

BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER LÄNDER
DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND

BERICHTE

Verhalten von ungeschützten trockenen Steigleitungen
bei direkter Flammeneinwirkung.

von Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

142

STÄNDIGE KONFERENZ DER INNENMINISTER UND -SENATOREN DER
LÄNDER, ARBEITSKREIS V, AUSSCHUß FÜR FEUERWEHR-
ANGELEGENHEITEN, KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG

**STÄNDIGE KONFERENZ DER INNENMINISTER UND -SENATOREN DER
LÄNDER, ARBEITSKREIS V, AUSSCHUß FÜR FEUERWEHRANGELEGEN-
HEITEN, KATASTROPHENSCHUTZ UND ZIVILE VERTEIDIGUNG**

Forschungsbericht Nr. 142

**Verhalten von ungeschützten trockenen Steigleitungen
bei direkter Flammeneinwirkung.**

von
Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann

Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

Karlsruhe
Januar 2007

FA.Nr. 198 (4/2005)

ISSN 0170-0060

INHALTSVERZEICHNIS

	BERICHTSKENNBLATT	1
1.	EINLEITUNG	2
2.	LÖSCHWASSERLEITUNG „TROCKEN“ – AUFBAU UND NORMATIVE FESTLEGUNGEN	4
3.	BRANDAUSBREITUNG – TEMPERATUREN BEI RAUM- BRÄNDEN - FLASHOVER	8
4.	WERKSTOFFBELASTUNG TROCKENER STEIGLEITUNGEN AUFGRUND HOHER TEMPERATUREN	17
5.	WÄRMEAUSDEHUNG UND WÄRMESPANNUNGEN	28
5.1	Wärmeausdehnung der Rohre – Festpunktbelastung	28
5.2	Wärmespannungen im Rohr – Thermoschock	33
5.3	Ausdehnung von Wasser im Rohr – Berechnung der Wärme- spannungen und Druckänderungen	38
5.4	Innendruck- und Druckstoßbeanspruchung	43
5.4.1	Innendruckbeanspruchung	43
5.4.2	Druckstoßbeanspruchung	47
6.	VERDAMPFUNGSVORGÄNGE IM BEHEIZTEN ROHR	52
7.	AUSWIRKUNGEN VON ERHÖHTEN TEMPERATUREN UND WÄRMESPANNUNGEN AUF ARMATUREN UND DRUCK- SCHLÄUCHE	68
7.1	Auswirkungen auf Armaturen	68
7.2	Auswirkungen auf Druckschläuche	72
8.	AUSWIRKUNGEN VON STEHENDEM UND FLIEßENDEM WASSER	73
9.	ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN	74
10.	LITERATURVERZEICHNIS	78
11.	ANHANG: DETAILS ZU TROCKENEN STEIGLEITUNGEN	84

BERICHTSKENNBLATT

Nummer des Berichtes: 142	Titel des Berichtes: Verhalten von ungeschützten trockenen Steigleitungen bei direkter Flammeneinwirkung.	ISSN: 0170-0060
Autor: Dipl.-Ing. Jürgen Kunkelmann	durchführende Institution: Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH), Hertzstraße 16, D-76187 Karlsruhe	
Nummer des Auftrages: 198 (4/2005)	auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung	
Abschlussdatum: Januar 2007		
Seitenzahl: 91	Bilder: 30	Tabellen: 21
Literaturverweise: 80		
Kurzfassung:		
<p>Gegenstand der Untersuchungen ist es zu klären, ob trockene Steigleitungen auch ungeschützt verlegt werden können, wenn sie durch Räume mit Brandlast geführt werden.</p> <p>In der Untersuchung wurden sowohl die Festigkeit und auftretenden Spannungen der Bauteile als auch die Wärmeausdehnung der Rohre, die Wärmeausdehnung von Wasser und die Bildung von Dampf in den Rohren bei einer Brandbelastung betrachtet.</p> <p>Hierbei wurde von folgenden Feststellungen ausgegangen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die durchschnittliche Zeit, bei der ein Flashover auftritt, beträgt ca. 7 min. • In der Vollbrandphase entstehen in einem Brandraum hohe Temperaturen von häufig über 1000°C. <p>Wesentliche Detailergebnisse der Untersuchung sind folgende:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Durch die hohen Temperaturen werden die Festigkeitskennwerte der Werkstoffe wie Dehngrenze, E-Modul und Zugspannung erheblich vermindert. Übliche Kautschukdichtungen in der Steigleitung werden bereits bei Temperaturen von größer als 80°C bis 110°C versagen. • Beim stehenden Wasser in der Steigleitung handelt es sich um den ungünstigsten Fall, der zu vermeiden ist, damit Einsatzkräfte der Feuerwehr und andere Personen nicht gefährdet werden. • Die größte Gefährdung ergibt sich beim Füllvorgang für die vollständig mit Wasser gefüllte ungeschützte Leitung, die durch Brandeinwirkung weiter aufgeheizt wird. Dieser Fall kann sehr schnell dann eintreten, wenn die Leitung geflutet wird und das Be- und Entlüftungsventil planmäßig bei einem Druck von 0,3 bar Überdruck schließt, aber noch kein Löschwasser über die Entnahmearmaturen entnommen wird. Aufgrund der Inkompressibilität des Wassers entstehen sehr hohe Drücke, die zum Bersten von Armaturen, Rohrleitungen und Druckschläuchen führen können. Als Faustformel kann angenommen werden, daß bei Wasser in den Leitungen je Grad Temperaturerhöhung der Druck um ca. 15 bar zunimmt, wenn dieser im geschlossenen System nicht abgebaut werden kann. Wie die in dieser Arbeit dokumentierten Berechnungen gezeigt haben, übersteigen diese Drücke um ein Vielfaches die Drücke, die aufgrund der Dampfdruckkurve des Wassers im Sättigungszustand entstehen können. • Aufgrund der unter diesen Voraussetzungen erwarteten Verdampfung von Löschwasser im Rohr besteht beim Ausströmen des Heißdampfes die Gefahr von Verbrühungen bei Feuerwehreinsatzkräften. <p>Als Ergebnis der vorgelegten Arbeit, dürften daher trockene Steigleitungen in keinem Fall ungeschützt verlegt werden, da bei deren Brandbelastung unkalkulierbare Gefährdungen auftreten.</p>		
Schlagwörter: Steigleitung, trocken, Festigkeit, Berstdruck, Wärmespannung, Thermoschock, Festpunktbelastung, Inkompressibilität, Druckstoß, Verdampfung, Armaturen, Dichtungen, Druckschlauch		

1. EINLEITUNG

Für die Bekämpfung von Bränden stehen solche Anlagen und Anlagenkomponenten zur Verfügung, mit denen Brände selbsttätig gelöscht werden können (z.B. Wasserlöschanlagen) und solche Komponenten, mit denen die Feuerwehren bei ihren Einsätzen unterstützt werden können.

Zu den unterstützenden Maßnahmen gehören z. B. fest verlegte Rohrleitungen, die einzelne Bereiche überbrücken und der Feuerwehr für den Löscheinsatz zur Verfügung stehen. Hierbei werden je nach Einsatzort nasse und trockene Steigleitungen unterschieden.

Der vorliegende Forschungsbericht befasst sich mit Sicherheitsaspekten von ungeschützt verlegten trockenen Steigleitungen.

Löschwasserleitungen (Steigleitungen) sind besonders in baulichen Anlagen festverlegte Rohrleitungen mit Feuerlösch-Schlauchanschlußeinrichtungen. Begriffe und schematische Darstellungen sind **DIN 14462 Teil 1 {2003} [3]** zu entnehmen.

Hierbei wird zwischen folgenden Bauformen unterschieden:

- Löschwasserleitung „naß“

Löschwasserleitungen „naß“ sind Verbrauchsleitungen, die ständig unter Druck stehen und von Trinkwasser durchflossen werden. An die Schlauchanschlußventile im Wandhydranten sind betriebsbereit angekuppelte Schlauchleitungen mit Strahlrohren angeschlossen. Die Löschwasserleitung „naß“ dient in erster Linie der Selbsthilfe (z.B. der Bewohner) bei der Brandbekämpfung. Für die Löschwasserleitungen sind ggf. Druckerhöhungsanlagen erforderlich (z.B. bei Hochhäusern).

- Löschwasserleitung „naß / trocken“

Löschwasserleitungen „naß/trocken“ sind Verbrauchsleitungen, die erst im Bedarfsfall selbsttätig mit Trinkwasser gespeist werden. Mit dieser Anlagenkonzeption soll erreicht werden, daß Löschwasser aus der normalen Wasserversorgung ohne oder mit nur geringer Verzögerung zur Verfügung steht, ohne daß abgestandenes, als Trinkwasser nicht mehr geeignetes Wasser in den Lei-

tungen verbleibt oder Wasserleitungen einfrieren. Im Bedarfsfall wird durch Öffnen eines Schlauchanschlußventils mit Grenztaster die Entleerung geschlossen, die fernbetätigte Füll- und Entleerungsstation automatisch geöffnet und das Leitungssystem mit Wasser gefüllt. Erst beim Schließen des letzten Schlauchanschlußventils (nach Gebrauch) schließt automatisch die Ventilstation und die Entleerung öffnet zwangsweise.

Die Ausstattung der Wandhydranten entspricht der Löschwasserleitung „naß“, nur daß hier die Schlauchanschlußventile mit Grenztaster ausgestattet sein müssen. Zur Entlüftung der Leitung während des Einspeisevorganges sowie zur Entleerung der Leitung nach Gebrauch sind an den obersten Punkten des Rohrleitungssystems Be- und Entlüfter vorzusehen.

- Löschwasserleitungen „trocken“

Bei dieser Ausführung einer Steigleitung wird erst im Bedarfsfall Löschwasser durch die Feuerwehr über eine Löschwasser-Einspeisevorrichtung eingespeist.

Folgender Vergleich der Löschwasserleitungen „naß“, „naß-trocken“ und „trocken“ (nach **Massong {2005} [4]**) zeigt Vor- und Nachteile der verschiedenen Bauformen von Löschwasserleitungen auf.

Anforderungen	Steigleitung naß	Steigleitung naß-trocken	Steigleitung trocken
Verfügbarkeit des Löschwassers	sehr gut	gut	schlecht
Frostschutz	schlecht	sehr gut	sehr gut
Hygiene	problematisch	unproblematisch	unproblematisch
Zentrale Meldeanlage	nicht vorhanden	vorhanden	nicht vorhanden
Betrieb durch	Feuerwehr und privat	Feuerwehr und privat	nur Feuerwehr

In dieser Untersuchung werden ausschließlich trockene Steigleitungen betrachtet.

Trockene Steigleitungen müssen aufgrund geltender Vorschriften bisher durch Abschnitte oder Räume geführt werden, in denen sich keine Brandlasten befinden. Ist dies nicht der Fall, müssen diese Leitungen feuerbeständig umkleidet werden, damit die Brandbekämpfung nicht gefährdet wird.

Gegenstand der Untersuchungen ist es zu klären, ob diese Steigleitungen auch ungeschützt durch brandbelastete Räume verlegt werden können. Von Interesse sind hierbei das Verhalten der ungeschützten Leitungen bei direkter Flammeneinwirkung und die Frage, welchen Einfluß stehendes bzw. fließendes Wasser auf das Verhalten der Steigleitung und ihrer Zusatzkomponenten hat.

Die Fragestellung geht auf einen Antrag der Berufsfeuerwehr Berlin (Senatsverwaltung für Inneres des Landes Berlin) zurück. So wird ein mögliches Szenario dadurch herbeigeführt, daß eine ungeschützte trockene Steigleitung durch eine Garage verlegt wird und es zu einem Fahrzeugbrand kommt.

2. LÖSCHWASSERLEITUNG „TROCKEN“ AUFBAU UND NORMATIVE FESTLEGUNGEN

Wie bereits der Tabelle in Abschnitt 1 über Vor- und Nachteile der verschiedenen Bauformen von Löschwasserleitungen zu entnehmen ist, dienen trockene Steigleitung nach **DIN 14462-1 {2005} [3]** nicht der Selbsthilfe, sondern sind ausschließlich für die Feuerwehr zur Einspeisung und Entnahme von Löschwasser ohne zeitraubendes Verlegen von Schläuchen bestimmt. Sie können auch zusätzlich zu Löschwasserleitungen „naß" oder „naß/trocken" gefordert werden.

Das nachfolgende **Bild 1** zeigt den schematischen Aufbau einer Löschwasserleitung „trocken“

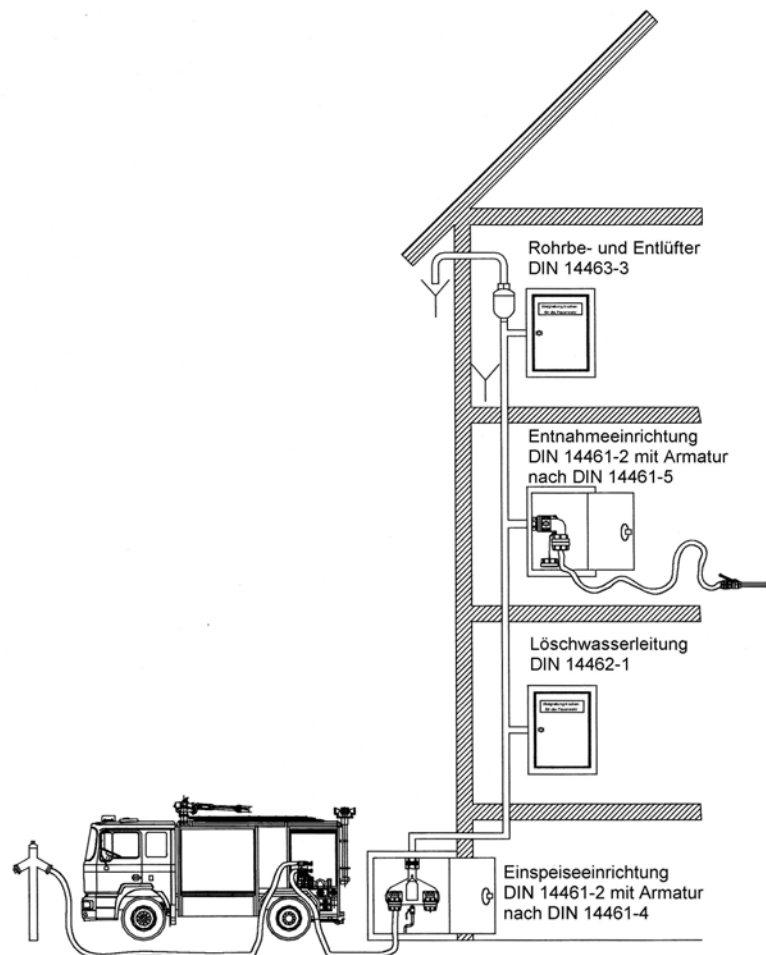


Bild 1: Löschwasseranlage „trocken“ nach DIN 14462-1 {2005} [3]

(Skizze nach: **Gloria {2005} [43]**)

Die Lösch Wasserleitung „trocken“ darf nach Norm keine unmittelbare Verbindung mit anderen Wasserversorgungssystemen besitzen. Werden in einem Gebäude mehrere Steigleitungen eingebaut, so ist jede Steigleitung getrennt zu führen und mit einer eigenen Einspeisung zu versehen.

Die Einspeisung ist (800 ± 200) mm Mitte Kupplungsebene über der für die für die Feuerwehr vorgesehenen Fläche und in deren unmittelbarer Nähe gut sichtbar und gut zugänglich anzuordnen.

Die Einspeisung von Löschwasser erfolgt durch die Feuerwehr über eine zum System gehörende Einspeisearmatur.

Die Leitung nach **DIN 14462-1 {2005} [3]** ist üblicherweise in DN 80 zu dimensionieren.

Leitungen DN 80 haben die folgenden Abmessungen (**Wagner {1983} [48]**):

Außendurchmesser: 88,9 mm

Innendurchmesser: 82,5 mm

Normalwanddicke: 3,2 mm.

Bei Einsatz geringerer Nennweiten und/oder bei Längen größer 100 m ist die ausreichende Dimensionierung rechnerisch nachzuweisen.

Die Leitungen sind für Nenndruck PN 16 zu bemessen. Bei einem Wasserdurchfluß von mindestens 300 l/min darf die Druckdifferenz zwischen Löschwassereinspeisung und ungünstigster Entnahmestelle maximal 1 bar plus geodätischer Steighöhe betragen.

Die Löschwasserleitung muss in jedem Geschoss Feuerlösch-Schlauchanschlusseinrichtungen haben.

Damit die Anschlüsse nicht von Unbefugten geöffnet werden können, werden für diese Ausführung Schlauchanschlußarmaturen ohne Handräder verwendet. Die Armaturen können mit einem entsprechenden Schlüssel für das Feuerweherschloß geöffnet und geschlossen werden.

Jeder Abzweig muß mindestens die Nennweite der angeschlossenen Ventile haben.

In Löschwasserleitungen „trocken“ sind außer den Einspeise- und Entnahmearmaturen keine weiteren Absperrreinrichtungen zulässig.

Die Werkstoffe müssen **Tabelle 1** der **DIN 14462-1 {2005} [3]** entsprechen.

Verbieten bestimmte Anwendungen den Einsatz von Rohrmaterial nach **Tabelle 1** so dürfen auch andere metallische Werkstoffe nach Abstimmung mit der Feuerwehr verwendet werden.

Tabelle 1: Rohrleitungsmaterialien für Löschwasserleitungen und Wandhydranten
anschlüsse in Trinkwasser-Installationen (DIN 14462-1{2005} [3])

Rohrleitungsmaterial	Rohre nach	übliche Verbindungstechniken	Rohrverbindungen nach
schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe (früher: feuerverzinkter Stahl)	DIN EN 10255 DIN EN 10240	Gewindeverbindung	DIN EN 10242
		Klemmverbindung	
nichtrostender Stahl	DVGW GW5411	Pressverbindung	DVGW W 534
		Klemmverbindung	
Kupfer	DIN EN 1057 DVGW GW 392	Pressverbindung	DVGW GW 2, DVGW GW 6
		Schweißverbindung	
		Klemmverbindung	DVGW GW 2, DVGW W 534
Innenverzinnertes Kupfer	DIN EN 1057 DVGW GW 392	Steckverbindung	DIN EN 1254
		Pressverbindung	DVGW GW 2, DVGW GW 6, DVGW GW 8, DVGW W 534
ANMERKUNG: Für Nichttrinkwasser-Installationen ohne besondere Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit kann auch schwarzes Stahlrohr verwendet werden.			

Die Entnahmestellen müssen (1200 ± 400) mm über dem Fußboden - gemessen von Fußboden-Oberkante bis Mitte Entnahmeeinrichtung - angeordnet sein.

Die Feuerlösch-Schlauchanschlüsseinrichtungen müssen so angeordnet sein, dass anzuschließende Knaggenteile mit dem Kupplungsschlüssel ungehindert betätigt werden können. Der Druckschlauch muss knickfrei angeschlossen werden können.

In der Nähe der obersten Entnahmestelle müssen eine für die Prüfung ausreichend große Abflussmöglichkeit und ein entsprechender Entwässerungsanschluss vorhanden sein.

Liegt die oberste Entnahmestelle mehr als 30 m über der Einspeiseeinrichtung, ist eine Druckerhöhungsanlage erforderlich.

Die Löschwasserleitung muß entleert werden können. Die Entleerungseinrichtung muß verplombbar sein. Befindet sich die Entleerungseinrichtung im Innern des Gebäudes, so ist in ihrer unmittelbaren Nähe eine ausreichende Entwässerungsmöglichkeit vorzusehen.

Die im **Anhang** der Vollständigkeit halber wiedergegebenen **Bilder** und **Tabellen** stellen Details der einzelnen Bauelemente von trockenen Steigleitungen dar. Diese Details werden in dieser Ausführlichkeit wiedergegeben, weil insbesondere die Kenntnis der verwendeten Materialien in den weiteren Ausführungen dieses Berichts für das Verständnis von Bedeutung ist.

3. BRANDAUSBREITUNG – TEMPERATUREN BEI RAUMBRÄNDEN - FLASHOVER

Bei einem Brand in einem Raum ist ohne schnelle Alarmierung, ohne frühzeitige Löschmaßnahmen bzw. schnellen Feuerwehreinsatz mit erheblichen Personen- und Sachschäden durch die schnelle Brand- aber vor allem Rauchausbreitung zu rechnen. Besonders schlafende Personen sind durch die entstehenden toxischen Brandgase sowie Sauerstoffmangel beträchtlich gefährdet.

Im nachfolgenden soll gezeigt werden, welche Wärme- und Temperaturbelastungen bereits bei gewöhnlichen Raumbränden auftreten können und im Endeffekt eine trockene Steigleitung belasten können.

An dieser Stelle soll zunächst auf das Brandphänomen des Flashovers eingegangen werden (**Kunkelmann {2003, 2002} [1, 2]**).

Der Flashover (siehe **Bild 2**) tritt auf, wenn sich in einem Raum die Oberfläche des brennbaren Materials durch Wärmestrahlung aus den Flammen und aus der heißen Rauchschiicht unterhalb der Decke soweit aufgeheizt hat, daß flächendeckend brennbare Pyrolysegase und –dämpfe kurzfristig und in großer Menge entstehen. Es kommt zu einer Rußanreicherung und Sauerstoffverringernng, verbunden mit einem kurzfristigen Temperaturabfall. Hierbei geht der Brand von einem brandlastgesteuerten zum ventilationsgesteuerten Brand über. Bei eingeschränkter Sauerstoffzufuhr in den Brandraum wächst die Konzentration der

bei der Pyrolyse produzierten brennbaren Gase und von Kohlenmonoxid in der Rauchschicht trotz vorhandener Zündquelle über die obere Zündgrenze an. Es bilden sich Flammzungen („dancing angels“) an der Grenzschicht Rauch/Luft wo ein zündfähiges Konzentrationsverhältnis vorliegt.

Nach dem Flashover brennt in der Regel das gesamte im Raum befindliche brennbare Material, es kommt zur Durchzündung des gesamten Raumes. Als Temperaturkriterium für das Auftreten eines Flashovers wird häufig ein Wert zwischen 500°C bis 600°C in der Rauchschicht (Deckenbereich) und ein Wärmestrahlungskriterium von ca. 20 kW/m² im Bodenbereich angenommen. Durch frühzeitige Abkühlung des Brandrauchs (Löscheinsatz) wird die Gefahr eines "Flashovers" durch die Eindämmung der Pyrolyse erheblich verringert.

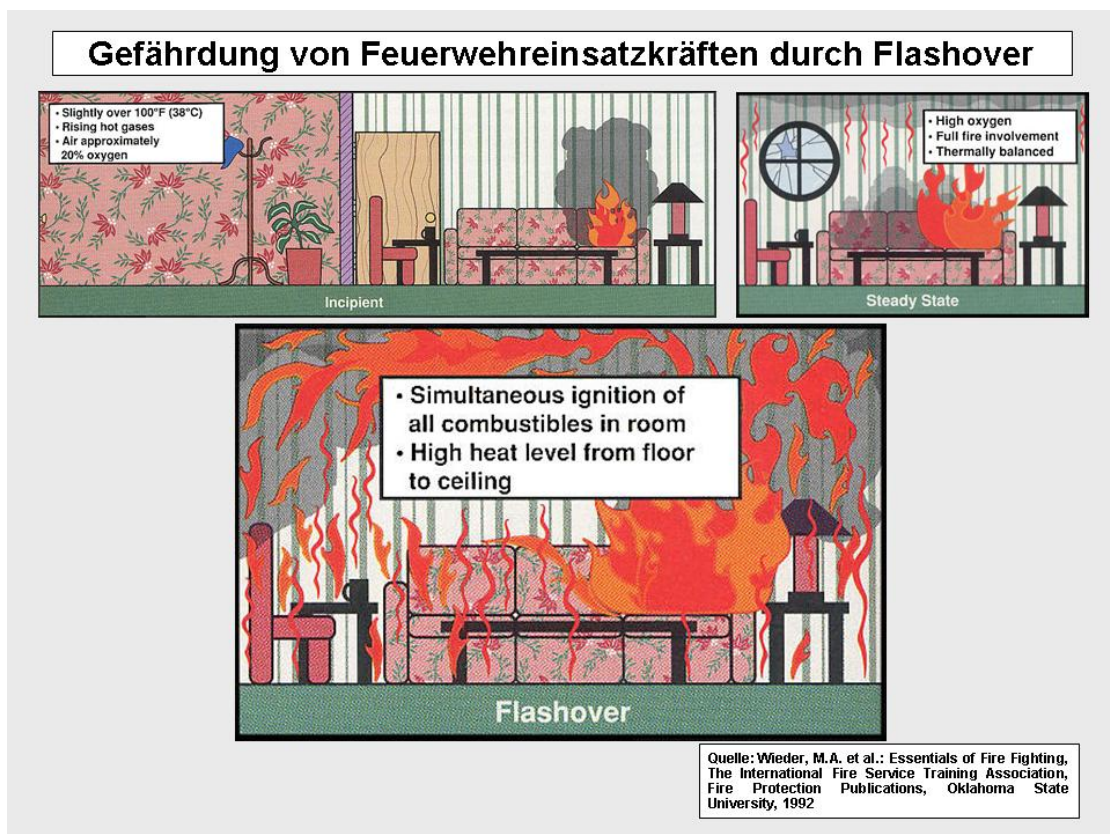


Bild 2: Schematische Darstellung eines Flashovers

Die Einflußfaktoren für die Entstehung eines Flashovers sind:

- Art, Zündverhalten, Heizwert, Menge und Anordnung der Brandlast
- Geometrie des Raumes
- Ventilationsbedingungen (z.B. Größe von Tür- und Fensteröffnungen)
- Thermische Eigenschaften von Wänden, Decke und Fußboden

Nachfolgend werden einige Ergebnisse aus zwei Raumbrandversuchen an der Forschungsstelle für Brandschutztechnik gezeigt (**Bilder 3 bis 11**).

Bei dem dargestellten Versuch 1 wurde neben der Brand- und Rauchausbreitung die Temperaturbelastung von Stahlträgern untersucht

Bei Versuch 8 handelte es sich um einen Raumbrand mit vorgesetzter Ganzflächendoppelfassade mit Einscheibensicherheits-Verglasung vor dem Brandraumfenster.

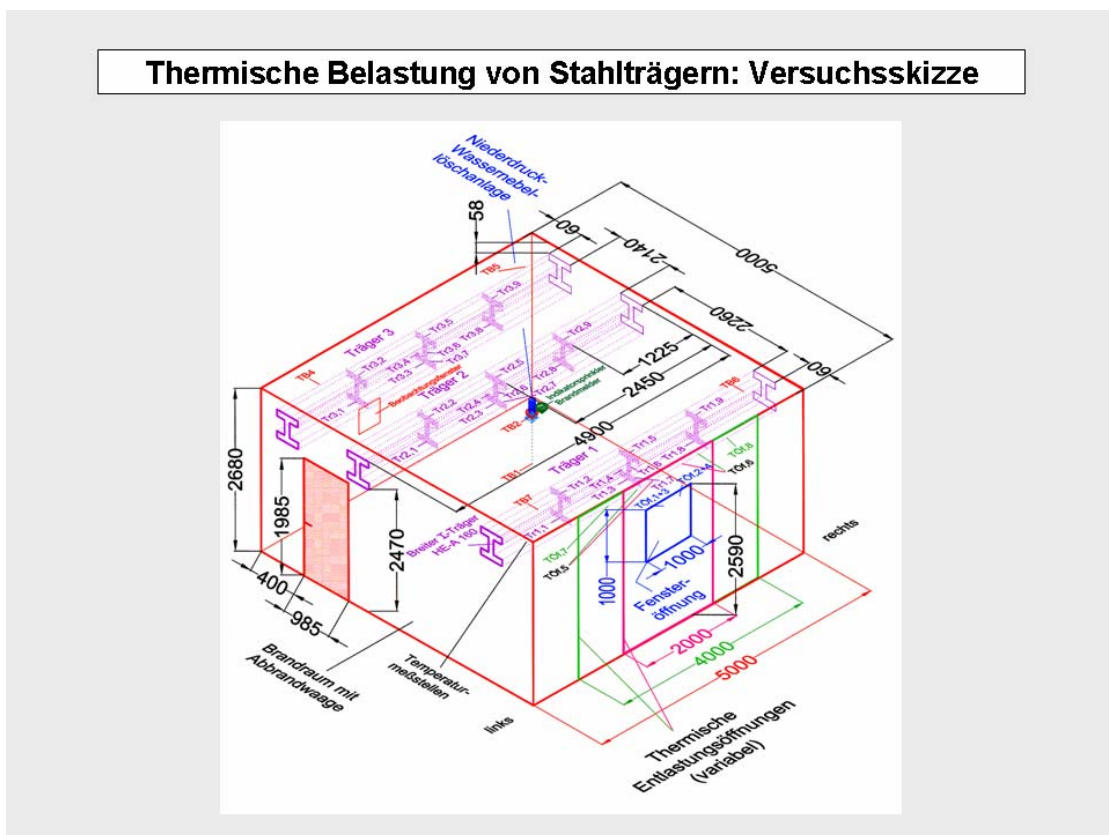


Bild 3: Versuchsaufbau – Thermische Belastung von Stahlträgern

Versuch 1 (Thermische Belastung von Stahlträgern): Versuchsaufbau



Brandraum mit Stahlträger 1, 2 und Fensteröffnung



Brandraum mit Stahlträger 3 und Brandraumtür



Brandlast: ca. 336 kg (Holzkrippen: ca. 314 kg, Linoleum: ca. 19 kg, Nadelfilzteppichboden: ca. 2 kg, Heptan: 1 l)



Temperaturmeßstelle am Stahlträger



Messung der Durchbiegung von Stahlträger 1

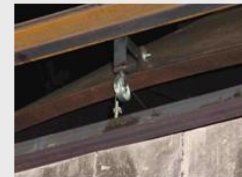


Bild 4: Versuchsaufbau – Versuch 1: Thermische Belastung von Stahlträgern

Versuch 1 (Thermische Belastung von Stahlträgern): Versuchsablauf



1 min 8 s (nach Zündung) im **Brandraum**



10 min 42 s (nach Zündung) im **Brandraum**



10 min 42 s (nach Zündung) an der **Fensteröffnung**



12 min 42 s (nach Zündung) im **Brandraum**



12 min 58 s (nach Zündung) im **Brandraum**
Flashover



12 min 58 s (nach Zündung) an der **Fensteröffnung**
Flashover

Bild 5: Versuchsablauf – Versuch 1: Thermische Belastung von Stahlträgern

Versuch 1 (Thermische Belastung von Stahlträgern): Versuchsablauf



13 min 58 s (nach Zündung)
an der Fensteröffnung



21 min 1 s (nach Zündung)
an der Fensteröffnung
Löschbeginn der Feuerwehr
mit Fog Nail



21 min 32 s (nach Zündung)
an der Fensteröffnung
Löschzeit mit Fog Nail: 31 s



21 min 50 s (nach Zündung) an der
Fensteröffnung - Öffnen der Brand-
raumtür und Nachlöscharbeiten der
Feuerwehr mit Strahlrohr

Bild 6: Versuchsablauf – Versuch 1: Thermische Belastung von Stahlträgern

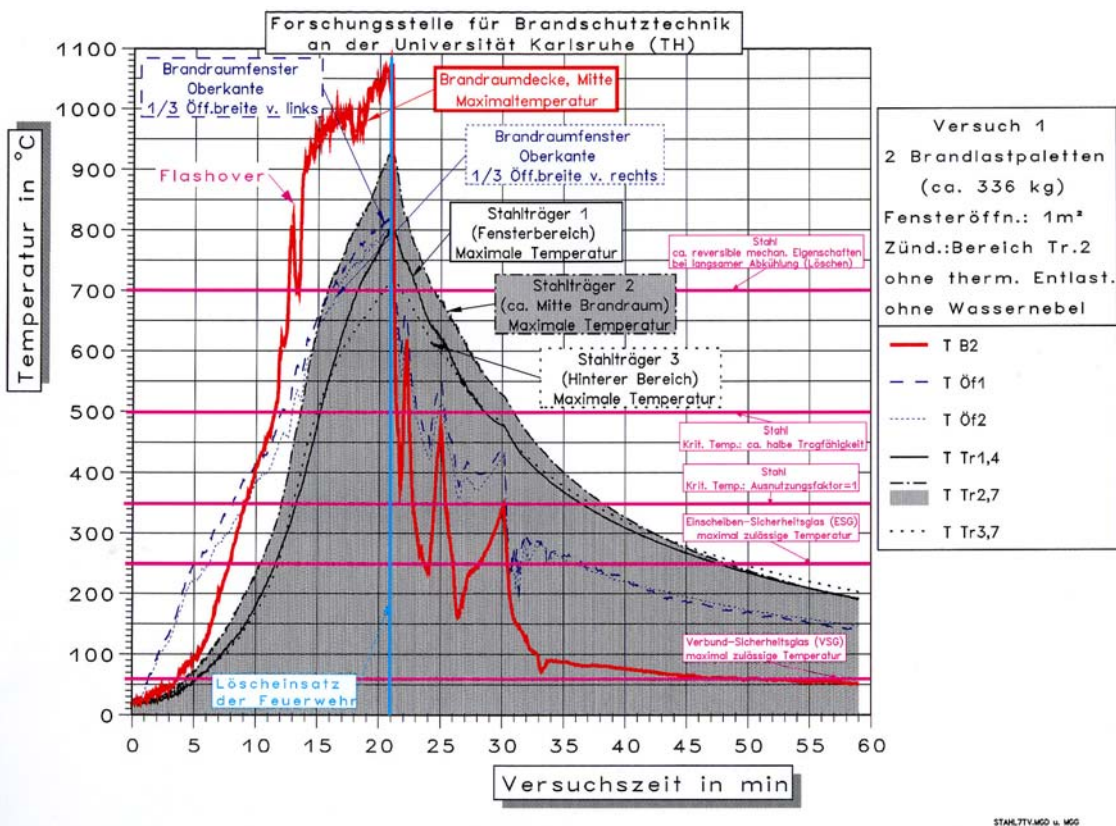


Bild 7: Versuch 1: Ausgewählte Temperaturverläufe

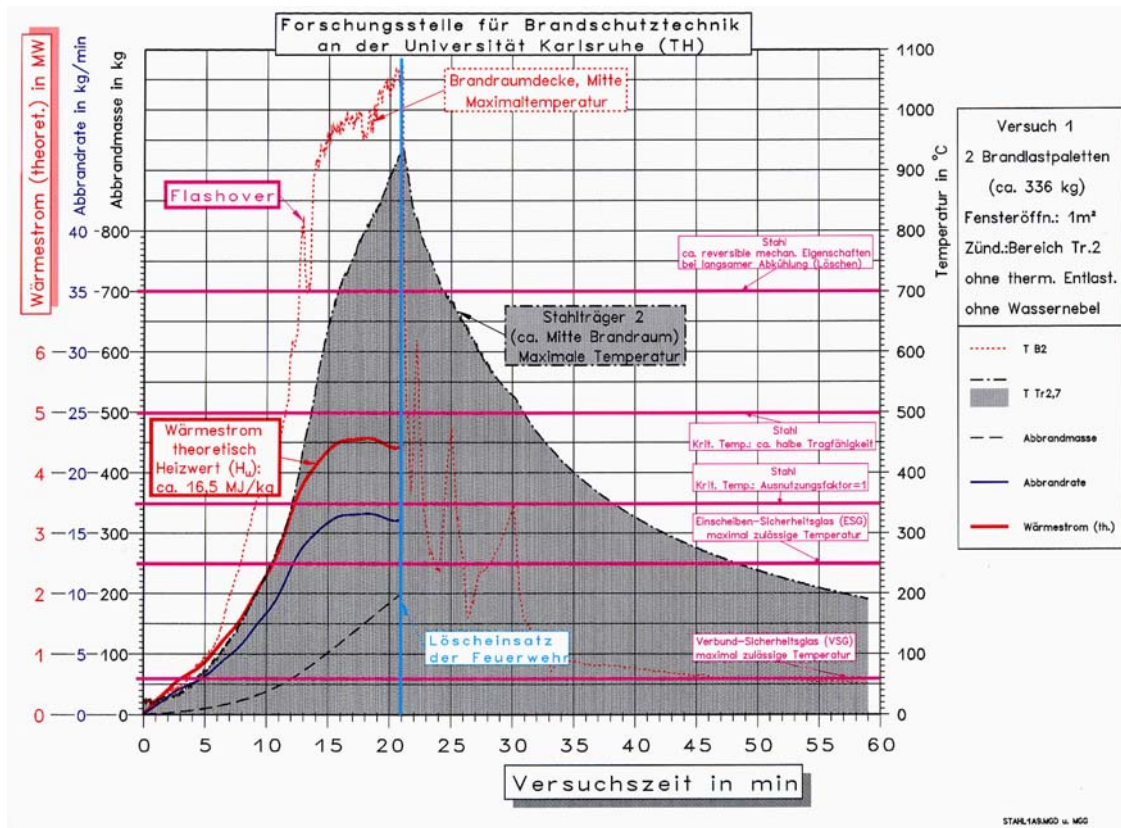


Bild 8: Versuch 1: Ausgewählte Temperaturverläufe und Brandleistung (Wärmestrom)

Man erkennt aus den **Bildern 7 und 8**, daß selbst bei der relativ kleinen Brandlast von 336 kg (13,4 kg/m²) die kritische Stahltemperatur von 500°C (halbe Tragfähigkeit) bereits nach ca. 13,5 min auftritt. Die maximale Stahlträgertemperatur von ca. 940°C ist nach 21 min erreicht. Die maximale Brandraumtemperatur an der Decke von ca. 1080°C nach ebenfalls 21 min. Die maximale theoretische Brandleistung (Wärmestrom) von ca. 4,5 MW, ermittelt über die Abbrandwaage, wird nach 15 min erreicht.

Versuch 8 (Ganzflächendoppelfassade): Versuchsaufbau



Versuchsaufbau:

Brandraum: 25 m², Höhe: 2,68 m, Brandraumtür geschlossen

Brandlast: Wohnzimmereinricht., 754 kg, 0,5 l Heptan

Innenfassade: Fenster geöffnet (ohne Verglasung), ca. 1,5 m²

Außenfassade: ESG-Verglasung (8 mm ESG) in Aluminiumprofilssystem mit Glashalteleisten, ca. 3 m²

Zwischenfassadenbereich: ohne Abschottungen, Abstand zwischen Innen- u. Außenfassade: 1,2 m

Bild 9: Versuchsaufbau – Versuch 8: Ganzflächendoppelfassade

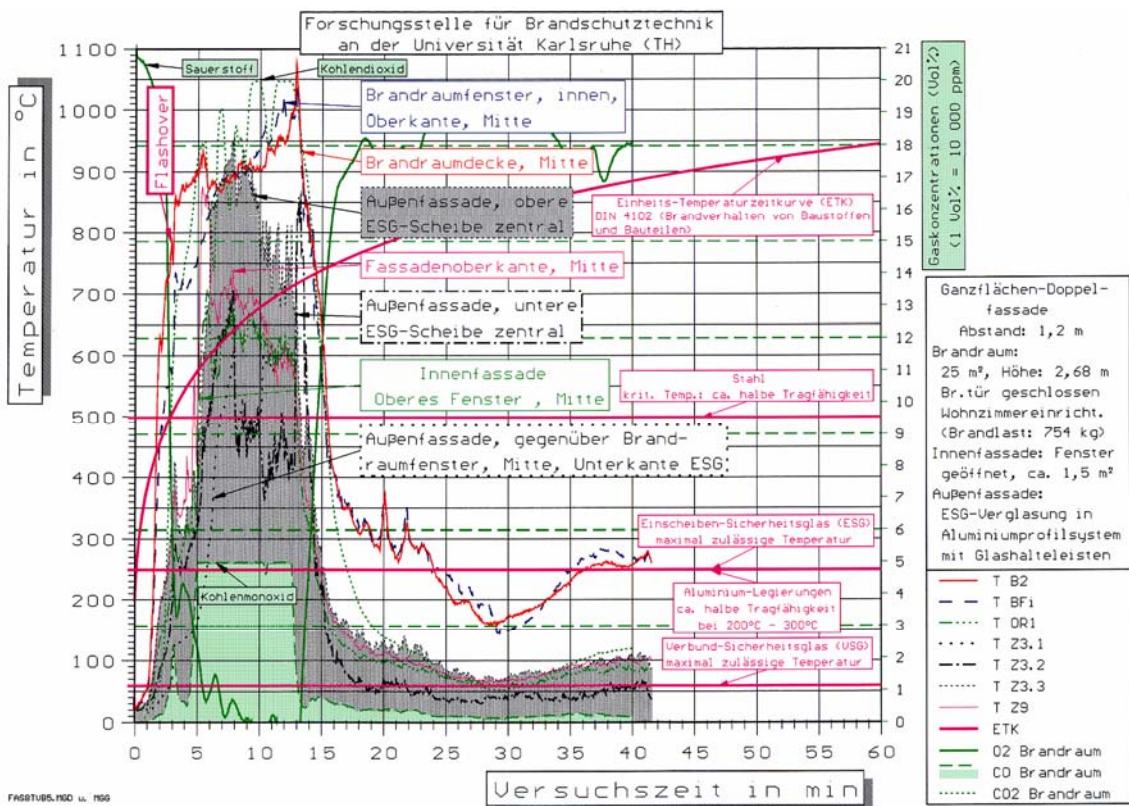


Bild 10: Versuch 8: Ausgewählte Temperaturverläufe

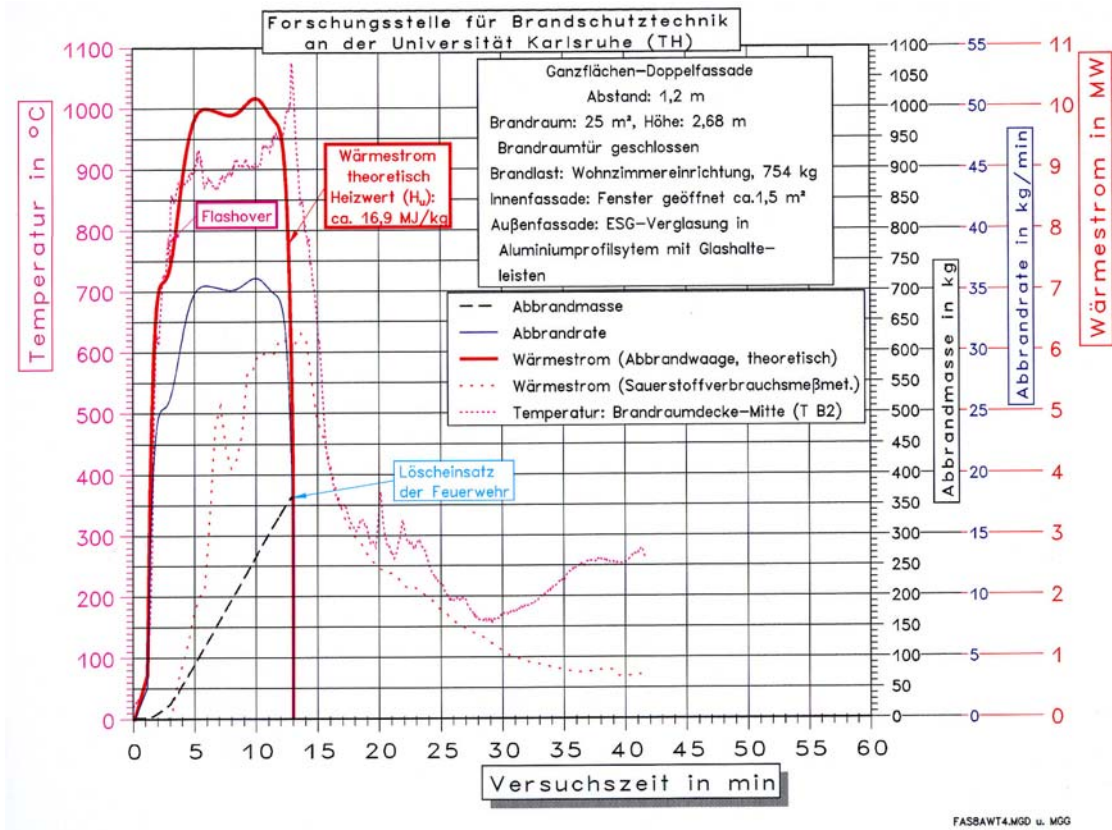


Bild 11: Versuch 8: Ausgewählte Temperaturverläufe und Brandleistung (Wärmestrom)

Bei einem Wohnzimmerbrand nach **Bild 9 bis 11** (Versuch 8: Ganzflächendoppelfassade) mit einer Brandlast von 754 kg (30 kg/m²) wurde im Brandraum die 500°C Grenze bereits nach ca. 2 Minuten überschritten. Die maximale Temperatur im Brandraum von ca. 1100°C wurde nach 13 min, die maximale theoretische Brandleistung von ca. 10 MW, ermittelt über die Abbrandwaage, wurde nach 5 min erreicht.

An der Außenfassade in 1,2 m Abstand vom Brandraumfenster wurde die kritische Stahltemperatur von 500°C nach ca. 5 min erreicht, die maximale Temperatur von ca. 950°C nach ca. 8 min.

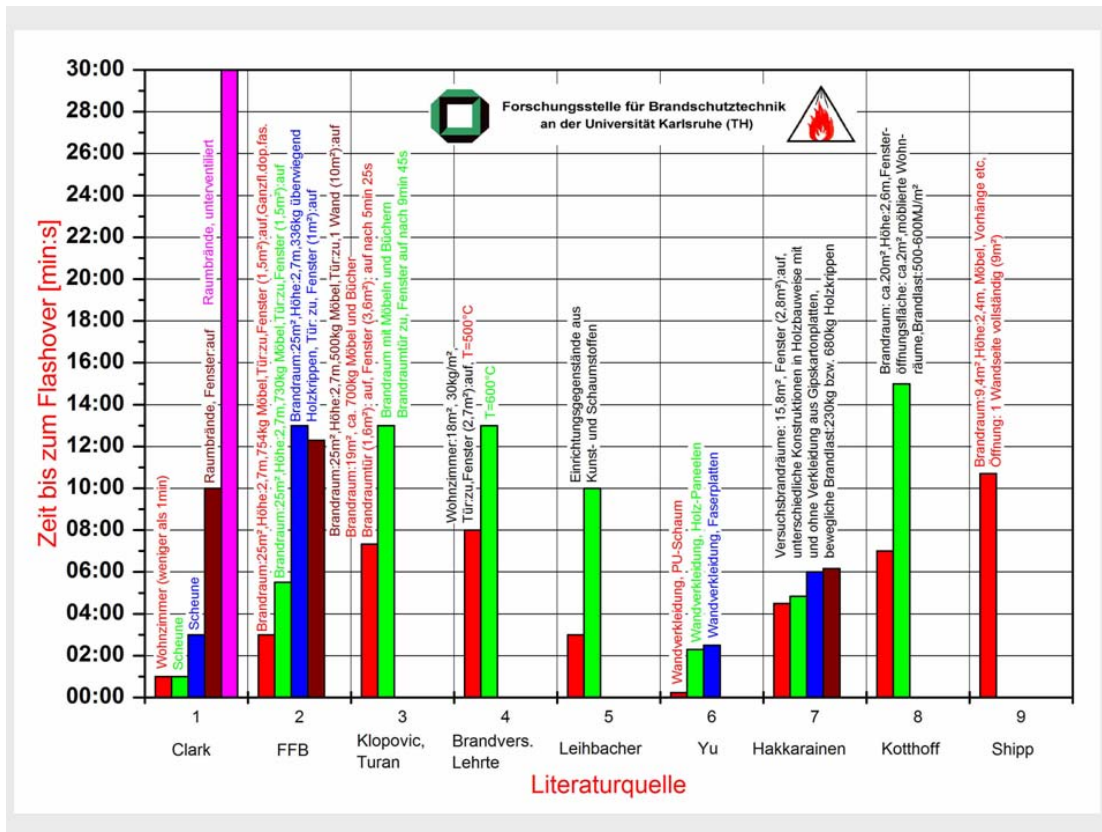


Bild 12: Zeit bis zum Flashover

Bild 12 kann man entnehmen, daß es bereits in kurzer Zeit zu einem Flashover kommen kann. Im Mittel trat der Flashover nach 7 Minuten bei den Versuchsbränden auf. Hierbei werden sehr rasch hohe Temperaturen auch an Stahlbauteilen erreicht. Aus den angegebenen Zeiten ist abzuleiten, daß die Wahrscheinlichkeit, daß die Feuerwehr erst nach einem Flashover eintrifft, relativ hoch ist. Hierdurch wäre eine ungeschützt verlegte trockene Steigleitung bereits einige Zeit vor dem Feuerwehreinsatz hohen Temperaturen im Brandraum ausgesetzt.

Bei Bränden eines oder mehrerer Fahrzeuge in einer Garage (im Kapitel „Einleitung“ genanntes Szenario) werden aufgrund der großen lokalen Brandlasten in Form von flüssigen und festen Brandstoffen ebenfalls schnell große Wärmefreisetzung und hohe Temperaturen erreicht, die ungeschützte trockene Steigleitungen entsprechend belasten können.

4. WERKSTOFFBELASTUNG TROCKENER STEIGLEITUNGEN AUFGRUND HOHER TEMPERATUREN

Um die Sachverhalte besser verstehen zu können, wird an dieser Stelle auf einige Grundlagen der Festigkeitslehre näher eingegangen. **Bild 13** zeigt das Spannungs-Dehnungs-Diagramm beim Zugversuch (siehe **Böge {1975} [70]**).

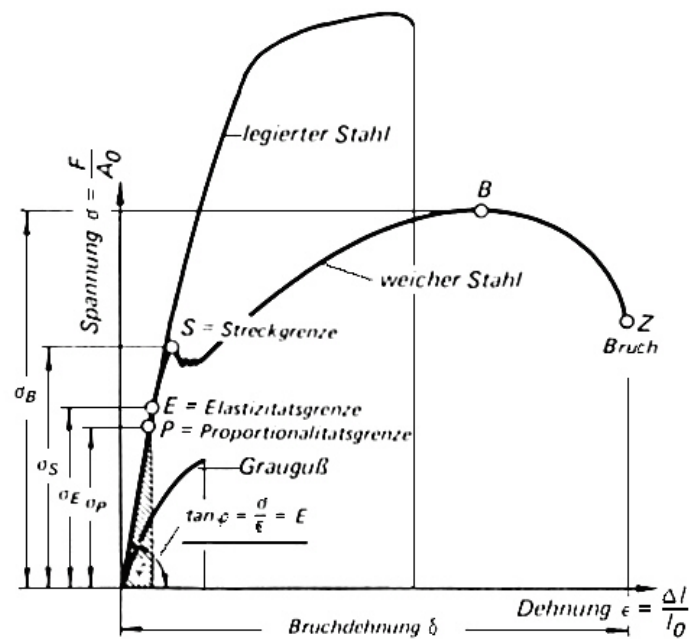


Bild 13: Spannungs-Dehnungsdiagramm nach **Böge {1975} [70]**.

Im elastischen Bereich ist der E-Modul das Verhältnis von Spannung σ und zugehöriger Dehnung ϵ .

Der Zusammenhang wird durch das (proportionale) Hookesche Gesetz wiedergegeben:

$$\sigma = E \times \epsilon \quad (1)$$

Der E-Modul ist somit die Steigung der Spannungs-Dehnungslinie.

$$\tan \varphi = E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2)$$

Beim kohlenstoffarmen Stahl nimmt bei weiterer Steigerung der Spannung die Dehnung überproportional zu und die Proportionalitätsgrenze wird überschritten. Kurz oberhalb der Proportionalitätsgrenze liegt ein Punkt, die sogenannte obere Streckgrenze, bei der plötzlich Fließen ohne Volumenänderung eintritt, d.h. eine sich über die ganze Länge erstreckende Verlängerung ohne Spannungsänderung, die mit einem Spannungsabfall auf die sogenannte untere Streckgrenze einhergehen kann.

Viele Werkstoffe zeigen beim Zugversuch jedoch kein plötzliches Fließen wie der kohlenstoffarme Stahl. Sie haben keine ausgeprägte Streckgrenze, ihre Kennlinie verläuft stetig gekrümmt. Für diese Werkstoffe wird als gleichwertige Grenzspannung die 0,2-Dehngrenze bestimmt. Sie darf ebenso wie die Streckgrenze in einem Bauteil nicht erreicht werden, damit es im Betrieb keine bleibenden Formänderungen gibt.

Als Beispiel sei an dieser Stelle der Vergleich von Stahl und Aluminium aufgeführt. Wegen des kleineren E-Moduls (1/3 von Stahl) würde das Aluminiumteil bei gleicher Belastung die dreifache elastische Formänderung aufweisen.

Nach Erreichen eines Höchstwertes der Zugspannung (Kraft F_{\max}), der Zugfestigkeit

$$\sigma_{zB} = \frac{F_{\max}}{A_0} \quad (3)$$

bezogen auf den Ausgangsquerschnitt fällt die Zugspannung. An einer nicht eindeutig vorhersagbaren Stelle z.B. eines Stabes wird eine mit der Zeit fortschreitende Einschnürung mit erheblichem Fließen an dieser Stelle beobachtet, bis schließlich der Bruch eintritt.

Nach **Müller {1970} [74] (Tabelle 2)** ergeben sich folgende Mittelwerte der Warmfestigkeit (Dehngrenze $\sigma_{0,2}$, Bruchfestigkeit σ_B) verschiedener Werkstoffe bis 500°C in Prozenten des Wertes bei Raumtemperatur:

Werkstoff	200 °C		300 °C		400 °C		500 °C	
	$\sigma_{0,2}$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	σ_B	$\sigma_{0,2}$	σ_B
Grauguß	—	100	—	98	—	92	—	65
Stahlguß	90	103	82	104	72	83	60	55
unvergüteter Stahl . .	84	100	65	98	57	75	46	50
Kesselstahl, unlegiert .	—	—	66	99	52	79	38	50
Kesselstahl, legiert . .	—	—	73	96	66	87	56	74
Kupfer	—	71	—	58	—	46	—	29
Messing, weich	—	78	—	51	—	26	—	11
Messing, kaltgew.	—	72	—	54	—	38	—	18
Mn-Bronze	—	102	—	96	—	64	—	—
NiCu-Legierung für Dampfturbinen- Schaufeln	—	92	—	92	—	86	—	—
Aluminium, rein	—	90	—	72	—	58	—	—
AlCuNi-Legierung . . .	—	85	—	66	—	31	—	—
Silumin	—	81	—	53	—	—	—	—
Magnesiumlegierung . .	—	58	—	26	—	—	—	—

Tabelle 2: Mittelwerte der Warmfestigkeit (Dehngrenze $\sigma_{0,2}$, Bruchfestigkeit σ_B) verschiedener Werkstoffe bis 500°C in Prozenten des Wertes bei Raumtemperatur nach **Müller {1970} [74]**.

Bei unvergütetem Stahl beträgt bei 500°C die Dehngrenze nur noch 46% und die Bruchfestigkeit nur noch 50% des Ausgangswertes bei Raumtemperatur.

Bei einer Temperaturbeanspruchung durch einen Brand mit noch wesentlich höheren Temperaturen von über 1000°C kommt es zu einer weitaus größeren Reduzierung der Festigkeit.

Nach **Würtemberger et al. {1987} [69]** (Tabelle 3) ergeben sich weiterhin folgende Schmelztemperaturen für verschiedene Metalle:

Werkstoff	Schmelztemperatur bei 1,013 bar in °C
Aluminium	659
CuAl-Legierung	1040
CuSn-Legierung	900
CuZn-Legierung	900 – 1000
Gußeisen	1150 – 1200
Kupfer	1083
Magnesium	650
Nickel	1455
Stahl unlegiert	1460
Stahl hochlegiert, X 12 CrNi 18 8	1450

Tabelle 3: Schmelztemperaturen für verschiedene Metalle nach **Würtemberger et al. {1987} [69]**.

Im Nachfolgenden werden die u. a. für Steigleitungen verwendeten Rohrleitungen im Besonderen betrachtet.

Nach **Wagner {1983} [48] (Tabelle 4)** ergeben sich folgende zulässigen Betriebsüberdrücke für Rohrleitungsteile nach **DIN 2401, Teil 2 {1966} [38]** (1.66) (Auszug, sämtliche Drücke sind Überdrücke) wie folgt:

Nenn- druck	Werkstoffe der Rohrleitungsteile							Zulässiger Betriebsdruck der Rohrleitung in bar bei Temperatur in °C																
	Stahlrohrleitungen			Armaturen mit Flanschen				Schrauben nach DIN 2507 Blatt 2 ^{*)}	1 20 (120)	200	250	300	350	400	425	450	475	500	510	520	530	540	550	
	Nahtlose Röhre ⁵⁾	Geschweißte Röhre ⁶⁾	Flansche ¹²⁾	Gußeisen mit Lamellen-graphit ¹⁾	Gußeisen mit Kugel-graphit ¹⁾	Stahlguß	Stahl																	
1	St 00	St 33	St 37-2	GG-20	GGG-38	-	St 37-2	4.6	1 ⁶⁾	-	-	-												
	St 35	St 37-2							1	1	1	1												
2,5	St 00	St 33	St 37-2	GG-20	GGG-38	-	St 37-2	4.6	2,5 ⁶⁾	-	-	-												
	St 35	St 37-2	St 37-2	GG-20	GGG-38	-	St 37-2	4.6	2,5	2	1,8	1,5												
6	St 00	St 33	St 37-2	GG-20	GGG-38	-	St 37-2	4.6	6 ⁶⁾	-	-	-												
	St 35	St 37-2	St 37-2	GG-20	GGG-38	-	St 37-2	4.6	6	5	4,5 ⁷⁾	3,6 ⁷⁾												
10	St 00	St 33	St 37-2	GG-20	GGG-38	GS-45	St 37-2	4.6	10 ⁶⁾	-	-	-												
	St 35	St 37-2	St 37-2	GG-20	GGG-38	GS-45	St 37-2	4.6	10	8	7 ⁷⁾	6 ⁷⁾												
16	St 00	St 33	St 37-2	GG-20	GGG-38	GS-45	St 37-2	4.6	16 ⁶⁾	-	-	-												
	St 35	St 37-2	St 37-2	GG-20	GGG-38	GS-45	St 37-2	4.6	16	13	11 ⁷⁾	10 ⁷⁾												
25	St 00	St 33	C 22 N	-	-	GS-C 25	C22 N	C35	16	14	13	11	10	8										
	St 35	St 37-2	St 37-2	-	-	GS-C 25	C22 N	C35	25	20	18	16												
40	St 35,8	St 37,8 ⁸⁾	C 22 N	-	-	GS-C 25	C22 N	C35	25	22	20	17	16	13										
	15 Mo 3	15 Mo 3	15 Mo 3	-	-	GS-22 Mo 4	15 Mo 3	24 CrMo 5				25	22	20	19	18	17							
64	13 CrMo 44	-	13 CrMo 44	-	-	GS-17 CrMo 55	13 CrMo 44	24 CrMo V 55				25	24	23	22	21	20	18	15	12	9			
	St 35	St 37-2	St 37-2	-	-	GS-45,5	C22 N	4,6 ¹²⁾	40	32	28	24												
100	St 52	St 52-3	C 22 N	-	-	GS-C 25	C22 N	C35	40	-	-	-												
	St 35,8	St 37,8 ⁸⁾	C 22 N	-	-	GS-C 25	C22 N	C35	40	35	32	28	24	21										
16	15 Mo 3	15 Mo 3	15 Mo 3	-	-	GS-22 Mo 4	15 Mo 3	24 CrMo 5				40	35	31	30	29	28							
	13 CrMo 44	-	13 CrMo 44	-	-	GS-17 CrMo 55	13 CrMo 44	24 CrMo V 55				40	38	36	35	34	33	29	24	19	15			
64	St 35 ⁹⁾	St 37-2 ⁹⁾	RSt 42-2	-	-	GS-C 25	C 22 N	C 35	64	36	29	24												
	St 35 ⁹⁾	St 37-2 ⁹⁾	RSt 42-2	-	-	GS-C 25	C 22 N	C 35	64	50	45	40												
100	St 52	St 52-3	C22 N	-	-	GS-C 25	C22 N	C35	64	-	-	-												
	St 35,8	St 37,8 ⁸⁾	C22 N	-	-	GS-C 25	C22 N	C35	64	50	45	40	36	32										
16	15 Mo 3	15 Mo 3	15 Mo 3	-	-	GS-22 Mo 4	15 Mo 3	24 CrMo 5				64	56	50	47	46	45							
	13 CrMo 44	-	13 CrMo 44	-	-	GS-17 CrMo 55	13 CrMo 44	24 CrMo V 55				64	61	58	57	56	53	47	40	32	25			
100	St 35 ⁹⁾	St 37-2 ⁹⁾	RSt 42-2	-	-	GS-C 25	C22 N	C35	100	80	70	60												
	St 52 ⁹⁾	St 52-3 ⁹⁾	RSt 42-2	-	-	GS-C 25	C22 N	C35	100	-	-	-												
16	15 Mo 3	15 Mo 3	15 Mo 3	-	-	GS-22 Mo 4	15 Mo 3	24 CrMo 5				100	87	78	74	72	70							
	13 CrMo 44	-	13 CrMo 44	-	-	GS-17 CrMo 55	13 CrMo 44	24 CrMo V 55				100	95	91	89	87	82	74	62	49	38			

- Für Flansche, die nicht geschweißt werden, sind die in den entsprechenden Maßnormen festgelegten Werkstoffe einzusetzen.
- Für Flanschverbindungen sind Dichtungen aus lt-Werkstoffen nach DIN 3754 (Vornorm) für Nenndrücke ab 64 und für höhere Temperaturen die entsprechenden Metall-Weichstoff- bzw. Metalldichtungen angenommen, siehe DIN 2505 (Vornorm).
- Der für 20 °C gültige zulässige Betriebsdruck kann bei Eisenwerkstoffen im Temperaturbereich von —10 bis 120 °C angewandt werden.
- Beanspruchungsgrenzen:
Bis 120 °C:
für Flüssigkeiten, falls der Zahlenwert des Produktes aus Innendurchmesser in mm und Betriebsdruck in bar folgende Werte nicht überschreitet: 7200 für St 00 und St 33, 10 000 für St 37, für Druckluft und ungefährliche Gase bis 10 bar
bis 180 °C: für Satteldampf bis 10 bar
für Gasleitungen siehe auch DIN 2470 sowie DIN 2460 und DIN 2461
- Nahtlose Stahlrohre nach DIN 2391, DIN 2448 und DIN 2460, geschweißte Stahlrohre nach DIN 2393, DIN 2458 und DIN 2461 sowie Gewinderöhre.
- Zulässige Betriebsdrücke dieser Zeile gelten für Rohre, die ohne Ablieferungsprüfung nach DIN 1626 bzw. DIN 1629 jeweils Blatt 3 und Blatt 4 geliefert werden.
- Auslieferung mit Abnahmezeugnis A, B oder C.
- Entsprechend Stahl-Eisen-Lieferbedingung 660 (z. Z. noch Entwurf)
- Der Festigkeitskennwert der Schraube ist mit einer gegenüber der Betriebstemperatur um 15° niedrigeren Temperatur eingesetzt.
- Bei Schiebern aus Gußeisen gelten die in den Maßnormen (z.B. DIN 3201) enthaltenen zulässigen Betriebsdrücke.
- Nur bei Weichdichtungen, bei Metall-Weichstoff- oder Metalldichtungen Schrauben C 35.
- *) Zulässiger Betriebsdruck für Armaturen in gleicher Höhe wie für 200 °C bei Verwendung von GG-20 und Schrauben 5.6.

Tabelle 4: Zulässige Betriebsüberdrücke für Rohrleitungsteile nach DIN 2401, Teil 2 (1.66) (Auszug, sämtliche Drücke sind Überdrücke) nach **Wagner {1983} [48]**.

Wie **Tabelle 4** zu entnehmen ist, ergibt sich für geschweißte Rohre aus St 37-2 bereits bei 300°C eine Absenkung des zulässigen Betriebsdruckes von 16 bar auf ca. 10 bar Überdruck. Da bei einem Vollbrand in einem Raum Temperaturen von über 1000°C auftreten können, ist ein Schutz der Rohrleitungen und Armaturen unbedingt erforderlich. Die Beanspruchungsgrenze der Rohrleitungen beträgt 120°C bei St 37.2. Bei diesen hohen Temperaturen ist ebenfalls die Funktionsfähigkeit von Armaturen nicht mehr gewährleistet.

Nach **Wagner {1984} [51] (Tabelle 5)** ergeben sich die Festigkeitskennwerte geschweißter Stahlrohre nach **DIN 1626 {1984} [7]** wie folgt:

Maßgebende Technische Lieferbedingung	Rohrart	Stahlsorte		Gewährleistete Prüfwerte der Rohre bei Raumtemperatur				Festigkeitswerte ¹ in N/mm ² bei		
		Kurzname	Werkstoffname	Zugfestigkeit N/mm ²	Streckgrenze für Wanddicken		Bruchdehnung (L ₀ = 5 d ₀) %	200 °C	250 °C	300 °C
					bis 16 mm mindestens N/mm ²	über 16 bis 40 mm N/mm ²				
DIN 1626 Blatt 2	Rohre für allgemeine Verwendung (Handelsgüte)	St 33	1.0033	320 - 490	-	-	18	127	-	-
		St 37	1.0110	360 - 440	235	225	23	186	-	-
		St 42	1.0130	410 - 490	255	245	20	206	-	-
DIN 1626 Blatt 3	Rohre mit Gütevorschriften	St 34-2	1.0102	330 - 410	205	205	26	147	127	98
		St 37-2	1.0112	360 - 440	235	225	23	186	167	137
		St 42-2	1.0132	410 - 490	255	245	20	206	186	157
		St 52-3	1.0841	510 - 610	355	345	22	245	226	196
DIN 1626 Blatt 4	Besonders geprüfte Rohre mit Gütevorschriften	s. DIN 1626 Bl. 3 (darüber)								

¹ Für erhöhte Temperaturen werden Festigkeitskennwerte nicht gewährleistet. Dies ist bei der Berechnung durch Einsetzen eines höheren Sicherheitsbeiwertes zu berücksichtigen (z.B. nach Technische Regeln für Dampfkessel (TRD) 20%)

Tabelle 5: Festigkeitskennwerte geschweißter Stahlrohre nach **DIN 1626**, Bl. 2 bis Bl. 4 (1.65) nach **Wagner {1984} [51]**.

Nach **Wagner {1984} [51]** erfordern die hohen Temperaturen und Drücke in Anlagen der Energiegewinnung und der Verfahrenstechnik den Einsatz warmfester Stähle für den Bau von Kesseln, Apparaten und Rohrleitungen. Die Warmfestigkeitseigenschaften dieser Stähle ermöglichen die Erstellung drucktragender Anlagen für Temperaturen bis etwa 750°C. Zur Verfügung stehen unlegierte und niedrig- bis hochlegierte Stähle, mit deren Hilfe unter Berücksichtigung der Betriebsverhältnisse und sonstiger Gegebenheiten die Konstruktion möglichst optimal gestaltet werden kann.

Als hitzebeständig werden Stähle bezeichnet, die bei Temperaturen oberhalb etwa 600°C noch eine ausreichende Zunderbeständigkeit aufweisen. Das Zunderverhalten der hitzebe-

ständigen Stähle wird im Wesentlichen durch Zulegieren von Chrom, Silizium, Aluminium und Titan beeinflusst. Die Wirkung dieser Elemente, einzeln oder gemeinsam, ergibt je nach Betriebsbedingungen eine gute Widerstandsfähigkeit gegen Verzunderung.

Bei trockenen Steigleitungen kommen jedoch diese warmfesten und hitzebeständigen Stähle nicht zum Einsatz.

Nach **Wagner {1983} [48]** ergeben sich nach **Tabelle 6** folgende Stoffwerte und daraus abgeleitete Größen von ferritischen, martensitischen und austenitischen Stählen (c = spezifische Wärmekapazität, β_L = linearer Ausdehnungskoeffizient, ρ = Dichte, E = Elastizitätsmodul):

Stoffwerte	Einheiten und Stofffamilie		Temperatur θ (°C)															
			20	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
$c(\theta)$	kJ/(kg · K)	F	0.460	0.471	0.484	0.502	0.524	0.550	0.581	0.617	0.657	0.701	0.750	0.803				
		M	0.460	0.471	0.484	0.502	0.524	0.550	0.581	0.617	0.657	0.701	0.750	0.803	0.861	0.924		
		A	0.504	0.520	0.530	0.540	0.550	0.560	0.570	0.580	0.590	0.600	0.610	0.620	0.630	0.640	0.650	0.660
$\tilde{c}(20, \theta)$	kJ/(kg · K)	F	0.460	0.465	0.470	0.476	0.484	0.493	0.504	0.517	0.531	0.546	0.563	0.581				
		M	0.460	0.465	0.470	0.476	0.484	0.493	0.504	0.517	0.531	0.546	0.563	0.581	0.601	0.623		
		A	0.504	0.512	0.517	0.522	0.527	0.532	0.537	0.542	0.547	0.552	0.557	0.562	0.567	0.572	0.577	0.582
$\beta_L(\theta)$	$\mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{K})$	F	11.90	12.70	13.20	13.70	14.20	14.70	15.20	15.70	16.20	16.70	17.20	17.70				
		M	10.60	11.24	11.64	12.04	12.44	12.84	13.24	13.64	14.04	14.44	14.84	15.24	15.64	16.04		
		A	16.80	17.70	18.21	18.67	19.08	19.45	19.78	20.06	20.30	20.49	20.63	20.73	20.79	20.80	20.76	20.68
$\tilde{\beta}_L(20, \theta)$	$\mu\text{m}/(\text{m} \cdot \text{K})$	F	11.90	12.30	12.55	12.80	13.05	13.30	13.55	13.80	14.05	14.30	14.55	14.80				
		M	10.60	10.92	11.12	11.32	11.52	11.72	11.92	12.12	12.32	12.52	12.72	12.92	13.12	13.32		
		A	16.80	17.26	17.53	17.78	18.02	18.24	18.45	18.65	18.83	18.99	19.14	19.27	19.39	19.49	19.58	19.65
$\rho(\theta)$	kg/m ³	F	7850	7827	7812	7796	7780	7763	7746	7728	7709	7691	7671	7651				
		M	7760	7740	7726	7713	7699	7684	7669	7654	7638	7622	7605	7588	7571	7553		
		A	7900	7867	7846	7825	7803	7780	7757	7734	7711	7688	7664	7641	7617	7594	7571	7548
$c \cdot \rho$	kJ/(m ³ · K)	F	3611	3689	3783	3912	4074	4271	4501	4765	5061	5391	5753	6147				
		M	3570	3648	3742	3870	4032	4227	4457	4719	5014	5343	5703	6096	6521	6977		
		A	3982	4091	4159	4225	4291	4357	4422	4486	4550	4613	4675	4737	4799	4860	4921	4981
$E(\theta)$	kN/mm ²	F	212.0	206.6	203.0	199.3	195.5	191.4	187.3	183.0	178.5	173.9	169.1	164.2				
		M	216.0	211.1	207.8	204.3	200.5	196.6	192.5	188.2	183.7	178.9	174.0	168.9	163.6	158.1		
		A	197.0	190.5	186.5	182.4	178.4	174.3	170.3	166.2	162.2	158.1	154.1	150.0	146.0	141.9	137.9	133.8
$\frac{\beta_L \cdot E}{1 - \nu}$	N/(mm ² · K)	F	3,604	3,748	3,829	3,901	3,965	4,020	4,067	4,104	4,131	4,148	4,156	4,152				
		M	3,271	3,390	3,455	3,513	3,564	3,607	3,641	3,667	3,684	3,691	3,689	3,677	3,655	3,622		
		A	4,728	4,818	4,850	4,865	4,863	4,845	4,811	4,763	4,702	4,628	4,541	4,443	4,335	4,217	4,090	3,954

F = Ferrit; M = Martensit; A = Austenit

Tabelle 6: Stoffwerte und daraus abgeleitete Größen von ferritischen, martensitischen und austenitischen Stählen (c = spezifische Wärmekapazität, β_L = linearer Ausdehnungskoeffizient ($\equiv \alpha_L$), ρ = Dichte, E = Elastizitätsmodul) nach **Wagner {1983} [48]**

Der **Tabelle 6** ist u.a. zu entnehmen, daß es bei den aufgeführten Stahlarten zu einer beträchtlichen Reduzierung des Elastizitätsmoduls (E-Modul, zweitletzte Tabellenzeile) bei höherer Temperatur kommt. Bei einer Erwärmung von 20°C auf 500°C ergibt sich je nach

Stahl eine Reduzierung um ca. 17 bis 20 %, bei 600°C um ca. 22 bis 24 %, bei 800 °C beim austenitischen Stahl um 32 %

Man kann sich nun unmittelbar vorstellen, daß es bei einer Temperaturbeanspruchung durch einen Brand mit noch wesentlich höheren Temperaturen von über 1000°C zu einer weitaus größeren Reduzierung der Festigkeit kommt. Hierbei folgen die Materialtemperaturen trockener Steigleitungen praktisch unmittelbar dem Anstieg der Raumtemperatur. Dies ist sowohl durch deren thermophysikalische Stoffwerte (Wärmeleitfähigkeit, Dichte, spezifische Wärmekapazität) als auch deren geringen Massen infolge geringer Wandstärken bedingt.

An dieser Stelle soll ein weiterer Punkt diskutiert werden: Was geschieht, wenn in eine durch Brand stark erwärmte Rohrleitung plötzlich kaltes Wasser eingespeist wird.

Nach **Weißbach {1976} [72]** wird bei hohen Abkühlungsgeschwindigkeiten, die für unlegierten Stahl nur durch Abschrecken in Wasser zu erreichen sind, die Perlitbildung im Stahl vollständig unterdrückt und der Austenit wandelt sich in Martensit um. Bei sachgerechtem Härten soll hierdurch ein möglichst reines Martensitgefüge hergestellt werden.

Nach **Domke {1977} [73]** ist diejenige Abkühlungsgeschwindigkeit, bei der zuerst Martensit auftritt, als untere, und diejenige, bei der nur Martensit auftritt, als obere kritische Abkühlungsgeschwindigkeit bezeichnet. Wenn nur von der kritischen Abkühlungsgeschwindigkeit gesprochen wird, dann ist im Allgemeinen die obere gemeint. **Bild 14** zeigt die Abhängigkeit der kritischen Abkühlungsgeschwindigkeit unlegierter Stähle vom Kohlenstoffgehalt.

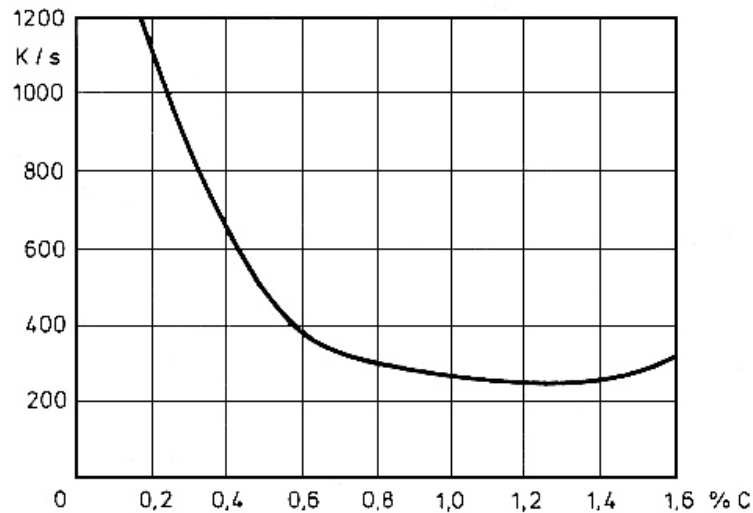


Bild 14: Abhängigkeit der kritischen Abkühlungsgeschwindigkeit unlegierter Stähle vom Kohlenstoffgehalt nach **Domke {1977} [73]**.

Nach **Weißbach {1976} [72]** nehmen Stähle unter 0,2 % Kohlenstoffgehalt beim Abschrecken kaum Härte an (siehe **Bild 14 und 15**). Der Martensitpunkt M_s (Startpunkt der Martensitbildung) liegt je nach Kohlenstoffgehalt des Stahles bei verschiedenen Temperaturen.

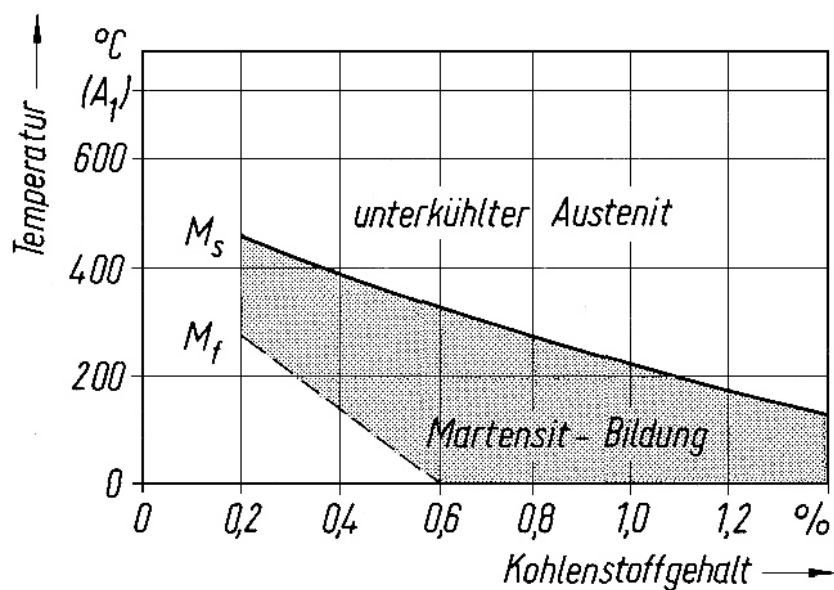


Bild 15: Start und Ende der Martensitbildung nach **Weißbach {1976} [72]**.

Abgeschreckte Teile weisen Maß- und Formänderungen auf. Im ungünstigsten Fall treten Risse auf. Durch das Abschreckmittel (hier Wasser in der Rohrleitung) wird die Innenwand sofort kalt und zieht sich zusammen. Diese Kontraktion wird aber noch vom heißen äußeren Bereich behindert. Es entstehen Zugspannungen an der Innenwand, die zu Rissen führen können. Im weiteren Verlauf der Abkühlung will der äußere Bereich schrumpfen, wird aber

jetzt vom starren inneren Bereich behindert. Es entstehen Zugspannungen im äußeren Bereich mit evtl. Rißbildung. Diese Spannungen als Folge ungleicher Temperaturen in Rand und Kern heißen Wärmespannungen. Daneben treten noch Umwandlungsspannungen auf. Der Martensit mit seinem aufgeweiteten Gitter bewirkt eine Volumenzunahme von 1 %. Wenn beim Rohr der Innenbereich martensitisch wird und im äußeren Bereich keine Durchhärtung erfolgt, so erhöhen sich dadurch die Zugspannungen im äußeren Bereich. Bei symmetrischen Teilen halten sich diese Spannungen evtl. das Gleichgewicht, während un-symmetrische Teile zu Verzug neigen.

Nach **Domke {1977} [73]** treten Härterisse manchmal beim oder unmittelbar nach dem Härten, manchmal aber erst nach Wochen auf.

Nach **DIN 14462-1 {2005} [3]** werden für das Rohrleitungsmaterial von Löschwasserleitungen in Trinkwasser-Installationen u.a. schmelztauchverzinkte Eisenwerkstoffe (früher: feuerverzinkter Stahl) nach **DIN 10255 {2004} [5]** entsprechend **Tabelle 7** verwendet. Dieser Werkstoff (Werkstoffnummer 1.0026) kommt u.a. bei trockenen Steigleitungen nach **DIN 14462-1 {2005} [3]**, **Tabelle 1** zum Einsatz. Die im Jahr 2004 zurückgezogene **DIN 1626 {1984} [7]** gibt bei der Streckgrenze bei Rohren mit 235 N/mm² bei St 37 höhere Werte bei der Streckgrenze an als die **DIN 10255 {2004} [5]** nach **Tabelle 7**. Bei der Zugfestigkeit weichen die Werte in der **DIN 1626** mit 360 bis 440 N/mm² ebenfalls ab.

Da sich die **DIN EN 14462-1 {2005} [3]** auf die **DIN 10255 {2004} [5]** bezieht, werden bei den nachfolgenden Berechnungen die Festigkeitskennwerte der **DIN EN 10255** verwendet.

Der eingesetzte Stahl mit der Werkstoffnummer 1.0026 hat folgende chemische Zusammensetzung nach **DIN EN 10255 {2004} [5]**:

Stahlsorte		Chemische Zusammensetzung Massenanteile in %, max.				Mechanische Eigenschaften		
Kurzname	Werkstoffnummer	C	Mn	P	S	Obere Streckgrenze R _{eH} MPa min.	Zugfestigkeit R _m MPa	Bruchdehnung A % min.
S195T	1.0026	0,20	1,40	0,035	0,030	195	320 bis 520	20

Tabelle 7: Chemische Zusammensetzung (Schmelzanalyse) und mechanische Eigenschaften für Rohre aus unlegiertem Stahl mit Eignung zum Schweißen und Gewindeschneiden nach **DIN 10255 {2004} [5]**.

Nach **DIN 13480-2 {2002} [6]**, Metallische Rohrleitungen darf die chemische Zusammensetzung von Stählen zum Schweißen oder Umformen die in **Tabelle 8** angegebenen Werte nicht überschreiten.

Werkstoffgruppe (nach Tabelle A. 1)	Maximaler Gehalt nach der Schmelzanalyse		
	%C	%P	%S
Stahl (1 bis 6 und 9)	0,23 ^a	0,035	0,025
Ferritische nichtrostende Stähle (7.1)	0,08	0,040	0,015
Martensitische nichtrostende Stähle (7.2)	0,06	0,040	0,015
Austenitische nichtrostende Stähle (8.1)	0,08	0,045	0,015 ^b
Austenitische nichtrostende Stähle (8.2)	0,10	0,035	0,015
Austnitisch-ferritische nichtrostende Stähle (10)	0,030	0,035	0,015

^a Maximaler Gehalt nach der Stückanalyse 0,25 %.
^b Für Erzeugnisse, die bearbeitet werden müssen, ist nach Vereinbarung ein Schwefelgehalt von 0,015 % bis 0,030 % zulässig, sofern die Korrosionsbeständigkeit für den geplanten Anwendungsfall ausreichend sichergestellt ist.

Tabelle 8: Höchstzulässige Werte für die Gehalte an Kohlenstoff, Phosphor und Schwefel für Stähle zum Schweißen oder Umformen nach **DIN 13480-2 {2002} [6]**.

Aufgrund des geringen Kohlenstoffgehaltes (maximal 0,2 bis 0,25 %) des bei den Rohren verwendeten Stahles (überwiegend unlegierte Stähle) ist nicht damit zu rechnen, daß Risse im Stahl aufgrund des Abschreckvorganges auftreten. Weiterhin besteht hierdurch nicht die Gefahr, daß das Rohr nach Brandbelastung mit anschließendem Abschrecken aufgrund

von Versprödung bei späteren Belastungen aufgrund eines Trennungsbruches (Sprödbbruches) versagt.

Nach **Kempchen {2005} [65]** ergeben sich folgende maximalen Einsatztemperaturen für Dichtungswerkstoffe (Auswahl):

Dichtungswerkstoff	Max. Temperatur in °C
Metalle	
Aluminium	300
Baustahl	450
Hochlegierter Stahl	550
Kupfer	350
Nickel	600
Gummi und Kunststoffe	
Naturkautschuk	80
BunaN [®]	100
Viton [®]	205
Teflon [®]	260

Tabelle 9: Maximalen Einsatztemperaturen für Dichtungswerkstoffe (Auswahl) nach **Kempchen {2005} [65]**.

Als weiteres Dichtungsmaterial kommt häufig EPDM (Ethylen-Propylen-Dien-Monomer) mit einer maximalen Betriebstemperatur von 110°C zum Einsatz.

Diese Einsatztemperaturen von Dichtungsmaterialien kommen nicht nur bei den verschiedenen Armaturen zum Tragen, sondern auch bei den Rohrverbindungselementen, z.B. bei den modernen Kupplungsverbindungen, die auf Verbindungen mit Gewinde verzichten.

Man erkennt, daß die bei den trockenen Steigleitungen zum Einsatz kommenden Dichtungen aus verschiedenen Kautschukarten sowie EPDM den zu erwartenden hohen Temperaturen im Brandraum nicht standhalten können und frühzeitig versagen werden.

5. WÄRMEAUSDEHNUNG UND WÄRMESPANNUNGEN

5.1 Wärmeausdehnung der Rohre - Festpunktbelastung

Nach **Wagner {1983} [48]** ändern Rohrleitungen ihre Länge, sobald Änderungen der Belastung und der Temperatur auftreten. Hiervon macht keine Rohrleitung eine Ausnahme, denn nach der Inbetriebnahme herrschen immer andere Zustände als bei der Montage. Ob jedoch eine Längenänderung als groß oder klein anzusprechen ist, hängt weniger von ihrer absoluten Größe als vielmehr von dem Vermögen der Leitung ab, dieser Längenänderung nachgeben zu können. Als maßgebend für die Größe der Längenänderung soll hier primär die Dehnung in Richtung der Leitungsachse durch Temperatureinwirkung betrachtet werden, wobei die Längenänderung durch Innendruck vernachlässigt wird.

Wird ein einseitig fest eingespanntes Rohr von der Anfangstemperatur T_1 auf die Endtemperatur T_2 erwärmt, so dehnt sich dieses um den Betrag ΔL aus.

$$\Delta L = L \times \alpha_L \times \Delta T_{1,2} \quad (4)$$

Hierin ist α_L (K^{-1}) der lineare Wärmeausdehnungskoeffizient, der angibt, um welchen Betrag je Längeneinheit sich das Rohr ändert, wenn man seine Temperatur um eine Temperatureinheit ändert. Bei dieser Einspannung entsteht keine Spannung, da sich das Rohr frei ausdehnen kann.

Nach **Wossog et al. {1981} [52]** ergeben sich für Metalle folgende Längenausdehnungskoeffizienten im Bereich zwischen 20° und 600°C:

Werkstoff	Mittlerer Längenausdehnungskoeffizient in 1/K zwischen 20°C und 600°C					
	100°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°
Unlegierter Stahl	$11,1 \times 10^{-6}$	$12,1 \times 10^{-6}$	$12,9 \times 10^{-6}$	$13,5 \times 10^{-6}$	$13,9 \times 10^{-6}$	$14,1 \times 10^{-6}$
15 Mo 3	$11,6 \times 10^{-6}$	$12,6 \times 10^{-6}$	$13,2 \times 10^{-6}$	$13,8 \times 10^{-6}$	$14,2 \times 10^{-6}$	$14,5 \times 10^{-6}$
13CrMo4.4	$11,4 \times 10^{-6}$	$12,5 \times 10^{-6}$	$12,9 \times 10^{-6}$	$13,5 \times 10^{-6}$	$14,2 \times 10^{-6}$	$14,3 \times 10^{-6}$
10CrMo9.10	$10,7 \times 10^{-6}$	$11,9 \times 10^{-6}$	$12,6 \times 10^{-6}$	$13,0 \times 10^{-6}$	$13,3 \times 10^{-6}$	$13,6 \times 10^{-6}$
12CrMo20.5	$11,3 \times 10^{-6}$	$11,6 \times 10^{-6}$	$11,9 \times 10^{-6}$	$12,2 \times 10^{-6}$	$12,3 \times 10^{-6}$	$12,5 \times 10^{-6}$
X8 CrNiTi 18.10	$16,0 \times 10^{-6}$	$17,0 \times 10^{-6}$	$17,0 \times 10^{-6}$	$18,0 \times 10^{-6}$	$18,0 \times 10^{-6}$	
X8 CrNiMoTi 18.11	$16,5 \times 10^{-6}$	$17,5 \times 10^{-6}$	$18,5 \times 10^{-6}$	$18,5 \times 10^{-6}$	$19,0 \times 10^{-6}$	
Kupfer	$17,3 \times 10^{-6}$	$17,8 \times 10^{-6}$	$18,5 \times 10^{-6}$			
Aluminium	$23,8 \times 10^{-6}$	$24,7 \times 10^{-6}$				

Tabelle 10: Mittlere Längenausdehnungskoeffizienten für verschiedene Werkstoffe nach **Wossog et al. {1981} [52]**.

Nach **Dietzel {1984} [50]** ergibt sich die Temperaturabhängigkeit des linearen Wärmedehnungsbeiwertes (\equiv Längenausdehnungskoeffizient) α_L fester Stoffe in Abhängigkeit von der Temperatur anschaulich auch aus nachfolgendem Diagramm:

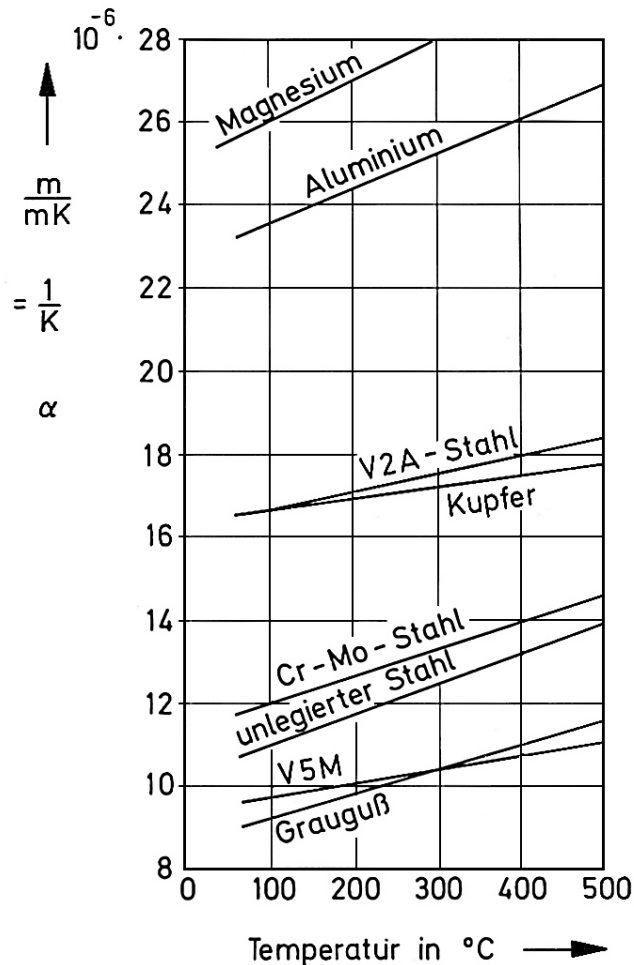


Bild 16: Lineare Wärmedehnungsbeiwerte α_L in Abhängigkeit von der Temperatur nach **Dietzel {1984} [50]**.

Bei einer Temperaturerhöhung von 20°C auf 600°C ergibt sich bei unlegiertem Stahl mit einem Längenausdehnungskoeffizienten von $14,1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ bei einer Rohrlänge von

- 2,7 m (Annahme: Raumhöhe) eine Längenänderung von

$$\Delta L = L_2 - L_1 = \alpha_L \times L_1 \times (T_2 - T_1) \quad (5)$$

$$\Delta L = 14,1 \times 10^{-6} \text{ 1/K} \times 2,7 \text{ m} \times (600^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 0,022 \text{ m} \equiv 22 \text{ mm}$$

- 10 m (Annahme horizontal und vertikal verlegtes Rohr im Brandraum)

$$\Rightarrow 0,0818 \text{ m} \equiv 82 \text{ mm}$$

Bei einer Brandraumtemperatur von 1000°C ergibt sich unter Annahme des gleichen Längenausdehnungskoeffizienten von $14,1 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ eine Längenänderung bei

- 2,7 m Rohrlänge => 0,0372 m \equiv 37 mm

- 10 m Rohrlänge => 0,14 m \equiv 140 mm

Da jedoch bei 1000°C durch Extrapolation des Verlaufs der in **Bild 16** dargestellten Kurven von einem höheren Längenausdehnungskoeffizienten auszugehen ist, wird die Längenänderung noch größer als angegeben sein.

Wird nach **Wagner {1983} [48]** das Rohr im kalten Zustand (T_1) am anderen Ende fest eingespannt und dann auf die Temperatur T_2 erwärmt, kann sich das Rohr nicht ausdehnen und die Längenänderung ΔL bewirkt eine Stauchung des Rohres um diesen Betrag. Voraussetzung hierfür ist aber, daß das Rohr nicht ausknickt.

Der Längenänderungsbetrag ΔL bezogen auf die ursprüngliche Länge L ist gemäß der Festigkeitslehre definiert als Stauchung oder Dehnung ε .

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (6)$$

Da die Spannungen im Gültigkeitsbereich des „Hookeschen Gesetzes“ proportional den Dehnungen sind, ergibt sich mit dem Proportionalitätsfaktor E :

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (7)$$

σ = Normalspannung

E = Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul E ist nur von dem Werkstoff und der Temperatur abhängig (siehe **Tabelle 6**).

Setzt man die Gleichungen (4) u. (6) in Gl. (7) ein, ergibt sich als entstehende Wärmespannung σ_T eine Größe, die als oberster Wert anzusehen ist, jedoch für die Grenzwertbetrachtung sehr aufschlussreich wird.

$$\sigma_T = E \times \frac{\Delta L}{L} = E \times \frac{L \times \alpha_L \times \Delta T_{1,2}}{L} \quad (8)$$

$$\sigma_T = E \times \alpha_L \times \Delta T_{1,2} \quad (9)$$

Bei einem starren System kürzt sich somit die Rohrlänge heraus und die entstehende Wärmespannung ist neben der Temperaturdifferenz nur von den Werkstoffeigenschaften abhängig. Dabei ist zu beachten, daß die beiden Einflußgrößen E und α_L primär vom Raumgitteraufbau der Werkstoffe abhängen und für ferritische Stähle (α -Raumgitter) sowie austenitische Stähle (β -Raumgitter) nahezu gleich sind.

Starr eingespannte Rohrleitungen dürfen nur einer Temperaturdifferenz von:

$$\Delta T_{1,2} = \frac{\sigma_{Zul}}{E \times \alpha_L} \quad (10)$$

ausgesetzt werden.

Für Stahlrohrleitungen mit

$$\sigma_{Zul} = \frac{\sigma_{0,2}}{S} = 195 \text{ N/mm}^2 / 1,5 = 130 \text{ N/mm}^2 \quad (11)$$

$\alpha_L = 11,1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ (im Bereich zwischen 20°C und 100°C)

$E = 2,06 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$

$S = \text{Sicherheitsbeiwert} = 1,5$

$\sigma_{0,2} = \text{Streckgrenze} = 195 \text{ N/mm}^2$ (Stahl S195T nach **DIN 10255 {2004} [5]**)

folgt:

$$\Delta T_{1,2} \approx 57 \text{ K}$$

Es ergibt sich also für die Rohrleitungen eine zulässige Rohrtemperaturänderung von $\leq 57 \text{ K}$.

Demnach müssen Rohrleitungen, die einer Temperaturdifferenz von $T_{1,2} > 57 \text{ K}$ ausgesetzt sind, einen Rohrdehnungsausgleich besitzen.

Eine natürliche Reduzierung der Spannung auf den zulässigen Wert erfolgt durch die Ausknickung des Rohres bei entsprechenden Schlankheitsgrad.

Dies hat zur Folge, daß Rohrleitungen so zu verlegen sind, daß der Dehnungsausgleich nicht durch seitliches Ausbiegen bzw. Ausknicken erfolgt, da hierbei eine unzulässige Beanspruchung der z.B. einer Flanschverbindung auftritt. Ebenfalls sind die Festpunkte in der Praxis nur sehr selten so zu verankern, daß die volle Ausknickungsbelastung aufgenommen werden kann.

Bei einer Nennweite von DN 80 (Rohr 88,9 * 3,2) der trockenen Steigleitung ergibt sich bei starrer Einspannung eine Festpunktbelastung von:

$$F = \sigma_{0,2} \times A_{Kr} \approx 1,7 \times 10^5 \text{ N} \quad (12)$$

mit: $\sigma_{0,2} = 195 \text{ N/mm}^2$

$A_{Kr} = \text{Kreisringfläche des Rohres} = 862 \text{ mm}^2$

5.2 Wärmespannungen im Rohr - Thermoschock

Nach **Wagner {1984} [49]** sind Wärmespannungen in einem Rohr die Folge von Temperaturunterschieden, die durch einen stationären oder instationären Wärmefluß gegeben sind.

Bei der stationären Wärmeleitung ist das Temperaturfeld im Gegensatz zur instationären Wärmeleitung unabhängig von der Zeit.

Die stationäre Wärmespannung ist im Allgemeinen im Betriebszustand gegeben, während die instationäre Wärmespannung beim An- und Abfahren auftritt.

Im vorliegenden Fall des Einspeisens von Löschwasser in die Steigleitung handelt es sich daher zunächst um den instationären Fall.

Zunächst wird an dieser Stelle jedoch kurz der stationäre Fall veranschaulicht.

Liegen zwischen Innen- und Außenwandung eines Rohres ungleiche Temperaturen an und entsteht somit ein Temperaturunterschied zwischen der Rohrrinnenseite und Rohraußenseite, dann entstehen nach **Bild 17** auf der wärmeren Seite Druckspannungen und auf der kälteren Seite Zugspannungen.

Bild 17 zeigt die Temperaturverteilung und Wärmespannungen bei einer beheizten Rohrwand, wobei die Fälle „innen beheizt“ und „außen beheizt“ unterschieden werden (linke bzw. rechte Bildhälfte).

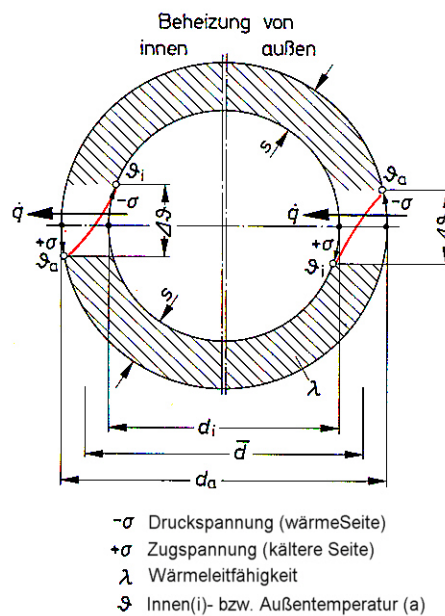


Bild 17: Temperaturverteilung und Wärmespannungen in einer beheizten Rohrwand nach **Wagner {1984} [49]**, für den stationären Fall

Für die instationäre Wärmespannung wird an dieser Stelle nur der Grenzfall der Thermoschockspannung behandelt.

Beim „idealen Thermoschock“ wird die Temperatur der z.B. inneren Wandoberfläche sprunghaft von ϑ_0 auf ϑ_i geändert (**Bild 18**). Hierbei erfolgt die Temperaturänderung so rasch (Wärmeübergangskoeffizient $\alpha_i \rightarrow \infty$), daß die übrigen Wandteile ihre Temperatur erst erhöhen, wenn die innere Wandoberfläche bereits ihre Endtemperatur erreicht hat.

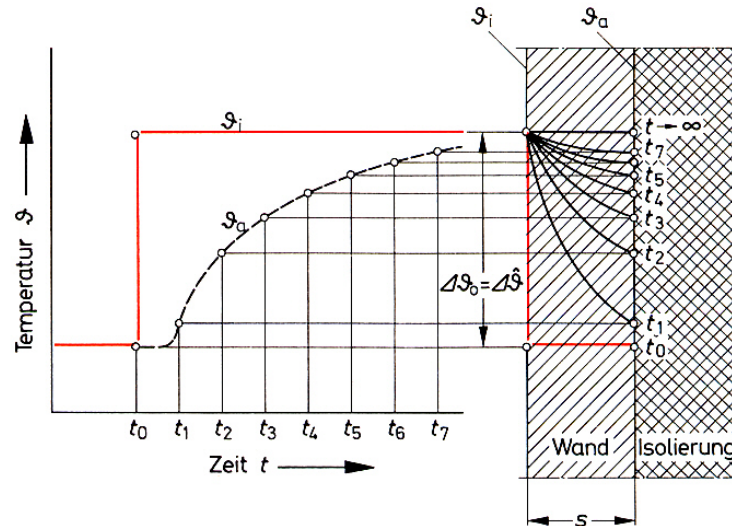


Bild 18: Temperaturverteilung bei idealem Thermoschock nach **Wagner {1984} [49]**.

Die Temperaturänderung bleibt im ersten Moment ($T = T_0 \ (\equiv \vartheta_0)$) auf eine sehr dünne Wandzone beschränkt. Erst allmählich erfolgt auch in den übrigen Wandzonen der Temperatureausgleich.

Beim Thermoschock ist im ersten Augenblick in der Rohrwand die maximale Temperaturdifferenz $\Delta\vartheta_0 \ (\equiv \Delta T_0)$ vorhanden (**Bild 18**).

In der Praxis läßt sich der ideale Thermoschock insbesondere wegen des endlichen Wärmeübergangskoeffizienten α_i nicht realisieren. Daher werden die tatsächlich auftretenden Spannungen niedriger sein, als sich diese theoretisch nach der vorbeschriebenen Modellrechnung ergeben würden.

Bedingt durch die gesamte Temperaturdifferenz ΔT_0 an der Rohrwand erhält man als Thermoschockspannung σ_{Ts} (maximal mögliche Wärmespannung):

$$\sigma_{Ts} = \frac{E}{1 - \nu_Q} \times \alpha_L \times \Delta T_0 \tag{13}$$

α_L = linearer Ausdehnungskoeffizient

ν_Q = Querkontraktionszahl (durch die Längenänderung wird die Werkstoffdicke um den Betrag der Querkontraktionszahl verringert), Wert für Stahl: 0,3

Verwendet man aus **Tabelle 6** näherungsweise die Werte für den nur von den Materialkennwerten abhängigen Faktor

$$\frac{E \times \alpha_L}{1 - \nu_Q}$$

für ferritische bzw. austenitische Stähle, so errechnet sich die Thermoschockspannung beispielsweise für den Fall der Glühfarben 550°C und 810°C der Rohrleitungen nach **Würtemberger et al. {1984} [69]** gemäß nachfolgender **Tabelle 11**.

$\vartheta_{\text{Glüh}}$ °C	$\frac{E \times \alpha_L}{1 - \nu_Q}$ N/(mm ² × K)	$\vartheta_{\text{Wasser}}$ °C	$\Delta\vartheta_0 = \vartheta_{\text{Glüh}} - \vartheta_{\text{Wasser}}$ K	σ_{Ts} N/mm ²
Glühfarben				
Dunkelbraun				
Braunrot	4,156	20	530	2203
Dunkelrot				
Dunkelkirschrot				
Kirschrot				
Hellkirschrot	3,954	20	790	3124
Hellrot				
gut Hellrot				
Gelbrot				
Hellgelbrot				
Gelb				
Hellgelb				
Gelbweiß				

Tabelle 11: Thermoschockspannung σ_{Ts} für Rohrleitungsstähle von Steigleitungen bei auf zwei Temperaturwerte erhitzte Stähle in Bezug zur Glühfarbe.

Man erkennt, daß die errechnete Thermoschockspannung wesentlich größer als z.B. die Dehngrenze des bei den Rohrleitungen eingesetzten Stahles von $\sigma_{0,2} = 195 \text{ N/mm}^2$ ist.

5.3 Ausdehnung von Wasser im Rohr – Berechnung der Wärmespannungen und Druckänderungen

Im Normalfall kann während der Flutungsphase der Steigleitung die Luft über das Entlüftungsventil abströmen. Bei vollständig gefluteter Löschwasserleitung wird die Entlüftung beendet, indem sich die Schwimmerkugel gegen die Gummidichtung drückt. Diese Kunststoffkugel dichtet oberhalb eines minimalen Schließdruckes von 0,3 bar Überdruck ab.

Es wird daher der Fall angenommen, daß die Leitung vollständig gefüllt wird, jedoch noch kein Löschwasser aus den Entnahmearmaturen entnommen wird, d.h. das Volumen bleibt konstant.

Nach **Dietzel {1984} [50]** behalten auch unter zunehmendem Druck Flüssigkeiten nahezu ihr Volumen. Dagegen ist die Volumenzunahme bei einer Temperaturerhöhung wesentlich größer als bei festen Stoffen.

Die Volumenzunahme ergibt sich zu

$$\Delta V = V_2 - V_1 = \gamma_R \times V_1 \times (T_2 - T_1) \quad (14)$$

Nach **Dietzel {1984} [50]** besteht zwischen dem Volumenausdehnungskoeffizient γ_R und dem Längenausdehnungskoeffizient α_L die Beziehung:

$$\gamma_R = 3 \times \alpha_L \quad (15)$$

Nach **Bohl {1984} [53]** besitzen auch Flüssigkeiten eine bestimmte, wenn auch geringe Elastizität ähnlich den festen Stoffen. Zwischen und Volumen- und Druckänderung besteht nach dem Hookeschen Gesetz folgender Zusammenhang:

$$\Delta V = \frac{1}{E} \times V_1 \times \Delta p \quad (16)$$

Es ist üblich, anstelle des E-Moduls einen Kompressibilität-Koeffizienten κ_K zu verwenden. Der Kompressibilitäts-Koeffizient ergibt sich aus dem E-Modul zu

$$\kappa_K = \frac{1}{E} \quad (17)$$

Solange über der Flüssigkeit ein Gasvolumen ansteht, d.h. die Flüssigkeit füllt das Volumen noch nicht vollständig aus, folgt der Druckanstieg der Dampfdruckkurve.

Wird nach **Rempe, Rodewald {1988} [68]** eine Flüssigkeit allseitig von einem festen Behälter umschlossen, so ist eine Volumenzunahme bei Temperatursteigerung nicht möglich. Wird demnach die Volumenausdehnung bei Temperatursteigerung verhindert, so steigt der Flüssigkeitsdruck im Behälter stark an. Der Kompressibilitäts-Koeffizient ist stoff-, temperatur- und druckabhängig. So kann die Drucksteigerung in Abhängigkeit von den Stoffeigenschaften der Flüssigkeit 10 – 15 bar pro K Temperatursteigerung betragen. Nach Druckentlastung (Bersten des Behälters) nimmt das Volumen der Flüssigkeit um den auf die Ausdehnung zurückzuführenden Betrag ΔV zu. Um Bersten zu verhindern, können Berstscheiben oder Sicherheitsventile eingesetzt werden.

Es folgt nach **Bohl {1984} [53]** für die Volumenänderung:

$$\Delta V = \frac{1}{E} \times V_1 \times \Delta p = \kappa_K \times V_1 \times \Delta p \quad (18)$$

Hieraus ergibt sich die Druckänderung zu

$$\Delta p = \frac{\Delta V \times E}{V_1} = \frac{\Delta V}{\kappa_K \times V_1} \quad (19)$$

Der E-Modul beträgt für Wasser $2,06 \cdot 10^9$ N/m² bei 1 bar und 0°C. Hieraus ergibt sich $\kappa_K = 0,49 \times 10^{-9}$ m²/N.

Bei den nachfolgenden Berechnungen wird angenommen, daß das Entlüftungsventil nach der Flutungsphase der Steigleitung mit entsprechender Entlüftung ab dem minimalen Schließdruck von 0,3 bar Überdruck schließt. Weiterhin wird angenommen, daß zu diesem

Zeitpunkt noch kein Wasser aus den Entnahmearmaturen entnommen wird. Es handelt sich daher um eine vollständig mit Wasser gefüllte Steigleitung. Diese wird im Brandbereich entsprechend erwärmt.

Randbedingungen: Rohr mit Wasser gefüllt, keine Strömung im Rohr

Rohr: DN 80:

Außendurchmesser = 88,9 mm,

Normalwanddicke = 3,2 mm,

Innendurchmesser = 82,5 mm

Rohrlänge im Brandraum: 10 m

Wassertemperatur- Zulauf: 10°C

Nachfolgend werden zwei Fälle betrachtet:

1) Atmosphärendruck in der Leitung

2) Feuerlöschkreiselpumpe: maximaler Druck: 10 bar

1) Siedepunkt von Wasser bei 1 bar: 99,63 °C

Volumenausdehnungskoeffizient γ_R (nach **VDI Wärmeatlas {1994} [55]**)

$$\gamma_R (100^\circ\text{C}, 1,013 \text{ bar}) = 0,7501 \times 10^{-3} \text{ 1/K}$$

Die Kompressibilität von Wasser beträgt nach **Lax {1967} [80]** bei 1,013 bar und 100°C:

$$\kappa_K = 0,49 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}$$

Das Volumen des Rohres ergibt sich zu:

$$V_{R1} = l \times \pi/4 \times d_i^2 = 10 \text{ m} \times \pi/4 \times 0,0825^2 \text{ m}^2 = 0,054 \text{ m}^3$$

Nach Gleichung (14) ergibt sich die Volumenänderung zu:

$$\Delta V = 0,7501 \times 10^{-3} \text{ 1/K} \times 0,054 \text{ m}^3 \times (99,63^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) = 0,00363 \text{ m}^3 \equiv 3630 \text{ cm}^3$$

Hieraus ergibt sich mit dem Gesamtvolumen von

$$V_{R2} = V_{R1} + \Delta V = 0,058 \text{ m}^3$$

eine Volumenvergrößerung von 7,4 %.

Die Druckänderung ergibt sich nach Gleichung (19) zu

$$\begin{aligned} \Delta p &= 0,00363 \text{ m}^3 / (0,054 \text{ m}^3 \times 0,49 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}) \\ &= 137.188.209 \text{ N/m}^2 (= \text{Pa}) \equiv \mathbf{1.372 \text{ bar}} \end{aligned}$$

Zur Überprüfung dieses Wertes erfolgt die überschlägige Berechnung mit 10 – 15 bar pro K Temperatursteigerung nach **Rempe, Rodewald {1988} [68]**:

Hierbei ergibt bei der Erwärmung um 90° ein Druck von 900 bar bis 1350 bar.

Bezieht man die Volumenänderung im Brandraum nicht auf eine aufgeheizte Rohrlänge von 10 m, sondern auf eine angenommene Gesamtrohrlänge von 30 m im Gebäude mit einem Volumen von $3 \times 0,054 \text{ m}^3 = 0,162 \text{ m}^3$ ergibt sich die Druckänderung zu:

$$\begin{aligned} \Delta p &= 0,00363 \text{ m}^3 / (0,162 \text{ m}^3 \times 0,49 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}) \\ &= 45.729.403 \text{ N/m}^2 (= \text{Pa}) \equiv \mathbf{457 \text{ bar}} \end{aligned}$$

2) Siedepunkt von Wasser bei 10 bar: 179,9°C

Volumenausdehnungskoeffizient γ_R (nach **VDI Wärmeatlas {1994} [55]**)

$$\gamma_R (180^\circ\text{C}, 10,019 \text{ bar}) = 1,221 \times 10^{-3} \text{ 1/K}$$

Die Kompressibilität von Wasser beträgt nach **Lax {1967} [80]** bei 10 bar und 180°C:

$$\kappa_K = 0,76 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}$$

Das Volumen des Rohres ergibt sich wiederum zu:

$$V_{R1} = l \times \pi/4 \times d_R^2 = 10 \text{ m} \times \pi/4 \times 0,0825^2 \text{ m}^2 = 0,054 \text{ m}^3$$

Nach Gleichung (14) ergibt sich die Volumenänderung zu:

$$\Delta V = 1,221 \times 10^{-3} \text{ 1/K} \times 0,054 \text{ m}^3 \times (179,9^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) = 0,0112 \text{ m}^3 \equiv 11.200 \text{ cm}^3$$

Hieraus ergibt sich mit dem Gesamtvolumen

$$V_{R2} = V_{R1} + \Delta V = 0,0652 \text{ m}^3$$

eine Vergrößerung des Volumens um 20,7 %.

Die Druckänderung ergibt sich nach Gleichung (19) zu

$$\begin{aligned} \Delta p &= 0,0112 \text{ m}^3 / (0,054 \text{ m}^3 \times 0,76 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}) \\ &= 272.904.483 \text{ N/m}^2 (= \text{Pa}) \equiv \mathbf{2729 \text{ bar}} \end{aligned}$$

Zur Überprüfung dieses Wertes erfolgt ebenfalls die überschlägige Berechnung mit 10 – 15 bar pro K Temperatursteigerung nach **Rempe, Rodewald {1988} [68]**: Hierbei ergibt bei der Erwärmung um 170° ein Druck von 1700 bar bis 2550 bar.

Bezieht man die Volumenänderung im Brandraum nicht auf eine aufgeheizte Rohrlänge von 10 m, sondern auf eine angenommene Gesamtrohrlänge von 30 m im Gebäude mit einem Volumen von $3 \times 0,054 \text{ m}^3 = 0,162 \text{ m}^3$ ergibt sich die Druckänderung zu

$$\begin{aligned} \Delta p &= 0,0112 \text{ m}^3 / (0,162 \text{ m}^3 \times 0,49 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{N}) \\ &= 90.968.161 \text{ N / m}^2 (= \text{Pa}) \equiv \mathbf{910 \text{ bar}} \end{aligned}$$

Nach **DIN 14463-3 {2003} [15]** für fernbetätigte Füll- und Entleerungsstationen Teil 3: Be- und Entlüftungsventile PN 16 für Löschwasserleitungen „nass/trocken“ und „trocken“ beträgt der Prüfdruck 24 bar und der Mindest-Berstdruck 64 bar.

Dieser Mindest-Berstdruck wird bereits durch Aufheizung des Wassers auf Siedetemperatur von 99,63°C bei 1 bar erheblich überschritten.

Weiterhin besteht die Gefahr, daß das Rückschlagventil der Einspeisearmatur aufgrund des hohen Druckes mit hoher Wahrscheinlichkeit versagt und sich der Druck in die angeschlossenen B-Schläuche bzw. Feuerwehkreiselpumpe überträgt. Nach **DIN 14811 Teil 1 {1990} [17]** beträgt der Zerplatzdruck für einen B-Schlauch 50 bar.

Wird Wasser über 100°C erwärmt bildet sich bei einem Leck bzw. Bersten schlagartig viel Dampf.

5.4. Innendruck- und Druckstoßbelastung

5.4.1 Innendruckbeanspruchung

Im nachfolgenden Abschnitt wird der Druck ermittelt, der zum Bersten des Rohres führt.

In der Wandung eines unter Innendruck stehenden Rohres (dünnwandiger Hohlzylinder) treten in den drei Koordinaten Normalspannungen als Hauptspannungen auf (**Wagner {1984} [49]**):

Umfangsspannung σ_u in Umfangsrichtung

Längsspannung σ_l in Längsrichtung

Radialspannung σ_r in Radialrichtung

Durch Zusammenfassung dieser Hauptspannungen kann mit Hilfe der Festigkeitshypothesen ein Spannungsvergleichswert $\tilde{\sigma}_v$ errechnet werden.

Je nach Grenzwertbetrachtung über das Versagen des Werkstoffes, also ob das Versagen durch plastische Verformung, Dauerbruch, Gleitbruch oder Trennungsbruch hervorgerufen wird, ist die Berechnung mit einer bestimmten Festigkeitshypothese durchzuführen.

Für das Versagen durch plastisches Verformen und gegen Dauerbruch zeigt nach **Wagner**

{1984} [49] die

Gestaltänderungshypothese

die beste Übereinstimmung zwischen Versuch und Rechnung.

Die

Schubspannungshypothese

kommt bei Versagen durch plastisches Verformen und gegen Gleitbruch zur Anwendung. Im Unterschied zur Gestaltänderungshypothese finden bei der Schubspannungshypothese nicht die Differenzen aus allen drei Hauptspannungen, sondern lediglich die Differenz der größten und kleinsten Hauptspannung Berücksichtigung.

Für das Versagen gegen Trennbruch machen diese beiden Hypothesen keine Aussagen. Hier hat sich die

Normalspannungshypothese

als am brauchbarsten erwiesen. Versagen durch Trennungsbruch ist somit zu erwarten, wenn die größte Zugspannung die Zugfestigkeit (Trennfestigkeit) übersteigt.

Da die Schubspannungshypothese nur geringfügig von der Gestaltänderungshypothese abweicht, wird diese wegen ihres einfachen Aufbaus bevorzugt im Rohrleitungs- und Behälterbau verwendet.

Nach **Wagner {1984} [49]** ergibt sich somit aus der Schubspannungshypothese die mittlere Vergleichsspannung $\tilde{\sigma}_{v,Sch}$ bei vorwiegend ruhender Beanspruchung für ein nahtloses Rohr zu:

$$\tilde{\sigma}_{v,Sch} = \frac{p}{2} \times \left(\frac{d_i}{s_v} + 1 \right) \quad (20)$$

mit

p = innerer Überdruck

d_i = Innendurchmesser

s_v = Rechnerische Wanddicke ohne Zuschläge

Aus dieser Gleichung ergibt sich der Druck zu

$$p = \left(\frac{2 \times \tilde{\sigma}_{v,Sch}}{\frac{d_i}{s_v} + 1} \right) \quad (21)$$

Bei geschweißten Stahlrohren muß die Festigkeit der Schweißnaht durch eine Schweißnahtwertigkeit (Verschwächungsfaktor) v_N berücksichtigt werden. Hiermit ergeben sich die entsprechenden Gleichungen zu

$$\tilde{\sigma}_{v,Sch} = \frac{p}{2} \times \left(\frac{d_i}{s_v \times v_N} + 1 \right) \quad (22)$$

Aus dieser Gleichung ergibt sich der Druck zu

$$p = \left(\frac{2 \times \tilde{\sigma}_{v,Sch}}{\frac{d_i}{s_v \times v_N} + 1} \right) \quad (23)$$

Nach **Wagner {1984} [49]** beträgt die Schweißnahtwertigkeit je nach Ausführungsklasse der Rohre zwischen 0,5 und 1. Bei einer Schweißnahtwertigkeit $v_N = 1$ können solche Rohre wie nahtlose Rohre eingesetzt werden. Bei den nachfolgenden Berechnungen wird $v_N = 0,9$ angenommen.

Für die Berechnung eines Rohres DN 80 wird wiederum der Stahl gemäß **DIN 10255 {2004} [5]** (siehe **Tabelle 7**) verwendet:

Folgende Fragestellungen werden hierbei untersucht:

- a) Ab welchem inneren Überdruck p_{bl} muß mit größerer bleibender Dehnung bei einem Rohr DN 80 gerechnet werden?

Innendurchmesser $d_i = 82,5 \text{ mm}$

Wanddicke $s_v = 3,2 \text{ mm}$

Obere Streckgrenze $\sigma_S = 195 \text{ N/mm}^2$

Zugfestigkeit $\sigma_B = 320 \text{ bis } 520 \text{ N/mm}^2$

Schweißnahtwertigkeit $v_N = 0,9$

Aus der obigen Gleichung (23) für den Druck ergibt sich mit

$$\tilde{\sigma}_{v, Sch} = \sigma_{zul} = \sigma_S = 195 \text{ N/mm}^2$$

$$p_{bl} \approx 13,2 \text{ N/mm}^2 \equiv \mathbf{132 \text{ bar}}$$

- b) In welchem Druckbereich ist ein Bruch des Rohres DN 80 zu erwarten?

Aus der obigen Gleichung (23) für den Druck ergibt sich mit

$$\tilde{\sigma}_{v, Sch} = \sigma_{zul} = \sigma_B = 320 \text{ bis } 520 \text{ N/mm}^2$$

$$p_B \approx 21,6 \text{ bis } 35,1 \text{ N/mm}^2 \equiv \mathbf{216 \text{ bis } 351 \text{ bar}}$$

Diese Werte für den Druck würden nach den vorhergehenden Berechnungen bei der Ausdehnung von Wasser in einem 10 m langen Rohr erreicht bzw. überschritten werden.

Berücksichtigt man, daß wie bereits in Abschnitt 4 erläutert (**Müller {1970} [74]**), die Dehngrenze bei 500°C nur noch 46% und die Bruchfestigkeit nur noch 50% der Bruchfestigkeit des Wertes bei Raumtemperatur bei unvergütetem Stahl beträgt, so ergibt sich entsprechend für den Bruch des Rohres bei 500°C nach Gleichung (23) mit:

$$\tilde{\sigma}_{v, Sch} = \sigma_{zul} = \sigma_B = 160 \text{ bis } 260 \text{ N/mm}^2 \text{ (bei } 500^\circ\text{C)}$$

$$p_B \approx 10,8 \text{ bis } 17,5 \text{ N/mm}^2 \equiv \mathbf{108 \text{ bis } 175 \text{ bar (bei } 500^\circ\text{C)}}$$

Hierbei ist zu beachten, daß im Brandfall auch höhere Temperaturen über 1000°C auftreten können und die zum Bersten führenden Drücke dadurch noch weiter reduziert werden.

Da das Be- und Entlüftungsventil weit vor Erreichen dieser Drücke versagt, tritt ein Bersten der Rohrleitung nicht ein.

5.4.2 Druckstoßbeanspruchung

Nach **Wagner {1984} [49]** können in Rohrleitungen im praktischen Betrieb Druckstöße auftreten, die bei der Berechnung berücksichtigt werden müssen. Fast jede von einer Flüssigkeit durchströmte Rohrleitung ist in irgendeiner Art mit Absperrorganen versehen, die den Flüssigkeitsstrom verändern können. Aber auch die dem Rohrsystem die Flüssigkeit zuführenden Energieorgane, wie Pumpen, Hochbehälter, Windkessel, sind strömungsverändernde Elemente. Erfolgt nun in einem System, in dem sich eine Flüssigkeit im Zustand der stationären Strömung befindet, eine kurzzeitige Beeinflussung zur instationären Strömung hin, so kann ein Druckstoß auftreten. Der Druckstoß kann erzeugt werden durch Förderung von Flüssigkeiten mittels Kolbenpumpen, Anlassen oder Abstellen von Kreiselpumpen, Öffnen oder Schließen von Absperr- und Regelorganen, Rohrbrüche, Zusammenfall oder Ausbreitung von Gasblasen. Bei der Druckstoßtheorie setzt man eine elastische Verformung des Wassers und der Rohrwände während der Verzögerung der Flüssigkeitgeschwindigkeit unter Freiwerden von kinetischer Energie voraus. Durch diese elastische Verformung wird gegenüber der Annahme einer völlig starren Flüssigkeitssäule der Überdruck abgeschwächt.

Nachfolgend wird das Anlagenschema für die Druckstoßberechnung gezeigt.

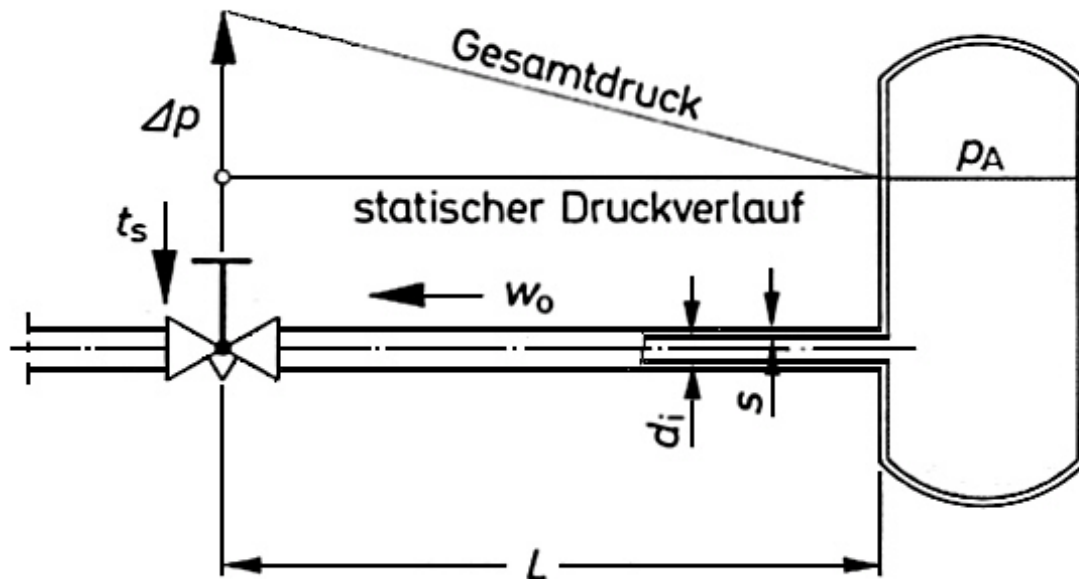


Bild 19: Anlagenschema für die Druckstoßberechnung nach **Wagner {1984} [49]**.

Wesentlich ist hierbei die Verzögerungszeit, die das Schließgesetz bestimmt. Bezeichnet man mit t_1 die Laufzeit der Druckwelle vom Abschlußorgan bis zum Druckspeicher und wieder zurück, mit L die Leitungslänge zwischen dem Abschlußorgan und der Reflexionswelle sowie mit a die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Druckwelle, d.h. der elastischen Verformung der Flüssigkeitselemente in Verbindung mit der Verformung der Rohrwandelemente, so gilt:

$$t_1 = \frac{2 \times L}{a} \quad (24)$$

Findet der Abschluß der Leitung in einer Schließzeit t_s statt, die kleiner ist als die Laufzeit t_1 ($t_s < t_1$), so ergibt sich der größtmögliche Druckstoß, der sogenannte

Joukowsky-Stoß,

bei dem somit die Reflexion der Welle keinen Einfluß auf die Amplitude des Druckstoßes hat.

Der Druckanstieg $\Delta \hat{p}$ beim Joukowsky-Stoß läßt sich für einsträngige Leitungen mit kon-

stantem Innendurchmesser d_i bestimmen aus:

$$\Delta \hat{p} = \rho \times g \times \hat{H} = \rho \times a \times \Delta w \quad (25)$$

mit: \hat{H} = Joukowsky-Stoßhöhe

g = Erdbeschleunigung

a = Druckfortpflanzungsgeschwindigkeit

Δw = Geschwindigkeitsdifferenz zwischen stationärem Zustand und Abbremsgeschwindigkeit.

Bei Wasser im Rohr mit völlig starren Wänden erreicht die Druckfortpflanzungsgeschwindigkeit den Wert $a = 1425$ m/s, d.h. die Schallgeschwindigkeit im Wasser.

Für Wasser in Stahlrohrleitungen mit Normalwanddicke kann nach Literaturangaben als Mittelwert $a = 1300$ m/s eingesetzt werden.

Für dünnwandige Fernleitungen kann sich dieser Wert bis auf $a \approx 1000$ m/s ermäßigen.

Wird nun die Geschwindigkeit vom stationären Zustand w_0 plötzlich auf $w = 0$ abgebremst, ergibt sich der maximal mögliche Druckstoß gemäß Gleichung (25) mit

$$\Delta w = w_0 .$$

Wird dagegen die Flüssigkeitssäule in der Leitung allmählich, und zwar linear, abgebremst in einer Schließzeit t_1 die größer ist als die Reflexionszeit ($t_s > t_1$), dann ergibt sich eine Druckerhöhung von

$$\Delta p = z \times \rho \times a \times w_0 \quad (26)$$

Hierin ist

$$z = \frac{t_1}{t_s} = \frac{2 \times L}{a \times t_s} \quad (27)$$

mit $z \leq 1,0$.

Der maximale Gesamtüberdruck für die Berechnung gegen Verformen beträgt

$$\hat{p} = p_A + \Delta p \quad (28)$$

Geht man bei einem B-Rohr nach **DIN 14811 Teil 1 {1990} [17]** von einem maximalen Volumenstrom von 2400 l/min aus, so ergibt sich bei einem Rohr DN 80 –mit Innendurchmesser $d_i = 82,5$ mm eine Strömungsgeschwindigkeit von

$$w_R = \frac{\dot{V}}{A_R} = \frac{2,4 \text{ m}^3}{\frac{\pi}{4} \times 0,0825^2 \text{ m}^2 \times 60 \text{ s}} = 7,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (29)$$

Der maximale Druckstoß tritt auf bei $z=1$

Hieraus folgt aus

$$z = \frac{2 \times L}{a \times t_s}$$

die Leitungslänge L , ab der der maximale Druckstoß auftritt zu

$$L \geq \frac{t_s \times a}{2} \quad (30)$$

Bei Annahme einer Schließzeit des Kugelhahns von $t_s = 0,1$ s (linear) ergibt sich:

$$L \geq \frac{0,1 \text{ s} \times 1300 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{2} = 65 \text{ m}$$

Das bedeutet, der maximale Druckstoß tritt bei einer Leitungslänge von mehr als 65 m auf.

Der maximale Druckstoß ergibt sich zu

$$\Delta p = z \times \rho \times a \times w_0 = 1 \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1300 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 7,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 9.750.000 \frac{\text{kg}}{\text{m} \times \text{s}^2} \equiv 97,5 \text{ bar}$$

Nach Gleichung (28) ergibt sich schließlich der Gesamtüberdruck unter Berücksichtigung der Feuerlöschkreiselpumpe mit 10 bar zu

$$\hat{p} = p_A + \Delta p = 10 \text{ bar} + 97,5 \text{ bar} = 107,5 \text{ bar}$$

Bei einer Leitungslänge von 30 m ergibt sich nach Gleichung (27)

$$z = \frac{2 \times L}{a \times t_s} = \frac{2 \times 30 \text{ m}}{1300 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,1 \text{ s}} = 0,46$$

und damit wird der Druckstoß zu

$$\Delta p = z \times \rho \times a \times w_0 = 0,46 \times 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1300 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 7,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 4.485.000 \frac{\text{kg}}{\text{m} \times \text{s}^2} \equiv 45 \text{ bar}$$

Der Gesamtüberdruck unter Berücksichtigung der Feuerlöschkreiselpumpe mit 10 bar ergibt sich zu

$$\hat{p} = p_A + \Delta p = 10 \text{ bar} + 45 \text{ bar} = 55 \text{ bar}$$

Diese kurze Schließzeit ist allerdings bei der Betätigung z.B. der Entnahmearmatur mit Feuerwehrschlüssel bzw. dem Öffnen des Strahlrohres nicht zu erwarten.

Bei einer Schließzeit von 0,5 s ergibt sich mit $z = 0,092$ der Druckstoß zu 9 bar bzw. der Gesamtdruck zu 19 bar.

Bei einer Schließzeit von 1 s ergibt sich mit $z = 0,046$ der Druckstoß zu 4,5 bar bzw. der Gesamtdruck zu 14,5 bar.

Aus diesen Werten ist erkennbar, daß es außer von der Rohr- bzw. Schlauchlänge ganz entscheidend auf die Schließzeit ankommt, wie hoch der Druckstoß ausfällt.

6. VERDAMPFUNGSVORGÄNGE IM BEHEIZTEN ROHR

Die nachfolgenden Betrachtungen haben das Ziel, die Verdampfungsvorgänge beim Einleiten von Löschwasser in die aufgeheizte trockene Steigleitung zu beschreiben.

Die Aufgabenstellung besteht darin festzustellen, wie viel Dampf beim Einströmen des Löschwassers in die erhitzte Rohrleitung entstehen kann. Es handelt sich dabei um ein in-stationäres Wärme- und Stoff- und Impulstransportproblem.

Nach **Bohl {1984} [53]** liegt bei der Fortleitung von Luft, Gasen und Dämpfen, hier Wasserdampf in Rohrleitungen, eine Expansionsströmung vor. Infolge des Reibungsverlustes nimmt der Druck in Strömungsrichtung ab. Im allgemeinen Fall ändern sich dabei längs der Rohrleitung Druck, Temperatur, Dichte und Geschwindigkeit. Im Gegensatz zur inkompressiblen Strömung (hier von Wasser) ist der Druckabfall Δp längs der Rohrleitung bei der kompressiblen Strömung nicht linear und die Geschwindigkeit w nicht konstant (**Bild 20**).

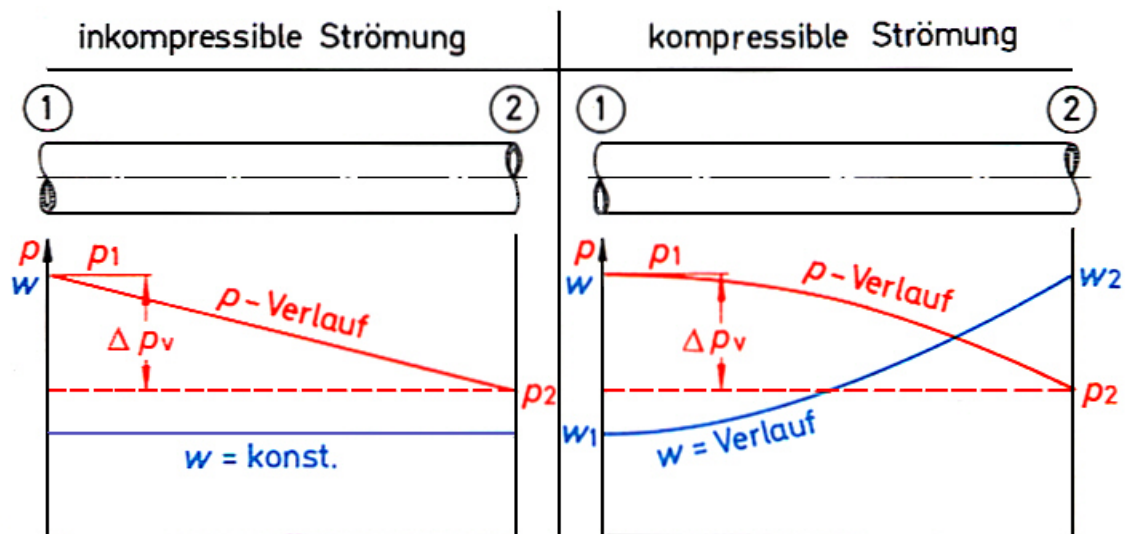


Bild 20: Vergleich zwischen inkompressibler und kompressibler Rohrströmung nach **Bohl {1984} [53]**.

Nach **Baehr {1978} [54]** ist im Gebiet des festen, flüssigen und gasförmigen Zustandsbereichs Stoff homogen, d.h. seine physikalischen Eigenschaften ändern sich innerhalb seines Volumens nicht. Diese Bereiche der Zustandsfläche nennt man die Einphasengebiete. Im Naßdampfgebiet besteht der Stoff dagegen aus zwei Phasen, er ist heterogen. Diese

Gebiete sind die Zweiphasengebiete der Zustandsfläche.

Nach **Hemming {1984} [77]** ist die Wärmeleitung die Wärmefortpflanzung innerhalb eines Stoffes durch Molekülstöße. Dieser Wärmestrom kann für eine ebene Wand wie folgt berechnet werden:

$$\dot{Q}_L = \frac{\lambda}{s} \times A \times \Delta T \quad (31)$$

\dot{Q}_L = Wärmestrom in W

λ = Wärmeleitfähigkeit in W/ m × K

s = Dicke der Wand in m

A = Übertragungsfläche in m²

ΔT = Temperaturdifferenz in K

Nach **Hemming {1984} [77]** kann der durch **Wärmeleitung** übertragene Wärmestrom \dot{Q}_L (Wärmefortpflanzung innerhalb eines Stoffes durch Molekülstöße) bei einer Rohrwand durch folgende Formel berechnet werden:

$$\dot{Q}_L = \frac{\lambda \times 2 \times \pi \times L}{\ln \frac{r_a}{r_i}} \times \Delta T \quad (32)$$

\dot{Q}_L = Wärmestrom in W

λ = Wärmeleitfähigkeit in W/ m × K

ΔT = Temperaturdifferenz in K

L = Rohrlänge

r_a = Außenradius in m

r_i = Innenradius in m

Hierbei ergeben sich folgende Wärmeleitfähigkeiten und spezifische Wärmekapazitäten verschiedener Stoffe bei für 20°C und 1 bar (**Tabelle 12**):

Stoffart	Wärmeleitzahl in W/m K	spezifische Wärmekapazität in W s/kg K
Eisenmetalle	46 ... 58	450... 500
Leichtmetalle	150 ... 250	840... 870
Kupfer	395	390
Porzellan, Steinzeug	0,8 ... 1,3	700... 800
Mineralien	1 ... 4	700... 900
Glas	0,6 ... 1	800... 850
Holz	0,17... 0,34	2 100... 2 900
Kunststoffe	0,1 ... 0,4	1 500... 2 000
Schaumstoffe	0,02... 0,08	1 000... 1 500
Wasser	0,58	4 190
organische Flüssigkeiten	0,1 ... 0,5	1 000... 4 000
Luft	0,026	1 000
Wasserstoff	0,187	14 280
Generatorgas	0,023	1 050
Wasserdampf (100 °C)	0,019	2 000

Tabelle 12: Wärmeleitahlen und spezifische Wärmekapazitäten verschiedener Stoffe (20°C und 1 bar) nach **Hemming {1984} [77]**.

Bei der Konvektion erfolgt der Wärmestrom durch den Transport von Bezirken oder Schichten fluider Medien zur Wärmeübertragungsfläche.

Man unterscheidet zwischen freier Konvektion und erzwungener Konvektion.

Freie Konvektion entsteht durch Strömungsvorgänge, die allein durch Dichteunterschiede (z.B. in einem Temperaturfeld) hervorgerufen werden. Erzwungene Konvektion wird durch eine von außen aufgezwungene Fluidströmung erzeugt.

Man nennt die Wärmeübertragung durch Konvektion zwischen einem Fluid und einer Fläche auch Wärmeübergang. Der Wärmestrom beim Wärmeübergang ist proportional der Wärmeübergangszahl α mit der Einheit W/m²•K.

$$\dot{Q}_k = \alpha \times A \times \Delta T \quad (33)$$

Der Wärmeübergang bei erzwungener Konvektion ist abhängig vom Strömungszustand (laminar oder turbulent) — ausgedrückt durch die Reynoldszahl Re — von den Stoffwerten des Fluids — ausgedrückt durch die Prandtlzahl Pr — und von der Wärmeleitung der Grenz-

schicht zwischen Fluid und Übertragungsfläche – ausgedrückt durch die Nusseltzahl Nu.

Weiterhin tritt Wärmestrahlung auf, die auf der Wärmeübertragung durch elektromagnetische Wellen beruht.

Diese ergibt sich nach **Wagner {1985} [78]** für den Wärmestrom von einer Fläche A_1 auf die Fläche A_2 zu:

$$\dot{Q}_{S,1,2} = C_{1,2} \times A_1 \times (T_1^4 - T_2^4) \quad (34)$$

$C_{1,2}$ = Strahlungsaustausch zwischen den beiden Flächen

Für parallel große schwarze Flächen ergibt sich der Maximalwert von:

$$C_{1,2} = C_S = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K}^4)$$

In der Praxis treten Wärmeleitung und Konvektion nicht nur getrennt für sich, sondern auch gemeinsam auf.

Der **Wärmestrom** beträgt dann

$$\dot{Q}_{L,K} = k \times A \times \Delta T_m \quad (35)$$

k = Wärmedurchgangskoeffizient

A = Wärmeaustauschfläche

ΔT_m = mittlere Temperaturdifferenz

Der Wärmedurchgang durch mehrschichtige Zylinder wird in **Bild 21** dargestellt:

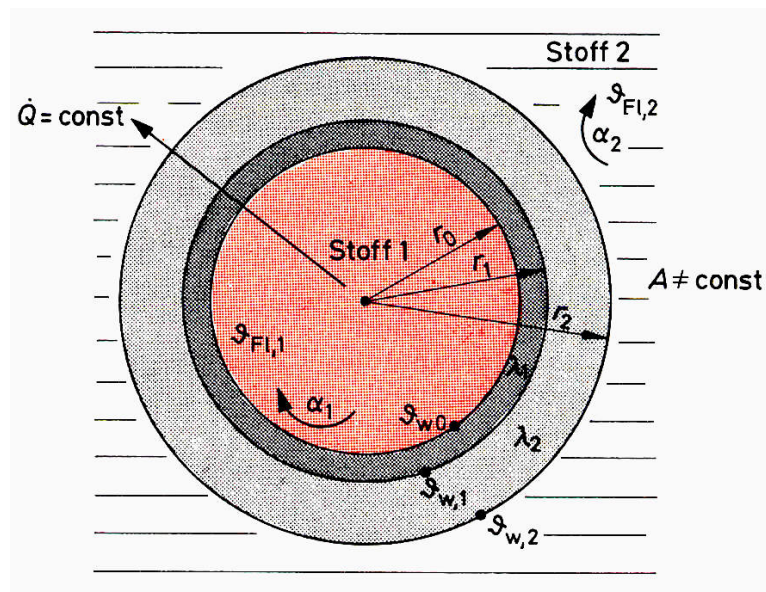


Bild 21: Wärmedurchgang durch mehrschichtige Zylinder (**Wagner {1985} [78]**).

Im Falle der trockenen ungeschützten Steigleitung handelt es sich um einen einschichtigen Zylinder. Der Wärmestrom hierfür beträgt:

$$\dot{Q}_{L,K} = k_a \times A_a \times \Delta T_m = k_a \times \pi \times d_a \times L \times (T_{Fl,a} - T_{Fl,i}) \quad (36)$$

$$k_a = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} \times \frac{d_a}{d_i} + \frac{d_a}{2 \times \lambda_R} \times \ln \frac{d_a}{d_i} + \frac{1}{\alpha_a}} \quad (37)$$

mit

k_a = Wärmedurchgangskoeffizient außen

A_a = Rohroberfläche außen

d_a = Rohraußendurchmesser

d_i = Rohrinne Durchmesser

$T_{Fl,i}$ = Temperatur des Mediums innerhalb des Rohres

$T_{Fl,a}$ = Temperatur des Mediums außerhalb des Rohres

λ_R = Wärmeleitfähigkeit der Rohrwand

α_a = Wärmeübergangskoeffizient an der äußeren Rohrwand

α_i = Wärmeübergangskoeffizient an der inneren Rohrwand

Es wird angenommen, dass bei der trockenen Steigleitung das Wasser nur im Bereich des Brandbereiches verdampft.

Die Verdampfung ist der Übergang einer Flüssigkeit in den dampfförmigen Zustand, nachdem ihre Oberfläche die vom Druck abhängige Sättigungstemperatur erreicht hat. Die zum Verdampfen einer Masseneinheit Flüssigkeit (z.B. 1 kg) erforderliche Wärmemenge nennt man Verdampfungswärme. Die Verdampfungswärme wird mit zunehmendem Druck kleiner und verschwindet am kritischen Punkt.

Für Wasser liegt der kritische Punkt bei ca. 221 bar und 374°C.

In den heterogenen Gebieten haben die beiden im thermodynamischen Gleichgewicht stehenden Phasen denselben Druck und dieselbe Temperatur. Ihre spezifischen Zustandsgrößen, z.B. das spezifische Volumen, die spezifische innere Energie oder die spezifische Entropie sind jedoch verschieden.

Ein Zustand in den Zweiphasengebieten ist durch die Angabe von p und T noch nicht festgelegt, denn diese beiden Zustandsgrößen sind gekoppelt: zu jedem Druck gehört eine bestimmte Temperatur. Erst wenn auch die Zusammensetzung des heterogenen Systems, das Mengenverhältnis der beiden Phasen bekannt ist, liegt der Zustand vollständig fest.

Kaltes Wasser wird zunächst von der Temperatur T durch Wärmezufuhr zum Sieden auf Siedetemperatur t_s gebracht.

Diese Siedetemperatur liegt bei 1 bar bei 99,63°C.

Sein spez. Volumen ist hierbei

$$v_s = v'.$$

Bei höherem Druck siedet das Wasser bei einer höheren Siedetemperatur t_s

Durch weitere Wärmezufuhr entsteht aus siedendem Wasser ein Wasser-Dampf-Gemisch.

Der Dampfanteil x kg Dampf/ kg Gemisch nimmt im Gemisch ständig zu und der Wasseranteil wird entsprechend kleiner. Schließlich ist alles verdampft, der Zustand $x = 1$ erreicht und

das spezifische Volumen

$$v''$$

erreicht.

Während des Verdampfungsvorganges bleibt die Temperatur

$$T_s = \text{konstant}$$

von $x = 0$ bis $x = 1$.

Der nun entstandene Dampf heißt trocken gesättigter Dampf (Sattdampf)

Führt man dem trocken gesättigten Dampf weiter Wärme zu, dann beginnt nunmehr seine Temperatur zu steigen. Eine Überhitzung des Sattdampfes ist nur möglich, wenn der Sattdampf vom Wasser, aus dem er entstanden ist, vollständig getrennt wird. Andernfalls würde bei stärkerer Wärmezufuhr nur mehr Wasser (schneller) verdampfen. Die Temperatur bliebe T_s .

Bild 22 zeigt die Verdampfungsvorgänge in einem beheizten Rohr nach **Wagner {1985} [78]**.

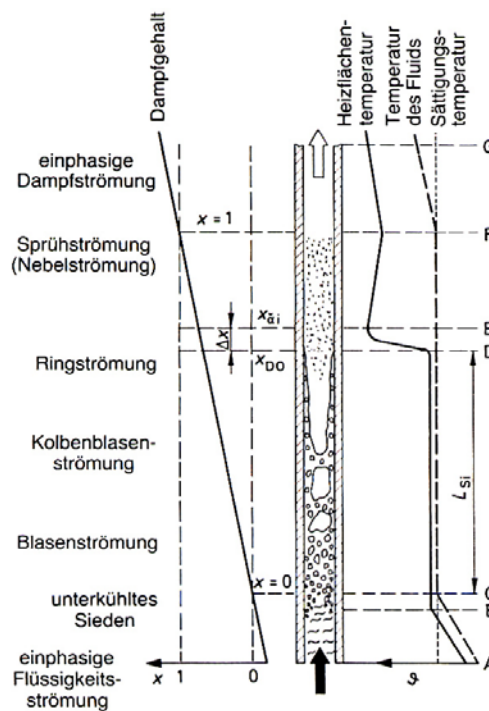


Bild 22: Verdampfungsvorgänge in einem beheizten Rohr (**Wagner {1985} [78]**).

Im Bereich des **unterkühlten Siedens** ist die Innenwandtemperatur des Rohrs größer als die Sattedampftemperatur des Mediums. Die sich hier bildenden Dampfblasen werden nach Erreichen einer bestimmten Größe vom Wasser mitgerissen und kondensieren im unterkühlten Medium. Dadurch wird eine intensive Turbulenz in der Grenzschicht erzeugt und der Wärmeübergang wesentlich begünstigt. Es findet keine reine Dampferzeugung statt.

Im Bereich des **normalen Siedens** ist die Sattedampftemperatur des Mediums erreicht und die Erzeugung der Dampfblasen verstärkt. Bei sehr kleinen Werten verläuft der Prozeß ähnlich wie beim unterkühlten Sieden, jedoch ohne Kondensation der Dampfblasen. Später entstehen durch Zusammenschmelzen einzelner Dampfblasen die Dampfropfen in der Mitte des Rohrs, und daraus bildet sich in der Rohrmitte ein Strom aus Dampf-Wasser-Emulsion.

Am Ende entsteht eine **ringförmige Strömung**, in deren Mitte Dampf strömt. Rundherum, entlang des Rohrs, strömt mit kleinerer Geschwindigkeit ein dünner Wasserfilm.

Wird dieser Wasserfilm an der Rohrwand unterbrochen, so wird auch der Wärmeübergang schlechter, und die **Filmverdampfung** beginnt (Position D). Die innere Rohrwandtemperatur beginnt zu steigen. Hierbei ist zu beachten, daß sich die Strömungsformen je nach Kombination von Druck, Wärmebelastung und Massenstromdichte ändern und der physikalische Mechanismus der Wärmeübertragung gegenüber dem normalen Sieden nicht identisch bleibt. Sobald der Wasserfilm vom Dampffilm ersetzt wird, geht die Wärme gleich wie bei der einphasigen Dampfströmung über. Die Geschwindigkeit des Dampffilms bleibt jedoch wesentlich kleiner als die mittlere Geschwindigkeit des Mediums.

Nach **Hemming {1984} [77]** entsteht die Filmverdampfung bei sehr großen Wärmestromdichten ($> 300\,000\text{ W/m}^2$), wenn die Dampfblasen einen zusammenhängenden, die Heizfläche isolierenden Dampffilm bilden. Beim Umschlag Blasenverdampfung / Filmverdampfung sinkt die Wärmeübergangszahl plötzlich ab.

Die Rohrwandtemperatur steigt dann weiter bis zu einem Wert (Position E), bei dem die Geschwindigkeit des Dampffilms groß genug ist, um die Rohrwand entsprechend zu kühlen (**Wagner {1985} [78]**). Unter dieser Bedingung weist auch die Wärmeübergangszahl den kleinsten Wert α_{\min} auf. In diesem Moment beginnt die Rohrwandtemperatur zu sinken, und zwar so lange, bis die Geschwindigkeit des Dampffilms die gleichen Werte wie bei der ein-

phasigen Dampfströmung hat.

Nach **Hemming {1984} [77]** ergeben sich folgende Wärmeübergangszahlen fluider Medien an Wandflächen (**Tabelle 13**).

Medium	Wärmeübergangszahl in W/m ² K
Luft an ebene Wände	8... 80
Wasser an ebene Wände	100... 1 000
siedendes Wasser	1 000... 15 000
kondensierender Wasserdampf	6 000... 25 000
kondensierende org. Dämpfe	600... 2 000
Luft außen an Rohrbündel	20... 1 000
Wasser in Rohren (turbulent)	2 000... 15 000
Wasser außen an Rohrbündel	1 000... 5 000
Wasser an Rührgefäßmantel	3 000... 3 500
Luft an Wirbelschicht	200... 600

Tabelle 13: Wärmeübergangszahlen fluider Medien an Wandflächen nach **Hemming {1984} [77]**.

Weiterhin ergeben sich entsprechend **Tabelle 14** folgende Wärmeübergangszahlen bei der Verdampfung:

Wärmestromdichte in W/m ²		Wärmeübergangszahl in W/m ² K
Blasen- verdampfung	8 000	1 400
	10 000	1 500
	20 000	2 500
	50 000	5 000
	100 000	8 500
	150 000	10 000
Filmver- dampfung	300 000	10 000
	400 000	3 000
	500 000	1 500

Tabelle 14: Wärmeübergangszahlen bei der Verdampfung nach **Hemming {1984} [77]**.

Bei der Verdampfung im Rohr muß zunächst das einströmende Wasser zum Sieden gebracht werden.

Unter der Annahme, daß in der Leitung ein Druck von 10 bar (Absolutdruck) aufgrund der

Feuerlöschkreiselpumpe herrscht, siedet das Wasser statt bei 99,63 °C (1 bar) erst bei 179,9°C.

Die Dichte des siedenden Wassers weist bei 179,9°C einen Wert von 887,06 kg/m³ nach **VDI-Wärmeatlas [55]** auf.

Das spezifische Volumen beträgt bei dieser höheren Siedetemperatur

$$v_s = v' = 1,127 \text{ l/kg bzw. } 0,001127 \text{ m}^3/\text{kg}.$$

Die Verdampfungsenthalpie des flüssigen Wassers beträgt entsprechend **Tabelle 15** bei 179,9°C und 10 bar

$$h_v (\equiv r) = 2015,3 \text{ kJ/kg}.$$

Durch weitere Wärmezufuhr entsteht aus siedendem Wasser ein Wasser-Dampf-Gemisch. Der Dampfanteil x kg Dampf/kg Gemisch nimmt ständig zu, der Wasseranteil $(1 - x)$ kg Wasser/kg Gemisch wird ständig kleiner.

Schließlich ist alles Wasser verdampft, der Zustand $x = 1$ und das spezifische Volumen v'' erreicht.

Während des Verdampfungsvorganges zwischen $x = 0$ und $x = 1$ bleibt die Temperatur des Dampf-Wasser-Gemisches konstant gleich der zum Druck gehörenden Siedetemperatur. Daher kann man bei feuchtem Dampf durch Messung von p und T nichts über seinen Dampfgehalt aussagen.

Nach **Dietzel {1984} [50]** ist das spezifische Volumen von feuchtem Dampf v_{feucht} kleiner als von Satttdampf v'' bei gleichem Druck. Das in der Mischung enthaltene Wasser hat einen viel kleineren Rauminhalt als der gasförmige Dampf und errechnet sich zu:

$$v_{\text{feucht}} = x \times v'' + (1 - x) \times 0,001 \quad (38)$$

Führt man dem trocken gesättigten Dampf ($x = 1$) weitere Wärme zu, dann beginnt seine Temperatur zu steigen. Er verhält sich umso mehr wie ein Gas, je höher seine Temperatur über der zum Druck gehörenden Siedetemperatur liegt.

Eine Überhitzung des Sattdampfes ist nur möglich, wenn der Sattdampf vom Wasser, aus dem er entstanden ist, vollständig getrennt wird. Andernfalls würde bei stärkerer Wärmezufuhr nur mehr Wasser (schneller) verdampfen; die Temperatur bliebe bei der Siedetemperatur.

Aus diesem Grund wird bei der hier vorliegenden Problematik mit trockenen Steigleitungen der überhitzte Dampf nicht betrachtet.

Bei konstantem Druck berechnet sich die **Enthalpie des siedenden Wassers** zu

$$h' = C_{pmw} \Big|_{T_0}^{T_s} \times T_s \quad (39)$$

Die Verdampfungsenthalpie h_v berechnet sich aus der Differenz der Enthalpie des Sattdampfes h'' und der Enthalpie des siedenden Wassers h' zu

$$h_v = h'' - h' \quad (40)$$

Die Enthalpie von feuchtem Dampf ist umso größer, je höher der Dampfgehalt ist. Sie ergibt sich zu:

$$h_{fD} = h' + x \times h_v \quad (41)$$

Nach **Dietzel {1984} [50]** gilt für Wasser und Wasserdampf das folgende p, v -Diagramm (**Bild 23**) bzw. die Wasserdampf-tafel im Sättigungszustand (**Tabelle 15**).

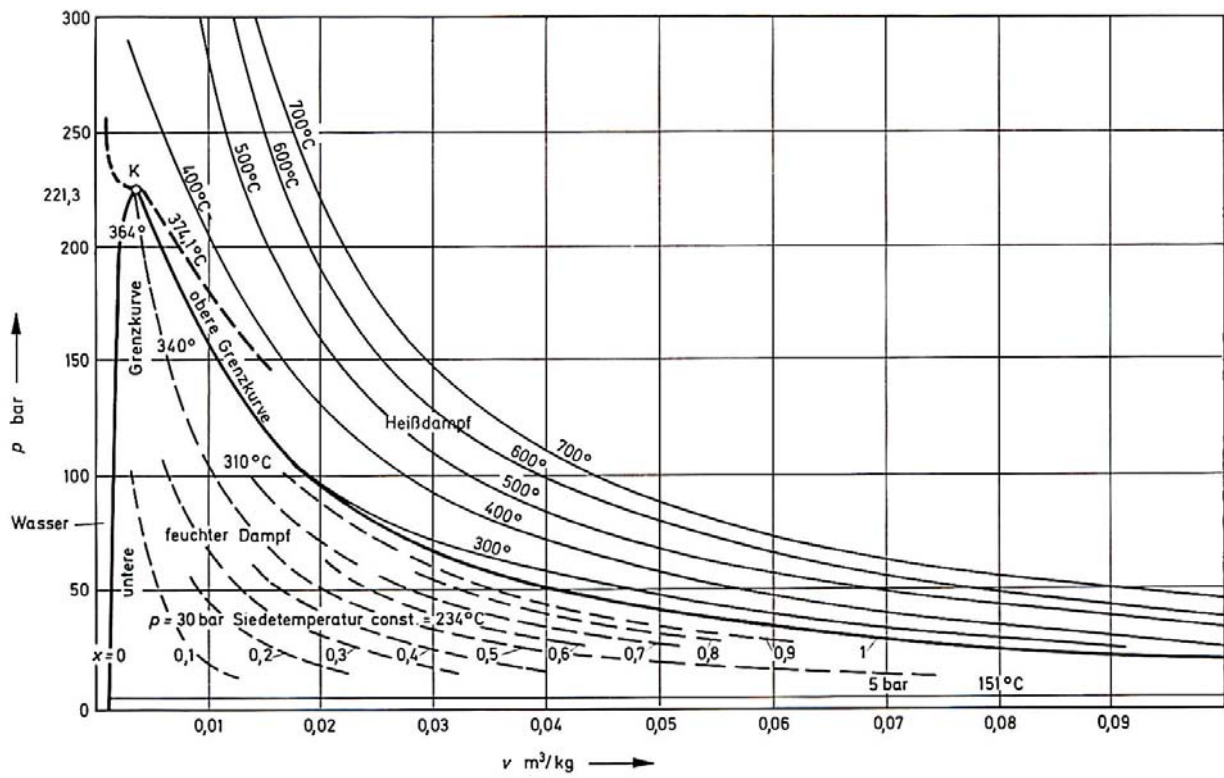


Bild 23: p, v-Diagramm für Wasser und Wasserdampf (Dietzel {1984} [50]).

p bar	t_s °C	v' dm ³ /kg	v'' m ³ /kg	h' kJ/kg	h'' kJ/kg	r kJ/kg	s' kJ/kg K	s'' kJ/kg K
0,01	6,98	1,0001	129,2	29,35	2513,4	2484,0	0,1061	8,9734
0,02	17,51	1,0012	67,02	73,45	2532,7	2459,3	0,2607	8,7214
0,03	24,10	1,0026	45,68	100,97	2544,7	2443,8	0,3543	8,5754
0,04	28,98	1,0040	34,81	121,36	2553,6	2432,3	0,4223	8,4725
0,05	32,90	1,0052	28,20	137,71	2560,7	2423,0	0,4761	8,3930
0,06	36,19	1,0064	23,75	151,42	2566,7	2415,2	0,5206	8,3283
0,07	39,03	1,0074	20,54	163,28	2571,8	2408,5	0,5588	8,2737
0,08	41,54	1,0084	18,11	173,76	2576,3	2402,5	0,5922	8,2266
0,09	43,79	1,0094	16,21	183,16	2580,3	2397,1	0,6220	8,1851
0,1	45,84	1,0102	14,68	191,71	2583,9	2392,2	0,6489	8,1480
0,2	60,09	1,0173	7,652	251,28	2608,9	2357,6	0,8316	7,9060
0,4	75,89	1,0266	3,994	317,46	2635,7	2318,3	1,0255	7,6667
0,6	85,95	1,0334	2,732	359,73	2652,2	2292,5	1,1449	7,5280
0,8	93,51	1,0389	2,087	391,53	2664,3	2272,7	1,2324	7,4300
1,0	99,63	1,0436	1,694	417,33	2673,8	2256,5	1,3022	7,3544
1,1	102,32	1,0457	1,549	428,66	2678,0	2249,3	1,3324	7,3222
1,2	104,81	1,0477	1,428	439,18	2681,8	2242,6	1,3603	7,2928
1,3	107,13	1,0496	1,325	449,01	2685,3	2236,3	1,3862	7,2658
1,4	109,32	1,0514	1,236	458,24	2688,6	2230,3	1,4104	7,2409
1,5	111,37	1,0532	1,159	466,95	2691,6	2224,7	1,4331	7,2177
2,0	120,23	1,0610	0,8852	504,52	2704,6	2200,1	1,5295	7,1212
3,0	133,54	1,0737	0,6054	561,2	2723,2	2161,9	1,6711	6,9859
4,0	143,63	1,0841	0,4621	604,4	2736,5	2132,1	1,7757	6,8902
6,0	158,84	1,1011	0,3155	670,1	2755,2	2085,1	1,9300	6,7555
8,0	170,41	1,1152	0,2403	720,6	2768,0	2047,5	2,0447	6,6594
10	179,88	1,1276	0,1944	762,2	2777,5	2015,3	2,1370	6,5843
15	198,28	1,1541	0,1318	844,1	2792,5	1948,4	2,3131	6,4448
20	212,37	1,1769	0,0996	908,0	2800,6	1892,6	2,4453	6,3422
30	233,84	1,2166	0,0667	1007,7	2805,5	1797,9	2,6438	6,1890
40	250,33	1,2523	0,0497	1086,7	2802,4	1715,7	2,7949	6,0714
50	263,92	1,2859	0,0394	1153,8	2794,6	1640,8	2,9190	5,9735
60	275,56	1,3186	0,0324	1213,1	2783,9	1570,8	3,0257	5,8880
70	285,80	1,3510	0,0273	1266,7	2771,1	1504,3	3,1203	5,8113
80	294,98	1,3837	0,0235	1316,4	2756,9	1440,4	3,2059	5,7412
90	303,31	1,417	0,0205	1362,9	2741,6	1378,5	3,2847	5,6762
100	310,96	1,451	0,0180	1407,0	2725,6	1318,2	3,3582	5,6155
110	318,04	1,487	0,0160	1449,3	2708,7	1258,9	3,4277	5,5584
120	324,64	1,525	0,0143	1490,2	2687,2	1196,3	3,4941	5,4971
130	330,81	1,566	0,0128	1530,2	2663,5	1132,3	3,5580	5,4353
140	336,63	1,610	0,0115	1569,6	2637,7	1066,7	3,6203	5,3726
150	342,12	1,658	0,0103	1608,9	2610,5	999,7	3,6818	5,3104
160	347,32	1,713	0,0093	1648,5	2581,2	929,9	3,7433	5,2471
180	356,96	1,850	0,0075	1732,9	2511,4	778,5	3,8707	5,1062
200	365,71	2,06	0,0059	1826,7	2416,0	589,3	4,0151	4,9375
210	369,79	2,22	0,0050	1889,9	2344,9	454,9	4,1073	4,8149
220	373,70	2,64	0,0039	2107,4	2195,6	208,4	4,2947	4,5799
221,20	374,15	0,00317 m ³ /kg					4,4429	

**Tabelle 15: Wasserdampf tabel, Sättigungszustand („Drucktabel“)
(Dietzel {1984} [50]).**

An dieser Stelle soll bemerkt werden, daß es nach **AD 2000-Merkblatt A1 {2004} [39]** für Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitung – Berstsicherungen für siedende Flüssigkeiten und sonstige Flüssigkeiten, die bei der Entspannung auf den Gegendruck Gas freisetzen zur Zeit keine allgemein anerkannten Bemessungsregeln gibt. Die hier aufgeführten Bemessungsregeln beziehen sich ausschließlich auf Gase und Dämpfe bzw. Flüssigkeiten. Aufgrund dieser komplexen Zusammenhänge wird ein vereinfachter Rechengang zur Berechnung der Verdampfung des Wassers in der trockenen Steigleitung vorgeschlagen.

Für die Verdampfung gilt folgende Grundgleichung für den Wärmestrom:

$$\dot{Q} = \dot{m} \times [c_{\text{H}_2\text{O}} \times (T_{\text{S}} - T_{\text{Anf}}) + h_{\text{V}}] = k_{\text{a}} \times A_{\text{a}} \times (T_{\text{Fl,a}} - T_{\text{Fl,i}}) \quad (42)$$

$$\Rightarrow \dot{Q} = \dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} \times [c_{\text{H}_2\text{O}} \times (T_{\text{S}} - T_{\text{Anf}}) + h_{\text{V}}] = k_{\text{a}} \times (\pi \times d_{\text{a}} \times L) \times (T_{\text{Fl,a}} - T_{\text{Fl,i}}) \quad (43)$$

Geht man bei einem B-Rohr nach **DIN 14811 Teil 1 {1990} [17]** von einem maximalen Volumenstrom von 2400 l/min ($\equiv 40$ kg/s) aus, so ergibt sich bei einem Rohr DN 80 –mit Innendurchmesser $d_i = 82,5$ mm eine Strömungsgeschwindigkeit im kalten Fall von

$$w_{\text{R}} = \frac{\dot{V}}{A_{\text{R}}} = \frac{2,4 \text{ m}^3}{\frac{\pi}{4} \times 0,0825^2 \text{ m}^2 \times 60 \text{ s}} = 7,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (44)$$

Hierdurch ergibt sich die Reynolds-Zahl nach **Bohl {1984} [53]** zu

$$\text{Re} = \frac{w_{\text{R}} \times d_i}{\nu_{\text{KV}}} = \frac{7,5 \frac{\text{m}}{\text{s}} \times 0,0825 \text{ m}}{0,1693 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 3.654.755 \quad (45)$$

mit

ν_{KV} = kinematische Viskosität = $0,1693 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (10 bar, 180°C nach **VDI-**

Wärmeatlas [55])

d_i = charakteristische Länge, hier Rohrinne Durchmesser = 82,5 mm $\equiv 0,0825$ m

Turbulente Strömung in Rohren tritt oberhalb $\text{Re}=2320$ auf; die vorliegende Strömung in der trockenen Steigleitung ist somit turbulent.

Für die Berechnung der verdampften Wassermenge werden weiterhin folgende Randbedingungen angenommen:

$\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 887,06 \text{ kg/m}^3$ (10 bar, 180°C nach **VDI-Wärmeatlas [55]**)

d_{a} = Rohraußendurchmesser = 88,9 mm $\equiv 0,0889$ m

d_i = charakteristische Länge, hier Rohrinne Durchmesser = 82,5 mm $\equiv 0,0825$ m

T_S = Siedetemperatur des Wassers = 179,9°C (bei 10 bar absolut (Pumpendruck))

T_{Anf} = Anfangstemperatur des Wassers = 10°C

λ_{Rohr} = Wärmeleitfähigkeit (Wärmeleitzahl) des Rohres = 37 W/(m×K) bei 600°C nach
(nach **VDI-Wärmeatlas [55]**)

h_V = Verdampfungsenthalpie des Wassers = 2015,3 kJ/kg (180°C, 10 bar) nach **Dietzel {1984} [50]**

A_a = Heizfläche = Oberfläche des Rohres in m²

L = Länge des Rohres im Bereich des Brandraumes = 10 m

α_a = Wärmeübergangskoeffizient an der äußeren Rohrwand = 510 W/(m×K) (Luft außen an Rohrbündel, Mittelwert aus **Tabelle 13**)

α_i = Wärmeübergangskoeffizient an der inneren Rohrwand = 8500 W/(m×K) (Wasser in Rohren, turbulent, Mittelwert nach **Tabelle 13** bzw. Blasenverdampfung nach **Tabelle 14**)

c_{p,H_2O} = 4,403 kJ/(kg×K) bei 180°C und 10 bar (nach **VDI-Wärmeatlas [55]**)

Aus der Gleichung (43) ergibt sich der verdampfte Flüssigkeitsmassenstrom zu

$$\dot{m}_{H_2O} = \frac{k_a \times (\pi \times d_a \times L) \times (T_{Fl,a} - T_{Fl,i})}{c_{H_2O} \times (T_S - T_{Anf}) + h_V} \quad (44)$$

mit

$$k_a = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_i} \times \frac{d_a}{d_i} + \frac{d_a}{2 \times \lambda_R} \times \ln \frac{d_a}{d_i} + \frac{1}{\alpha_a}} \quad (45)$$

$$k_a = \frac{1}{\frac{1}{8500 \frac{W}{m^2 \times K}} \times \frac{0,0889 m}{0,0825 m} + \frac{0,0889 m}{2 \times 37 \frac{W}{m \times K}} \times \ln \frac{0,0889 m}{0,0825 m} + \frac{1}{510 \frac{W}{m^2 \times K}}}$$

$$k_a = \frac{1}{0,0001268 \frac{m^2 \times K}{W} + 0,0000898 \frac{m^2 \times K}{W} + 0,001961 \frac{m^2 \times K}{W}} = 459 \frac{W}{m^2 \times K}$$

ergibt sich unter Annahme einer maximalen Rohrtemperatur im Brandfall von 900°C (siehe Versuch 1 **Bilder 7 und 8**):

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{459 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \times \text{K}} \times (\pi \times 0,0889 \text{ m} \times 10 \text{ m}) \times (900^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C})}{4,403 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg} \times \text{K}} \times (179,9^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) + 2015,3 \times 10^3 \frac{\text{J}}{\text{kg}}} = \frac{1.140.918 \text{ W}}{2.763.370 \frac{\text{W} \times \text{s}}{\text{kg}}}$$

ein verdampfter Wassermassenstrom von:

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = 0,41 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \equiv 24,6 \frac{\text{kg}}{\text{min}}$$

Hieraus ergibt sich unter Berücksichtigung der Dichte von Sattedampf

$$\rho'' = 5,1539 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

bzw. des spezifischen Volumens von Sattedampf bei 180°C und 10 bar nach **VDI-Wärmeatlas [55]**

$$v'' = 0,1940 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$$

ein Dampfstrom von

$$\dot{V} = 24,6 \frac{\text{kg}}{\text{min}} \times 0,1940 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} = 4,8 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \equiv 0,08 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

Da die bei den Armaturen verwendeten Dichtungsmaterialien aus Kautschuk bei Temperaturen von 100 bis 110°C versagen, wird dieser Dampf an diesen Stellen mit 180°C austreten bzw. die an den Entnahmearmaturen angeschlossenen Druckschläuche beanspruchen und die Feuerwehreinsatzkräfte gefährden.

7. Auswirkungen von erhöhten Temperaturen und Wärmespannungen auf Armaturen und Druckschläuche

7.1 Auswirkungen auf Armaturen

Unter der Annahme, daß sich die Armaturen der trockenen Steigleitung nicht im Brandbereich befinden, ergeben sich bei höheren Temperaturen keine Probleme aufgrund von Wärmebelastungen und Wärmedehnungen der Bauteile von Armaturen. Aufgrund der Schmelztemperaturen (Aluminium, Bronze) sowie der Wärmespannungen (Stahl, Aluminium, Bronze) und zulässigen Dichtungstemperaturen wäre der Betrieb der Armaturen an den Steigleitungen bei Brandbelastung nicht gewährleistet. Aufgrund der hohen Temperaturbelastung im Brandfall ist bei Armaturen davon auszugehen, daß diese im Brandfall versagen bzw. aufgrund der Wärmedehnungen zwischen Gehäuse und Verschlußkörper nicht mehr bedient werden können.

Anders sieht es aus bei den bereits behandelten Belastungen durch hohe Drücke aufgrund des Ausdehnens von Wasser und der Entstehung von Druckstößen z.B. beim Öffnen und Schließen von Armaturen.

Nachfolgend soll auf einige Kriterien der Belastung von Armaturen eingegangen werden.

Nach **DIN 14463-3 {2003} [15]** für fernbetätigte Füll- und Entleerungsstationen Teil 3: Be- und Entlüftungsventile PN 16 für Löschwasserleitungen „nass/trocken“ und „trocken“ beträgt der Prüfdruck 24 bar und der Mindest-Berstdruck 64 bar.

Für die Prüfung der Einspeisearmatur PN 16 ist als Nachfolgedokument der **DIN 3230 Teil 3** (Technische Lieferbedingungen für Armaturen; Zusammenstellung möglicher Prüfungen) **{1982} [79]** die **DIN 12266-1** und **- 2 {2003, 2000} [25, 26]** (Industriearmaturen - Prüfung von Armaturen) anzuwenden. Hierbei muß die Temperatur des Prüfmediums (hier Wasser) im Bereich von 5°C bis 40°C liegen.

Nach **DIN 14302 {1985} [21]** und **DIN 14303{1985} [22]** werden für B- bzw. C- Druckkuppelungen Aluminiumlegierungen sowie für den Dichtring Nitril-Kautschuk verwendet. Zur Überprüfung der Festigkeit des Druck tragenden Gehäuses gegen Innendruck muß der

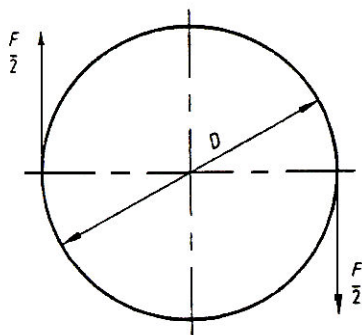
Prüfdruck mindestens das 1,5 fache des zulässigen Druckes bei Raumtemperatur betragen.

Während oder nach einem Brandereignis muß überprüft werden, ob die durch Brandeinwirkung belasteten Armaturen noch mit der in **DIN 12570 {2003} [27]** festgelegten Kraft geöffnet bzw. geschlossen werden können.

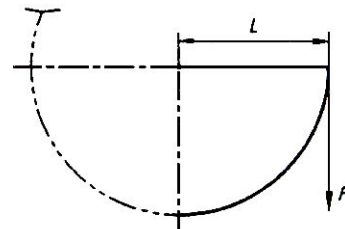
Da angenommen werden kann, daß sich die Armaturen von trockenen Steigleitungen außerhalb des Brandraumes befinden, wird davon ausgegangen, daß diese nicht hohen Temperaturen ausgesetzt sind.

Die Kräfte zur Betätigung einer Armatur wurden in **DIN 12570 {2003} [27]** festgelegt.

Bild 24 zeigt hierbei die Betätigungselemente für ein Handrad, Handhebel bzw. Handrad mit Kurbel.



1 — Handrad



2 — Handhebel oder Handrad mit Kurbel

Bild 24: Betätigungselemente nach **DIN 12570 {2003} [27]**.

Die Größe der manuellen Betätigungskraft F und der maximalen Handkraft F_s , die zur Berechnung der Größe des Betätigungselementes verwendet werden, müssen der nachfolgenden **Tabelle 16** entsprechen.

Kraft	D und L mm											
	100	125	160	200	250	315	400	500	630	720	800	1000
F N	250	300	300	350	400	400	400	400	400	400	400	400
F_s N	500	600	600	700	800	800	1000	1000	1000	1000	1000	1000

D ist der Durchmesser des Handrades in Millimeter (mm);

L ist die Länge des Handhebels oder der Radius des Kurbelkreises in Millimeter (mm);

F ist die manuelle Betätigungskraft für die Auslegung des manuellen Betätigungselementes in Newton (N);

F_s ist die maximale Handkraft für die Auslegung des manuellen Betätigungselementes in Newton (N).

Tabelle 16: Manuelle Betätigungskraft nach **DIN 12570 {2003} [27]**.

Für Zwischenwerte von D und L sind die anzuwendenden Werte für F und F_s durch lineare Interpolation der tabellierten Werte zu errechnen.

Die Kraft F ist die angenommene Kraft, die eine Person unter folgenden Bedingungen auf ein Betätigungselement aufbringen kann:

- Bediener in stehender Position;
- Betätigungselement etwa in Taillenhöhe;
- keine räumliche Einschränkung;
- fester Stand;
- Betätigungszeit höchstens 5 min.

Die Kraft F_s ist die angenommene Handkraft, die eine Person auf das Betätigungselement aufbringen kann unter denselben Bedingungen wie die Kraft F, jedoch für eine kurze Zeitspanne.

Zur Betätigung der Entnahmearmaturen der trockenen Steigleitungen wird ein Feuerwehrschlüssel mit einem Hebelarm von 200 mm verwendet. D.h. hier kommt der Fall „Handhebel“ nach **Bild 24** zur Anwendung. Die Forschungsstelle für Brandschutztechnik ermittelte hierbei eine maximale Betätigungskraft von ca. 35 N für eine Entnahmearmatur im Neuzustand ohne Brandeinwirkung.

Nach **DIN ISO 10497 {2004} [28]** für die Prüfung von Armaturen auf Feuersicherheit ist die Prüfung von Armaturen auf Feuersicherheit sehr gefährlich und daher ist vorrangig die Sicherheit des Personals zu beachten. Auf Grund der möglichen Schwachstellen in der Ausführung der Prüfarmatur und der Prüfeinrichtung sowie der Art der Feuersicherheitsprüfung können gefährliche Brüche der drucktragenden Bauteile vorkommen. Zum Schutz des Personals sind im Bereich des Prüfstandaufbaus geeignete Schutzschilder und andere entsprechende Mittel erforderlich. Eine Armatur wird hierzu in geschlossener Stellung, vollständig gefüllt mit Wasser und mit Druck beaufschlagt, für eine Dauer von 30 min vollständig von Flammen umgeben, die im Bereich der Armatur eine Temperatur von 750 °C bis 1 000 °C haben. Die Armatur muss vollständig von den Flammen umgeben sein, um sicherzustellen, dass Sitz- und Dichtungsbereiche den hohen Temperaturen während des Brandes ausgesetzt sind. Für die Prüfung muß gasförmiger Brennstoff verwendet werden. Als Druckmeßgeräte sind industrielle Druckmeßgeräte mit einem Skalenendwert zwischen dem 1,5- und 4 fachen des gemessenen Druckes zu verwenden. Während des Prüfzyklus wird die innere und äußere Undichtheit aufgezeichnet. Innerhalb von 5 min nach Löschen des Feuers wird die Prüfarmatur mit Wasser zwangsgekühlt, bis ihre Außenfläche eine Temperatur unter 100 °C erreicht hat, die Abkühlzeit darf 10 min nicht überschreiten. Die erforderliche Zeit zur Abkühlung der Außenfläche der Armatur auf unter 100 °C ist aufzuzeichnen. Nach dem Abkühlen nach der Feuersicherheitsprüfung wird die Armatur einer hydrostatischen Prüfung unterzogen, bei der die Druckfestigkeit des Gehäuses, der Sitze und der Dichtungen festgestellt wird.

Die Norm **DIN ISO 10497 {2004} [28]** kommt allerdings bei den trockenen Steigleitungen nicht zur Anwendung.

7.2 Auswirkungen auf Druckschläuche

Nach **DIN 14811 Teil 1 {1990} [17]** ergeben sich folgende Kennwerte und Betriebsbedingungen für Druckschläuche (siehe **Tabelle 17 und 18**):

Kurzzeichen	Innendurchmesser mm		Nennweite DN	Schlauchlänge m				zugehörige Druckkupplungen
		Grenzabmaße		+1,5 % - 0,5				
D	25	+1,0 - 0,5	25	5	15	-	-	DIN 14 301 - D
C 42	42	+1,0 - 0,5	42	-	15	-	30 ¹⁾	DIN 14 332 - C42
C 52	52	+1,0 - 0,5	52	-	15	-	-	DIN 14 302 - C
B	75	+1,0 - 0,5	75	5	-	20	35 ²⁾	DIN 14 303 - B
A	110	+1,0 - 0,5	110	5	-	20	-	DIN 14 323 - A

1) Z. B. für Schnellangriffseinrichtungen
2) Nur für Drehleitern

Tabelle 17: Abmessungen von Druckschläuchen nach **DIN 14811 Teil 1 {1990} [17]**.

Kurzzeichen	Schlauchlänge m	Durchfluß l/min	Eintrittsdruck bar	Druckverlust bar max.	Gebrauchsprüfdruck bar	Prüfdruck bar	Zerplatzdruck bar	Abrolllänge m min.
D	15	140	6	2	8	12	25	3,75
C 42	15	600	6	2,5	12	24	50	3,75
C 52	15	1200	6	3	12	24	50	3,75
B	20	2400	4	2	12	24	50	5
A	20	6000	4	1,7	8	12	25	5

Tabelle 18: Kennwerte von Druckschläuchen nach **DIN 14811 Teil 1 {1990} [17]**.

Entsprechend **Tabelle 18** beträgt der Zerplatzdruck bei C- und B-Schläuchen 50 bar.

Bei A und D-Schläuchen beträgt der Zerplatzdruck 25 bar.

Die Prüfung des Berstdruckes erfolgt allerdings derart, daß die Druck langsam bis zum Prüfdruck erhöht wird und nicht schlagartig. Für die Prüfungen muß die Temperatur des Wassers zwischen 3 und 23 °C und die der Luft zwischen 5 und 23°C liegen. Bei der Alte-

rung der Schläuche geht man davon aus, daß die verwendeten Werkstoffe so aufeinander abgestimmt werden, daß sich die Werte für den Zerplatzdruck und die Trennkraft der Schichten (bei mehrschichtigen Druckschläuchen) nach Alterung um nicht mehr als 25% vermindern.

Die Abminderung des Zerplatzdruckes des B- Schlauches von 50 bar um 25% durch Alterung führt zu einem verminderten Zerplatzdruck von 37,5 bar.

Der Druck, bei dem in der Feuerwehreinsatzpraxis Zerplatzen auftritt, dürfte sich noch weiter vermindern, wenn die Schläuche z.B. einer größeren Wärmebelastung wie etwa durch Glutbrände im Brandschutt ausgesetzt sind bzw. mechanisch vorschädigt sind.

8. AUSWIRKUNGEN VON STEHENDEM UND FLIEßENDEN WASSER

In den bisherigen Untersuchungen wurde angenommen, daß während der Flutungsphase der Steigleitung die Luft über das Entlüftungsventil abströmt.

Solange über der Flüssigkeit ein Gasvolumen ansteht, d.h. die Flüssigkeit füllt das Volumen noch nicht vollständig aus, folgt der Druckanstieg der Dampfdruckkurve.

Bei vollständig gefluteter Löschwasserleitung wird die Entlüftung beendet, indem sich die Schwimmerkugel gegen die Gummidichtung drückt. Die Kunststoffkugel des Entlüftungsventils dichtet ab einem minimalen Schließdruck von 0,3 bar Überdruck ab.

Es wurde daher der Fall angenommen, daß die Leitung vollständig gefüllt wird, jedoch noch kein Löschwasser aus den Entnahmearmaturen entnommen wird, d.h. das Volumen bleibt konstant.

Beim stehenden Wasser handelt es sich um den ungünstigsten Fall, von dem ausgegangen werden muß, damit Einsatzkräfte der Feuerwehr und andere Personen nicht gefährdet werden.

Die größte Gefahr ergibt sich für den Fall der vollständig mit Wasser gefüllten Leitung, die

durch Brandeinwirkung aufgeheizt wird.

Aufgrund der Inkompressibilität des Wassers entstehen Drücke, die zum Bersten von Armaturen, Rohrleitungen und Druckschläuchen führen können.

Wie die Berechnungen gezeigt haben, übersteigen diese Drücke um ein Vielfaches die Drücke, die aufgrund der Dampfdruckkurve im Sättigungszustand nach **Tabelle 15** entstehen können.

Fließendes Wasser hat aufgrund des besseren Wärmeübergangs eine größere Kühlwirkung als stehendes Wasser, d.h. beim stehenden Wasser werden die Versagenstemperaturen der einzelnen Bauteile schneller erreicht.

9. ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Gegenstand der Untersuchungen ist es zu klären, ob trockene Steigleitungen auch ungeschützt verlegt werden können, wenn sie durch Räume mit Brandlast geführt werden.

In der Untersuchung wurden sowohl die Festigkeit und auftretenden Spannungen der Bauteile als auch die Wärmeausdehnung der Rohre, die Wärmeausdehnung von Wasser und die Bildung von Dampf in den Rohren bei einer Brandbelastung betrachtet.

Hierbei wurde von folgenden Feststellungen ausgegangen:

- Die durchschnittliche Zeit, bei der ein Flashover auftritt, beträgt ca. 7 min.
- In der Vollbrandphase entstehen in einem Brandraum hohe Temperaturen von häufig über 1000°C.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Untersuchungen zusammengefasst.

1. Bereits bei ca. 500°C beträgt die Dehngrenze $\sigma_{0,2}$ nur noch 46 % bzw. die Bruchfestigkeit σ_B nur noch 50 % des Wertes bei Raumtemperatur bei unvergütetem Stahl. Der E-Modul zur Berechnung der zulässigen Spannungen reduziert sich bei einer Erhöhung von Raumtemperatur auf 500°C um ca. 18%. Für die hohen Brandraumtemperaturen wären selbst warmfeste Stähle mit zulässigen Temperaturen bis etwa 750°C unzurei-

chend.

2. Aufgrund des geringen Kohlenstoffgehaltes des Stahles von 0,2 % bei den eingesetzten Rohrleitungen ist nicht damit zu rechnen, daß es aufgrund von hohen Abkühlungsgeschwindigkeiten durch Einleitung von Löschwasser in die erhitzten Rohre zu einem Härtungsvorgang mit Martensitbildung kommt.
3. Für Aluminium und Aluminiumlegierungen (z.B. B- und C-Kupplungen) beträgt die Schmelztemperatur ca. 660°C. Für die bei den Armaturen eingesetzten Kupfer/Zink-(Messing) und Kupfer-/Zinnlegierungen (Bronze) beträgt die Schmelztemperatur 900°C – 1000°C. Falls diese Bauteile einer Brandbelastung ausgesetzt würden, würde diese zulässigen Temperaturen in der Vollbrandphase überschritten werden. Aufgrund der hohen auftretenden Temperaturen ist die Funktion von Armaturen (z.B. große Öffnungs- und Schließkräfte aufgrund unterschiedlicher Wärmedehnungen zwischen Gehäuse und Verschlusskörper der Armatur) nicht gewährleistet. Handelsübliche Armaturen sind für diese Betriebstemperaturen nicht ausgelegt. Unter der Annahme, daß sich die Armaturen sowie Druckschläuche der trockenen Steigleitung nicht Brandbereich befinden, ergeben sich bei höheren Temperaturen keine Probleme aufgrund von Wärmebelastungen und Wärmedehnungen der Bauteile von Armaturen.
4. Die in den Armaturen und Kupplungen eingesetzten Kautschuk-Dichtungen haben eine maximal zulässige Temperatur 80°C bis 110°C je nach Kautschukart. Diese Temperaturen werden bereits durch die Satttdampf Temperatur von ca. 180°C (Feuerlöschkreiselpumpe, 10 bar) aufgrund der Verdampfung des Löschwassers im Rohr überschritten und führen zum Versagen.
5. Durch die Erwärmung der Rohre ergibt sich eine Längenänderung vorwiegend in Längsrichtung, welche bei einer festen Einspannung der Rohre zu Zwangskräften auf Rohrverbindungen, Wände und Decken und extremen Festpunktbelastungen führt.
6. Aufgrund der Temperaturunterschiede zwischen Innen- und Außenwandung des Rohres entstehen Wärmespannungen im Rohr. Auf der wärmeren Seite entstehen hierbei Druckspannungen, auf der kälteren Seite Zugspannungen. Beim hier vorliegenden Fall des Einleitens von kaltem Löschwasser in im Extremfall glühende Leitungen ist mit einem Thermoschock zu rechnen. Die Thermoschockspannung stellt die maximal mögliche

che Wärmespannung dar.

7. Die größte Gefährdung ergibt sich beim Füllvorgang für die vollständig mit Wasser gefüllte ungeschützte Leitung, die durch Brandeinwirkung weiter aufgeheizt wird. Dieser Fall kann sehr schnell dann eintreten, wenn die Leitung geflutet wird und das Be- und Entlüftungsventil planmäßig bei einem Druck von 0,3 bar Überdruck schließt, aber noch kein Löschwasser über die Entnahmemarmaturen entnommen wird. Aufgrund der Inkompressibilität des Wassers entstehen sehr hohe Drücke, die zum Bersten von Armaturen, Rohrleitungen und Druckschläuchen führen können. Als Faustformel kann angenommen werden, daß bei Wasser in den Leitungen je Grad Temperaturerhöhung der Druck um ca. 15 bar zunimmt, wenn dieser im geschlossenen System nicht abgebaut werden kann. Wie die in dieser Arbeit dokumentierten Berechnungen gezeigt haben, übersteigen diese Drücke um ein Vielfaches die Drücke, die aufgrund der Dampfdruckkurve des Wassers im Sättigungszustand entstehen können.
8. Fließendes Wasser hat aufgrund des besseren Wärmeübergangs eine größere Kühlwirkung auf die Bauteile der Steigleitung, d.h. beim stehenden Wasser werden die Versagenstemperaturen der einzelnen Bauteile schneller erreicht. Weiterhin wirkt sich beim fließenden Wasser dessen Inkompressibilität nicht aus.
9. Beim Öffnen und Schließen der Armaturen treten Druckstöße auf. Diese sind u. a. sehr von der Schließzeit der Armatur und der Leitungslänge abhängig. Wie die Berechnungen gezeigt haben, liegen diese Drücke unterhalb der Bersttemperatur des Be- und Entlüftungsventils (64 bar) und des Zerplatzdruckes eines neuen C- bzw. B-Schlauches (50 bar). Unter Berücksichtigung der Abminderung des Zerplatzdruckes des Schlauches von 50 bar um 25% durch Alterung ergibt sich ein verminderter Zerplatzdruck von 37,5 bar. Der Zerplatzdruck vermindert sich noch weiter, wenn die Schläuche z.B. einer größeren Wärmebelastung z.B. durch Glutbrände im Brandschutt ausgesetzt bzw. beschädigt sind. Eine höhere Temperatur tritt auch durch den ca. 180°C heißen Dampf auf. Hierdurch steigt die Gefahr des Versagens aufgrund von Druckstößen.
10. Aufgrund der unter diesen Voraussetzungen erwarteten Verdampfung von Löschwasser im Rohr besteht beim Ausströmen des Heißdampfes die Gefahr von Verbrühungen bei Feuerwehreinsatzkräften.

Wie die Untersuchungen gezeigt haben, dürften trockene Steigleitungen in keinem Fall ungeschützt verlegt werden, da bei der Brandbelastung unkalkulierbare Gefährdungen auftreten.

10. LITERATURVERZEICHNIS

- [1] Kunkelmann J.: {2003} Flashover / Backdraft – Ursachen, Auswirkungen, mögliche Gegenmaßnahmen.
Forschungsbericht Nr. 130 der Arbeitsgemeinschaft der Innenministerien der Bundesländer, Arbeitskreis V - Ausschuß für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung, Karlsruhe, Forschungsstelle für Brandschutztechnik (2003)
- [2] Kunkelmann, J.: {2001} Verringerung der Temperaturen an Stahl-Glasfassaden im Brandfall durch thermische Entlastungsöffnungen und ortsfeste Niederdruck-Wasserebellöschanlagen.
Forschungsbericht zum Forschungsvorhaben im Auftrag der Stiftung Industrieforschung, Förderkennzeichen: Nr. S 483, Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe (TH), Karlsruhe 2001
- [3] DIN 14462-1 {2005} Löschwassereinrichtungen – Teil 1: Planung und Einbau von Wandhydrantenanlagen und Löschwasserleitungen.
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 2005 (Entwurf)
- [4] Massong, F.: {2005} www.Massong.com, Frankenthal/Pfalz, 2005
- [5] DIN EN 10255 {2004} Rohre aus unlegiertem Stahl mit Eignung zum Schweißen und Gewindschneiden.
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, November 2004
- [6] DIN EN 13480-2 {2002} Metallische industrielle Rohrleitungen – Teil 2: Werkstoffe
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, August 2002
- [7] DIN 1626 {1984} Geschweißte kreisförmige Rohre aus unlegierten Stählen für besondere Anforderungen.
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Oktober 1984
Zurückgezogen Februar 2004
- [8] DIN EN 10217-1 {2005} Geschweißte Stahlrohre für Druckbeanspruchungen-Technische Lieferbedingungen.
Teil 1: Rohre aus unlegierten Stählen mit festgelegten Eigenschaften bei Raumtemperatur.
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 2005
- [9] DIN EN 10217-2 {2005} Geschweißte Stahlrohre für Druckbeanspruchungen-Technische Lieferbedingungen.
Teil 2: Elektrisch geschweißte Rohre aus unlegierten und legierten Stählen mit festgelegten Eigenschaften bei erhöhten Temperaturen
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 2005
- [10] DIN EN 10002-1 {2001} Metallische Werkstoffe – Zugversuch.
Teil 1: Prüfverfahren bei Raumtemperatur.
Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2001

- [11] DIN EN 10002-5 {1992} Metallische Werkstoffe – Zugversuch.
Teil 5: Prüfverfahren bei erhöhter Temperatur.
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Februar 1992
- [12] DIN 14461 Teil 2 {1989} Feuerlösch-Schlauchanschlußeinrichtungen - Einspeiseeinrichtung und Entnahmeeinrichtung für Steigleitung „trocken“
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 1989
- [13] DIN 14461 Teil 4 {1989} Feuerlösch-Schlauchanschlußeinrichtungen – Einspeisearmatur PN 16 für Steigleitung „trocken“
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 1989
- [14] DIN 14461 Teil 5 {1984} Feuerlösch-Schlauchanschlußeinrichtungen – Schlauchanschlußarmatur PN 16 für Steigleitung „trocken“
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juni 1984
- [15] DIN 14463-3 {2003} Fernbetätigte Füll- und Entleerungsstationen –
Teil 3: Be- und Entlüftungsventile PN 16 für Löschwasserleitungen
„nass/trocken“ und „trocken“
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, März 2003
- [16] DIN EN ISO 14557 {2003} Feuerwehrschräuche – Saugschräuche aus Gummi und Kunststoff.
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juli 2003
- [17] DIN 14811 Teil 1 {1990} Druckschräuche – Anforderungen, Prüfung, Behandlung
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 1990
- [18] DIN 14811 Teil 2 {1977} Druckschräuche – Ermittlung des Druckverlustes
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, November 1977
- [19] DIN 14811 Teil 3 {1977} Druckschräuche – Ermittlung der Scheuerbeständigkeit
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, November 1977
- [20] DIN 14811 Teil 4 {1976} Druckschräuche – Ermittlung des Verhaltens unter Flammeneinwirkung
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Februar 1976
- [21] DIN 14302 {1985} C-Kupplung PN 16 aus Aluminium-Legierung.
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 1985
- [22] DIN 14303 {1985} B-Kupplung PN 16 aus Aluminium-Legierung.
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 1985
- [23] DIN 14925 {1983} Feuerwehrwesen – Verschräuchleinrichtung
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, April 1983
- [24] DIN 86211 {1991} Schlauchanschluß-Ventile PN 16 mit C- oder B- Kupplungen und mit Flanschanschluß.
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, März 1991
- [25] DIN EN 12266-1 {2003} Industriearmaturen – Prüfung von Armaturen
Teil 1: Druckprüfungen, Prüfverfahren und Annahmekriterien – Verbindliche Anforderungen
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juni 2003

- [26] DIN EN 12266-2 {2000} Industriearmaturen – Prüfung von Armaturen
Teil 2: Prüfungen, Prüfverfahren und Annahmekriterien – Ergänzende Anforderungen
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Oktober 2000
- [27] DIN EN 12570 {2003} Industriearmaturen – Verfahren für die Auslegung des Betätigungselementes.
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 2003
- [28] DIN EN ISO 10497 {2004} Prüfung von Armaturen – Anforderungen an die Typprüfung auf Feuersicherheit.
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, November 2004
- [29] DIN 1988 {1988} Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen (TRWI) – Technische Regel des DVGW
Teil 1: Allgemeines, Berlin, Dezember 1988
- [30] DIN 1988 {1988} Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen (TRWI) – Technische Regel des DVGW
Teil 2: Planung und Ausführung; Bauteile, Apparate, Werkstoffe,
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 1988
- [31] DIN 1988 {2002} Technische Regeln für Trinkwasser-Installationen (TRWI) – Technische Regel des DVGW
Teil 6: Feuerlösch- und Brandschutzanlagen,
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 2002
- [32] DIN EN 10220 {2003} Nahtlose und geschweißte Stahlrohre – Allgemeine Tabellen für Maße und längenbezogene Massen.
DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag GmbH, Berlin 2003
- [33] DIN 2460 {2005} Stahlrohre und Formstücke für Wasserleitungen.
Entwurf
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, März 2005
- [34] DIN EN 10224 {2003} Rohre und Fittings aus unlegierten Stählen für den Transport wässriger Flüssigkeiten einschließlich Trinkwasser-Technische Lieferbedingungen
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juli 2003
- [35] DIN EN ISO 4126-2 {2003} Sicherheitseinrichtungen gegen unzulässigen Überdruck.
Teil 2: Berstscheibeneinrichtungen
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 2003
- [36] DIN EN ISO 4126-3 {2004} Sicherheitseinrichtungen gegen unzulässigen Überdruck.
Teil 3: Sicherheitsventile und Berstscheibeneinrichtungen in Kombination,
Entwurf
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 2004
- [37] DIN EN 13480 {2002} Metallische industrielle Rohrleitungen.
Teil 1: Allgemeines
Teil 2: Werkstoffe
Teil 3: Konstruktion und Berechnung
Teil 5: Prüfung
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, August 2002

- [38] DIN 2401-2 {1966} Rohrleitungen; Druckstufen, zulässige Betriebsdrücke für Rohrleitungsteile aus Eisenwerkstoffen.
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Januar 1966
Norm zurückgezogen 1986
- [39] AD 2000 A1 {2004} AD 2000-Merkblätter
A1: Sicherheitseinrichtungen gegen Drucküberschreitung – Berstsicherungen, Oktober 2004
Carl Heymanns Verlag, Köln, Oktober 2004
- [40] AD 2000 W4 {2005} AD 2000-Merkblätter
W4: Rohre aus unlegierten und legierten Stählen,
Carl Heymanns Verlag, Köln, Februar 2005
- [41] DVGW W 303 {2003} Dynamische Druckänderungen in Wasserversorgungsanlagen.
Technische Regel Arbeitsblatt W 303 Entwurf), DVGW Regelwerk, Bonn 2003
- [42] Feuerwehr Braunschweig {2005} Prüfung trockener Steigleitungen nach DIN 14461 Teil 2
Brandschutzmerkblatt Nr. 5, www.feuerwehr.braunschweig.de, 2005
- [43] Gloria {2005} Planungshinweise: Löschwassieranlagen – Wandhydranten - Druckerhöhung, Füll- und Entleerungsstationen – Zubehör.
www.gloria.de, Wadersloh, 2005
- [44] KSB AG {1989} Kreispumpenlexikon.
3. Auflage, Frankenthal, 1989
- [45] KSB AG {2005} Druckstoß.
www.ksb.de/ksb/web/DE/de/segmente/systemtechnik/4__Dienstleistungen/4a__Drucksto_C3_9F/Dienstl__Drucksto_C3_9F__index.html, Frankenthal, 2005
- [46] Wikipedia {2005} Steigleitung.
W <http://de.wikipedia.org/wiki/Steigleitung>, August 2005
- [47] Kuchling, H.: {1988} Physik – Formeln und Gesetze.
20. Auflage, Buch- und Zeit-Verlagsgesellschaft, Köln 1988
- [48] Wagner, W.: {1983} Rohrleitungstechnik.
Vogel-Verlag, Kamprath-Reihe: Technik, 2. Auflage, Würzburg 1983
- [49] Wagner, W.: {1984} Apparate- und Rohrleitungsbau: Festigkeitsberechnungen.
Vogel-Verlag, Kamprath-Reihe: Technik, 2. Auflage, Würzburg 1984
- [50] Dietzel, F.: {1984} Technische Wärmelehre.
Vogel-Verlag, Kamprath-Reihe: Technik, 3. Auflage, Würzburg 1984
- [51] Wagner, W.: {1984} Apparate- und Rohrleitungsbau.
Vogel-Verlag, Kamprath-Reihe: Technik, 2. Auflage, Würzburg 1984
- [52] Wossog, G., et al: {1981} Handbuch für den Rohrleitungsbau.
8. Auflage, VEB Verlag Technik Berlin, 1981
- [53] Bohl, W.: {1984} Technische Strömungslehre.
Vogel-Verlag, Kamprath-Reihe: Technik, 6. Auflage, Würzburg 1984
- [54] Baehr, H.D.: {1978} Thermodynamik.
4. Auflage, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1978

- [55] VDI {1994} VDI-Wärmeatlas, 7. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf 1994
- [56] Mutschmann, J., Stimmelmayer, F.: {1995} Taschenbuch der Wasserversorgung. Franckh-Kosmos Verlags-GmbH Co, Stuttgart, 1995
- [57] Schlesinger {2005} Aufgaben von Berstscheiben, Einbau von Bertscheiben, www.schlesinger-gmbh.de, , Schalksmühle, 2005
- [58] Atemschutz.org {2005} Flash-Over-Box. www.atemschutz.org/flashover/fobox.htm, 2005
- [59] Iveco Magirus {2005} Eurofire-Pumpen-Reihe – Feuerlöschkreiselpumpen www.iveco-magirus.de, 2005
- [60] Minimax {2005} Wandhydranten. www.minimax.ch/produkte/wandhydranten.htm, 2005
- [61] Kirsner {2005} Forensic & Steam Projects. Kirsner Consulting Engineering www.kirsner.org/pages/forensicResAlt.html, 2005
- [62] Edur {2005} Grundlagen für die Projektierung und den Betrieb von EDUR-Kreiselpumpen. – Kavitation – Werkstoffe und Korrosion. EDUR Pumpenfabrik, www.edur.de, Kiel 2005
- [63] Lang, C., Detert, M.: {2004} Hydraulik von Rohrsystemen. Kurs SS 2004, Institut für Hydromechanik, Universität Karlsruhe www.ubka.uni-karlsruhe.de/eva/index.html
- [64] Mäder, B.: {2005} Neue Anforderungen an Wandhydranten und Steigleitungen unter Berücksichtigung der DIN 1988-6. www.zillerass.de/symposium/archiv2005/maeder.pdf
- [65] Kempchen {2005} Dichtungen – Gebräuchliche Werkstoffe. www.kempchen.de/d/prospekte/pdf/208.pdf, 2005
- [66] Samson {2005} Kavitation an Stellventilen. www.samson.de, Frankfurt 2005
- [67] Fröhlich, G.: {1978} Dampfexplosionen durch Kontakt zwischen Wasser und heißen Schmelzen. Chem.-Ing.-Tech. 50 (1978) Nr.11, S. 861 - 866
- [68] Rempe, A., Rodewald, G.: {1988} Brandlehre. 2. Auflage, Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart 1988
- [69] Würtemberger, G., et al.: {1987} Tabellenbuch Metall, 36. Auflage, Verlag Europa-Lehrmittel, Haan (Gruiten), 1987
- [70] Böge, A.: {1975} Mechanik und Festigkeitslehre. 16. Auflage, Friedrich Vieweg Sohn Verlagsgesellschaft, Braunschweig, 1975
- [71] Wellinger, K., Krägeloh, E.: {1971} Werkstoffe und Werkstoffprüfung – Grundlagen. Lueger Lexikon der Technik, Rowohlt Taschenbuch Verlag GmbH, Reinbek 1971
- [72] Weißbach, W.: {1976} Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung. Friedrich. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig, 1976

- [73] Domke, W.:
{1977} Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung.
7. Auflage, Verlag W, Girardet, Essen, 1977
- [74] Müller, H.:
{1970} Festigkeits- und Elastizitätslehre.
4. Auflage, Carl Hanser Verlag München, 1970
- [75] Föll, H.:
{2005} Einführung in die Materialwirtschaft.
www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/, Kiel 2005
- [76] BASF:
{2006} www.plasticsportal.net/wa/EU/Catalog/ePlastics/doc/BASF/prodline/ultraform/mechanical_properties_ultraform.xdoc
BASF, 2006
- [77] Hemming, W.:
{1984} Verfahrenstechnik.
Vogel-Verlag, Kamprath-Reihe: Technik, 3. Auflage, Würzburg 1984
- [78] Wagner, W.:
{1985} Thermische Apparate und Dampferzeuger.
Vogel-Verlag, Kamprath-Reihe: Technik, 1. Auflage, Würzburg 1985
- [79] DIN 3230-3
{1990} Technische Lieferbedingungen für Armaturen – Allgemeine Anforderungen.
DIN Deutsches Institut für Normung, Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 1982,
Norm zurückgezogen 2003
- [80] Lax, E.:
{1967} D'Ans Lax – Taschenbuch für Chemiker und Physiker.
3. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg , New York 1967

11. ANHANG: DETAILS ZU TROCKENEN STEIGLEITUNGEN

Das nachfolgende **Bild A-1** zeigt den schematischen Aufbau einer Löschwasserleitung „trocken“.

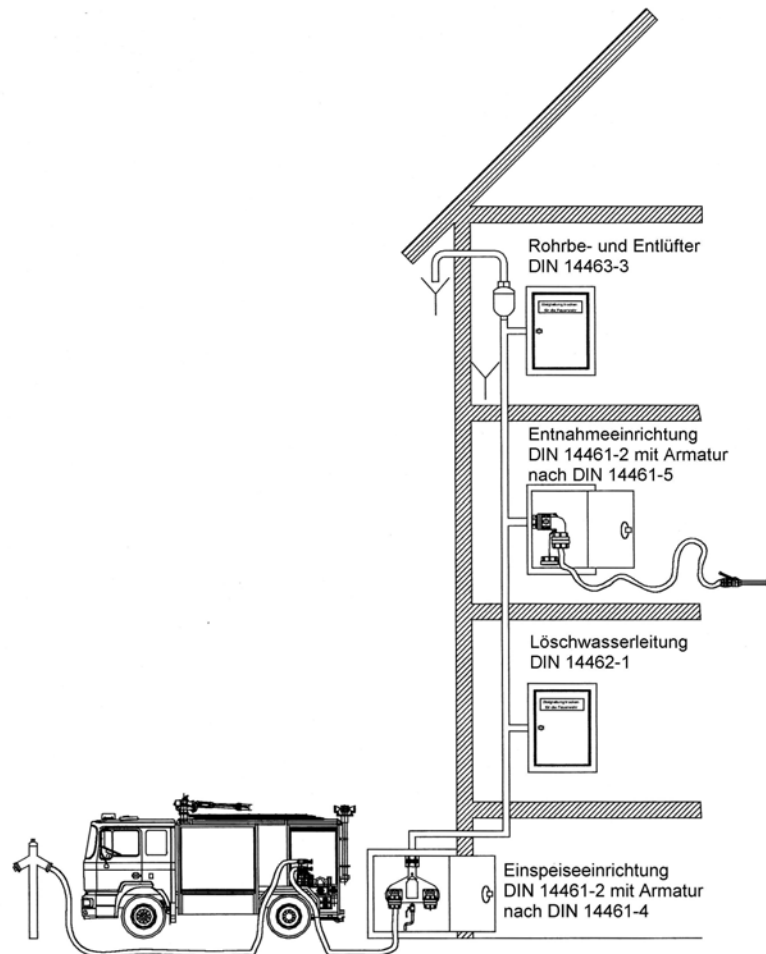


Bild A-1: Löschwasseranlage „trocken“ nach **DIN 14462-1 {2005} [3]**

(Skizze nach: **Gloria {2005} [43]**)

Die **Bilder A-2** und **A-3** sowie die **Tabelle A-1** zeigen im Detail eine Einspeisearmatur nach **DIN 14461 Teil 4 {1989} [13]**.

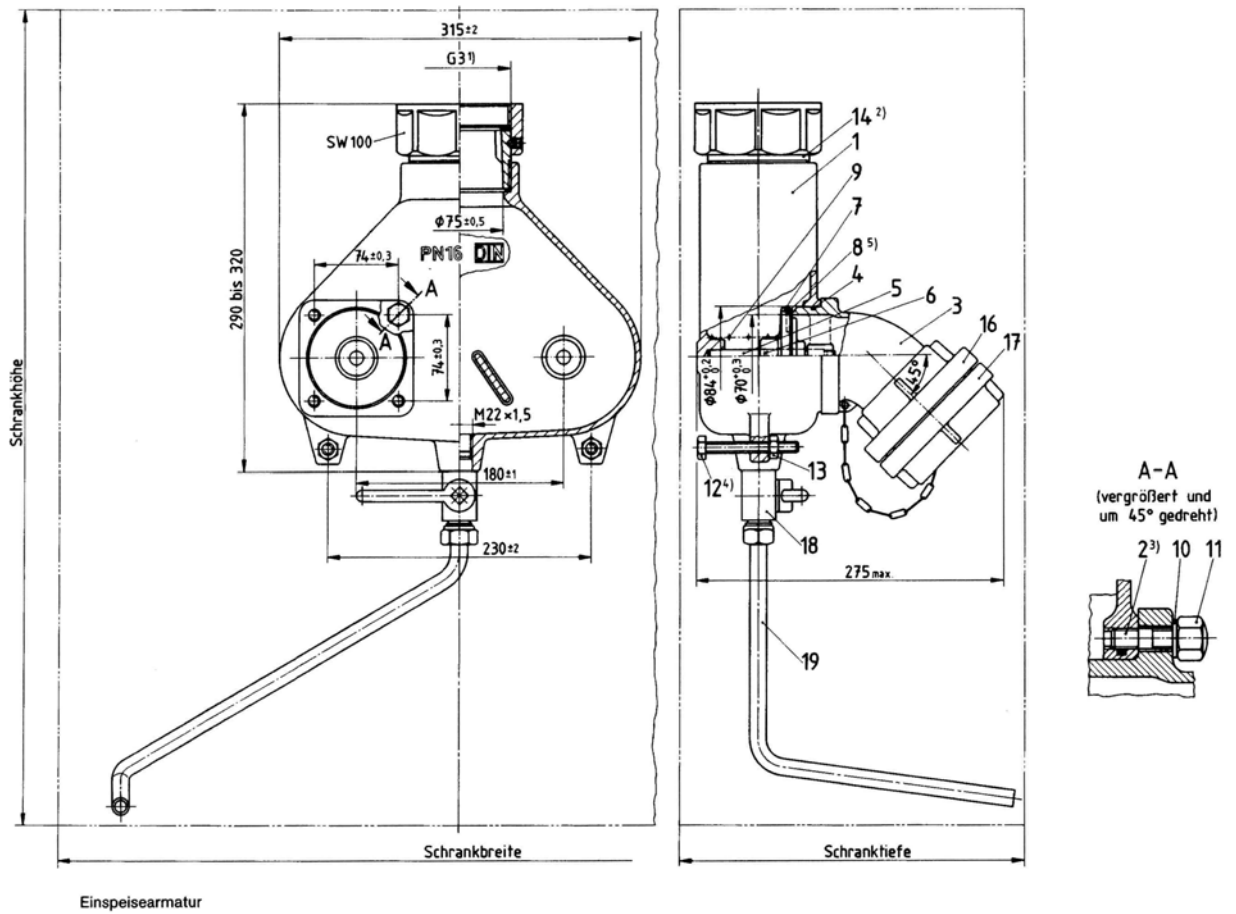


Bild A-2: Einspeisearmatur PN 16 für Steigleitung „trocken“ nach DIN 14461 Teil 4 [13].

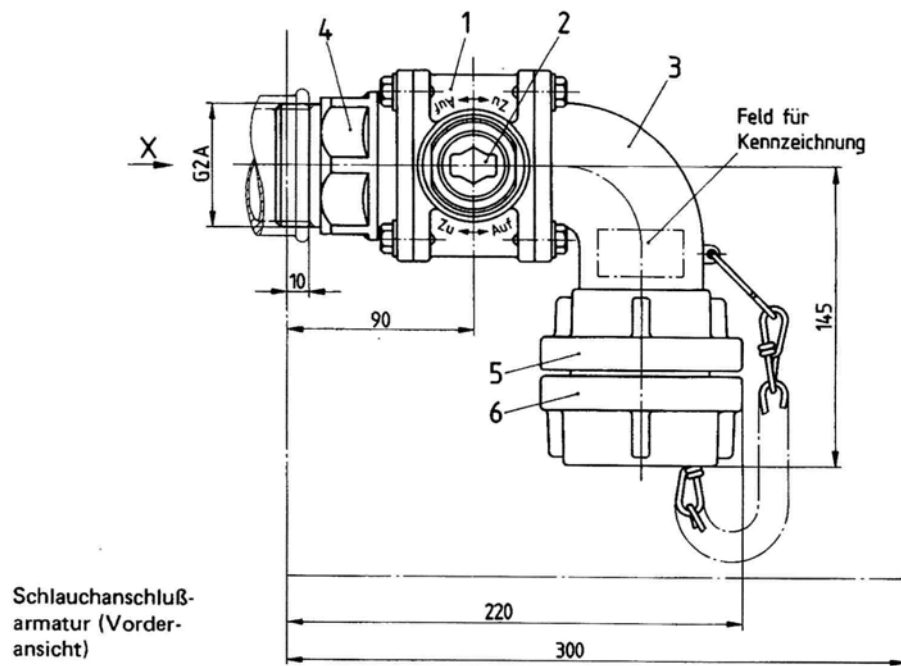


Bild A-3: Einspeisearmatur PN 16 für Steigleitung „trocken“ nach DIN 14461 Teil 4 [13].

Tabelle A-1: Einspeisearmatur PN 16 für Steigleitung „trocken“ nach **DIN 14461 Teil 4****[13]** – Stückliste

Pos.-Nr.	Stückzahl	Benennung bzw. Bezeichnung	Werkstoff
1	1	Gehäuse	G-CuSn5ZnPb (Werkstoffnr. 2.1096.01) nach DIN 1705
2	8	Stiftschraube M 10 x 25 nach DIN 939	Nichtrostender Stahl X 10 CrNiS 18 9 (Werkstoffnr. 1.4305) nach DIN 17440
3	2	Bogen 45° DN 65	G-CuSn5ZnPb (Werkstoffnr. 2.1096.01) nach DIN 1705
4	2	O-Ring 75,8 x 3,53	Gummi, Härte (70 ± 5) Shore A nach DIN 53 505
5	2	Achse	Nichtrostender Stahl X 6 CrNiTi 1810 (Werkstoffnr. 1.4541) nach DIN 17 440
6	2	X-Ring 8,2 x 1,78	Gummi, Härte (80 ± 5) Shore A nach DIN 53 505
7	2	Rückschlagventil	G-CuSn5ZnPb (Werkstoffnr. 2.1096.01) nach DIN 1705
8	2	Dichtring	Gummi, Härte (50 ± 5) Shore A nach DIN 53 505
9	2	Feder	Federdraht aus nichtrostendem Stahl X 12CrNi 17 7 (Werkstoffnr. 1.4310) nach DIN 17 224
10	8	Scheibe 10,5 nach DIN 433	Nichtrostender Stahl X5CrNi 18 10 (Werkstoffnr 1.4301) nach DIN 17440
11	8	Hutmutter M 10 nach DIN 917	
12	2	Sechskantschraube M 10 x 80 nach DIN 933	Nichtrostender Stahl X5CrNi 18 12 (Werkstoffnr 1.4303) nach DIN 17440
13	2	Sechskantmutter M 10 nach DIN 934	Nichtrostender Stahl XSCrNi 1810 (Werkstoffnr 1.4301) nach DIN 17 440
14	1	Verschraubung G3A - SW 100	GK-CuZn37Pb (Werkstoffnr 2.0340.02) nach DIN 1709 oder
15	1	Muffennippel (Ergänzung zu Pos. Nr. 14)	G-CuSn5ZnPb (Werkstoffnr 2.1096.01) nach DIN 1705
16	2	Kupplung DIN 86 205 - B	
17	2	Kupplung DIN 86 207 -BK jedoch mit Sicherungskette	
18	1	Entleerungshahn; Kugelhahn DN13-M 22x1,5 für lötlöse Rohrverschraubung mit Schneidring nach DIN 2353*) einschließlich Überwurfmutter M 22 x 1,5 und Schneidring auf beiden Seiten	Kupfer-Zink-Legierung (Messing) nach DIN 17660, Sorte nach Wahl des Herstellers
19		Entleerungsrohr; Rohr 15 x 1,5 nach DIN 1754 Teil 3	Kupfer nach DIN 17 671 Teil 1 Sorte nach Wahl des Herstellers
*) Z. Z. Entwurf			

Die Bilder A-4 und A-5 sowie die **Tabelle A-2** zeigen im Detail die Entnahmearmatur bzw. Schlauchanschlussarmatur nach **DIN 14461 Teil 5 {1984} [14]**.



Bezeichnung der Schlauchanschlußarmatur (S) mit Kupplungen aus Aluminium-Legierung (A):

Armatur DIN 14 461 – S – A

Bezeichnung der Schlauchanschlußarmatur (S) mit Kupplungen aus Kupfer-Zink-Legierung (K):

Armatur DIN 14 461 – S – K

Bild A-4: Schlauchanschlußarmatur PN 16 für Steigleitung „trocken“ nach DIN 14461 Teil 5 [14].



Bild A-5: Schlauchanschlussarmatur PN 16 für Steigleitung „trocken“ nach **DIN 14461 Teil 5 [14]**.

Tabelle A-2: Schlauchanschlussarmatur PN 16 für Steigleitung „trocken“ nach **DIN 14461 Teil 5 [14]** - Stückliste

Pos. Nr.	Stückzahl	Benennung bzw. Bezeichnung	Werkstoff
1	1	Absperrarmatur (Gehäuse und Innenteile)	Für Gussteile: GK-CuZn37Pb (Werkstoff-Nr 2.0340.02) nach DIN 1709 oder G-CuSn5ZnPb (Werkstoff-Nr 2.1096.01) nach DIN 1705 Für Stangen und Rohre: CuZn39Pb3 (Werkstoff-Nr 2.0401) nach DIN 17 660 Für O-Ringe: Nitril-Kautschuk Härte (70 ± 5) Shore A nach DIN 53505 Für Schrauben: Nichtrostender Stahl X 5 CrNi 19 1 1 (Werkstoff-Nr 1.4303) nach DIN 17 440
2	1	Betätigungseinrichtung nach DIN 14925	G-X20Cr14 (Werkstoff-Nr 1.4027) Nach DIN 17445 oder nichtrostender Stahl nach DIN 17 440 nach Wahl des Herstellers
3	1	Krümmmer	GK-CuZn37Pb (Werkstoff-Nr 2.0340.02) nach DIN 1709 oder G-CuSn5ZnPb (Werkstoff-Nr 2.1096.01) nach DIN 1705
4	1	Verschraubung G 2 A	Für Gussteile: GK-CuZn37Pb (Werkstoff-Nr 2.0340.02) nach DIN 1709 Für Axialsicherung: X40Cr13 (Werkstoff-Nr 1.4034) nach DIN 17 440 Für Schrauben: X 5 CrNi 189 (Werkstoff-Nr 1.4301) nach DIN 17440

5	1	Festkupplung DIN 14307 - C oder Kupplung DIN 86 204 - C	entsprechend DIN 14 307 Teil 1 bzw. DIN 86 204
6	1	Blindkupplung DIN 14311 -C oder Kupplung DIN 86 206 - CK oder Kupplung DIN 86 206 - CL	entsprechend DIN 14 311 bzw. DIN 86 206

Zur Entlüftung der Leitung während des Einspeisevorganges sowie zur Entleerung der Leitung nach Gebrauch sind an den obersten Punkten jedes Rohrstranges Be- und Entlüftungsventile nach **DIN 14463 Teil 3 {2003} [15]** nach **Bild A-6** vorzusehen. Die maximale Entlüftungsmenge muß nach DIN 14462-1 mindestens 2000 l/min (Luft) betragen. Durch die Länge der Rohrleitung und / oder durch den Rohrverlauf können zusätzliche Rohrbe- und entlüfter erforderlich werden.

Während der Flutungsphase der Steigleitung kann die Luft über das Ventil abströmen. Bei vollständig gefluteter Löschwasserleitung wird die Entlüftung beendet, indem sich die Schwimmerkugel gegen die Gummidichtung drückt. Eine Kunststoffkugel dichtet ab einem minimalen Schließdruck von 0,3 bar Überdruck ab. Eine Kontrollschraube ermöglicht nach leichtem Aufdrehen eine Überprüfung, ob Druck in der Leitung ansteht, bzw. ob die Entlüftung optimal erfolgt ist. Der Raum, in dem das Ventil installiert ist, muß eine Öffnung zur freien Atmosphäre aufweisen, damit die Be- und Entlüftungsfunktionen nicht maßgebend beeinträchtigt werden.

Das Be- und Entlüftungsventil muß u. a. folgende Prüfbedingungen erfüllen:

- Zulässiger Betriebsinnendruck im Dauerbetrieb: 16 bar
- Prüfdruck: 24 bar
- Mindest-Berstdruck: 64 bar

Das Gehäuse besteht nach Herstellerangaben aus Rotguss (gegossene Mehrstoff-Zinnbronze), die Dichtungen aus Nitril-Kautschuk und die Kunststoffkugel aus Polyoximethylen (POM). POM hat eine Dauerbetriebstemperatur von ca. 100°C (nach **BASF {2006}[76]**).



Bild A-6: Be- und Entlüftungsventil PN 16 (Abbildung: DN 50, Entlüftungsmenge bis 3000 l/min) nach **DIN 14463-3 [15]**.

Die nachfolgende **Tabelle A-3** zeigt die Abnahmeprüfung für Löschwasserleitungen „trocken“, die auch Aussagen zur Prüfung auf Festigkeit und Dichtheit macht nach **DIN 14462-1 {2005} [3]**.

Tabelle A-3: Abnahmeprüfung von Löschwasseranlagen „trocken“ nach **DIN 14462-1 [3]**.

Lfd. Nr.	Art der Prüfung
1	Eignung und Normkonformität der verwendeten Komponenten und Rohrmaterialien
2	Prüfung des Einbaus der Schlauchanschlusseinrichtungen nach 6.1.1 (z. B. der Einbauhöhe, Wanddicke) beachten
3	Zugänglichkeit der Einspeisung und der Entnahmestellen
4	Funktionsprüfung der Schlauchanschlusseinrichtungen
5	Messung des Druckverlustes der Löschwasserleitung nach 6.2.3.2
6	Prüfung auf Festigkeit und Dichtheit: Die Löschwasserleitung wird 2 min mit 24 bar auf Festigkeit und 10 min bei 16 bar auf Dichtheit geprüft. Die Prüfung muss vorgenommen werden, bevor die Lösch Wasserleitung gegebenenfalls verdeckt wird. Es dürfen hierbei keine Undichtheiten und kein Druckabfall auftreten. Die Drücke sind jeweils an der Einspeisung zu messen.
7	Funktionsfähigkeit der Einspeisearmatur, der Be- und Entlüftungs- sowie der Entleerungseinrichtungen bei einem Wasserdurchfluss nach 6.2.3.2
8	Ggf. Prüfen des zuverlässigen Betriebes der Druckerhöhungsanlage nach 6.1.6
9	Vollständigkeit und Lesbarkeit der Beschilderung
	Nach der Prüfung:
10	Entleerung der Löschwasserleitung, Schließen der Schlauchanschlusseinrichtungen
11	Plombierung der Einspeisung, Entleerungen und der Schlauchanschlusseinrichtungen
12	Anbringen eines Prüfvermerks (Datum, Prüfer) an gut sichtbarer Stelle am Schrank
13	Prüfergebnisse im Kontrollbuch festhalten

H i n w e i s

Die Liste der bisher veröffentlichten Forschungsberichte kann auf den Homepages
der Forschungsstelle für Brandschutztechnik an der Universität Karlsruhe

<http://www.ffb.uni-karlsruhe.de/>

und des

Instituts der Feuerwehr Sachsen-Anhalt in Heyrothsberge

<http://www.idf.uni-magdeburg.de>

eingesehen werden.