

Sichtweiten im Brandfall – Von Jin's Experimenten zu modernen Mess- und Simulationsmethoden

Lukas Arnold^{1,2}

- 1 Institute for Advanced Simulation, Forschungszentrum Jülich, Wilhelm-Johnen-Straße, 52428 Jülich, Deutschland
l.arnold@fz-juelich.de
- 2 Lehrstuhl Computational Civil Engineering, Bergische Universität Wuppertal, Pauluskirchstraße 7, 42285 Wuppertal, Deutschland
arnold@uni-wuppertal.de

Kurzfassung

Die Sichtweite im Brandfall ist ein zentrales Kriterium für die Beurteilung der Personensicherheit und maßgeblich für Evakuierungszeiten und das verfügbare sichere Evakuierungszeitfenster. Historisch basiert ihre Bewertung auf den experimentellen Arbeiten von Jin aus den 1970er-Jahren, die einen einfachen empirischen Zusammenhang zwischen Extinktionskoeffizient und Sichtweite etablierten. Diese Ansätze sind jedoch mit starken Vereinfachungen verbunden und berücksichtigen weder räumliche und zeitliche Inhomogenitäten des Rauchs noch unterschiedliche Raucharten oder realistische Beleuchtungsbedingungen. Vor diesem Hintergrund besteht ein wachsender Bedarf an Mess- und Modellierungsverfahren, die Sichtweiten unter realitätsnahen Brandbedingungen differenzierter erfassen.

Der folgende Beitrag gibt einen Überblick über aktuelle experimentelle und numerische Arbeiten, die diese Lücken adressieren. Vorgestellt werden moderne Messmethoden wie LEDSA und ELPI+, welche eine zeit- und orts aufgelöste Bestimmung von Extinktionskoeffizienten erlauben und zeigen, dass massenspezifische Extinktionen stark aerosolabhängig sind. Replikationen und Erweiterungen der Jin-Experimente belegen zudem, dass niedrige Umgebungsbeleuchtungen die Sichtbarkeit von Fluchtzeichen deutlich erhöhen und klassische Bemessungswerte systematisch konservativ sind. Ergänzend werden neue, wegpunktbasierte Ansätze zur Sichtbarkeitsbewertung vorgestellt, die die reale Wahrnehmung entlang von Sichtlinien abbilden und eine praxisnähere Beurteilung der Evakuierungssicherheit ermöglichen.

1. Einleitung

Die Sichtweite im Brandfall ist ein zentraler Parameter in der brandschutztechnischen Sicherheitsbewertung und spielt eine Schlüsselrolle bei Ingenieurmethoden im Brandschutz [1]. Eingeschränkte Sicht beeinflusst unmittelbar die Fähigkeit von Personen, Fluchtwege, Notausgänge und Sicherheitskennzeichnungen wahrzunehmen, und wirkt sich damit direkt auf Evakuierungszeiten und das verfügbare sichere Evakuierungszeitfenster (ASET) aus. In vielen nationalen und internationalen Regelwerken wird die Sichtweite daher als maßgebendes Kriterium zur Beurteilung der Personensicherheit herangezogen, häufig mit Grenzwerten im Bereich von etwa 5–10 m.

Historisch basiert die Bewertung der Sichtweite in Rauch maßgeblich auf den Arbeiten von Jin aus den 1970er-Jahren. Der für die empirischen Zusammenhänge verwendete experimentelle Aufbau ist in Abbildung 1 vorgestellt. Diese stellen eine Pionierleistung dar und bildeten erstmals einen systematischen Zusammenhang zwischen Rauchdichte, Beleuchtung und Sichtbarkeit ab. Die Experimente entstanden jedoch lange vor der Entwicklung moderner numerischer Strömungssimulationen (CFD) und berücksichtigen nur einen stark vereinfachten Satz an Raucheigenschaften. Insbesondere räumliche Inhomogenitäten, zeitliche Schwankungen, unterschiedliche Raucharten (z. B. weißer vs. schwarzer Rauch) sowie spektrale Effekte der Lichtstreuung und -absorption konnten nicht erfasst werden. Vor diesem Hintergrund besteht heute die Notwendigkeit, Sichtweiten nicht nur punktuell, sondern räumlich und zeitlich aufgelöst zu bestimmen.

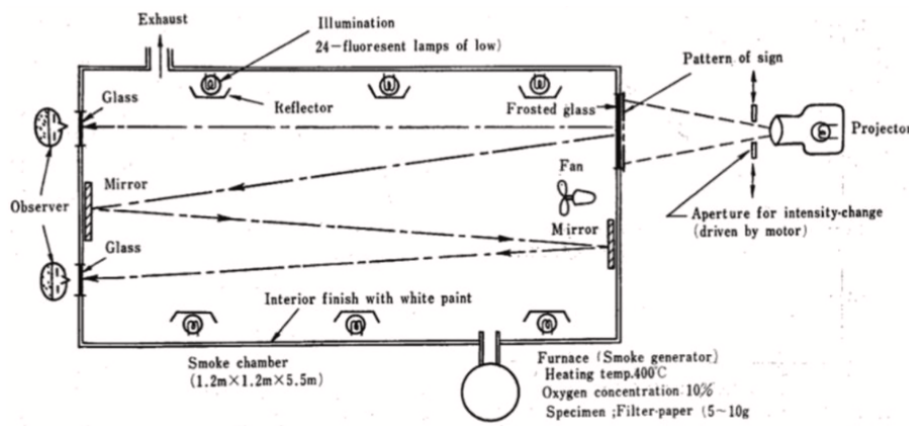


Abbildung 1: Versuchsaufbau von Jin. Aus [2].

Die physikalische Grundlage der Sichtweitenbeschreibung in Rauch ist die Abschwächung von Licht durch Absorption und Streuung an Rauchpartikeln. Diese wird durch den Extinktionskoeffizienten σ beschrieben, der angibt, wie stark die Lichtintensität pro Weglänge im Rauch abgeschwächt wird [m^{-1}]. Der Extinktionskoeffizient fasst sowohl Absorptions- als auch Streueffekte zusammen und hängt unter anderem von Partikelkonzentration, Partikelgröße, Zusammensetzung des Rauchs und der Wellenlänge des Lichts ab. Die Abschwächung der Lichtintensität entlang eines optischen Weges l lässt sich mit dem Beer-Lambert-Gesetz beschreiben:

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-\sigma l) \quad .$$

Dabei ist I_0 die Lichtintensität ohne Rauch, I die gemessene Lichtintensität im Rauch und σ der Extinktionskoeffizient. Dieses Gesetz bildet die Grundlage für Rauchdichtemessungen und für die Bestimmung der Sichtweite.

Auf Basis der experimentellen Beobachtungen leitete Jin einen einfachen empirischen Zusammenhang zwischen Sichtweite V und Extinktionskoeffizient σ her. Unter Annahme konstanter Randbedingungen (z. B. Beleuchtung, Kontrastschwelle, Schildart) ergibt sich:

$$V = \frac{C}{\sigma} \quad .$$

Dabei ist C ein empirischer, dimensionsloser Koeffizient, der unter anderem von der Art des betrachteten Objekts (selbstleuchtend oder reflektierend), der Umgebungsbeleuchtung und der Wahrnehmungsschwelle des Beobachters abhängt. In der praktischen Anwendung werden oft konstante Werte für C bzw. für das Produkt $K = \sigma V$ verwendet, was die Komplexität realer Brandumgebungen stark reduziert.

Trotz dieser Vereinfachungen ist die Jin-Korrelation bis heute die Grundlage vieler ingenieurmäßiger Sichtweitenmodelle in CFD-Simulationen. Moderne Forschung zeigt jedoch, dass insbesondere unter realistischen Brandbedingungen mit niedriger Umgebungsbeleuchtung und räumlich inhomogenem Rauch die Annahme eines konstanten Koeffizienten nur eingeschränkt gültig ist und weiterführende, differenziertere Modelle erforderlich sind.

Dieser Beitrag fasst im Folgenden die aktuellen wesentlichen wissenschaftlichen Arbeiten der Arbeitsgruppe am Forschungszentrum Jülich (Abteilung Branddynamik am IAS-7) und der Bergischen Universität Wuppertal (Lehrstuhl Computational Civil Engineering) zusammen.

2. Experimentelle Messmethoden

2.1. Brandentdeckungslabor der Universität Duisburg-Essen

Die hier vorgestellten Experimente wurden in einem Versuchsraum der Universität Duisburg-Essen mit Abmessungen von etwa $10,5 \text{ m} \times 8,9 \text{ m}$ durchgeführt, der eine realitätsnahe Untersuchung der

Rauchentwicklung ermöglicht. Innerhalb dieses Raumes wurden unterschiedliche Brandarten gemäß EN 54 realisiert, um ein breites Spektrum an Rauchcharakteristika abzudecken. Dazu zählen unter anderem TF5-Poolbrände mit n-Heptan, die typischerweise dichte, stark absorbierende Rauchsichten aus flammender Verbrennung erzeugen, sowie TF2-Versuche mit schwelenden Holzbränden, bei denen überwiegend hellerer, stärker streuender Rauch entsteht. Durch diese Variation der Brandarten konnten die hier vorgestellten Messverfahren unter deutlich unterschiedlichen optischen und physikalischen Rauchbedingungen getestet und miteinander verglichen werden (Abbildung 2).



Abbildung 2: Versuchsraum bei einem Heptan-Brand. Links: Übersicht beim Brandversuch mit einer Kamera für die LEDSA-Messungen in der rechten Ecke. Rechts: Positionen der Messgeräte, hier u.a. MIREX, LEDSA-Streifen und ELPI+ (Einsaugung durch die Decke, das Messgerät ist über der Decke).

Das MIREX-System (Measuring InfraRed EXtinction) ist ein etabliertes Messverfahren zur direkten Bestimmung der Lichtabschwächung durch Rauch und wird in den betrachteten Arbeiten konsequent als Referenzgröße herangezogen. Es basiert auf der Messung der Transmission von Infrarotlicht entlang einer definierten optischen Weglänge und erlaubt über das Beer-Lambert-Gesetz die direkte Berechnung des Extinktionskoeffizienten. Aufgrund seiner robusten, standardisierten Funktionsweise und der langjährigen Verwendung in der Brandforschung gilt MIREX als verlässlicher Maßstab für die Validierung neuer, bildbasierter Verfahren. Für die im folgenden genannten Methoden dient es daher als Vergleichsbasis, um sowohl die zeitliche Entwicklung als auch die höhenabhängige Verteilung der Extinktionskoeffizienten experimentell abzusichern.

2.2. LEDSA

Die LED-basierte Methodik (LEDSA – *LED Smoke Analysis*) ist ein bildgestütztes, photometrisches Verfahren zur zeitlich und räumlich aufgelösten Bestimmung von Licht-Extinktionskoeffizienten in Brandversuchen [3, 4]. Sie basiert darauf, dass der durch Rauch verursachte Intensitätsabfall einzelner, bekannter Lichtquellen (LEDs) mit handelsüblichen Digitalkameras erfasst und ausgewertet wird. Die physikalische Grundlage bildet das Beer-Lambert-Gesetz, welches den Zusammenhang zwischen Lichttransmission, Extinktionskoeffizient und Weglänge beschreibt.

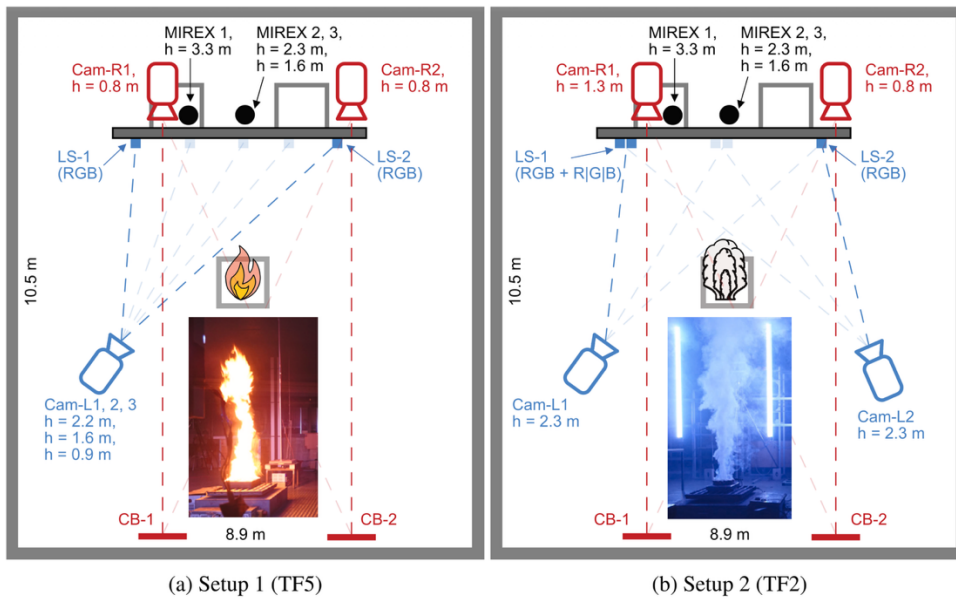


Abbildung 3: Versuchsaufbau in Anlehnung an EN 54, hier TF5 und TF2. Grundriss des Versuchsaufbaus. Drei MIREX-Messgeräte befinden sich hinter den LED-Streifen. Die Position der Kameras variiert zwischen zwei Versuchsaufbauten. Aus [5].

Methodisch werden vertikal angeordnete LED-Streifen im Versuchsraum installiert und kontinuierlich von Kameras beobachtet, siehe Abbildung 3. Aus Referenzbildern vor der Brandentstehung wird für jede LED eine Anfangsintensität bestimmt. Während des Brandes werden die Intensitäten aus den Bild-daten (idealerweise RAW-Formate zur Vermeidung kamerainterner Nichtlinearitäten) extrahiert und relativ zur Referenz normiert. Der Raum wird anschließend in horizontale Schichten mit homogener Rauchdichte diskretisiert, siehe Abbildung 4. Mithilfe eines inversen Modells wird aus den gemessenen Intensitätsabnahmen entlang der jeweiligen Sichtlinien ein Satz von Extinktionskoeffizienten bestimmt, der die Beobachtungen bestmöglich reproduziert. Dieses tomographische Vorgehen erlaubt eine höhen- und zeitabhängige Rekonstruktion der optischen Eigenschaften des Rauchs, hier insbesondere der Lichtextinktion.

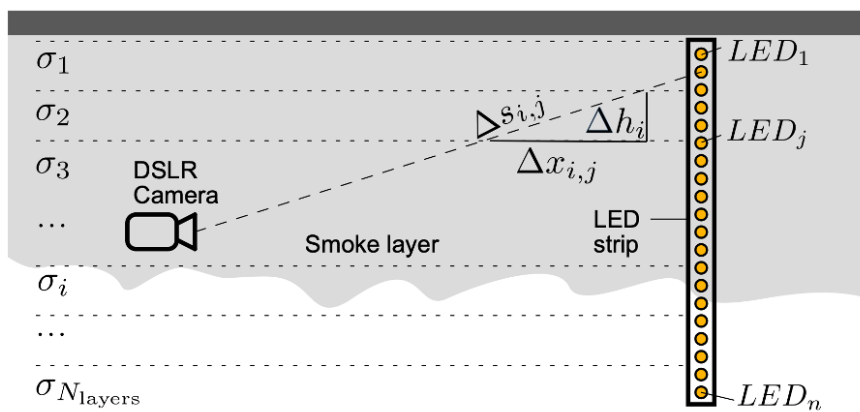


Abbildung 4: Das LEDSA zugrunde liegende Modell. Die in den einzelnen Schichten als kontakt angenommenen Extinktionskoeffizienten werden so variiert, dass die gemessenen LED-Intensitäten repräsentieren können.

Die LEDSA Methode liefert zeitlich und orts aufgelöste Extinktionsprofile, die insbesondere bei gut belüfteten, flammenden Bränden (z. B. EN-54, TF5 n-Heptan Brand) eine gute Übereinstimmung mit etablierten Referenzmesssystemen wie dem MIREX zeigen. Im Vergleich zu rein kontrastbasierten Bildauswertungsverfahren, wie der Radiance-Methode, liefert LEDSA nicht nur qualitative Rauchverteilungen, sondern quantitativ belastbare Extinktionskoeffizienten [5], siehe Abbildung 5. Dem steht allerdings ein höherer rechnerischer Aufwand gegenüber, da die Bestimmung der Extinktionskoeffizienten über ein inverses, tomographisches Modell erfolgt.

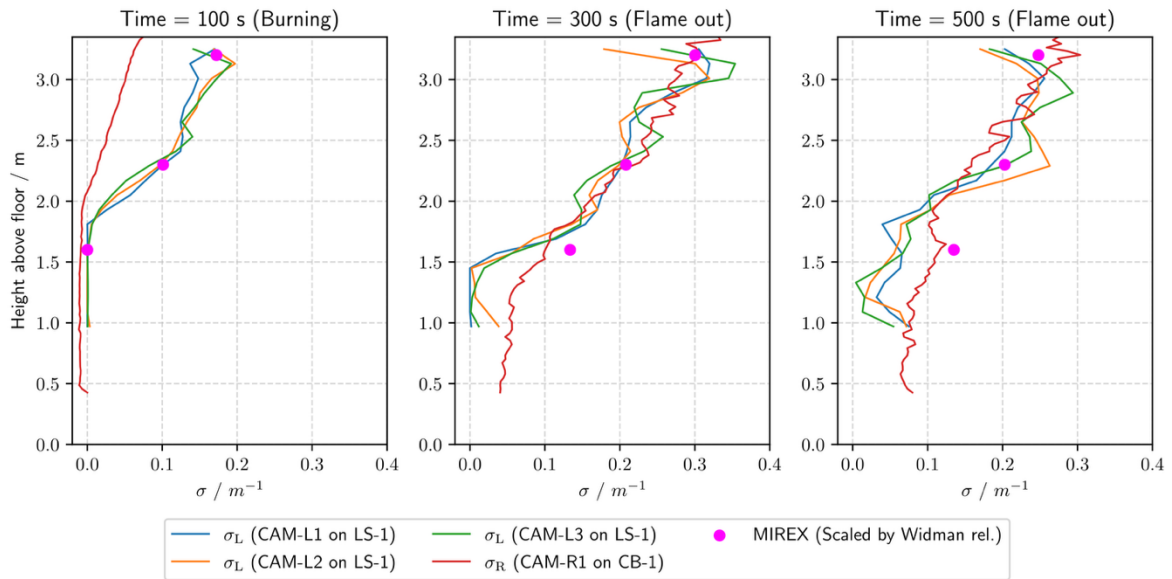


Abbildung 5: Extinktionskoeffizienten der MIREX-, LEDSA- und Radiance-Methode für den TF5-Test in Abhängigkeit von der Höhe zu verschiedenen Zeitpunkten. Die MIREX-Ergebnisse sind auf die Wellenlänge der roten LEDs skaliert. Aus [5].

Insgesamt eignet sich LEDSA besonders als Validierungswerkzeug für numerische Brand- und Sichtweitenmodelle (z. B. CFD-Simulationen) sowie für die detaillierte Untersuchung der zeitlichen Entwicklung und vertikalen Schichtung von Rauch in kontrollierten Brandversuchen.

2.3. ELPI+

Die Arbeit von Gnendiger et al. [6] entwickelt und validiert ein physikalisches Modell zur Bestimmung von massenspezifischen Extinktionskoeffizienten von Aerosolen, insbesondere von Brandrauch. Methodisch werden indirekte Aerosolmessungen mit einem Kaskadenimpaktor (ELPI+) mit direkten optischen Extinktionsmessungen der MIREX kombiniert. Die vom ELPI+ erfassten Aerosolpartikelgrößen werden intern auf Stokes-äquivalente Kugeln abgebildet, wodurch ihre Wechselwirkung mit Licht mithilfe der Mie-Theorie beschrieben werden kann. Aus den partikelgrößenabhängigen Wirkungsgraden wird ein volumenbezogener Extinktionskoeffizient berechnet, der anschließend mit den unabhängig gemessenen MIREX-Daten verglichen wird.

Das Modell benötigt nur drei physikalisch interpretierbare Eingangsparameter: die effektive Partikelstoffdichte sowie den Real- und Imaginärteil des komplexen Brechungsindex. Es wird auf zwei charakteristisch unterschiedliche Aerosole angewendet: ein Paraffin-Aerosol in einem Laborversuch und Ruß aus einem raumskaligen, gut belüfteten Heptan-Brand. In beiden Fällen zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen modellierten und gemessenen Extinktionskoeffizienten über die Zeit, einschließlich verschiedener Brand- und Abklingphasen, siehe Abbildung 6. Damit wird gezeigt, dass die Aerosolmessungen bei geeigneter physikalischer Modellierung zuverlässig zur Vorhersage der Sichtbeeinträchtigung herangezogen werden können.

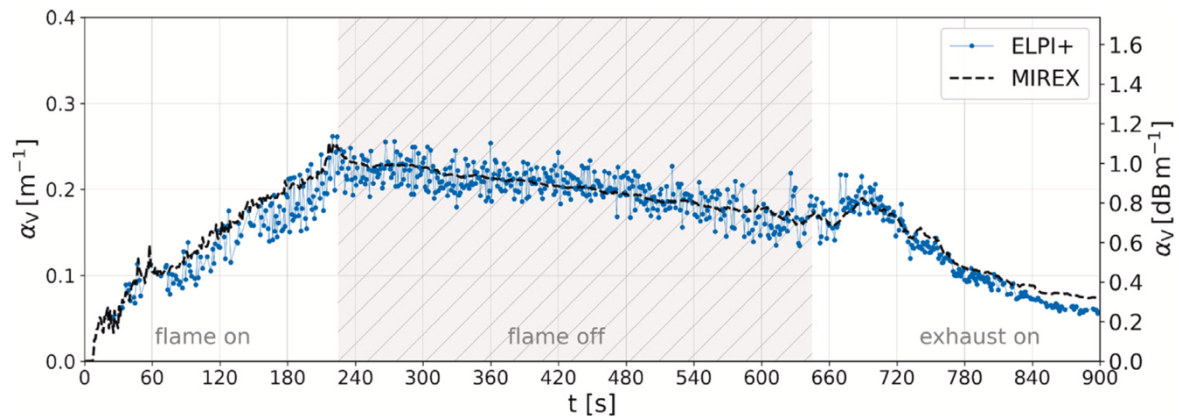


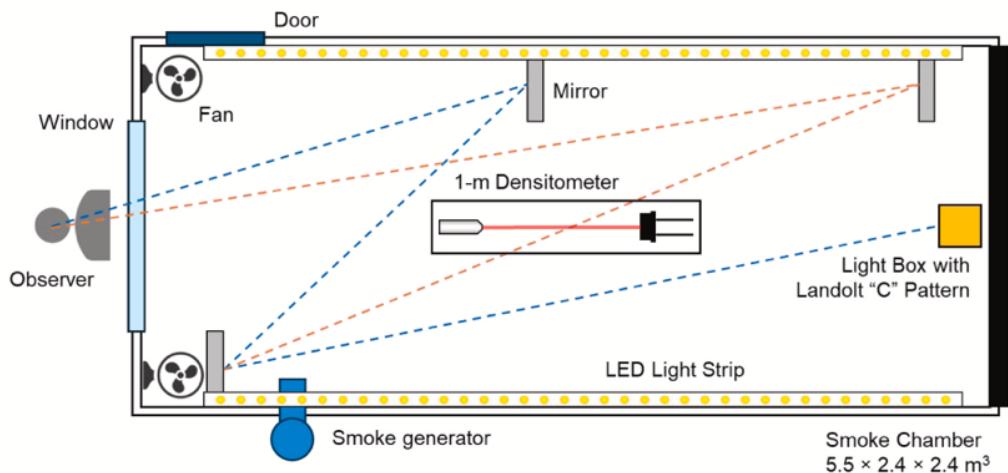
Abbildung 6: Extinktionskoeffizient, ermittelt aus einem n-Heptan-Brandversuch. Die schwarze Kurve zeigt das Ergebnis des MIREX-Systems, die blaue Kurve das Ergebnis anhand der ELPI+ Messungen. Die unterschiedlich schattierten Bereiche kennzeichnen verschiedene Phasen des Experiments. Aus [6].

Zentrale Ergebnisse betreffen die massenspezifische Extinktion: Diese erweist sich als nicht universell, sondern stark aerosolabhängig. Für Paraffin werden mittlere Werte von etwa $4,4 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ ermittelt, während für Ruß aus flammenden n-Heptan-Bränden deutlich geringere Werte von rund $2,4 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$ resultieren. Diese Werte weichen teils um mehr als einen Faktor drei von häufig verwendeten Literatur- und Standardwerten in Brandsimulationsmodellen ab. Daraus folgt, dass pauschale Annahmen zur massenspezifischen Extinktion zu erheblichen Fehlern bei den Abschätzungen der Sichtweite führen können, und schlagen eine vereinfachte Methodik vor, mit der auf Basis von ELPI+-Messungen realistischere Extinktionswerte für zukünftige Anwendungen bestimmt werden können.

2.4. Wiederholung und Erweiterung der Experimente von Jin

In einer aktuellen Studie [7], wurde das Ziel verfolgt, die klassischen Sichtweitenexperimente von Jin aus den 1970er-Jahren systematisch zu wiederholen, neu zu bewerten und an realistischere Bedingungen moderner Brandereignisse anzupassen. Methodisch basiert die Arbeit auf einer Wiederholung von Jins Versuchsaufbau, jedoch mit mehreren entscheidenden Neuerungen, siehe Abbildung 7. Während Jin in einer kleinen Rauchkammer arbeitete und überwiegend hohe Umgebungsbeleuchtungsstärken ($\approx 180 \text{ lx}$) sowie sehr starke Lichtquellen für die Beschilderung verwendete, wurde hier eine großmaßstäbliche Rauchkammer ($5,5 \text{ m} \times 2,4 \text{ m} \times 2,4 \text{ m}$) mit moderner Messtechnik eingesetzt. Es wurden gezielt niedrige Umgebungslichtniveaus ($1\text{--}22 \text{ lx}$), wie sie für reale Notfallsituationen bei Stromausfall typisch sind, und realistischere Leuchtdichten von Fluchtzeichen verwendet. Die Rauchdichte wurde mit einem kalibrierten Rauchdichtemesser (Laser, 638 nm , Messstrecke 1 m) erfasst, während Umgebungsbeleuchtung und Schildleuchtdichte separat und nachvollziehbar gemessen bzw. vorab kalibriert wurden – ein wesentlicher Fortschritt gegenüber Jin, dessen Messmethoden nur unzureichend dokumentiert waren. Zudem erlaubt ein Spiegelsystem reproduzierbare Distanzen von $5,5 \text{ m}$, $10,5 \text{ m}$ und $15,5 \text{ m}$, bei konstantem Sehwinkel. Als Zielobjekt wurde ein Landolt-C-Symbol eingesetzt, das sowohl reine Erkennbarkeit als auch Detailwahrnehmung abbildet.

(a) New Smoke Visibility Chamber



(b) Front View of Chamber



(c) Back View of Chamber

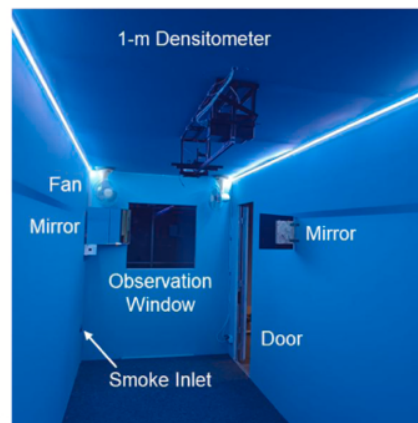


Abbildung 7: (a) Neuer experimenteller Versuchsaufbau zur Untersuchung der Sichtbarkeit von Beschilderun. (b) Vorderansicht der Kammer und (c) Rückansicht der Kammer. Aus [7].

Die Ergebnisse bestätigen zunächst Jins grundlegende Beobachtung einer annähernd linearen Beziehung zwischen Sichtweite V und dem Kehrwert des Extinktionskoeffizienten σ . Quantitativ zeigen sich jedoch relevante Abweichungen: Unter vergleichbaren Bedingungen liegen die gemessenen Extinktionskoeffizienten für die Sichtbarkeit um etwa 7–11 % niedriger als bei Jin, was auf Unterschiede in Beleuchtung und Messtechnik zurückgeführt wird. Bei hoher Umgebungsbeleuchtung (180 lx) ergibt sich für beleuchtete Schilder ein dimensionsloser Faktor $K = \sigma V$ im Bereich von etwa 4,7–9,5, also ähnlich, aber nicht identisch zu Jins klassischem Bereich von 5–8. Die zentrale Erkenntnis betrifft jedoch den Einfluss niedriger Umgebungsbeleuchtung: Bei 1–22 lx bleiben Fluchtzeichen auch bei deutlich höheren Rauchdichten sichtbar, und der K -Wert steigt auf 6–11. Gleichzeitig nimmt der kritische Extinktionskoeffizient mit zunehmender Sichtdistanz stark ab – um nahezu 40 % pro zusätzlichen 5 m. Damit zeigt die Studie, dass die in der Praxis häufig verwendeten Jin-Parameter die Sichtbarkeit von Fluchtzeichen unter realistischen, dunklen Brandbedingungen systematisch unterschätzen und eine Anpassung der Bemessungswerte für leistungsorientierte Brandschutzkonzepte erforderlich ist.

3. Computermodelle

Bei der Modellierung der Sichtweite stellt einen wegpunktbasierten Ansatz zur Berechnung der Sichtweite im Brandfall eine neue Methodik dar [8]. Ausgangspunkt sind CFD-Simulationen, aus denen zeit- und ortsaufgelöste Rauch- bzw. Extinktionskoeffizienten gewonnen werden. Im Gegensatz zur klassischen lokalen Betrachtung wird die Sichtbarkeit, siehe Abbildung 8, nicht als Zellgröße interpretiert, sondern entlang der tatsächlichen Sichtlinie zwischen einer Person und einem Fluchtwegschild.

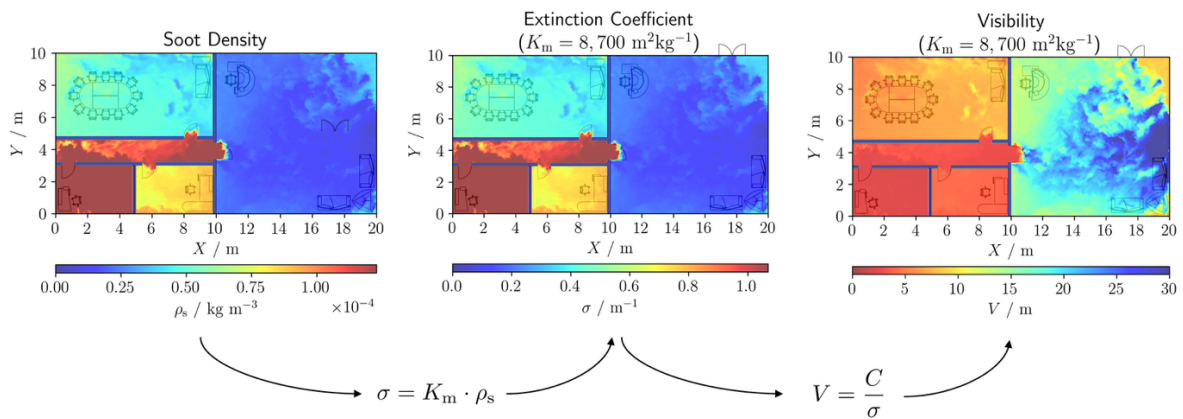


Abbildung 8: Klassischer Ansatz, um die lokalen Sichtweiten in CFD-Modellen zu berechnen.

Dazu werden die Schilder als sogenannte Wegpunkte definiert. Für jeden Punkt im begehbaren Bereich wird die verfügbare Sichtweite berechnet, indem der Extinktionskoeffizient entlang der Sichtlinie zum jeweiligen Wegpunkt integriert und mithilfe der empirischen Beziehung nach Jin in eine Sichtweite überführt wird, siehe Abbildung 9. Zusätzlich berücksichtigt der Ansatz geometrische Effekte wie Sichtwinkel, Orientierung der Schilder und visuelle Abschattungen durch Bauteile. Das Ergebnis sind zeitabhängige binäre Sichtbarkeitskarten, die angeben, ob von einem Ort aus mindestens ein Exit-Schild sichtbar ist. Diese Karten können weiter zu zeitlich aggregierten Sichtbarkeits- oder ASET-Karten verarbeitet werden.

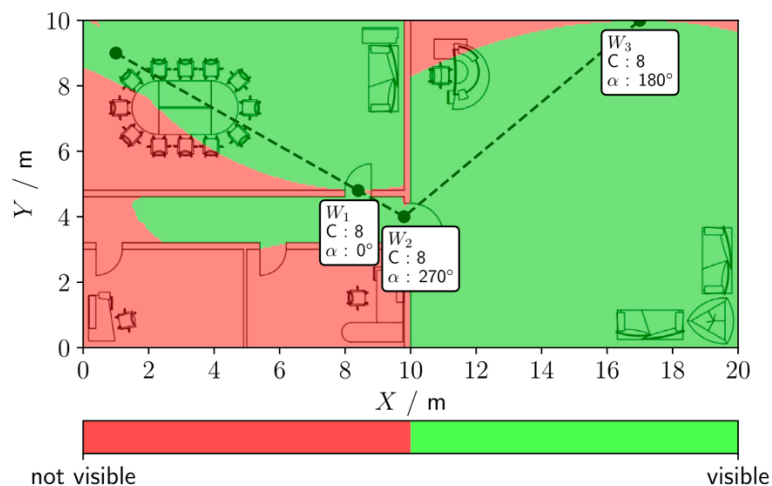


Abbildung 9: Sichtkarte für die drei Wegpunkte (Schilder) W_1 bis W_3 . Die grünen Flächen deuten die Erkennbarkeit eines der Schilder unter Berücksichtigung einer simulierten Verrauchung. Aus [8].

Der wesentliche Vorteil des Ansatzes liegt darin, dass Sichtbarkeit nicht mehr als rein lokale Rauchkenngröße interpretiert wird. Klassische Methoden bewerten lediglich die Rauchdichte in einer Zelle und vergleichen sie mit einem pauschalen Grenzwert, was zu subjektiven und teils irreführenden Interpretationen führen kann. Der wegpunkt-basierte Ansatz bildet hingegen die reale Wahrnehmungssituation besser ab, da er den tatsächlichen Lichtweg, Entfernungen zu Fluchtwegschildern und bauliche Gegebenheiten berücksichtigt. Dadurch entstehen die erforderlichen Sichtweiten automatisch aus der Geometrie, ohne dass globale Mindestwerte vorgegeben werden müssen.

Die Arbeiten zeigen, dass lokal berechnete Sichtweiten und wegpunkt-basierte Sichtweitenkarten zu deutlich unterschiedlichen Bewertungen der Nutzbarkeit von Fluchtwegen führen können. Sichtweitenkarten erlauben eine realistischere und intuitivere Beurteilung der verfügbaren Evakuierungszeit, insbesondere in komplexen oder offenen Gebäudestrukturen. Sie helfen dabei, potenzielle „blinde Bereiche“ zu identifizieren, die in klassischen Auswertungen verborgen bleiben. Insgesamt liefert der Ansatz ein

praxisnahes Werkzeug zur Unterstützung von Ingenieurmethoden, ohne zusätzliche Anforderungen an die eigentliche Brandsimulation zu stellen.

4. Ausblick

Zukünftige Arbeiten sollten die vorgestellten Methoden konsequent auf weitere Raumgeometrien und deutlich größere Raumvolumina ausdehnen, um ihre Übertragbarkeit auf komplexe Gebäudestrukturen wie Hallen, Atrien oder Verkehrsbauwerke zu untersuchen. Dabei ist insbesondere die Skalierbarkeit der betrachteten Brandereignisse von zentraler Bedeutung, da Rauchentwicklung, Schichtung und optische Eigenschaften mit zunehmender Raumgröße und Brandleistung nicht linear variieren. Eine systematische Analyse sowohl unterschiedlicher Brandarten und -größen, als auch Lüftungsszenarien ist notwendig, um die gewonnenen experimentellen Erkenntnisse von Labor- und Raumversuchen robust auf reale Anwendungen zu übertragen.

Auf der Modellierungsseite bieten ray-tracing-basierte Verfahren ein großes Potenzial für die realistischere Vorhersage der Abbildung von Fluchtwegschildern unter Rauchbedingungen, da sie komplexe Lichtwege, Streuung und Abschattung explizit berücksichtigen können. Darauf aufbauend besteht weiterer Forschungsbedarf in der Entwicklung von Wahrnehmungsmodellen, die die modellierten Schildabbildungen mit der menschlichen visuellen Wahrnehmung verknüpfen. Solche Modelle könnten Kontrast, Leuchtdichte, Blickwinkel und Adaptationseffekte integrieren und damit eine direkte, physikalisch und physiologisch begründete Bewertung der Sichtbarkeit ermöglichen, die über rein empirische Grenzwerte hinausgeht.

Danksagung

Die hier vorgestellten Arbeiten waren nur aufgrund langjähriger Teamarbeit möglich und flossen in viele Publikationen und Projektanträge. Insbesondere sind hier folgende Personen explizit zu nennen, ohne die, die hier vorgestellten wissenschaftlichen Methoden und Erkenntnisse nicht möglich gewesen wären. In alphabetischer Reihenfolge: Alexander Belt, Kristian Börger, Christoph Gwendiger, Alica Kandler, Manuel Osburg, Thorsten Schultze und Wojciech Węgrzyński.

Fördernachweis

Viele der hier vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des Projekts NextVIS, welches durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) mit den Projektkennzeichen 465392452 gefördert wird, durchgeführt.

Literatur

- [1] Wojciech Węgrzyński, Nadiia Spodyniuk, Mateusz Zimny, Wolfram Jahn, Gabriele Vigne, Lukas Arnold; Survey on the use of tenability criteria in CFD analyses for Performance-Based Fire Safety Engineering; Journal of Physics: Conference Series, Band 3121 (2025), [DOI: 10.1088/1742-6596/3121/1/012045](https://doi.org/10.1088/1742-6596/3121/1/012045)
- [2] T. Jin; Visibility through fire smoke, Bull. Japan Assoc. Fire Sci. Eng. 19 (1970), [DOI: https://doi.org/10.11196/KASAI.19.2.1](https://doi.org/10.11196/KASAI.19.2.1)
- [3] Lukas Arnold, Alexander Belt, Thorsten Schultze, Lea Sichma; Spatiotemporal measurement of light extinction coefficients in compartment fires; Fire and Materials, Band 45 (2021), [DOI: 10.1002/fam.2841](https://doi.org/10.1002/fam.2841)
- [4] Kristian Börger, Alexander Belt, Thorsten Schultze, Lukas Arnold; Remote sensing of the light-obscuring smoke properties in real-scale fires using a photometric measurement method; Fire Technology, Band 40 (2024), [DOI: 10.1007/s10694-023-01470-z](https://doi.org/10.1007/s10694-023-01470-z)
- [5] Kristian Börger, Jennifer Ellingham, Alexander Belt, Thorsten Schultze, Stefan Bieder, Elizabeth Weckman, Lukas Arnold; Assessing performance of LEDSA and Radiance method for measuring extinction coefficients in real-scale fire environments; Fire Safety Journal, Band 141 (2023), [DOI: 10.1016/j.firesaf.2023.103929](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103929)

- [6] Christoph Gnendiger, Thorsten Schultze, Kristian Börger, Alexander Belt, Lukas Arnold; Extinction coefficients from aerosol measurements; Fire Safety Journal, Band 146, [DOI: 10.1016/j.firesaf.2024.104110](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104110)
- [7] Wai Kit Cheung, Jakub Bielawski, Lukas Arnold, Xinyan Huang, Wojciech Węgrzyński; Reappraisal of Jin's Visibility Through Fire Smoke Experiment: Insights into Signage Visibility and the Impact of Ambient Light; Fire Safety Journal, Band 159 (2026), [DOI: 10.1016/j.firesaf.2025.104573](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2025.104573)
- [8] Kristian Börger, Alexander Belt, Lukas Arnold; A waypoint based approach to visibility in performance based fire safety design; Fire Safety Journal, Band 150 (2024), [DOI: 10.1016/j.firesaf.2024.104269](https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2024.104269)