

Sichere Technik

Druckprüfungen von Druckbehältern und Rohrleitungen

Flüssigkeitsdruckprüfungen, Gasdruckprüfungen



Sichere Technik
Flüssigkeitsdruckprüfungen, Gasdruckprüfungen
T 039
Stand: April 2012

Inhaltsverzeichnis dieses Ausdrucks

Deckblatt	3
1 Anwendungsbereich	3
2 Begriffsbestimmungen	4
2.1 Maximal zulässiger Druck PS (nach DGRL)	4
2.2 Zulässige minimale/maximale Temperatur TS (nach DGRL)	4
2.3 Zulässiger Betriebsdruck PB (nach TRBS 2141)	5
2.4 Zulässige Betriebstemperatur TB (nach TRBS 2141)	5
2.5 Prüfdruckfaktor FP (nach AD 2000-Merkblatt HP 30 bzw. TRBS 2141, TRBS 1201-2)	5
3 Rechtsgrundlagen	6
3.1 Druckprüfung nach Richtlinie 97/23/EG (DGRL)	6
3.2 Druckprüfung nach Betriebssicherheitsverordnung	6
3.2.1 Wiederkehrende Prüfung	6
3.2.2 Prüfung nach einer Änderung	7
4 Flüssigkeitsdruckprüfungen	7
4.1 Allgemeine Anforderungen bei der Flüssigkeitsdruckprüfung	8
4.2 Durchführung der Flüssigkeitsdruckprüfung	9
4.2.1 Prüftechnische Anforderungen	9
4.2.1.1 Prüfmedium	9
4.2.1.2 Prüfdruck	10
4.2.1.2.1 Prüfdruck bei der erstmaligen Druckprüfung nach DGRL	10
4.2.1.2.2 Prüfdruck bei Druckprüfungen nach Betriebssicherheitsverordnung	12
4.2.2 Ablauf der Flüssigkeitsdruckprüfung	15
4.2.3 Zusätzliche Anforderungen bei Prüfdrücken über 100 bar und bei Temperaturen des Prüfmediums höher als 50 °C	16
5 Gasdruckprüfungen	16
5.1 Gasdruckprüfung mit Luft oder inerten Gasen	16
5.1.1 Allgemeine Anforderungen bei der Gasdruckprüfung	16
5.1.1.1 Vorangehende Maßnahmen	17
5.1.1.2 Vermeidung von Sprödbruch	17
5.1.2 Vorangehende Prüfungen, zerstörungsfreie Prüfungen	17
5.1.2.1 Gasdruckprüfung als erstmalige Druckprüfung	17
5.1.2.2 Gasdruckprüfung bei wiederkehrenden Prüfungen	18
5.1.3 Durchführung der Gasdruckprüfung	18
5.1.3.1 Prüftechnische Anforderungen	18
5.1.3.1.1 Prüfdruck bei der erstmaligen Druckprüfung	18
5.1.3.1.2 Prüfdruck bei wiederkehrenden Prüfungen	20
5.1.3.1.3 Maßnahmen gegen Überschreitung des Prüfdrucks	20
5.1.3.1.4 Druckmessung	20
5.1.3.1.5 Prüftemperatur	20
5.1.3.2 Ablauf der Gasdruckprüfung	20
5.1.4 Personenschutzmaßnahmen	21
5.2 Gasdruckprüfung mit Gasen mit Gefährlichkeitsmerkmalen	22
5.2.1 Gasdruckprüfung als erstmalige Druckprüfung	22
5.2.2 Gasdruckprüfung bei wiederkehrenden Prüfungen	22
5.2.2.1 Anforderungen nach Gefährlichkeitsmerkmalen	22
5.2.2.2 Zusätzliche Personenschutzmaßnahmen	23
Anhang 1: Fachbegriffe	24
Anhang 2: Literaturverzeichnis	24
Bildnachweis	26
Änderungen gegenüber der Vorfassung	27

Ziel der Überarbeitung dieses Merkblatts ist die Anpassung an die neue Rechtslage bedingt durch die Richtlinie 97/23/EG über Druckgeräte und die Betriebssicherheitsverordnung. Hierbei wurde der aktuelle Stand der Technik entsprechend den Regelwerken und europäischen Normen im Bereich der Herstellung sowie den Technischen Regeln für Betriebssicherheit im Bereich der betrieblichen Prüfungen berücksichtigt.

Das Merkblatt wurde sorgfältig erstellt. Trotzdem wird der Unternehmer nicht von der Pflicht und Verantwortung befreit, die Angaben auf Vollständigkeit, Aktualität und Richtigkeit selbst zu überprüfen.

In den Betrieben nehmen Frauen und Männer gleichermaßen verantwortungsvolle Aufgaben wahr. Um das Lesen zu erleichtern, wird in diesem Merkblatt – wie auch in den Vorschriften – unabhängig davon nur von „dem Unternehmer“ bzw. „dem Vorgesetzten“ gesprochen.

Das Arbeitsschutzgesetz spricht vom Arbeitgeber, das Sozialgesetzbuch VII und die Unfallverhütungsvorschriften der Berufsgenossenschaften vom Unternehmer. Beide Begriffe sind nicht völlig identisch, weil Unternehmer nicht notwendigerweise Arbeitnehmer beschäftigen. Im Zusammenhang mit der vorliegenden Thematik ergeben sich daraus keine relevanten Unterschiede.

1 Anwendungsbereich

Das Merkblatt gilt für Flüssigkeitsdruckprüfungen und Gasdruckprüfungen

- im Bereich der Richtlinie 97/23/EG¹ über Druckgeräte (Druckgeräterichtlinie – DGRL), umgesetzt durch die 14. Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz², als erstmalige Druckprüfung von Druckbehältern und Rohrleitungen und
- im Bereich der Betriebssicherheitsverordnung (BetrSichV)³ im Rahmen der wiederkehrenden Festigkeitsprüfung von Druckbehältern und Rohrleitungen gemäß § 15 sowie der Prüfung vor Inbetriebnahme nach einer Änderung gemäß § 14 Abs. 2. Einfache Druckbehälter nach der Richtlinie 2009/105/EG⁴ (ehemals Richtlinie 87/404/EWG) werden mit behandelt.

Bei einer Druckprüfung als Flüssigkeitsdruckprüfung oder Gasdruckprüfung wird geprüft, ob die drucktragenden Wandungen unter Prüfdruck gegenüber dem Prüfmittel dicht sind und ob keine sicherheitstechnisch bedenklichen Verformungen auftreten.

Bei **Gasdruckprüfungen** ist bei Vorliegen der im Merkblatt aufgeführten Voraussetzungen und Einhaltung der darin beschriebenen Schutzmaßnahmen eine Abstimmung der für den Personenschutz erforderlichen Maßnahmen mit der für den Prüfort zuständigen Berufsgenossenschaft und der zuständigen Behörde nicht erforderlich.

Anmerkungen

Bei der

- erstmaligen Druckprüfung von Druckbehältern und Rohrleitungen nach DGRL, die dem Artikel 3 Abs. 3 unterliegen und nach der „guten Ingenieurpraxis“ in einem der Mitgliedstaaten ausgelegt und gefertigt werden, und
- erstmaligen bzw. wiederkehrenden Druckprüfung von Druckbehältern und Rohrleitungen, die nach Betriebssicherheitsverordnung als Arbeitsmittel eingestuft werden und bei denen das Erfordernis der Prüfung vom Arbeitgeber auf der Grundlage einer Gefährdungsbeurteilung ermittelt wird,

können die prüftechnischen Anforderungen und erforderlichen Personenschutzmaßnahmen in Anlehnung an dieses Merkblatt ermittelt werden.

2 Begriffsbestimmungen

2.1 Maximal zulässiger Druck PS (nach DGRL)

Der maximal zulässige Druck PS (nach DGRL) ist der vom Hersteller angegebene höchste Druck, für den das Druckgerät ausgelegt ist.

Er wird für eine vom Hersteller vorgegebene Stelle festgelegt. Hierbei handelt es sich um die Anschlussstelle der Ausrüstungsteile mit Sicherheitsfunktion oder um den höchsten Punkt des Druckgerätes (in der Regel bei Druckbehältern) oder, falls nicht geeignet, um eine andere angegebene Stelle.

Anmerkung

Bei Druckgeräten mit Differenzdrücken und/oder statischen Drücken von Flüssigkeitssäulen im Betriebs- oder Prüfzustand kann der Berechnungsdruck vom maximal zulässigen Druck PS abweichen.

2.2 Zulässige minimale/maximale Temperatur TS (nach DGRL)

Die zulässige minimale/maximale Temperatur TS (nach DGRL) ist die vom Hersteller angegebene minimale/maximale Temperatur, für die das Druckgerät ausgelegt ist.

Anmerkung

Bei beheizten Druckgeräten kann die Berechnungstemperatur, d. h. die zu erwartende Wandtemperatur von der zulässigen maximalen Temperatur TS je nach Beheizungsart abweichen. Sie errechnet sich aus der zulässigen maximalen Temperatur mit einem entsprechenden Temperaturzuschlag.

- 1 Siehe Anhang 2 Nr. (1)
- 2 Siehe Anhang 2 Nr. (4)
- 3 Siehe Anhang 2 Nr. (5)
- 4 Siehe Anhang 2 Nr. (2)

2.3 Zulässiger Betriebsdruck P_B (nach TRBS 2141⁵)

Der zulässige Betriebsdruck P_B (nach TRBS 2141⁵) ist der vom Arbeitgeber/Betreiber aus Sicherheitsgründen festgelegte höchste bzw. niedrigste Wert (im Vakuumbereich) des Drucks, für den das Druckgerät bzw. der einfache Druckbehälter ggf. durch ein Ausrüstungsteil mit Sicherheitsfunktion abgesichert ist. Dieser darf im Betrieb nicht über- bzw. unterschritten werden.

Der zulässige Betriebsdruck (P_B) kann sich vom maximal zulässigen Druck (PS) gemäß DGRL unterscheiden.

2.4 Zulässige Betriebstemperatur T_B (nach TRBS 2141)

Die zulässige Betriebstemperatur T_B (nach TRBS 2141) ist der vom Arbeitgeber/Betreiber aus Sicherheitsgründen festgelegte höchste bzw. niedrigste Wert der Temperatur, auf den das Druckgerät ggf. durch ein Ausrüstungsteil mit Sicherheitsfunktion abgesichert ist. Dieser darf im Betrieb nicht über- oder unterschritten werden.

Die zulässige Betriebstemperatur (T_B) kann sich von der zulässigen minimalen/maximalen Temperatur (TS) gemäß DGRL unterscheiden.

2.5 Prüfdruckfaktor F_P (nach AD 2000-Merkblatt HP 30⁶ bzw. TRBS 2141, TRBS 1201-2⁷)

Der Prüfdruckfaktor F_P (nach AD 2000-Merkblatt HP 30⁶ bzw. TRBS 2141, TRBS 1201-2⁷) ist ein Faktor größer als 1, der durch Multiplikation mit

- dem maximal zulässigen Druck PS bei der Druckprüfung nach DGRL oder
- dem zulässigen Betriebsdruck P_B bei der wiederkehrenden Druckprüfung nach Betriebssicherheitsverordnung den Wert des Prüfdrucks bestimmt.

Anmerkungen

- Bei der wiederkehrenden Druckprüfung nach Betriebssicherheitsverordnung darf der Prüfdruck auf den vom Arbeitgeber/Betreiber festgelegten bzw. abgesicherten, in der Regel niedrigeren Wert des zulässigen Betriebsdrucks P_B bezogen werden. Wenn nach der Gefährdungsbeurteilung/sicherheitstechnischen Bewertung des Arbeitgebers/Betreibers die Druckfestigkeit entsprechend den anfänglichen Auslegungsgrenzen nachgewiesen werden soll, muss der Prüfdruck auf den maximal zulässigen Druck PS bezogen werden.
- Bei Druckbehältern oder Rohrleitungen, bei denen der statische Druck einer Flüssigkeitssäule im Betrieb oder bei der Flüssigkeitsdruckprüfung zu berücksichtigen ist, ist der Prüfdruck ggf. um hydrostatische Druckanteile zu erhöhen.

5 Siehe Anhang 2 Nr. (9)

6 Siehe Anhang 2 Nr. (14)

3 Rechtsgrundlagen

3.1 Druckprüfung nach Richtlinie 97/23/EG (DGRL)

Im Rahmen der Abnahme von Druckgeräten, die dem Anhang I der DGRL unterliegen, ist jedes einzelne Druckgerät einer Druckfestigkeitsprüfung zu unterziehen. Als Ausnahme darf die Druckfestigkeitsprüfung bei serienmäßig hergestellten Druckgeräten der Kategorie I auf statistischer Grundlage durchgeführt werden.

Gemäß Anhang I Nr. 7.4 DGRL muss der Prüfdruck dem höheren der folgenden Werte entsprechen:

- dem 1,25-fachen Wert der Höchstbelastung des Druckgerätes im Betrieb unter Berücksichtigung des maximal zulässigen Drucks und der maximal zulässigen Temperatur oder
- dem 1,43-fachen Wert des maximal zulässigen Drucks.

Die Druckfestigkeitsprüfung erfolgt in der Regel als „hydrostatischer Druckversuch“ (Flüssigkeitsdruckprüfung). Ist der hydrostatische Druckversuch nachteilig oder nicht durchführbar, können andere Prüfungen, die sich als wirksam erwiesen haben, durchgeführt werden. Für andere Prüfungen als den hydrostatischen Druckversuch müssen zuvor zusätzliche Maßnahmen, wie zerstörungsfreie Prüfungen oder andere gleichwertige Verfahren, angewandt werden.

„Andere Prüfungen“ als der hydrostatische Druckversuch werden in den harmonisierten europäischen Normen DIN EN 13 445-5⁸, DIN EN 13 480-5⁹ sowie im AD 2000-Merkblatt HP 30 konkretisiert. Es handelt sich insbesondere um eine Gasdruckprüfung, die in der Regel mit Druckluft oder Stickstoff durchgeführt wird.

Gemäß DIN EN 13 445-5 kann die Druckfestigkeitsprüfung von Druckbehältern in bestimmten Fällen auch als eine kombinierte Flüssigkeits- und Gasdruckprüfung durchgeführt werden.

Gemäß DIN EN 13 480-5 darf die Flüssigkeits- oder Gasdruckprüfung einzelner Schweißnähte (Verbindungsnahte) von Rohrleitungen, wenn diese Prüfungen sich nachteilig auswirken oder nicht durchführbar sind, durch geeignete zerstörungsfreie Prüfungen (100 % Volumenprüfung und 100 % Oberflächenrissprüfung) ersetzt werden.

3.2 Druckprüfung nach Betriebssicherheitsverordnung

3.2.1 Wiederkehrende Prüfung

Im Rahmen der wiederkehrenden Prüfung nach § 15 der Betriebssicherheitsverordnung wird bei Druckbehältern und Rohrleitungen, die dem Abschnitt 3 „Besondere Vorschriften für überwachungsbedürftige Anlagen“ unterliegen, u. a. eine Festigkeitsprüfung gefordert. Dies betrifft

7 Siehe Anhang 2 Nr. (7)

7 Siehe Anhang 2 Nr. (7)

8 Siehe Anhang 2 Nr. (16)

9 Siehe Anhang 2 Nr. (17)

- Druckbehälter im Sinne der DGRL, die in die Kategorie I oder höher eingestuft werden,
- einfache Druckbehälter im Sinne der Richtlinie 2009/105/EG mit einem Druck-Inhaltsprodukt $PS \cdot V > 50 \text{ bar} \cdot \text{l}$ und
- Rohrleitungen im Sinne der DGRL, die in die Kategorie I oder höher eingestuft werden und soweit sie für hochentzündliche, leichtentzündliche, entzündliche, sehr giftige, giftige oder ätzende Gase, Dämpfe oder Flüssigkeiten bestimmt sind.

Nach § 15 Abs. 10 kann bei Festigkeitsprüfungen die statische Druckprobe (Druckprüfung) durch gleichwertige zerstörungsfreie Verfahren ersetzt werden, wenn ihre Durchführung aus Gründen der Bauart des Druckgerätes nicht möglich oder aus Gründen der Betriebsweise nicht zweckdienlich ist.

Ausnahmen von den Regelungen des § 15 der Betriebssicherheitsverordnung sind im Anhang 5 „Prüfung besonderer Druckgeräte nach § 17“ festgelegt.

3.2.2 Prüfung nach einer Änderung

Im Rahmen der Prüfung vor Inbetriebnahme nach einer Änderung gemäß § 14 Abs. 2 der Betriebssicherheitsverordnung kann, soweit die Bauart oder der Betrieb des Druckbehälters oder der Rohrleitung durch diese Änderung beeinflusst wird, u. a. eine Festigkeitsprüfung erforderlich sein. Das Erfordernis einer Festigkeitsprüfung – und der Durchführung als Druckprüfung und/oder zerstörungsfreie Prüfung – legt der Betreiber auf der Grundlage einer sicherheitstechnischen Bewertung bzw. Gefährdungsbeurteilung fest. Eine Abstimmung mit der zuständigen Prüfstelle¹⁰ bzw. Prüfperson sollte, soweit möglich, bereits im Vorfeld der Änderung erfolgen.

Dies betrifft die im Abschnitt 3.2.1 des Merkblatts genannten Druckbehälter und Rohrleitungen, die dem Abschnitt 3 „Besondere Vorschriften für überwachungsbedürftige Anlagen“ der Betriebssicherheitsverordnung unterliegen.

Anmerkungen

- Bei Eigenherstellung von Druckgeräten durch den Betreiber ist die Druckgeräteverordnung als nationale Umsetzung der DGRL nicht anzuwenden, da es sich nicht um ein Inverkehrbringen im Sinne des EG-Rechts handelt. Gemäß § 12 der Betriebssicherheitsverordnung ist in diesem Fall bei Druckgeräten, die dem Anhang I DGRL unterliegen würden, der Stand der Technik einzuhalten. Als Stand der Technik für Beschaffenheitsanforderungen ist Anhang I DGRL heranzuziehen. Somit gelten die Bestimmungen der DGRL auch für die erstmalige Druckprüfung von Druckbehältern und Rohrleitungen in Eigenherstellung.
- Das Gleiche gilt für Druckbehälteranlagen und Rohrleitungen, die nach einer wesentlichen Veränderung in Betrieb genommen werden. Nach Betriebssicherheitsverordnung gelten für die Beschaffenheit die gleichen Anforderungen wie für Neuanlagen nach DGRL.

4 Flüssigkeitsdruckprüfungen

¹⁰ Siehe Anhang 1

4.1 Allgemeine Anforderungen bei der Flüssigkeitsdruckprüfung

4.1.1

Die sich durch das spezifische Gewicht des Prüfmediums ergebenden z. T. konstruktiven Anforderungen sind bereits bei der Planung zu berücksichtigen.

4.1.2

Druckprüfungen sind zeitlich so zu veranlassen, dass die zuständige Prüfstelle bzw. Prüfperson alle drucktragenden Teile ausreichend besichtigen kann. Ist dies bei der erstmaligen Druckprüfung im Endzustand nicht möglich, wird die erstmalige Druckprüfung als Teilprüfung im prüffähigem Zustand durchgeführt.

4.1.3

Die erstmalige Druckprüfung erfolgt

- nach der letzten Wärmebehandlung, bei emaillierten Druckbehältern vor einer Emaillierung,
- in der Regel nach dem Plattieren und nach der spanenden Bearbeitung,
- vor dem Anbringen von Farbanstrichen, Dämmungen, Gummierungen, Ausmauerungen und Ähnlichem,
- in der Regel vor dem Anbringen von Auskleidungen, Verzinkungen,
- soweit in den Prüfunterlagen vorgesehen: nach zerstörungsfreien Prüfungen oder besonderen Dichtheitsprüfungen.

4.1.4

Bei Druckbehältern oder Rohrleitungen mit mehreren Druckräumen ist jeder Druckraum einzeln einer Druckprüfung zu unterziehen. Von dieser Regel kann abgewichen werden, wenn eine Wand zwischen zwei Druckräumen nur für den Differenzdruck ausgelegt ist und durch betriebliche Maßnahmen sichergestellt wird, dass nicht ein Raum unabhängig vom anderen unter Druck gesetzt werden kann. In solchen Fällen sind die angrenzenden Räume zunächst einzeln entsprechend diesem Differenzdruck und anschließend die betroffenen Räume gleichzeitig mit dem Prüfdruck P_p zu beaufschlagen.

4.1.5

Der vom Manometer bei der Prüfung angezeigte Druck muss durch geeignete Maßnahmen, z. B. Kontrollmanometer, kontrolliert werden können.

4.1.6

Sollen bei der Druckprüfung Dehnungsmessungen durchgeführt werden, so ist das Vorgehen einschließlich Füllen, Vordrücken usw. mit der zuständigen Prüfstelle bzw. Prüfperson abzustimmen.

4.1.7

Bei Druckbehältern oder Rohrleitungen, bei denen der statische Druck der Flüssigkeitssäule (im Betrieb oder bei einer Flüssigkeitsdruckprüfung) zu berücksichtigen ist, ist die Druckprüfung in der Regel am stehenden Behälter bzw. der senkrecht verlaufenden Rohrleitung durchzuführen. Wird die erstmalige Flüssigkeitsprüfung am liegenden Druckbehälter oder an der liegenden Rohrleitung durchgeführt, ist der zu messende Prüfdruck ggf. um die in senkrechter Lage wirksamen statischen Druckanteile zu korrigieren.

Anmerkung

Die im Betrieb oder auch bei der Flüssigkeitsdruckprüfung auftretenden statischen Drücke der Flüssigkeit (Betriebs- bzw. Prüfmedium) brauchen nur berücksichtigt werden, soweit sie die Beanspruchung der Wand um mehr 5 % erhöhen, sofern in den Prüfunterlagen nicht anders vorgesehen. Dies gilt für Druckbehälter und Rohrleitungen nach AD 2000 sowie DIN EN 13 445 bzw. DIN EN 13 480.

4.1.8

Kontrollbohrungen zur Überprüfung der Dichtheit verdeckter Schweißnähte müssen bei den Druckprüfungen offen sein.

4.2 Durchführung der Flüssigkeitsdruckprüfung

4.2.1 Prüftechnische Anforderungen

4.2.1.1 Prüfmedium

Die Flüssigkeitsdruckprüfung wird in der Regel mit Wasser durchgeführt, soweit es die Bauart oder die Betriebsweise des Druckbehälters oder der Rohrleitung bzw. das Beschickungsgut dies zulassen.

Andere geeignete, nicht heiße Flüssigkeiten, z. B. Hydrauliköl, Kältemittel der Gruppe 1 nach DIN EN 378-1¹¹ können verwendet werden, wenn dies zweckdienlich ist.

Anmerkungen

Sofern andere Flüssigkeiten als Wasser verwendet werden, sind ggf. zusätzliche Gefährdungen durch die Eigenschaften des Prüfmittels im Rahmen einer Gefährdungsbeurteilung zu berücksichtigen.

Hierzu liefert die DIN EN 13 480-5¹² einige Anhaltspunkte; bei der erstmaligen Druckprüfung sollen Flüssigkeiten verwendet werden, die

- nicht giftig sind und
- einen Flammpunkt von über 60 °C haben und nicht weniger als 25 °C unter diesem Flammpunkt eingesetzt werden.

Außerdem sollte die Prüftemperatur mindestens 10 °C unter dem Siedepunkt bei Atmosphärendruck und mindestens 5 °C oberhalb des Erstarrungspunktes der Flüssigkeit liegen.

4.2.1.2 Prüfdruck

Die Höhe des Prüfdrucks P_P beträgt für Druckbehälter und Rohrleitungen, die nicht für den Zeitstandbereich ausgelegt sind

$$P_P = F_P \cdot p$$

p = Druck im höchsten Punkt des Druckgerätes, falls die Prüfunterlagen keinen anderen Bezugspunkt angeben, in bar

p = PS bei einer Druckprüfung nach DGRL, in bar

p = P_B bei einer Druckprüfung nach Betriebssicherheitsverordnung, in bar.

Bei gleichzeitigem Auftreten von Überdruck und Unterdruck an der drucktragenden Wand, z. B. bei einem Druckbehälter mit Vakuumschale, ist der Druck p durch die Druckdifferenz zu ersetzen. Ist der Unterdruck nicht zuverlässig begrenzt, ist die Druckdifferenz gleich dem um 1 bar erhöhten Druck p

$$\Delta p = p + 1$$

Δp = Druckdifferenz an der drucktragenden Wand, in bar.

4.2.1.2.1 Prüfdruck bei der erstmaligen Druckprüfung nach DGRL

a) Für Druckbehälter und Rohrleitungen, die **nicht für den Zeitstandbereich ausgelegt sind**, darf der Prüfdruckfaktor den höheren der folgenden beiden Werte nicht unterschreiten:

$$\begin{cases} F_P = 1,25 \frac{f_{20}}{f_{\theta}} \\ F_P = 1,43 \end{cases}$$

worin

11 Siehe Anhang 2 Nr. (15)

12 Siehe Anhang 2 Nr. (17)