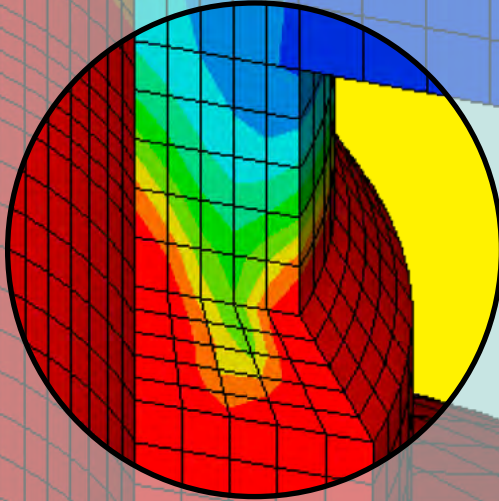




Sebastian Schindler

Zulässigkeitsnachweis im Druckbehälterbau mittels Finite-Elemente-Verfahren

Impressum

**Zulässigkeitsnachweis im Druckbehälterbau
mittels Finite-Elemente-Verfahren**

ISBN 978-3-903255-82-1

Autor: Dipl.-Ing. Dr. techn. Sebastian Schindler, TÜV AUSTRIA GMBH

Medieninhaber: TÜV AUSTRIA AKADEMIE GMBH

Leitung: Mag. (FH) Christian Bayer, Ing. Günter Göttlich

2345 Brunn am Gebirge, TÜV AUSTRIA-Platz 1

+43 5 0454-8000

akademie@tuv.at | www.tuv-akademie.at

Produktionsleitung: Mag. Judith Martiska

Layout: Markus Rothbauer, office@druckwelten.at

& lucdesign, luc@luc.at

Herstellung: druckwelten.at, 1180 Wien



Cover: Markus Rothbauer; Motive: © Sebastian Schindler

© 2026 TÜV AUSTRIA AKADEMIE GMBH

Das Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, insbesondere die Rechte der Verbreitung, der Vervielfältigung, der Übersetzung, des Nachdrucks und der Wiedergabe bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwertung – dem Verlag vorbehalten.

Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Medieninhabers reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Trotz sorgfältiger Prüfung sämtlicher Beiträge in diesem Werk sind Fehler nicht auszuschließen. Die Richtigkeit des Inhalts ist daher ohne Gewähr. Eine Haftung des Herausgebers oder der Autoren ist ausgeschlossen.

Im Sinne einer besseren Lesbarkeit und eines erleichterten Verständnisses verzichten wir in unseren Publikationen auf eine geschlechterspezifische Differenzierung und verwenden für Personenbezeichnungen das generische Maskulinum. Wir verstehen dieses als neutrale grammatikalische Ausdrucksweise, mit der wir ohne jegliche Diskriminierung alle Menschen gleichermaßen ansprechen

Vorwort

Die im Folgenden beschriebenen Verfahren des numerischen (oder auch analytischen, eng. *Design by Analysis*) Zulässigkeitsnachweises bieten die Möglichkeit, Konstruktionen zu untersuchen, die über die Anwendungsgrenzen des üblichen Nachweises nach Formeln (engl. *Design by Formula*) hinausgehen.

Ziel dieses Buches ist es, die Möglichkeiten und auch die korrekte Anwendung dieser Verfahren mit Hilfe der Finite-Elemente-Methode zu zeigen. Dabei soll auch auf die Grundlagen der verschiedenen Verfahren eingegangen werden, da dies in der Praxis zu einem besseren Verständnis führt und die Interpretation der Ergebnisse erleichtert.

Dieses Buch soll als Hilfestellung für den Anwender dienen und kann keinesfalls das Studium des anzuwendenden Regelwerks ersetzen.

Der Autor

Dipl.-Ing. Dr. techn. Sebastian Schindler ist seit 20 Jahren Mitarbeiter des TÜV AUSTRIA im Geschäftsbereich Druckgeräte Team Entwurfsprüfung. Arbeitsschwerpunkte sind Entwurfsprüfung nach Druckgeräterichtlinie und Druckgerätesgesetz, dabei insbesondere auch Finite-Elemente-Analysen im Rahmen dieser Prüfungen. Seit 19 Jahren ist er Vortragender des Seminares Numerische Analyse von Druckgeräten in Kooperation mit CADFEM GmbH.

Inhaltsverzeichnis

Teil I – Grundlagen

1 Einführung	11
2 Methode der Spannungs kategorisierung	13
2.1 Allgemeines	13
2.2 Geltungsbereich	13
2.3 Spannungs kategorien	14
2.4 Spannungs bewertung	17
2.5 Grundlagen für die Bewertung der Spannungen	19
2.5.1 Zugstab	20
2.5.2 Der Biegebalken unter reiner Biegung	21
2.5.3 Bewertung der Sekundärspannungen	23
2.6 Modellbildung	24
2.7 Spannungs linearisierung	24
2.8 Spannungs kategorisierung für einige typische Fälle	27
2.8.1 Rohr unter Zusatzlasten	27
2.8.2 Stützen	28
2.8.3 Ebener Boden	29
2.9 Zusammenfassung	31
3 Analytischer Zulässigkeitsnachweis – Direktes Verfahren	33
3.1 Allgemeines	33
3.1.1 Einwirkungen	35
3.1.2 Charakteristische Werte und charakteristische Funktionen von Einwirkungen	35
3.1.3 Bemessungswerte und Bemessungsfunktionen von Einwirkungen	35
3.1.4 Allgemeines zu den Berechnungsmodellen	36
3.1.5 Strukturspannungen und Strukturdehnungen	36
3.2 Auswertung der Ergebnisse bei Analysen mit idealplastischem Materialgesetz	39
3.3 Mythos Verfestigung	41
3.4 Tragfähigkeitsnachweis (TN)	41
3.4.1 Einleitung	41
3.4.2 Modellbildung	42
3.4.3 Werkstoffgesetz	43
3.4.4 Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen	47
3.4.5 Vorgehensweise	48
3.4.6 Tragfähigkeit einfacher Bauteile	50
3.5 Einspielnachweis (EN)	50
3.5.1 Einleitung	50
3.5.2 Modellbildung	52
3.5.3 Werkstoffgesetz	52

3.5.4	<i>Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen</i>	52
3.5.5	<i>Vorgehensweise</i>	52
3.6	Stabilitätsnachweis	56
3.6.1	<i>Einleitung</i>	56
3.6.2	<i>Modellbildung und Vorgehensweise</i>	56
3.6.3	<i>Teilsicherheitsbeiwerte</i>	60
3.6.4	<i>Verbindliche Regel</i>	61
3.7	Standsicherheitsnachweis (SE)	62
3.8	Kriechnachweise Allgemeines	62
3.8.1	<i>Kriechfestigkeitskennwerte</i>	63
3.8.2	<i>Schweißverbindungen</i>	64
3.9	Kriechfestigkeitsnachweis (KFN)	64
3.9.1	<i>Einleitung</i>	64
3.9.2	<i>Modellbildung</i>	64
3.9.3	<i>Werkstoffgesetz</i>	65
3.9.4	<i>Teilsicherheitsbeiwerte der Einwirkungen</i>	66
3.9.5	<i>Vorgehensweise</i>	66
3.10	Kriechdehnungsnachweis (KDN)	68
3.10.1	<i>Anwendungsregel 1: Lange Kriechperioden (Akkumulationsregel gewichteter Standzeiten)</i>	68
3.10.2	<i>Anwendungsregel 2: Lange unterbrochene Kriechperioden</i>	71
3.10.3	<i>Erläuterungen zur Referenzspannung</i>	72
3.11	Kriechschädigung und zyklische Ermüdung (KEN)	73
3.12	Zusammenfassung	74
4	Ermüdungsnachweis nach EN 13445-3 Kapitel 18	75
4.1	Allgemeines zur Ermüdungslebensdauerberechnung	75
4.2	Modellbildung	76
4.3	Zyklenzählmethoden	77
4.4	Äquivalente Volllastzyklen und kritische Bereiche	78
4.5	Einfluss des Mediums	79
4.6	Spannungsermittlung	80
4.6.1	<i>Ermittlung der Vergleichsspannungsschwingbreite (konstante Hauptspannungsrichtungen)</i>	81
4.6.2	<i>Ermittlung der Vergleichsmittelspannung (konstante Hauptspannungsrichtungen)</i>	83
4.6.3	<i>Vergleichsspannungsschwingbreite und Vergleichsmittelspannung nach Tresca bei veränderlichen Hauptspannungsrichtungen</i>	84
4.6.4	<i>Vergleichsspannungsschwingbreite und Vergleichsmittelspannung nach Mises</i> ..	87
4.6.5	<i>Spannungsschwingbreite direkt zyklisch belasteter Kehlnähte</i>	88
4.7	Korrekturfaktoren	91
4.7.1	<i>Theoretische und effektive Formzahl</i>	91
4.7.2	<i>Temperaturkorrektur</i>	91
4.7.3	<i>Wanddickenkorrektur</i>	92
4.7.4	<i>Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Oberflächenrauheit</i>	93
4.7.5	<i>Berücksichtigung von Spannungen im überelastischen Bereich</i>	93

4.7.6 Berücksichtigung des Mittelspannungseinflusses	94
4.7.7 Zusammenfassung Korrekturfaktoren	98
4.8 Ermüdungskurven geschweißter Bereich	98
4.9 Ermüdungskurven ungeschweißter Bereich	102
4.10 Ermüdungsfestigkeit von Schrauben	104
4.11 Ablauf Ermüdungsanalyse	104

Teil II – Beispiele

5 Einfache Beispiele zur Traglast	109
5.1 Zylinder unter Innendruck	109
5.2 Frei drehbar gelagerte Platte	109
6 Beispiel zur Ermittlung der Strukturspannungen	111
7 Beispiel zur Ermittlung der Dehnungen	115
8 Klöpperboden mit Stützen im Krepfenbereich	117
8.1 Spannungskategorisierung	118
8.2 Direktes Verfahren	120
8.2.1 Tragfähigkeitsnachweis	120
8.2.2 Einspielnachweis	123
8.2.3 Ermüdungsnachweis	128
8.3 Ergebnisbetrachtung	129
9 Ebener Boden mit Entlastungsnut	131
9.1 Spannungskategorisierung	132
9.2 Direktes Verfahren	135
9.2.1 Tragfähigkeitsnachweis	135
9.2.2 Einspielnachweis	139
9.3 Ergebnisbetrachtung	139
10 Sammler eines Luftkühlers	141
10.1 Spannungskategorisierung	142
10.2 Direktes Verfahren	146
10.2.1 Tragfähigkeitsnachweis	146
10.2.2 Einspielnachweis	148
10.3 Ergebnisbetrachtung	150
11 Kriechnachweise an einem T-Stück	151
11.1 Kriechfestigkeitsnachweis	152
11.2 Kriechdehnungsnachweis	157
12 Stabilitätsnachweis eines Klöpperbodens	163
12.1 Erster Lösungsblock: Statisch-mechanische Analyse	163
12.2 Zweiter Lösungsblock: Eigenwert Beulanalyse	165
12.3 Dritter Lösungsblock: Nichtlineare Stabilitätsanalyse – Stabilitätsnachweis	166
13 Beulverhalten und Stabilitätsnachweis einer Kugel	173

14 Beispiel zur Ermittlung der Vergleichsspannungsschwingbreite und Vergleichsmittelspannung	179
14.1 Auswertung mittels Verfahren nach Norm	180
14.2 Auswertung nach Tresca mittels Spannungstensoren	183
14.3 Auswertung nach Mises mittels Spannungstensoren	186
15 Ermüdungsanalyse an einem Stutzen	189
15.1 Auswertung ungeschweißter Bereich	192
15.1.1 <i>Ermittlung der Vergleichsspannungsschwingbreite und der Vergleichsmittelspannung</i>	192
15.1.2 <i>Theoretische und effektive Formzahl</i>	197
15.1.3 <i>Ermittlung der Korrekturfaktoren</i>	200
15.1.4 <i>Ermittlung der zulässigen Zyklenzahl und Zusammenfassung der Ergebnisse</i>	201
15.2 Auswertung geschweißter Bereich	202
15.2.1 <i>Ermittlung der Strukturspannungsschwingbreite</i>	202
15.2.2 <i>Ermittlung der Korrekturfaktoren</i>	207
15.2.3 <i>Ermittlung der zulässigen Zyklenzahl</i>	207
16 Ermüdung, Spannungsauswertung an einer Kehlnaht	211
16.1 Auswertung mittels Koordinatensystem im Kehlnahtschnitt	212
16.2 Auswertung im globalen kartesischen Koordinatensystem	215
16.3 Berechnung der Ermüdungslebensdauer	218
17 Verhalten einer Schraubverbindung	221

Teil III – Anhang

A Erweitertes Zyklenzählverfahren	231
B Invariante des Spannungstensors und Berechnung der Hauptnormalspannungen und Eigenvektoren	235
C Ermüdung auf Basis einer plastischen Berechnung	241
D Berichterstellung	243
E Literaturverzeichnis	244

Teil I – Grundlagen

1 Einführung

Die Auslegung von Druckgeräten, welche in der Europäischen Union in Verkehr gebracht werden sollen, erfolgt grundsätzlich unter den Vorgaben der Druckgeräterichtlinie [1] und unter Anwendung eines Regelwerkes, das die wesentlichen Sicherheitsanforderungen der Druckgeräterichtlinie erfüllt. Bei der Anwendung von nach Druckgeräterichtlinie harmonisierten Normen ist das automatisch gewährleistet, im Falle unbefuerter Druckbehälter ist das die Produktnorm EN 13445 [3].

In der EN 13445 Teil 3 sind sehr umfangreiche Vorschriften für die Berechnung sowohl nach Formeln als auch mittels Finite-Elemente-Verfahren enthalten. Insbesondere der Normative Anhang B in Teil 3 der Norm bietet die Möglichkeit, die Methode der Finiten Elemente mittels neuer beziehungsweise zeitgemäßer Verfahren anzuwenden. Mit der Gewissheit, die Anforderungen der Druckgeräterichtlinie einhalten zu können. Das ist auch der Grund, warum sich dieses Buch hauptsächlich mit der Umsetzung der Vorschriften der EN 13445-3 befasst.

Alle in diesem Buch gemachten Verweise beziehen sich auf die EN 13445-3, Ausgabe 2021-12-15 [3].

Eine Norm ist kein Lehrbuch. Die Berechnungsvorschriften sind darin grundsätzlich beschrieben, aber es sind weder theoretische Hintergründe angeführt, noch werden in der Norm Abgaben über die praktische Anwendung und Umsetzung gemacht oder gar Beispiele angegeben. Genau hier soll dieses Buch ansetzen und dem Leser als Hilfestellung und Leitfaden dienen, wie die korrekte Umsetzung dieser Verfahren zu erfolgen hat. Ein wesentlicher Punkt ist dabei auch das Verständnis der theoretischen Hintergründe zu den Berechnungsverfahren. Denn damit werden Berechnungsschritte und Punkte der Auswertung sehr oft erst klar, und damit auch die Umsetzung logisch und verständlich.

Dieses Buch setzt gewisse Vorkenntnisse in Strukturmechanik und auch in der Anwendung von Finite-Elemente-Verfahren voraus. Es werden bei den Beispielen natürlich spezifische Hinweise bezüglich Modellbildung, Randbedingungen usw. gegeben, aber es handelt sich hier um kein Buch über die allgemeinen Grundlagen zur Finite-Elemente-Berechnung. Hier wird auf die entsprechenden Grundlagenwerke, Vorlesungen und Seminare verwiesen. Für den Anwender bringt es natürlich große Vorteile, die allgemeinen theoretischen Grundlagen der Finite-Elemente-Verfahren zu kennen und zu verstehen, wie auch die fachspezifischen Grundlagen zu den Berechnungsverfahren im Druckbehälterbau, die hier gebracht werden.

Einige allgemeine Punkte vorweg, die bei der Berechnung im Druckgerätebau grundsätzlich wichtig sind und als Voraussetzung für die Auslegung von Druckbehältern betrachtet werden müssen:

- ✓ Werkstoffe sind immer nach den Vorschriften der harmonisierten Werkstoff-Normen und den Angaben in der jeweiligen Produktnorm zu wählen. Siehe dazu die Vorgaben in:
 - EN 13445-2: 2021, Unbefeuerte Druckbehälter – Teil 2: Werkstoffe (Stahl)
 - EN 13445-6: 2021, Unbefeuerte Druckbehälter – Teil 6: Anforderungen an die Konstruktion und Herstellung von Druckbehältern und Druckbehälterteilen aus Gusseisen mit Kugelgraphit
 - EN 13445-8: 2021, Unbefeuerte Druckbehälter – Teil 8: Zusätzliche Anforderungen an Druckbehälter aus Aluminium und Aluminiumlegierungen
 - EN 13445-10: 2021, Unbefeuerte Druckbehälter – Teil 10: Zusätzliche Anforderungen an Druckbehälter aus Nickel und Nickellegierungen
- ✓ Werkstoffe nach einer Europäischen Werkstoffeinzelzulassung oder mittels Werkstoffeinzelgutachten müssen natürlich auch den Anforderungen der Produktnorm entsprechen.
- ✓ Für Festigkeitskennwerte sind immer die spezifizierten Mindestwerte der Normen zu verwenden. Gemessene Festigkeitskennwerte (z. B. aus Werkstoffzeugnissen) dürfen nicht verwendet werden! Siehe dazu auch die Leitlinie G-24 zur Druckgeräterichtlinie [2].
- ✓ Das gewählte Regelwerk ist immer geschlossen anzuwenden. Mischen von Regelwerken („*cherry picking*“) ist nicht zulässig. Der strukturmechanische Nachweis, kurz die Auslegung eines Druckbehälters, ist immer im Zusammenhang mit den Vorgaben des angewendeten Regelwerkes bezüglich zerstörungsfreier Werkstoffprüfung (Prüfverfahren, Prüfumfang ...), den Werkstoffen (siehe oben) und Anforderung an die Herstellung wie Wärmenachbehandlung zu sehen.

2 Methode der Spannungskategorisierung

2.1 Allgemeines

Als in den späten 1950er Jahren begonnen wurde, die Methode der Finiten Elemente mathematisch zu formulieren und für die Anwendung auf den ersten Computern zu entwickeln, war man auf Grund der verfügbaren Rechenleistung im Wesentlichen auf die Verwendung von Schalen- und Balkenmodellen und rein linearelastischen Analysen angewiesen. Die Regeln wurden somit dahingehend entwickelt, dass mit Hilfe einer elastischen Berechnung eines Schalentragswerks (= Druckbehälter) die Zulässigkeit gegen verschiedene Versagensmechanismen nachgewiesen werden kann.

Die Versagensmechanismen, die durch die Methode der Spannungskategorisierung abgedeckt werden, sind: globale plastische Deformation (= zähes Bruchversagen) und fortschreitende plastische Deformation beziehungsweise alternierende Plastizität. Diese Versagensmechanismen werden durch unterschiedliche Spannungskategorien hervorgerufen. Ein wesentlicher Schritt bei dieser Methode ist somit die korrekte Einteilung der auftretenden Spannungen in die richtigen Kategorien. Ermüdungslebensdauerberechnungen und Stabilitätsberechnungen müssen gesondert beziehungsweise zusätzlich durchgeführt werden.

Das Versagen durch Sprödbbruch wird von diesem Verfahren (und allen weiteren im Folgenden beschriebenen Methoden) nicht abgedeckt. Im Druckbehälterbau wird dies durch die Beschränkung auf entsprechend duktile Werkstoffe (Stähle mit Bruchdehnung $\geq 14\%$ und Kerbschlagarbeit $\geq 27\text{ J}$ laut Druckgeräterichtlinie), und entsprechende Anforderungen an die Schweißnähte hinsichtlich Konstruktion, Herstellung (Verfahrensprüfungen, Arbeitsproben ...) und zerstörungsfreie Prüfungen sichergestellt. So kann Sprödbbruch von vornherein ausgeschlossen werden.

2.2 Geltungsbereich

Der Geltungsbereich von Berechnungsverfahren ist ein wichtiger Punkt, den es nicht zu übersehen gilt. Er ist immer im Vorfeld zu prüfen und vom jeweils angewendeten Regelwerk anhängig.

- ✓ Die Methode der Spannungskategorisierung kann angewendet werden, wenn das Regelwerk keine zutreffenden Formeln zur Berechnung enthält, oder als Alternative zur Auslegung nach Bemessungsformeln. Dies ist vom jeweiligen Regelwerk abhängig, siehe z. B. AD 2000-Merkblatt B0 [4], Abschnitt 2.2 und EN 13445-3 [3] Anhang C.1.
- ✓ Die Kriterien der Spannungsbewertung gelten für Bauteile, soweit sich diese als Flächentragwerke (Scheiben, Platten, Schalen) oder als räumliche Stabwerke darstellen lassen¹.
- ✓ Die Feststellungen gelten für die im Druckbehälterbau zugelassenen Stähle. Die Regeln und Spannungsbegrenzungen dieser Methode beruhen auf der ausreichenden Duktilität des Werkstoffes (ausreichende Bruchdehnung, kein sprödes Verhalten), um lokales plastisches Verhalten und den Abbau von lokalen Spannungsspitzen durch plastische Deformation zulassen zu können.
- ✓ Beanspruchungszustand aufgrund eines linearelastischen Spannungs-Dehnungszustandes (= linearelastische Berechnung).
- ✓ Für Behälter, die nach diesem Verfahren ausgelegt werden, sind die Vorgaben des jeweiligen Regelwerkes bezüglich Prüfumfang und Schweißnahtwertigkeit zu beachten.
- ✓ Grundsätzlich wurde die Methode der Spannungskategorisierung für Bauteiltemperaturen im Bereich zeitunabhängiger Festigkeitskennwerte entwickelt. Befindet sich die Bauteiltemperatur im Bereich zeitabhängiger Festigkeitskennwerte (Kriechbereich), sind, sofern möglich und vorhanden, zusätzliche Anforderungen des jeweiligen Regelwerkes zu berücksichtigen.

2.3 Spannungskategorien

Die Spannungen sind abhängig von ihrer erzeugenden Ursache und ihrer Auswirkung auf das Festigkeitsverhalten des Bauteils in primäre Spannungen P , sekundäre Spannungen Q und Spannungsspitzen F einzuteilen und gemäß ihrer Zuordnung in unterschiedlicher Weise zu begrenzen.

In den Regelwerken sind Tabellen angegeben, in denen für die häufigsten Geometrien und Belastungen die Zuordnung in die entsprechende Spannungskategorie angegeben ist. Diese Tabellen sind jedoch nicht immer eindeutig und vollständig, da es nicht möglich ist, diese Methode mit einigen wenigen, allgemein gültigen Beispielen zu beschreiben. Man sollte sich deshalb nicht blind auf die Angaben in diesen Tabellen verlassen, sondern diese nur als Hilfestellung betrachten und immer auch die Definitionen der unterschiedlichen Spannungskategorien zur Einstufung heranziehen.

¹ Aus diesem Grund ist bei Volumenmodellen die Linearisierung der Spannungen über den betrachteten Querschnitt erforderlich.