



# Befüllung und Entleerung von Typ-IV-Behältern mit Wasserstoff

**Haftungsausschluss:** Diese Veröffentlichung entspricht dem Stand des technischen Wissens zum Zeitpunkt der Herausgabe.

Der Verwender muss die Anwendbarkeit auf seinen speziellen Fall und die Aktualität der ihm vorliegenden Fassung in eigener Verantwortung prüfen.

Eine Haftung des IGV und derjenigen, die an der Ausarbeitung beteiligt waren, ist ausgeschlossen.

© Der IGV genehmigt hiermit die Vervielfältigung dieses Dokuments, vorausgesetzt, der Verband wird als Quelle angegeben.

## Inhaltsverzeichnis

|   |   |
|---|---|
| 1. Einleitung.....  | 3 |
| 2. Grundlagen zu Wasserstoff und Typ-IV-Behälter .....            | 3 |
| 3. Physikalische Effekte und thermodynamische Zusammenhänge ..... | 3 |
| 3.1 Joule-Thomson-Effekt .....                                    | 3 |
| 3.2 Kompression und Expansion .....                               | 3 |
| 3.3 Druck- und Temperaturverhältnisse.....                        | 5 |
| 3.4 Wärmeübergänge.....   | 5 |
| 3.5 Temperaturmessung .....                                       | 6 |
| 4. Anwendung: Befüllung und Entleerung .....                      | 6 |
| 4.1 Befüllung .....   | 6 |
| 4.2 Entleerung .....  | 7 |
| 5. Empfehlungen für die Praxis .....                              | 8 |
| 6. Fazit.....   | 8 |

## 1. Einleitung

Wasserstoff etabliert sich zunehmend als nachhaltiger Energieträger sowohl im Mobilitäts- als auch im Infrastruktursektor.

Die sichere und effiziente Befüllung sowie Entnahme von Wasserstoff aus Druckspeichern – insbesondere Composite-Hochdruck-Speichersystemen (CHSS) aus Typ-IV-Behältern – erfordert ein grundlegendes Verständnis physikalischer Effekte.

Ziel dieses Merkblatts ist es, grundlegende thermodynamische Zusammenhänge praxisnah zu erklären, typische Temperatur- und Druckeffekte zu veranschaulichen und Hinweise für die sichere Handhabung zu geben.

## 2. Grundlagen zu Wasserstoff und Typ-IV-Behälter

Wasserstoff weist als kleinstes Molekül besondere physikalische Eigenschaften auf:

- Geringe Dichte
- Hohe spezifische Wärmekapazität → nimmt viel Wärme bezogen auf die Masse
- Realgasverhalten muss bei Hochdruckanwendungen berücksichtigt werden (typische Drücke: 20 bar bis zu 1.000 bar bei der Befüllung und Entleerung von CHSS)
- Negativer Joule-Thomson-Effekt bei Umgebungstemperatur

Typ-IV-Behälter bestehen aus einem gasdichten Thermoplast-Liner, umhüllt von einer hochfesten, faserverstärkten Struktur (z. B. CFK). Diese Struktur weist eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit auf, was zu verzögerten Wärmeübergängen und ausgeprägten Temperaturgradienten führt.

## 3. Physikalische Effekte und thermodynamische Zusammenhänge

### 3.1 Joule-Thomson-Effekt

Wasserstoff zeigt bei Raumtemperatur einen leicht negativen Joule-Thomson-Koeffizienten. Das bedeutet: Bei Drosselung (z. B. durch eine Engstelle oder Regelventil) kann es zu einer geringen Erwärmung kommen (ca. 10 K bei einem Druckabfall von 300 bar auf 100 bar) – im Gegensatz zu Stickstoff, der sich deutlich abkühlt. In der Praxis wird dieser Effekt jedoch häufig von anderen Prozessen überlagert.

### 3.2 Kompression und Expansion

- **Kompression:** Wenn Wasserstoff unter hohem Druck in ein geschlossenes Volumen wie einen Speicher gedrückt wird, erwärmt er sich stark. Da Typ-IV-Behälter Wärme nur langsam abgeben, bleibt die Temperatur im Behälter bei einer Befüllung hoch.
- **Expansion:** Bei der schnellen Entnahme von Gas aus einem Druckbehälter kommt es zu zur Abkühlung, da das Gas expandiert und dabei Arbeit verrichtet, ohne dass ausreichend Wärme aus der Umgebung nachströmen kann.

Abbildung 1 veranschaulicht die thermodynamischen Prozesse während der Befüllung und Entleerung eines Wasserstoffdruckspeichers.

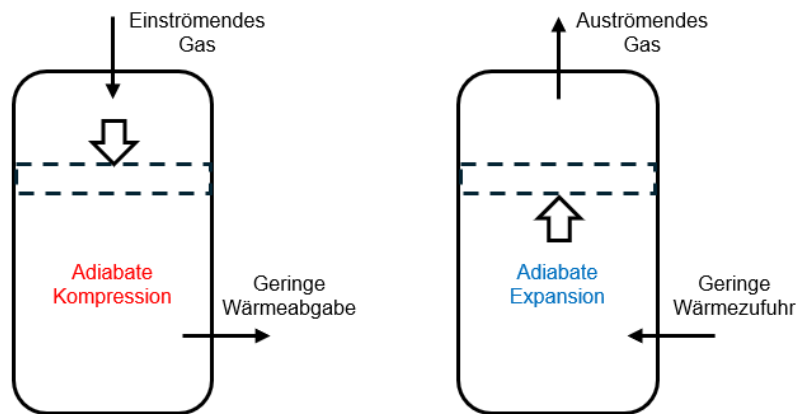


Abbildung 1: Adiabate Kompression bzw. Expansion schematisch für einen Typ IV Behälter

Laufen beide Vorgänge sehr schnell ab, dann können sie näherungsweise als adiabate Kompression und Expansion beschrieben werden, bei denen die Temperaturänderung in Abhängigkeit vom Druckverhältnis und dem Isentropenexponenten  $\kappa$  (für Wasserstoff ca. 1,41) für ein ideales Gas wie folgt berechnet werden kann:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

Dabei ist:

- T1: Anfangstemperatur in [K]
- T2: Endtemperatur nach der Kompression bzw. Expansion in [K]
- p1 und p2: Anfangs- und Enddruck in [bar a]

In der folgenden Abbildung 2 sind die gemäß dieser Formel resultierenden Temperaturänderungen in Abhängigkeit vom Druckverhältnis grafisch dargestellt.

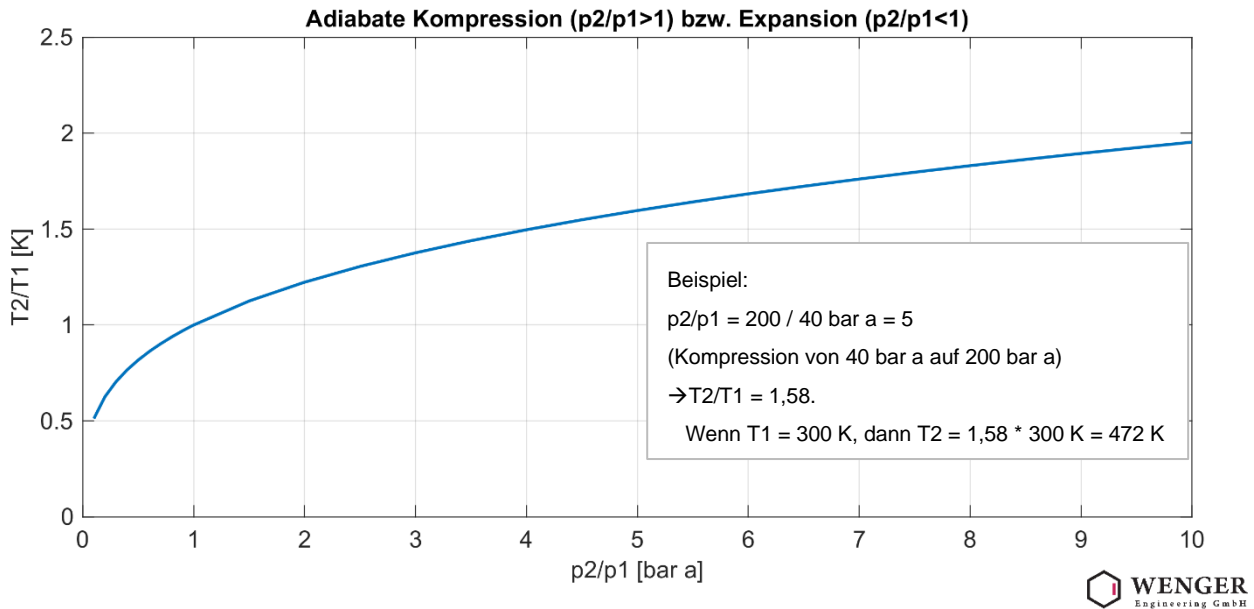


Abbildung 2: Adiabate Temperaturänderung für ein ideales Gas ( $\kappa \approx 1,41$  für Wasserstoff)

### 3.3 Druck- und Temperaturverhältnisse

- Der Druckanstieg im Speicher erfolgt typischerweise in einer Rampe – je schneller, desto stärker die Temperaturspitze, da die Wärmeabfuhr durch die Behälterwand nur langsam erfolgt.
- Die Temperaturentwicklung ist stark abhängig von der Füllrate, der Wasserstoffeintrittstemperatur in den Speicher, der Ausgangstemperatur im Speicher und der Wärmeaustauschrate mit der Umgebung.
- Die Temperaturverteilung innerhalb des Speichers ist dabei räumlich stark inhomogen. Diese Gradienten entstehen aufgrund ungleichmäßiger Strömungsverteilung und begrenzter Wärmeleitung in der Typ-IV-Behälterwand.

### 3.4 Wärmeübergänge

- Composite-Wände haben eine geringe Wärmeleitfähigkeit.
- Der Wärmeübergang vom Gas an die Behälterwand erfolgt über Konvektion und hängt stark von den Strömungsgeschwindigkeiten im Behälter ab.
- Insgesamt ist der Wärmestrom an die Umgebung träge, insbesondere bei kurzer Fülldauer.

### 3.5 Temperaturmessung

Zur Kontrolle des Befüll- bzw. Entleerungsvorganges sollte die Gastemperatur im Behälter bzw. in der Leitung vor dem Behälter ermittelt werden.

- Geeignet:  
Temperaturmessung mittels im Ventilkopf eingeschraubtem Temperaturmessfühler (lange Ausführung)
- Ungünstig:  
Außensensorik an der Wand, da Verzögerung durch geringe Wärmeleitfähigkeit der Behältermaterialien

## 4. Anwendung: Befüllung und Entleerung

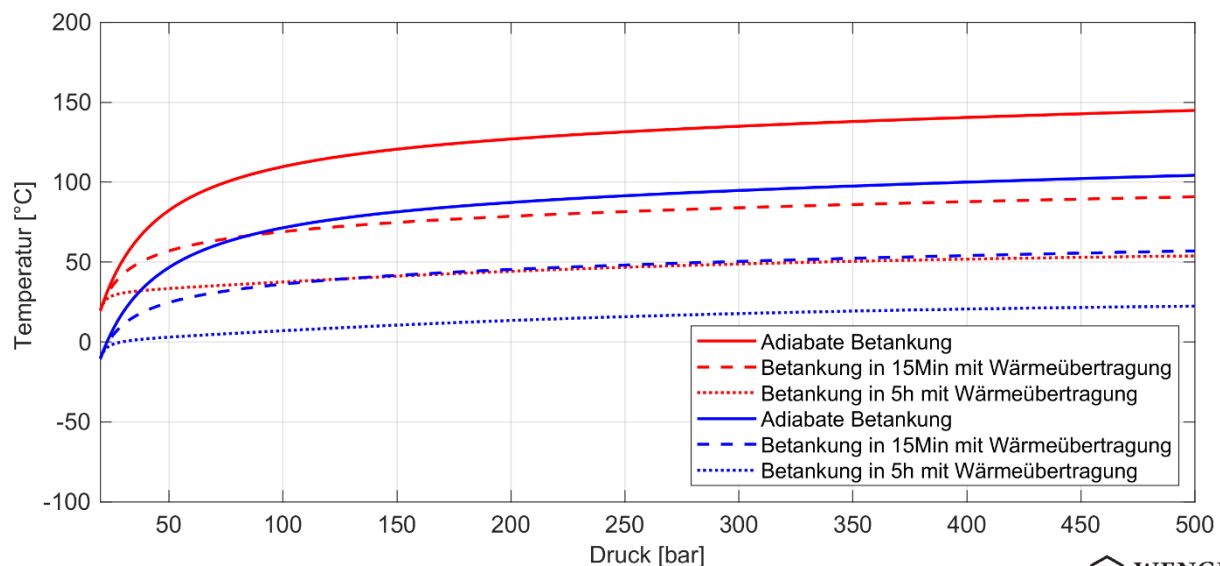
### 4.1 Befüllung

**In der Leitung:** Bei konstanter Rohreintrittstemperatur wird Wasserstoff durch Drosselung (JT-Effekt) leicht erwärmt. Dieses bereits vorgewärmte Gas gelangt in den Typ-IV-Behälter.

**Im Typ-IV-Behälter:** Dort erfolgt eine weitere Erwärmung durch Kompression. Die Temperatur kann stark ansteigen, wenn keine ausreichende Wärmeabfuhr erfolgt.

Kritische Temperaturen lassen sich vermeiden durch:

- Vorkühlung des einströmenden Gases
- Reduzierte Füllgeschwindigkeit (mehr Zeit für Wärmeabgabe)



**WENGER**  
Engineering GmbH

Abbildung 3: Zunahme der durchschnittlichen Behältergastemperatur bei unterschiedlichen langen Befüllungen eines Typ IV Behälters von 20 bar auf 500 bar mit unterschiedlichen Wasserstoffeintritts- und Behälterstarttemperaturen (blau: -10°C, rot: 20°C)

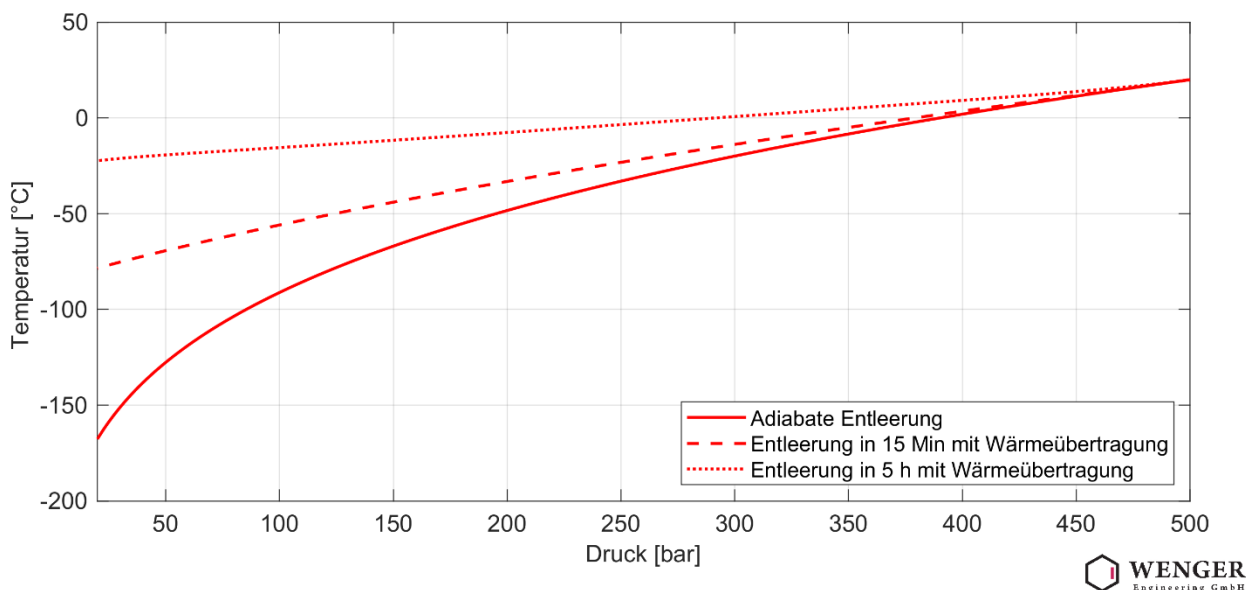
## 4.2 Entleerung

**Im Typ IV-Behälter:** Bei schneller Entnahme wird dem Gas Energie entzogen, es kühlt sich deutlich ab. Die Wand des Behälters kann diese Abkühlung aufgrund des geringen Wärmedurchgangs nur langsam kompensieren – das Innere bleibt lange kalt.

**In der Leitung:** Das kalte Gas aus dem Typ-IV-Behälter strömt durch die Leitung. Der dort eventuell eintretende Joule-Thomson-Effekt kann das Gas nur minimal erwärmen, was kaum ins Gewicht fällt. Das Ergebnis bei zu schneller Entnahme sind häufig Vereisungen an Ventilen und Auslassleitungen.

Gegenmaßnahmen:

- Entleerungsgeschwindigkeit begrenzen
- Leitung ggf. beheizen oder isolieren



 WENGER  
Engineering GmbH

Abbildung 4: Abnahme der durchschnittlichen Behältergastemperatur bei unterschiedlichen langen Entleerungen eines Typ IV Behälters ausgehend bei 20°C von 500 bar auf 20 bar

## 5. Empfehlungen für die Praxis

- Füll- und Entleergeschwindigkeiten regulieren, um Überhitzung bzw. Unterkühlung zu vermeiden
- Druck-Temperatur-Tabellen verwenden, um Überfüllung zu vermeiden
- Temperaturmessung im Gasstrom, nicht nur an der Außenwand
- Bei CHSS-Auslegung: Wärmeleitfähigkeit, Masse und Speichervolumen der Typ-IV-Behälter beachten

## 6. Fazit

Die thermodynamischen Prozesse beim Umgang mit Wasserstoffdruckspeichern sind komplexer als bei vielen anderen technischen Gasen insbesondere wegen der verwendeten Composite-Behälter mit ihrer im Vergleich zu klassischen Stahlbehältern wesentlich geringeren Wärmeleitung.

Bei der Befüllung führt die Kombination aus Joule-Thomson-Erwärmung in der Zuleitung und Kompressionsarbeit im Behälter zu einem signifikanten Temperaturanstieg, der nur durch Vorkühlung oder langsame Befüllung kontrolliert werden kann.

Bei der Entnahme hingegen kühlt sich das Gas im Behälter deutlich ab und es ist mit gezielten Maßnahmen wie einer regulierten Entnahmegeschwindigkeit darauf zu achten, dass die Gastemperatur nicht zu stark abnimmt.

Durch die Einhaltung von Füll- und Entleerprotokollen lassen sich Überhitzung, Unterkühlung, Materialbeanspruchungen und Sicherheitsrisiken zuverlässig minimieren.

Damit wird ein sicherer und effizienter Betrieb von Wasserstoffanlagen gewährleistet.

Dieses Merkblatt wurde erstellt in Zusammenarbeit mit

**Wenger Engineering GmbH**

Einsteinstraße 55

89077 Ulm, Deutschland

T: +49 731 790 605-0