

Heißbemessung von Tragwerken unter Berücksichtigung von Sprinkleranlagen

CFD gestützte Berechnung der Kühlleistung und
Auslösezeitpunkt einer Sprinkleranlage

ALEXANDER SPALLEK, M.Sc. | UNIV. PROF. DR.-ING. JOCHEN MENKENHAGEN

Inhalt der Präsentation

- Erläuterung zur Kühlwirkung von Wasser bzgl. der Wärmefreisetzungsrate
- Einbezug von Wasserlöschanlagen in eine Heißbemessung von brandfernen Bauteilen

Inhaltsverzeichnis

- CFD-Simulation: Was ist das? 4
- Anwendungsgrenzen einer CFD – Simulation für mechanische Untersuchungen 5
- Anwendungsgrenzen für die Berücksichtigung der Kühlwirkung einer Wasserlöschanlagen ... 6
- Einbezug der Kühlwirkung in eine CFD – Simulation 7
- Rechenbeispiel - Heißbemessung eines Deckenträgers 11
- Rechenbeispiel - Berechnung der Sprinklerauslösezeit 13
- Rechenbeispiel - Berechnung der Bauteiltemperatur 14
- Rechenbeispiel - Nachweisführung nach Eurocode 3 15
- Zusammenfassung und Fazit 17

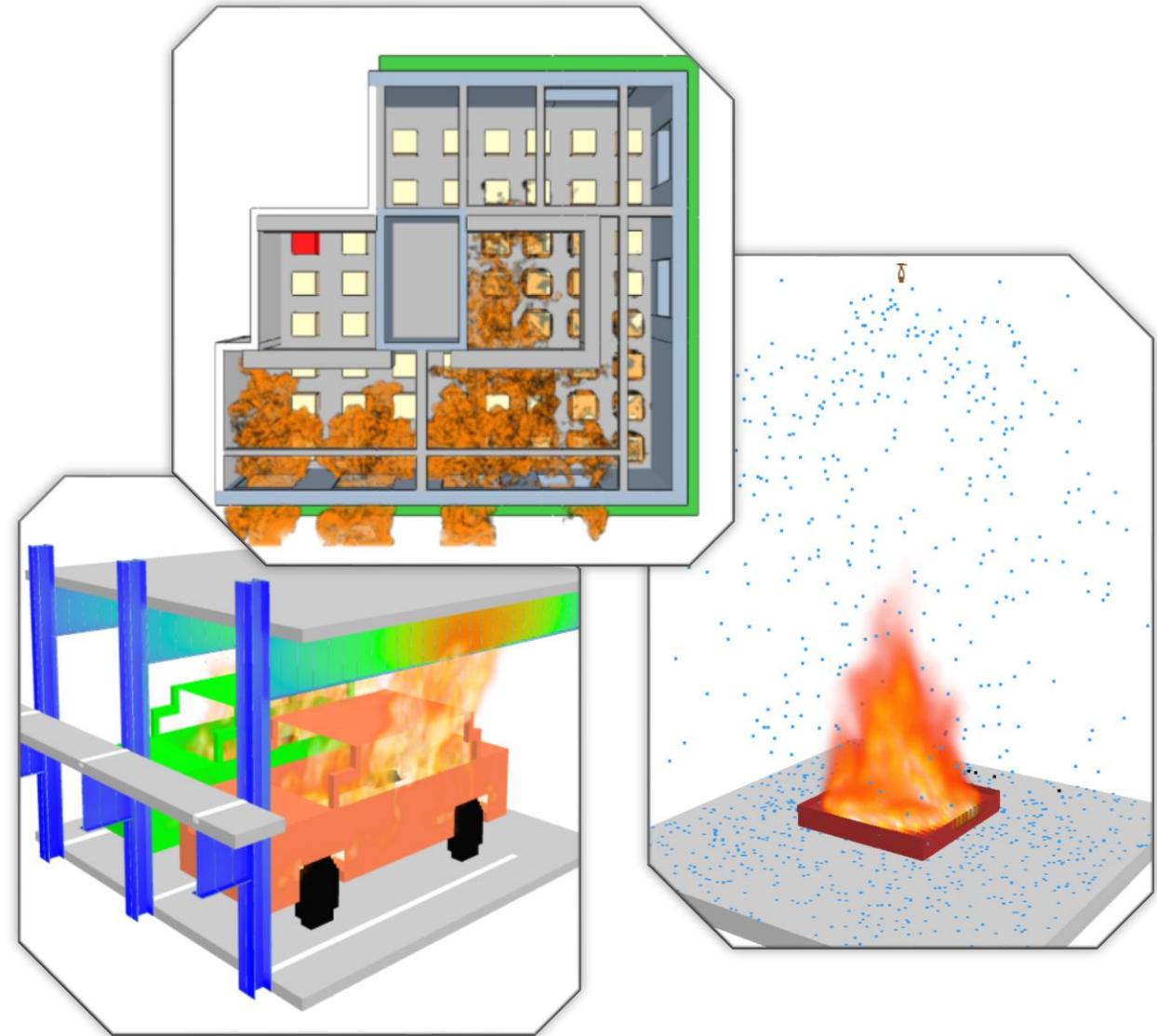
Strömungssimulationen - Was ist das?

- Dreidimensionale Strömungssimulationen (engl.: **C**omputational **F**luid **D**ynamics; kurz **CFD**), nutzen numerische Methoden, um Strömungsprobleme wie z.B. Umströmung eines Flugzeugflügels näherungsweise zu lösen.
- Lösung der drei Erhaltungsgleichungen: Massen-, Impuls- und Energiebilanz

Auch im Bereich des vorbeugenden Brandschutzes finden Strömungssimulationen eine hohe Anwendungsmöglichkeit:

- Dimensionierung von Rauchabzugsanlagen.
- Vorhersage über eine mögliche Brandausbreitung.
- Ermittlung der Bauteil- oder Umgebungstemperatur für weitere mechanische Untersuchungen.

Im weiteren wird sich auf Betrachtung des letzten Punktes beschränkt.



Definierter Anwendungsrahmen einer CFD-Simulation für mechanische Untersuchungen

Für die Heißbemessung von Bauteilen sind die Regeln zur Anwendbarkeit von Strömungssimulationen nicht klar definiert. Die folgenden Ausnahmen sind in Normen oder technischen Regelwerkgen festgehalten:

– Für Heißbemessung von Bauteilen (Nach EC1-1-2 Kap. 3.3.2(2)) dürfen Feldmodelle für Temperaturberechnung verwendet werden

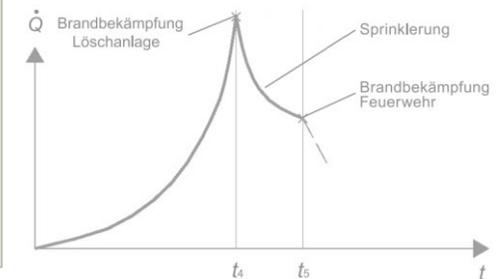
– CFD – Berechnungen und die Berücksichtigung von Sprinklern (Stand der Wissenschaft) wird durch DIN 18009 legitimiert. FDS erfüllt geforderte Bedingungen.

– Zusätzliche Legitimation durch die VDI 6019 Blatt 1 für gesprinklerte Brandkurven.

„Feldmodelle mit den Verfahren der Fluid-Dynamik berechnen die Temperaturentwicklung in einem Brandabschnitt in Abhängigkeit der Zeit und des Ortes. [...] Eine CFD-Simulation darf zur numerischen Lösung der partiellen Differenzialgleichungen, die an allen Orten des Brandabschnittes die thermodynamischen und aerodynamischen Unbekannten liefern, verwendet werden“
- Auszug aus DIN EN 1991-1-2 Kap. 3.3.2(2) und Anhang D -

„Bei der Auswahl der Rechenmodelle muss die Verfügbarkeit geeigneter Eingangsdaten für die Parameter der Einwirkungen und der Widerstände sowie die Rand- und Anfangsbedingungen berücksichtigt werden. Bei der Auswahl von Rechenmodellen müssen folgende Bedingungen überprüft und bewertet werden:
[...] Modelle und Verfahren, die keiner anerkannten Regel entsprechen, können ggf. für Nachweisführungen auf dem Stand von Wissenschaft und Technik ebenfalls zur Anwendung kommen.“
- Auszug aus DIN 18009-1 Kap. 8.2 und Kap. 4.2.4 -

„Das [...] aufgeführte Bemessungsverfahren zur Bestimmung von Brandverlaufskurven kann auch für andere brandschutztechnische Nachweise (z.B. thermische Analysen von Bauteilen) herangezogen werden.“
- Auszug aus VDI 6019 Blatt 1 -

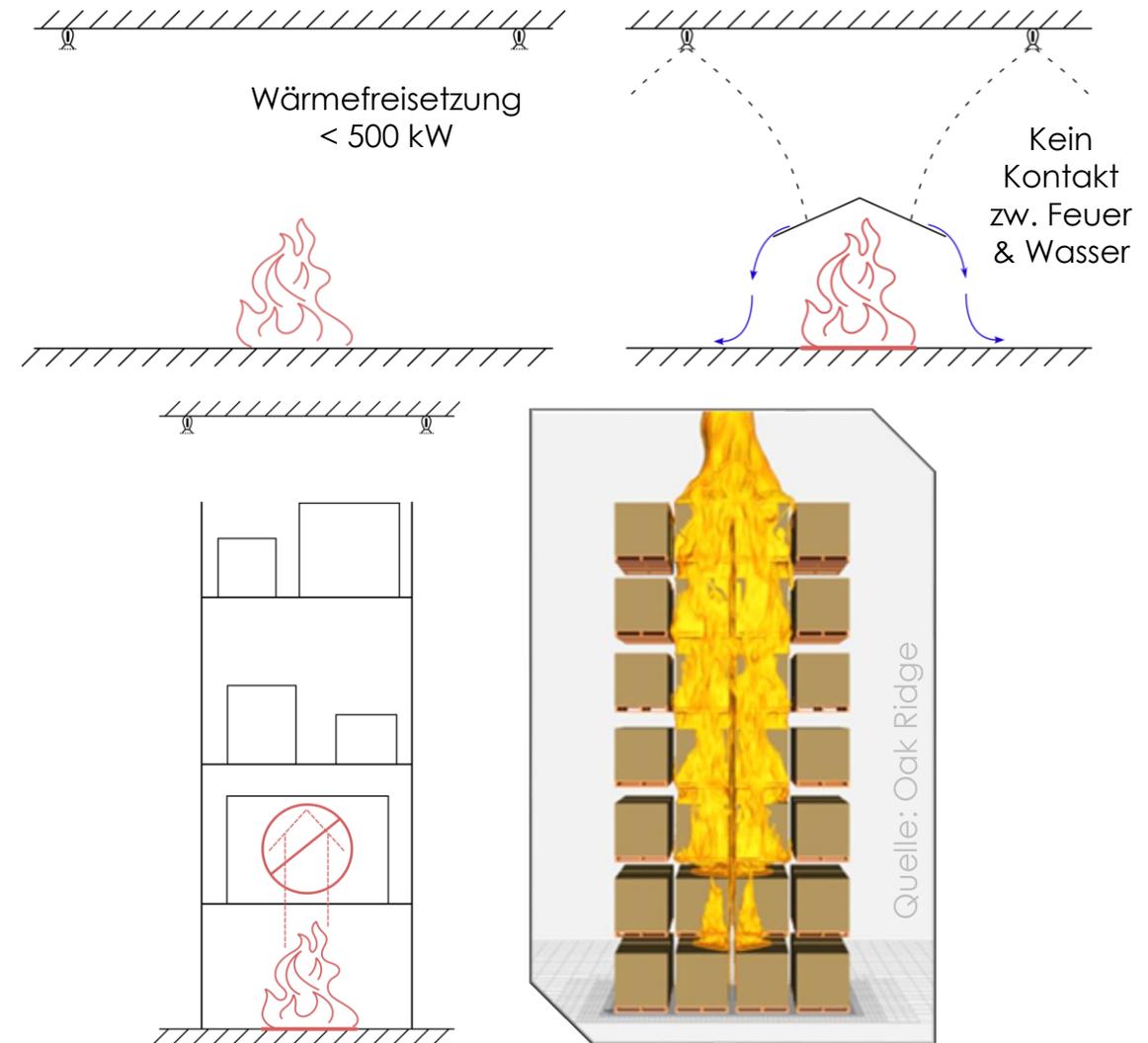


Anwendungsgrenzen für die Berücksichtigung der Kühlwirkung einer Wasserlöschanlage

Derzeitig definierte Anwendungsgrenzen:

- Die Wärmefreisetzung muss unter 500 kW liegen.
- Es dürfen keine Störfaktoren (Abschattung etc.) vorliegen, die den Brand vor Wasser abschirmen.
- Gültig nur für Feststoffbrände ohne vertikale Brandausbreitung
(Hochregellager oder Brand von vertikaler Begrünung)

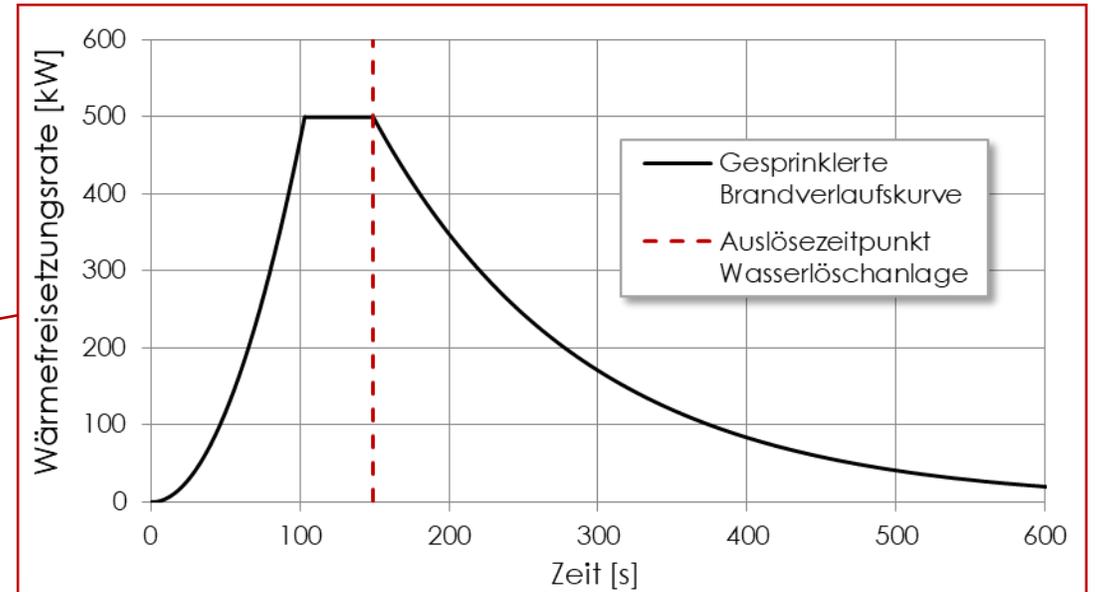
Die Anwendungsgrenzen werden definiert durch:
VDI 6019, VdS 2728 sowie SFPE Handbook of Fire Protection Vol. 2 Kap. 42



Kühlwirkung in der Simulation

Einbezug der Kühlwirkung über 2 Methoden möglich:

1. Quelle-Senken-Ansatz (**QSA**) – keine Erhöhung der Rechendauer
2. Discrete Phase Model (DPM) – Hohe Rechendauer & realitätsnahe Brandabbildung möglich¹



Für **Bauteile im brandfernen Bereich**² haben Untersuchungen ergeben, dass hinsichtlich der Umgebungstemperatur zwischen den beiden Methoden keine Unterschiede zu erwarten sind.

Einbezug des **QSA** in die Simulation ist über zwei Varianten möglich:

1. Abschätzung der Kühlwirkung nach der hydraulischen Auslegung
2. Berechnung der Kühlwirkung direkt in der Simulation

1) Löschung kann nicht realitätsnah erfolgen, da die Wärmefreisetzungsrate meist über eine Funktion gesteuert ist. Hier muss die chemische Zusammensetzung des Brandes bekannt sein und ein entsprechendes Verbrennungsmodell genutzt werden.

2) Brandferner Bereich meint hier, dass die Temperaturerhöhung der Bauteile nicht primär durch die thermische Strahlung beeinflusst ist. Hier wären Einflüsse der Wassertropfen und der Wasserschicht auf den Bauteilen zu untersuchen

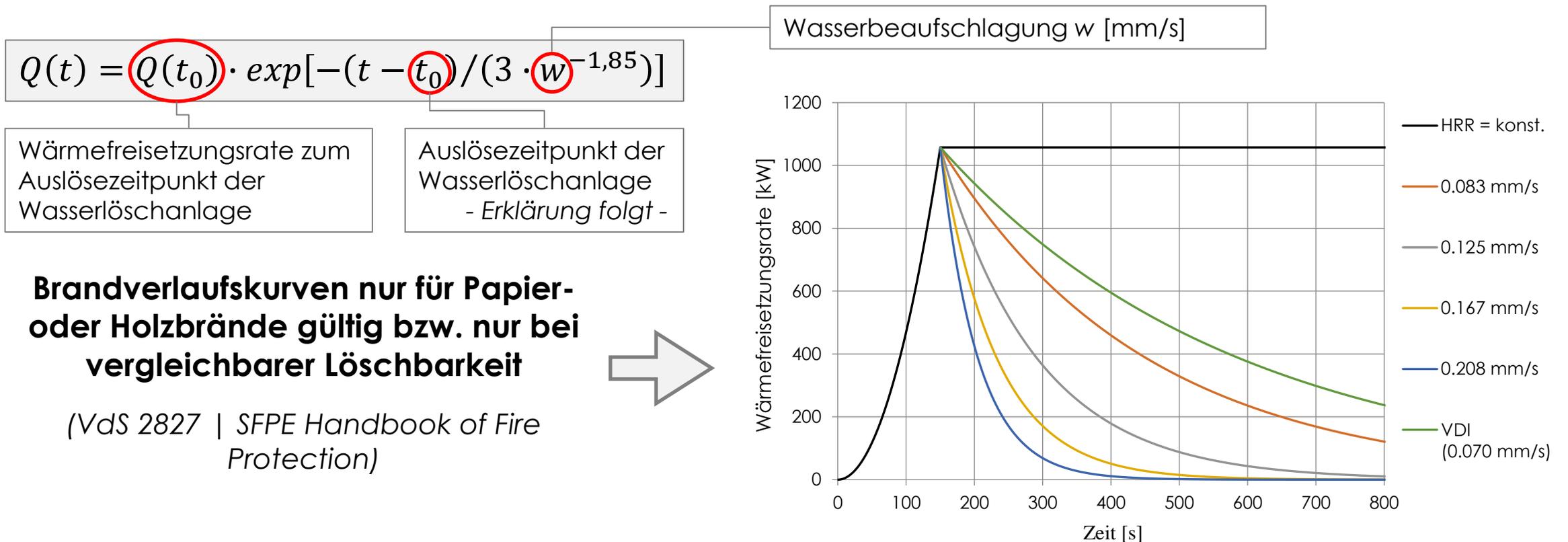
Einbezug der Kühlwirkung in eine CFD-Simulation

Kühlwirkung in der Simulation - Variante 1.) Vorabschätzung nach VdS 2827

Mindestwasserbeaufschlagung w (VdS CEA 4001)

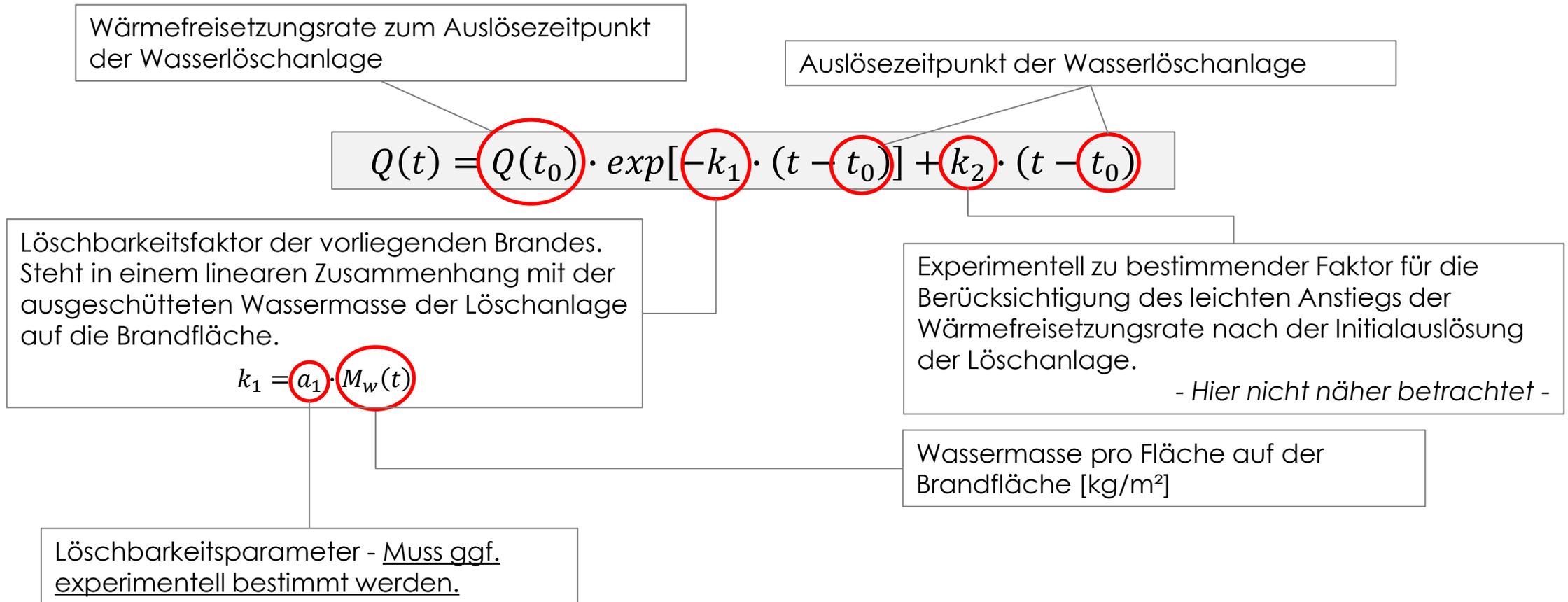
– Definiert anhand der Brandgefahrenklassen & Schutzziele

Die Brandverlaufskurve $Q(t)$ wird dann wie folgt berechnet werden:

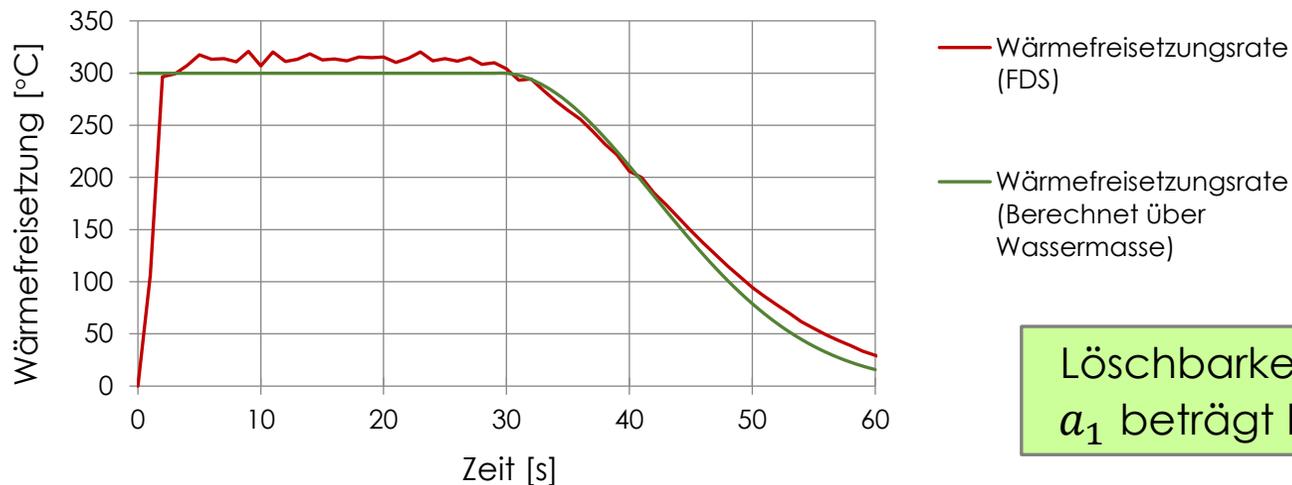
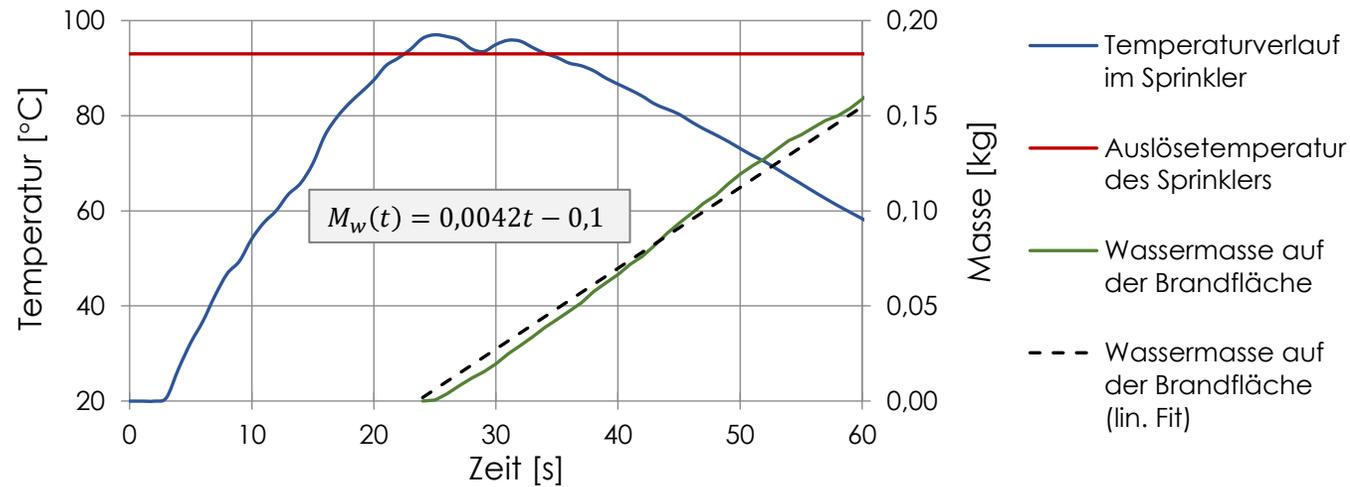


Kühlwirkung in der Simulation - Variante 2.) Berechnung über FDS

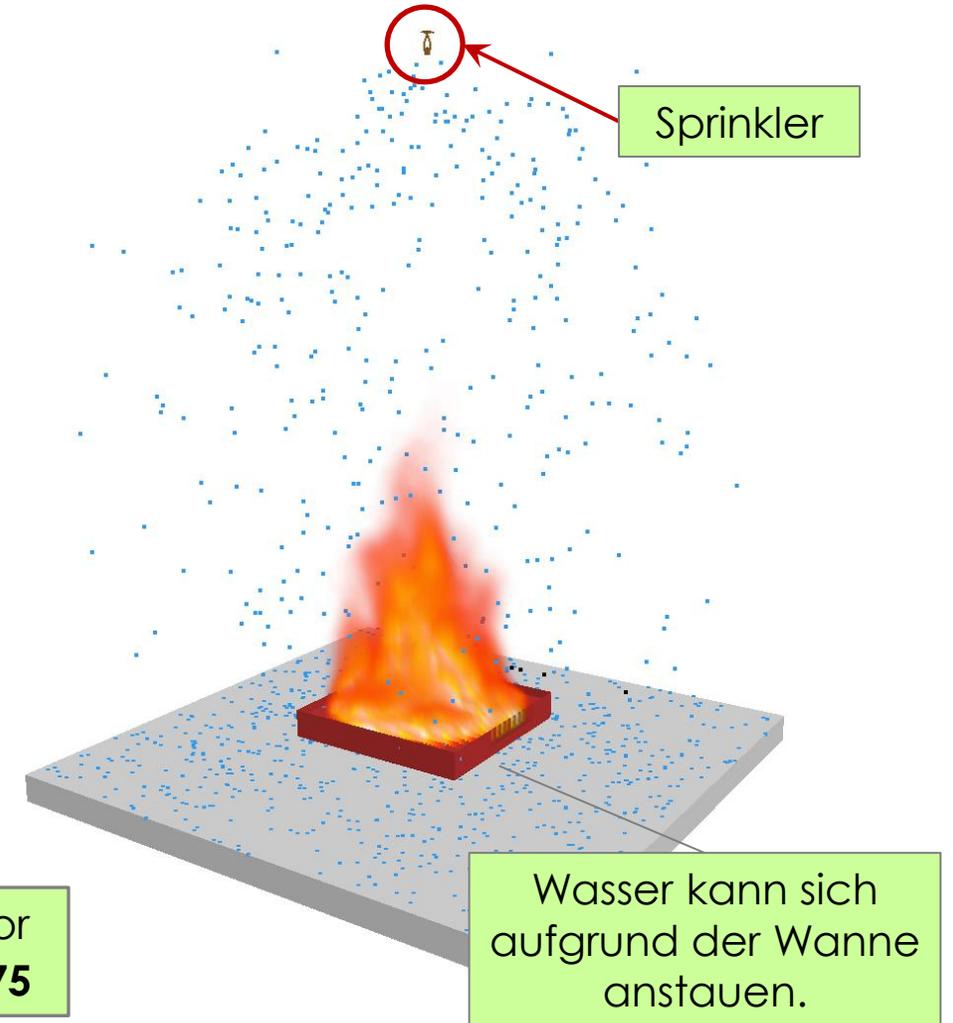
Der Verlauf der Wärmefreisetzungsrate berechnet sich gemäß [7, 8] zu:



Kühlwirkung in der Simulation - Variante 2.) Berechnung über FDS



Löschbarkeitsfaktor a_1 beträgt hier **0,75**

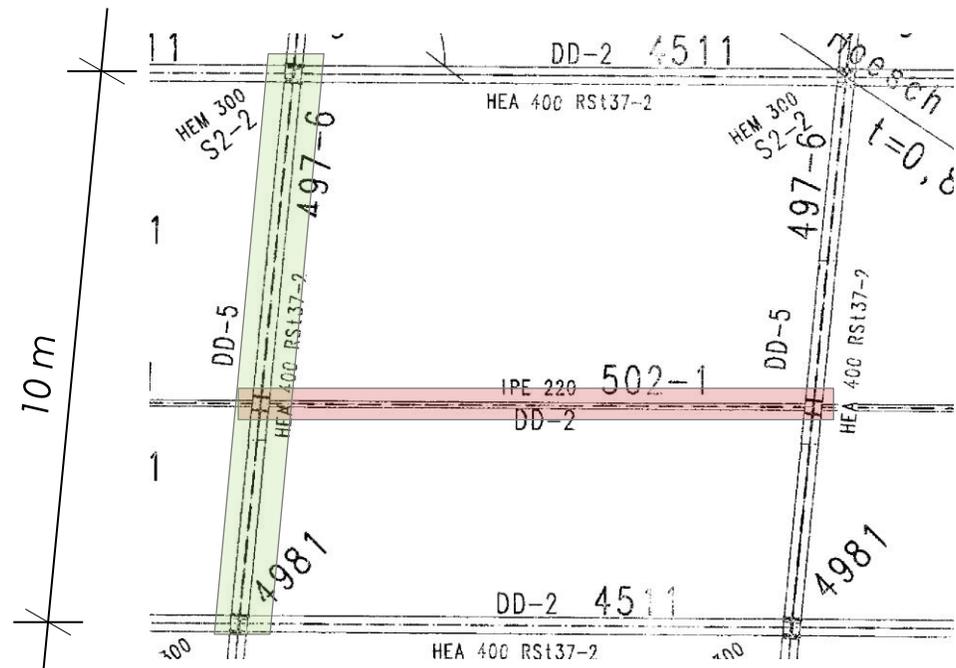


Rechenbeispiel - Heißbemessung eines Deckenträgers

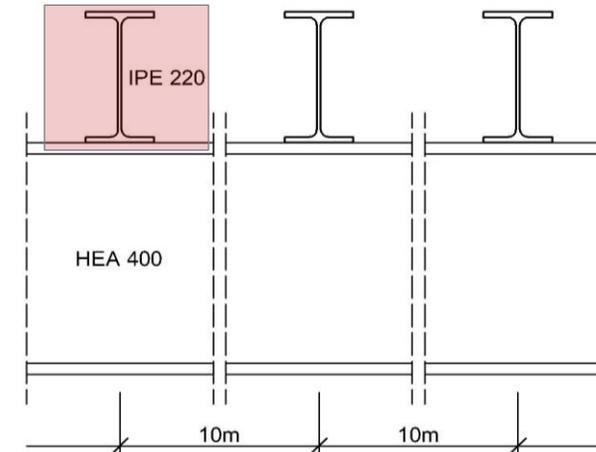
Ausschnitt einer Lagerhalle in Stahlbauweise

- **Haupttragelemente: Biegeträger HEA 400**, auf verkleide Stahlstützen in einem **Achsabstand von 10 Metern**
- **Koppelstab IPE 220** zur Begrenzung der Knicklänge der Hauptträger. (Nur durch Eigengewicht belastet)

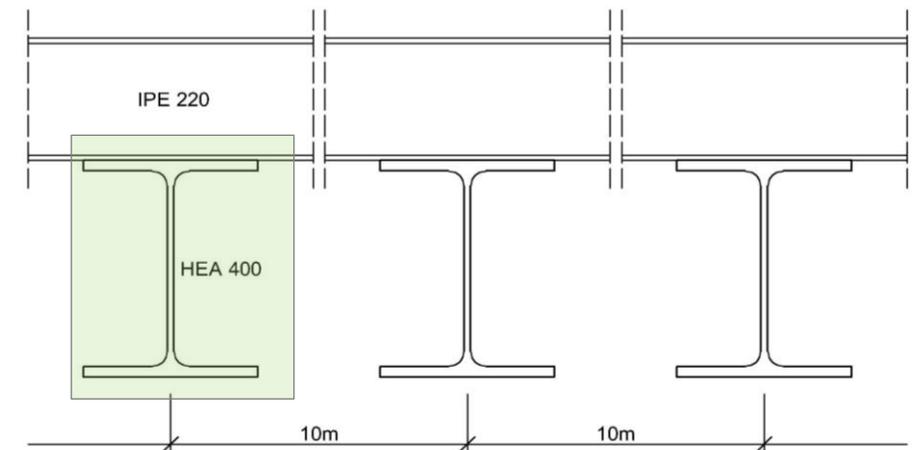
Draufsicht: Deckenkonstruktion



Ansicht: Längsrichtung



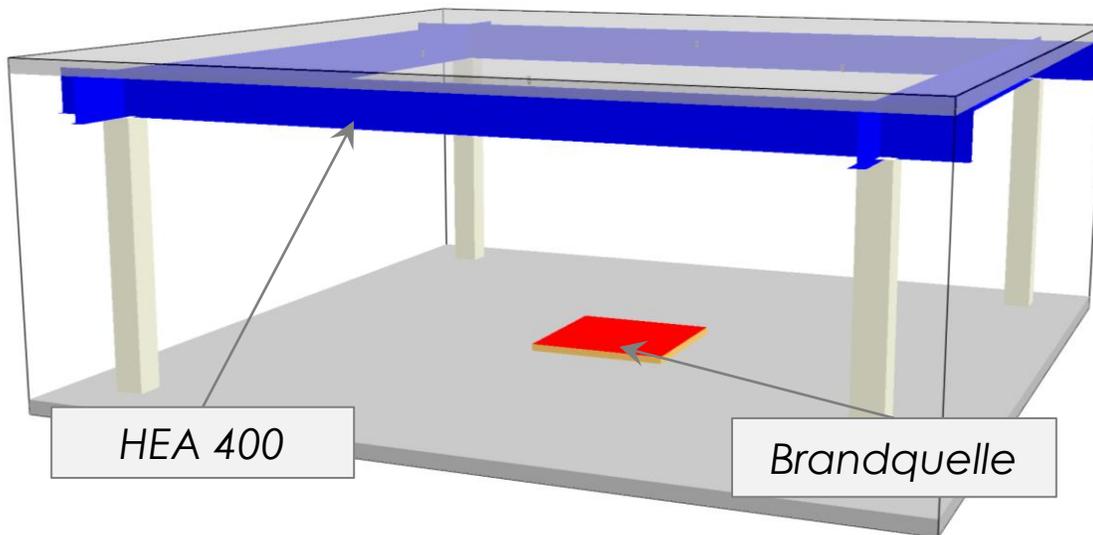
Ansicht: Querrichtung



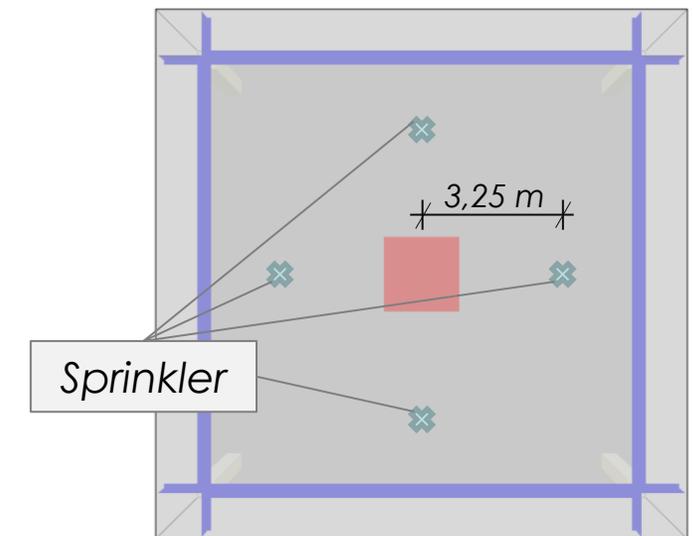
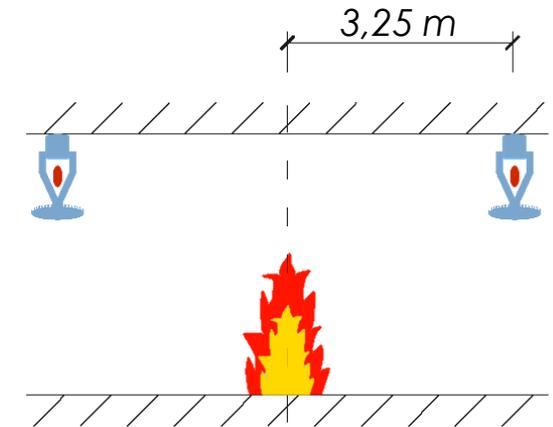
Rechenbeispiel - Heißbemessung eines Deckenträgers

Ausschnitt einer Lagerhalle in Stahlbauweise

- **Sprinkler-Rastermaß:** Maximal zulässiger Abstand 4,60 Meter (VDI 6019)
→ Horizontaler **Abstand zur Plumenachse** beträgt **3,25 Meter**.
- **Nennauslösezeit** der Sprinklergruppe: **68 °C**
- **Brandintensitätskoeffizient:** **0,047 kW/s²** (VDI 6019)



Vereinfachtes Simulationsmodell mit zentral platziertem Brandherd



Rechenbeispiel - Berechnung der Sprinklerauslösezeit

Auslösezeit der Wasserlöschanlage

Die Berechnung der Auslösezeit ist über zwei Wege möglich.

- **Analytisches Verfahren**

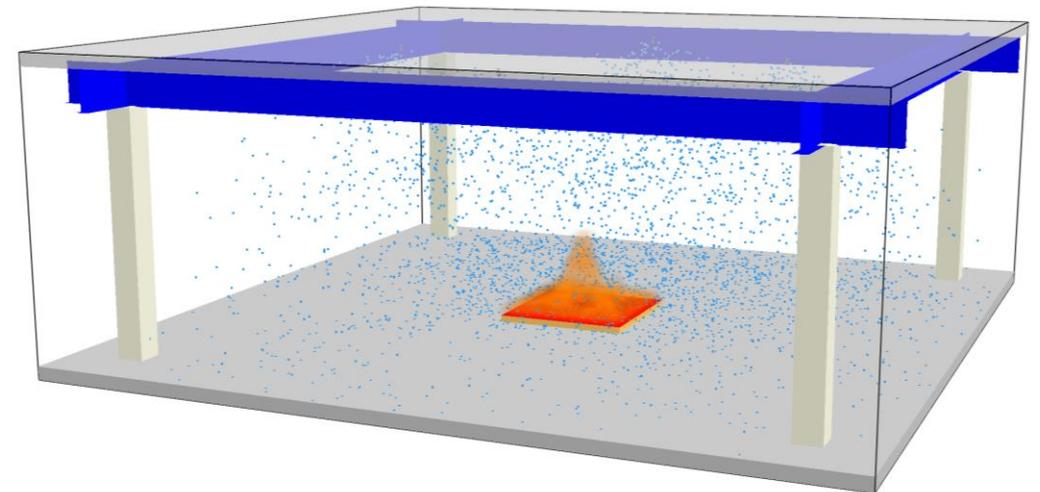
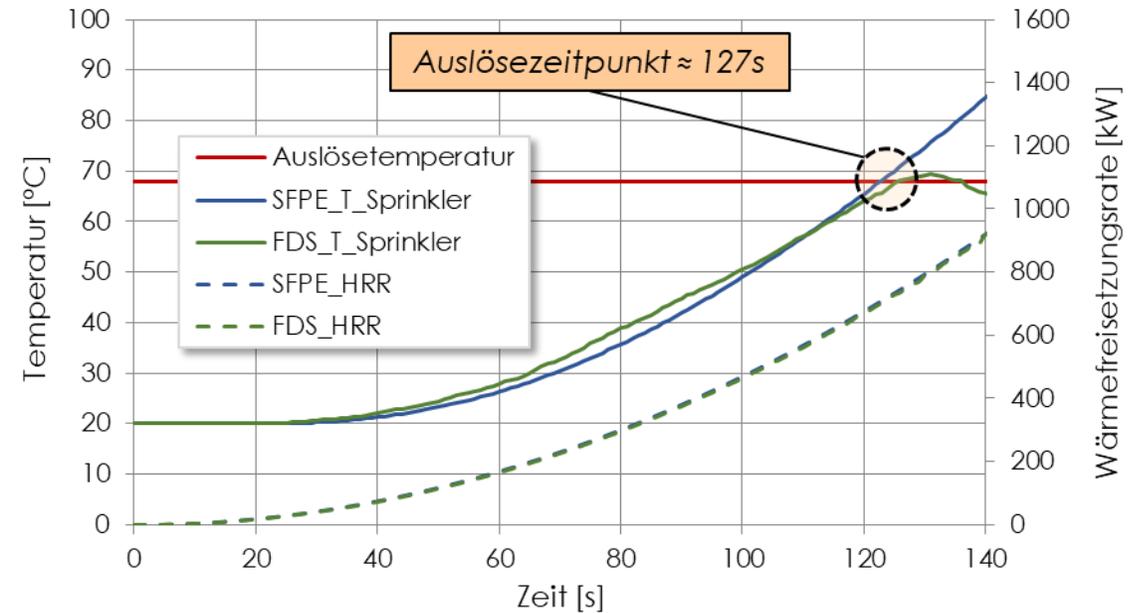
(*SFPE Handbook of Fire Protection*)

Rauchgastemperaturen, -geschwindigkeiten und Ausbreitungsgeschwindigkeiten

- **Numerisches Verfahren**

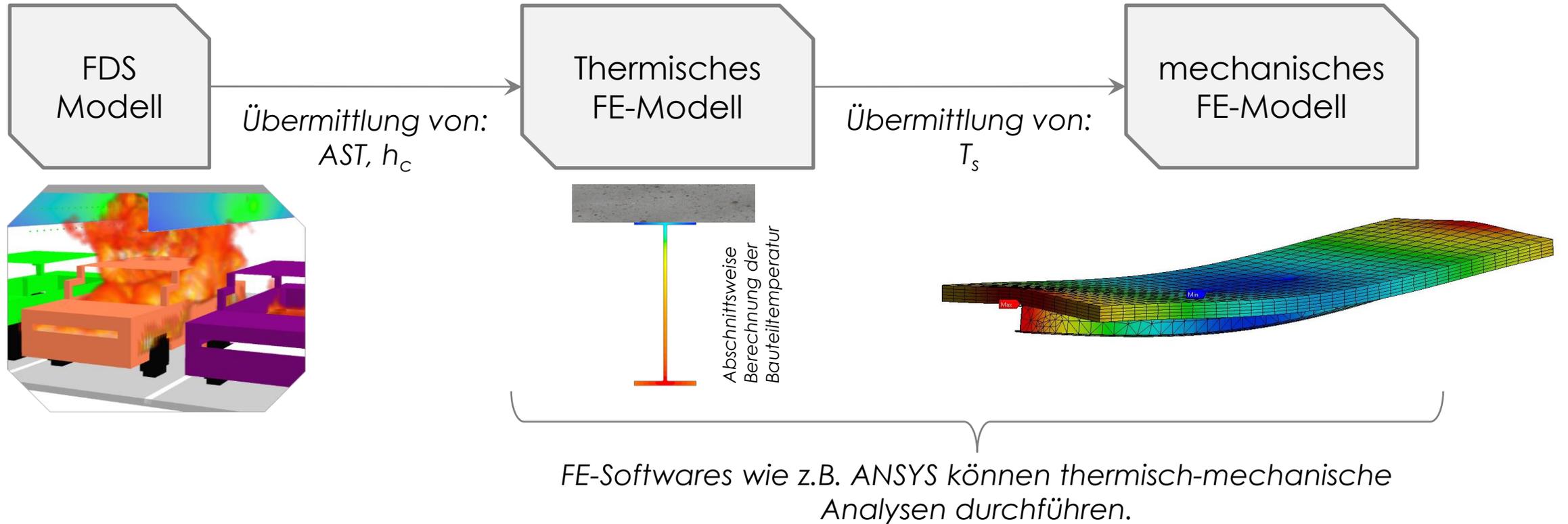
(*per Simulation z.B. FDS*)

Lösung Erhaltungsgleichungen, um die Bewegung der Heißgasschichten zu simulieren.



Rechenbeispiel - Berechnung der Bauteiltemperatur

Einschub: Bauteiltemperatur berechnen mit Hilfe der Adiabatische Oberflächentemperatur (AST)



Die AST kann als effektive Umgebungstemperatur für thermisch-mechanische FE-Modelle verstanden werden und dient als Schnittstelle bzw. Austauschmedium zwischen CFD- und FE-Modellen.

Rechenbeispiel - Nachweisführung gemäß der Eurocodes 3

Vergleich zwischen einer gesprinklerten Brandkurve und der ETK

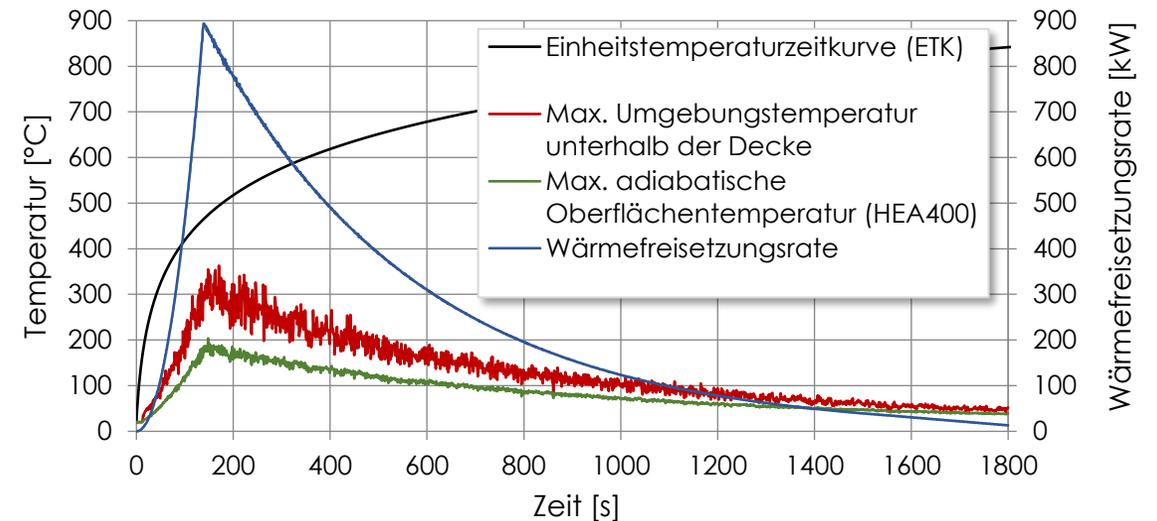
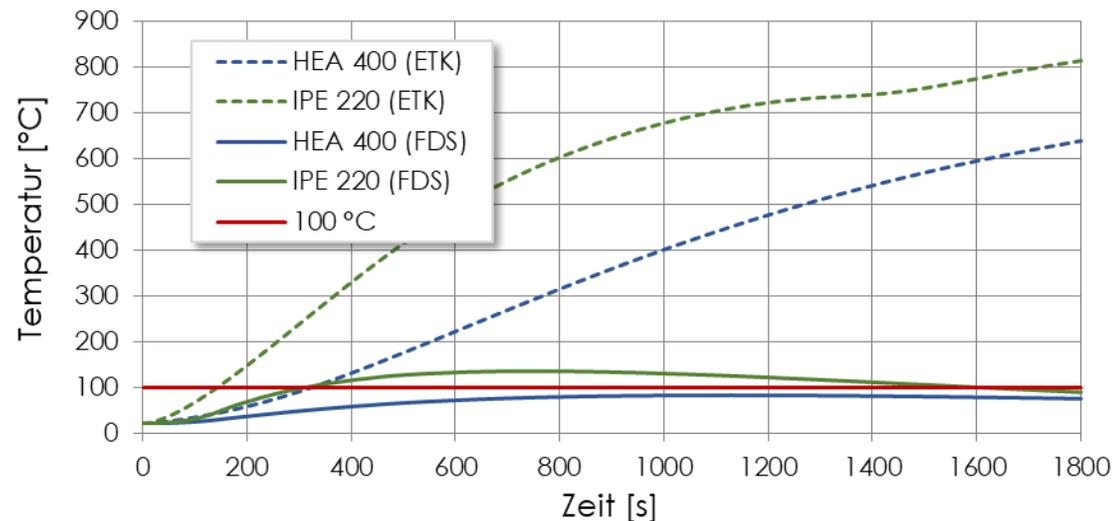
In diesem einfachen Beispiel wird auf der sicheren Seite liegend die **maximale Umgebungstemperatur** statt der AST verwendet. Die Erhöhung der **Bauteiltemperaturen** wird gemäß des **EC3** nach der folgenden Formel berechnet:

$$\Delta T_s = k_{sh} \cdot \frac{A_m/V}{c_a(T) \cdot \rho_a} \cdot \dot{h}_{net,d} \cdot \Delta t$$

Wärmefluss

Abfolge der Nachweisführung gegen ein Versagen der Konstruktion infolge Biegedrillknicken:

1. Berechnung der Drehfedersteifigkeit des Koppelstabs IPE220
2. Biegedrillknicknachweis des Trägers HEA400

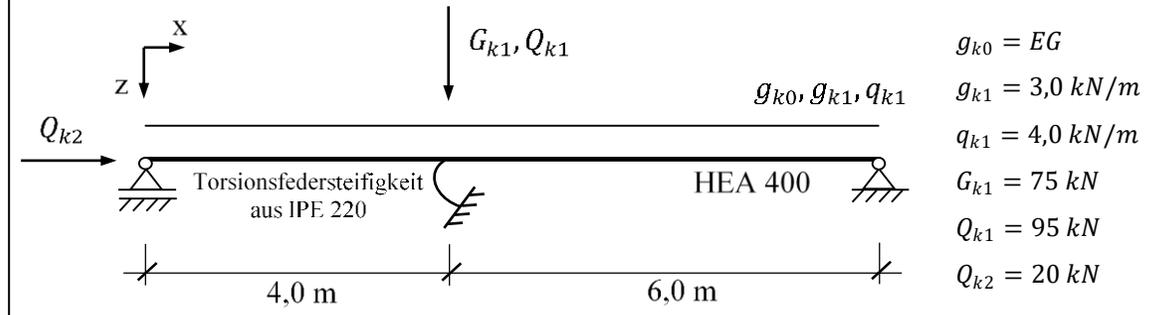


Rechenbeispiel - Nachweisführung gemäß der Eurocodes 3

Temperaturbeanspruchung: FDS	Temperaturbeanspruchung: ETK
IPE 220	
Maximale Temperatur: 137 °C	Maximale Temperatur: 814 °C
Berechnung der Abminderungsfaktoren: $k_E = 0,964$ $k_y = 1,000$	Berechnung der Abminderungsfaktoren: $k_E = 0,087$ $k_y = 0,103$
Berechnung der Verdrehung φ $\varphi = 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot \frac{1000}{21000 \cdot 0,964 \cdot 2770}$ $= 2,972 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$	Berechnung der Verdrehung φ $\varphi = 2 \cdot \frac{1}{3} \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^2 \cdot \frac{1000}{21000 \cdot 0,087 \cdot 2770}$ $= 0,329 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$
Berechnung der Drehfedersteifigkeit c_m $c_m = \frac{1}{\varphi} = 336455 \text{ kNcm} = 3365 \text{ kNm}$	Berechnung der Drehfedersteifigkeit c_m $c_m = \frac{1}{\varphi} = 30365 \text{ kNcm} = 304 \text{ kNm}$

Bauteiltemperatur unter 100°C
 → Keine Abminderung der
 Tragwirkung

Temperaturbeanspruchung: FDS	Temperaturbeanspruchung: ETK
HEA 400	
Maximale Temperatur: 98 °C	Maximale Temperatur: 640 °C
Berechnung der Abminderungsfaktoren: $k_E = 1,000$ $k_y = 1,000$	Berechnung der Abminderungsfaktoren: $k_E = 0,238$ $k_y = 0,374$
Berechnung der Momententragfähigkeit: $M_{fi,Rd} = 2562 \cdot 35,5 \cdot 1,0 = 910 \text{ kNm}$	Berechnung der Momententragfähigkeit: $M_{fi,Rd} = 2562 \cdot 35,5 \cdot 0,374 = 340 \text{ kNm}$
Nachweis: $M_{y,Ed,max} / M_{fi,Rd} = 474 / 910 = 0,52 \quad \checkmark$	Nachweis: $M_{y,Ed,max} / M_{fi,Rd} = 474 / 340 = 1,40 \quad \text{✗}$



Die Bemessungseinwirkung wird für den Brandfall mittels des Abminderungsfaktors $\eta_{fi} = 0,65$ gemäß abgemindert. Die Überprüfung wird mit dem Stabwerksprogramm RStab der Firma Dlubal geführt. Die Momentenberechnung erfolgt nach der Th. II Ordnung unter Ansatz von Vorkrümmungen um beide Achsen für die Knicklinie b.

$M_{y,Ed,max} = 729 \text{ kNm} \cdot 0,65 = 474 \text{ kNm}$

Zusammenfassung & Fazit

Derzeit gültige Grenzen:

- Wärmefreisetzung $< 500 \text{ kW}$
- Liegen Störfaktoren vor, darf die Kühlwirkung nicht angesetzt werden.
- Keine vertikale Brandausbreitung

Quelle-Senken Ansatz hinreichend genau für brandferne Bauteile

- Berücksichtigung der Wasserbeaufschlagung w
- Experimentelle Bestimmung des Löscharkeitsfaktors a_1

Berechnung der Sprinkleraktivierungszeit

- Per analytisches Verfahren (Nur bei radialer Abströmung der Heißgasschicht)
- Per Simulation

Mechanische Untersuchung:

- Ausgabe der Adiabatische Oberflächen-temperatur (AST)
- Bauteiltemperatur nach EC3 berechnen.
- Bei komplexen Geometrien ggf. mit numerischen Verfahren
- Weitere mech. Nachweisführungen können nun durchgeführt werden.

Lösungsvorschlag:

- Schnittstelle zwischen FDS und FE-Software SAFIR zum direkten Übergabe der Bauteiltemperatur für statische Bemessungen. Siehe [12]
- „Umweg“ über die AST nicht notwendig



**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit**

Literaturverzeichnis

- [1] DIN 18009-1: DIN 18009-1 Brandschutzingenieurwesen.
- [2] DIN EN 1993-1-2: Eurocode 3: Bemessung von Konstruktionen von Stahlbauten.
- [3] VDI 6019 Blatt 1 – Ingenieurverfahren zur Bemessung der Rauchableitung aus Gebäuden.
- [4] Hurley, M. J.; Gottuk, D. T.; Hall, J. R. et al. (Hrsg.): SFPE Handbook of Fire Protection Engineering – Vol. II. Chapter 42: Automatic Sprinkler System Calculation. Springer, New York, NY, 2016.
- [5] VdS Schadenverhütung GmbH: VdS 2827 Bemessungsbrände für Brandsimulationen (2000).
- [6] McGrattan, K. B.; Forney, G. P.: Fire Dynamics Simulator – Mathematical Guide. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2004.
- [7] Hamins, A.; McGrattan, K. B.: Reduced-Scale Experiments on the Water Suppression of a Rack-Storage Commodity Fire for Calibration of a CFD Fire Model. International Association for Fire Safety, 2002.
- [8] Yu, H. Z.; Lee, J. L.; Kung, H. C.: Suppression of Rack-Storage Fires by Water. International Association For, 1994.
- [9] VdS Schadenverhütung GmbH: VdS CEA – 4001 Richtlinien für Sprinkleranlagen.
- [10] Hurley, M. J.; Gottuk, D. T.; Hall, J. R. et al. (Hrsg.): SFPE Handbook of Fire Protection Engineering – Vol. II. Chapter 40: Design of Detection Systems. Springer, New York, NY, 2016.
- [11] Hurley, M. J.; Gottuk, D. T.; Hall, J. R. et al. (Hrsg.): SFPE Handbook of Fire Protection Engineering – Vol. I. Chapter 14: Ceiling Jet Flows. Springer, New York, NY, 2016.
- [12] Pehrs, I.; Meyer, P.; Veenker, K.: Zeitgemäße Ingenieuransätze für den Brandschutz von Garagen. Ernst & Sohn GmbH & Co. KG