

BEST PERFORMANCE RATIO IM BRANDSCHUTZ

Claudius Hammann^{1,3}, Daniel Herzog^{1,2}

¹ Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauphysik, E-Mail: claudius.hammann@tum.de

² BC Ingenieure, Freising, E-Mail: daniel.herzog@bci-ing.de²

³ Technische Universität München, HR 6 – Werkfeuerwehr Garching

Kurzfassung

Das Paper beschreibt die Möglichkeit der Risikoquantifizierung und Optimierung im vorbeugenden Brandschutz durch eine Fault-Tree-Analyse (FTA). Diese Methode ermöglicht die Kosten-Nutzen Analyse in Bezug auf den Zuwachs an Sicherheit eines Systems bzw. Gebäudes. Anhang zweier Szenarien konnte die Risikominderung im Verhältnis zum Mitteleinsatz durch Varianten (redundante Sprinklerpumpe/ Brandwand) quantifiziert werden. Dabei wurde gezeigt, dass die Errichtung einer Brandwand um ca. den Faktor 10 effektiver ist gegenüber der Variante mit der redundanten Sprinklerpumpe. Weiterführend konnte aufgezeigt werden, dass die FTA eine Möglichkeit bietet, einen Kosten-Nutzenfaktor zu benennen.

Motivation

Die Baukostensteigerung ist ein viel diskutiertes und auch politisch beachtetes wesentliches Themenfeld (Bundesbauministerium, 2019), gleichwohl zeigen Daten der Versicherer, dass die Kosten für den Brandschutz im Wohnungsbau lediglich 2 bis 3 % der Baukosten ausmachen, Fehlplanung und Baumängel jedoch bei ca. 10 % liegen (Normenkontrollrat, 2021). Insbesondere die frühzeitige Planung ist dabei ein Garant zum Kostensparen (Bundesbauministerium, 2015). Im Zuge der effizienten Baukostensenkung ist

die Frage "Wo liegt das beste Verhältnis zwischen eingesetzten finanziellen Mitteln und dem Zuwachs an Sicherheit im Brandschutz?" von zentraler Bedeutung. Der vorliegende Artikel beschreibt den methodischen Ansatz mittels Fehlerbaumanalyse (eng. Fault-Tree-Analysis = FTA), um diese Frage zu beantworten. Die Methode kann Planern sowie Versicherungsunternehmen die Möglichkeit bieten unterschiedliche Maßnahmen zu vergleichen und diese im Verhältnis von Mitteleinsatz (Kosten) und dem Zuwachs an Sicherheit für das Gebäude zu bewerten.

Stand der Wissenschaft und Technik

Die FTA wurde mit dem Ziel entwickelt, Fragen der Art "wie kann es dazu kommen, dass [...]?" in einer strukturierten Art und Weise zu beantworten und

bewerten zu können (Eder, 2015). Der Platzhalter [...] steht hierbei für ein unerwünschtes Ereignis, welches in der FTA als TOP-Event beschrieben wird. Im Fall des hier beschriebenen Anwendungsfalles beschreibt das TOP-Event die Versagenswahrscheinlichkeit des Beispielgebäudes in Bezug auf ein Brandereignis. Die folgende Aufzählung beschreibt isoliert zwei Varianten zur Risikominderung, welche für den Anwendungsfall herangezogen werden. Reale Gebäude weisen einen weitaus komplexeren Fehlerbaum mit diversen weiteren Elementen auf. (Ruijters, 2015).

Im weiteren werden die einzelnen Elemente der FTA vorgestellt:

TOP-Event: Diese Element beschreibt den höchsten Punkt innerhalb eines FTA und das Ziel der Analyse. Unterhalb des Top-Events wird das TOP-Event durch GATE's mit anderen Primärevents verbunden.

ODER-Gate: Das Gate verbindet mehrere darunter liegende Elemente. Das übergeordnete Element tritt ein, wenn mindestens eines der untergeordneten Ereignisse eingetreten ist.

UND-Gate: Das übergeordnete Ereignis tritt ein, wenn alle untergeordneten Ereignisse eingetreten sind.

Primärevent: Ein Primärevent beschreibt die Ausfallwahrscheinlichkeit p innerhalb einer FTA als tiefstes Element innerhalb der Fehlerbaumanalyse. Dabei wird das Event E des jeweiligen Primärevents definiert mit:

$$p(E) \in [0; 1] \quad (1)$$

Die mathematische Gesetzmäßigkeit eines FTA beruht im Wesentlichen auf der Booleschen Algebra, welche ein Teilgebiet der linearen Algebra von Hassler Whitney darstellt (Whitney, 1935). Hierbei wird auf Basis der Interpretation von komplexen Systemen eine Logikform eingeführt, welche durch Operatoren unterschiedliche Variablen verknüpfen. Diese sind:

- Operator für UND-Gate mit \wedge
- Operator für ODER-Gate mit \vee

Somit gibt es feste Kombinationen aus den Operatoren und den Variablen mit jeweils einer dichotomen Ausprägung. Mögliche Kombination sind aus Abbildung 1 zu entnehmen. (Genocchi, 1899):

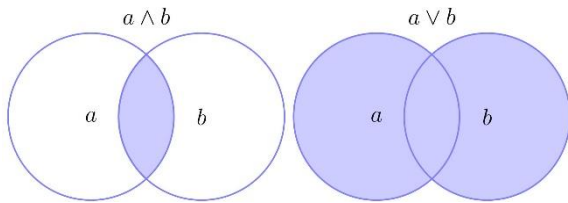


Abbildung 1: Venn-Diagramm mit den möglichen Operatoren der Booleschen Algebra innerhalb eines FTA

Hieraus ergeben sich nach den allgemein gültigen Regeln für die ODER und UND-Gates folgendes Berechnungsarten für die Eintrittswahrscheinlichkeit des jeweiligen übergeordneten Elements in Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit eines ODER-Gates p_{oder} und eines p_{und} für ein ODER-Gate mit unabhängigen Ereignissen nach (Bronstein, 2015):

$$p_{und} = p(E_1 \cap E_2) = p(E_1) * p(E_2) \quad (2)$$

$$p_{oder} = p(E_1) \cup p(E_2) = p(E_1) + p(E_2) - p(E_1) * p(E_2) \quad (3)$$

Mittels dieser Operatoren werden die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Primärevents logisch verknüpft um die Wahrscheinlichkeit des Top Events zu berechnen.

Risiko im Brandschutz

Grundlegend wird Risiko als das Produkt der Eintrittshäufigkeit und des Schadensausmaßes (Gefahr) definiert. (Wälder & Wälder, 2017) Könnte einer dieser beiden Multiplikatoren zu 0 gesetzt werden, wäre kein Risiko vorhanden. Da dies im Bauwesen, konkret im Brandschutz nicht möglich ist, weil mit einer Gefahr jederzeit zu rechnen ist, vgl Urteil OVG Münster (OVG Münster - 10 A 363/86," 1987) muss die Verhältnismäßigkeit zwischen

eingesetzten Mitteln zur Risikominimierung und dem Niveau der Risikoakzeptanz bewertet werden. (Bundesarbeitsgericht Urteil: 9 AZR 1117/06). Diese Verhältnismäßigkeit entwickelt sich auf Grundlage der subjektiv-qualitativen Risikowahrnehmung einer Gesellschaft. Brandereignisse unterliegen dabei einer starken subjektiven Wahrnehmung, da das Erleben der Gefahr unmittelbar, direkt und meist mit großer medialen Berichterstattung einhergeht. (Whyte & Burton, 1982). Diese Vielzahl subjektiver Wahrnehmungsgrößen führt dazu, dass die gesellschaftliche Risikoakzeptanz sehr gering, bzw. ein erheblicher Mitteleinsatz zur Risikominimierung von der Gesellschaft toleriert wird. (Smith, 2013) Dieses akzeptierte Risiko wird als Grenzkrisiko bezeichnet (Herzog, 2024) oder international als ALARP-Prinzip (As Low as reasonably practicable) beschrieben. (Hurst et al., 2019). Die Definition des ausreichenden Mitteleinsatz erfolgt dabei im Brandschutz in Deutschland durch die Bau- und Sonderbauvorschriften sowie die technischen Baubestimmungen der Länder. (MBO, 2023). Dieses Restrisiko wird z.B. in der Musterbauordnung (MBO) in §14 durch die Formulierung „Rettung muss **möglich** sein“ beschrieben. Die „Möglichkeit“ beinhaltet dabei das Restrisiko. Deutlich wird dies beim Vergleich zur Formulierung der Standsicherheit; „Gebäude müssen Standsicher sein“. Ein potentielles Versagen des Tragwerks ist damit nicht akzeptiert, während im Brandschutz ein Versagen (Toter im Brandfall) akzeptiert ist (Maiworm et. al., 2023).

Baurechtlicher Rahmen der Anwendung

Das Grundscenario (ohne erweiterte Maßnahmen) beschreibt das bauordnungsrechtliche Sicherheitsniveau in Deutschland. Zusätzlich zu den Basisanforderungen der Bauordnung können bei geregelten Sonderbauten Erleichterungen sowie höhere Anforderungen durch Sonderbauvorschriften erlassen werden (MIndBauRI, 2019). Abgestimmt auf die Abmessungen und Größe der Nutzungseinheiten

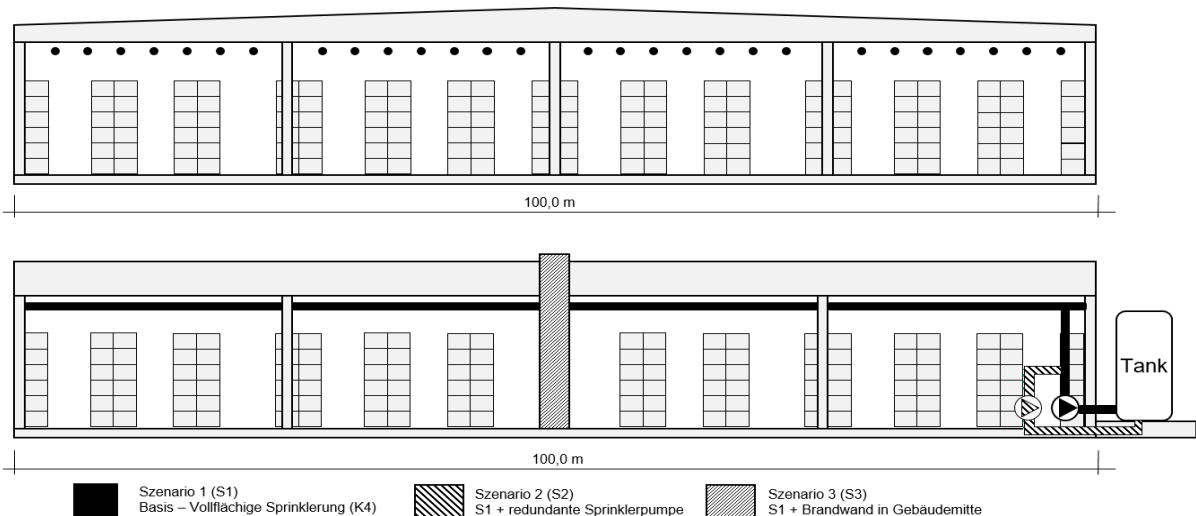


Abbildung 2: Visualisierung der Szenarien (SZ); Szenario 1 Gebäude 100 m x 100 m, mit Sprinklersystem, Szenario 2 wie SZ 1 mit zusätzlicher Sprinklerpumpe, SZ 3 wie SZ 1 mit zusätzlicher Brandwand in Gebäudemitte.

verschärfen sich die brandschutztechnischen Anforderung mit zunehmender Gebäudeklasse oder wie in diesem Beispiel einer Indsturiehalle die Anforderungen an das Tragwerk oder die maximale Brandabschnittfläche zwischen den Brandwänden nach Musterindustriebaurichlinie (MIndBauRI). Neben der Nachweisführung anhand der Bauordnung können für komplexe unregelmäßige Gebäude schutzzielorientierte Ingenieurmethoden des Brandschutzes (DIN 18009) angewendet werden, um damit das Sicherheitsniveau zu erreichen. Mit beiden Methoden (deskriptiven Anforderung / Ingenieurmethoden) ist das Bauordnungsrecht formal erfüllt und das Gebäude brandschutztechnisch baurechtskonform geplant. Darüberhinaus können Versicherungen erhöhte Anforderungen an den Gebäude-, Anlagen- und Sachwertschutz stellen, der ebenfalls durch die Planung im vorbeugenden Brandschutz umgesetzt werden kann.

Anwendungsbeispiel: Definition der Gebäude und Anlagenparameter

Die Modellierung der Risikominimierung erfolgt anhand eines erdgeschossigen Industriebaus, bewertet nach MBO sowie der MIndBauRI, Abschnitt 6. Die Abmessungen des Gebäudes sind 100 m Länge auf 100 m Breite, bei einer Höhe von 7 m. Siehe Abbildung 2. Das Tragwerk ist aus nichtbrennbaren Baustoffen ohne Feuerwiderstand ausgeführt. Zudem wird das Gebäude durch eine flächendeckende Sprinkleranlage geschützt. Dies führt zur Einstufung in Sicherheitskategorie K4 und einer maximal zulässigen Brandabschnittsgröße von 10.000 m². (MIndBauRI, 2019). Das Gebäude dient als vollautomatisiertes Industrielager, das bedeutet, es befinden sich keine Personen dauerhaft im Gebäude. Folgende drei Szenarien werden analysiert:

- Szenario 1: ohne erweiterte Maßnahmen in den Brandschutz. Diese Parameter stellen das Basisszenario der folgenden Risikokalkulation dar (s_{ohne}). Der entsprechende Fehlerbaum ist in Abbildung 3 dargestellt.

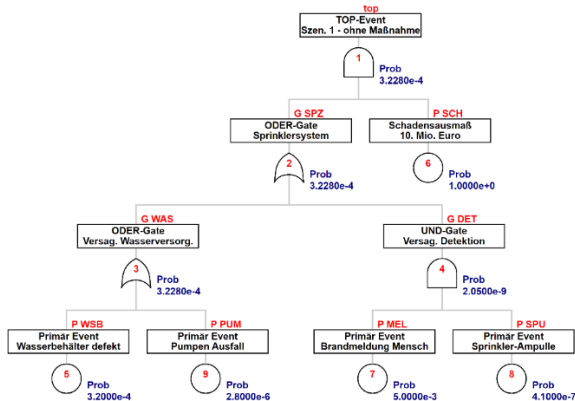


Abbildung 3: FTA des Grundscenario 1, ohne zusätzlicher redundante Sprinklerpumpe und ohne Brandwand in Gebäudemitte

- Szenario 2: die Sprinkleranlage verfügt über eine zweite redundante Sprinklerpumpe, die bei Ausfall der ersten Pumpe das System mit Löschwasser versorgt. Die Kosten für den Einbau dieser redundanten Pumpe sind zu 10.000 € angenommen (s_{SPZ}). Da in diesem Szenario keine Brandwand vorhanden ist, ist die Wahrscheinlichkeit, dass es im Brandfall zu einem Gesamtverlust der gesamten Halle kommt bei $p = 1$. (siehe Abbildung 4 FTA SPZ bei $p = 1$.)

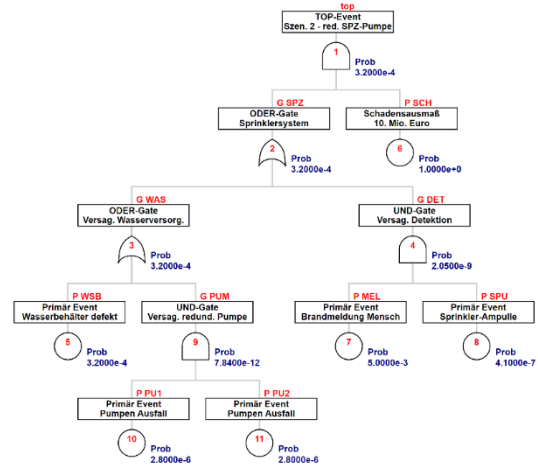


Abbildung 4: FTA Szenario 2: Grundscenario 1 mit zusätzlicher redundanter Sprinklerpumpe, ohne Brandwand

- Szenario 3: die Halle wird in der Hälfte der Längsausdehnung durch eine qualifizierte Brandwand getrennt. Die Brandwand wird als Stahlbetonwand in Betonklasse C25/30 ausgeführt. Für die Quantifizierung, wird ein Preis von 350 €/m² angenommen. Daraus resultiert, bei 100 m Länge und 7 m Höhe, ein Gesamterrichtungspreis der Brandwand von 245.000€. Diese unterbindet einen Brandüberschlag in die nicht vom Brand betroffene Gebäudehälfte (s_{BW}). Der Fehlerbaum ist Abbildung 5 zu entnehmen.

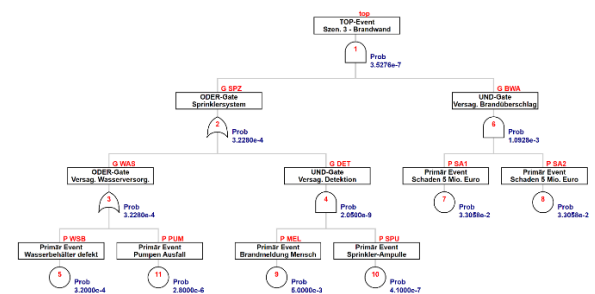


Abbildung 5: FTA Szenario 3: Grundscenario 1 mit zusätzlicher Brandwand in Gebäudemitte, ohne redundante Sprinklerpumpe.

Türen, Öffnungen und Schotts, sowie der Flächenbedarf zur Errichtung der Brandwand oder der Sprinklerpumpe werden bei der Analyse vernachlässigt.

Methode: Drei Varianten der FTA

Die Fehlerbäume wurde in der open-source Data-Science Programmiersprache R analysiert. Hierbei wurde das Package "FaultTree" in der Version 1.0.1 verwendet, um Fehlerbäume zu erstellen und zu berechnen (R Studio, 2024). Um das Veränderungspotential der jeweiligen geplante Maßnahme zu quantifizieren, muss zuerst die Versagenswahrscheinlichkeit p des Gesamtsystems ohne der Verbesserungsmaßnahme (p_{ohne}) errechnet werden. Dabei werden in der FTA die Versagenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Systemelemente berücksichtigt. Die Versagenswahrscheinlichkeiten ergeben sich für die gewählten Szenarien zu:

- Branddetektionswahrscheinlichkeit für die Halle bei einer Anwesenheit von 1/3 der Zeit mit $p_{MEL} = 5^{-3}$ (Berry, 1979)
- Wahrscheinlichkeit eines defekten Wasserbehälters mit $p_{WSB} = 9,9^{-8}$ (GRS, 2001)
- Wahrscheinlichkeit einer nicht funktionsfähigen Sprinklerampulle mit $p_{SPU} = 4,1^{-7}$ (Burkhard, 2016)
- Pumpenausfall der Sprinklerpumpe mit $p_{PUM} = 2,8^{-6}$ (GRS, 2001)
- Wahrscheinlichkeit eines Brandüberschlag über die Brandwand hinweg mit $p_{BWU} = 3,3^{-2}$ (AGBF, 2023).

Eine ausführliche Auflistung weiterer Versagenswahrscheinlichkeiten sind in Hammann (2021) zu finden. Im betrachteten Szenario 1 sind dies z.B. (defekt Sprinklerampulle/ Wasserbehälter oder Sprinklerpumpe sowie Versagen Brandmeldung, siehe Fehlerbaum in Abbildung 3. Im Anschluss wird die FTA angepasst, sodass die alternativen Lösungsansätze simuliert werden. In diesem Beispiel wird die Versagenswahrscheinlichkeit des Szenarios 2 mit der redundanten Sprinklerpumpe p_{SPZ} und des Szenarios 3 mit der Brandwand p_{BW} beschrieben.

Somit ergeben sich die drei unterschiedliche Versagenswahrscheinlichkeiten p_{ohne} , p_{SPZ} und p_{BW} .

Da sich das Risiko R aus dem Produkt der Eintrittswahrscheinlichkeit p des Events E und dem zu erwartenden Schadensausmaß S des Events E definiert, gilt:

$$R=p(E)*S(E) \quad (4)$$

$$R_{ohne}=p_{ohne}*S_{ohne} \quad (5)$$

$$R_{SPZ} = p_{SPZ} * S_{SPZ} \quad (6)$$

$$R_{BW} = p_{BW} * S_{BW} \quad (7)$$

Um das beste Verhältnis zwischen dem Zuwachs an Sicherheit und dem entsprechenden Mitteleinsatz zu bemessen, muss die Differenz Δ des Risikowertes R zwischen dem Risiko ohne der Maßnahme R_{ohne} und dem Risiko mit der ergriffenen Maßnahme für die Brandwand R_{BW} und die Maßnahme redundante Sprinklerpumpe R_{SPZ} ermittelt werden mit:

$$R\Delta_{BW} = R_{ohne} - R_{BW} \quad (8)$$

$$R\Delta_{SPZ} = p_{ohne} - R_{SPZ} \quad (9)$$

Nun müssen die Δ -Risiko-Werte, also $R\Delta_{BW}$ und $R\Delta_{SPZ}$ in das Verhältnis zu den entsprechenden Kosten der Maßnahmen gesetzt werden. Dies wird durch die Verhältniszahl (vz) beschrieben.

Nun kann die Frage: "Wie viel Δ erhält man für wie viel €?" beantwortet werden. Im Beschriebenen Beispiel gilt dann:

$$vz_{BW} = \frac{R\Delta_{BW}}{\epsilon_{BW}} \quad (10)$$

$$vz_{SPZ} = \frac{R\Delta_{SPZ}}{\epsilon_{SPZ}} \quad (11)$$

Durch die Bemessung der vz wird dann die Frage nach dem Best-Performance-Ratio Entscheidung beantwortet.

Ergebnisse

Durch die drei verschiedenen Varianten der FTA (siehe Abbildung 3, Abbildung 4 und Abbildung 5) ergeben sich nun die drei Versagenswahrscheinlichkeiten der FTA mit:

$$p_{FTA} = \begin{cases} p_{ohne} & = 3,2280^{-4} \\ p_{SPZ} & = 3,2000^{-4} \\ p_{BW} & = 3,5276^{-7} \end{cases} \quad (12)$$

Nun folgt die Berechnung des Risikowertes der drei Varianten mit:

$$R_{ohne} = p_{ohne} * S_{ohne} = 3,2280^{-4} * 10^6 \text{€} = 3228 \quad (13)$$

$$R_{SPZ} = p_{SPZ} * S_{SPZ} = 3,2000^{-4} * 10^6 \text{€} = 3200 \quad (14)$$

$$R_{BW} = p_{BW} * S_{BW} = 3,5276^{-7} * 10^6 \text{€} = 3,53276 \quad (15)$$

Hieraus ergeben sich dann die Risikoreduzierungsweite (Δ -Werte) mit:

$$R\Delta_{BW} = R_{ohne} - R_{BW} = 3228 - 3,53276 = 3224,46724 \quad (16)$$

$$R\Delta_{SPZ} = p_{ohne} - R_{SPZ} = 3228 - 3200 = 28 \quad (17)$$

Die Verhältniszahl vz ergibt sich damit aus:

$$vz_{BW} = \frac{R\Delta_{BW}}{\epsilon_{BW}} = \frac{3224,46724}{245 \text{ €}} = 13,161 \quad (18)$$

$$vz_{SPZ} = \frac{R\Delta_{SPZ}}{\epsilon_{SPZ}} = \frac{28}{10 \text{ €}} = 2,8 \quad (19)$$

Für eine bessere Vergleichbarkeit der eingesetzten Mittel für die SPZ-Variate mit 10.000 € und jene mit der der Brandwand mit 245.000 € wurden beiden Werte des Mitteleinsatzes mit 1.000 difiviert.

Nun folgt die Bemessung der Verhältniszahlen vz_{BW} und vz_{SPZ} mit:

$$vz_{BW} = 13,161 > 2,8 = vz_{SPZ} \quad (20)$$

Hieraus ergibt sich eine positive Entscheidung für die Verhältniszah der Variante „Brandwand“.

Diskussion

Es konnte gezeigt werden, dass im angeführten Beispiel der Einbau einer Brandwand mit deutlich höheren Errichtungskosten (245 T €) gegenüber der redundanten Sprinklerpumpe (10 T €) das Risiko effektiver positiv beeinflusst. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die FTA eine Möglichkeit ist, die Einflussfaktoren auf das Risikosenkungspotential zu identifizieren. Dabei sind die quantifizierten Risiken nur im Verhältnis zueinander zu bewerten und nicht als realer Wert quantifizierbar. Diese weitereführende Berechnung bedarf weiterer Forschung. Im Übrigen zeigt sich, dass die Ergebnisse in großem Maße von den Eingangsparametern der Versagenswahrscheinlichkeiten abhängen. Diese Eintrittswahrscheinlichkeiten können ausschließlich über die Analyse stattgefundenere Schadesereignisse quantifiziert werden. Kritisch muss zudem die Datenqualität der Eingangsparameter diskutiert werden. So sind Kennzahlen zu Versagenswahrscheinlichkeiten aus Kernkraftwerken (GRS, 2011 & Brukhard, 2016) nicht mit den Versagenswahrscheinlichkeiten aus realen Bränden einer urbanen Umgebung (AGBF, 2023) zu kombinieren, da Prüfintervalle und die Genauigkeit beim Einbau und Betrieb sehr unterschiedlichen Sicherheitsstandard unterliegen. Hinzu kommen unterschiedliche Datenqualitäten (Hammann, 2021), welche einen Vergleich erschweren. Für den beschriebene Fall einer Best-Performance-Ratio Entscheidung ist die Anwendung jedoch möglich, da es sich bei der Bemessung (siehe Formel 20) letztendlich um eine Verhältnis handelt. Werden

ausschließlich Versagenswahrscheinlichkeiten einer hohen Güte verwendet, ändert sich das Verhältnis nicht. Hier ist weitere Forschung erforderlich. Im gleichen Verhältnis wie die Erhöhung von Sicherheiten über die FTA quantifizierbar sind, könnte in weiterer Forschung auch die Reduzierung von Anforderung und die damit einhergehende Risikozunahme prognostiziert werden. Dies ist vor allem in Bezug auf die Identifizierung von Baukostensenkungspotentiale für die Bau- und Immobilienwirtschaft von entscheidender Bedeutung. Die Auswirkungen von Änderungen in der brandschutztechnischen Gesetzgebung wirken sich u.a. aufgrund des Bestandschutzes nur sehr langsam auf die Schadensfallzahlen aus und können bis dato nur sehr schwierig, oder gar nicht prognostiziert werden. Die Anwendung der FTA hat das Potenzial dies zu ermöglichen.

Allgemein kann festgestellt werden, dass die FTA in Kombination mit den entsprechenden Versagenswahrscheinlichkeiten und dem entsprechenden Mitteleinsatz als Methodik funktioniert. Eine Aussage über eine nachvollziehbare Entscheidung zwischen mehreren Maßnahmen zugunsten des besten Preis-Leistungsverhältnisses (Mitteleinsatz und Zuwachs an Sicherheit) kann somit getroffen werden.

Literatur

- (AGBF, 2023) Arbeitsgemeinschaft Leiter der Berufsfeuerwehren Deutschland. B-Einsatzstellenbewertung AGBF Bund. Aktuelle Ergebnisse der VB-Einsatzstellenbewertung. Stand August 2023. <https://www.agbf.de/downloads-fachausschuss-vorbeugender-brand-und-gefahrenschutz>
- (Berry, 1979) Dennis Berry and Earl Minor. Nuclear power plant fire protection - fire hazards analysis (subsystem study task 4). U. S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-0654(SAND79-0324):56–60, 1979.
- (Bronstein, 2015) I.N. Bronstein, K.A. Semendiyayev, Gerhard Musiol, Heiner Mühlig; Handbook of Mathematics; Springer Berlin, Heidelberg (2015).
- (Burkhard, 2016) Burkhard Forell and Svante Einarsson. Ressortforschungsberichte zur kerntechnischen sicherheit und zum strahlenschutz - ergänzung und aktualisierung von zuverlässigkeits- kenngrößen für brandschutzeinrichtungen in deutschen leichtwasserreaktoren – vorhaben 3610r01370. Technical report, Bundesamt für Strahlenschutz, 2016.
- (Bundesarbeitsgericht, 2008) Urteil: 9 AZR 1117/06

- (Bundesbauministerium, 2015) Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat; Bericht der Baukostensenkungskommission im Rahmen des Bündnisses für bezahlbares Wohnen und Bauen - Endbericht; November 2015.
- (Bundesministerium, 2019) Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat; Maßnahmenpaket Baukostensenkung Umsetzungsstand der Empfehlungen der Baukostensenkungskommission und Ausblick; Juli 2019.
- (DIN 18009) DIN-Reihe 18009 Brandschutzingenieurwesen. Beuth Verlag (2016).
- (Eder, 2015) Fehlerbaumanalyse in Theorie und Praxis. Frank Edler, Michael Soden, René Hankammer. Springer Verlag Berlin Heidelberg (2015).
- (Genocchi, 1899) Angelo Genocchi; Differentialrechnung und Grundzüge der Integralrechnung, B. G. Teubner, Leipzig (1899).
- (GRS, 2001) Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit. Ermittlung kernkraftwerksspezifischer zuverlässigkeits- kenngrößen für brandschutzeinrichtungen in einem ältern kraftwerk und in der konvoianlage. Technical report, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, 2001.
- (Hammann, 2021) Claudius Hammann. Analysis of safety systems: Methodology and data for risk quantification in organizational, technical and structural systems with focus on fire protection. Dissertation. Technische Universität München – Lehrstuhl für Nukleartechnik (2021).
- (Herzog, 2024) Daniel Herzog. Entwicklung einer Methode zur Analyse und Vergleichbarkeit der individuellen Nutzergefährdung durch lokale gesundheitsschädliche Einflüsse aus Umweltexpositionen. Dissertation. Technische Universität München – Lehrstuhl für Bauphysik (in Prüfung vsl. 06/2024).
- (Hurst, J., McIntyre, J., Tamauchi, Y., Kinuhata, H., & Kodama, T. 2019). A summary of the ALARP principle and associated thinking. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 56(2), 241-253. doi:10.1080/00223131.2018.1551814
- (Maiworm et. al., 2023) Björn Maiworm, Claudius Hammann, Michael Schleich. Prescriptive Building Regulations, Safety Objectives, and Residual Risk in Germany. *Fire Technology*, 59(6). (2023).
- (MBO, 2022) Bauministerkonferenz. Musterbauordnung Fassung November 2002 zuletzt geändert durch Beschluss der Bauministerkonferenz vom 22./ 23.09.2022. In. Berlin: ARGE Bau.
- (MIndBauRI, 2019) Bauministerkonferenz, Musterindustriebaurichtlinie Fassung 2019
- (Normenkontrollrat, 2021) Normenkontrollrat Baden-Württemberg; Entlastung von Bürokratie und Baukosten durch Optimierung des Brandschutzes; Stuttgart, 2021.
- (OVG-Münster, 1987) Urteil 10 A 363/86
- (R Studio, 2024) Software R in der Version 2023.12.0+369, <https://posit.co/download/rstudio-desktop/> zuletzt geprüft am 6.1.2024.
- (Ruijters, 2015) Enno Ruijters, Mari elle Stoelinga; Fault tree analysis: A survey of the state-of-the-art in modeling, analysis and tools; *Computer Science Review*; Volumes 15–16, 2015, Pages 29-62.
- (Smith, K. 2013). *Environmental Hazards - Assessing Risk and Reducing Disaster* (Vol. 6). Abingdon, Oxon: Routledge.
- (Wälder, K., & Wälder, O. 2017). Der Risikobegriff. In K. Wälder & O. Wälder (Eds.), *Methoden zur Risikomodellierung und des Risikomanagements* (pp. 1-3). Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- (Whitney, 1935) Hassler Whitney; On the abstract properties of linear dependence, *American Journal of Mathematics*, 57(3):509, jul (1935).
- (Whyte, A., & Burton, I. 1982). *Living with risk : environmental risk management in Canada*. Toronto: University of Toronto.