

Alle gängigen Verfahren zur Beurteilung der Sicherheit und Betriebssicherheit von Bauteilen basieren auf der Erfassung von Festigkeitseigenschaften. Hierzu kommen meist zerstörende Prüfungen an einzelnen Prüfmustern zum Einsatz, während die zerstörungsfreien Prüfverfahren ggf. an jedem Bauteil ergänzend dazu genutzt werden, die Qualität und Fehlerfreiheit eines Werkstoffes oder einer Fügeverbindung zu überwachen. Unter sehr engen Randbedingungen ist es in wenigen Fällen mit Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung wie Schallemissionsanalyse und Röntgenrefraktion auch möglich, den Belastungsgrad unter einer vorgegebenen Last grob abzuschätzen. Belastungsgrad meint das Verhältnis von Werkstoffanstrengung zu Belastbarkeit. Da dies aber derzeit kaum für ganze Bauteile (Composite-Cylinders) im Labor und sicherlich nicht im Feld genutzt werden kann, bleiben derzeit nur zerstörende Prüfungen, um die zentralen Sicherheitseigenschaften belastbar zu bestimmen.

Als die zentralen sicherheitsrelevanten Eigenschaften werden heute zum einen die statische Festigkeit im Sinne einer Berstprüfung und die Betriebsfestigkeit im Sinne der Lastwechselprüfung angesehen. Wie später noch ausgeführt werden wird, streuen Festigkeitseigenschaften von Bauteil zu Bauteil und von Werkstoffprobe zu Werkstoffprobe. Damit wird es im Zuge der mancherseits angestrebten Optimierung zur Kosten- oder Gewichtseinsparung unverzichtbar, das jeweilige Festigkeitsmerkmal anhand von mehreren Prüfmustern statistisch zu quantifizieren und zu bewerten.

Für die statistische Ermittlung von Festigkeitseigenschaften gibt es zentrale Aspekte, die im Folgenden diskutiert werden sollen. Zum einen wird im Unterkapitel Abschn. 2.1 erläutert, warum die Reproduzierbarkeit von Prüfungen wesentlich ist und nach welchen Aspekten diese in der Lastwechselprüfung verbessert werden kann. Zum anderen wird in den darauf folgenden, Unterkapiteln 2.2 bis 2.4 der Frage des geeigneten Prüfverfahrens nachgegangen. Führt die Lastwechselprüfung nicht zu den angestrebten Erkenntnissen, ist die Zeitstandsprüfung als Alternative zu diskutieren. In diesem Kontext wird die langsame

Berstprüfung als Ersatz für die Zeitstandsprüfung Stück für Stück erarbeitet (Abschn. 2.2), beschrieben (2.3) und es werden erste Erfahrungen dargestellt (2.4).

Die Aspekte der Auswertung von Ergebnissen werden hier nicht als Bestandteil der Ermittlung von Festigkeitseigenschaften angesehen, sondern separat betrachtet.

---

## 2.1 Anforderungen zur Verbesserung der Reproduzierbarkeit

Die Ergebnisse der Prüfungen dienen unterschiedlichen Zwecken. Oft sollen nach gängiger Praxis mit einzelnen Prüfungen Mindesteigenschaften nachgewiesen werden. Immer öfter dienen Prüfergebnisse dazu, aus direkten Vergleichen Schlüsse zu ziehen. Letzteres gilt im Prinzip auch für alle Prüfungen, die als Reihenprüfung einer statistischen Auswertung zugeführt werden.

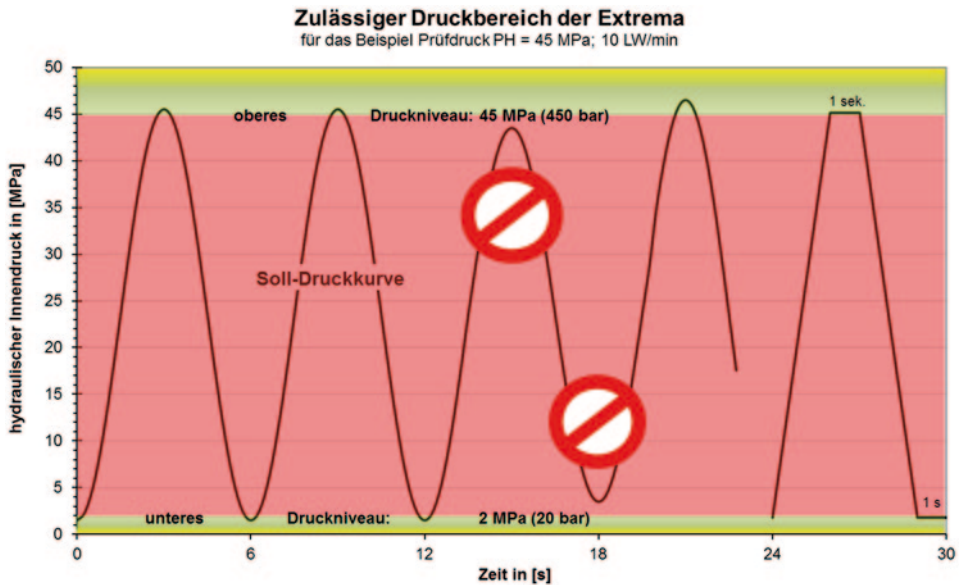
Bei all diesen Prüfungen muss gewährleistet sein, dass die Prüfergebnisse unabhängig von Prüfanlage und Prüfstelle vergleichbare Werte liefern. Dies ist jedoch eine wackelige Anforderung, die bei Prüfungen zur Demonstration von Mindestwerten nur bei grenzwertigen Eigenschaften einen Einfluss der Prüfanlage erkennen lässt. Dieser scheinbar geringe Einfluss darf aber dennoch in seiner praktischen Bedeutung nicht unterschätzt werden.

Bei Prüfungen, deren Ergebnisse quantitativ ausgewertet werden sollen (d. h. Feststellung der tatsächlichen Eigenschaft anstelle einer reinen ja/nein-Abfrage) oder auf deren Basis statistische Auswertungen durchgeführt werden sollen, kommt bzgl. der Vergleichbarkeit der Werte noch ein deutlich verschärfender Aspekt hinzu: Hier bedeutet die Statistik von Eigenschaften, dass die ermittelte Streuung dieser Eigenschaft bei veränderten oder nur schwankenden Prüfparametern deutlich größer wird, als es die Eigenschaft der Stichprobe wirklich ist. Um dies zu vermeiden, müssen für eine statistische Bewertung der Prüfergebnisse die Prüfvorgaben sehr viel detaillierter als bisher üblich festgeschrieben werden. Dies beinhaltet auch, dass nicht mehr Mindest- ODER Maximalwerte für Parameter angegeben werden dürfen. Stattdessen müssen über Mindest- UND Maximalwerte möglichst enge Bereiche von Prüfparametern angegeben werden.

Bevor in den nachfolgenden Abschnitten die Berst- und Zeitstandsprüfprozeduren genauer beleuchtet werden, soll hier zunächst anhand der Lastwechselprüfung gezeigt werden, an welchen Stellen eine Nachbesserung der in den Normen vorgegebenen Prüfparameter wünschenswert ist, um einen für statistische Zwecke hinreichenden Grad der Reproduzierbarkeit zu erreichen.

### 2.1.1 Reproduzierbarkeit der Lastwechselprüfung

In [1, 2] sind Ringversuche dargelegt, die im Rahmen des EU-Vorhabens StorHy [3] zwischen Prüfeinrichtungen aus vier verschiedenen europäischen Ländern verabredet wurden. Diese bezogen sich unter anderem auf die Druck- und Temperaturverläufe verschiedener, im Detail verabredeter Varianten der hydraulischen Lastwechselprüfung.



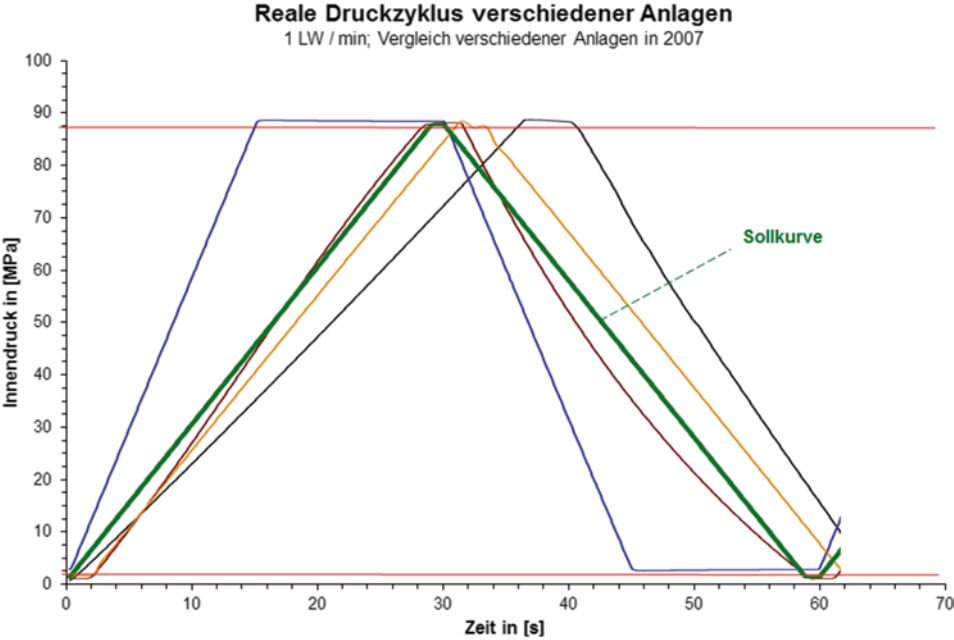
**Abb. 2.1** Darstellung von Druckkurven und des Bereichs unerlaubter Extremwerte. (vergl. [2])

Als Form der Druckkurve wurde eine Trapezkurve mit oberen und unteren Haltephasen von je 1 Sekunde verabredet, wie es heute für Prüfungen für Treibgasspeicher von Fahrzeugherstellern teilweise gefordert wird (vergl. [4–6]). Das obere Druckniveau war mit 87,5 MPa (125 % von 70 MPa) festgelegt und das untere mit 2 MPa. Hierbei war darauf zu achten, dass die realen Druckextrema außerhalb dieses in Abb. 2.1 rot gekennzeichneten Druckbereichs liegen.

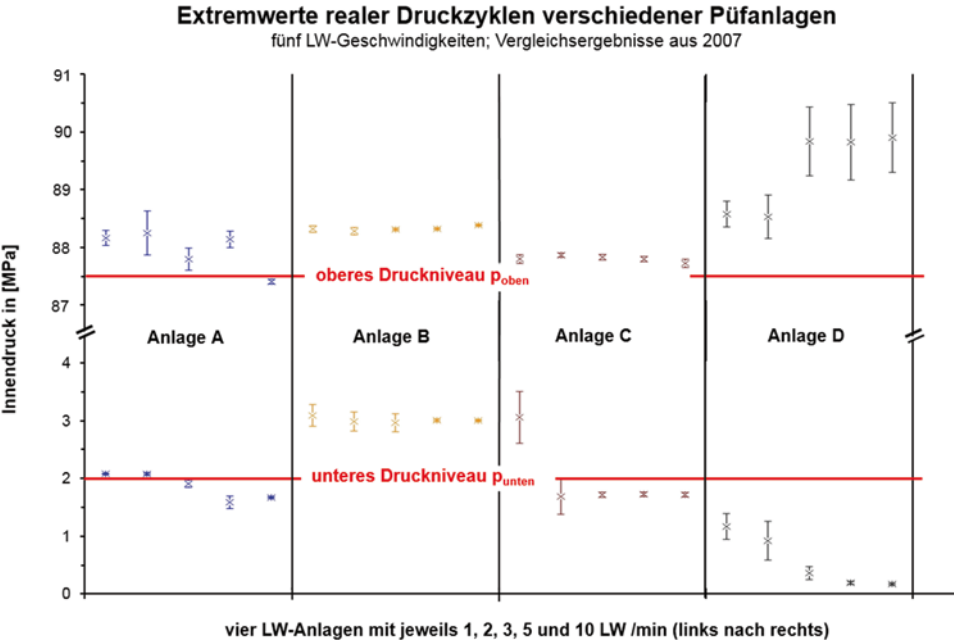
Die Ergebnisse der Versuche zur Formtreue, wie sie in Abb. 2.2 dargestellt sind, wurden unterschiedlich bewertet:

- Der Partner A hatte Maxima mit Druckspitze, so dass neben der Zyklenzahl pro Minute die Mindesthaltephase auf dem geforderten Druckniveau als nicht erfüllt gelten muss.
- Der Partner B nahm sich die Freiheit, bei vorgegebener Lastwechselanzahl pro Minute die Haltephase deutlich zu erhöhen, überschritt aber systematisch das untere Druckniveau.
- Der Partner C kam der Sollkurve deutlich näher, hatte aber mit nicht linearem Druckab- und -aufbau zu kämpfen.
- Der Partner D hielt die oberen und unteren Druckvorgaben gut ein, hatte aber eine gänzlich andere Lastwechselgeschwindigkeit gewählt.

Von ebenfalls essentiell Interesse ist die Reproduzierbarkeit der schwelenden Last, wie sie in Abb. 2.3 mithilfe der Extrema (je Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung) dargestellt sind. Hier sind für jeden Partner von links nach rechts jeweils die Ergebnisse der Prüfungen mit 1 LW/min, 2 LW/min, 3 LW/min, 5 LW/min und 10 LW/min dargestellt.



**Abb. 2.2** Druckkurven verschiedener LW-Anlagen. (vergl. [1])



**Abb. 2.3** Statistische Betrachtung der Druckminima und –maxima. (Mittelwert mit  $\pm$  Standardabweichung; vergl. [1])

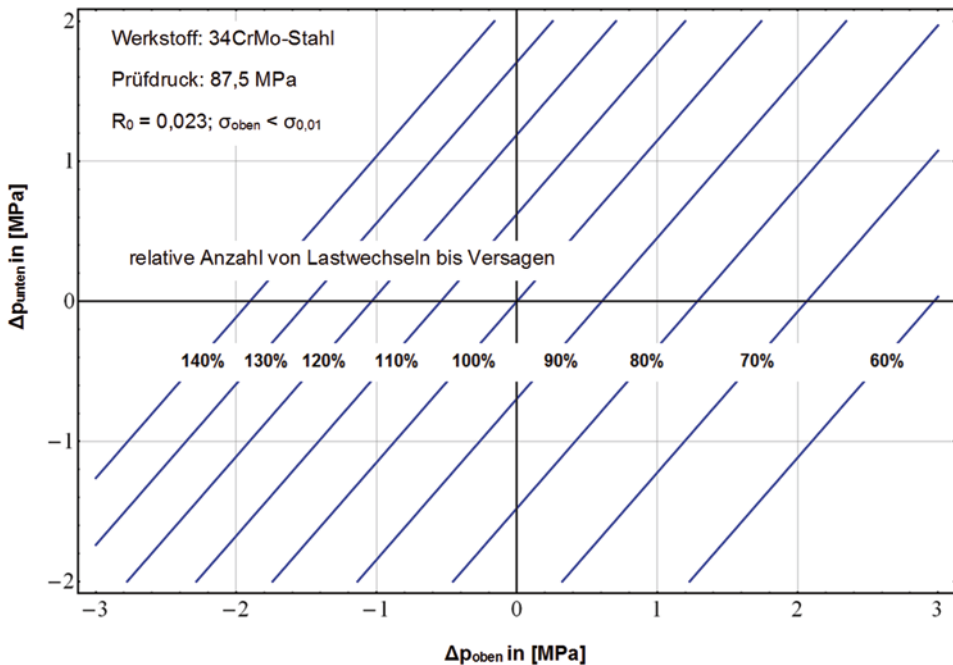
Die Ergebnisse zeigen:

- Partner A hatte eine Streuung der Oberwerte, die deutlich größer war als die der Minima. Streng genommen genügen nur die Prüfungen mit 3 LW/min und 5 LW/min den Druckvorgaben.
- Der Partner B hatte insbesondere bei 5 LW/min und 10 LW/min eine sehr kleine Streuung der Druckextrema. Großes Manko ist jedoch, dass alle dargestellten Werte der Druckextrema zu höheren Drücken verschoben sind. Die nachträgliche Analyse ergab, dass ein Spannungsoffset in der Messkette vorhanden war, der als systematischer Messfehler bezeichnet werden kann. Um auf diese Form der Fehlerquelle und ihre Auswirkung hinzuweisen sind hier nicht die wahren Werte, sondern die fehlerbehafteten, extern gemessenen dargestellt. In jedem Fall lässt sich dieser Fehler vergleichsweise einfach ergünden und beheben, sofern man über Kontrollmessungen in Ringversuchen darauf stößt.
- Der nächste Partner C erfüllte die Anforderungen erst bei mehr als 2 LW/min und zeigte geringe Streuungen ab 3 LW/min.
- Die vierte Prüfanlage im Vergleich (Partner D) erfüllte zwar in jedem Fall die Anforderungen an die Druckeinhaltung, stellt aber mit den relativ großen Streubreiten und den großen Abständen zu den Sollwerten dem Prüfling eine unnötig hohe Belastung dar. Dies ist zwar konservativ, geht jedoch zu Lasten der Reproduzierbarkeit.

Im Ergebnis zeigten die Prüfungen bei Raumtemperatur mit ansteigender Lastwechselgeschwindigkeit geschwindigkeitsabhängige Streubreiten der Druckextrema (Druckspitze und Druckminimum). Im Großen und Ganzen kamen die Anlagen aber mit 10 LW/min relativ gut zurecht. Obwohl der Nachweis erbracht wurde, dass die am Adapter gemessenen Druckextrema auch bei höheren Geschwindigkeiten in dieser Versuchsanordnung im Prüfmuster wirksam gewesen wären, wurden höherer Lastwechselgeschwindigkeiten nicht getestet, da dies bei zumindest einem der Partner nicht machbar gewesen wäre.

Aufgrund der teilweise deutlich kritikwürdigen Abweichungen von den Druckvorgaben ist an einem Beispiel dargestellt, welche Auswirkungen als Konsequenz solcher „Ungenauigkeiten“ zu erwarten sind. Abbildung 2.4 gibt hierzu zunächst einen Eindruck des Einflusses der Druckabweichungen in den Extrema von den Sollwerten. Für die in Abb. 2.4 dargestellten Beispielanalysen wurden die in der FKM-Richtlinie [7] für 34CrMo4 angegebenen Materialdaten und Rechenverfahren verwendet.

In Abb. 2.4 ist die Abweichung des unteren Druckniveaus über der Abweichung des oberen Druckwertes aufgetragen. Parameter der Kurvenschar ist die relative Lebensdauer. So ergibt sich z. B. bei einer systematischen Abweichung des Oberdruckes von etwa +7 bar zum Solldruck eine Reduktion des Messergebnisses von 10% gegenüber einer ideal durchgeführten Prüfung. Da die Linien konstanter Lebensdauer steiler als 45° geneigt sind, erkennt man, dass der Einfluss des oberen Druckniveaus (nur) etwas größer als der Einfluss der Abweichungen vom unteren Solldruckniveau ist.



**Abb. 2.4** Variationsrechnung zum Einfluss der Druckabweichungen auf die Lastwechselfestigkeit. (vergl. [2])

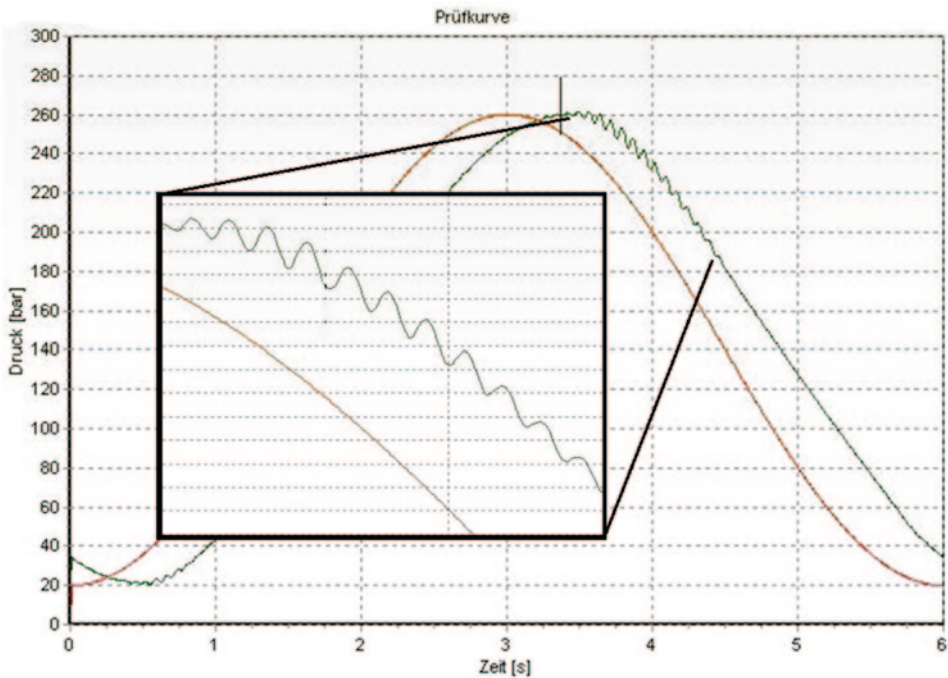
In der Praxis wird man oft mit der Auffassung konfrontiert, dass man besonders auf die oberen Druckniveaus zu achten hätte. Dies führt aufgrund von Regelproblemen bei sehr geringem Druck oft dazu, dass auf die Einhaltung des unteren Druckniveaus nicht annähernd vergleichbar Wert gelegt wird. Vor diesem Hintergrund überrascht die Geringfügigkeit des Unterschiedes in der Bedeutung beider Druckgrenzen nach Abb. 2.4. So sei es an dieser Stelle gestattet, eine Lanze für die detaillierte Beschreibung und exakte Regelung der Minimalwerte unterhalb des unteren Sollwertes zu brechen.

Da dieser Einfluss Werkstoff- und Design-spezifisch ist, können die quantitativen Angaben in Abb. 2.4 nur als Anhaltspunkt gewertet werden.

In [1, 2] wurde auch der Frage möglicher Oberschwingungen (grün) im Prüfmedium gegenüber der Solldruckkurve (rot; phasenverschoben) wie in Abb. 2.5 dargestellt nachgegangen. Das Ergebnis war ein unerwartet kleiner Einfluss auf das Gesamtprüfergebnis.

Des Weiteren wurde das Temperaturverhalten bei Extremtemperaturzyklen betrachtet. Hier wiesen die beiden Anlagen, die von den vier im Rahmen des Ringversuches beteiligten Anlagen überhaupt in der Lage waren, diese Prüfungen auszuführen, erkennbaren Unterschiede in den Temperaturverläufen auf (s. [1, 2]).

Wesentlicher Aspekt der Vergleichbarkeit der Medientemperaturen im Prüfablauf ist hierbei die Frage, wie gekühlt wird, wo gemessen wird und ob das Prüfmedium vorgekühlt wird. Hierbei spielt insbesondere die Frage eine Rolle, ob mindestens so viel Volumen vorgekühlt wird, wie zum Druckaufbau im Prüfaufbau nachgeschoben werden muss,



**Abb. 2.5** Beispiel einer Oberschwingung (nachlaufend) an einer Soll-Sinuskurve; provoziert durch eine Falschabstimmung der Steuerparameter. (vergl. [2])

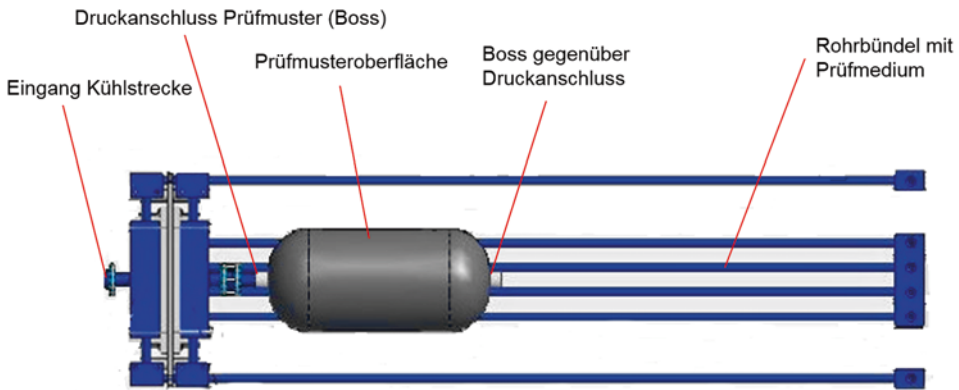
und ob das vorgekühlte Medium einer nennenswerten Durchmischung mit dem von der Anlage nachgeschobenen, warmen Medium unterliegt.

Ein Konzept, das dies leistet ist in Abb. 2.6 dargestellt. Es zeigt eine modulare Einheit, die als „Kühlstrecke“ bei entsprechend angepasstem Volumen das Medium im notwendigen Umfang konditioniert und auch die sonst übliche Durchmischung verhindert. Details sind im Patent [8] und in [2] zu finden.

In Abb. 2.7 sind verschiedene Messungen dargestellt, die an den relevanten Stellen gemäß Abb. 2.6 gemessen wurden. In den hier gezeigten vier Prüfungen wurde das Medium im „Boss“ (Gewindehalsstück aus Metall des CC) in mehrstündiger Kühlung auf eine Temperatur von  $-45^{\circ}\text{C}$  gebracht. Wie an dem Knick nach Prüfungsbeginn in allen Messkurven in Abb. 2.7 abzulesen ist, erreicht das Medium im durch den Composite relativ gut isolierten Prüfmuster aber nur eine mittlere Temperatur von etwa  $-20^{\circ}\text{C}$ . Diese großen Temperaturunterschiede zwischen dem Boss und dem Prüfmedium im Prüfmuster ergeben sich u. a. aus der unterschiedlichen Wärmeleitfähigkeit der verschiedenen Werkstoffe. Da der Boss und das darin enthaltene Druckmedium schneller als die relativ große Menge Prüfmedium im (gut isolierten) Prüfmuster abkühlen, kann die tatsächlich im Behälter erreichte Temperatur bei dieser Messanordnung erst kurz nach Beginn des Zyklrierens indirekt am Kurvenverlauf der Temperatur am Boss abgelesen werden. Damit ist Erfahrung notwendig, die richtige Temperatur konstant zu erreichen.



### Positionen der Temperatursensoren an der "Kühlstrecke" (Draufsicht ohne Tragegerüst)



**Abb. 2.6** Einheit zur Konditionierung des Druckmediums mit eingebautem Prüfmuster in der Draufsicht. (vergl. [2])

Die Druckzyklen werden bei dem hier verwendeten, geschlossenen Zweikreisssystem durch das zyklische Pendeln einer Flüssigkeitssäule (Prüfmedium) in den Anschlussrohrleitungen aufgebaut. Das Prüfmedium durchmischt sich dabei an beiden Enden. Am einen Ende ist das gefüllte Prüfmuster, während am anderen Ende der Druckübersetzer (Kolben mit definiertem Hubvolumen) liegt.

Alle Analysen zu Abb. 2.7 basieren auf den hier gegebenen Voraussetzungen ausreichender Menge vorgekühltem Prüfmedium und geringer Durchmischung mit anlagenseitig warmen Prüfmedium. Zum Vorkühlen der notwendigen Menge an Prüfmedium, das mindestens dem genutzten Hubvolumen des Druckübersetzers entsprechen muss, wird die in [2], [8] und Abb. 2.6 beschriebene Kühlstrecke genutzt.

Die unterste Linie stellt eine Prüfung mit kontinuierlicher Kühlung der Klimakammer auf  $-40^{\circ}\text{C}$  dar. Durch die Durchmischung des (noch) zu warmen Druckmediums im Prüfmuster mit dem ausreichend vortemperierte Prüfmedium steigt zunächst die Temperatur am Boss. Darauf folgt ein Wendepunkt, der zeigt, dass durch das gekühlte Rohrsystem mehr Wärme abgeführt wird, als durch die Kompression, Strömung mit Reibung und anlagenseitigem Wärmeeintrag erzeugt wird. Die Medientemperatur sinkt bis sich dann das Gesamtsystem in der permanent gekühlten Prüfkammer auf einem Temperaturniveau einpendelt. Wird die Temperaturmesssonde direkt in das fließende Prüfmedium am Boss eingebracht kann dieser Effekt der zyklierenden Flüssigkeitssäule während jedem Zyklus wie in Abb. 2.8 beobachtet werden. Aufgrund der (geringen) kompressionsbedingten Wärmeerzeugung im relativ gut isolierten Prüfmuster und der gekühlten Rohrleitung, geht der Temperaturunterschied auch nach dem Erreichen des Temperaturgleichgewichts des Gesamtsystems nie ganz zurück.



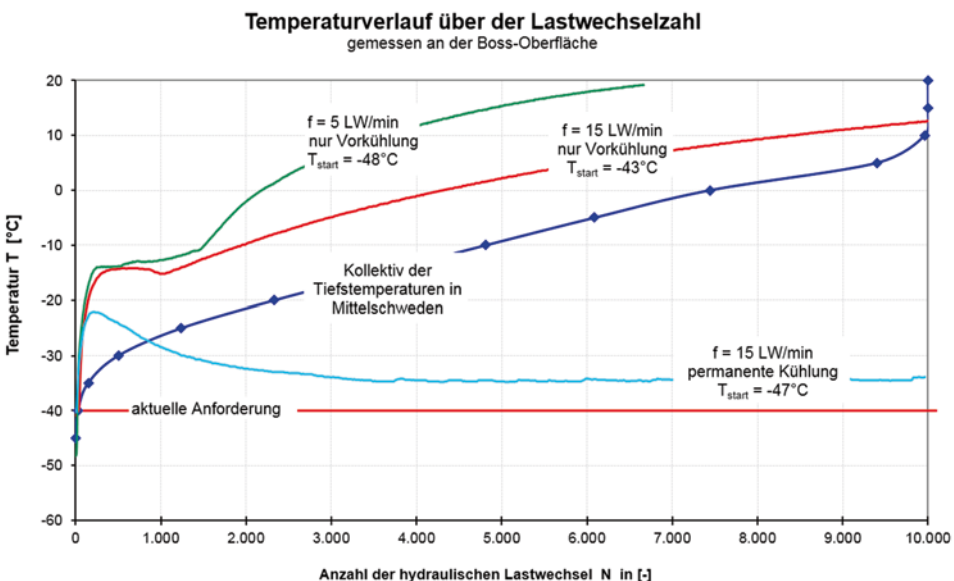


Abb. 2.7 Entwicklung der Temperatur über der Lastwechselzahl

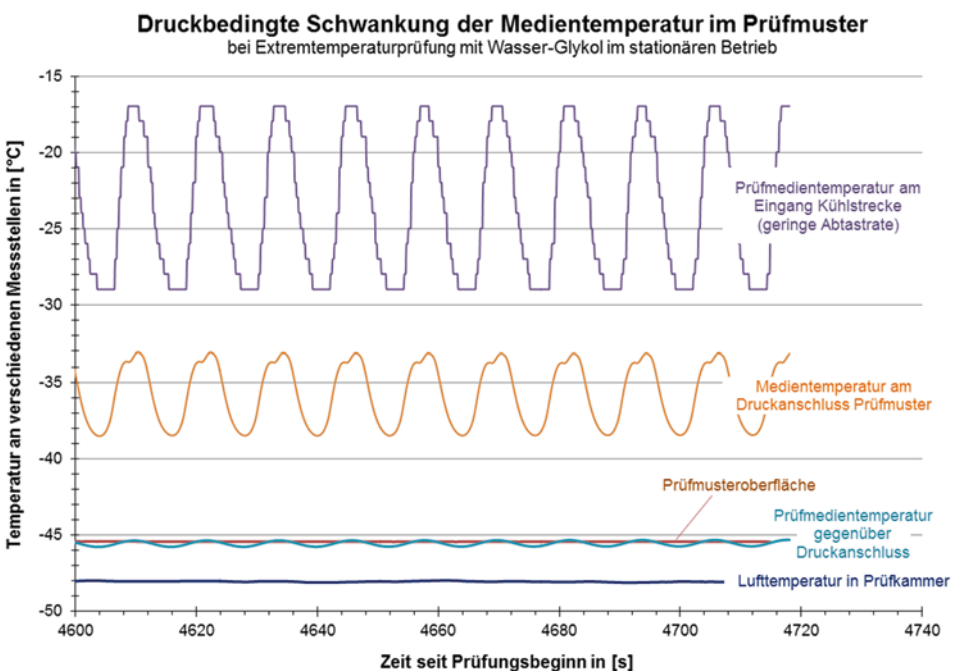
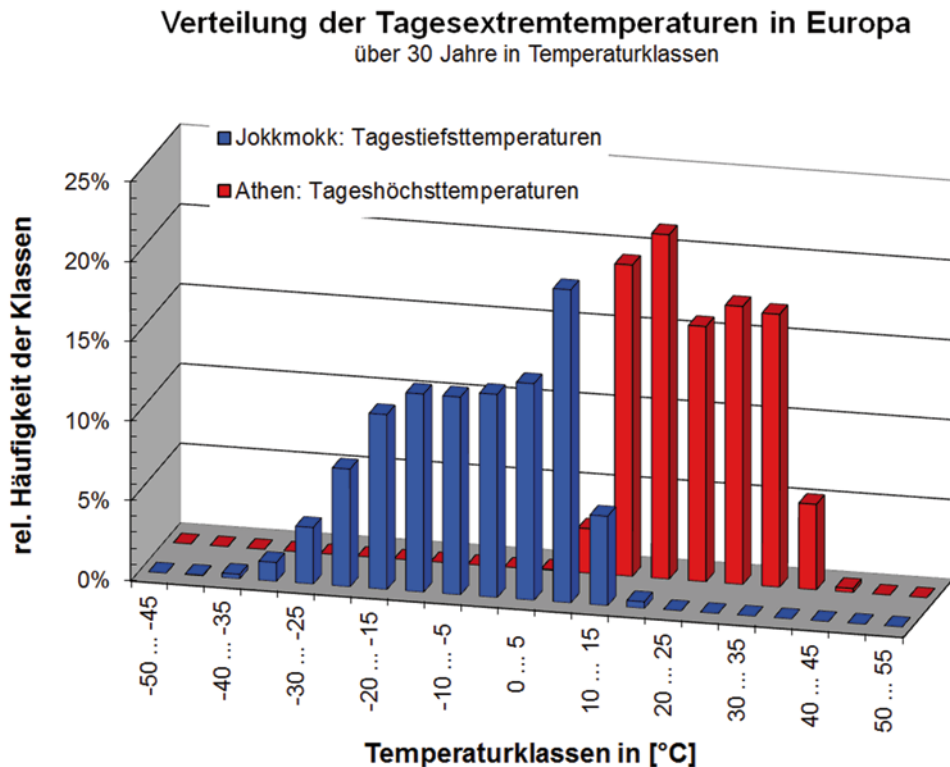


Abb. 2.8 Einfluss der Position des Temperatursensors. (vergl. [9])

Die Abb. 2.7 zeigt darüber hinaus eine Kurve, die auf der statistischen Auswertung einer über 30 Jahre laufenden Wetterstatistik eines Ortes in Mittelschweden (Jokkmokk; s. [10]) basiert. Hierbei ist die Häufigkeitsverteilung der Tiefsttemperaturen auf die 10.000 Zyklen zu 100% angewendet. D. h. eine Temperaturkurve, die dieser Linie entspricht, wäre für die minimal in Europa zu erwartenden Minimaltemperaturen angemessen, die in Abb. 2.9 dargestellt ist.

Um diesen Temperaturverlauf nachzufahren, sind in der oberen Hälfte von Abb. 2.7 zwei verschiedene Prüfungen dargestellt, bei denen die Kühlung der Prüfkammer wie auch des Mediums mit dem Start des Zyklrierens abgeschaltet wurde. Die schneller ansteigende Kurve gehört zu der Zykliergeschwindigkeit von 15 Lastwechseln pro Minute (LW/min). Der Kurve mit dem langsameren Anstieg beschreibt eine Geschwindigkeit von 5 LW/min. Damit ist die Zeit pro LW zwischen beiden Linien mit dem Faktor 3 verknüpft. Über die Zeit kommt aber neben dem Wärmeeintrag in das Prüfmuster durch die Kompression und Reibung des Mediums die allgemeine Erwärmung der Prüfkammer hinzu. Dennoch steigt die langsamere Prüfung nur etwa doppelt so schnell wie die schnellere Prüfung. Das heißt, dass die schnell Prüfung auch eine schnellere Temperaturerhöhung bedeutet. Damit haben die hydraulischen Vorgänge im Prüfmuster und dem Prüfmuster-



**Abb. 2.9** Klimatische Unterschiede in Europa: Extremwerte der Temperatur

Sicherheitsbewertung von  
Composite-Druckgasbehältern  
Potential statistischer Methoden jenseits aktueller  
Vorschriften

Mair, G.W.

2016, XIX, 303 S. 180 Abb., 132 Abb. in Farbe.,

Softcover

ISBN: 978-3-662-48131-8