



Brandereignisse in Schienenfahrzeugen – Ursachen und Erkenntnisse, Schlussfolgerungen und Abgleich zu anerkannten Regeln der Technik



Rail

Mehr Sicherheit.
Mehr Wert.

Dr.-Ing. J. Heyn
05.04.2016





Rail

Es werden Erkenntnisse aus untersuchten Brandereignissen anonymisiert aufgezeigt, so dass dem Fachgremium neben den normativen Vorgaben zusätzliche Informationen für risiko-basierte Analysen zu Komponenten und Fahrzeuge vermittelt werden.

Dies ist auch eine Basis zur Anforderungserfüllung für die Produkt- und Betreiberhaftung.





1 Schutzziele – Bewertungsbasis für alle Nachweiseführungen

2 Begrenzung von Brandauswirkungen

3 Bewertung von Brandereignissen

3.1 Brandereignis durch Vandalismus

3.2 Brandereignis durch Technikdefekt

4 Resümee zur Technikausrichtung

Personensicherheit

- mit Fokus auf den sicheren Aufenthalt im System „Bahn“
- mit Fokus auf das Erreichen sicherer Aufenthaltsbereiche zur Minimierung von weiteren möglichen Gefährdungen

Betriebssicherheit

- mit Fokus auf Gewährleistung der funktionalen Sicherheit im Bahnsystem
- mit Fokus auf möglichst nur kurze Betriebsunterbrechung bzw. wieder schnelle Verfügbarkeit

Sachschutz

- mit Fokus auf den Werterhalt von Fahrzeugen und Infrastruktur





Schutzziel: Im Falle eines Brandereignisses darf es zu keiner Handlungsunfähigkeit von Personen kommen!

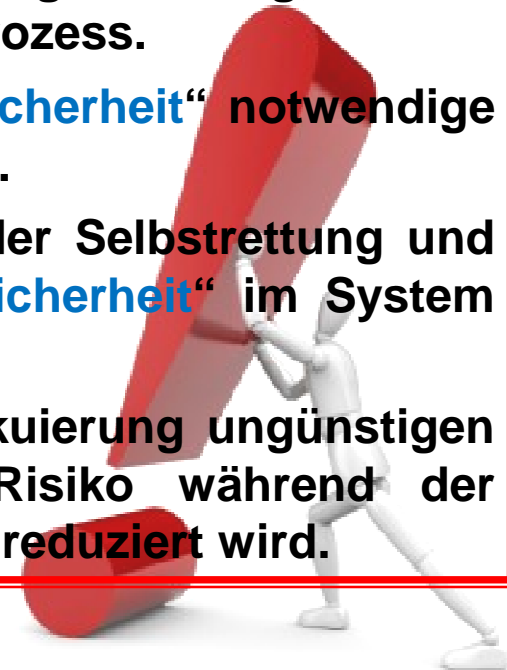
Es muss die **größtmögliche Personensicherheit** (Reisende, Personal sowie Rettungskräfte) unter Berücksichtigung der Verhältnismäßigkeit der dafür notwendigen Aufwendungen gewährleistet werden (beachten von ALARP).

Damit verbunden ist die Minimierung der Gesundheitsgefährdung, hervorgerufen durch das Brandereignis und den Rettungsprozess.

Die für das Erreichen eines Bereiches „**absoluter Sicherheit**“ notwendige Zeitspanne ist das entscheidende Akzeptanzkriterium.

Mindestens direkte Gefährdungen sind im Verlauf der Selbstrettung und beim weiteren Aufenthalt in Bereichen „**relativer Sicherheit**“ im System „Fahrzeug / Zug / Tunnel / Station“ zu verhindern.

Grundsätzlich sollte **kein Halt** in einem für die Evakuierung ungünstigen Bereich erfolgen, sodass das gesundheitliche Risiko während der Selbstrettung bzw. Flucht auf ein absolutes Minimum reduziert wird.



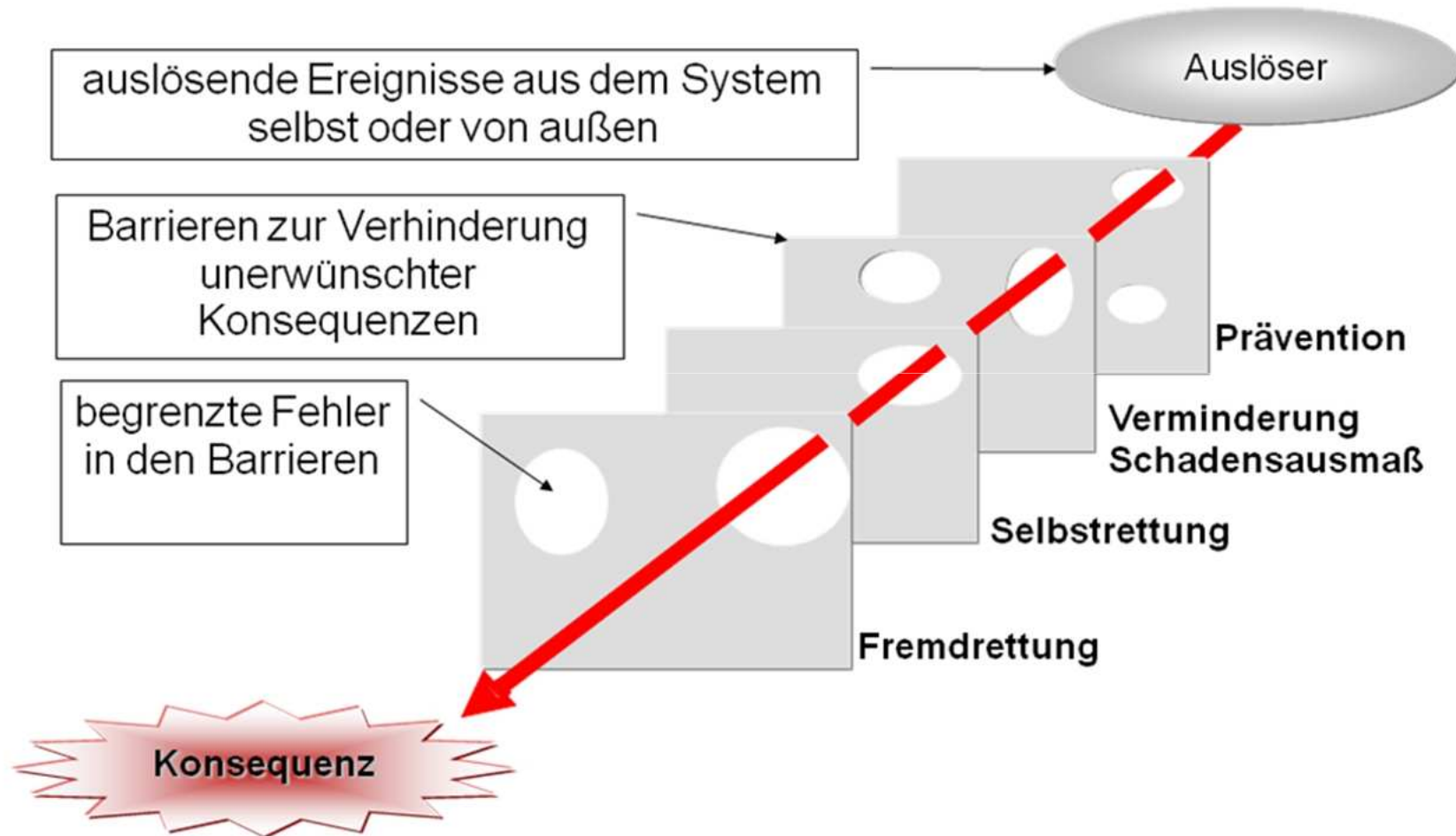


- 1 Schutzziele – Bewertungsbasis für alle Nachweiseführungen
- 2** Begrenzung von Brandauswirkungen
- 3 Bewertung von Brandereignissen
 - 3.1 Brandereignis durch Vandalismus
 - 3.2 Brandereignis durch Technikdefekt
- 4 Resümee zur Technikausrichtung

Schadensbegrenzung durch ein „Barriere-System“

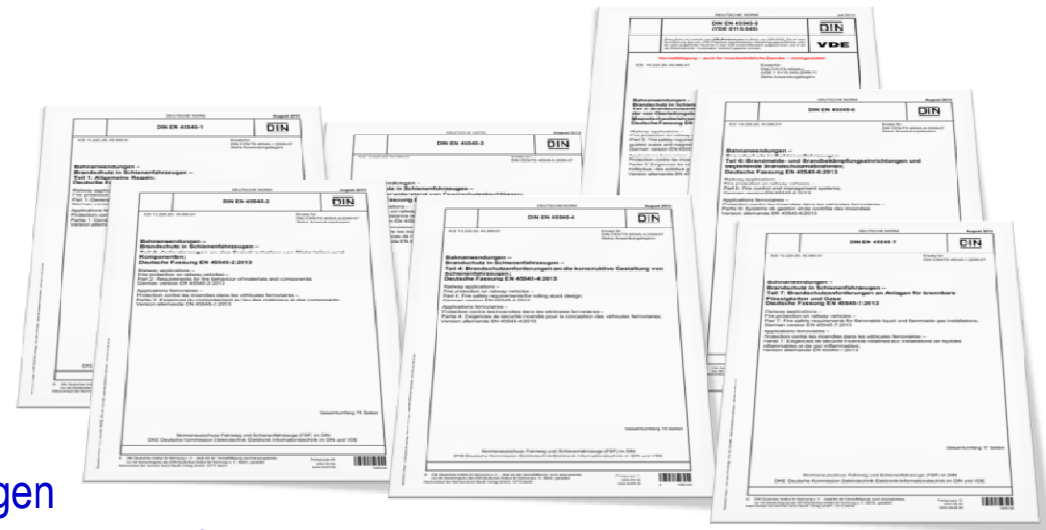


Rail



Ansatz:

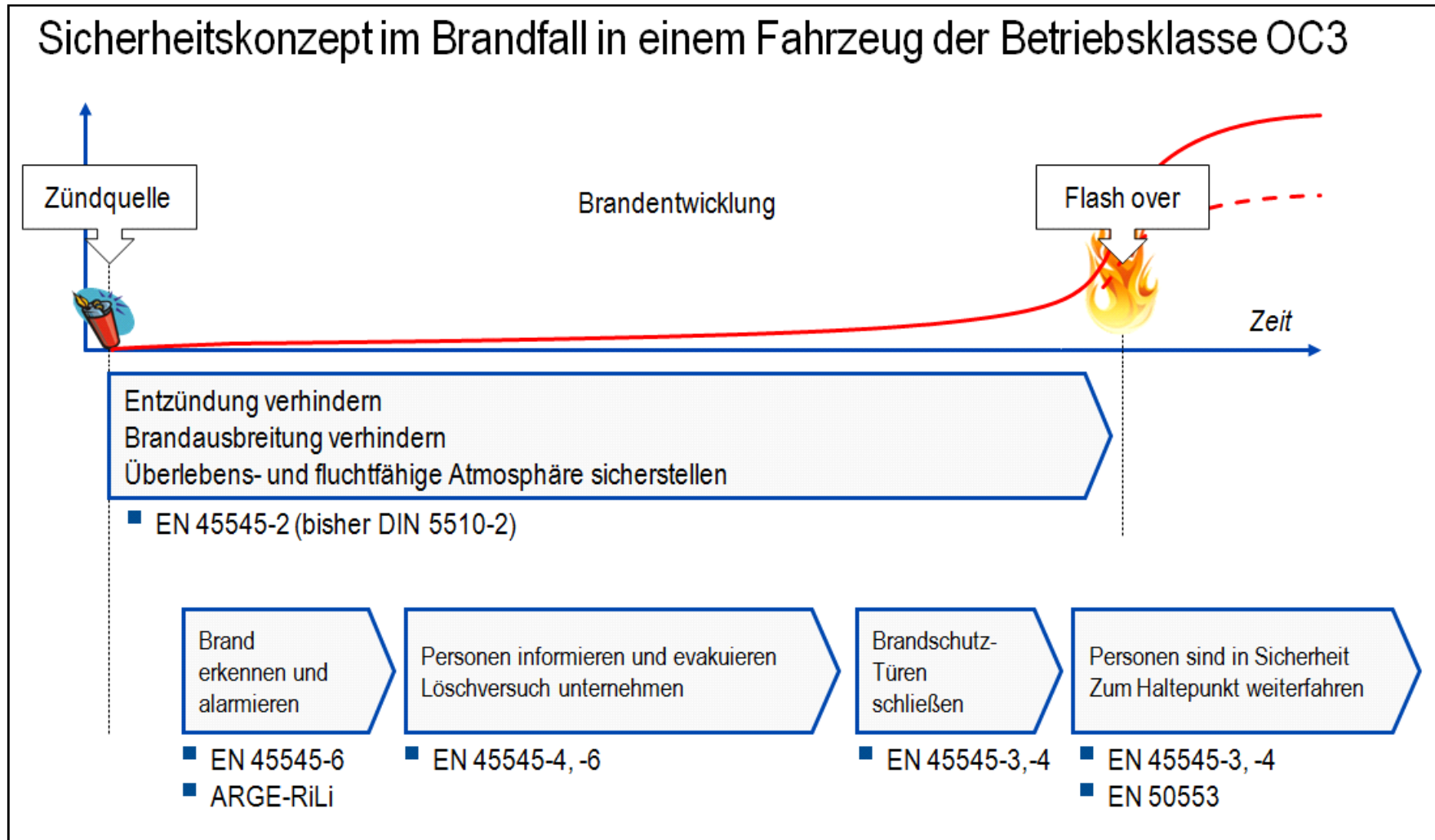
Die **anerkannten Regeln der Technik** (aRdT) sind als eine „Checkliste“ zur Nachweisführung zu verstehen. Zudem besteht die Möglichkeit eines „**Nachweises gleicher Sicherheit**“ (gegenwärtig für Modernisierungen und Fahrzeuge „außerhalb“ der TSI-Regularien möglich), soweit dies regulativ und behördlich zugestanden wird (eine vorherige Zusicherung ist dabei dringend angeraten).



Grundsatz:

Zu beachten ist, dass „**Technische Lösungen Vorrang vor betrieblichen bzw. organisatorischen Maßnahmen**“ haben.

Dieses ergibt sich auf Grund der Risikominimierung ausgehend vom „Human-Faktor“ (30% der Fehler). Hierbei ist die Verhältnismäßigkeit der dafür erforderlichen technischen Aufwendungen und die Praktikabilität der betrieblichen Maßnahmen zu beachten (siehe ALARP).



Brand-Entstehung → Brand-Entwicklung → Brand-Verlauf unter Beachtung der Auswirkungen

- **offener bzw. sichtbarer Brand**
direkte Erkennbarkeit von Flammen oder Rauch,
z.B. bei Unachtsamkeit oder Brandstiftung
- **versteckter Brand**
nur indirekte Erkennbarkeit
z.B. im Unterflur-, Schalt-
schrank- oder Dachbereich,
in der Regel nach einem
Technikdefekt
- **beschleunigter Brand**
bei flüssigen Brandlasten (z.B. Technikfehler)





1 Schutzziele – Bewertungsbasis für alle Nachweiseführungen

2 Begrenzung von Brandauswirkungen

3 Bewertung von Brandereignissen

3.1 Brandereignis durch Vandalismus

3.2 Brandereignis durch Technikdefekt

4 Resümee zur Technikausrichtung

Brand durch absichtliches Fehlverhalten

z.B. das Entzünden von Komponenten ist kaum noch möglich

z.B. das Entzünden von Papier oder **betriebsbedingt vorhandenen Stoffen (z.B. Brandlast „Reisetasche“)** ergibt das eigentliche Risiko – **die normative Anforderungen sind auf die Resistenz der Werkstoffe ausgerichtet (betrifft Entzündung, Brandausbreitung)**

Terrorismus (bewusste Inkaufnahme von Toten und Verletzten) ist **keine** Auslegungsgrundlage.

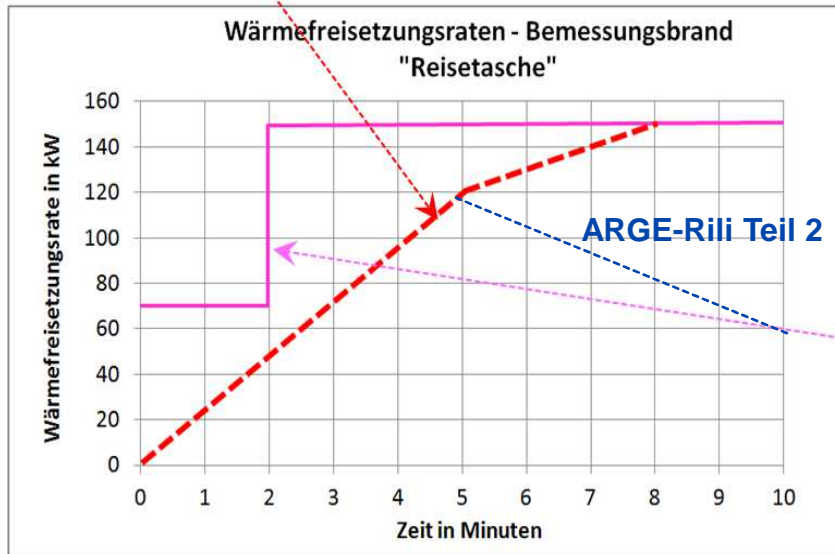




anerkannte Regeln der Technik zur Auslegung von Bahnfahrzeugen

Technische Regeln für Straßenbahnen
 Brandschutz in unterirdischen Betriebsanlagen
 nach der Verordnung über den Bau und Betrieb der Straßenbahnen (BOStrab)
 - Technische Regeln Brandschutz -
 (TR Strab BS)
 Ausgabe: Entwurf März 2012

Als Zündinitial für den Bemessungsbrand ist eine konstant ansteigende Energiefreisetzung bis 120 kW nach 5 Minuten und eine weitergehende Energiefreisetzung bis maximal 150 kW nach 8 Minuten zu berücksichtigen. Dabei ist die ungünstigste Stelle im Fahrzeug zu wählen. Führt dieses Zündinitial nicht zur Brandentwicklung im Fahrzeug, sind Einzelfallbetrachtungen zur Bestimmung des Bemessungsbrandes erforderlich.



DEUTSCHE NORM August 2013
 DIN EN 45545-1
 ICS 13.220.20; 45.060.01
 Ersatz für DIN EN/TS 45545-1:2009-07
 Siehe Anwendungsbeginn

Anhang A
 (informativ)

Zündmodelle im Anwendungsbereich dieses Dokuments

Die Prüfungen zum Brandverhalten von Materialien und Produkten (beschrieben in FprEN 45545-2 und FprEN 45545-3) und die Anforderungen an die konstruktive Gestaltung (beschrieben in FprEN 45545-4 bis FprEN 45545-7) unterstellen üblicherweise folgende Zündmodelle:

Zündmodell 1
 Um eine typische Zündquelle infolge Brandstiftung oder Vandalismus darzustellen, z. B. Zeitungen oder Abfall, hat die Flamme eine Dauer von 3 min und eine durchschnittliche Leistung von 7 kW, die eine Bestrahlungsintensität von 25 kW/m² bis 30 kW/m² erzeugt

ANMERKUNG 1 Das Zündmodell 1 wurde aus dem Papierkistentest nach UIC 564-2 entwickelt.

Zündmodell 2
 Um die Auswirkungen eines Brandes in einer frühen Entwicklungsphase auf nahe benachbarte Oberflächen darzustellen, z. B. horizontale Oberflächen von Sitzen oder Fußböden, ein Strahler mit einer Bestrahlungsintensität von nominell 25 kW/m² aufgeprägt auf einer Fläche von 0,1 m².

Zündmodell 3
 Um die Auswirkungen eines weiter als Zündmodell 2 entwickelten Brandes oder eines sich entwickelnden Brandes auf Oberflächen oberhalb oder längsseits darzustellen, z. B. Wände oder Decken, ein Strahler mit einer Bestrahlungsintensität von nominell 50 kW/m² aufgeprägt auf einer Fläche von 0,1 m².

Zündmodell 4
 Um die Auswirkungen eines Lichtbogens darzustellen, z. B. infolge des normalen Betriebs von elektrischer Hochleistungsausrüstung (wo Typ-A-Lichtbogenbarrieren wie in FprEN 45545-4 beschrieben notwendig wären) und Fehlern an elektrischer Ausrüstung niedriger Leistung, eine Flamme mit einer Leistung von 1 kW und 30 s Dauer.

Zündmodell 5
 Um Brände darzustellen, die schwerwiegender als Zündmodelle 1 bis 4 sind, z. B. Gepäckbrände und Brandstiftung. Für diese Brände ist das Zündmodell eine Flamme, die einen radiativen Wärmestrom mit einem Nominalwert im Bereich von 20 kW/m² bis 25 kW/m² auf einer Fläche von 0,7 m² erzeugt, mit einer durchschnittlichen Leistung von 75 kW für eine Dauer von 2 min, unmittelbar gefolgt von einem radiativen Wärmestrom mit einem Nominalwert im Bereich von 40 kW/m² bis 50 kW/m² auf der gleichen Fläche von 0,7 m², mit einer durchschnittlichen Leistung von 150 kW für eine Dauer von 8 min.

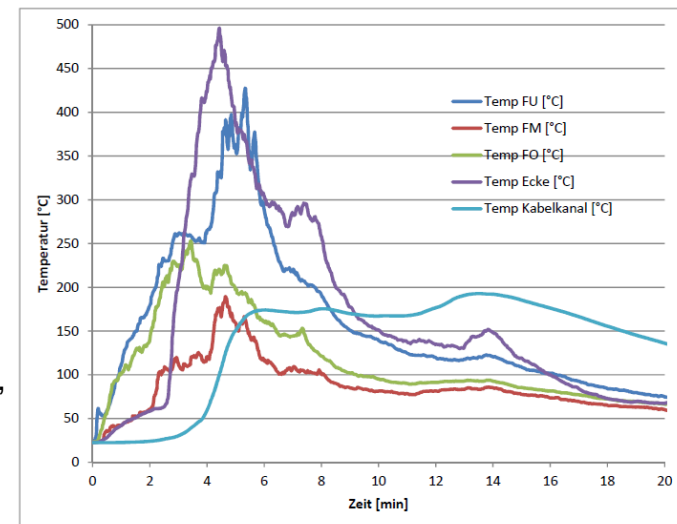
Diese fünf Zündmodelle werden angewendet, um die in 4.2, 4.3 und 4.4 beschriebenen Schutzziele zu erreichen.

Tests gemäß ARGE-Rili Teil 2 zum Nachweis der Funktionsgewährleistung z.B. von in der Voute verlegten Steuerleitungen (z.B. Bussystem, FIS) – beispielhafter Versuchsaufbau

Brandsituation nach 4 Minuten und nach 5 Minuten



- Temperaturen am/im Kabelkanal maximal 200° C ab der 13. Brandminute,
- es ergibt sich keine Schädigung / Entflammung der Kabelisolation,
- bis zur 4. Brandminute würden Daten sicher übertragen werden können (Temperaturbereich zwischen 70-100° C)





1 Schutzziele – Bewertungsbasis für alle Nachweiseführungen

2 Begrenzung von Brandauswirkungen

3 Bewertung von Brandereignissen

3.1 Brandereignis durch Vandalismus

3.2 Brandereignis durch Technikdefekt

4 Resümee zur Technikausrichtung



Rail

Brand ausgehend von Fehlern in brandlastführenden Systemen

Brennkraftmotoren – z.B. Dieselhochdruckleitung / -pumpe und Rücklaufleitungen (**häufige Brandursache**) sowie Kurbelgehäuseentlüftung, Filtersysteme

Brenntechnik – z.B. Warmwasservorheizung, Abgasreinigung

Ölkreisläufe – z.B. Hydrostatik, Schmierölsystemen, Sicherheitsventile

Brand ausgehend von Fehlern im Abgassystem

Abgasturbolader – mechanischer Defekt (**häufige Brandursache**)

Abgassammelleitung – mechanischer Defekt (begrenzte Wirkung, i.d.R. Abbrand von Verschmutzungen)

Brand ausgehend von anderen Motorkomponenten

Anlasser – Überhitzung bei Fehlfunktion

elektrische Leitungen – z.B. mechanische Defekte im Anlasserstromkreis

- **Normative Anforderungen zur E-Technik sind auf Hot-Spots ausgerichtet.**
- **Brandereignisse ausgehend von der Motorentechnik sind keine Auslegungsgrundlage. Hier müssen abschottende und diagnostizierende Maßnahmen wirken.**



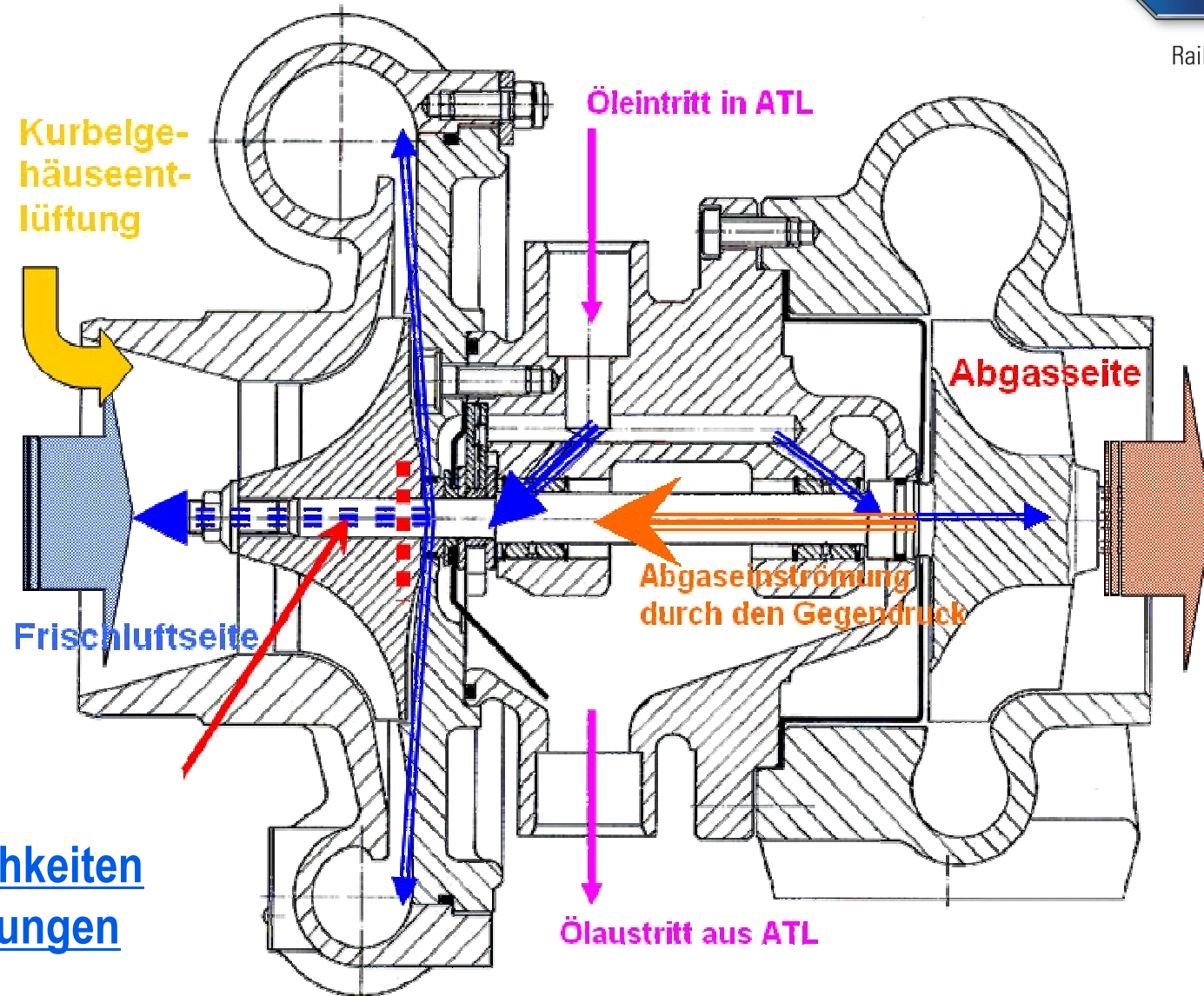
Brandursache betriebsbedingte Stresseinwirkung

1. Im Ergebnis der Bruchbildanalysen zu den geschädigten Läufern der Abgasturbolader war ein technischer Defekt ursächlich:
 - Gewaltbruch der Welle des ATL (Schädigung Abgasturbine)
 - Schwingbruch der Welle des ATL (Riefenanzeichen)
2. Das Öl-Luftgemisch zündete im Bereich des defekten Turboladers.
3. Wenn zwei Turbolader im Einsatz sind, ergibt sich keine Motorabstellung.
4. Die Brandausbreitung aus dem Unterflurbereich in den Fahrzeuginnenraum erfolgte über das Luftansaugsystem (Kunststoffkasten) über den Türsäulenschrank.
5. Es entwickelte sich ein hinter der Innendecke versteckter Brand (beinhaltet ein hohes Risikopotential).

Beispielrörterung – Brandfall „Turbolader-Defekt“



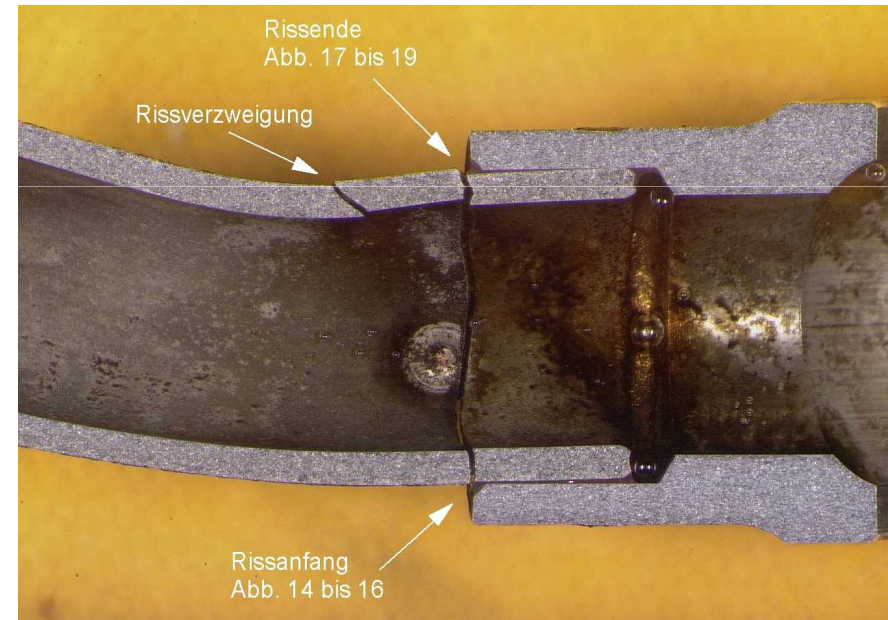
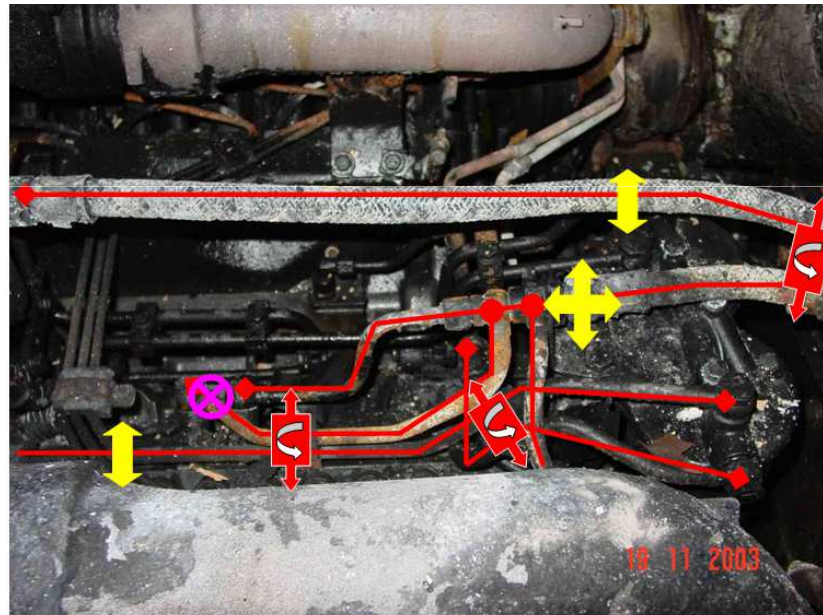
Rail



Fehlermöglichkeiten
und -auswirkungen

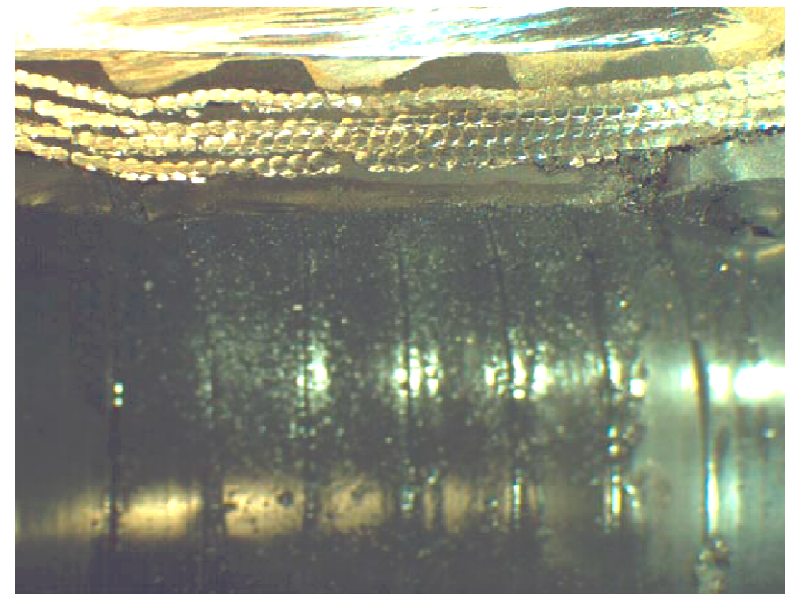
Brandursache betriebsbedingte Stresseinwirkung

Überlagerung von Schwingung ausgehend vom Motor und vom Fahrzeug auf Dieselrücklaufleitungen



Brandursache ausgehend von Produktionsfehler

- Vorliegender (systematischer) **Herstellungsfehler im Bereich der Schlauchverpressung** durch eine nicht vollständig oberhalb des „Stahlgeflechts“ entfernte Gummilage.
- Die Folge ist die **nicht spezifikationsgerechte Verzahnung** der Verpressung mit dem Stahlgeflecht des Schlauches.
- Diese führte bei einem hohen Schlauchinnendruck (max. Motordrehzahl im Grenzbereich) zum „Abrutschen“ des Schlauches und der **Freisetzung von unter Druck stehendem Hydrauliköl**, welches sich als Aerosol im Maschinenraum ausgebreitet und abgelagert hat.
- Bei Erreichen der Zündtemperatur des Aerosols ergab sich eine **extreme Verpuffung** mit nachfolgendem Brand im abgetrennten Maschinenraum.



V 13235

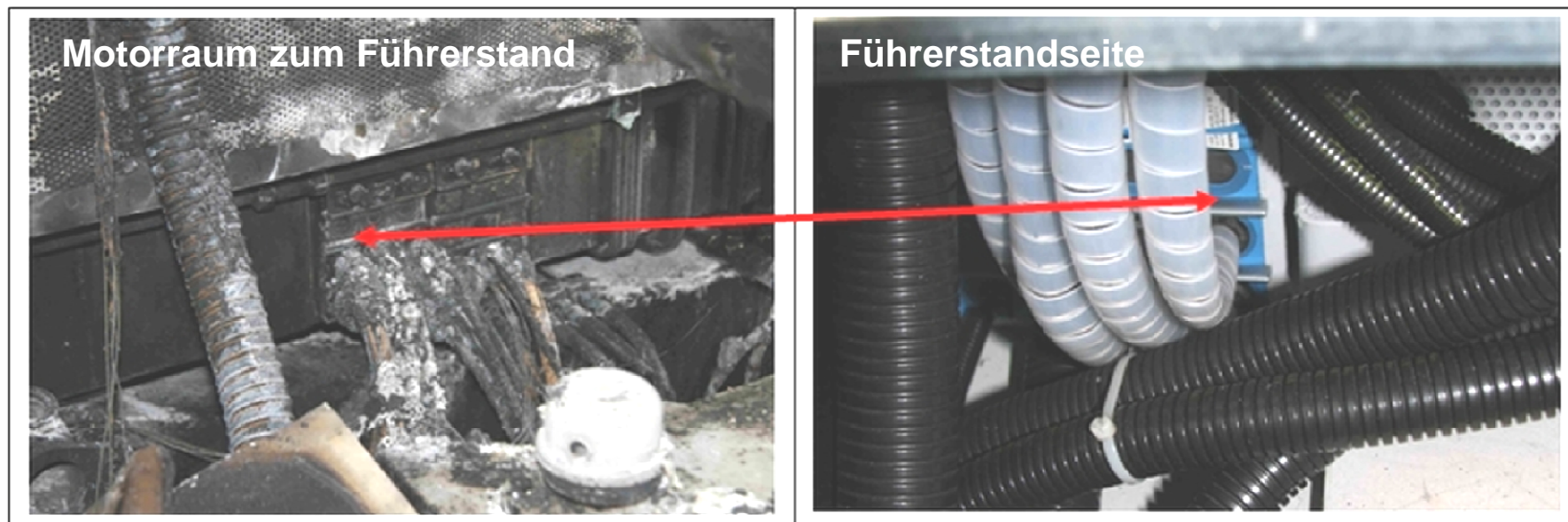
— 6 mm —

Beispielrörterung – Brandfall „Defekt Hydraulikschlauch“



Rail

wirksame Brandbegrenzung durch den Vorbau und die Kabeldurchführung

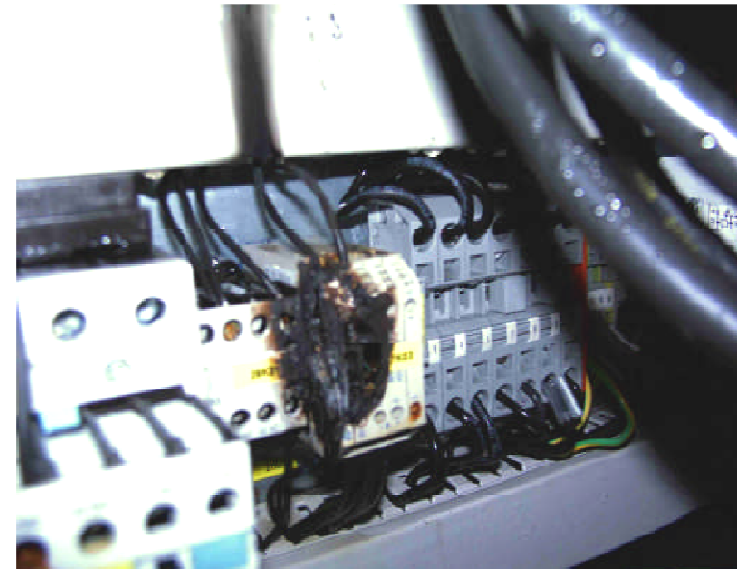


Brand ausgehend von Fehlern in elektrischen Komponenten

Hochspannung – z.B. Traktionsstromkreis
(in der Regel verbunden mit einer Sicherheitsabschaltung und befindlich in geschotteten Technikbereichen)

Mittelspannung – z.B. Heizstromkreis (**häufigste Ursache**),
Versorgung von Hilfsbetrieben

Niedrigspannung – z.B. Elektronik (**ist unkritisch**)



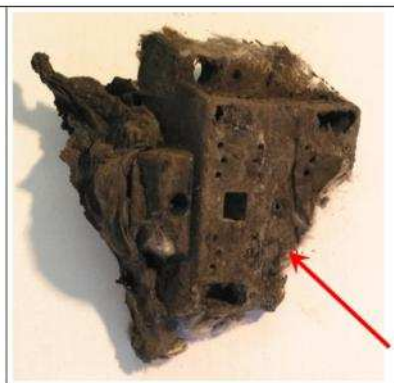
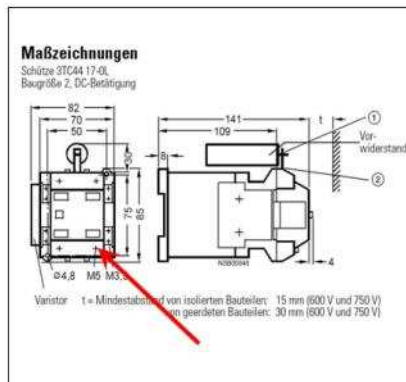
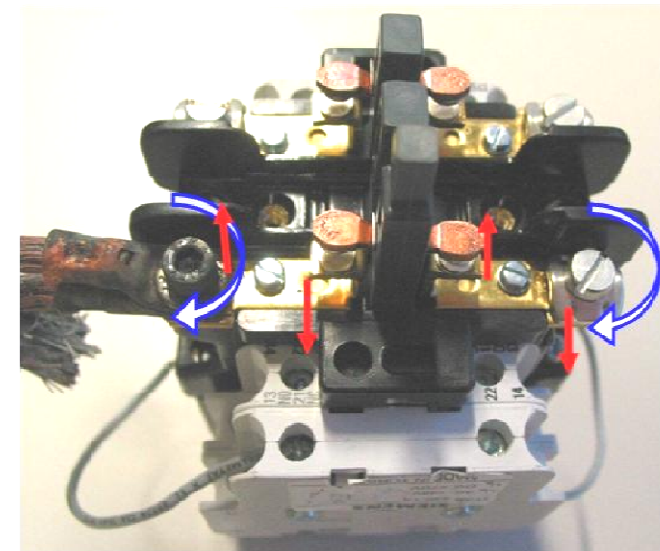
Brandursache fehlerhafte Klemmstellen

Das 670 V Heizsystem ist auf Grund der hohen Ströme sehr sensibel bezüglich der **Montage von Klemmen und Schützen und Leitungen**. „Falsche“ Anschlüsse können durch sich ergebende **hohe Übergangswiderstände** zu einer massiven Hitzeentwicklung in den Anschlussstellen führen.

Die Heizschütze selbst können in Folge einer Erwärmung der Spule, was zu einem Verklemmen und damit zu einem stehenden Lichtbogen führt, ebenfalls überhitzen.

Die Zündung des Brandes ist auf das Auftreten einer elektrischen Fehlerleistung und der damit verbundenen Wärmefreisetzung zurückzuführen.

Der Werkstoffnachweis wirkt nur begrenzt fehlerreduzierend.



Beispielrörterung – Brandfall „670V Heizstromkreis“



Rail



Schadenssituation: Kritikalität im Bereich von Busleitungen

- links zentraler Bus-Knoten (Neuzustand),
- mittig noch begrenzter Schaltschrankbrand,
- rechts Vollbrand ausgehend von einer Zündquellen im unteren Schaltschrankbereich



1 Schutzziele – Bewertungsbasis für alle Nachweiseführungen

2 Begrenzung von Brandauswirkungen

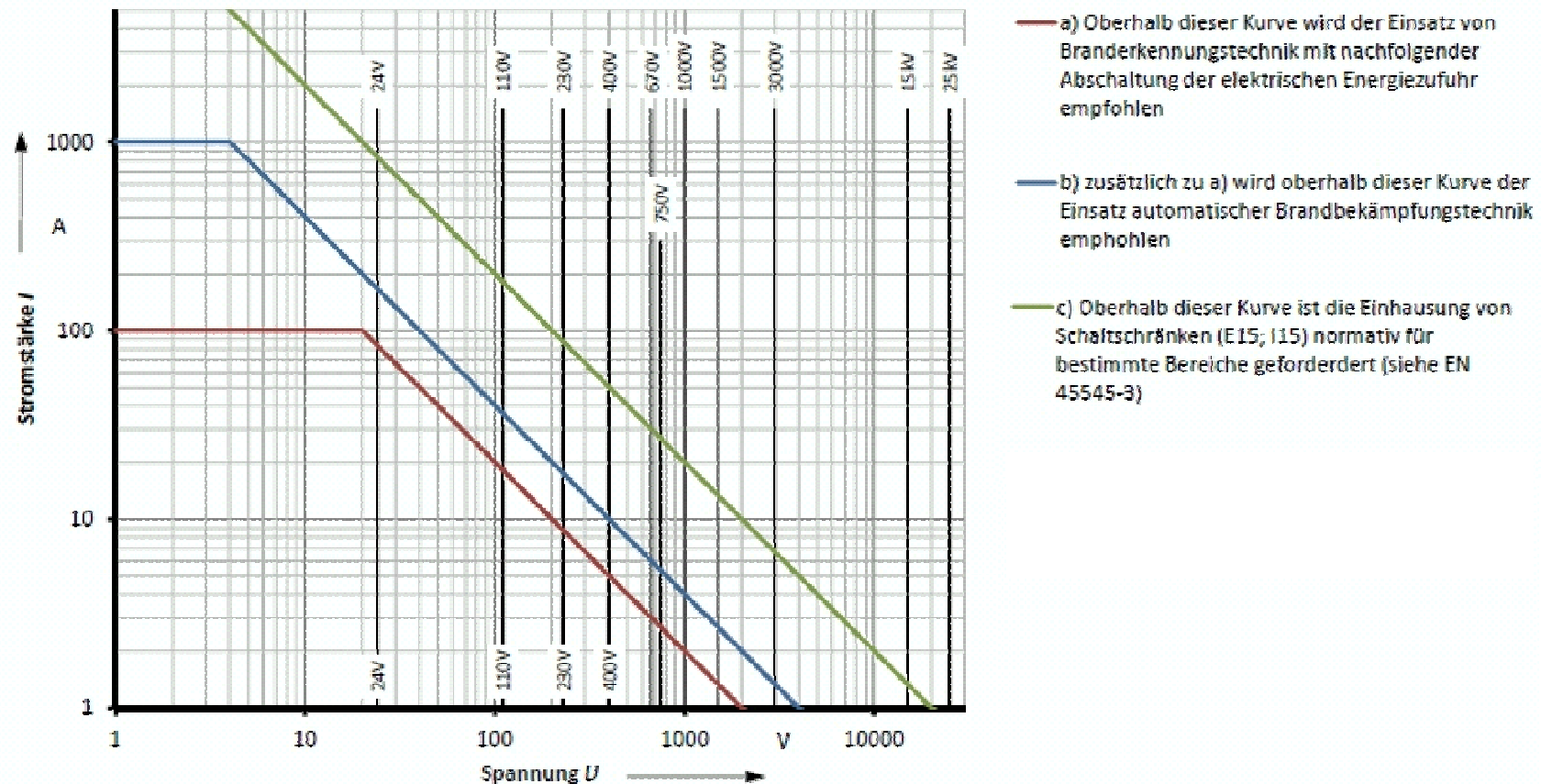
3 Bewertung von Brandereignissen

3.1 Brandereignis durch Vandalismus

3.2 Brandereignis durch Technikdefekt

4 Resümee zur Technikausrichtung

Maßnahmen zur Begrenzung des Schadensausmaßes bei technischen Zündquellen in elektrischen Einbauräumen



Beachten der unterschiedlichen Kritikalitäten ausgehend von technischen Defekten im Wechsel- und Gleichstromsystem (letzteres nicht im Diagramm enthalten – z.B. 24V-Anlasserstromkreis).

Prinzip der Risiko- und Schadensausmaßanalyse



Rail

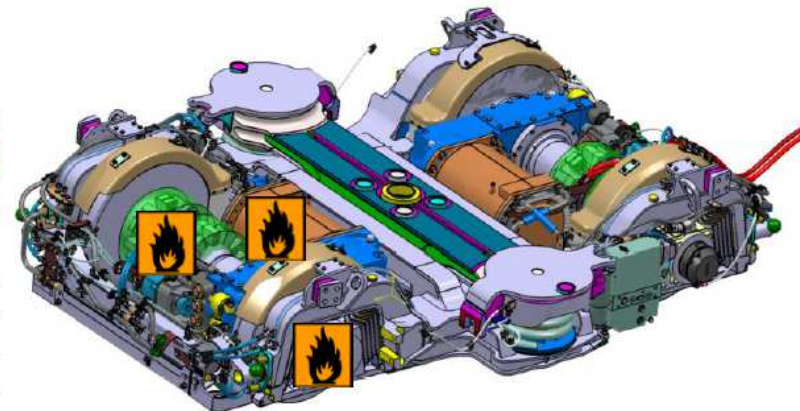
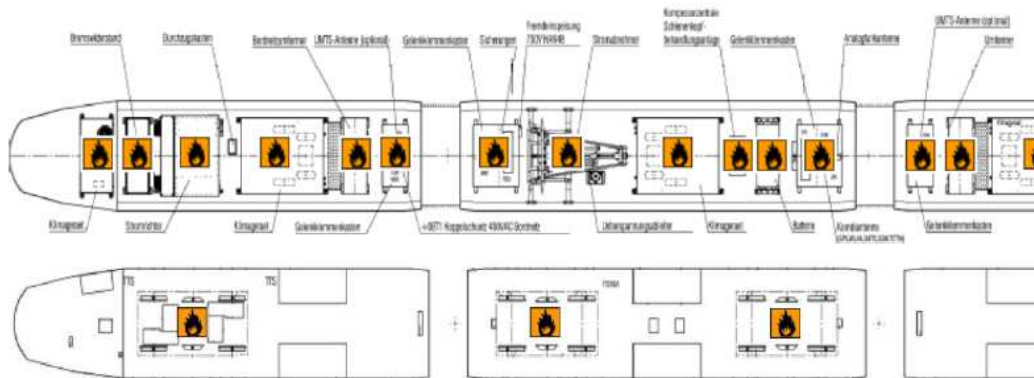
Ziel – identifizieren von Brandrisiken und Folgeereignissen ausgehend von:

- der Fahrzeugtechnik oder benachbarten Fahrzeugen
- möglichen Fehlhandlungen oder Unachtsamkeit

auch unter Berücksichtigung betrieblicher Abläufe bzw. Situationen.

Schwerpunkte der Analysen:

1. mögliche Zündquellen (Art, Temperatur, Leistung, Dauer)
2. Abstand entzündbarer Brandlasten von der Zündquelle
3. Brandszenario unter Berücksichtigung der getroffenen Maßnahmen (technische Auslegung, Werkstoffe, Brandschutztechnik, Ausbreitungsbegrenzung, Funktionsgewährleistung)



Ergebnis aus der Beurteilung des Brandrisikos bzw. Antwort auf die Frage:

Ist das mögliche Brandereignis bzw. sind die Auswirkungen in Bezug auf die definierten Schutzziele erfüllung akzeptabel?



Rail

➤ **Auswertung von Ereignissen / Schadensfällen unter Beachtung**

- der Randbedingungen (u.a. Betriebseinflüsse, Stressresistenz, Fahrlässigkeit)
- des Schadensausmaßes (u.a. Sachschaden, irreversible Verletzung, Todesfall)

➤ **Risikobewertungen u.a. in Anlehnung an FMEA-Prinzipien**

Verweis z.B. auf EN 60812 / EN 60695 / EN 14121 sowie
EN 50126 / CSM-VO (bezogen auf Brandereignisse nur qualitativer Ansatz möglich)

➤ **Fehlerfolgebetrachtungen**

unabhängige Doppelfehler können auf Basis von Wahrscheinlichkeitsbewertungen
ausgegrenzt werden (i.d.R. ergibt sich eine Fehlerverkettung)



**Eine Fixierung von Bewertungskriterien (Personen- und ggf. Sachschutz) sollte
möglichst im Ergebnis von Expertenerörterungen (Systemengineering) erfolgen.**

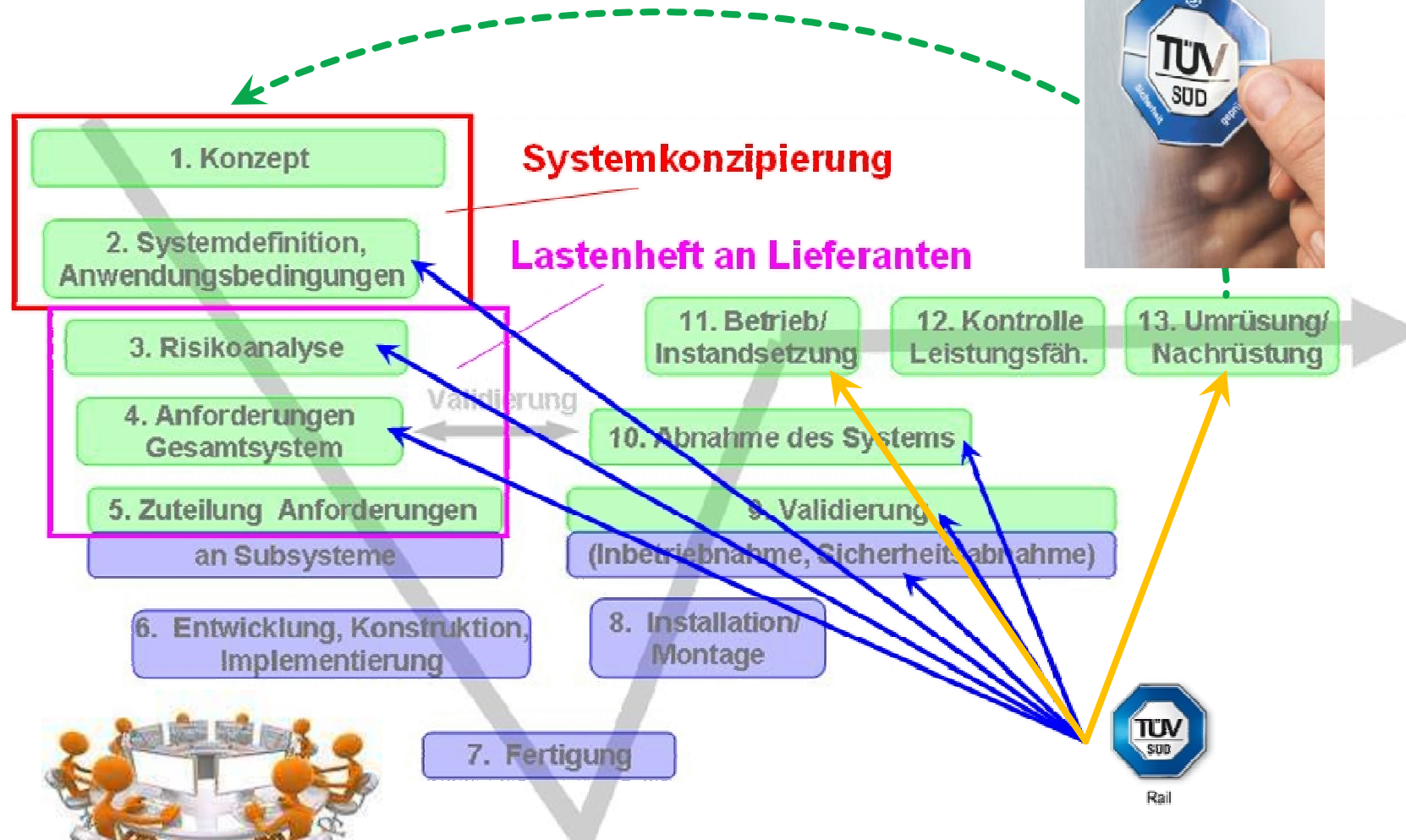
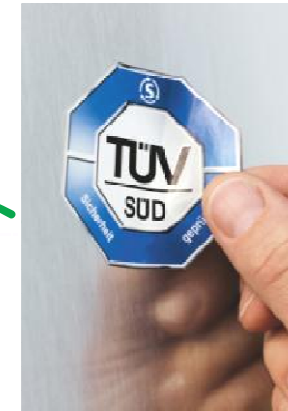
Zu beachten ist, dass

- eine 100%-tige Sicherheit nicht erreicht werden kann,
- eine Fahrlässigkeit oder Mutwilligkeit von Personenhandlungen nicht verhindert werden können.
- eine gezielte Komponentenanordnung / Brandrisikobereichsabtrennungen sinnvoll ist

Lebenszyklus eines „Projektes“ – mögliche TÜV-Mitwirkung



Rail



Prinzipielle Schrittfolge (siehe EN 50126)