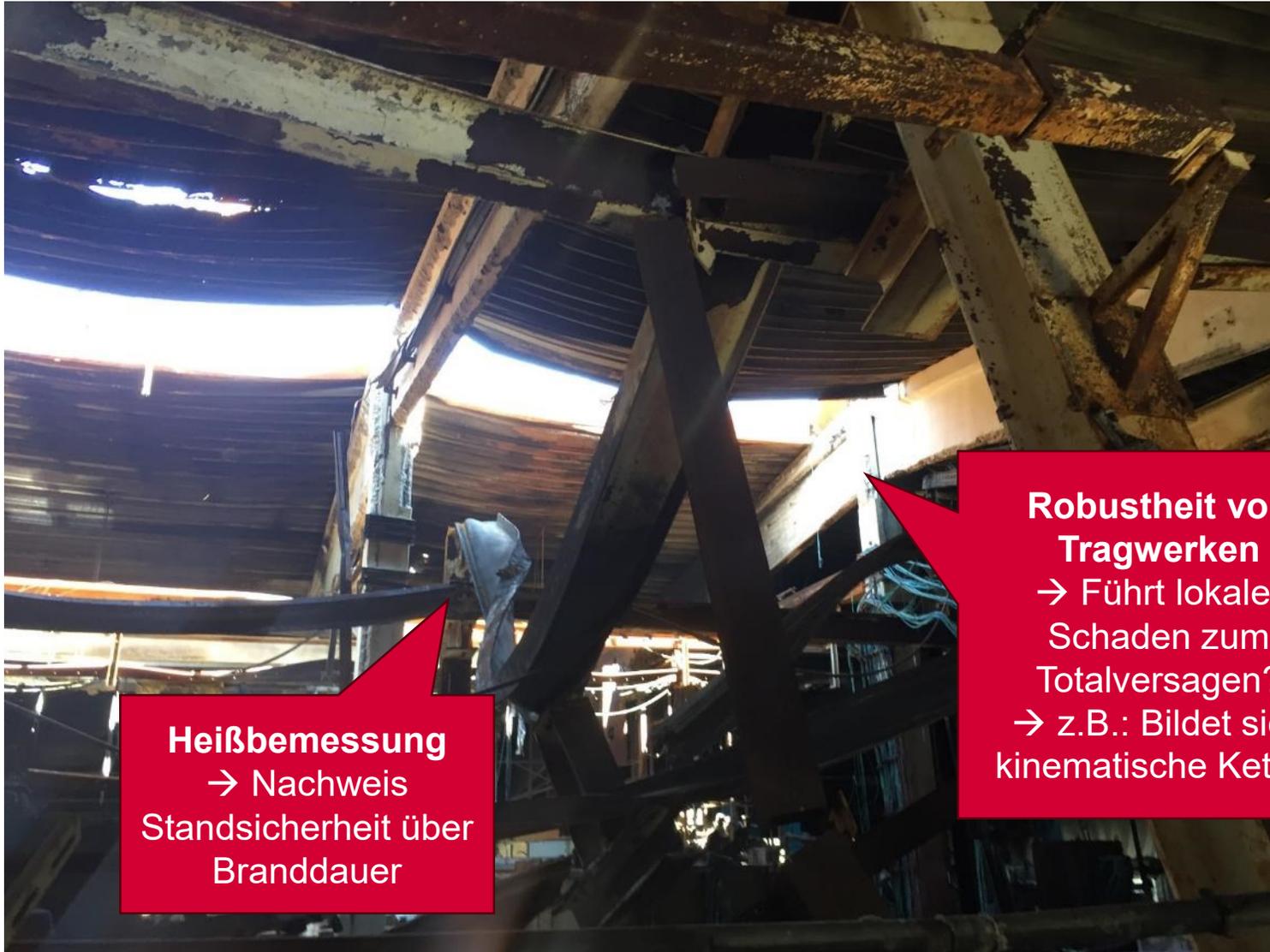




Brandschutz-Forum-München 2024
22.11.2024

HEIßBEMESSUNG VON STAHLTRAGWERKEN UND KINEMATISCHE KETTE

Dr.-Ing. M. Cyllok



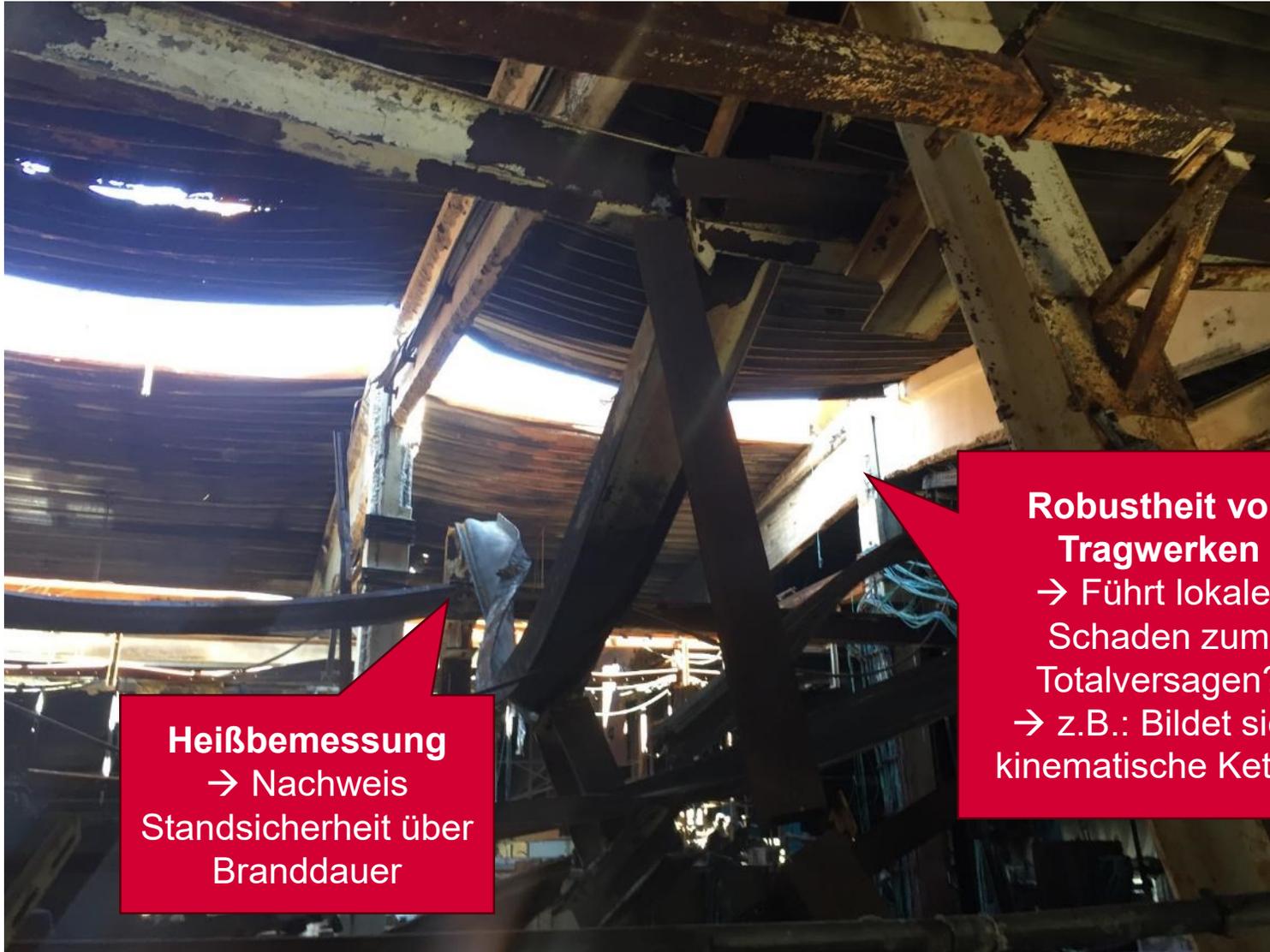
Heißbemessung
→ Nachweis
Standicherheit über
Branddauer

**Robustheit von
Tragwerken**
→ Führt lokaler
Schaden zum
Totalversagen?
→ z.B.: Bildet sich
kinematische Kette?

**ROBUSTHEIT VON
STAHLTRAGWERKEN**

**EINWIRKUNGEN UND
BAUTEILTEMPERATUREN**

**HEIßBEMESSUNG UND
IHRE GRENZEN**



Heißbemessung
→ Nachweis
Standicherheit über
Branddauer

**Robustheit von
Tragwerken**
→ Führt lokaler
Schaden zum
Totalversagen?
→ z.B.: Bildet sich
kinematische Kette?

ROBUSTHEIT VON STAHLTRAGWERKEN

EINWIRKUNGEN UND
BAUTEILTEMPERATUREN

HEIßBEMESSUNG UND
IHRE GRENZEN



**Robustheit von
Tragwerken**
→ Führt lokaler
Schaden zum
Totalversagen?
→ z.B.: Bildet sich
kinematische Kette?

- Grundlegende Anforderungen an Tragwerke

- Bauordnung (hier: [BayBO](#)) fordert u.a. [Standicherheit](#) und [Brandschutz](#), konkretisiert durch die eingeführten technischen Baubestimmungen (hier: [BayTB](#)), insb. [DIN EN 1990](#)
- Abs. 2.1 [DIN EN 1990](#) fordert u.a. grundlegend und bauartunabhängig:
 - Tragfähigkeit
 - Tragfähigkeit im Brandfall (Feuerwiderstandsdauer)
 - Robustheit (Schadensfolge muss in gutem Verhältnis zur Schadensursache stehen)



• Strategien für die Robustheit

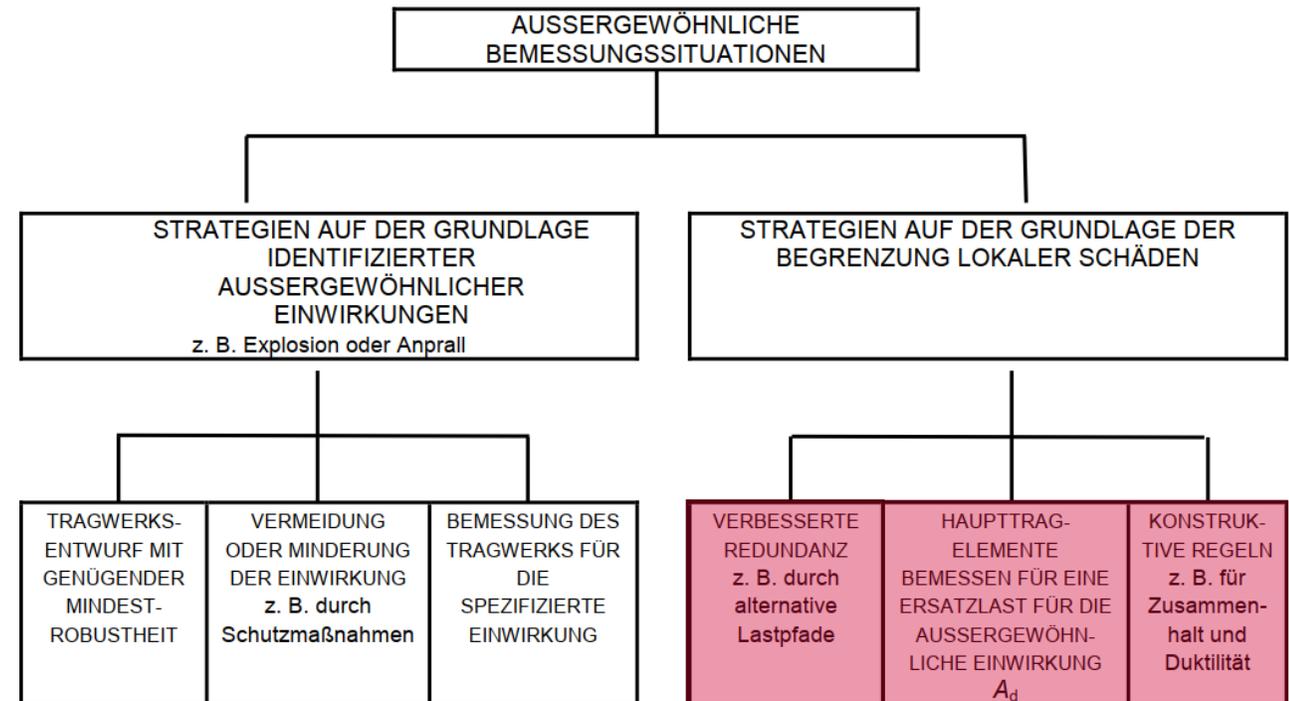
- Schaden darf zu mehr „Beweglichkeit“, jedoch nicht zum Totalverlust führen!
- Abs. 2.1 (5)P [DIN EN 1990](#) sieht folgende Robustheitsstrategien vor:
 - Vermeidung/ Minderung von Gefährdungen
 - Tragwerk mit geringer Anfälligkeit gegen Gefährdungen
 - Tragwerk ohne Totalversagen nach lokalem Schaden/ Ausfall
 - Tragwerk mit Vorankündigung bei Totalversagen
 - Kopplung von Tragelementen



Robustheit von Tragwerken
→ Führt lokaler Schaden zum Totalversagen?
→ z.B.: Bildet sich kinematische Kette?

• Strategien für die Robustheit

- Abs. 3.1 **DIN EN 1991-1-7** konkretisiert Robustheitsstrategien u.a. für Brand vor:





**Robustheit von
Tragwerken**
→ Führt lokaler
Schaden zum
Totalversagen?
→ z.B.: Bildet sich
kinematische Kette?

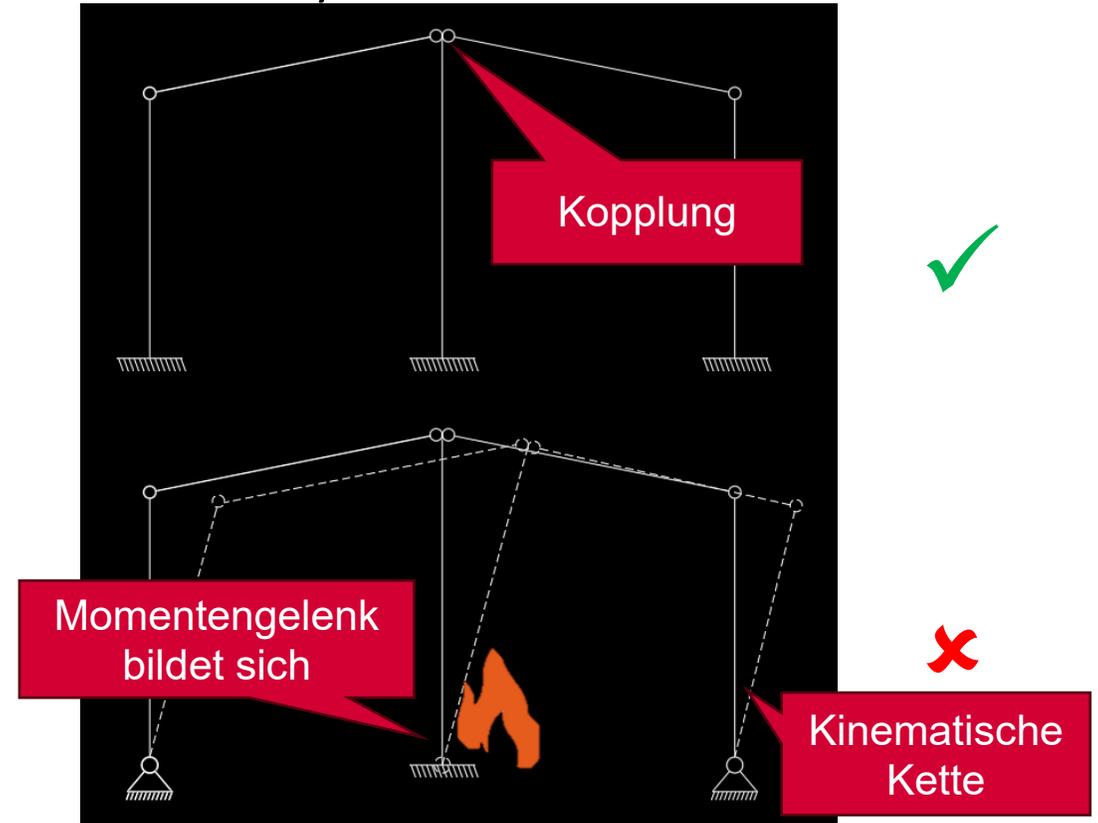
- Verbesserung der Redundanz
 - Alternative Lastpfade herstellen, d.h. Lastumlagerungen ermöglichen
 - Statisch unbestimmtes System herstellen
 - Statisch bestimmtes System meiden, da Gefahr, dass sich nach lokalem Schaden ein kinematisches (d.h. bewegliches) System einstellt („kinematische Kette“)

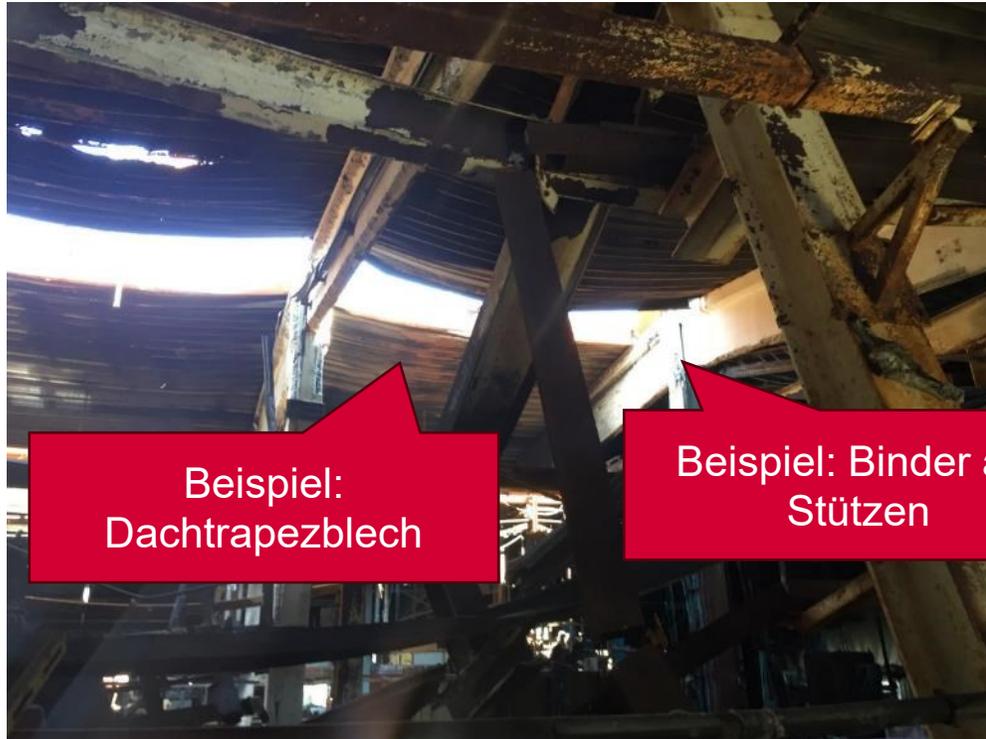


Beispiel: Binder auf Stützen

- Verbesserung der Redundanz

- Statisches System: Binder auf Stützen





Beispiel:
Dachtrapezblech

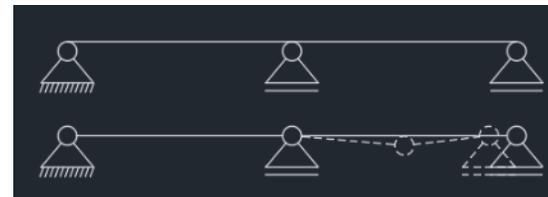
Beispiel: Binder auf
Stützen

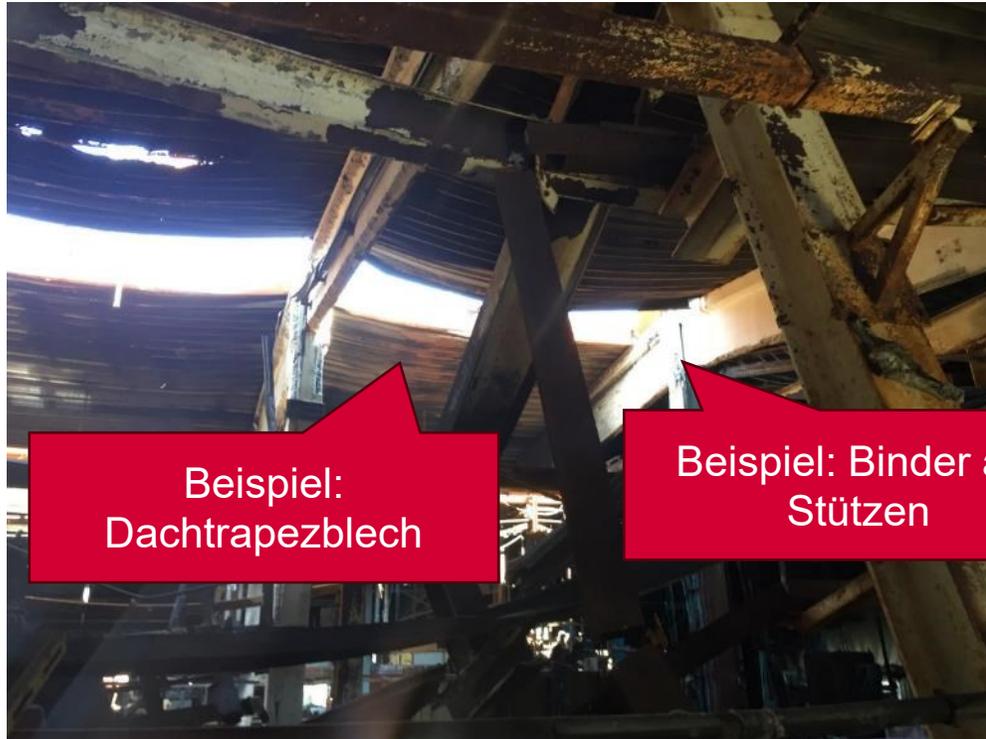
• Konstruktive Regeln

- Kopplung von Tragelementen (z.B. Verdornung, Ringanker)



- Mindestdicken
- Beispiel Stahlbau: Befestigung von Schutzsystemen (z.B. GKF-Platten) → siehe auch Heißbemessung
- Redundanzen vergrößern

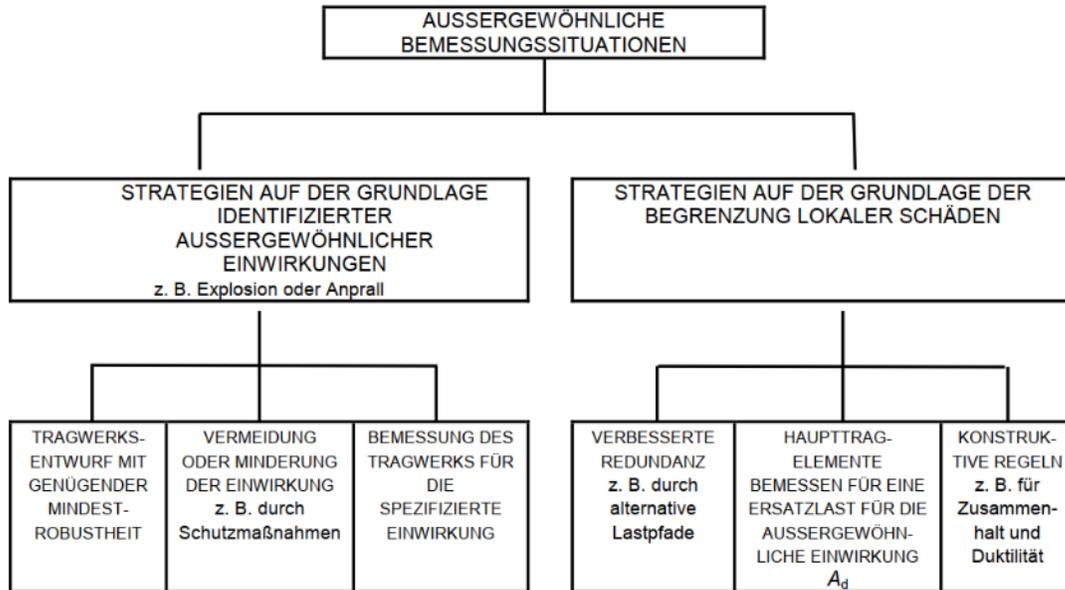




Beispiel:
Dachtrapezblech

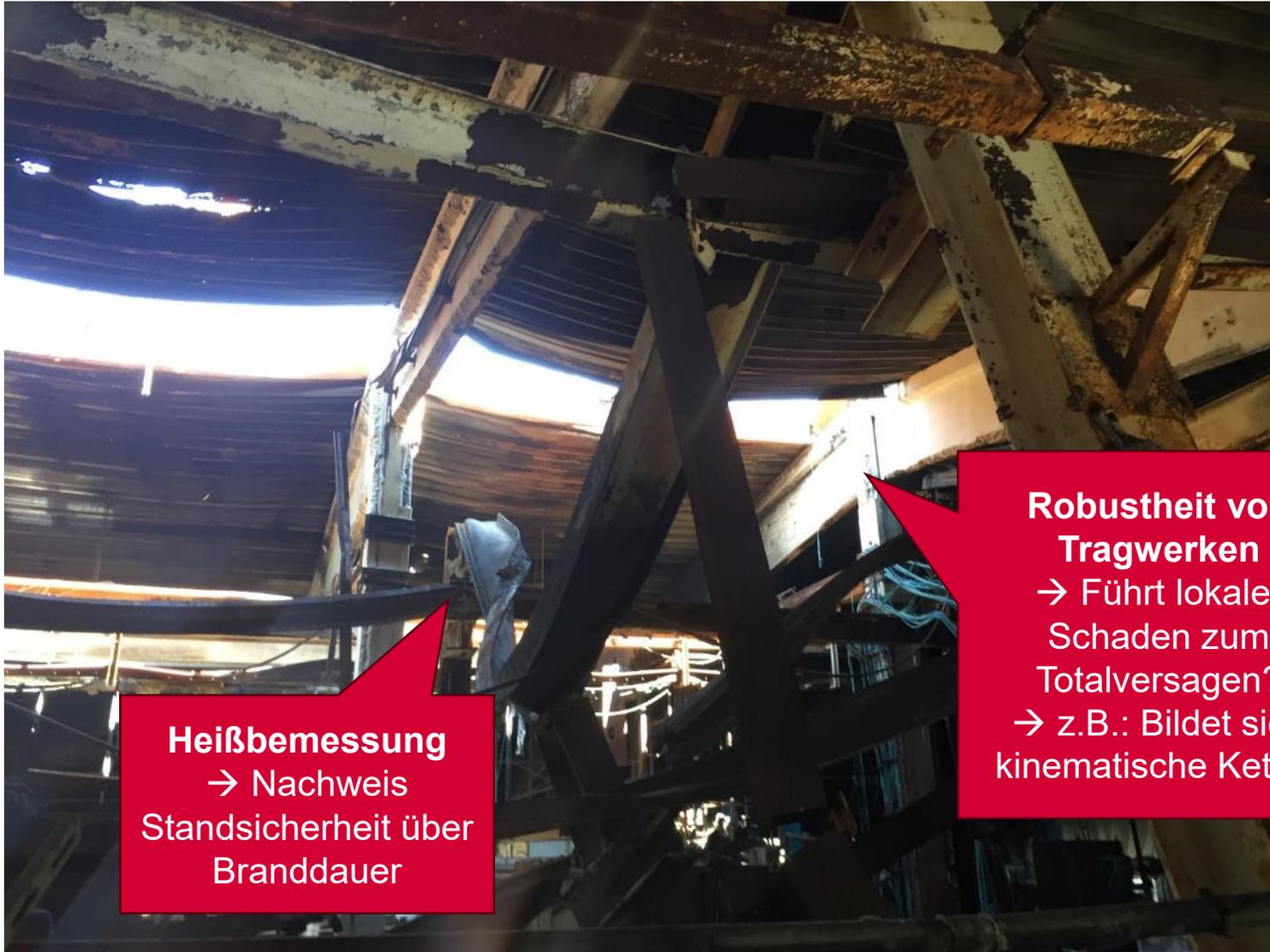
Beispiel: Binder auf
Stützen

- Bemessung Haupttragelemente für außergewöhnliche Einwirkung
 - Hier: Außergewöhnliche Einwirkung Brandfall
 - Hier z.B.: Feuerbeständige Heißbemessung
 - Nebentragelemente mit geringerer (z.B. feuerhemmend) oder keiner Anforderung (z.B. Dachtrapezblech)



- Exkurs: MIndBauRL und kinematische Kette

- MIndBauRL „Allgemeine Anforderungen“, Abs. 5.14.9
*„Industriebauten – insbesondere solche mit Tragwerken ohne klassifiziertem Feuerwiderstand – müssen statisch konstruktiv so errichtet werden, dass bei Versagen von Bauteilen bei lokal begrenzten Bränden nicht ein plötzlicher Einsturz des Haupttragwerkes außerhalb des betroffenen Brandbereichs durch z. B. **Bildung einer kinematischen Kette** angenommen werden muss.“*
- Die Regel nach Abs. 5.14.9 ist ein Beispiel für die Robustheitsstrategie auf „Grundlage der Begrenzung lokaler Schäden“ nach DIN EN 1991-1-7



Heißbemessung
→ Nachweis
Standicherheit über
Branddauer

**Robustheit von
Tragwerken**
→ Führt lokaler
Schaden zum
Totalversagen?
→ z.B.: Bildet sich
kinematische Kette?



**ROBUSTHEIT VON
STAHLTRAGWERKEN**

**EINWIRKUNGEN UND
BAUTEILTEMPERATUREN**

**HEIßBEMESSUNG UND
IHRE GRENZEN**

• Heißbemessung

- Nachweis Standsicherheit über Branddauer (Feuerwiderstandsdauer)
- Auch: Numerischer Brandversuch

• Bemessungssituation Brandfall

- Brandfall ist außergewöhnliche Bemessungssituation
- Mechanische Einwirkungen und außergewöhnliche Einwirkung A_d
$$E_{d,fi} = E\{G_{k,j}; P; A_d; (\psi_{1,1} \text{ oder } \psi_{2,1})Q_{k,1}; \psi_{2,i}Q_{k,i}\}$$
$$j \geq 1; i > 1$$
- Veränderliche Einwirkungen: $\psi_{2,1}Q_{k,1}$
- Ausnahme Wind: $\psi_{1,1}Q_{k,1,Wind} = 0,2 Q_{k,1,Wind}$

Beispiele für ψ_2 :

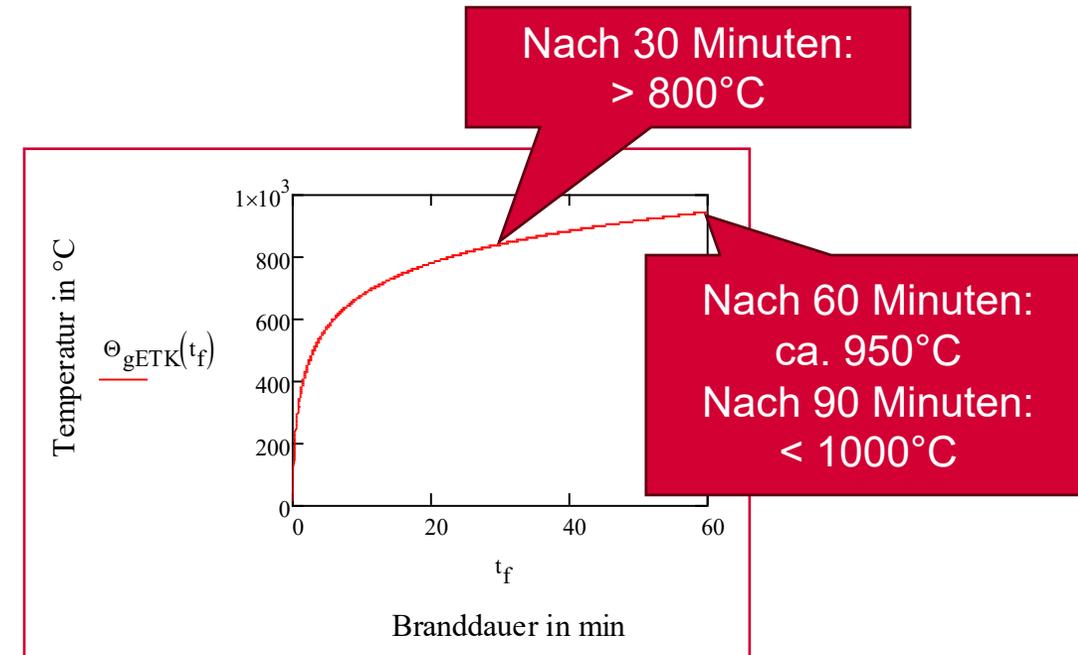
Schnee NN ≤ 1000 m: $\psi_2 = 0$

Büro: $\psi_2 = 0,3$

Versammlungsstätte: $\psi_2 = 0,6$

Ergebnis
→ Veränderliche
Einwirkungen sinken
deutlich

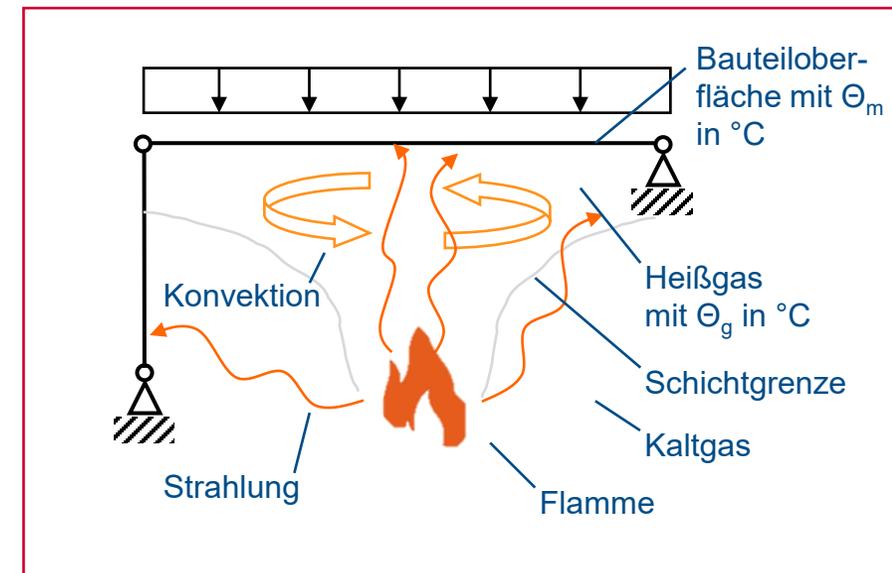
- Einwirkung für den Brandfall A_d
 - A_d : Heißgastemperatur nach Temperaturzeitkurve
 - Regelfall: Normbrand (Einheitstemperaturzeitkurve - ETK)
 - Temperaturen im Brandfall sind hoch und steigen nach ETK mit der Branddauer
 - Anforderungen nach BayBO
 - Feuerhemmend → 30 Minuten ETK
 - Hochfeuerhemmend → 60 Minuten ETK
 - Feuerbeständig → 90 Minuten ETK



Normbrand nach ETK

- Wärmetransport zu den Bauteilen

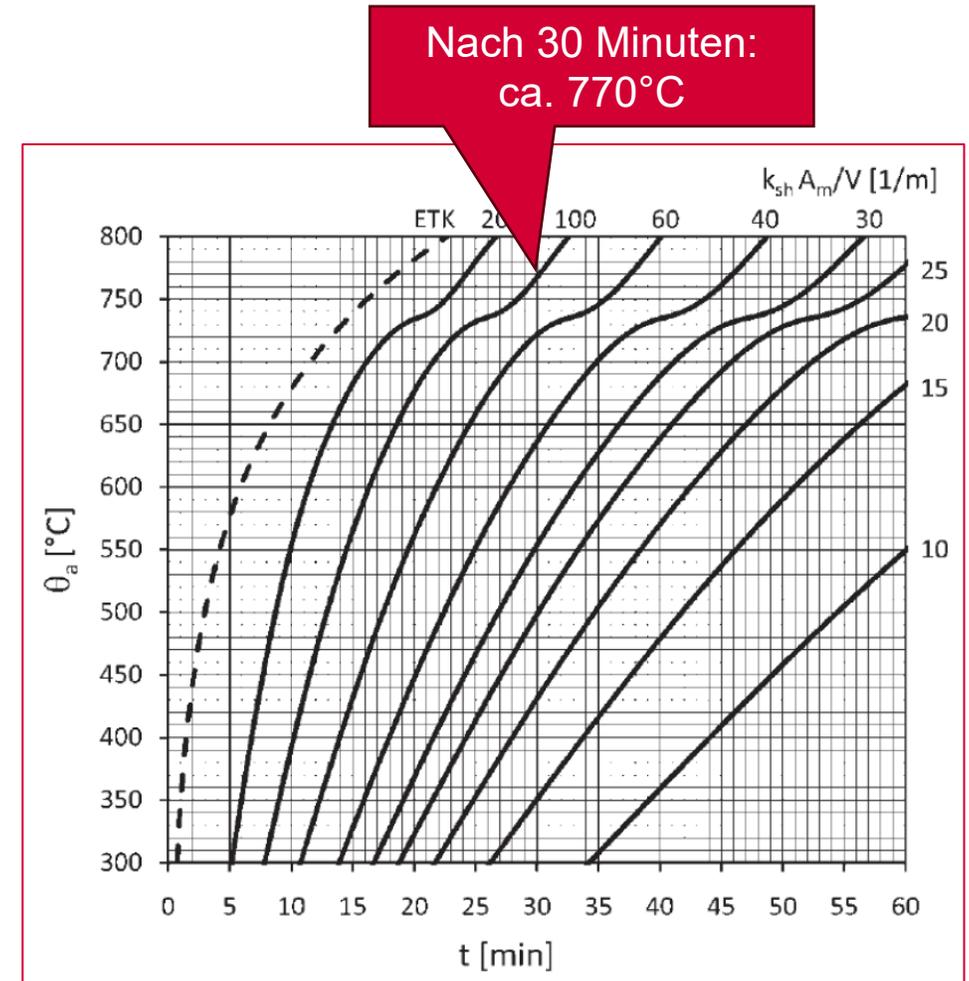
- Von Heißgas zur Bauteiloberfläche findet Wärmetransport statt → Wärmestrom
- Wärmestrom besteht aus Konvektion und Strahlung und nimmt mit dem Temperaturunterschied zwischen Heißgas und Bauteiloberfläche zu
- Konvektion: Mitführen von Wärme in strömendem Fluid
- Strahlung: Energieausbreitung über Wellen bzw. Teilchen



Wärmeströme im Brandraum

• Wärmeeintrag und Wärmeleitung im Bauteil

- Je größer die Bauteiloberfläche A_m , desto mehr Wärme pro Zeiteinheit wird in das Bauteil eingetragen
- Je kleiner das Bauteilvolumen V , desto schneller wird das Bauteil durcherwärmt
- Für ungeschützte Stahlprofile (bekannte spezifische Wärme) mit bekanntem Profilmfaktor $\frac{A_m}{V}$ lässt sich unter ETK-Beflammung die Bauteiltemperatur bestimmen
- Beispiel 30 Minuten ETK
IPE 550 mit $\frac{A_m}{V} \approx 100 \frac{1}{m} \rightarrow \theta_a \approx 770^\circ\text{C}$



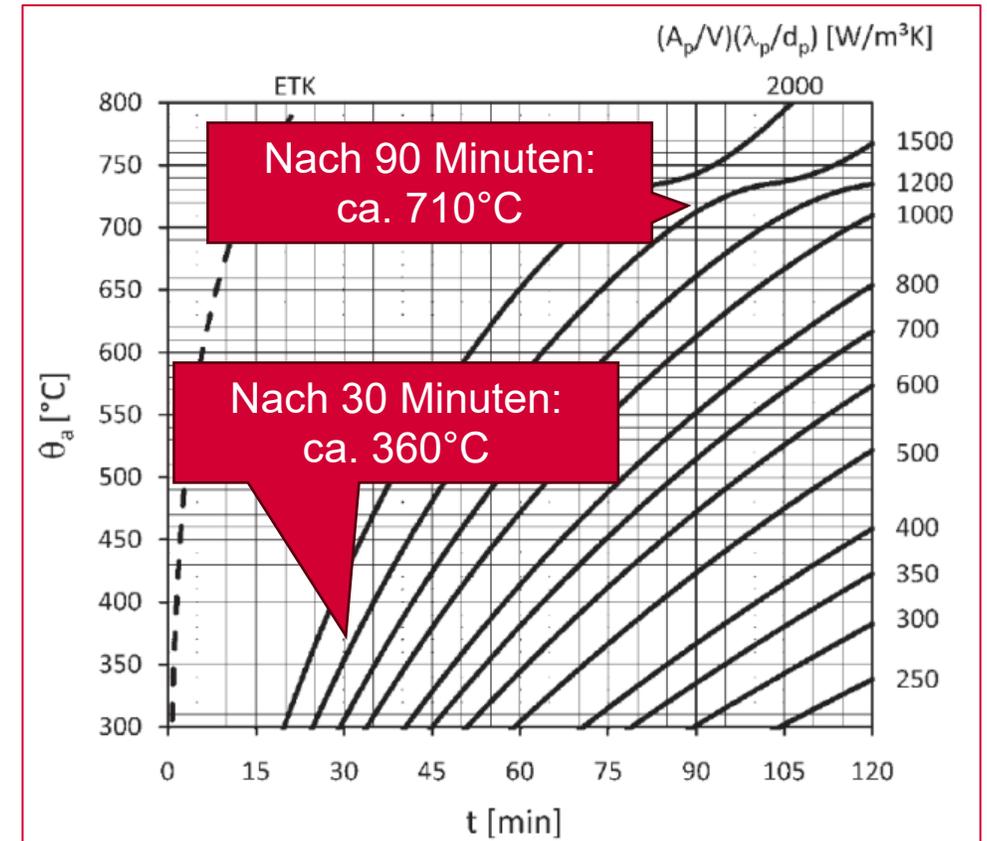
Erwärmung ungeschützter Stahlquerschnitte unter ETK-Beflammung

• Wärmeeintrag und Wärmeleitung im Bauteil

- Mit Putz- oder Plattenbekleidungen lassen sich Stahlprofile schützen, d.h. ihre Bauteiltemperatur im Brandfall zu begrenzen
- Für die Berechnung der Bauteiltemperatur sind hier die Dicke d_p , die Leitfähigkeit λ_p und die Oberfläche A_p der Bekleidung, sowie das Bauteilvolumen V erforderlich
- Beispiel 30 Minuten ETK

12,5 mm dicker GKF-Kasten an IPE 550

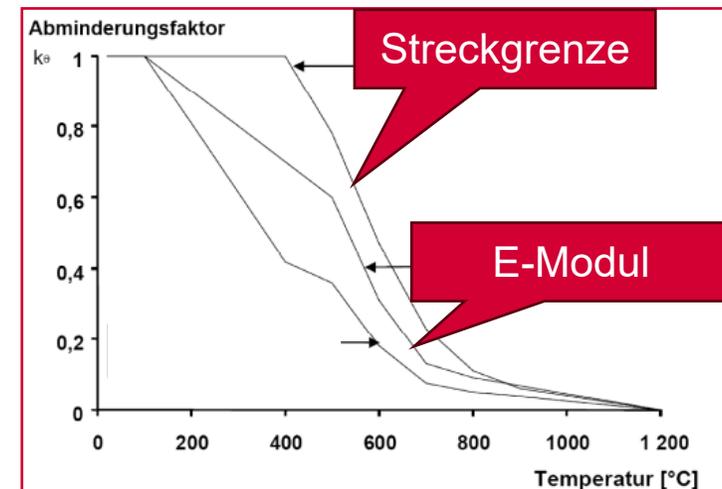
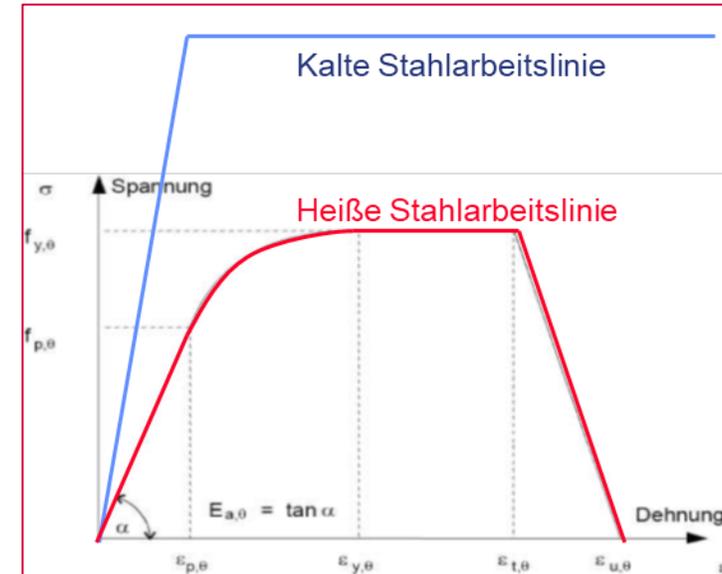
$$\frac{A_p}{V} \cdot \frac{\lambda_p}{d_p} \approx 1550 \frac{W}{m^3K} \rightarrow \theta_a \approx 360^\circ C$$



Erwärmung geschützter Stahlquerschnitte unter ETK-Beflammung

• Baustoffe im Brandfall

- Im Brandfall herrschen hohe Temperaturen, die die Baustoffkennwerte verändern
- Festigkeit bzw. Streckgrenze der Baustoffe (z.B. Stahl) sinken mit steigender Temperatur
- Bauteiltragfähigkeit $R_{d,fi}$ sinkt mit steigender Temperatur bzw. mit steigender Branddauer bei ETK-Befalmmung
- Steifigkeit (E-Modul) sinkt schneller als Streckgrenze
- Thermische Dehnungen und reduzierte Steifigkeit führt im Brandfall zu großen Verformungen
- Achtung: Stabilität!

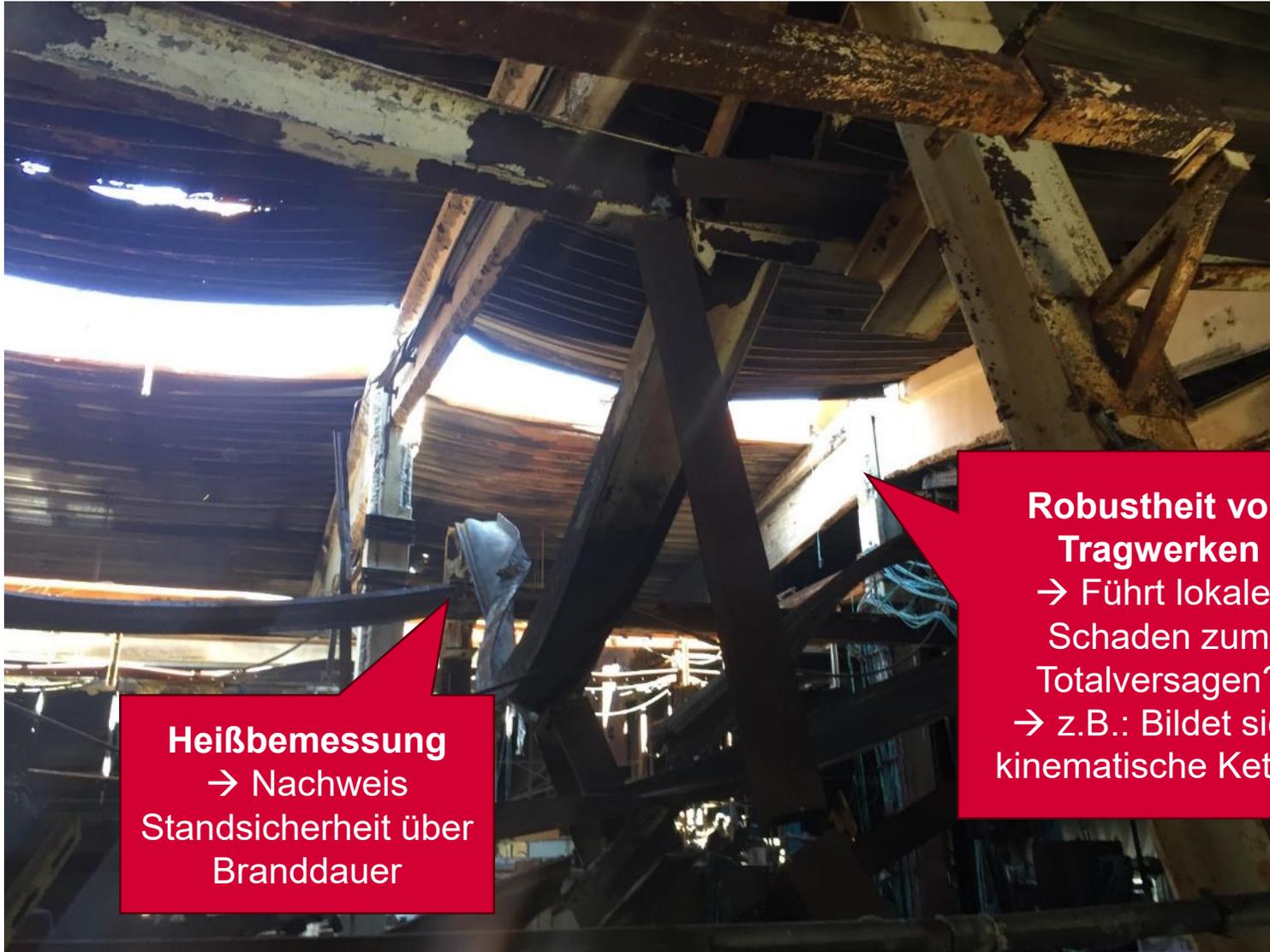


• Baustoffe im Brandfall

- Im Brandfall herrschen hohe Temperaturen, die die Baustoffkennwerte verändern
- Festigkeit bzw. Streckgrenze der Baustoffe (z.B. Stahl) sinken mit steigender Temperatur
- Für einen Spannungsnachweis (ohne Stabilität) gibt es eine kritische Temperatur $\theta_{a,cr}$, bei der die Reduzierung der Streckgrenze ($R_{d,fi}$!) gleich der Reduzierung der Einwirkung $E_{d,fi}$ ist
- Beispiel: Für $E_{d,fi} = 0,7E_d$ ist $\theta_{a,cr} = 526^\circ\text{C}$
→ Vergleiche Bauteiltemperaturen aus Beispielen!

Stahltemperatur θ_a	Abminderungsfaktoren bei Temperatur θ_a relativ zu dem Wert f_y oder E_a bei 20 °C		
	Abminderungsfaktor (relativ zu f_y) für die effektive Fließgrenze $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Abminderungsfaktor (relativ zu f_y) für die Proportionalitätsgrenze $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	Abminderungsfaktor (relativ zu E_a) für die Steigung im elastischen Bereich $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1 000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1 100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1 200 °C	0,000	0,0000	0,0000

ANMERKUNG Zwischenwerte dürfen linear interpoliert werden.



Heißbemessung
→ Nachweis
Standicherheit über
Branddauer

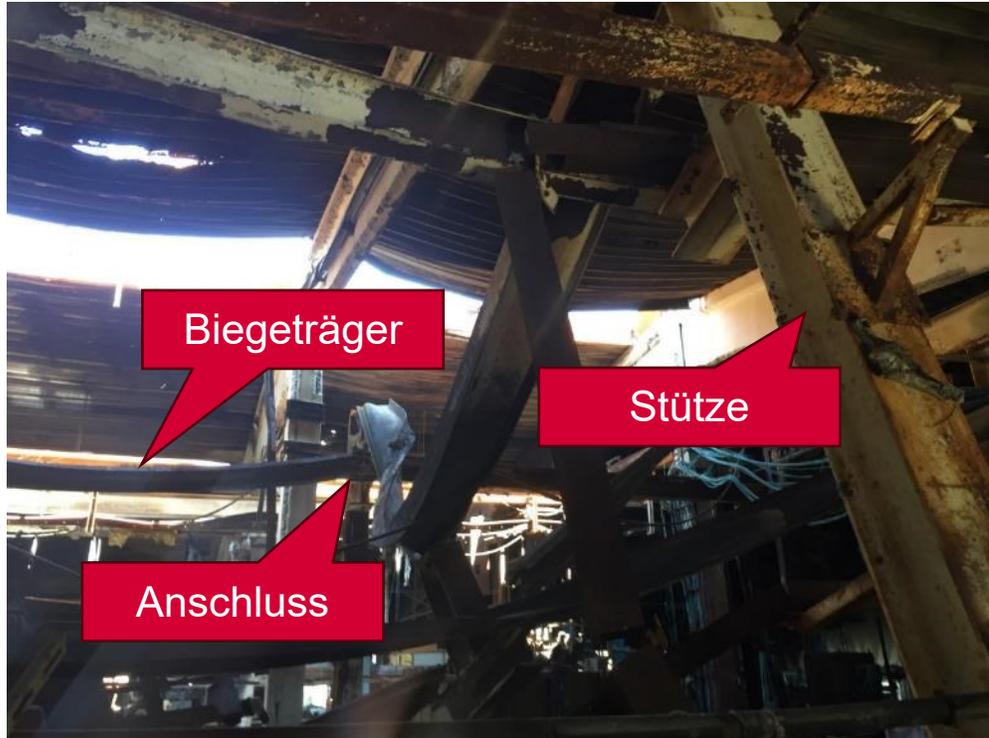
**Robustheit von
Tragwerken**
→ Führt lokaler
Schaden zum
Totalversagen?
→ z.B.: Bildet sich
kinematische Kette?



**ROBUSTHEIT VON
STAHLTRAGWERKEN**

**EINWIRKUNGEN UND
BAUTEILTEMPERATUREN**

**HEIßBEMESSUNG UND
IHRE GRENZEN**



• Heißbemessung

- Nachweis Standsicherheit über Branddauer (Feuerwiderstandsdauer)
 - Biegeträger
 - Stützen
 - Anschlüsse
- Spannungsnachweis oder Bauteilnachweis (Ersatzstabverfahren für Stabilität)
- Alternative für Spannungsnachweis: Nachweis mit kritischer Temperatur $\theta_{a,cr}$
- Bauteiltemperatur ist maßgebend für die Heißbemessung!

μ_0	$\theta_{a,cr}$	μ_0	$\theta_{a,cr}$	μ_0	$\theta_{a,cr}$
0,22	711	0,42	612	0,62	549
0,24	698	0,44	605	0,64	543
0,26	685	0,46	598	0,66	537
0,28	674	0,48	591	0,68	531
0,30	664	0,50	585	0,70	526
0,32	654	0,52	578	0,72	520
0,34	645	0,54	572	0,74	514
0,36	636	0,56	566	0,76	508
0,38	628	0,58	560	0,78	502
0,40	620	0,60	554	0,80	496

ANMERKUNG Der Nationale Anhang kann Werte für die kritischen Temperaturen enthalten.

• Beispiel Heißbemessung

- Biegeträger IPE 550, S235 ohne BDK (ohne Stabilitätsversagen) darf mit kritischer Temperatur $\theta_{a,cr}$ nachgewiesen werden
- Nach Norm DIN EN 1993-1-2 gilt in Deutschland für eine „kalte“ Ausnutzung $\mu_d = \frac{E_d}{R_d} = 1,0$ konservativ $\mu_0 = \frac{E_{d,fi}}{R_d} \leq 0,7$ und damit $\theta_{a,cr} = 526^\circ\text{C}$
- Beispiel: Für $\theta_a = \theta_{a,cr} = 710^\circ\text{C}$ muss die Tragfähigkeit R_d des Biegeträgers ca. 3,2-fach vergrößert werden, sodass $\mu_0 = \frac{E_{d,fi}}{3,2 R_d} = 0,22$
- Achtung: Bauteil ist nach Heißbemessung ggf. gegenüber Kaltzustand „überbemessen“ und funktioniert ungeschützt nur bis ca. 30 Minuten ETK-Beflammung!



Träger mit Brandschutzbeschichtung auf Epoxidbasis

- **Begrenzung der Bauteiltemperatur**

- Bauteiltemperatur ist maßgebend für die Heißbemessung
- Bauteil ist nach Heißbemessung ggf. „überbemessen“ gegenüber Kaltzustand
- Mit Putz- oder Plattenbekleidungen lassen sich Stahlprofile schützen, d.h. ihre Bauteiltemperatur im Brandfall zu begrenzen
- Alternative: Brandschutzbeschichtung (Reaktive Brandschutzsysteme) zur Begrenzung der Bauteiltemperatur
- Schlussfolgerung: Heißbemessung und Schutzmaßnahmen wirken zusammen!

• Zusammenfassung

- Robuste Tragwerke sind nach Bauordnung gefordert und baupraktisch gut umsetzbar
- Bei robusten Tragwerken stehen Schadensursache und Schadensfolge in einem guten Verhältnis
- Strategie Brandschutz (z.B. MIndBauRL)
 - Heißbemessung Haupttragelemente
 - Redundanz herstellen
 - Konstruktion für Zusammenhalt und Duktilität
- Heißbemessung und Schutzmaßnahmen wirken zusammen