minuten erreicht, bis der Versuch abgebrochen wurde. Die lange Versuchsdauer im Vergleich zu Kap. 2.4.4 lässt sich damit begründen, dass durch die PVC-Mantel- und Litzen-Schmelze eine leitende Schicht innerhalb der Holztafelbaukonstruktion entstand. Die Prüfdauer von 20 Minuten ist ein rein versuchstechnischer und extrem auf der sicheren Seite liegender Umstand. In der Praxis wäre durch Auslösen einer Sicherungseinrichtung des Hausanschlusses der Stromkreis weit früher unterbrochen worden, vgl. Kap. 2.4.2. Innerhalb der Holztafelbaukonstruktion kam es zu Verkohlungen, ein Mitbrand nach Ende der Einwirkung trat jedoch nicht auf. Nach Ende der Stromzufuhr verhielt sich der Prüfkörper in der geprüften Konstellation selbstverlöschend.

Der Lichtbogen am halogenfreien Kabel trat nur rund 22 Sekunden auf. Im Anschluss fand kein Stromfluss mehr innerhalb des Schaltkreises statt, da sich keine durch Schmelze entstandene leitende Schicht bildete. Nach Versuchsende konnten nur geringfügige lokale Verkohlungen am KVH festgestellt werden.

4 Fazit und Ableitung von Maßnahmen

Circa ein Drittel aller Brände sind auf elektrotechnische Ursachen zurückzuführen. Ein Großteil dieser Brände geht jedoch von Elektrogräten aus bzw. wird durch überlastete Mehrfachsteckdosen oder beschädigte Kabel innerhalb der Nutzungseinheit ausgelöst. In diesen Fällen trägt insbesondere die mobile Brandlast zur Raumbrandentwicklung bei. Immobile Brandlasten, wie z.B. sichtbare Wände oder Decken aus Holz, können dies zwar begünstigen, erhöhen aber nicht das Brandentstehungsrisiko.

Engel; Moosmüller; Werther (2020) Brandgefahr durch Elektroinstallationen in modernen mehrgeschossigen Holzgebäuden. https://doi.org/10.1002/bate.202000076

Anders könnte sich dies bei Elektrobränden innerhalb einer brennbaren Konstruktion verhalten. Spätestens seit Einführung der DIN VDE 0100-420 wird die Frage, welchen Einfluss ein brennbarer Baustoff bei Elektrobränden innerhalb der Konstruktion einnimmt, stark diskutiert.

Im Rahmen der Untersuchung wurde diese Fragestellung für moderne mehrgeschossige Gebäude (Gebäudeklasse 4-5) aus Holz untersucht. Diese Differenzierung ist insbesondere deshalb notwendig, da brennbare Dämmstoffe nicht Teil des Untersuchungsumfangs waren.

Im Rahmen der Untersuchung konnte nachgewiesen werden, dass das Risiko eines Auftretens von Elektrobränden innerhalb der Konstruktion verhältnismäßig gering ist. Weiter decken die vorhandenen Schutzeinrichtungen eines Hausanschlusses einen Teil möglicher Defekte bereits ab. Entscheidend ist somit die Frage, wie sich ein brennbarer Baustoff bei Auftreten eines Lichtbogens innerhalb der Konstruktion verhält. Bei allen durchgeführten Versuchen, die mit konservativ anzusehenden Einwirkungszeiten durchgeführt wurden, trat immer ein Selbstverlöschen auf. Es entstand kein weiterführender Brand um den Initialbereich der Entzündung nach Ende der Einwirkung in oder an der brennbaren Konstruktion.

AFDDs sind wichtige Bestandteile um den Brandschutz in Gebäuden mit besonderen Schutzniveau (Sonderbau wie Krankenhaus oder Pflegeheim) oder Gebäuden mit Kulturschätzen zu verbessern. Eine Notwendigkeit für Standardgebäude lässt sich mit Blick auf die Versuche jedoch nicht ableiten.

Eine weitere entscheidende Erkenntnis war, dass halogenfreie Installationsleitungen bei Lichtbögen, auf Grund des Nichtvorhandensein von PVC Schmelze, deutlich gutmütiger reagieren. Da diese Leitungen nur geringfügig teurer sind eröffnet dieser Sachverhalt ein weiter zu untersuchendes Feld für die Zukunft. Auch die Reaktion von Kabelbündeln, anstelle von Einzelkabeln wie in dieser Untersuchung, soll in weiterführenden Untersuchungen nochmals betrachtet werden.

Fördernachweis und Danksagung

Diese Untersuchung wurden im Rahmen des Vorhabens TIMpuls (www.timpuls.tum.de) durchgeführt. Das Vorhaben wird vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) über den Projektträger Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) gefördert. Eine Kofinanzierung der Holzwirtschaft erfolgt koordinierend über den Landesinnungsverband des Bayerischen Zimmererhandwerks.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Felix Ulrich, Geschäftsführer des Ingenieurbüros IBU Brandschutz GmbH & Co.

KG und der Beckhoff Automation GmbH & Co. KG für die fachliche Unterstützung während der Versuchskonzeption und -durchführung.

Literatur

[1] MOOSMÜLLER, K. (2019) *Untersuchung der Brandgefahr durch Elektroinstallationen in Holzgebäuden* [Master-Thesis]. Technische Universität München.

[2] INSTITUT FÜR SCHADENVERHÜTUNG UND SCHADENFORSCHUNG DER ÖFFENTLICHEN VERSICHERER E.V. [Hrsg.] (2020) *URSACHENSTATISTIK - Brandschäden* 2019. Kiel.

[3] HOYER, J. (2018) *Brände in Elektroverteilungen*. Schadenprisma. 2018/02. S. 12–17. Kiel.

[4] ARGEBAU BAUMINISTERKONFERENZ, KONFERENZ DER FÜR STÄDTEBAU, BAU- UND WOHNUNGSWESEN ZUSTÄNDIGEN MINISTER UND SENATOREN DER LÄNDER (2004) *Muster-Richtlinie über brandschutztechnische Anforderungen an hochfeuerhemmende Bauteile in Holzbauweise (M-HFHHolzR)*. Fassung Juli 2004.

[5] DAHMOUNI, Y. (1999): *Brandentstehung in Niederspannungsanlagen*. [Dissertation]. Universität Hannover.

[6] BABRAUSKAS, V. (2003): *Ignition Handbook. Principles and applications to fire safety engineering, fire investigation, risk management and forensic science*. Issaquah: Fire Science Publishers

[7] KRAUSE, S. (2017): *Investitions-, Brand- und Personenschutz gemäß DIN VDE 0100-420*. Version 9. Siemens AG [Hrsg.] München

[8] ERNST GRANZOW GMBH & CO. KG [HRSG.] (2017): *Schutz bei seriellen und parallelen Fehlerlichtbögen – Die neuen AFDD Brandschutzschalter QSE960D und QSE966D* von Hager. https://sicherheitstechnik.granzow.de/afdd_brandschutzschalter_von_hager/ (Abruf vom 30.06.2020)

[9] SIEMENS AG [HRSG.] (2016): *Brandschutzschalter 5SM6 – Technik Fibel*. München

[10] SIEMENS AG [HRSG.] (o. J.): *Kohlebogenlampen: Scheinwerfer zur lichtstärksten Beleuchtung*. München

[11] DIN VDE 0100-420 VDE 0100-420:2016-02 (2016) *Errichten von Niederspannungsanlagen Teil 4-42: Schutzmaßnahmen – Schutz gegen thermische Auswirkungen*. Beuth, Berlin

[12] DIN VDE 0100-420 VDE 0100-420:2019-10 (2019) *Errichten von Niederspannungsanlagen Teil 4-42: Schutzmaßnahmen – Schutz gegen thermische Auswirkungen*. Beuth, Berlin

Engel; Moosmüller; Werther (2020) Brandgefahr durch Elektroinstallationen in modernen mehrgeschossigen Holzgebäuden. https://doi.org/10.1002/bate.202000076

Autoren

Thomas Engel, M.Sc.
Technische Universität München
Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Arcisstraße 21
80333 München
engel@tum.de

Katharina Moosmüller, M.Sc.
Hans-Segl-Str. 25
94486 Osterhofen
k.moosmueller@web.de

Dr.-Ing. Norman Werther
Technische Universität München
Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Arcisstraße 21
80333 München
n.werther@tum.de

Zitieren Sie diesen Beitrag

Engel, T.; Moosmüller, K.; Werther, N. (2021) Brandgefahr durch Elektroinstallationen in modernen mehrgeschossigen Holzgebäuden. Bautechnik 98, H. 5, S. 353–364.

https://doi.org/10.1002/bate.202000076

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet.

Eingereicht: 25. Juli 2020; angenommen: 2. September 2020.

Hinweis

Dies ist die angenommene Version desfolgenden Artikels: Engel, T.; Moosmüller, K.; Werther, N. (2021) Brandgefahr durch Elektroinstallationen in modernen mehrgeschossigen Holzgebäuden. Bautechnik 98, H. 5, S. 353–364, die in endgültiger Form veröffentlicht wurde unter https://doi.org/10.1002/bate.202000076. Dieser Artikel darf für nicht-gewerbliche Zwecke entsprechend der Wiley Selbstarchivierungs-Richtlinie verwendet werden.