



Verdichtung und Wasserstoff- transport: Eine technische und wirtschaftliche Analyse

GET H₂ TransHyDE

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt



Finanziert von der
Europäischen Union
NextGenerationEU



Autorinnen und Autoren

Dr. Ann-Christin Fleer – Open Grid Europe GmbH

Maurizio Sciancalepore – Open Grid Europe GmbH

Eva-Maria Spreckelsen – Open Grid Europe GmbH

René Werner Verbücheln – Open Grid Europe GmbH

Disclaimer

Die Erarbeitung des Positionspapiers erfolgte durch eine ausgewählte Autorenschaft aus dem Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE. Die Inhalte der Autorenpublikation wurden unabhängig vom Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt erstellt und spiegeln nicht zwangsläufig die Meinung des gesamten Leitprojekts wider.

Impressum

Wasserstoff-Leitprojekt TransHyDE

cruh21 GmbH

Erste Brunnenstraße 1

20459 Hamburg

Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und
Geothermie IEG

Gulbener Straße 23

03046 Cottbus

Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion

Stiftstraße 34-36

45470 Mülheim an der Ruhr



Inhaltsverzeichnis

	Abbildungsverzeichnis	S. 4
	Tabellenverzeichnis	S. 5
1 	Einleitung und Motivation	S. 6
2 	Wasserstofftransport in Leitungen	S. 7
	2.1 Energietransportkapazität	S. 7
	2.2 Betriebsvolumenstrom	S. 9
	2.3 Strömungsgeschwindigkeit	S. 9
3 	Grundlagen der Maschinentechnik	S. 10
	3.1 Verdichter für den Wasserstofftransport	S. 10
	3.1.1 Dynamische Verdichter	S. 11
	3.1.2 Verdrängerverdichter	S. 12
	3.2 Antriebe	S. 13
4 	Matching der Transportaufgabe mit der Verdichtertechnik	S. 15
	4.1 Eingangsdaten	S. 15
	4.2 Auswahl der Maschinenkonfiguration	S. 17
	4.2.1 Auswahl der Antriebe	S. 18
	4.2.2 Auswahl der Verdichter	S. 18
	4.3 Ergebnisse	S. 19
5 	Strömungsmechanische Rechnungen für Leitungskonfigurationen	S. 20
	5.1 Grundlagen	S. 20
	5.2 Basisrechnungen	S. 21
6 	Zusammenfassung	S. 25
	Literaturverzeichnis	S. 26





Abbildungsverzeichnis

2.1	Verhältnis Energietransportkapazität.	8
2.2	Verhältnis Energietransportkapazität.	9
3.1	Verdichtertypen.	11
4.1	Verdichterstationen im visionären Wasserstoffnetz.	16
4.2	Aufgenommene Leistung.	17
4.3	Spezifische Enthalpiedifferenz.	17
4.4	Verfahren zur Auswahl der Maschinenkonfiguration.	18
4.5	Back-to-Back-Anordnung.	19
5.1	Druckabfall über eine Leitung.	20
5.2	Druckabfall bei Leitungsparallelisierung.	20
5.3	Druckabfall bei Verdichtung.	21
5.4	Druckabfall über eine 1.000 km lange Leitung in SIMONE.	21
5.5	Leitungsloops im SIMONE-Simulationsnetz.	21
5.6	Einsatz von Verdichtern im SIMONE-Simulationsnetz.	21
5.7	Spezifische Transportkosten beim Transport von 5 GW.	23
5.8	Spezifische Transportkosten beim Transport von 10 GW.	23
5.9	Spezifische Kosten beim Transport von 20 GW.	24



Tabellenverzeichnis

2.1	Wichtige physikalische Größen von Wasserstoff und Erdgas.	7
3.1	Vor- und Nachteile Zentrifugalverdichter und Kolbenverdichter.	11
3.2	Vor- und Nachteile Elektromotor und Gasturbine hinsichtlich Wasserstofftransport.	14
4.1	Betrachtete Arbeitspunkte.	16
4.2	Verdichterkonfiguration mit Gasturbinen und Elektromotoren.	19
4.3	Preisindikationen Maschinenkonfigurationen.	19
5.1	Ergebnisse Simulationsrechnung.	22

1

Einleitung und Motivation

Der Transportbedarf für Wasserstoff wird in den nächsten Jahren steigen. Gründe dafür sind der Ausbau von regenerativen Energiequellen und die damit verbundene Erzeugung von Wasserstoff sowie der Import von Wasserstoff als industrieller Rohstoff und Energieträger.

Angesichts des steigenden Transportbedarfs ist der Aufbau einer geeigneten Pipeline-Infrastruktur unerlässlich. Dabei ist es wichtig, die technischen Unterschiede zum Erdgastransport in Pipelines zu berücksichtigen. Besonders die Verdichtung von Wasserstoff stellt eine neue technische Herausforderung dar. Wegen der physikalischen Eigenschaften von Wasserstoff, wie der geringen molaren Masse, gestaltet sich die Verdichtung technisch anspruchsvoller und energetisch aufwendiger.

In diesem Whitepaper werden Konzepte für die Verdichtung von Wasserstoff für den Transport in Pipelines erarbeitet und hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte bewertet. Dazu gehören Aspekte wie Investitions- und Betriebskosten und die Antriebsart. Zusätzlich enthält das Whitepaper eine Übersicht über mögliche Verdichter-Technologien (dynamische Verdichter, Verdrängerverdichter) für Wasserstoff.

Aufbauend auf der technischen und wirtschaftlichen Bewertung werden Empfehlungen für den Einsatz von Verdichter-Technologien passend zu möglichen Transportaufgaben gegeben.

Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in beispielhafte strömungsmechanische Simulationsrechnungen ein, um allgemeingültige Aussagen zum Einsatz von Verdichtern in Wasserstoffnetzen zu treffen. Im Zuge dieser Rechnungen werden Parameter wie Leitungsdurchmesser und transportierte Leistung variiert.

2

Wasserstofftransport in Leitungen

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über physikalische Größen gegeben, die einen großen Einfluss auf den Transport von Wasserstoff in Pipelines haben. Zur Einordnung der Transporteigenschaften werden außerdem die betrachteten physikalischen Größen für Wasserstoff und Erdgas verglichen.

Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die physikalischen Größen, die beim Transport von Wasserstoff eine wesentliche Rolle spielen. Zum Vergleich sind Werte für eine repräsentative Erdgas-Zusammensetzung (norwegisches H-Gas) aufgeführt.

Tabelle 2.1. Wichtige physikalische Größen von Wasserstoff und Erdgas.

Größe	Einheit	Wasserstoff	Norwegisches H-Gas
Molare Masse	g/mol	2,01	18,2
Brennwert	kWh/m ³	3,54	11,6
Wobbe-Index	kWh/m ³	13,4	14,7
Schallgeschwindigkeit ¹	m/s	1.326	388
Kompressibilitätszahl ¹	-	1,03	0,87
Isentropenexponent ¹		1,46	1,33

Wasserstoff ist das erste Element im Periodensystem mit der geringsten molaren Masse aller chemischen Elemente. Mit etwa 2 g/mol beträgt die Masse von Wasserstoff etwa ein Neuntel der Masse von Erdgas. Die molare Masse beeinflusst unter anderem das maximal erreichbare Druckverhältnis bei der Nutzung von Turboverdichtern (siehe Abschnitt 3.1.1). Der volumetrische Energieinhalt von Wasserstoff (Brennwert) ist ebenfalls wesentlich geringer als der von Erdgas – im Fall des oben genannten Beispiels um etwa den Faktor drei.

Welche Auswirkungen diese physikalischen Größen auf wichtige Transporteigenschaften von Wasserstoff haben, wird in den folgenden Abschnitten erläutert. Weitere Informationen finden sich auch in dem Artikel Aktuelle Fragestellungen beim leitungsgebundenen Transport von Wasserstoff [1].

2.1. Energietransportkapazität

Der maximal transportierbare Volumenstrom und somit die Energietransportkapazität einer Rohrleitung kann durch die Berechnung des Druckabfalls entlang der Leitung bestimmt werden. Eine in der Praxis genutzte Formel ist die quadratische Druckabfallsgleichung von Darcy und Weisbach.

¹ Bei 283,15 K (10 °C) und 50 bar

$$p_1^2 - p_2^2 = \lambda \cdot \frac{L}{D_5} \cdot \frac{16}{\pi^2} \cdot \rho_n \cdot \frac{T}{T_n} \cdot p_n \cdot K \cdot Q_n^2 \quad (2.1)$$

Formel 2.1. Quadratische Druckabfallsgleichung [2].

Darin sind:

D: Innendurchmesser

L: Länge

K: Kompressibilitätszahl

p_1 : Anfangsdruck

p_2 : Enddruck

p_n : Druck Normzustand

Q_n : Normvolumenstrom

T: Temperatur

T_n : Temperatur Normzustand

λ : Rohrreibungszahl

ρ_n : Dichte Normzustand

Aus der quadratischen Druckabfallsgleichung lässt sich folgende vereinfachte Formel zur Energietransportkapazität einer Leitung ableiten [3]:

$$\dot{E} \sim C \cdot \frac{W_s}{\sqrt{K}} \quad (2.2)$$

Formel 2.2. Energietransportkapazität Leitung.

Die Energietransportkapazität hängt ab von einer Konstanten C, dem Wobbe-Index W_s und der Kompressibilitätszahl K eines Brenngases. Die Konstante steht für die unveränderlichen Eigenschaften einer Leitung: Länge, Durchmesser, Druckstufe usw. Der Wobbe-Index ist ein Maß für die Austauschbarkeit von Brenngasen. In Formel 2.3 ist er definiert als Quotient aus dem Brennwert und der Wurzel der relativen Dichte eines Brenngases.

$$W_s = \frac{H_{s,N}}{\sqrt{d_N}} \quad (2.3)$$

Formel 2.3. Wobbe-Index.

Die Kompressibilitätszahl ist definiert als Quotient aus dem Realgasfaktor Z im Betriebszustand und dem Realgasfaktor im Normzustand Z_N .

$$K = \frac{Z}{Z_N} \quad (2.4)$$

Formel 2.4. Kompressibilitätszahl.

Der Quotient aus der Energietransportkapazität für Wasserstoff und Erdgas drückt aus, wie groß die relative Veränderung der Transportkapazität ist.

$$\frac{\dot{E}_{H_2}}{\dot{E}_{EG}} = \frac{W_{s,H_2}}{W_{s,EG}} \cdot \sqrt{\frac{K_{EG}}{K_{H_2}}} \quad (2.5)$$

Formel 2.5. Verhältnis Energietransportkapazitäten.

Nach Einsetzen der oben genannten repräsentativen Erdgas-Zusammensetzung ergibt sich das in Abbildung 2.1 dargestellte Bild.

Im Ergebnis zeigt sich, dass das Verhältnis der Energietransportkapazitäten etwa zwischen 80 und 90 Prozent liegt. Je größer der mittlere Leitungsdruck ist, desto kleiner ist das Verhältnis.

Dieses druckabhängige Verhalten lässt sich leicht aus Formel 2.5 ableiten: Der Quotient der Wobbe-Indizes ist konstant. Das Verhältnis der Kompressibilitätszahlen hängt jedoch stark vom Druck ab. Hinzu kommt, dass die Kompressibilitätszahl von Wasserstoff bei hohen Drücken größer, die von Erdgas allerdings kleiner wird. Folglich wird der Quotient der Kompressibilitätszahlen bei steigenden Drücken kleiner.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Transportkapazität von Wasserstoffleitungen trotz des im Vergleich zu Erdgas deutlich geringere Brennwertes von Wasserstoff nicht signifikant abnimmt.

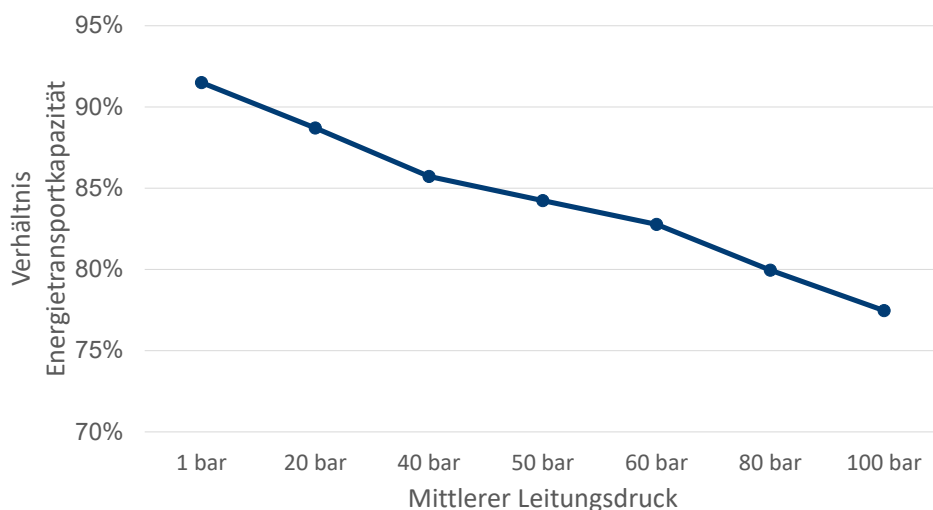


Abbildung 2.1. Verhältnis Energietransportkapazität.

2.2. Betriebsvolumenstrom

Der geringe Brennwert hat allerdings einen großen Einfluss auf den Betriebsvolumenstrom. Die Definition des Betriebsvolumenstroms in Abhängigkeit vom Normvolumenstrom ist in Formel 2.6 gegeben.

$$Q_B = Q_N \cdot \frac{T}{T_N} \cdot \frac{P_N}{P} \cdot K \quad (2.6)$$

Formel 2.6. Betriebsvolumenstrom in Abhängigkeit vom Normvolumenstrom.

Der Normvolumenstrom kann wiederum berechnet werden als Quotient aus der Energietransportkapazität und dem Brennwert.

$$\dot{E} = Q_N \cdot H_S \Leftrightarrow Q_N = \frac{\dot{E}}{H_S} \quad (2.7)$$

Formel 2.7. Normvolumenstrom.

Setzt man die Formel 2.7 in die Definition des Normvolumenstroms ein, ergibt sich die Formel für den Betriebsvolumenstrom in Abhängigkeit von Kapazität und Brennwert.

$$Q_B = \frac{\dot{E}}{H_S} \cdot \frac{T}{T_N} \cdot \frac{P_N}{P} \cdot K \quad (2.8)$$

Formel 2.8. Betriebsvolumenstrom in Abhängigkeit von Kapazität und Brennwert.

Das Verhältnis der Betriebsvolumenströme von Wasserstoff und Erdgas ist in Formel 2.9 definiert. Hierbei wird angenommen, dass die gleiche Leistung in Form von Erdgas und Wasserstoff transportiert werden soll.

$$\frac{Q_{B,H_2}}{Q_{B,EG}} = \frac{H_{S,EG}}{H_{S,H_2}} \cdot \frac{K_{H_2}}{K_{EG}} \quad (2.9)$$

Formel 2.9. Verhältnis Betriebsvolumenströme.

Wird die oben genannte Erdgas-Zusammensetzung verwendet für die Berechnung des Brennwertes und der Kompressibilitätzahl, ergibt sich das Abbildung 2.2 dargestellte Verhältnis der Betriebsvolumenströme bei Wasserstoff- und Erdgastransport.

Beim Transport von Wasserstoff sind die Betriebsvolumenströme zwischen drei- bis viereinhalbmal so groß wie beim Transport von Erdgas. Dies gilt unter der Annahme, dass die gleiche Leistung transportiert werden soll.

2.3. Strömungsgeschwindigkeit

Die erhöhten Betriebsvolumenströme haben unter anderem eine Auswirkung auf die Strömungsgeschwindigkeiten des Gases in der Leitung.

In Formel 2.10 ist die Strömungsgeschwindigkeit eines Gases in einer Leitung definiert. Sie leitet sich her über den Betriebsvolumenstrom Q_B und die Querschnittsfläche A der Leitung.

$$v = \frac{Q_B}{A} \quad (2.10)$$

Formel 2.10. Strömungsgeschwindigkeit.

Bei einer gegebenen Leitung ist die Fläche konstant. Wenn man das Verhältnis der Strömungsgeschwindigkeit bildet, kürzt sich die Variable A daher raus und die folgende Formel bleibt übrig.

$$\frac{v_{H_2}}{v_{EG}} = \frac{Q_{B,H_2}}{Q_{B,EG}} \quad (2.11)$$

Formel 2.11. Verhältnis Strömungsgeschwindigkeiten.

Also ist das Verhältnis der Strömungsgeschwindigkeiten identisch zum Verhältnis der Betriebsvolumenströme. Soll eine auf Wasserstoff umgestellte Leitung dieselbe Transportkapazität aufweisen wie zuvor mit Erdgas, treten drei- bis viereinhalbmal so hohe Strömungsgeschwindigkeiten auf. Diese hohen Geschwindigkeiten können zu einer schnelleren Ermüdung des Materials führen (z. B. durch akustische Effekte wie Schwingungen und Pulsationen). Mit der Wahl von geeigneten Materialien und Einbauteilen kann dieses Risiko jedoch verringert werden.

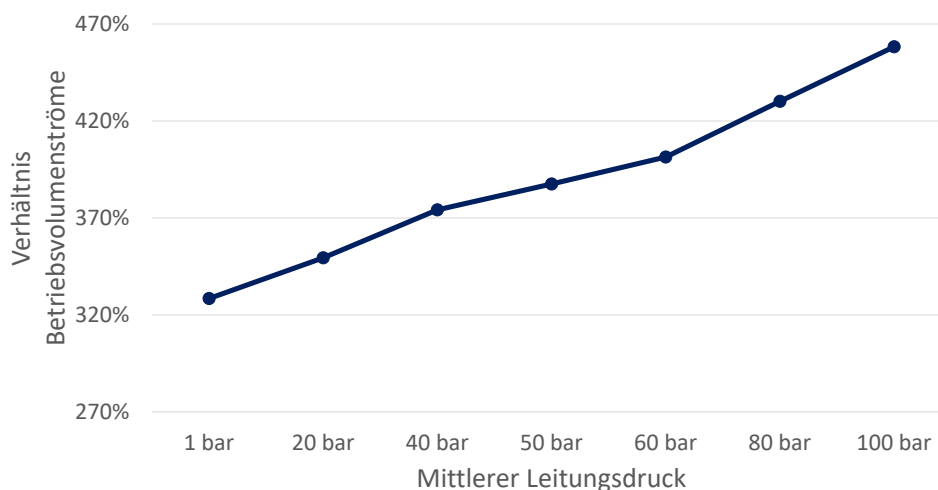


Abbildung 2.2. Verhältnis Energietransportkapazität.

3

Grundlagen der Maschinentechnik

Eine Verdichtereinheit besteht aus einem Verdichter und einem passenden Antrieb. In diesem Kapitel wird erklärt, welche Typen von Verdichtern für den Transport von Wasserstoff in Pipelines geeignet sind und welche Antriebe dazu passen. Für Verdichter und Antriebe werden jeweils die Vor- und Nachteile der möglichen technischen Lösungen diskutiert.

3.1. Verdichter für den Wasserstofftransport

Verdichter haben die Aufgabe, das Druckniveau eines gasförmigen (kompressiblen) Mediums zu erhöhen. In Pipelineanwendungen übernehmen Verdichter dabei mehrere Funktionen:

- Sie kompensieren den Druckverlust, der bei der Durchströmung der Rohrleitung auftritt. Dieser Druckverlust wird maßgeblich von den Eigenschaften der Rohrleitung, dem Medium und dem transportierten Volumenstrom bestimmt (siehe auch Abschnitt 2.1).
- Darüber hinaus dienen Verdichter in einem Pipelinenetz zur Steuerung der auftretenden Gasflüsse: Sie beeinflussen sowohl die Flussrichtung als auch die Flussgeschwindigkeit bzw. die transportierten Volumenströme.
- Zusätzlich können Verdichter auch zur Energiespeicherung eingesetzt werden: Durch die Erhöhung des Drucks in einer Pipeline wird auch die Menge des transportierten Mediums und somit der Energieinhalt erhöht. Solche temporären Druckerhöhungen werden zum Beispiel dafür genutzt, um kurzfristige Spitzenlasten zu kompensieren. Dieser Effekt wird häufig mit dem englischen Begriff „Line Packing“ bezeichnet.

Grundsätzlich lassen sich Verdichter in zwei Haupttypen unterteilen: Verdränger- und dynamische Verdichter (siehe Abbildung 3.1).

Verdrängerverdichter arbeiten, indem sie das Gas in eine oder mehrere Verdichtungskammern ansaugen, deren Einlass anschließend geschlossen wird. Das geometrische Volumen der Kammern nimmt ab, und das Gas darin wird komprimiert. Bei Verdrängerverdichtern hängt das maximal erreichbare Druckverhältnis nicht von der molaren Masse des Gases ab, sondern nur von der Volumenreduzierung.

Dynamische Verdichter hingegen saugen das Gas in ein oder mehrere Verdichtungsaufräder an und beschleunigen es auf eine hohe Geschwindigkeit. Das Gas wird anschließend durch einen Diffusor geleitet, wo die kinetische Energie in statischen Druck umgewandelt wird. In diesem Fall haben die Eigenschaften des verdichteten Gases einen großen Einfluss auf den Verdichtungsprozess (siehe auch Abschnitt 3.1.1). Insbesondere hat die molare Masse einen starken Einfluss auf das maximal erreichbare Druckverhältnis.

Für die Auswahl des geeigneten Verdichtertyps ist entscheidend, welche Druckverhältnisse realisiert und welche maximalen Volumenströme verdichtet werden sollen. Bei großen Volumenströmen und moderaten Druckverhältnissen bieten dynamische Verdichter Vorteile. Bei hohen Druckverhältnissen und moderaten Volumenströmen sind hingegen Verdrängerverdichter in der Regel die bessere Wahl.

Im Fall von Wasserstoff bieten sich für die Initialverdichtung und die Speicherung in der Regel Verdrängerverdichter an. Bei sehr großen Mengen kann auch ein Getriebeturbo eine geeignete Option darstellen. Wegen der großen Volumenströme sind beim Wasserstofftransport in Pipelines vor allem dynamische Verdichter geeignet. In Einzelfällen können Kolbenverdichter

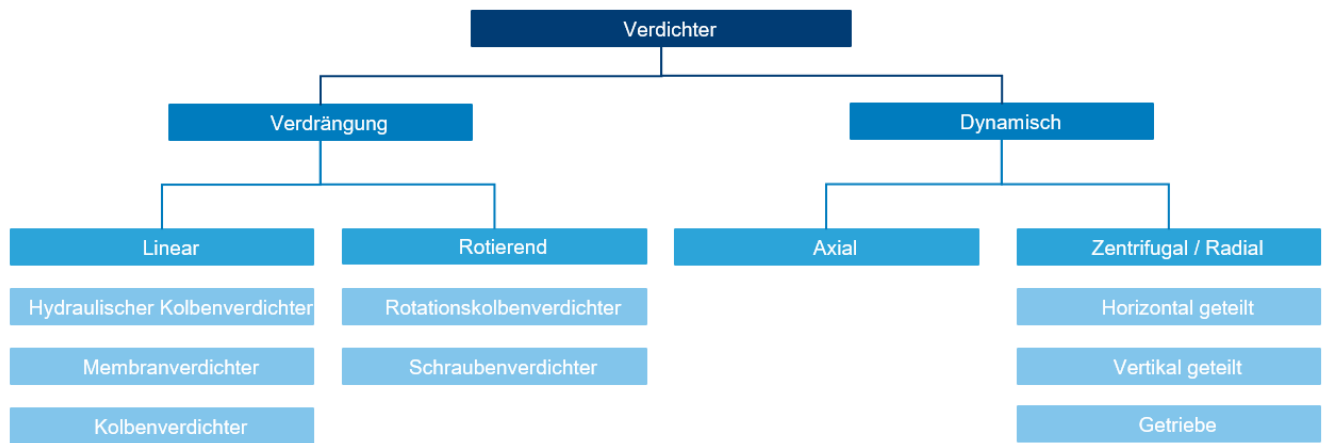


Abbildung 3.1. Verdichtertypen.

eine gute Alternative darstellen.

Die in der Industrie am häufigsten verwendeten Varianten sind Zentrifugalverdichter und Kolbenverdichter. Beide Verdichter finden bereits seit mehr als 100 Jahren Verwendung in unterschiedlichen Anwendungsbereichen wie Pipelinetransport, Chemieindustrie, Düngerherstellung und Petrochemie.

Im Vergleich zu Erdgas erhöhen sich bei der Verdichtung von Wasserstoff die Anforderungen an das Material, die Größe der Maschinen und die Anzahl der Stränge, unabhängig vom Verdichtertypen. Da die Funktionsweisen dynamischer und Verdrängerverdichter unterschiedlich sind, haben sie jeweils eigene technische Herausforderungen. Die Vor- und Nachteile dieser Verdichtertypen in Bezug auf die Verdichtung von Wasserstoff werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

3.1.1. Dynamische Verdichter

Der gebräuchlichste Typ für dynamische Verdichter in Pipeline-Anwendungen ist der Turboverdichter (radialer Verdichter). In Turboverdichtern wird das transportierte Gas erst beschleunigt

(Zuführung von kinetischer Energie) und dann in einem Diffusor abgebremst. Turboverdichter erzeugen den Druck also über die Umwandlung von kinetischer Energie. Die kinetische Energie wiederum ist proportional zur molaren Masse des transportierten Gases und der Geschwindigkeit im Verdichter. Wegen dieses Zusammenhangs spielen die molare Masse eines Gases und die Umfangsgeschwindigkeit eine große Rolle bei der Funktionsweise von Turboverdichtern. Sie haben insbesondere einen Einfluss darauf, welches maximale Druckverhältnis (Verhältnis zwischen Ausgangsdruck und Eingangsdruck) realisiert werden kann.

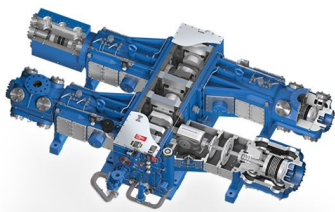
Aus der grundlegenden Thermodynamik geht hervor, dass die spezifische isentrope Enthalpiedifferenz (auch Head oder Förderhöhe genannt) durch die folgende Formel gegeben ist:

$$h = \frac{\kappa}{\kappa - 1} \cdot \frac{R}{M} \cdot Z \cdot T \cdot \left(\pi^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1 \right) \quad (3.1)$$

mit $\kappa = \frac{c_p}{c_v}$

Formel 3.1. Spezifische isentrope Enthalpiedifferenz [4].

Tabelle 3.1. Vor- und Nachteile Zentrifugalverdichter und Kolbenverdichter.

Zentrifugalverdichter		Kolbenverdichter	
 Bildquelle: Siemens Energy		 Bildquelle: Ariel compression	
Vorteile	Nachteile	Vorteile	Nachteile
Großer Volumenstrom	Geringes Druckverhältnis	Hohes Druckverhältnis	Kleiner Volumenstrom
Zeitlich kontinuierliche Verdichtung	-		Zeitlich diskontinuierliche Verdichtung (Vibrationsrisiko)
Geringer Bauraum			Große Maschine
Geringe Leckagen			Leckagen möglich
		Variabler Druckbereich	

Demnach hängt die spezifische isentrope Enthalpiedifferenz h ab vom Isentropenexponenten κ , der molaren Masse M , der Eintrittstemperatur T , der allgemeinen Gaskonstante R , dem Druckverhältnis π und dem Realgasfaktor Z . Im Fall von Wasserstoff beträgt der Realgasfaktor etwa 1 und kann daher vernachlässigt werden.

Bei einer bestimmten Laufrad-Diffusor-Geometrie und einer gegebenen Drehzahl ist die Verdichtungsarbeit relativ unabhängig vom verdichteten Gas. Bei einem Wechsel des Gases ändern sich nur die molare Masse, der Isentropenkoeffizient (geringfügig), der Realgasfaktor und das resultierende Druckverhältnis.

Die folgende Faustformel lässt sich direkt aus der obigen Gleichung ableiten:

$$\pi_{\max} - 1 \sim M \quad (3.2)$$

Formel 3.2. Zusammenhang Verdichtungsverhältnis und molare Masse.

Wie bereits in Kapitel 1 gezeigt, ist die molare Masse von Wasserstoff (2 g/mol) wesentlich geringer als die von Erdgas (etwa 18 g/mol). Wird angenommen, dass die Umfangsgeschwindigkeit konstant ist, bewirkt die geringe molare Masse, dass die maximal realisierbare relative Druckerhöhung bei Wasserstoffverdichtern etwa um Faktor neun geringer ist als bei Erdgasverdichtern. Dies führt dazu, dass man rein hypothetisch für Wasserstoff sieben Erdgasverdichter hintereinanderschalten müsste, um dasselbe Druckverhältnis zu erzielen, das einer dieser Erdgasverdichter für Erdgas erzielt.

Während ein typischer Erdgas-Pipelineverdichter etwa zwei bis vier Stufen umfasst, sind bei Wasserstoffanwendungen theoretisch 14 bis 28 Stufen erforderlich. So viele Stufen aneinanderzureihen ist allerdings aufgrund konstruktiver Beschränkungen praktisch nicht umsetzbar. Die maximale Stufenzahl eines Zentrifugalverdichters liegt realistisch im Bereich von acht bis zehn Stufen.

Die einzige praktische Möglichkeit, mehr kinetische Energie auf das Gas zu übertragen und somit den geringeren Druckaufbau pro Stufe zu kompensieren, besteht darin, die Umfangsgeschwindigkeit der Radiallaufräder deutlich zu erhöhen. Um bei Wasserstoff einen vergleichbaren Druckanstieg pro Verdichterstufe zu erreichen wie bei Erdgas, muss die Umfangsgeschwindigkeit des Laufrades auf ca. 600 bis 800 m/s erhöht werden. Zum Vergleich: übliche Umfangsgeschwindigkeiten bei der Verdichtung von Erdgas liegen in einem Bereich von 200 bis 350 m/s.

Begrenzende Faktoren für die maximal erreichbaren Umfangsgeschwindigkeiten sind die Schallgeschwindigkeit des transportierten Gases und die Materialeigenschaften des Verdichters. Im Fall von Erdgas ist üblicherweise die Schallgeschwindigkeit (etwa 400 m/s) der begrenzende Faktor. Die Schallgeschwindigkeit von Wasserstoff liegt mit etwa 1.320 m/s weit darüber. Daher ist bei der Verdichtung von Wasserstoff nicht die Schallgeschwindigkeit limitierend, sondern es sind die verwendeten Materialien. Um Wasserstoffversprödung auszuschließen, darf eine Streckgrenze von 827 N/mm² nicht überschritten werden (vgl. hierzu auch American Petroleum Institute (API) 617).

Aktuell sind Zentrifugalverdichter am Markt erhältlich, die mit maximal sieben Laufrädern ein Druckverhältnis von bis zu 3 erreichen. Dies entspricht Umfangsgeschwindigkeiten von ca. 500 bis 600 m/s. Zu bemerken ist, dass es bisher nur wenig Referenzen für diese Maschinen gibt.

Um die Umfangsgeschwindigkeit zu erhöhen, kann man entweder Laufräder mit einem größeren Durchmesser verwenden

oder die Drehzahl erhöhen. In der Regel bevorzugen Verdichter-Hersteller aus konstruktiven Gründen die Lösung „kleiner & schneller“ statt „größer & langsamer“.

Bei der Auswahl typischer Wasserstoffverdichter für den Pipelinetransport sind Drehzahlen im Bereich von 10.000 bis 23.000 Umdrehungen pro Minute zu erwarten. Zum Vergleich: Im bestehenden Erdgasnetz liegen die Geschwindigkeiten etwa zwischen 3.000 und 10.000 Umdrehungen pro Minute. Um die hohen Drehzahlen für die Verdichtung von Wasserstoff zu erreichen, reichen herkömmliche Antriebe nicht aus, daher wird ein Zwischengetriebe benötigt. Neben der Tatsache, dass das Getriebe ein weiteres Strangelement darstellt und somit die Komplexität erhöht, beeinflusst es den Gesamtwirkungsgrad (ca. ein bis zwei Prozent Verlust durch Luftverwirbelung und Wärme) und benötigt zusätzlichen Bauraum und Kühlung.

Generell sind bei der Verdichtung von Wasserstoff geringere Gesamtwirkungsgrade zu erwarten als bei der Verdichtung von Erdgas. Dies liegt zum einen an der großen Anzahl der notwendigen Verdichterstufen aufgrund der geringen molaren Masse und zum anderen an den höheren internen Leckagen, die durch die niedrige Viskosität von Wasserstoff verursacht werden. Ohne Anspruch auf Genauigkeit kann ein typischer Gesamtwirkungsgrad am Punkt des besten Wirkungsgrades (auch Spitzenwirkungsgrad genannt) für einen Wasserstoff-Verdichter bei etwa 80 Prozent erwartet werden, während ein Erdgas-Verdichter bei etwa 83 Prozent liegen würde.

3.1.2. Verdrängerverdichter

Bei Verdrängerverdichtern ergeben sich in Hinblick auf Wasserstoff vor allem Herausforderungen durch mögliche Leckagen. Da Wasserstoffmoleküle viel kleiner sind als Erdgasmoleküle, müssen die Dichtungen der Maschinen entsprechend angepasst werden. Darüber hinaus kann Wasserstoff bei Kolbenverdichtern an Kolbenringen vorbei in das Kurbelgehäuse gelangen. Um ein potenziell zündfähiges Gemisch auszuschließen, muss das Kurbelgehäuse selbst oder der Kreuzkopf mit einem Inertgas gespült werden (z.B. Stickstoff).

Eine weitere Herausforderung der Verdichtung von Wasserstoff in Kolbenverdichtern ist die Temperatur am Verdichterausgang. Durch den höheren Isentropenexponenten von Wasserstoff wird die maximal zulässige Ausgangstemperatur früher erreicht.

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} \quad (3.3)$$

Formel 3.3. Ausgangstemperatur.

Wird angenommen, dass Eingangstemperatur, Eingangsdruck und Ausgangsdruck identisch sind, so hat nur der Isentropenexponent Einfluss auf die Temperaturerhöhung, wie Formel 3.3 zeigt. Bei einem Druckverhältnis von 5 ist die Ausgangstemperatur etwa 25 Prozent höher als bei Erdgas. Die höheren Ausgangstemperaturen treten auch bei dynamischen Verdichtern auf, jedoch in Kombination mit wesentlich geringen Druckverhältnissen. Daher ist die Ausgangstemperatur hauptsächlich bei Verdrängerverdichtern eine Herausforderung und weniger bei dynamischen Verdichtern.

Die hohen Strömungsgeschwindigkeiten und die geringe molare Masse von Wasserstoff können negativen Einfluss auf das Pulsationsverhalten des Systems haben. Dies kann zusätzliche Dämpfungselemente (z.B. Druckbehälter) erforderlich machen.

Eine weitere Form von Verdrängern sind Schraubenverdichter. Zwei Schraubenkörper drehen sich relativ zueinander und zum Gehäuse. Um die Bewegung der Schrauben zu ermöglichen, müssen Spalte vorhanden sein. Eine Herausforderung der Schraubenverdichter ist, dass ein Teil des verdichteten Gases aufgrund der Druckdifferenz durch die Spalte zurückströmt. Dies führt zu Effizienzverlusten. Je kleiner die molare Masse und die Viskosität eines Gases ist, desto geringer ist der Widerstand im Spalt, was zu einer größeren Rückströmung führt. Oft werden Schmiermittel wie Öl oder Wasser eingesetzt, um diese Rückströmungen zu reduzieren und gleichzeitig das verdichtete Gas zu kühlen. Diese Methode führt jedoch dazu, dass das Gas verunreinigt werden kann und dann nach der Verdichtung aufgereinigt werden muss.

3.2. Antriebe

Zum Antrieb eines Verdichters wird eine geeignete Antriebsmaschine benötigt. Die Auswahl der Antriebsmaschine richtet sich in der Regel nach der spezifischen industriellen Anwendung des Verdichters. Am häufigsten werden Gasturbinen, Elektromotoren, Dampfturbinen und Expander eingesetzt. Letztere finden insbesondere in der chemischen und petrochemischen Industrie Anwendung, wo Prozesswärme oder ein Überschuss an Druck für eine weitere Nutzung zur Verfügung stehen. Für die Verdichtung von Wasserstoff in Pipelineanwendungen eignen sich Gasturbinen und Elektromotoren.

Elektromotoren sind eine etablierte Technologie, die seit über hundert Jahren in vielen Industriezweigen eingesetzt wird. Sie erfordern ein zuverlässiges und hoch verfügbares Stromnetz und lassen sich über einen breiten Drehzahlbereich mit gutem Wirkungsgrad betreiben. Um die Drehzahl eines Elektromotors zu variieren, ist jedoch ein Frequenzumrichter notwendig. Frequenzumrichter benötigen einen geeigneten Aufstellungsort (safe area und klimatisiert) und müssen gekühlt werden. Abgesehen von der Abwärme emittieren Frequenzumrichter elektromagnetische Strahlungen. Der größte Vorteil von Elektromotoren ist ihr sehr breiter Einsatzbereich bei gleichzeitig gutem bis sehr gutem Wirkungsgrad. Hinzu kommt, dass Elektromotoren selbst keine klimaschädlichen Gase emittieren.

Zu beachten ist, dass auch Elektromotoren, wenn sie weit außerhalb ihres Auslegungspunkts betrieben werden, einen Wirkungsgradabfall aufweisen. Darüber hinaus werden Elektromotoren nicht mit Primärenergie versorgt. Der Gesamtwirkungsgrad des Systems muss also konsequenterweise auf die Stromerzeugung ausgedehnt werden, um Gasturbinen und Elektromotoren miteinander vergleichen zu können. Neben der Stromerzeugung spielen auch Transport und Umspannprozess eine wichtige Rolle.

Gasturbinen zeichnen sich besonders durch ihre hohe Energiedichte und ihre Unabhängigkeit von externen Energiequellen aus. Bei Pipelineanwendungen ist in der Regel das Brenngas direkt in der Pipeline verfügbar. Die für den Betrieb der Gasturbine erforderliche elektrische Energie kann durch kleine Generatoren bereitgestellt werden, sodass die Gasturbine auch ohne ein stabiles elektrisches Netz betrieben werden kann.

Wie bei allen Verbrennungsprozessen bestimmen die Wahl des Brennstoffs und die Verbrennungsbedingungen die Emissionen der Gasturbine. Bei der Verwendung von Kohlenwasserstoffen entstehen Kohlenstoffmonoxid (CO) und Kohlendioxid (CO₂), welche klimawirksame Gase sind. Im Fall der Nutzung von Wasserstoff als Brenngas treten diese Emissionen nicht auf. Allerdings werden bei der Verbrennung mit Luft wegen der hohen

Verbrennungstemperaturen verstärkt Stickoxide (NO_x) gebildet.

Elektromotoren und mit Erdgas betriebene Gasturbinen sind ausgereifte Technologien, die bereits seit Jahrzehnten erfolgreich eingesetzt werden. Die direkte Verbrennung von Wasserstoff in Gasturbinen ist allerdings noch unüblich. Notwendige technische Anpassungen sind bereits identifiziert worden, und es ist zu erwarten, dass für Wasserstoffverbrennung geeignete Gasturbinen in den kommenden Jahren in den Markt eingeführt werden.

Tabelle 3.2 fasst die Vor- und Nachteile der vorgestellten Antriebsarten zusammen. Bei Gasturbinen sind insbesondere die Emissionen – vor allem Schall – entscheidend für die Standortwahl und die Realisierbarkeit. Im Gegensatz dazu hängt der Einsatz von Elektromotoren in erster Linie von der Verfügbarkeit einer zuverlässigen Stromversorgung ab, da Elektromotoren keine Schwarzstartfähigkeit besitzen.

Aktuell werden meistens Gasturbinen als Antriebe für Erdgasverdichter eingesetzt. In den letzten Jahren hat jedoch die Nutzung von Elektromotoren als Antrieb zugenommen. Es ist daher nur konsequent und sinnvoll, diesen Trend auch auf ein Wasserstoffnetz zu übertragen.

Die benötigte Verdichterleistung in Abhängigkeit vom Betriebsvolumenstrom und der spezifischen isentropen Enthalpiedifferenz (siehe Formel 12) lässt sich wie folgt berechnen.

$$P_G = h \cdot \frac{1}{\eta_s} \cdot \rho \cdot Q_B \quad (3.4)$$

Formel 3.4. An das Gas übertragene Leistung [2].

Dabei sind η_s der isentrope Wirkungsgrad unter Berücksichtigung thermodynamischer und aerodynamischer Verluste, ρ die Dichte des Gases im Betriebszustand und Q_B der Betriebsvolumenstrom. Die beiden letztgenannten Parameter beziehen sich auf die Bedingungen am Eingang des Verdichters.

Der Wirkungsgrad kann bei der Vorauswahl auf der Grundlage experimenteller Korrelationen oder früher ausgeführter Maschinen geschätzt werden. Die Maschinenhersteller ermitteln ihn jedoch in der Regel durch eine Prüfstandsmessung der tatsächlich erforderlichen Verdichtungsarbeit im Vergleich zur idealen Verdichtungsarbeit (d. h. ohne Wärmeaustausch und ohne Verluste) bei gleichem Druckverhältnis.

Formel 3.5 zeigt, dass die aufzubringende Verdichterantriebsleistung P_K (Kupplungsleistung) sich als Produkt aus P_G und dem Kehrwehrt des mechanischen Wirkungsgrads (Berücksichtigung von Lager- und Dichtungsverlusten) ergibt.

$$P_K = P_G \cdot \frac{1}{\eta_m} \quad (3.5)$$

Formel 3.5. Verdichterantriebsleistung.

Der mechanische Wirkungsgrad hängt von der Konstruktion des Verdichters ab und ist unabhängig vom transportierten Gas. Typischerweise liegt er bei Pipeline-Verdichtern im Bereich von 95 bis 98 Prozent.

Wird unterstellt, dass der Betriebsvolumenstrom gleich ist, ergeben sich keine großen Unterschiede bezüglich der Antriebsleistung bei der Verdichtung von Wasserstoff oder Erdgas. Wird dagegen die Verdichtung von Wasserstoff und Erdgas bei gleicher transportierter Leistung verglichen, steigt die aufzubringende Verdichterantriebsleistung signifikant an. In diesem Fall sind die zu verdichtenden Betriebsvolumenströme und somit die

Tabelle 3.2. Vor- und Nachteile Elektromotor und Gasturbine hinsichtlich Wasserstofftransport.

Elektromotor		Gasturbine	
 Bildquelle: Siemens		 Bildquelle: Baker Hughes	
Vorteile	Nachteile	Vorteile	Nachteile
	Abhängigkeit von ausreichender Stromversorgung	Nutzung von H ₂ direkt als Antriebsenergie, schwarzstartfähig	
Günstig			Teuer
Ausgereifte Technik			Weiterentwicklung notwendig
Hohe Wirkungsgrade			Geringe Wirkungsgrade
Keine direkte Emission von klimaschädlichen Gasen			Emission von Stickoxiden und Schall
Hohe Zuverlässigkeit			Risiken beim Start und Stopp der Maschine
Wartungsarm			Wartungsintensiv
Breites Leistungsspektrum		Hohe Leistungsdichte	
	Oberschwingungen der Frequenzumrichter belasten das Stromnetz		

aufzubringende Antriebsleistung bei der Verdichtung von Wasserstoff drei- bis viereinhalbmal so groß wie bei der Verdichtung von Erdgas (siehe auch Abschnitt 2.2).

Hinzu kommt, dass die Nutzung von umgestellten Erdgasleitungen in einem Wasserstoffnetz möglicherweise zu einem erhöhten Verdichtungsbedarf führt, da die Leitungsdurchmesser nicht optimal für den Transport von Wasserstoff dimensioniert sind. All diese Faktoren führen zu einer höheren erforderlichen Verdichtungsleistung und damit zu einem höheren Bedarf an größeren oder zusätzlichen Antriebsmaschinen.

4

Matching der Transportaufgabe mit der Verdichtertechnik

In diesem Kapitel werden die wichtigsten Punkte des technischen Auswahlprozesses einer Maschineneinheit (Verdichter und Antrieb) anhand eines Beispiels erläutert.

Die Auswahl der passenden Maschineneinheit ist ein mehrstufiger Prozess:

1. Im ersten Schritt werden Transportszenarien für ein zukünftiges Wasserstoff-Pipelinennetz identifiziert. Die hier ausgewählten Szenarien basieren auf Veröffentlichungen des FNB Gas zum visionären Wasserstoffnetz [5] und auf OGE-internen Erkenntnissen, u.a. aus der Geschäftsentwicklung. Dabei wurden systemrelevante Parameter wie der zukünftige Energiebedarf Deutschlands und Prognosen über den Hochlauf des Wasserstoffmarktes berücksichtigt.
2. Im zweiten Schritt werden aus den definierten Transportszenarien Transportaufgaben und Arbeitspunkte für Verdichter definiert. Dazu werden die zu erwartenden Betriebsbedingungen für den Gastransport an verschiedenen Standorten analysiert.
3. Darauf aufbauend werden im dritten Schritt mögliche Konfigurationen aus Verdichtern und Antrieben bestimmt. Die Maschinenauswahl berücksichtigt folgende technisch-wirtschaftliche Kriterien:
 - Investitionskosten, einschließlich Beschaffung und Ersatzteil-Bevorratung
 - Betriebskosten, einschließlich Energie- und Wartungskosten
 - Betriebsflexibilität
 - Wirkungsgrad der Maschine, d.h. Effizienz

- Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit des Systems
- H₂-Readiness
- technische Komplexität

4.1. Eingangsdaten

Als Grundlage für die Untersuchungen wurden Arbeitspunkte für potenzielle Wasserstoffverdichter definiert (siehe Tabelle 4.1). Als Arbeitspunkt wird die Kombination aus Eingangsdruck vor der Verdichtung, gewünschtem Ausgangsdruck nach der Verdichtung und gleichzeitig auftretendem Volumenstrom bezeichnet.

Die in Tabelle 4.1 genannten Arbeitspunkte sind anhand zweier Kriterien durchnummeriert: betrachtete Verdichterstation und Transportfall. Beispielsweise gelten die Fälle 3-1 bis 3-5 für dieselbe Verdichterstation unter Berücksichtigung vier verschiedener Transportfälle.

Ursprung der in Tabelle 4.1 genannten Arbeitspunkte ist eine strömungsmechanische Rechnung für das Ende 2021 vom FNB Gas veröffentlichten visionären Wasserstoffnetz. Beim visionären Wasserstoffnetz handelt es sich um einen Entwurf der deutschen Fernleitungsnetzbetreiber für ein mögliches Wasserstoffnetz im Jahr 2050.

Im visionären Wasserstoffnetz wurden an einigen Stellen Verdichterstationen eingeplant. Die Positionen der Verdichterstationen sind in Abbildung 4.1 eingezeichnet. Für die weitere Betrachtung wurde eine Auswahl der Verdichterstationen getroffen: Um eine möglichst große Varianz abzubilden, wurden nur die Verdichterstationen mit großen Unterschieden bei den Arbeitspunkten ausgewählt.

Tabelle 4.1. Betrachtete Arbeitspunkte.

Arbeitspunkt	Normvolumenstrom in 1.000 m ³ /h	P _{in} in bar _g	P _{out} in bar _g	Verdichtungsverhältnis
1-1	3.099,2	26,4	32,5	1,2
1-2	4.409,5	38,4	44,5	1,2
1-3	1.666,5	62,0	71,5	1,2
1-4	1.494,3	20,6	30,0	1,5
2-1	1.605,0	40,0	75,0	1,9
2-2	1.976,1	40,0	70,3	1,8
3-1	1.221,0	40,0	45,2	1,1
3-2	508,1	40,0	64,7	1,6
3-3	693,8	40,0	53,1	1,3
3-4	740,7	40,0	64,7	1,6
3-5	1.411,5	40,0	55,5	1,4
4-1	980,0	40,0	56,0	1,4
4-2	2.775,3	40,0	53,0	1,3
4-3	2.962,7	40,0	60,5	1,5
4-4	5.646,0	40,0	54,5	1,4
5-1	2.775,3	40,0	58,5	1,5
5-2	2.962,7	40,0	59,2	1,5
5-3	5.646,0	40,0	78,0	2,0
6-1	2.542,0	40,0	43,7	1,1
6-2	740,7	40,0	44,5	1,1
6-3	1.411,9	40,0	63,4	1,6
6-4	3.763,0	26,4	32,5	1,2

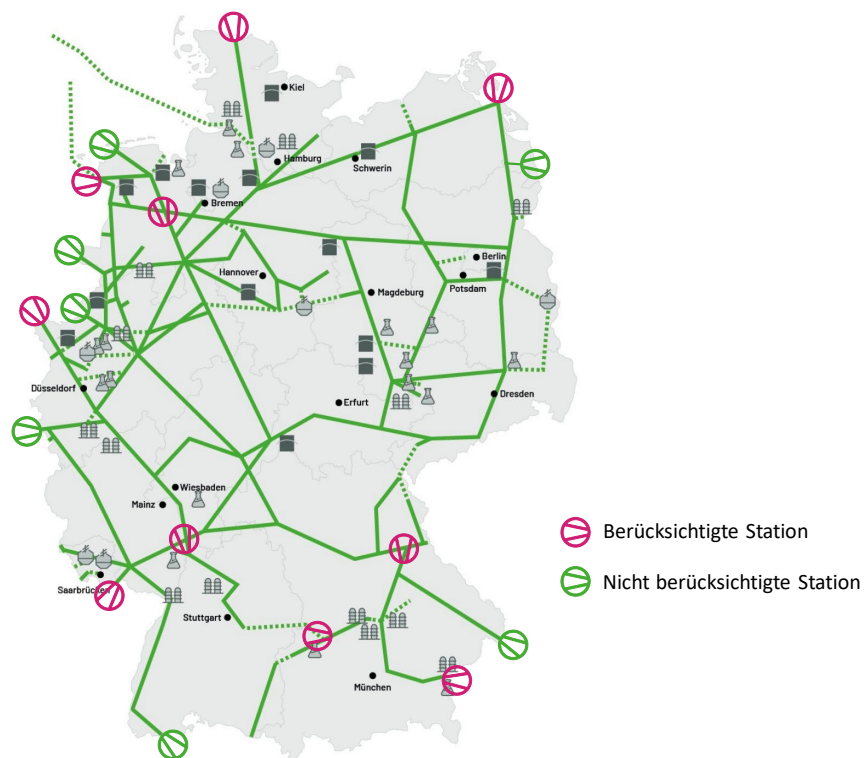


Abbildung 4.1. Verdichterstationen im visionären Wasserstoffnetz.

4.2. Auswahl der Maschinenkonfiguration

Die Arbeitspunkte geben vor, welche Transportaufgabe eine Verdichterstation erfüllen können muss. Für jede Verdichterstation in Tabelle 4.1 gibt es mehrere Arbeitspunkte und somit unterschiedliche Anforderungen an die Maschinenkonfiguration. Daher ist die Auswahl der passenden Maschinenkonfiguration eine komplexe Optimierungsaufgabe. Ein Beispiel ist die Festlegung der Anzahl von Maschinensträngen pro Verdichterstation: Es muss eine Abwägung erfolgen zwischen CAPEX (am kostengünstigsten ist die Wahl einer einzelnen, großen Maschineneinheit) und Flexibilität (am flexibelsten einsetzbar sind mehrere kleine Maschineneinheiten) unter Berücksichtigung der Konstruktions-

vorgaben wie dem erreichbaren Wirkungsgrad.

Auf Basis der Arbeitspunkte in Tabelle 4.1 wurden mögliche Maschinenkonfigurationen definiert. Dazu wurde zunächst die benötigte Verdichterleistung und spezifische Enthalpiedifferenz berechnet (siehe Abbildung 4.3). Da die Arbeitspunkte eine große Streuung in Bezug auf den Durchfluss und die spezifische Enthalpiedifferenz aufweisen, ist eine erste grobe Gruppierung (Clustering) auf Basis der maximalen Antriebsleistung vorgenommen worden.

Im nächsten Schritt wurde ausgewählt, welche Arbeitspunkte für die Auswahl der Maschinenkonfiguration herangezogen werden sollen. Entfallen sind die Arbeitspunkte 1-1 bis 1-4 und

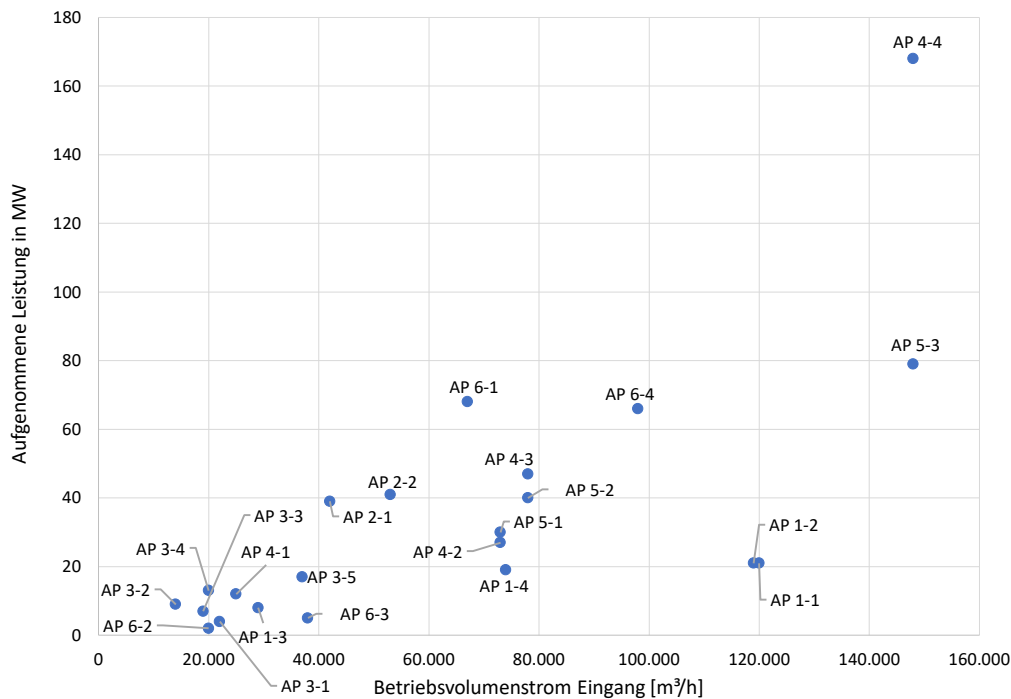


Abbildung 4.2. Aufgenommene Leistung.

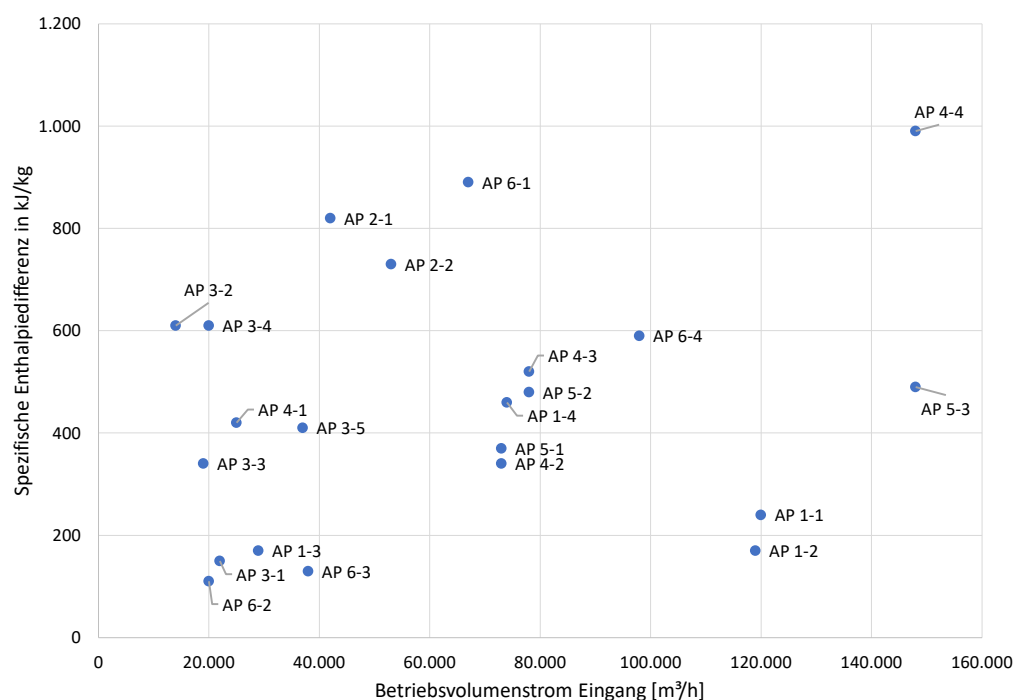


Abbildung 4.3. Spezifische Enthalpiedifferenz.

4-4. Die Punkte 1-1 bis 1-4 repräsentieren eine Verdichterstation auf der Strecke und haben vergleichsweise geringe Anforderungen an die Maschinenkonfiguration. Der maximale Volumenstrom für den Punkt 4-4 ist so groß, dass die Verdichterstation 170 MW an Leistung benötigen würde. Dies ist ein so extremer und seltener Fall, dass die Entscheidung getroffen wurde, diesen Punkt als Ausreißer aus dem Auswahlverfahren auszunehmen.

Die übriggebliebenen Arbeitspunkte weisen Leistungen von bis zu 80 MW und spezifische Enthalpiedifferenzen von bis zu 900 kJ/kg auf. Zur Einordnung: Die installierte Leistung vorhandener Erdgas-Verdichterstationen liegt in der Regel zwischen 20 und 200 MW.

4.2.1. Auswahl der Antriebe

Auf Basis der Arbeitspunkte in Tabelle 4.1 wurden passende Verdichterkonfigurationen ausgewählt. Das Verfahren zur Auswahl von Verdichtern und Antrieben passend zu den Arbeitspunkten ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

Um eine passende Konfiguration für die Antriebe zu finden, wird in einem ersten Schritt der Leistungsbedarf der Verdichter je Station mit der maximalen Antriebsleistung der Antriebsmaschinen verglichen. Konkret wurden drei Optionen betrachtet:

1. Gasturbine mit einer maximalen Leistung von etwa 14 MW unter Standortbedingungen.
2. Gasturbine mit einer maximalen Leistung von etwa 29 MW unter Standortbedingungen.
3. Elektromotor mit einer maximalen Leistung von etwa 40 MW. Folgende Leistungsklassen wurden im Einzelnen betrachtet:

- 14 MW, Mittelspannung, asynchron, wassergekühlt
- 29 MW, Mittelspannung, synchron, wassergekühlt
- 40 MW, Mittelspannung, synchron, wassergekühlt

Nach Abschluss des ersten Schritts ist die Anzahl der benötigten Antriebe und somit die Anzahl der Maschinenstränge festgelegt. Die Antriebsauswahl gilt als erfolgreich, wenn die Anforderungen an die benötigte Antriebsleistung erfüllt sind und die resultierende Anzahl der Maschinenstränge nicht zu hoch ist (zum Beispiel kleiner als sieben Stränge).

4.2.2. Auswahl der Verdichter

Die benötigte spezifische Enthalpiedifferenz einer ganzen Station wird mit den Einzelwerten verschiedener Verdichtertypen verglichen. Außerdem wird festgelegt, ob die Maschinenstränge parallel (großer Durchfluss bei gleicher spezifischer Enthalpiedifferenz) oder in Reihe (große spezifische Enthalpiedifferenz bei gleichem Durchfluss) betrieben werden. Die Auswahl der Verdichter ist erfolgreich, wenn die Transportaufgabe insgesamt erfüllt wird und die resultierende Anzahl der Verdichterstufen (Laufgrad + Diffusor) je Maschineneinheit nicht zu hoch ist (beispielsweise kleiner als acht Stufen).

Für die Festlegung der Verdichterkonfiguration gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten wie Verdichter und Antriebe konfiguriert werden. In Tabelle 4.2 ist ein Beispiel für eine solche Konfiguration unter Verwendung von Gasturbinen und Elektromotoren mit jeweils 14 MW Leistung dargestellt.

Die Konfiguration in Tabelle 4.2 kann alle Arbeitspunkte abdecken unter der Bedingung, dass die Maschineneinheiten auf der geplanten Station passend seriell oder parallel geschaltet

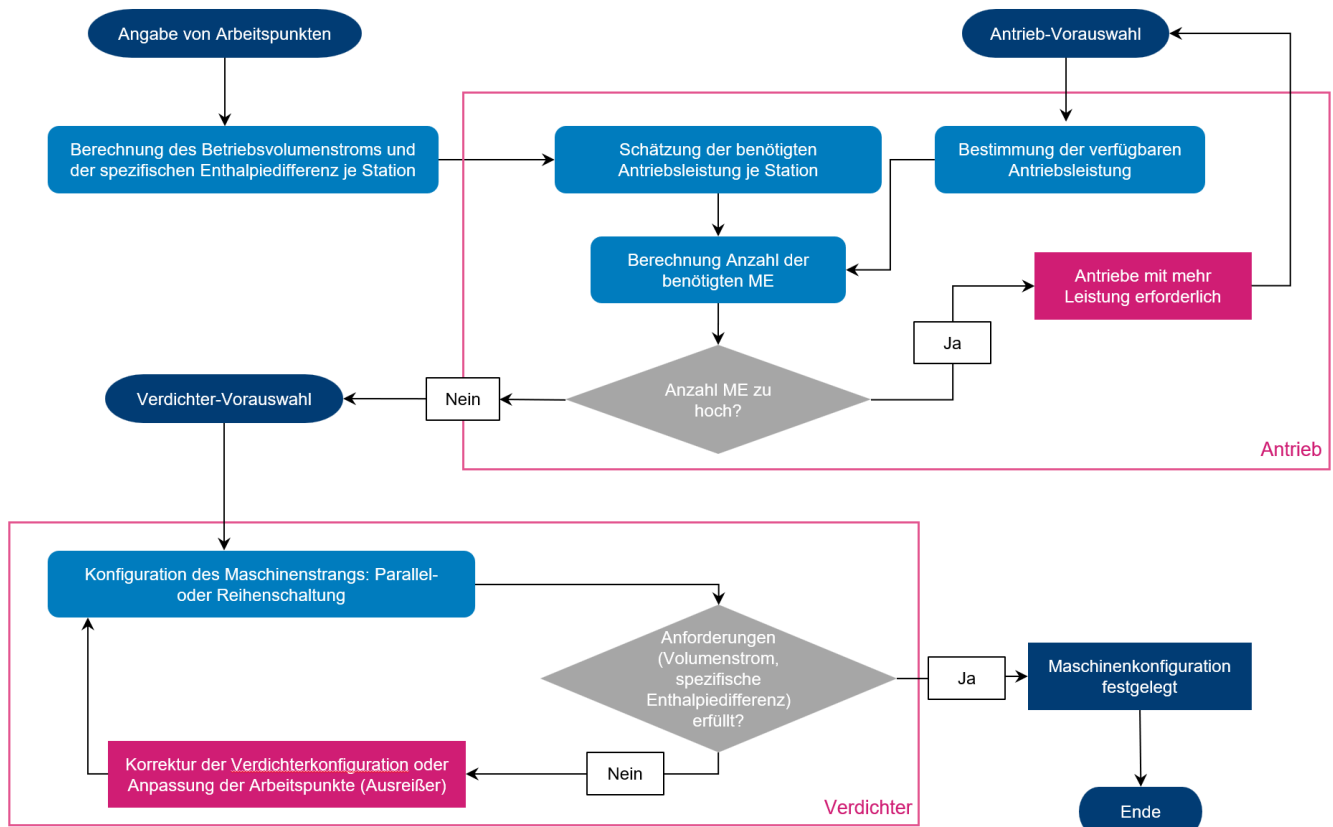


Abbildung 4.4. Verfahren zur Auswahl der Maschinenkonfiguration.

Tabelle 4.2. Verdichterkonfiguration mit Gasturbinen und Elektromotoren.

Arbeitspunkt	Gasturbine	Elektromotor
2-1	3	
2-2	4	
3-1	1	
3-2	1	
3-3	1	
3-4	2	
2-1	3	
3-5	2	
4-1	1	
4-2	3	
4-3	4	
5-1	3	
5-2	4	
5-3	4	3
6-1	4	2
6-2	1	
6-3	1	
6-4	4	3

werden. Um eine möglichst große Flexibilität zu haben, empfiehlt sich die sogenannte Back-to-Back-Anordnung der Maschineneinheiten.

Die Back-to-Back-Anordnung zeichnet sich dadurch aus, dass eine Maschineneinheit sowohl seriell als auch parallel betrieben werden kann (siehe Abbildung 4.5). Die Einheit ist in einen Niederdruck- und einen Hochdruckbereich unterteilt. Bei serieller Nutzung wird das Gas zunächst im Niederdruck- und anschließend im Hochdruckbereich über mehrere Stufen verdichtet. Bei paralleler Nutzung wird der Gasfluss auf den Niederdruck- und den Hochdruckbereich aufgeteilt und separat verdichtet.

Neben der technischen Auslegung muss auch eine wirtschaftliche Bewertung der Verdichterkonfigurationen erfolgen. Tabelle 4.3 zeigt eine grobe Übersicht über die Preisindikationen der unterschiedlichen Konfigurationen.

Tabelle 4.3. Preisindikationen Maschinenkonfigurationen.

Maschinenkonfiguration	Preisindikation (Stand April 2023)	
Gasturbine groß + Verdichter	~ 25 Mio. €/Stück	~ 0,9 Mio. €/MW
Gasturbine klein + Verdichter	~ 15 Mio. €/Stück	~ 1,0 Mio. €/MW
EM groß + Verdichter	~ 15 Mio. €/Stück	~ 0,5 Mio. €/MW
EM klein + Verdichter	~ 10 Mio. €/Stück	~ 0,8 Mio. €/MW

In dieser Aufstellung haben die Varianten mit Elektromotoren geringere Kosten als die mit Gasturbinen. Allerdings fallen bei den Elektromotoren zusätzliche Kosten für die Bereitstellung des Stromanschlusses an.

4.3. Ergebnisse

Im Vergleich zu Erdgas erfordert die Verdichtung von Wasserstoff mehr Maschineneinheiten mit höheren Leistungsklassen. Dies liegt an dem niedrigen volumetrischen Energiegehalt von Wasserstoff und seiner geringen molaren Masse.

Die Wahl des Antriebs ist eine systemabhängige Entscheidung, die sowohl die technische Komplexität als auch die Verfügbarkeit eines Stromanschlusses berücksichtigen sollte. Sowohl Gasturbinen als auch Elektromotoren sind aus maschinentechnischer Sicht geeignete Antriebsmaschinen für dynamische Verdichter. Elektromotoren haben den Vorteil, keine direkten CO₂-Emissionen zu haben. Außerdem sind sie wartungsärmer als Gasturbinen. Dafür sind Gasturbinen schwarzstartfähig. Natürlich sind auch Kombinationen aus Gas- und Elektroantrieb denkbar.

Für jeden Transportfall ist eine bestimmte Anzahl von Maschinensträngen erforderlich. Die entsprechenden Verdichter müssen je nach spezifischer Enthalpiedifferenz und zu transportierendem Volumenstrom entweder parallel oder in Reihe geschaltet werden. Die Anwendung einer Back-to-Back-Anordnung erhöht die Flexibilität. Dadurch können alle betrachteten Arbeitspunkte mit nur einem Bautyp von Verdichter abgedeckt werden.

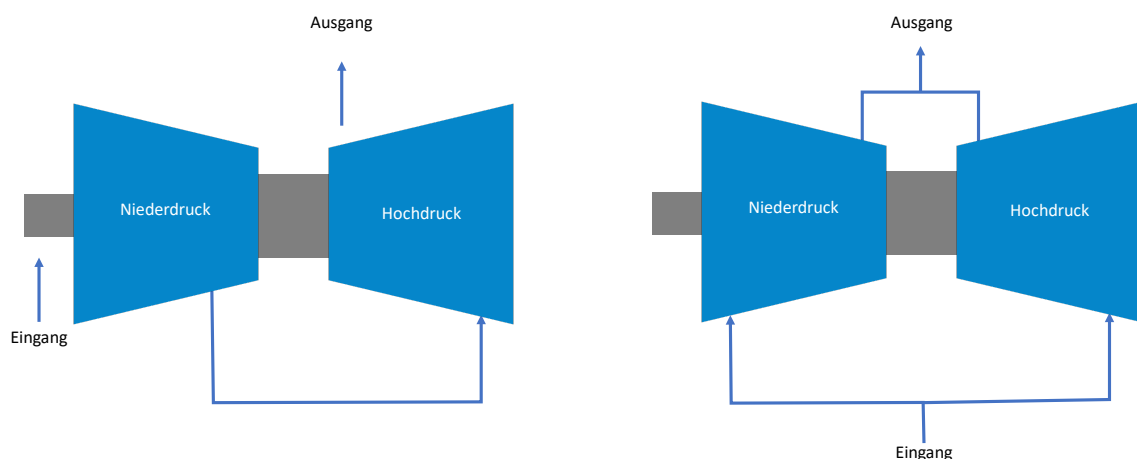


Abbildung 4.5. Back-to-Back-Anordnung.

5

Strömungsmechanische Rechnungen für Leitungskonfigurationen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse strömungsmechanischer Rechnungen für verschiedene Leitungskonfigurationen vorgestellt und Folgerungen für den Transport von Wasserstoff abgeleitet. Dazu werden im ersten Schritt eine Reihe von Basisrechnungen anhand einer einfachen Leitung dargestellt. Anschließend wird diese einfache Leitung um weitere Elemente erweitert, um zu zeigen, welche Möglichkeiten zur Steigerung der Transportkapazität eines Transportsystems existieren (z.B. Leitungsloops, Verdichter) und welche Vor- und Nachteile diese mit sich bringen. Die Rechnungen wurden mit Hilfe des Simulationsprogramms SIMONE erstellt. Kostenschätzungen basieren auf dem Orientierungskostensätzen aus dem Kernnetz.

5.1. Grundlagen

Eine wesentliche Aufgabe von strömungsmechanischen Rechnungen ist es, den Druckabfall in Leitungen zu bestimmen (siehe Abschnitt 2.1). Über den Druckabfall wird ermittelt, wie groß die Energietransportkapazität einer Rohrleitung oder eines Leitungssystems ist.

Abbildung 5.1 zeigt eine schematische Darstellung des Druckabfalls beim Transport von Wasserstoff über eine Rohrleitung. Der Wasserstoff wird über eine gegebene Leitung transportiert und am Anfang der Leitung mit 80 barg eingespeist. Aufgrund des Druckabfalls während des Transports beträgt der Druck am Ende der Leitung nur noch 30 barg. Der Druckabfall ist nicht-linear und nimmt zum Ende der Transportstrecke hin immer stärker zu. In diesem Beispiel entspricht der Mindestdruck am Ende der Leitung (30 barg) dem berechneten Druck. Das bedeutet, dass die maximale Energietransportkapazität der Leitung erreicht ist.

Eine Möglichkeit, die Transportkapazität des Leitungssys-

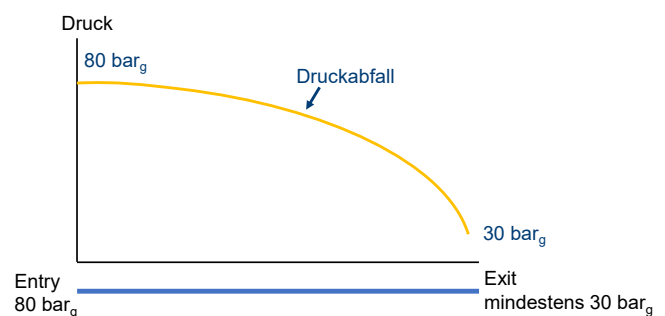


Abbildung 5.1. Druckabfall über eine Leitung.

tems zu erhöhen, besteht darin, die vorhandene Leitung zu parallelisieren. Der Druckabfall über den doppelten Leitungsstrang ist dann geringer, wodurch die Transportkapazität größer wird (siehe Abbildung 5.2).

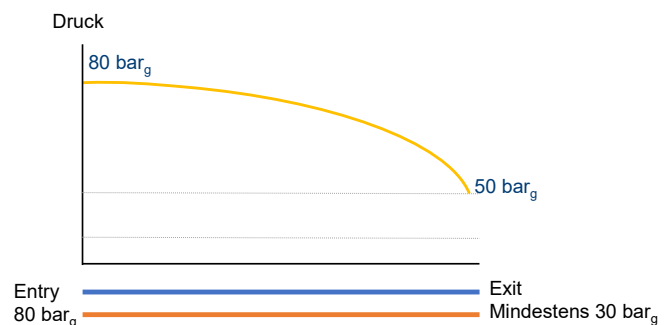


Abbildung 5.2. Druckabfall bei Leitungsparallelisierung.

Die Kapazität des Leitungssystems wird ebenfalls größer,

wenn Verdichter eingebaut werden. Dies liegt daran, dass der Druck entlang der Strecke zwischendurch erhöht werden kann, wie in Abbildung 5.3 dargestellt.

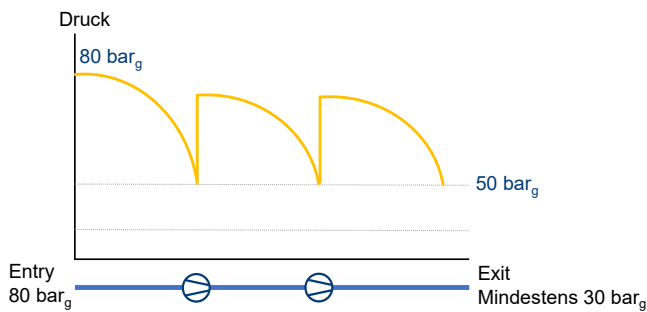


Abbildung 5.3. Druckabfall bei Verdichtung.

5.2. Basisrechnungen

Für die Basisrechnungen wird der Druckabfall über eine 1.000 km lange Leitung bei verschiedenen Durchmessern und unterschiedlich hohen Transportleistungen bestimmt.

Feste Parameter:

- Die betrachtete Rohrleitung ist 1.000 km lang, was etwa der Länge Deutschlands von Norden nach Süden entspricht.
- Am Anfang der Leitung wird mit 80 barg eingespeist.
- Am Ende der Leitung soll mindestens 30 barg vorhanden sein.

Variable Parameter:

- Leitungsdurchmesser: 800 mm, 1.000 mm, 1.200 mm und 1.400 mm.

- Transportierte Leistung: 5 GW, 10 GW und 20 GW in Form von reinem Wasserstoff.

Für jede Kombination aus Durchmesser und transportierter Leistung wurde der Druckabfall berechnet. Die Rechnung gilt als erfolgreich, wenn beim Transport der betrachteten Leistung am Ende der Leitung mindestens 30 barg vorhanden sind. Ist der Druck geringer, bedeutet dies, dass die Leitung nicht ausreicht, um die vorgegebene Transportaufgabe zu erfüllen. In diesem Fall erfolgt ein Ausbau. Dazu werden entweder Leitungsloops parallel zur vorhandenen Leitung oder Verdichter an geeigneter Stelle eingeplant.

Die Abbildung 5.4 zeigt ein Beispiel für die Berechnung des Druckabfalls über eine Leitung mit 1.000 mm Durchmesser. In diesem Beispiel sollen 10 GW über die Leitung transportiert werden. Jedoch ist dies nicht möglich – die maximale Kapazität der Leitung beträgt rund 8 GW. Bei einem größeren Transport würde der Druck am Ende der Leitung unter den gewünschten Mindestdruck sinken.

Um 10 GW zu transportieren, wird demzufolge ein zusätzlicher Ausbau benötigt. In Abbildung 5.5 ist das Netz dargestellt, mit dem ermittelt wurde, wie viele zusätzliche Kilometer Leitungsloop benötigt werden. Ob ein Leitungsabschnitt genutzt wurde, kann man daran erkennen, dass das Pfeilsymbol schwarz ausgefüllt dargestellt wird. Jeder Abschnitt hat eine Länge von 100 km, in Summe ergibt sich also eine Länge von 500 km an zusätzlichen Leitungen.

Alternativ kann die Kapazität des Leitungssystem durch die Nutzung von Verdichtern erhöht werden. Im Beispiel des Transports von 10 GW über eine Leitung mit 1.000 mm Durchmesser reicht eine einzige Verdichterstation nach 400 Kilometern aus, um den Mindestdruck am Ende der Leitung herzustellen. Erkennbar ist dies an der Einfärbung des Verdichtersymbols (siehe Abbildung 5.6) – die aktive Verdichterstation ist schwarz dargestellt. Die benötigte Verdichterleistung beträgt in diesem Fall etwa 38 MW.

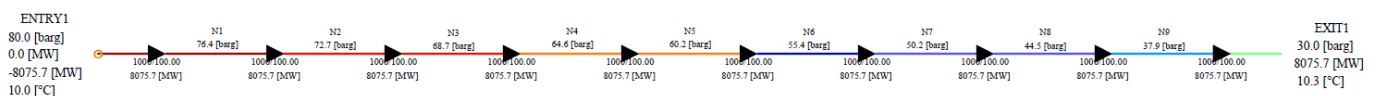


Abbildung 5.4. Druckabfall über eine 1.000 km lange Leitung in SIMONE.

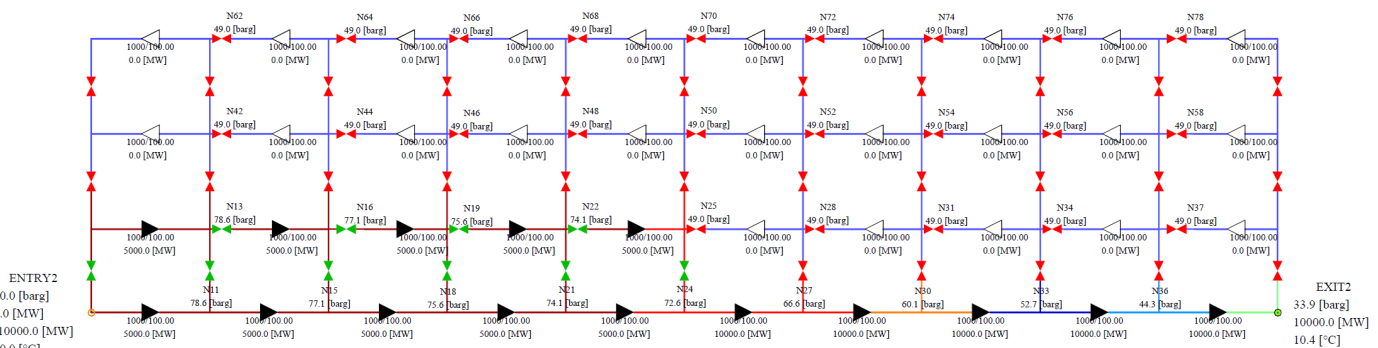


Abbildung 5.5. Leitungsloops im SIMONE-Simulationsnetz.

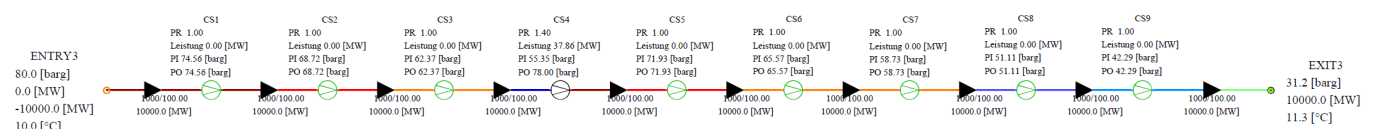


Abbildung 5.6. Einsatz von Verdichtern im SIMONE-Simulationsnetz.

Die Ergebnisse der Simulationsrechnung für alle Kombinationen sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Im Ergebnis zeigt sich, welche Kombinationen aus Durchmesser und Leistung die Transportaufgabe erfüllen (siehe schwarzer Text in Tabelle 5.1). Zum Beispiel reicht bei der Kombination DN1000 und 5 GW (Szenario Nr. 10) die Originalleitung bereits aus und es ist kein Zubau nötig. Die Szenarien 11 und 12 wurden daher nicht weiter betrachtet.

Für die Szenarien, die die Transportaufgabe erfüllen, wurden anhand der Orientierungskostensätze aus dem Kernnetz die

spezifischen Transportkosten in ct/kWh bestimmt. Dafür wurde eine Mischkalkulation aus CAPEX und OPEX erstellt, bei der zwei Varianten für Verdichterlaufstunden pro Jahr angenommen wurden: 8.760 Stunden (alle Stunden eines Jahres) und 2.190 Stunden (ein Viertel der Stunden eines Jahres). Die unterschiedlichen Verdichterlaufstunden wurden zur Berechnung der minimalen und maximalen spezifischen Kosten herangezogen. In den Abbildungen 5.7 bis 5.9 sind die minimalen Kosten (bei 8.760 Stunden) in Blau und die maximalen Kosten (bei 2.190 Stunden) in Orange dargestellt.

Tabelle 5.1. Ergebnisse Simulationsrechnung.

Nr.	Szenariobeschreibung	Ergebnis
1	5 GW, 800 mm, kein Zubau	Original-Leitung reicht nicht aus, Loop oder Verdichter benötigt
2	5 GW, 800 mm, Leitungsloop	300 km Loopleitung werden benötigt
3	5 GW, 800 mm, Verdichter	Eine Verdichterstation wird benötigt
4	10 GW, 800 mm, kein Zubau	Original-Leitung reicht nicht aus, Loop oder Verdichter benötigt
5	10 GW, 800 mm, Leitungsloop	1400 km Loopleitung werden benötigt
6	10 GW, 800 mm, Verdichter	8 Verdichterstationen werden benötigt
7	20 GW, 800 mm, kein Zubau	Original-Leitung reicht nicht aus, Loop oder Verdichter benötigt
8	20 GW, 800 mm, Leitungsloop	3600 km Loopleitung werden benötigt
9	20 GW, 800 mm, Verdichter	19 Verdichterstationen werden benötigt
10	5 GW, 1000 mm, kein Zubau	Original-Leitung reicht aus
11	5 GW, 1000 mm, Leitungsloop	Zubau wird nicht benötigt
12	5 GW, 1000 mm, Verdichter	Zubau wird nicht benötigt
13	10 GW, 1000 mm, kein Zubau	Original-Leitung reicht nicht aus, Loop oder Verdichter benötigt
14	10 GW, 1000 mm, Leitungsloop	500 km Loopleitung werden benötigt
15	10 GW, 1000 mm, Verdichter	Eine Verdichterstation wird benötigt
16	20 GW, 1000 mm, kein Zubau	Original-Leitung reicht nicht aus, Loop oder Verdichter benötigt
17	20 GW, 1000 mm, Leitungsloop	1.700 km Loopleitung werden benötigt
18	20 GW, 1000 mm, Verdichter	9 Verdichterstationen werden benötigt
19	5 GW, 1200 mm, kein Zubau	Original-Leitung reicht aus
20	5 GW, 1200 mm, Leitungsloop	Zubau wird nicht benötigt
21	5 GW, 1200 mm, Verdichter	Zubau wird nicht benötigt
22	10 GW, 1200 mm, kein Zubau	Original-Leitung reicht aus
23	10 GW, 1200 mm, Leitungsloop	Zubau wird nicht benötigt
24	10 GW, 1200 mm, Verdichter	Zubau wird nicht benötigt
25	20 GW, 1200 mm, kein Zubau	Original-Leitung reicht nicht aus, Loop oder Verdichter benötigt
26	20 GW, 1200 mm, Leitungsloop	800 km Loopleitung werden benötigt
27	20 GW, 1200 mm, Verdichter	Drei Verdichterstationen werden benötigt
28	5 GW, 1400 mm, kein Zubau	Original-Leitung reicht aus
29	5 GW, 1400 mm, Leitungsloop	Zubau wird nicht benötigt
30	5 GW, 1400 mm, Verdichter	Zubau wird nicht benötigt
31	10 GW, 1400 mm, kein Zubau	Original-Leitung reicht aus
32	10 GW, 1400 mm, Leitungsloop	Zubau wird nicht benötigt
33	10 GW, 1400 mm, Verdichter	Zubau wird nicht benötigt
34	20 GW, 1400 mm, kein Zubau	Original-Leitung reicht nicht aus, Loop oder Verdichter benötigt
35	20 GW, 1400 mm, Leitungsloop	100 km Loopleitung werden benötigt
36	20 GW, 1400 mm, Verdichter	Eine Verdichterstation wird benötigt

Die spezifischen Transportkosten liegen je nach Transportaufgabe zwischen 0,2 und 5,9 ct/kWh, wobei der höhere Wert aus einer sehr ungünstigen und daher unrealistischen Kombination aus transportierter Leistung und Leitungssystem resultiert.

Beim Transport von 5 GW zeigen sich keine großen Unterschiede bei den Kosten, wie Abbildung 5.7 verdeutlicht. Bei einem Durchmesser von 800 mm ist es etwas günstiger, Verdichter als Verstärkung einzuplanen, anstatt Looleitungen zu verwenden. Dies liegt unter anderem an der hier getroffenen Randbedingung, zur Vereinfachung keine Looleitung mit einer geringeren Länge als 100 km vorzusehen, während Verdichter hingegen passgenau eingesetzt werden. Daraus ergibt sich ein kleiner Vorteil für die Verdichterkosten.

Ab einem Durchmesser von 1.000 mm reicht die Leitung aus, um die gewünschte Leistung zu transportieren. Bei den Durchmessern 1.200 mm und 1.400 mm sind die Kosten zwar höher, diese Fälle sind jedoch als nicht relevant anzusehen, da bereits der geringere Durchmesser für den Transport vollkommen ausreicht.

Für den Transport von 10 GW reicht eine Leitung mit 800 mm

Durchmesser nicht aus, und es müssen weitere Ausbauten erfolgen. In diesem Fall ist es günstiger, Looleitungen einzuplanen als Verdichter. Bei einem Durchmesser von 1.000 mm besteht kein großer Kostenunterschied zwischen den beiden Ausbauvarianten. Ab einem Durchmesser von 1.200 mm reicht die gegebene Leitung für den Transport aus. Daher ist der Fall mit einem Durchmesser von 1.400 mm wiederum als nicht relevant anzusehen.

Der Transport von 20 GW zeigt größere Unterschiede bei den Kosten im Vergleich zu den zuvor betrachteten geringeren Leistungen. Der teuerste Fall tritt bei der Kombination eines Leitungsdurchmessers von 800 mm und dem Zubau von Verdichtern auf. Dieser Fall ist jedoch so ungünstig, dass er als unrealistisch anzusehen ist, da in der Simulationsrechnung alle 50 km Verdichter benötigt werden.

Auch bei einem Durchmesser von 1.000 mm ist es deutlich teurer, Verdichter zuzubauen, als Looleitungen zu verwenden. Ab einem Durchmesser von 1.200 mm gibt es keine großen Unterschiede mehr.

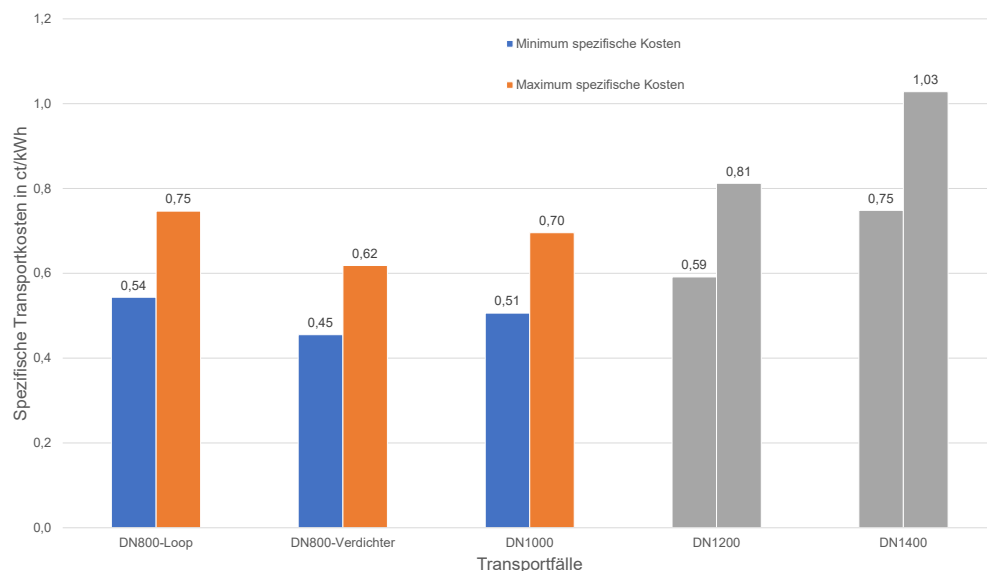


Abbildung 5.7. Spezifische Transportkosten beim Transport von 5 GW.

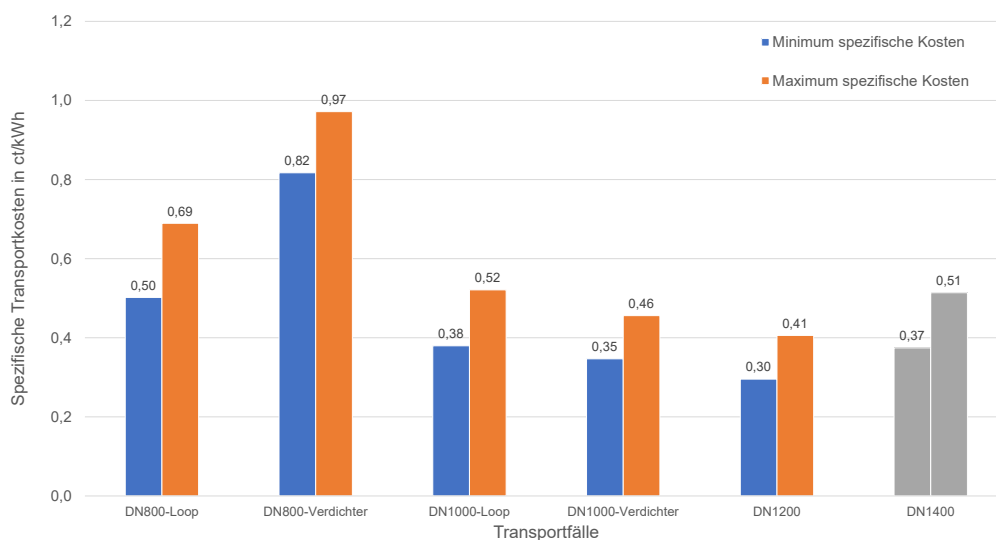


Abbildung 5.8. Spezifische Transportkosten beim Transport von 10 GW.

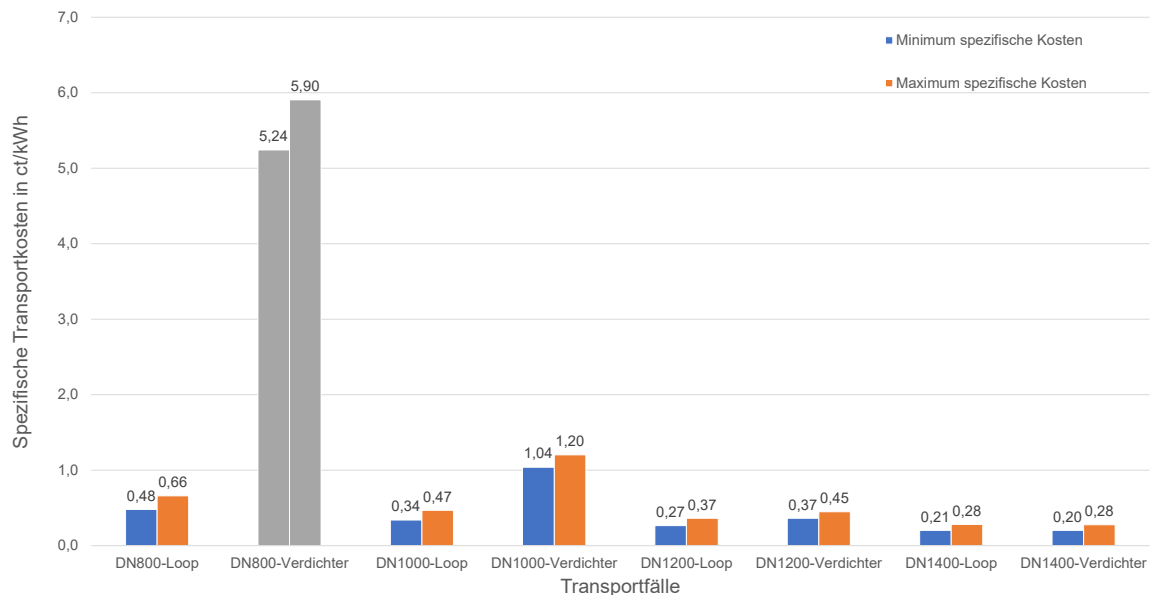


Abbildung 5.9. Spezifische Kosten beim Transport von 20 GW.

Zusätzlich lässt sich beim Transport von 20 GW eine grundsätzliche Tendenz erkennen: Je größer der Durchmesser der initialen Leitung ist, desto geringer sind die spezifischen Transportkosten.

Schon diese einfachen Basisrechnungen zeigen, dass es für die Entwicklung der Transportkosten entscheidend ist, für jede Transportaufgabe die passende Leitungsdimensionierung zu wählen. Ist der initiale Durchmesser signifikant zu gering, verteuert sich der Transport im Nachhinein durch zusätzliche Ausbaumaßnahmen erheblich. Wird der Durchmesser hingegen im initialen Leitungsnetz überdimensioniert, sind die Kosten von Anfang an höher als nötig.

Auf Basis der durchgeführten Rechnungen lassen sich folgende grundsätzliche Schlussfolgerungen ableiten:

- Sollen große Mengen an Wasserstoff transportiert werden (beispielsweise 10 GW und 20 GW), ist es am kostengünstigsten Leitungen mit großen Durchmessern zu nutzen.
- Ist mit einem großen Transportzuwachs zu rechnen, sind Loopleitungen als Ausbaumaßnahme grundsätzlich günstiger als Verdichter.
- Im Fall, dass das vorhandene Transportsystem nur geringfügig unterdimensioniert ist, lohnt sich der Zubau von Verdichtern.

6

Zusammenfassung

In dem vorliegenden Whitepaper werden Konzepte für die Verdichtung von Wasserstoff in einem wachsenden Transportsystem und deren Bewertung hinsichtlich technischer und wirtschaftlicher Gesichtspunkte vorgestellt.

In Kapitel 2 wird anhand von Formeln hergeleitet, dass die Transportkapazität einer auf Wasserstoff umgestellten Leitung ungefähr 80 Prozent der Kapazität im Vergleich zu Erdgas beträgt. Dies liegt vor allem an den ähnlichen Wobbe-Indizes von Wasserstoff und Erdgas. Bei gleicher transportierter Leistung sind im Fall von Wasserstoff der Betriebsvolumenstrom und somit die Strömungsgeschwindigkeit deutlich erhöht (um Faktor 4,5). Dies liegt daran, dass der volumetrische Energieinhalt (Brennwert) von Wasserstoff wesentlich geringer ist als der von Erdgas.

In Kapitel 3 wird Grundlagenwissen zu Verdichtern und Antrieben vermittelt. Für die Verdichtung von Wasserstoff eignen sich dynamische Verdichter kombiniert mit Elektromotoren oder Gasturbinen. Elektromotoren weisen sehr hohe Wirkungsgrade auf, müssen aber mit einer zuverlässigen Stromanbindung versorgt sein. Gasturbinen können Wasserstoff für den Betrieb nutzen, emittieren aber Schall und Stickoxide.

Zur Erzeugung einer gleich hohen Druckdifferenz benötigt die Verdichtung von Wasserstoff mit Turboverdichtern siebenmal mehr Stufen als bei Erdgas, es sei denn die Verdichter rotieren deutlich schneller.

Bei gleichem Betriebsvolumenstrom gibt es keine großen Unterschiede bezüglich der Antriebsleistung bei der Verdichtung von Wasserstoff oder Erdgas. Wird allerdings die Verdichtung von Wasserstoff und Erdgas bei gleicher transportierter Leistung verglichen, steigt die aufzubringende Verdichterantriebsleistung signifikant an. Wegen der erhöhten Betriebsvolumenströme ist die aufzubringende Antriebsleistung bei der Verdichtung von Wasserstoff drei- bis viereinhalbmal so groß.

In Kapitel 4 wird erläutert, wie die Auswahl von Verdichterkonfigurationen passend zu einer vorgegebenen Transportaufgabe erfolgen kann. Für einige vom visionären Wasserstoffnetz abgeleiteten Arbeitspunkte werden mögliche Maschinenkonfigurationen definiert. Durch eine flexible Verdichterkonfiguration mit Back-to-Back-Anordnung ist es möglich, alle Arbeitspunkte mit Verdichtern einer einzigen Leistungsklasse abzudecken.

In Kapitel 5 werden die Ergebnisse von einfachen strömungsmechanischen Rechnungen vorgestellt. Es wird gezeigt, welche Möglichkeiten es gibt, um die Transportkapazität eines Leitungsnetzes zu erhöhen. Je nach Transportsituation erweisen sich Loopeleitungen oder Verdichtierzubau als kostengünstiger.



Literaturverzeichnis

- [1] F. Graf, V. Isik, M. Heneka, W. Köppel, T. Kolb, A.-C. Fleer, and R. W. Verbücheln, "Aktuelle fragestellungen beim leitungsgebundenen transport von wasserstoff," *Chemie Ingenieur Technik*, vol. 96, no. 1–2, p. 74–85, Dec. 2023. [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1002/cite.202300106>
- [2] J. Mischner, H.-G. Fasold, and K. Kadner, *Systemplanung in der Gasversorgung, Gaswirtschaftliche Grundlagen, Kapitel: Transportkapazität von Gasleitungen und Leitungssystemen*. Essen, Germany: Oldenbourg Industrieverlag GmbH, Oct. 2011.
- [3] J. Mischner and H.-G. Fasold, "Gasbeschaffenheiten in deutschland: Was zum wobbe-index noch gesagt werden sollte," *gwf Gas+Energie*, 2019.
- [4] K. H. Ludtke, *Process centrifugal compressors*. Berlin, Germany: Springer, Nov. 2010.
- [5] "FNB Gas — fnb-gas.de," <https://fnb-gas.de/wasserstoffnetz/h2-netz-2050/>, [Accessed 09-04-2025].