

**Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg**  
**Fakultät Life Sciences**

**Nutzwertanalyse der Kälteenergie von Flüssigwasserstoff:  
Anwendungspotenziale im Hamburger Hafen**

Bachelorarbeit  
im Studiengang Umwelttechnik

vorgelegt von

**Lotta Zibell**



Hamburg, den 19.08.2024

**1. Gutachter:** Prof. Dr.-Ing. Sebastian Timmerberg (HAW Hamburg)

**2. Gutachterin:** Stephanie Kratzer (cruh21)

Die Abschlussarbeit wurde betreut und erstellt in der Firma **cruh21**

# Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis .....	III
Tabellenverzeichnis.....	III
Abkürzungs- und Symbolverzeichnis.....	IV
1. Einleitung.....	1
1.1. Hintergrund .....	1
1.2. Forschungsfrage .....	2
1.3. Aufbau der Arbeit .....	2
2. Theorie .....	3
2.1. Kälteenergie.....	3
2.2. Flüssigwasserstoff .....	3
2.2.1. Allgemein .....	3
2.2.2. Potenzial von Flüssigwasserstoff .....	5
2.2.3. Wasserstoff Verflüssigungsprozess .....	5
2.3. Vergleich Flüssigerdgas und Flüssigwasserstoff.....	7
2.4. Anwendungen der Kälteenergie .....	9
2.5. Hamburger Hafen .....	11
2.5.1. Flüssigwasserstoff in Hamburg.....	11
2.5.2. Zukunft des Hafens .....	12
2.6. Zwischenfazit.....	14
3. Methodik.....	15
3.1. Literaturrecherche .....	15
3.2. Nutzwertanalyse.....	15
4. Durchführung Nutzwertanalyse .....	20
4.1. Auswahl der Entscheidungsalternativen .....	20
4.2. Bestimmung Entscheidungskriterien .....	27
4.3. Gewichtung Entscheidungskriterien.....	28
4.4. Skalen und Bewertungsvorschriften .....	28
4.5. Bewertung der Entscheidungskriterien .....	30
5. Ergebnisse.....	31
6. Diskussion.....	37
6.1. Diskussion der Ergebnisse .....	37
6.2. Limitationen dieser Arbeit .....	38
7. Fazit und Ausblick .....	40
Literaturverzeichnis .....	V
Eidesstattliche Erklärung.....	XIII
Anhang .....	XIV

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Linde Prozess zur Verflüssigung von Flüssigwasserstoff (Staudt et al., 2024) ....	6
Abbildung 2: Prognostizierter Wasserstoffbedarf der Welt, Europa und von Deutschland (Dr. Schwarz, 2024).....	8
Abbildung 3: Temperaturniveaus für verschiedene Anwendungen, die die Kälte von LNG oder LH <sub>2</sub> nutzen (eigene Darstellung) .....	9
Abbildung 4: Karte der zukünftigen Schwerpunktnutzungen im Hamburger Hafen (BWI, 2023c).....	13
Abbildung 5: Legende der Karte der zukünftigen Schwerpunktnutzungen im Hamburger Hafen (BWI, 2023c) .....	13
Abbildung 6: Google Recherche zu Rechenzentren im Hamburger Hafen (GeoBasis-DE & Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), 2009a).....	XX
Abbildung 7: Recherche zu den Kühlhäusern im Hamburger Hafen (eigene Darstellung, Karte von Hamburg, 2024 Temperaturdaten von; Frucht- und Kühl-Zentrum (FKZ), 2024; Frigo Coldstore Logistics, Kompetente Kühllogistik, 2024; NORDFROST GmbH & Co. KG, 2024; OSSE Logistik, 2024).....	XXI
Abbildung 8: Google Recherche zu Trockeneisproduktion im Hamburger Hafen (GeoBasis-DE & Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), 2009b).....	XXI

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Eigenschaften von Flüssigwasserstoff (Alekseev et al., 2023; Peschka, 1984).....	4
Tabelle 2: Vergleich der Eigenschaften von LNG und LH <sub>2</sub> (Eigene Darstellung, Daten von Janczura, 2022).....	7
Tabelle 3: Liste verschiedener Kälteenergieanwendungen von LNG und LH <sub>2</sub> .....	10
Tabelle 4: Vorgehen bei einer Nutzwertanalyse (nach Kühnapfel, 2021) .....	16
<i>Tabelle 5: Muss-Anforderungen der Kälteenergie Anwendungen</i> .....	21
Tabelle 6: Gewichtung der Kriterien für die Nutzwertanalyse .....	28
Tabelle 7: Beschreibung der Punktzahlen je Kriterium .....	29
Tabelle 8: Zählung wie oft welche Bewertung innerhalb der Nutzwertanalyse vergeben wurde .....	32
Tabelle 9: Gewichtungsänderungen der Nutzwertanalyse .....	33
Tabelle 10: Minimal, Maximal und Durchschnitts Punktzahlen der Nutzwertanalyse und der Sensitivitätsanalyse .....	34
Tabelle 11: Rangfolge der ursprünglichen Rechnung und der drei Rechnungen für die Sensitivitätsanalyse .....	35
Tabelle 12: Ergebnisse der durchgeführten Nutzwertanalyse .....	36
Tabelle 13: Vergleich benötigter Gesamtenergie, verschiedener Transportoptionen, um 1 kg H <sub>2</sub> zu importieren (Staudt et al., 2024).....	XIX
Tabelle 14: Bewertungsgrundlage der Nutzwertanalyse.....	IV
Tabelle 15: Ergebnisse des 1. Schritts der Sensitivitätsanalyse der Nutzwertanalyse, die Gewichtungen aller Kriterien sind gleich.....	V
Tabelle 16: Ergebnisse des 2. Schritts der Sensitivitätsanalyse der Nutzwertanalyse, bei dem die Gewichtungsspitzen geglättet wurden .....	VI
Tabelle 17: Ergebnisse des 3. Schritts der Sensitivitätsanalyse der Nutzwertanalyse, bei dem die Gewichtungen gespreizt wurden .....	VII

# Abkürzungs- und Symbolverzeichnis

Ar.....	Argon
CO <sub>2</sub> .....	Kohlenstoffdioxid
EU.....	Europäische Union
H <sub>2</sub> .....	Wasserstoff
LAES.....	liquid air energy storage system - Flüssiglufspeichersystem
LH <sub>2</sub> .....	Flüssigwasserstoff
LNG.....	Liquid Natural Gas - Flüssig Erdgas
N <sub>2</sub> .....	Stickstoff
NGL.....	natural gas liquids - Erdgasflüssigkeiten
O <sub>2</sub> .....	Sauerstoff

## Einheiten

°C	Grad Celsius
K	Kelvin
kWh/l	Kilowattstunde pro Liter

# 1. Einleitung

## 1.1. Hintergrund

Die Klimakrise durch die Menschheit ausgelöst wurde, ist heutzutage nicht mehr von der Hand zu weisen (IPCC, o. J.)<sup>1</sup>. Allein in Deutschland kam es in diesem Jahr, 2024, zu mehreren verheerenden Hochwassern, Anfang des Jahres in Norddeutschland und Ende Mai/ Anfang Juni im Süden Deutschlands. Bundeskanzler Olaf Scholz sagte, dass er dieses Jahr schon das vierte Mal ein Hochwassergebiet besuchte und „sein Terminkalender werde so zum Warnzeichen, zum ‘Hinweis darauf, dass was los ist‘“ (F.A.Z., 2024). Er sagt weiterhin, dass die Aufgabe, den menschengemachten Klimawandel aufzuhalten, nicht vernachlässigt werden dürfte (ebd.). Ein wichtiger Schritt dazu ist das Erreichen der Klimaneutralität. Deutschland hat im deutschen Klimaschutzgesetz festgelegt, dass eine Umsetzung der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045 erfolgen muss (Erstes Gesetz zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes, 2021 Art.1 § 3 Abs. 2).

Der Hamburger Senat hat aktuell ebenfalls das Ziel bis 2045 klimaneutral zu werden (Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft, o. J.). Die Handelskammer Hamburg hat in Kooperation mit der ‚Organisation für Zusammenarbeit und Entwicklung‘ (OECD) im Januar 2024 eine Studie veröffentlicht, in der aufgezeigt wird, wie die Hamburger Wirtschaft bis zum Jahr 2040 Klimaneutralität erreichen kann und dabei international wettbewerbsfähig bleibt (HIW Hamburg Invest Wirtschaftsförderungsgesellschaft, 2024). Bei der Vorstellung der Studie, verkündete die EU-Kommissionspräsidentin Ursula von der Leyen, dass der Hamburger Hafen weltweit einer der ersten Häfen werde, der in einem großen Maßstab Wasserstoff (H<sub>2</sub>) importieren wird (ebd.). Zusätzlich weisen die Netzwerkaktivitäten von **cruh21** in Norddeutschland auf eine signifikante Aktivität hinsichtlich des Imports und der Nachfrage von flüssigem Wasserstoff in der Region hin (Almeida et al., 2024).

Beim Import von Wasserstoff stellen viele Studien fest, dass flüssiger Wasserstoff (LH<sub>2</sub>) die energetisch effizienteste Möglichkeit sein wird (Hank et al., 2020; IRENA, 2022; Ortiz et al., 2022; Staiß et al., 2022; Staudt et al., 2024<sup>2</sup>). Zusätzlich mit dem Wasserstoff wird Kälteenergie importiert, die durch einen innovativ gestalteten Regasifizierungsprozess, nutzbar gemacht werden könnte (Alekseev et al., 2023).

---

<sup>1</sup> Der *Intergovernmental Panel on Climate Change* IPCC wird auch als „Weltklimarat“ bezeichnet (IPCC, o. J.). In seinem Auftrag werden weltweit aktuelle Informationen über den Klimawandel zusammengetragen und aus wissenschaftlicher Sicht bewertet (ebd.).

<sup>2</sup> Die Autor:innen Staudt et al. haben in Ihrer Studie „Kurzstudie zu Transportoptionen von Wasserstoff“ unterschiedliche Transportoptionen miteinander verglichen. In Tabelle 13 im Anhang ist eine der Auswertungen abgebildet, in der der zukünftige Flüssigwasserstoffimport die höchste Effizienz, der untersuchten Transportoptionen, mit 74 % aufweist (Staudt et al., 2024).

Daraus ergeben sich für diese Arbeit die Themen Kälteenergie von Flüssigwasserstoff im Hamburger Hafen. Auf die Forschungsfrage und den Aufbau der Arbeit wird nachfolgend eingegangen.

## 1.2. Forschungsfrage

In dieser Arbeit wird sich mit den Anwendungsmöglichkeiten der Kälteenergie von Flüssigwasserstoff im Hamburger Hafen beschäftigt, weshalb die Forschungsfrage lautet:

„Welche potenziellen Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich für die Kälteenergie von Flüssigwasserstoff für den Hamburger Hafen?“.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung soll das Potenzial des Flüssigwasserstoffs, am Beispiel des Hamburger Hafens, deutlich gemacht werden. In den aktuellen Debatten wird diskutiert, wie Wasserstoff am effizientesten importiert werden kann. Der Aspekt, dass mit Flüssigwasserstoff auch wertvolle Kälteenergie importiert wird, wird selten mit in die Debatten aufgenommen.

## 1.3. Aufbau der Arbeit

Zur Herausarbeitung der Thematik wird zunächst im 2. Kapitel eine Grundlage über die Themen der Kälteenergie und des Flüssigwasserstoffs geschaffen. Im Zuge der Vorstellung von Flüssigwasserstoff, wird auf das Potenzial und den Verflüssigungsprozess eingegangen. Danach folgt ein Vergleich von LNG und Flüssigwasserstoff. Den Hauptaspekt des Theorieteils stellen die Anwendungen der Kälteenergie da. Abschließend wird ein Überblick über den Hamburger Hafen gegeben, indem näher auf die Ziele des Hafenentwicklungsplan eingegangen wird. Im 3. Kapitel, wird auf durchgeführte Literaturrecherche eingegangen und es werden die Schritte der Nutzwertanalyse erklärt. Auf Grundlage davon erfolgt die Durchführung im 4. Kapitel. Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse werden im 5. Kapitel dargestellt. Anschließend folgt die Diskussion der Ergebnisse, das Fazit und ein kurzer Ausblick auf Forschungsarbeiten, die folgen könnten.

## 2. Theorie

Das folgenden Kapitel gibt eine kurze Definition von Kälteenergie und allgemeine Informationen zu Flüssigwasserstoff, bevor auf das Potenzial von Flüssigwasserstoff und den Verflüssigungsprozess näher eingegangen wird. Es folgt ein Vergleich von Flüssigerdgas und Flüssigwasserstoff der zu den Anwendungen der Kälteenergie überleitet. Abschließend werden Informationen zum Hamburger Hafen gegeben, sowohl zum Thema Flüssigwasserstoff, als auch zur Zukunft des Hafens.

### 2.1. Kälteenergie

Die Nutzung von Kälteenergie steht in dieser Arbeit im Fokus, darum wird im Folgenden eine Definition der Kälteenergie gegeben. Im Falle von LNG oder Flüssigwasserstoff, wird viel Energie benötigt, damit die beiden Gase verflüssigt werden können. Diese aufgewendete Energie wird wieder freigesetzt, sobald die Flüssigkeiten wieder in Gase gewandelt werden.

Unter Kälteenergie versteht man die Energie, die benötigt wird, um ein Objekt auf eine Temperatur zu kühlen, die niedriger ist als die Umgebungstemperatur. Kälte wird in der Technik als das Fehlen von Wärme betrachtet. In der Thermodynamik ist Kälte ein Ungleichgewichtszustand. Dabei wird von dem Ort, an dem Kälte entstehen soll, Wärme abgeführt. Generell gilt, dass Wärme nicht vernichtet werden kann, sondern in andere Energieformen umgewandelt wird. Dieser Grundsatz wird im 1. Hauptsatz der Thermodynamik festgehalten. (Infoblätter Kältetechnik: Physikalische Grundlagen der Kälteerzeugung, o. J.)

In der Kältetechnik werden die in der Energietechnik üblichen Prozesse umgedreht. Einer dieser Umkehrprozesse ist die der Kondensation, also der Übergang vom gasförmigen in den flüssigen Zustand. In der Energietechnik entzieht eine Flüssigkeit bei ihrer Verdunstung oder Verdampfung der Umgebung thermische Energie und wandelt diese in Verdampfungsenthalpie um. Aus der Umgebung fließt immer weiter Wärme nach, damit das Gleichgewicht wieder hergestellt werden kann. Durch Isolationen kann dieser Vorgang gebremst, aber nicht gestoppt werden. (Infoblätter Kältetechnik: Physikalische Grundlagen der Kälteerzeugung, o. J.)

### 2.2. Flüssigwasserstoff

#### 2.2.1. Allgemein

Im Universum ist Wasserstoff mit einem Massenanteil von 75 % das häufigste und leichteste chemische Element (Felixberger, 2017). Auf der Erde beträgt der Anteil an gebundenem Wasserstoff in der Erdhülle 0,88 % und Wasserstoff kommt auf der Erde nur in Verbindung mit anderen Elementen vor (ebd.). Der Wasserstoffanteil in Wasser beträgt 11 %, wodurch das Element nahezu unbegrenzt verfügbar ist (ebd.). Wasserstoff liegt unter Normalbedingungen<sup>3</sup>

---

<sup>3</sup> Normalbedingungen sind in DIN 1343 festgelegt: 273,15 K bzw. 0 °C und 1,01325 bar

gasförmig vor und hat einen Siedepunkt von  $-252\text{ °C}$  (Zhang et al., 2011). Die Eigenschaften von Flüssigwasserstoff sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Eigenschaften von Flüssigwasserstoff (Alekseev et al., 2023; Peschka, 1984)

Eigenschaft	Flüssigwasserstoff
Temperatur	$-252,9\text{ °C}$
gravimetrische Energiedichte <sup>4</sup>	33,3 kWh/kg
volumetrische Energiedichte <sup>5</sup>	2,4 kWh/l
Reinheit	99,9999 %
Aufbau des Wasserstoffmoleküls	zwei Protonen & zwei Elektronen
Parawasserstoff	99,8 %

Das Wasserstoffmolekül besteht aus zwei Protonen und zwei Elektronen, es besitzt zwei Modifikationen, die auf chemischer Ebene identisch sind und sich auf physikalischer Ebene unterscheiden. Diese Modifikationen sind wichtig für die Wasserstoff Verflüssigung. Die Unterscheidung der Modifikationen, ist die Anordnung der Kernspins<sup>6</sup> der beiden Atome im Molekül. Die Kernspins der Protonen führen zu einer parallelen oder antiparallelen Ausrichtung zueinander. Bei einer parallelen Ausrichtung zueinander, fand ein symmetrischer Kernspin statt, der als Orthowasserstoff bezeichnet wird. Dementsprechend sind die Protonen beim Parawasserstoff antiparallel zueinander ausgerichtet. Ein großer Unterschied zwischen Para- und Orthowasserstoff ist die Wärmekapazität. Insgesamt ist Parawasserstoff energetisch niedriger. (Essler, 2021)

Wasserstoff setzt sich oberhalb von 250 K, also  $-23,15\text{ °C}$ , aus 75 % Orthowasserstoff und 25 % Parawasserstoff zusammen und diese Zusammensetzung wird als Normalwasserstoff bezeichnet (Essler, 2021). Oberhalb von  $-23,15\text{ °C}$  bleibt die Zusammensetzung gleich, unterhalb davon ist das Verhältnis von Ortho- und Para-Wasserstoff lediglich von der Temperatur abhängig (ebd.). Dabei verschiebt sich das Verhältnis zunehmend in Richtung des energetisch niedrigeren Parawasserstoffs, bis beim Flüssigwasserstoff ein Parawasserstoff Anteil von 99,8 % vorliegt (Alekseev et al., 2023).

Die volumetrische Energiedichte von gasförmigem Wasserstoff liegt mit  $0,003\text{ kWh/l}$  deutlich unter der von flüssigem Wasserstoff mit  $2,4\text{ kWh/l}$  (Alekseev et al., 2023). Dies bedeutet, dass bei gleichem Volumen 800-mal mehr Flüssigwasserstoff als gasförmiger Wasserstoff transportiert werden kann (ebd.). Die Erhöhung der Speicherdichte macht Flüssigwasserstoff für den Wasserstoffimport per Schiff interessant. Ein weiterer Vorteil von  $\text{LH}_2$  ist, dass für die Nutzung von  $\text{H}_2$  keine chemische Umwandlung notwendig ist, da es sich im Gegensatz zu Ammoniak

<sup>4</sup> bezogen auf die Energie pro Masse eines Stoffes (LUMITOS AG, 2024a)

<sup>5</sup> bezogen auf die Energie pro Raumvolumen eines Stoffes (LUMITOS AG, 2024a)

<sup>6</sup> Kernspin oder auch Eigendrehimpuls der Protonen im Atomkern (Essler, 2021)

um die gleiche gravimetrische Energiedichte handelt (Staudt et al., 2024). Außerdem ist kein zusätzlicher Energieaufwand für die Regasifizierung von Flüssigwasserstoff notwendig, wie es zum Beispiel bei flüssigem Erdgas der Fall wäre (ebd.). Nachteil ist, dass die Infrastruktur noch nicht vorhanden ist und die Verflüssigung und der Transport noch nicht im großen Maßstab durchgeführt wurden (IRENA, 2022). Dies kann zum einen zu unbekanntem Risiken oder Nachteilen führen, zum anderen wird Zeit für eine großtechnische Umsetzung benötigt (IRENA, 2022; Staudt et al., 2024).

### 2.2.2. Potenzial von Flüssigwasserstoff

In verschiedenen Studien wird deutlich, dass Deutschland viel Wasserstoff benötigt, um klimaneutral werden zu können. Flüssigwasserstoff bietet dabei großes Potenzial, da große Mengen an Wasserstoff importiert werden könnten. Ein weiterer Aspekt von Flüssigwasserstoff ist, dass neben Wasserstoff, auch wertvolle Kälteenergie enthalten ist, die nutzbar gemacht werden könnte. (Alekseev et al., 2023)

Bereits heute wird Flüssigwasserstoff in einer Reihe von Nischenanwendungen eingesetzt (IRENA, 2022). In der Raumfahrt als Treibstoff, in der Halbleiterindustrie aufgrund seiner hohen Reinheit und zur Versorgung von Wasserstofftankstellen. Im Mobilitätssektor, zum Beispiel bei LWKs, gibt es mittlerweile erste Prototypen, die mit flüssigem Wasserstoff auf Langstrecken unterwegs sind und damit eine Alternative zu fossil und elektrisch betriebenen LKWs darstellen. Ein weiteres Anwendungsgebiet, in dem noch viel geforscht wird, ist die Kühlung von Supraleitern. Das sind Leitungen, in denen Strom verlustfrei transportiert werden kann, wenn die Temperatur des Supraleiters dauerhaft unterhalb der Sprungtemperatur liegt. Aktuell wird flüssiges Helium oder flüssiger Stickstoff zur Kühlung verwendet. Flüssigwasserstoff könnte diese ersetzen. Außerdem könnte durch eine hybride Pipeline Flüssigwasserstoff und verlustfreier Strom transportiert werden, wenn Supraleiter in Flüssigwasserstoff-Pipelines liegen würden. (Alekseev et al., 2023)

Durch den weit verbreiteten Einsatz im industriellen Umfeld und insbesondere in der Raumfahrt konnten sowohl Wasserstoff als auch Flüssigwasserstoff ausgiebig unter Sicherheitsaspekten getestet werden. Im Vergleich zu anderen Brennstoffen, ist Flüssigwasserstoff nicht mehr oder weniger gefährlich, er verhält sich aber in vielerlei Hinsicht anders. Aufgrund des geringen Drucks, unter dem Flüssigwasserstoff gespeichert wird, ist z. B. die Gefahr des Berstens eines Behälters gering. Wasserstoff, der aus Flüssigwasserstoffbehältern verdampfen kann, muss sicher und vernünftig gehandhabt werden. (Alekseev et al., 2023; KIT, 2024)

### 2.2.3. Wasserstoff Verflüssigungsprozess

Die Verflüssigung von Wasserstoff beruht auf dem physikalischen Joule-Thomson-Effekt (LUMITOS AG, 2024b). Der Prozess, der diesen Effekt nutzt, wird als Hampson-Linde-Prozess bezeichnet (ebd.). Der Joule-Thomson-Effekt beschreibt die Temperaturveränderung eines

realen Gases durch eine Druckveränderung ohne Enthalpie<sup>7</sup> Veränderung (ebd.). Durch die Ausnutzung dieses Effekts schafften es im Jahre 1898 C. v. Linde in Deutschland und W. Hampson in England erstmalig Luft mit einer einfachen Methode zu verflüssigen (Saur, 1958). Dies ebnete den Weg für J. Dewar, der am 10. Mai 1898 zum ersten Mal erfolgreich Wasserstoff verflüssigte (ebd.).

Für den Verflüssigungsprozess ist die Kenntnis, dass Wasserstoff bei Raumtemperatur einen negativen Joule-Thomson-Koeffizienten aufweist und die Inversionstemperatur von Wasserstoff bei  $-73\text{ °C}$  liegt, von entscheidender Bedeutung. Ein negativer Joule-Thomson-Koeffizient hat zur Auswirkung, dass das Gas bei einem Druckabfall erwärmt wird. Bei einem positiven Joule-Thomson-Koeffizienten würde sich das Gas bei Druckabfall abkühlen. Die Inversionstemperatur ist der Umschlagspunkt, die beim Joule-Thomson-Prozess darüber entscheidet, ob eine Abkühlung oder Erwärmung erfolgt. Bezogen auf den Wasserstoff bedeutet es, dass oberhalb von  $-73\text{ °C}$  bei einem Druckabfall das Gas erwärmt wird und unterhalb der Temperatur eine Abkühlung stattfindet. (Aziz, 2021)

In Abbildung 1 ist ein Verflüssigungsprozess für Wasserstoff dargestellt, der Hampson-Linde-Prozess. Am Anfang des Prozesses wird der gasförmige Wasserstoff im Kompressor verdichtet, wodurch das Druckniveau erhöht wird und der Wasserstoff gekühlt wird. Eine zusätzliche Kühlung findet durch die Einleitung von flüssigem Stickstoff ( $\text{LN}_2$ ) statt. Danach wird der Wasserstoff in Wärmeüberträger (WÜT) eingeleitet und dort weiter runtergekühlt. Wenn der Wasserstoff kälter als  $-73\text{ °C}$  ist, kann er in ein Expansionsventil eingeleitet werden, es findet eine Druckverringerung statt und durch den Joule-Thomson-Effekt verflüssigt sich ein Teil des Wasserstoffs. Der verbleibende gasförmige Wasserstoff wird in den Kreislauf zurückgeführt und mit der neuen gasförmigen Wasserstoffzufuhr gemischt. (Aziz, 2021; Staudt et al., 2024)

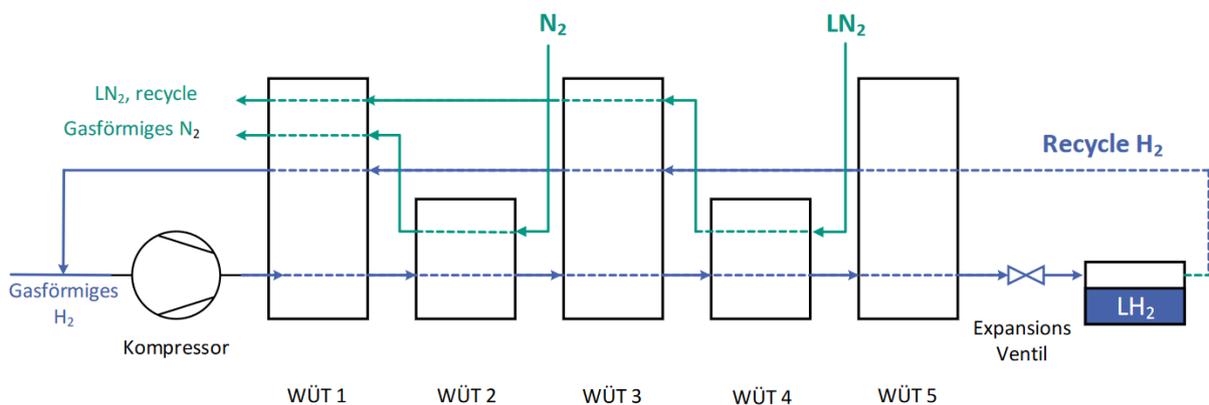


Abbildung 1: Linde Prozess zur Verflüssigung von Flüssigwasserstoff (Staudt et al., 2024)

<sup>7</sup> Enthalpie ist eine thermodynamische Zustandsgröße, die den Energiegehalt eines Stoffes kennzeichnet. Bei zum Beispiel Verdampfung oder Kondensation kann durch die Differenz der Enthalpien der Energieumsatz bei Zustandsänderung beschrieben werden. (EnArgus, 2024)

Auf den Verflüssigungsschritt in der Wertschöpfungskette von Flüssigwasserstoff, entfällt mit 30-36 % der größte Teil des Energieverbrauchs. Dies könnte auf 15 %, durch weitere Forschung an der Technik und der Vergrößerung des Prozesses, gesenkt werden. (IRENA, 2022)

### 2.3. Vergleich Flüssigerdgas und Flüssigwasserstoff

LNG ist der nächstliegende großtechnische Energieträger und kann damit als Referenzpunkt für Flüssigwasserstoff dienen. LNG ist ein Energieträger, der ebenfalls kryogene Bedingungen hat, im weltweiten Handel eingesetzt wird und bereits einen beträchtlichen Marktanteil hat. Besonders bei den Anwendungen der Kälteenergie ist eine Übertragung der Erkenntnisse von LNG auf LH<sub>2</sub> sinnvoll. LNG ist in dem Bereich bereits weiter erforscht als LH<sub>2</sub>. (IRENA, 2022)

Liquefied Natural Gas, kurz LNG, ist die internationale Bezeichnung für Flüssigerdgas. Erdgas wird dafür auf -162 °C gekühlt. Ähnlich wie bei Flüssigwasserstoff, wird das Volumen von LNG durch die Verflüssigung verringert, ungefähr um das 600-fache, weshalb es sich für den Transport per Schiff anbietet. (NDR, 2024)

Die verschiedenen Eigenschaften der beiden Flüssigkeiten, sind in Tabelle 2 dargestellt. Flüssigwasserstoff ist mit einer Siedetemperatur von -253 °C deutlich kälter, als LNG. Die Wärme, die für die Regasifizierung aufgewendet werden muss, ist etwas geringer als bei LNG, was unter anderem an dem geringeren Heizwert liegt. Energetisch betrachtet, kann aus LH<sub>2</sub> mehr Kälte gewonnen werden. (Janczura, 2022)

Tabelle 2: Vergleich der Eigenschaften von LNG und LH<sub>2</sub> (Eigene Darstellung, Daten von Janczura, 2022)

Eigenschaften	Einheit	LNG	LH <sub>2</sub>
Siedetemperatur <sup>8</sup>	°C	-162	-253
Volumetr. Dichte	kWh/l	6,1	2,4
Wärmezufuhr für Re- gasifizierung <sup>9</sup>	MJ/Nm <sup>3</sup>	0,6	0,35
Heizwert	MJ/Nm <sup>3</sup>	35,7	10,7
Kälteenergie	MJ/Nm <sup>3</sup>	0,75	1,3

LNG besteht zu 98 % aus Methan (Cox, 2024), welches bei der Produktion und beim Transport entweichen kann. Methan ist ungefähr 25 Mal so klimaschädlich wie Kohlenstoffdioxid und hat damit eine starke Auswirkung auf den Treibhauseffekt (NDR, 2024). Flüssigwasserstoff hingegen, gilt als CO<sub>2</sub> frei, solange der Strom für die Produktion aus erneuerbaren Energien stammt (Alekseev et al., 2023).

<sup>8</sup> Unter Normaldruck nach DIN 1343: 1,01325 bar

<sup>9</sup> Notwendige Menge an Wärme die zugeführt werden muss, damit die Regasifizierung funktioniert (Janczura, 2022).

Der Technologiereifegrad von Flüssigwasserstoff liegt bei der Verflüssigung bei 6-7, also bei Prüfung und Prototyp (Dr. Schwarz, 2024). Ebenso wie der Transport und die Regasifizierung im Importland (Dr. Schwarz, 2024). Langfristig betrachtet, hat flüssiger Wasserstoff den energetisch höchsten Wirkungsgrad, im Vergleich mit anderen Wasserstoff Transportoptionen (Dr. Schwarz, 2024; Staudt et al., 2024). Allerdings muss die Infrastruktur dafür noch ausgebaut werden, sowie die Verflüssigung und der Transport für die prognostizierten Handelsströme demonstriert werden (Dr. Schwarz, 2024; Staudt et al., 2024). Der prognostizierte Wasserstoffbedarf ist in Abbildung 2 dargestellt. In dieser wird wir deutlich, dass Europa und Deutschland 2045 eine Diskrepanz zwischen der eigenen Erzeugung und dem eigenen Bedarf haben. Langfristig sind Importe aus nicht europäische Regionen notwendig (Dr. Schwarz, 2024).

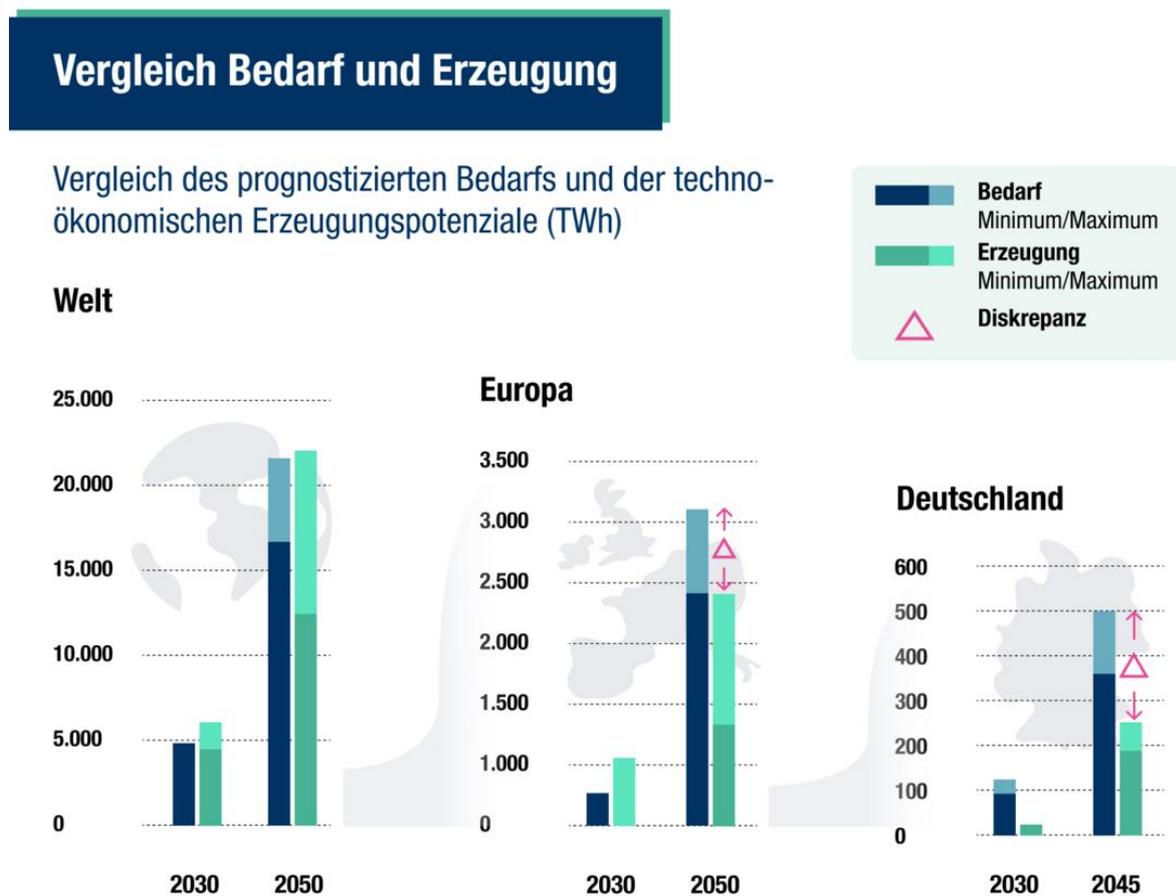


Abbildung 2: Prognostizierter Wasserstoffbedarf der Welt, Europa und von Deutschland (Dr. Schwarz, 2024)

In Abbildung 2 wird dargestellt wie stark der prognostizierte Wasserstoffbedarf von 2030 bis 2045 ansteigt und wie hoch der Wasserstoffbedarf in Deutschland und Europa sein wird.

## 2.4. Anwendungen der Kälteenergie

Flüssigwasserstoff ist schon lange als Kältemittel bekannt (Saur, 1958) und die Verflüssigung wird in einem begrenzten Rahmen kommerziell betrieben, sodass heute nur begrenzt Anwendungsmöglichkeiten der Kälteenergie aus Flüssigwasserstoff existieren (IRENA, 2022). Um grundsätzlich Anwendungsmöglichkeiten für Kälteenergie identifizieren zu können, wird die Recherche auf heute bekannte Anwendungen der Kälteenergie von LNG erweitert. Ansatz ist, potenzielle Anwendungen für Kälteenergie aus Flüssigwasserstoff zu identifizieren.

Es gibt diverse Auflistungen von potenziellen Anwendungen, die mit der Kälteenergie von LNG betrieben werden können, zum Beispiel von Antonio Atienza-Márquez (Atienza-Márquez et al., 2018). Zu den am meisten untersuchten Anwendungen der LNG Kälteenergie zählen: „kryogene Stromerzeugung, Luftzerlegungsprozesse, CO<sub>2</sub>-Abscheidung oder Meerwasserentsalzung (Atienza-Márquez et al., 2018, S. 467)“. Gemäß Kapitel 2.4 lassen sich die Erkenntnisse aus der Kälteanwendung von LNG auf LH<sub>2</sub> übertragen.

Die Zusammenfassung der Recherche, zu den Anwendungen der Kälteenergie, ist in Form einer Grafik in Abbildung 3 zu finden. In dieser sind verschiedenen Anwendungen der Kälteenergie von LNG und Flüssigwasserstoff anhand ihrer Temperaturniveaus dargestellt. Der Farbverlauf macht deutlich, dass die Anwendungen von links nach rechts immer „wärmer“ werden. Für eine bessere Einschätzung der Temperaturen sind Flüssigwasserstoff und LNG mit einem Strich bei -253 °C beziehungsweise -163 °C eingezeichnet. Eine Anwendung, die nicht abgebildet wurde, ist die kryogene Stromerzeugung, für diese konnte kein Temperaturniveau ermittelt werden.

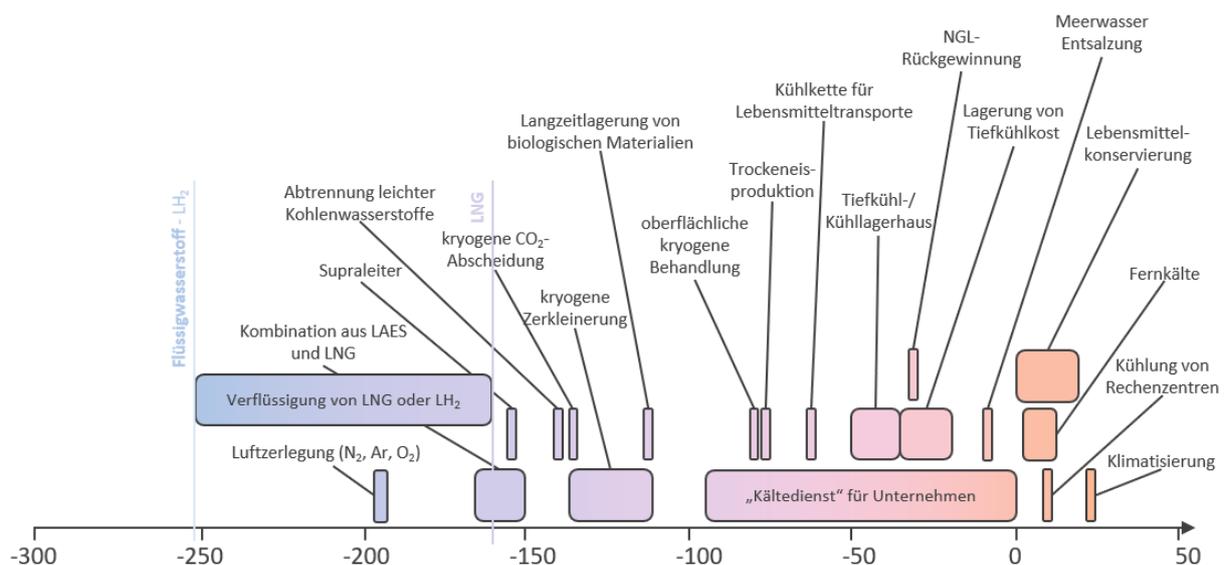


Abbildung 3: Temperaturniveaus für verschiedene Anwendungen, die die Kälte von LNG oder LH<sub>2</sub> nutzen (eigene Darstellung)

Tabelle 3 listet die Anwendungen aus Abbildung 3 aufsteigend nach ihrer Starttemperatur. Zusätzlich sind die Quellen angegeben, in denen die Anwendungen gefunden wurden. Im Anhang befindet sich eine Auflistung aller Anwendungen, in denen die technische Grundlage dieser erläutert wird.

Tabelle 3: Liste verschiedener Kälteenergieanwendungen von LNG und LH<sub>2</sub>

Anwendung	Temperatur [°C]		Quellen
	Start	End	
Verflüssigung von LNG oder LH <sub>2</sub>	-253	-163	(IRENA, 2022)
Luftzerlegung (N <sub>2</sub> , Ar, O <sub>2</sub> )	-193	-191	(Atienza-Márquez et al., 2018; Guo et al., 2019; He et al., 2019; Noor Akashah et al., 2023)
Kombination aus LAES und LNG	-180	-150	(Guo et al., 2019; Noor Akashah et al., 2023)
Supraleiter	-163	-163	(Alekseev et al., 2023)
Abtrennung leichter Kohlenwasserstoffe	-145	-145	(Atienza-Márquez et al., 2018; Guo et al., 2019; He et al., 2019; Noor Akashah et al., 2020)
kryogene CO <sub>2</sub> -Abscheidung	-140	-140	(Atienza-Márquez et al., 2018; Guo et al., 2019; He et al., 2019; Noor Akashah et al., 2023)
kryogene Zerkleinerung	-140	-120	(Atienza-Márquez et al., 2018; Guo et al., 2019)
Langzeitlagerung von biologischen Materialien	-120	-120	(Atienza-Márquez et al., 2018; Guo et al., 2019)
"Kältebetrieb" für Unternehmen	-90	0	(Messineo & Panno, 2011)
oberflächliche Tieftemperaturbehandlung	-80	-80	(Atienza-Márquez et al., 2018; Guo et al., 2019; Gupta et al., 2024)

			(Atienza-Márquez et al., 2018; Guo et al., 2019)
Trockeneisproduktion	-78,5	-78,5	
Kühlkette für Lebensmitteltransport	-60	-60	(He et al., 2019)
Tiefkühl-/ Kühllagerhaus	-50	-35	(Atienza-Márquez et al., 2018)
Lagerung von Tiefkühlkost	-35	-18	(Atienza-Márquez et al., 2018)
NGL-Rückgewinnung	-30	-30	(He et al., 2019)
Meerwasser Entsalzung	-5	-5	(Atienza-Márquez et al., 2018; He et al., 2019; Noor Akashah et al., 2023)
Lebensmittelkonservierung	0	20	(Atienza-Márquez et al., 2018)
Fernkälte	4	10	(Atienza-Márquez et al., 2018)
Kühlung von Rechenzentren	7	7	(He et al., 2019; Noor Akashah et al., 2023)
Klimaanlage	21	24	(Atienza-Márquez et al., 2018)
Kryogene Stromerzeugung			(Atienza-Márquez et al., 2018; Guo et al., 2019; He et al., 2019; Noor Akashah et al., 2023)

Viele der Anwendungen wurden bisher im theoretischen Kontext oder in Forschungsprojekten umgesetzt, jedoch noch nicht im großen Maßstab.

## 2.5. Hamburger Hafen

In diesem Kapitel wird erläutert, warum der Hamburger Hafen im Fokus dieser Arbeit steht und welche Pläne der Hamburger Hafen bis 2040 verfolgt.

### 2.5.1. Flüssigwasserstoff in Hamburg

Der Hamburger Hafen wird weltweit einer der ersten Häfen werden, der in einem großen Maßstab Wasserstoff importieren wird, dies verkündete die EU-Kommissionspräsidentin Ursula von der Leyen am 26. Januar 2024 (HIW Hamburg Invest Wirtschaftsförderungsgesellschaft, 2024).

Auch im Hafenenwicklungsplan des Hamburger Hafens, der 2023 erschien, wird die Relevanz des Hafens selbst und die des Wasserstoffes ebenfalls deutlich (BWI, 2023b). Ein Großteil des deutschen Wasserstoff Importbedarfs soll über Hamburg importiert werden (ebd.). Bei der Erreichung der Klimaziele wird ihm eine weitere wichtige Rolle zugeschrieben, er dient als Bindeglied zwischen unterschiedlichen Energieerzeugungs- und Energieverbrauchstechnologien (Goehermann, 2021). Wasserstoff kann eine klimaneutrale Alternative zu fossilen Energieträgern wie Erdgas bieten, solange die Herstellung mit Strom aus erneuerbaren Energien abläuft.

### 2.5.2. Zukunft des Hafens

Der Hamburger Hafen hat im Jahr 2023 einen Hafenenwicklungsplan veröffentlicht, der die Veränderungen des Hafens bis 2040 beschreibt. Eines der Ziele ist es, im Bereich der Klimaneutralität und des nachhaltigen Wirtschaftens eine Vorreiterrolle zu übernehmen (BWI, 2023c). Er steht unter der Vision „Innovationshafen 2040: Mit Innovationskraft und Qualität zu nachhaltiger Wertschöpfung“ (BWI, 2023c, S. 11). Der Hafen wird auch weiterhin geprägt sein vom Güterumschlag und der leistungsstarken Logistik, allerdings soll dies mit einer breiten, klimaneutralen industriellen Basis verknüpft werden. Der Plan umfasst drei Dokumente: eines, das die strategische Vision klarer herausarbeitet (BWI, 2023c), eines, in dem es um die operative Umsetzung geht (BWI, 2023b) und das dritte fasst die ersten beiden zusammen und gibt einen Überblick (BWI, 2023a).

Es soll ein aktiver Beitrag zu Klimaschutz, Energiewende und Nachhaltigkeit geleistet werden, zum Beispiel indem auf grüne Energieträger wie Wasserstoff gesetzt wird. Es wird die strategische Leitlinie für die Hafenpolitik der kommenden Jahre festlegt, welche in sieben Handlungsfelder unterteilt ist. **1. Digitalisierung**, Förderung von digitalen und autonomen Systemen, durch die eine optimale Steuerung der Logistik und der engen Vernetzung der Branchenakteuren möglich wird. **2. Klimaschutz, Kreislaufwirtschaft und Ökologie**: Nachhaltige Praktiken, wie die Kreislaufwirtschaft und die Umstellung auf regenerative Energieträger und die Reduzierung von Emissionen stehen im Fokus. **3. Infrastrukturerhalt und -ausbau**: Ziel ist die Aufrechterhaltung und Verbesserung der Hafeninfrastruktur. Dabei wird auf einen bedarfsgerechten und ressourcenschonenden Ausbau geachtet. **4. Ansiedlungs- und Flächenstrategie**: aktives Flächenmanagement wird gefördert, damit die Flächeneffizienz sowie die Wertschöpfung gesteigert werden. **5. Transformation der Arbeit**: Anpassung an veränderte Arbeitsbedingungen und -prozesse. **6. E-Commerce**: Berücksichtigung der wachsenden Bedeutung des Online-Handels. **7. Stadt und Hafen**: Betrachtung der Wechselwirkungen zwischen Hafen und Stadt. (BWI, 2023c)

In Abbildung 4 ist eine Karte des Hamburger Hafens zu sehen, mit der zukünftigen Schwerpunktnutzung. Diese wurde im Rahmen des vierten Handlungsfeldes entwickelt. In Abbildung

5 ist die dazugehörige Legende abgebildet. Zum einen kann dadurch die Größe des Hamburger Hafens eingeschätzt werden, zum anderen wird deutlich wie die Schwerpunkte im Hafen bis 2040 gelegt sind.

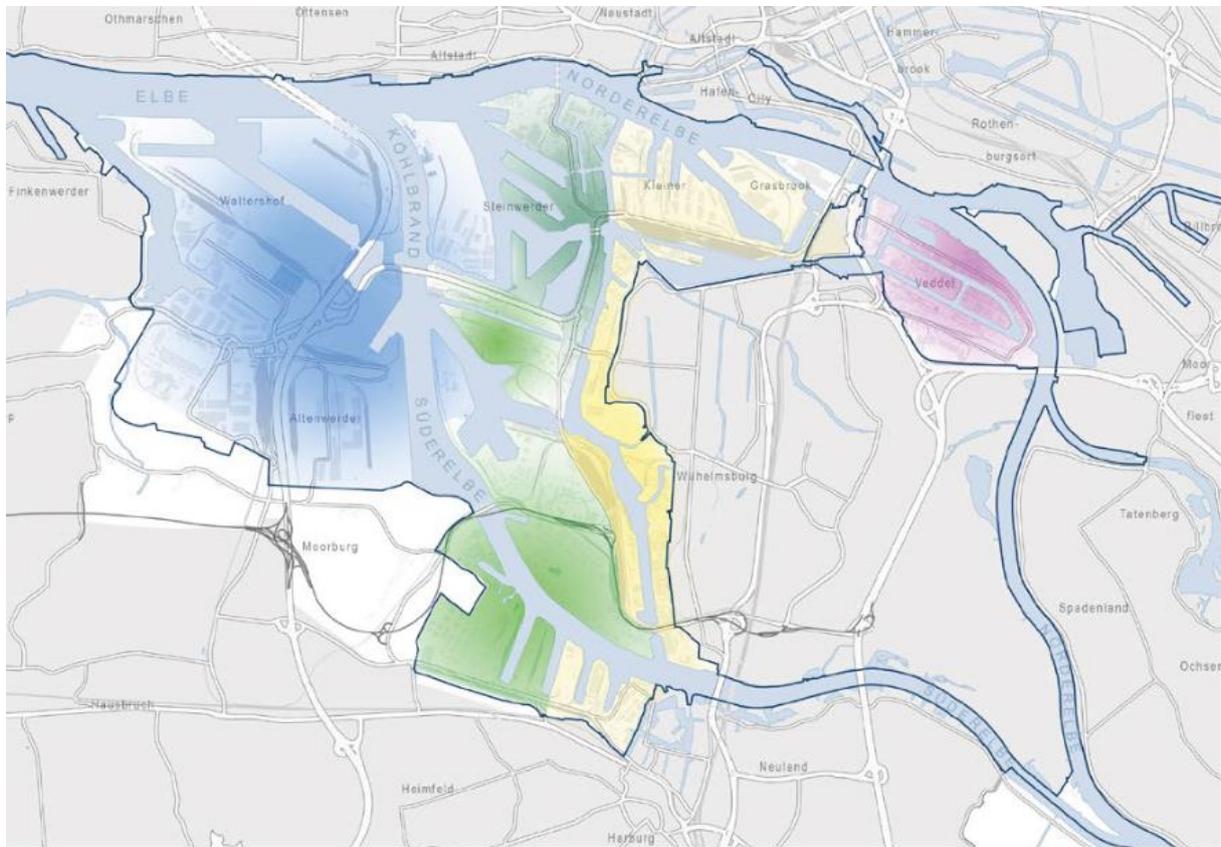


Abbildung 4: Karte der zukünftigen Schwerpunktnutzungen im Hamburger Hafen (BWI, 2023c)

#### Hafenflächen 2040

- |  |   |
|--|---|
| <p><span style="color: blue;">■</span> Deep Sea Hub<br/>Erreichbarkeit für Großschiffe, leistungsfähige trimodale und schwerlastfähige Infrastruktur mit Fokus auf Containerumschlag und Grundstoffindustrie.</p> <p><span style="color: green;">■</span> Maritime Tech and Innovation Hub<br/>Hohe Wertschöpfung, durchlässige citynahe Hafenzone.</p> <p><span style="color: lightgreen;">■</span> Sustainable Energy Hub<br/>Großflächige Industrie- und Umschlagsunternehmen mit ausreichend Abstand zur Wohnbebauung und hoher Integration in die Netzinfrastruktur (Strom, Pipelines).</p> | <p><span style="color: yellow;">■</span> Multipurpose Hub<br/>Hochwertige trimodale Grundstücke mit einem Schwerpunkt auf nicht-containerisiertem Umschlag und zukünftigem direkten Bundesautobahnanschluss.</p> <p><span style="color: purple;">■</span> Port and City Services Hub<br/>Citynahe Grundstücke für Logistik sowie hafennahe technische Dienstleistungsbetriebe und hafennahe Handwerk.</p> |
|--|---|

Abbildung 5: Legende der Karte der zukünftigen Schwerpunktnutzungen im Hamburger Hafen (BWI, 2023c)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass dem Hamburger Hafen nicht nur in Deutschland, sondern auch international eine große Bedeutung beigemessen wird. Unter Berücksichtigung der Netzwerkaktivitäten von **cruh21** in Norddeutschland lässt sich eine signifikante Aktivität hinsichtlich des Imports und der Nachfrage von flüssigem Wasserstoff in der Region feststellen (Almeida et al., 2024). Da der Hamburger Hafen, laut Ursula von der Leyen, weltweit einer der ersten Häfen sein wird, der Wasserstoff in einem großen Maßstab importiert, ist es sinnvoll,

diesen auch in Zusammenhang mit Flüssigwasserstoff näher zu betrachten (HIW Hamburg Invest Wirtschaftsförderungsgesellschaft, 2024). Neben der direkten Nutzungen, zum Beispiel bei Schwerlasttransportern, bietet die Kältenutzung von Flüssigwasserstoff großes Potenzial (Alekseev et al., 2023). Es besteht ein Untersuchungsinteresse inwieweit es im Hamburger Hafen Potenziale für die Nutzung der Kälteenergie aus Flüssigwasserstoff gibt.

## 2.6. Zwischenfazit

Kälteenergie wird im Zuge der Regasifizierung von Flüssigwasserstoff wieder freigesetzt. Flüssigwasserstoff wird bereits in vielen Bereichen eingesetzt, jedoch noch nicht im kommerziellen Maßstab. Um ihn als Wasserstoffimport nutzen zu können, müssen die Prozesse großtechnisch skaliert werden. Mit LH<sub>2</sub> könnte neben Wasserstoff auch wertvolle Kälteenergie importiert werden. (Alekseev et al., 2023)

LNG ist bereits besser erforscht, und es wurden zahlreiche Anwendungen untersucht, bei denen die Kälteenergie genutzt werden könnte. Diese Anwendungen könnten auch mit Flüssigwasserstoff genutzt werden (IRENA, 2022). In flüssigem Wasserstoff steckt mehr Kälteenergie, die genutzt werden könnte, als in LNG (Janczura, 2022).

Der Hamburger Hafen wird einer der ersten Häfen sein, der Wasserstoff importiert (HIW Hamburg Invest Wirtschaftsförderungsgesellschaft, 2024). Eine Möglichkeit des Imports ist flüssiger Wasserstoff. In den folgenden Kapiteln wird untersucht, welche Anwendungsmöglichkeiten für Kälteenergie aus Flüssigwasserstoff im Hamburger Hafen bestehen.

## 3. Methodik

Für die Untersuchung des Anwendungspotenzials von Kälteenergie aus Flüssigwasserstoff im Hamburger Hafen werden die Methodiken einer Literaturrecherche und Nutzwertanalyse genutzt. Eine Nutzwertanalyse eignet sich an dieser Stelle, da sie ein bewehrtes Tool ist, um ein komplexes Entscheidungsproblem zu lösen. Bei der Durchführung der Nutzwertanalyse dienen Erkenntnisse aus dem Theorieteil in Kapitel 2.4 und 2.5 sowie weitere Recherchen aus der Literatur als Grundlage für die Herausarbeitung der Entscheidungsalternativen, der Bewertungskriterien und der Bewertung selbst. Die Literaturrecherche diente dazu, viele Anwendungen der Kälteenergie zu identifizieren, damit diese in der Nutzwertanalyse miteinander verglichen werden können.

### 3.1. Literaturrecherche

Für die in Kapitel 2.5 aufgeführten Anwendungen der Kälteenergie wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt. Im ersten Schritt wurden Anwendungsmöglichkeiten für Flüssigwasserstoff gesucht. Das Ergebnis davon war, dass Flüssigwasserstoff schon lange als Kältemittel bekannt und eingesetzt wird, allerdings nur im kleinen Rahmen. Im kommerziellen Rahmen gibt es bisher keine Anwendung der Kälteenergie von  $LH_2$ , weshalb die Anwendungsmöglichkeiten von LNG untersucht wurden. LNG hat ein höheres Temperaturniveau und wird in mehreren Ländern großskalig verwendet. Ausgangspunkt für die weiterführende Recherche waren die Arbeiten von Antonio Atienza-Márquez (2018), Tianbiao He (2019) und L N Guo (2019). Durch diese Studien konnte eine Liste der Anwendungen erstellt werden. Darüber hinaus wurden ungefähr 25 weitere Paper gelesen und zehn davon näher analysiert und ausgewertet.

### 3.2. Nutzwertanalyse

In dieser Arbeit werden die verschiedenen Anwendungsmöglichkeiten der Kälteenergie von Flüssigwasserstoff miteinander verglichen, um ihr Anwendungspotenzial im Hamburger Hafen bestimmen zu können. Die Nutzwertanalyse gilt als nicht monetäres Bewertungsverfahren, bei dem unterschiedliche Maßnahmen unter der Betrachtung von verschiedenen Kriterien miteinander verglichen werden (Böhm et al., 2002). Es können komplexe Entscheidungsprobleme, anhand von Auswahlentscheidungen, Rankings und Objekt- und Subjektbewertungen, gelöst werden. Durch die Gewichtung der Kriterien kann die Wichtigkeit bestimmter Aspekte hervorgehoben werden. (Kühnapfel, 2021)

An dieser Stelle wird zunächst die wissenschaftliche Methodik der Nutzwertanalyse vorgestellt. Die Nutzwertanalyse wird anhand des Schemas von Kühnapfel durchgeführt. In seinem Leitfaden für Scoring und Nutzwertanalysen beschreibt er zehn Arbeitsschritte zur Durchführung

einer Nutzwertanalyse. In Anlehnung an seine Tabelle sind in Tabelle 4 die Arbeitsschritte für das Vorgehen bei einer Nutzwertanalyse dargestellt. (Kühnapfel, 2021)

*Tabelle 4: Vorgehen bei einer Nutzwertanalyse (nach Kühnapfel, 2021)*

<b>Nummerierung</b>	<b>Arbeitsschritt</b>
1	Organisation des Arbeitsumfelds und Planung
2	Ziel und Entscheidungsproblem
3	Auswahl der Entscheidungsalternativen
4	Bestimmung der Entscheidungskriterien
5	Gewichtung der Entscheidungskriterien
6	Skalen und Bewertungsvorschriften
7	Bewertung der Entscheidungskriterien
8	Berechnung des Nutzwerts bzw. Scores
9	Sensitivitätsanalyse
10	Präsentation und Dokumentation des Ergebnisses

#### *Schritt 1: Organisation des Arbeitsumfelds und Planung*

Kühnapfel (2021) geht in seiner Ausarbeitung davon aus, dass die Erarbeitung in einem Projektteam erfolgt, deshalb soll im ersten Schritt bestimmt werden, wer die Projektleitung übernimmt, welche Personen zum Teilnehmendenkreis gehören und es werden Termine geblockt und ein Zeitplan erarbeitet.

#### *Schritt 2: Ziel und Entscheidungsproblem*

In diesem Schritt wird das Ziel definiert und festgelegt, welchen Beitrag zur Entscheidung die Nutzwertanalyse leisten soll (Kühnapfel, 2021).

#### *Schritt 3: Auswahl der Entscheidungsalternativen*

Bei der Auswahl der Entscheidungsalternativen ist es wichtig, dass sie voneinander unterscheidbar und gleichzeitig miteinander vergleichbar sind. Falls zu viele Entscheidungsalternativen vorliegen, besteht die Option durch die Festlegung von Muss-Anforderungen Ausschlusskriterien festzulegen, die eine Selektion ermöglichen. (Kühnapfel, 2021)

#### *Schritt 4: Bestimmung der Entscheidungskriterien*

Im vierten Schritt, der **Bestimmung der Entscheidungskriterien**, sind die Anforderungen die hierbei erfüllt werden müssen: Vollständigkeit, Relevanz, Überschneidungsfreiheit, Interdependenzfreiheit, Bewertbarkeit und Reproduzierbarkeit des Bewertungsverfahrens.

Sie sollen in Summe die Zielsetzung hinreichend beschreiben, allerdings sollen alle Kriterien eine relevant für das Erreichen des Ziels sein. Durch die Überschneidungsfreiheit wird darauf geachtet, dass keine Kriterien gewählt werden, die sich so ähnlich sind, dass sie im Endeffekt die Gewichtung des Punktes erhöhen. Mit Interdependenzfreiheit ist gemeint, dass sich Kriterien nicht gegenseitig bedingen dürfen oder in Wechselwirkung miteinander stehen dürfen. Für die Bewertung müssen alle notwendigen Informationen zur Verfügung stehen, besonders relevant, wenn Teilnehmende anhand einer Nutzwertanalyse eine Bewertung vornehmen sollen. Das letzte Kriterium beschreibt, dass das Verfahren, wie eine Bewertung durchgeführt wird, wiederholbar sein muss. Die Entscheidungskriterien bestimmen in ihrer Gesamtheit die Art und Weise, wie die Bewertung durchgeführt wird. Daher ist es wichtig, das Ziel im Auge zu behalten, damit die Kriterien daraus abgeleitet werden können und eine vollständige und zielgerichtete Bewertung sichergestellt werden kann. (Kühnapfel, 2021)

#### *Schritt 5: Gewichtung der Entscheidungskriterien*

Bei der **Gewichtung der Entscheidungskriterien** ist entscheidend, dass insgesamt eine Summe von 100 % entsteht. Wenn viele Kriterien vorliegen, besteht die Option diese in Kategorien zu unterteilen, um eine Übersichtlichkeit beizubehalten. (Kühnapfel, 2021)

#### *Schritt 6: Skalen und Bewertungsvorschriften*

Die Wahl der Skalen ist wichtig, da diese die Bewertung beeinflussen können. Die grundsätzlichen Voraussetzungen sind, Praktikabilität, Repräsentativität, Universalität und Richtungsgleichheit. (Kühnapfel, 2021)

Die Skalen müssen auf den ersten Blick verstanden werden, es ist möglich sich zum Beispiel am Schulnotensystem des jeweiligen Landes zu orientieren. Durch die Repräsentativität wird beachtet, dass die Skala den zu bewertenden Entscheidungsoptionen passt. Eine Skala von eins bis zehn, ergäbe für die Bewertung eines binären Systems keinen Sinn. Idealerweise wird in der gesamten Nutzwertanalyse eine Skala verwendet. Der letzte Schritt der Richtungsgleichheit gibt an, dass bei allen Kriterien schlechte Ergebnisse mit wenigen Punkten und gute Ergebnisse mit vielen Punkten bewertet werden. Dadurch kann gewährleistet werden, dass eine hoher Nutzwert besser ist, als ein niedriger. (Kühnapfel, 2021)

### *Schritt 7: Bewertung der Entscheidungskriterien*

In diesem Schritt wird das Prozedere für die Bewertung festgelegt. Üblicherweise werden die Kriterien nacheinander durchgegangen und bewertet. Es besteht die Option, dass Bewertungen in Gruppen stattfinden. Wenn Teilnehmende die Nutzwertanalyse bewerten, sollte ihnen die Kriteriums Gewichtung, nach Möglichkeit, vorher nicht gezeigt werden. Dies sorgt dafür, dass auf die Kriterien mit einer geringen Gewichtung ein geringeres Augenmerk gelegt wird. (Kühnapfel, 2021)

### *Schritt 8: Berechnung des Nutzwerts bzw. Scores*

Die Bewertungen des Erfüllungsgrads jedes Kriteriums werden mit der jeweiligen Gewichtung multipliziert. Anschließend werden die Bewertungen miteinander addiert und die Gesamtbewertung kann abgegeben werden. Wenn mehrere Personen die Nutzwertanalyse durchgeführt haben, können die Ergebnisse miteinander verglichen werden. (Kühnapfel, 2021)

### *Schritt 9: Sensitivitätsanalyse*

In diesem Schritt wird die Gewichtung der Kriterien variiert und untersucht, ob und wie sich dies auf das Endergebnis auswirkt. Damit kann der Einfluss dieses Parameters untersucht werden. Dies gibt Aufschluss über die Robustheit der Ergebnisse. Die Robustheit setzt sich aus der Gewichtung der Kriterien und der Bewertung inwieweit ein Kriterium erfüllt wird zusammen. Diese Analyse ermöglicht es, die Parameter mit dem größten Einfluss auf das Ergebnis zu identifizieren und Bewertungsfehler aufzudecken. Ein mögliches Vorgehen dazu gliedert sich in vier Analyseschritte. Im 1. Schritt werden alle Kriterien gleich gewichtet. Im 2. Schritt werden die Gewichtungsspitzen geglättet und im 3. Schritt erfolgt eine Spreizung der Gewichtungen. Im 4. Schritt werden die Bewertungen der Kriterien variiert. (Kühnapfel, 2021)

Die ersten drei Schritte variieren dabei die Gewichtungen und der letzte Schritt legt den Fokus auf die Bewertungen der Kriterien. Der letzte Schritt bietet sich insbesondere dann an, wenn mehrere Personen eine Bewertung der Nutzwertanalyse vorgenommen haben. Dann können die optimistischste und die pessimistischste Bewertung miteinander verglichen werden, um zu überprüfen ob die gleiche Rangfolge vorliegt. (Kühnapfel, 2021)

Das Ziel der Sensitivitätsanalyse ist es, die Robustheit der ermittelten Ergebnisse zu überprüfen. Wenn sich die Rangfolge der Nutzwerte nicht ändert, sind die Ergebnisse robust und belastbar. Ändert sich die Rangfolge, können die Unterschiede zwischen den Entscheidungsalternativen nicht als signifikant angesehen werden. (Kühnapfel, 2021)

### *Schritt 10: Präsentation und Dokumentation des Ergebnisses*

Im letzten Schritt erfolgt die Präsentation und die Dokumentation des Verfahrens und der Ergebnisse. Bei der Präsentation wird auch auf die Robustheit der Ergebnisse eingegangen. Es wird über die Methodik begründet, ob den Ergebnissen getraut werden kann und es wird eine Handlungsempfehlung abgegeben. Bei der Dokumentation werden zwei Aufgaben erfüllt. Erstens sollen die Arbeitsschritte im Nachhinein nachvollziehbar sein und zweitens soll es möglich sein zu einem späteren Zeitpunkt die Nutzwertanalyse zu wiederholen und die Ergebnisse miteinander zu vergleichen. (Kühnapfel, 2021)

Die zehn Schritte dienen der strukturierten Durchführung einer Nutzwertanalyse und unterstützen die Aufrechterhaltung einer guten Arbeitsstruktur. (Kühnapfel, 2021)

## 4. Durchführung Nutzwertanalyse

In diesem Kapitel erfolgt die Durchführung und Auswertung der Nutzwertanalyse, welche anhand der in der Methodik erklärten Arbeitsschritte ausgeführt wird.

### *Schritt 1: Organisation des Arbeitsumfelds und Planung*

Der erste Schritt entfällt in dieser Arbeit, da die Arbeit in Einzelarbeit durchgeführt wurde und somit keine Koordination des Projektteams stattfinden musste.

### *Schritt 2: Ziel und Entscheidungsproblem*

Im zweiten Schritt wird das Ziel und das Entscheidungsproblem der Nutzwertanalyse herausgestellt. Das Ziel dieser Nutzwertanalyse ist es, die verschiedenen Anwendungen der Kälteenergie anhand ausgewählter Kriterien und mithilfe von Gewichtungsfaktoren bewerten und vergleichen zu können. Das Entscheidungsproblem entspricht der Forschungsfrage, welche die Anwendungen der Kälteenergie mit dem größten Potenzial für den Hamburger Hafen zu identifizieren versucht.

### *Schritte 3 bis 8*

Schritte drei bis acht erfolgen in den nächsten Unterkapiteln. Mit diesen wird die Nutzwertanalyse aufgebaut, sodass die Berechnung und Sensitivitätsüberprüfung aus Schritt neun im 5. Kapitel folgen kann. Schritt zehn, die Präsentation und Dokumentation der Ergebnisse, ergibt sich durch die in Kapitel 5 dargelegten Ergebnisse.

### 4.1. Auswahl der Entscheidungsalternativen

Die Entscheidungsalternativen dieser Nutzwertanalyse sind die in Kapitel 2.4 dargestellten Kälteenergieanwendungen. Sie sind durch die Art wie die Anwendungen ablaufen unterscheidbar und durch die Nutzung der Kälteenergie miteinander vergleichbar. Eine Vorauswahl dieser erfolgt über Muss-Anforderung. Die Muss-Anforderungen in dieser Arbeit sind:

1. Kompatibilität mit den bestehenden Systemen des Hamburger Hafens oder den Handlungsfeldern des Hafenentwicklungsplans.
2. Anwendungen sind in der Literatur mit ausreichend Informationen beschrieben und sind dort nicht bereits mit einer gravierenden Nachteilhaftigkeit bewertet, wie z. B. eine geringe Wirtschaftlichkeit.
3. Anwendung dient nicht der Nutzung von Erdgas oder seiner Bestandteile.

Mit dem ersten Kriterium wird geprüft, inwieweit die Anwendung bereits im Hamburger Hafen eingesetzt wird oder zukünftig eingesetzt werden könnte, da sie zu den Handlungsfeldern

des Hafentwicklungsplans passt. Hierzu wird eine Recherche auf Google Maps durchgeführt, ob die jeweiligen Anwendungen im Hamburger Hafen zu finden sind. Die Bilder befinden sich im Anhang. Ist dies der Fall, gilt das Kriterium als erfüllt, ist dies nicht der Fall, erfolgt ein Abgleich mit den Handlungsfeldern des Hamburger Hafentwicklungsplans.

Mit dem zweiten Kriterium wird die Literatur dahingehend überprüft, ob generell ausreichend Informationen beschrieben sind und ob dort nicht bereits gravierenden Nachteilhaftigkeit benannt wurden, siehe Tabelle 3.

Das dritte und letzte Kriterium stellt sicher, dass für die Anwendung kein Erdgas oder dessen Bestandteile benötigt werden. LNG bietet eine gute Übergangslösung, sollte aber aufgrund seiner Klimaschädlichkeit nicht für die zukünftige Energiesicherheit eingeplant werden. Dies wird auch bei der Sichtung der in Tabelle 3 aufgeführten Literatur deutlich.

In Tabelle 5 sind die Entscheidungsalternativen, sowie die Muss-Anforderungen aufgelistet. Ein Kreuz oder ein Häkchen zeigt an, ob eine Muss-Anforderung erfüllt oder nicht erfüllt ist. In der Spalte ganz rechts wird die Entscheidung, ob eine Alternative weiter analysiert werden soll, ebenfalls durch ein Kreuz oder ein Häkchen gekennzeichnet. Unterhalb der Tabelle sind für jede Anwendung die Rechercheergebnisse und die daraus resultierenden Argumente für die Muss-Anforderungen zusammengefasst.

*Tabelle 5: Muss-Anforderungen der Kälteenergie Anwendungen*

<b>Alternative</b>	<b>1.Kompatibilität Hamburger Hafen</b>	<b>2.Keine geringe Wirtschaftlich- keit</b>	<b>3.Keine Nutzung Erdgas</b>	<b>Entscheidung von</b>
Stromerzeugung	✓	X	✓	X
Klimaanlage	X	✓	✓	X
Kühlung von Rechenzentren	✓	✓	✓	✓
Fernkälte	✓	✓	✓	✓
Lebensmittel- konservierung	✓	✓	✓	✓
Meerwasser Entsalzung	X	✓	✓	X
NGL-Rückgewinnung	X	✓	X	X
Lagerung von Tiefkühlkost	✓	✓	✓	✓

Tiefkühl-/ Kühlagerhaus	X	✓	✓	X
Kühlkette für Lebensmittel- transporte	✓	X	✓	X
Trockeneis- produktion	X	✓	✓	X
Oberflächliche Tieftempera- turbehandlung	X	✓	✓	X
„Kältedienst“ für Unterneh- men	✓	✓	✓	✓
Langzeitlage- rung von bio- logischen Ma- terialien	X	✓	✓	X
kryogene Zer- kleinerung	X	✓	✓	X
kryogene CO <sub>2</sub> - Abscheidung	✓	✓	✓	✓
Abtrennung leichter Koh- lenwasser- stoffe	✓	✓	X	X
Supraleiter	✓	✓	✓	✓
Kombination aus LAES und LNG	✓	✓	✓	✓
Luftzerlegung	✓	✓	✓	✓
Verflüssigung von LNG oder LH <sub>2</sub>	✓	✓	X	X

### Stromerzeugung

Ausschluss durch Anforderung 2, da der Bedarf an kalter Energie bei der kryogenen Stromerzeugung gering ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die hochwertige Kühlkapazität von LNG im Prozess der kryogenen Stromerzeugung in Energie niedriger Qualität umgewandelt wird. Aus Sicht der wirtschaftlichen Effizienz ist die Stromerzeugung nicht der beste Weg, um die Kälteenergie zu nutzen. (Guo et al., 2019)

### Klimaanlage

Ausschluss durch Anforderung 2, da Klimaanlagen zwar gelistet sind, aber nicht näher erläutert wird, wie die Kälteenergie von LNG genutzt werden kann, (Atienza-Márquez et al., 2018). Bei einer weiteren Recherche wurden Paper zur Nutzung der Kälteenergie von LNG gefunden, diese beziehen sich jedoch auf LNG-Klimaanlagen für Busse (Yan & Xu, 2013), Autos (Tan et al., 2016) oder Schiffe (Li et al., 2020).

### Kühlung von Rechenzentren

Eine Recherche zu bestehenden Rechenzentren in Hamburg hat ergeben, dass es mehrere Rechenzentren in Hamburg gibt, jedoch keines im Hamburger Hafen, siehe Abbildung 6 (GeoBasis-DE & Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), 2009a). Im Hafenentwicklungsplan ist das erste Handlungsfeld die Digitalisierung und unterstreicht damit die Relevanz des Themas. Der digitale Transformationsprozess wird vorangetrieben, weshalb ein zukünftiger Bedarf an Rechenzentren im Hamburger Hafen gesehen wird. Für die zweite Muss-Anforderung wurden keine Informationen gefunden, die für einen Ausschluss sprechen und es wird kein Erdgas eingesetzt.

### Fernkälte

In Hamburg wurde 1968 das Fernkältenetz der City Nord in Betrieb genommen. (Hamburger Energiewerke, 2024). Dieses liegt zwar nicht im Hamburger Hafen, aber der Aufbau eines Fernkältenetzes könnte zur Verbesserung der Hafeninfrastruktur beitragen. Der Erhalt und Ausbau der Infrastruktur ist das dritte Handlungsfeld des Hamburger Hafens. Für die zweite Muss-Anforderung wurden keine Informationen gefunden, die für einen Ausschluss sprechen und es wird kein Erdgas eingesetzt.

### Lebensmittelkonservierung

Im Hamburger Hafen gibt es fünf Kühllhäuser, siehe Abbildung 7, die zusammen einen Temperaturbereich von -22 °C bis 25 °C abdecken. Die Lebensmittelkonservierung hat einen Temperaturbereich von 0 °C bis 20 °C, alle fünf Kühllhäuser liegen also im Temperaturbereich. Drei decken jedoch einen etwas wärmeren Bereich ab, da sie bei knapp unter 0 °C beginnen. Für

die zweite Muss-Anforderung wurden keine Informationen gefunden, die für einen Ausschluss sprechen und es wird kein Erdgas eingesetzt.

#### Meerwasserentsalzung

Durch Hamburg fließt die Elbe, die in die Nordsee mündet. Die Elbe ist ein Süßwasserfluss, so dass eine Meerwasserentsalzung für den Hamburger Hafen nicht in Frage kommt.

#### NGL-Rückgewinnung

Die Abkürzung NGL steht für natural gas liquids und kann mit Erdgasflüssigkeiten übersetzt werden. Ein Großteil des Erdgases besteht aus Ethan, Propan, Butan und Naturbenzin (Kondensat) (Mokhatab et al., 2006). Die dritte Muss-Anforderung schließt eine Nutzung von Erdgas aus, weshalb eine weitere Betrachtung der Rückgewinnung von NGL nicht erfolgt.

#### Lagerung von Tiefkühlkost

Die Lagerung von Tiefkühlkost erfolgt in einem Temperaturbereich zwischen -35 °C und -18 °C statt. Zwei der fünf in Abbildung 7, dargestellten Kühllagerhäuser fallen in diesen Temperaturbereich. Diese Lagerhäuser befinden sich in einem Temperaturbereich von -22 °C und 18 °C und werden mittlerweile vom gleichem Unternehmen betrieben (NORDFROST GmbH & Co. KG, 2024; Wnuck, 2010). Hinsichtlich der zweiten Muss-Anforderung konnten keine Informationen identifiziert werden, die einen Ausschluss begründen würden. Zudem wird kein Erdgas eingesetzt.

#### Tiefkühl-/ Kühllagerhaus

Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wurde eine Recherche auf der Website "Hamburg" durchgeführt, auf der Unternehmen aus dem Branchenbuch nach Kategorie gesucht werden können. Die Recherche nach den Begriffen "Kühllager", "Tiefkühl", "Kühllagerhaus", "Tiefkühlhaus" und "Tiefkühllager" lieferte keine Ergebnisse. Die Temperaturspanne umfasst -50 °C bis -35°C, wodurch die Kühllagerhäuser aus Abbildung 7 nicht kalt genug sind, um dies mit abdecken zu können. Dadurch kommt es zu einem Ausschluss dieser Anwendung.

#### Kühlkette für Lebensmitteltransporte

Die Kühlkette von Lebensmitteltransporten, gibt keine Klarheit darüber welche Anwendungen gemeint sind und wie eine Abgrenzung aussehen kann. Die Lagerung der Lebensmittel fällt unter die Anwendung „Lagerung von Tiefkühlkost.“ Die zweite Muss-Anforderung wird nicht erfüllt, was zum Ausschluss der Anwendung führt.

### Trockeneisproduktion

Im Hamburger Hafen konnte keine Trockeneis Produktion identifiziert werden, siehe Abbildung 8 (GeoBasis-DE & Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), 2009b). Infolge der Nicht-Erfüllung der ersten Muss-Anforderung erfolgt ein Ausschluss.

### Oberflächliche Tieftemperaturbehandlung

Bei einer oberflächlichen Tieftemperaturbehandlung werden beispielsweise Bauteile über einen gewissen Zeitraum tiefen Temperaturen ausgesetzt (Lausecker, 2021). In verschiedenen Papern wird angegeben, dass die Durchführung bei einer Temperatur von  $-80\text{ °C}$  erfolgt (A-tienza-Márquez et al., 2018; Guo et al., 2019). Daraus lässt sich ableiten, dass die Temperatur im Prozess mit Trockeneis erreicht werden soll. Im Rahmen der Recherche konnte keine Anwendung im Hamburger Hafen identifiziert werden, die eine solche Behandlung erfordert. Infolgedessen erfolgt ein Ausschluss.

### „Kältedienst“ für Unternehmen

Die vorliegende Anwendung zielt auf den Aufbau eines Verteilnetzes für Kälteenergie ab, welches beispielsweise in ein nahe gelegenes Industriegebiet eingeleitet werden kann (Messineo & Panno, 2011). Dies könnte zu einer Verbesserung der Hafeninfrastuktur beitragen, wie im Handlungsfeld drei des Hafentwicklungsplans gefordert. Für die zweite Muss-Anforderung wurden keine Informationen gefunden, die für einen Ausschluss sprechen und es wird kein Erdgas eingesetzt.

### Langzeitlagerung von biologischen Materialien

Im Paper „Progress of liquefied natural gas cold energy utilization“ wird die Anwendung zur Langzeitlagerung von biologischen Materialien genannt, deren Funktionsweise wird jedoch nicht näher erläutert. (Guo et al., 2019). Folglich erfolgt ein Ausschluss, da die zweite Muss-Anforderung nicht erfüllt wurde.

### Kryogene Zerkleinerung

Wie bereits die vorherige Anwendung wird auch diese im Paper „Progress of liquefied natural gas cold energy utilization“ aufgeführt, allerdings ohne eine nähere Erläuterung ihrer Funktionsweise (Guo et al., 2019). Da somit die zweite Muss-Anforderung nicht erfüllt wurde, muss auch diese Anwendung ausgeschlossen werden.

### Kryogene CO<sub>2</sub>-Abscheidung

Die Abscheidung von Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) ist in zahlreichen industriellen Prozessen eine vielversprechende Maßnahme, um die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu reduzieren. Im Hamburger Hafen sind diverse Industrien ansässig, darunter ein großes Stahlwerk. Hinsichtlich der zweiten

Muss-Anforderung konnten keine Informationen identifiziert werden, die einen Ausschluss begründen würden. Zudem wird kein Erdgas eingesetzt.

#### Abtrennung von leichten Kohlenwasserstoffen

Die Abtrennung von leichten Kohlenwasserstoffen spielt insbesondere in petrochemischen Prozessen eine bedeutende Rolle (Saboor & Hajizadeh, 2020). Der Begriff "Petrochemie" bezeichnet die Herstellung chemischer Produkte aus Erdgas sowie geeigneten Fraktionen des Erdöls. Dies führt zu einem Ausschluss durch die dritte Muss-Anforderung.

#### Supraleiter

Der Einsatz von Supraleitern erfolgt gegenwärtig noch nicht im Hamburger Hafen. Der verlustfreie Stromtransport sowie die Möglichkeit Flüssigwasserstoff in einer Pipeline zu transportieren passen zum dritten Handlungsfeld des Hamburger Hafenentwicklungsplans. In diesem geht es um die Verbesserung der Hafeninfrastruktur. Für die zweite Muss-Anforderung wurden keine Informationen gefunden, die für einen Ausschluss sprechen und es wird kein Erdgas eingesetzt.

#### Kombination aus LAES (liquid air energy storage system) und LNG

Bei einem LAES-System handelt es sich um ein Flüssigluftspeichersystem. Diese fungieren als Energiespeicher, welche das gespeicherte Wärmepotenzial von kryogenen Flüssigkeiten nutzen (University of Brighton, 2024). Die Speicherung von Energie ist in einem System, dass auf regenerative Energieträger setzt essentiell. Dadurch können beispielsweise Windflauten ausgeglichen werden. Im zweiten Handlungsfeld des Hamburger Hafenentwicklungsplans wird die Notwendigkeit einer Umstellung auf regenerative Energieträger betont. Weshalb die Anwendung in der Nutzwertanalyse mit betrachtet wird.

#### Luftzerlegung

Die Luftzerlegung, ist ähnlich wie die Abscheidung von CO<sub>2</sub> ein Teil von zahlreichen industriellen Prozessen. In der Konsequenz kann ein Einsatz im Hamburger Hafen als gegeben betrachtet werden. Hinsichtlich der zweiten Muss-Anforderung konnten keine Informationen identifiziert werden, die einen Ausschluss begründen würden. Zudem wird kein Erdgas eingesetzt.

#### Verflüssigung von LNG oder LH<sub>2</sub>

Bei der Verflüssigung von LNG oder LH<sub>2</sub> ist die Idee, die Kälteenergie der einen Flüssigkeit für den Verflüssigungsprozess der anderen zu verwenden (IRENA, 2022). Dafür ist LNG notwendig, die Nutzung von Erdgas wird durch die dritte Muss-Anforderungen ausgeschlossen, weshalb diese Anwendung nicht weiter behandelt wird.

Durch die Muss-Anforderungen werden in der weiteren Nutzwertanalyse neun Anwendungen miteinander verglichen.

## 4.2. Bestimmung Entscheidungskriterien

Wie im theoretischen Teil erläutert, soll die Summe der Entscheidungskriterien das Ziel hinreichend beschreiben. Um dies zu erreichen, werden vier Entscheidungskriterien definiert, die in ihrer Summe die Möglichkeit geben, das größte Potenzial der Kälteenergie Anwendungen für den Hamburger Hafen zu identifizieren.

Potenzial kann dabei sehr unterschiedlich definiert werden. In dieser Arbeit wird der Fokus nicht auf ein bestimmtes Thema gelegt, sondern eine Gesamtbewertung vorgenommen. Daraus lassen sich erste Ansatzpunkte ableiten, die in weiterführenden Arbeiten untersucht werden können. Dabei werden zwei technische Kriterien mit zwei hafenspezifischen Kriterien kombiniert. Die ausgewählten Kriterien sind:

### Technische Kriterien

1. Temperatur der Anwendung
2. Anzahl der Arbeiten in denen die Anwendung erwähnt wurde

### Hafenspezifische Kriterien

3. Matching mit dem Hafenentwicklungsplan 2040
4. Standort vorhanden

Das erste Kriterium bewertet die Temperatur der Anwendung. Dabei steigt die Punktzahl mit sinkender Temperatur. Dies lässt sich damit begründen, dass je kälter die Anwendungen sind, desto mehr Energie muss aufgewendet werden. Daher wäre es sinnvoll, gerade diese Anwendungen mit Kälteenergie zu versorgen. Das zweite Kriterium bezieht sich auf die Anzahl der Arbeit, in denen die Anwendung erwähnt wurde. In Tabelle 3, befinden sich alle Anwendungen und die dazu analysierten Arbeiten. In allen untersuchten Arbeiten werden mehrere Anwendungen der Kälteenergie genannt. Sobald Anwendungen in mehreren Arbeiten erwähnt werden, kann daraus geschlossen werden, dass die Anwendungen häufiger untersucht wurden. Je mehr Anwendungen untersucht werden, desto mehr Informationen können gesammelt werden und desto wahrscheinlicher wird eine kommerzielle Nutzung.

Die Kriterien drei und vier fokussieren sich auf den Hamburger Hafen. Das dritte Kriterium gleicht die Anwendungen mit vier der sieben Handlungsfelder des Hafenentwicklungsplans ab. Es handelt sich um 1. Digitalisierung, 2. Klimaschutz, Kreislaufwirtschaft und Ökologie; 3. Infrastrukturerhalt und -ausbau und 4. Ansiedlungs- und Flächenstrategie. Die anderen drei Handlungsfelder setzen ihre Schwerpunkte an anderer Stelle und werden daher hier nicht berücksichtigt. Mit dem letzten Kriterium wird geprüft, ob bereits ein Standort der Anwendung im Hamburger Hafen, in Hamburg oder gar nicht vorhanden ist.

Mit den ausgewählten Kriterien wird zunächst eine Einschätzung des technischen Potenzials vorgenommen, bevor das Potenzial des Hamburger Hafens hinzugezogen wird.

### 4.3. Gewichtung Entscheidungskriterien

Bei der Gewichtung der Entscheidungskriterien ist entscheidend, dass insgesamt eine Summe von 100 % entsteht. In Tabelle 6 ist die Gewichtung der vier Kriterien abgebildet. Der Fokus der Forschungsfrage und damit auch des Entscheidungsproblems der Nutzwertanalyse liegt zum einen auf den Anwendungen selbst und zum anderen darauf, wie gut diese in den Hamburger Hafen passen. Deshalb haben die Temperatur der Anwendung, sowie die Handlungsfelder des Hamburger Hafens, mit 30 %, die höchste Gewichtung. Mit einem Anteil von 25 % folgt das Kriterium "Standort vorhanden" in der Mitte. Die geringste Gewichtung, mit 15 %, weist die Bewertung der Erwähnungen in den untersuchten Arbeiten auf.

Tabelle 6: Gewichtung der Kriterien für die Nutzwertanalyse

<b>Kriterium</b>	<b>Gewichtung</b>
Temperatur der Anwendung	30 %
Erwähnung in den untersuchten Arbeiten	15 %
Handlungsfeld Hamburger Hafen 2040	30 %
Standort vorhanden	25 %
<u>Summe</u>	100 %

### 4.4. Skalen und Bewertungsvorschriften

In dieser Nutzwertanalyse wird bei allen Kriterien eine Skala von eins bis fünf verwendet, wobei eins die schlechteste und fünf die beste Wertung ist. Dadurch kann differenziert werden zwischen guten und schlechten Ergebnissen, aber die Schritte sind nicht zu kleinteilig, wie es bei einer Skala von eins bis 100 beispielsweise der Fall wäre.

In Tabelle 7 befindet sich die Beschreibung, was die Punktzahlen der einzelnen Kriterien bedeuten. Für die Festlegung der Bewertung für die Temperatur der Anwendung, bietet sich die Bewertung von Temperaturspannweiten an. Diese können berechnet werden, indem der Betrag der niedrigsten und der höchsten Temperatur gebildet wird, siehe Gleichung 6. 7 °C ist die Anwendungstemperatur der Kühlung von Rechenzentren und -193 die Starttemperatur der Luftzerlegung. Anschließend wird der Betrag durch die Anzahl der Bewertungsschritte geteilt, siehe Gleichung 7. Damit ergibt sich eine Temperaturspannweite von 40 °C pro Schritt.

$$|-193\text{ °C} + 7\text{ °C}| = 200\text{ °C} \quad (1)$$

$$\frac{200\text{ }^{\circ}\text{C}}{5} = 40\text{ }^{\circ}\text{C} \quad (2)$$

Die Bewertung der Anzahl der untersuchten Arbeiten, in denen die Anwendung erwähnt wird, erfolgt so, dass ein Punkt vergeben wird, wenn die Anwendung in einer Arbeit erwähnt wird. Um fünf Punkte zu erhalten, muss die Anwendung in fünf oder mehr Arbeiten erwähnt werden. In Tabelle 3 sind die Quellen genannt in denen die untersuchten Anwendungen gefunden wurden.

Bei der Bewertung der Handlungsfelder des Hamburger Hafens wird die schlechteste Bewertung vergeben, wenn die Anwendung zu keinem Handlungsfeld passt. Fünf Punkte werden vergeben, wenn die Anwendung zu allen vier ausgewählten Handlungsfeldern passt.

Bei der Bewertung, ob ein Standort vorhanden ist, gibt es drei Werte und diese werden auf die fünfer Skala angepasst. Wenn kein Standort vorhanden ist, wird ein Punkt vergeben. Ein Standort in Hamburg gibt drei und ein Standort im Hamburger Hafen gibt fünf Punkte. Die Unterscheidung fällt dabei nicht binär zwischen ja/nein aus, da ein Standort in Hamburg darauf hinweist, dass bereits Systeme für diese Anwendung etabliert sind, sodass eine Übertragung auf den Hamburger Hafen einfacher sein könnte.

Tabelle 7: Beschreibung der Punktzahlen je Kriterium

<b>Kriterium</b>	<b>Bewertung: 1</b>	<b>Bewertung: 2</b>	<b>Bewertung: 3</b>	<b>Bewertung: 4</b>	<b>Bewertung: 5</b>
Temperatur der Anwendung	7 °C bis -33 °C	-33 °C bis -73 °C	-73 °C bis -113 °C	-113 °C bis -153 °C	-153 °C bis -193 °C
Erwähnung in den untersuchten Arbeiten	Nennung in einer Arbeit	Nennung in zwei Arbeiten	Nennung in drei Arbeiten	Nennung in vier Arbeiten	Nennung in fünf und mehr Arbeiten
Handlungsfeld Hamburger Hafen 2040	Passend zu 0 Handlungsfeldern	Passend zu 1 Handlungsfeldern	Passend zu 2 Handlungsfeldern	Passend zu 3 Handlungsfeldern	Passend zu 4 Handlungsfeldern
Standort vorhanden	Nein		Standort in Hamburg		Standort im Hamburger Hafen

## 4.5. Bewertung der Entscheidungskriterien

Bei der Bewertung der Entscheidungskriterien handelt es sich um den 7. Schritt der Vorgehensweise für Nutzwertanalyse von Kühnapfel (2021). Diese wurde, wie der Rest der Arbeit, in Einzelarbeit durchgeführt. Demnach war es auch nicht möglich die Gewichtung der Kriterien nicht vorher zu wissen. Bei der Bewertung wurde darauf geachtet, dass alle Kriterien, unabhängig von ihrer Gewichtung, mit derselben Beachtung betrachtet wurden.

Für das Kriterium „Temperatur der Anwendung“ wurde die Anwendungstemperatur beziehungsweise die Temperaturspanne der Anwendungen herausgesucht. Diese gehen von 7 °C bis runter zu -193 °C, siehe Tabelle 3. Im Kriterium „Erwähnung der untersuchten Arbeiten“ wurden die Arbeiten, die in Tabelle 3 aufgeführt sind, auf die ausgewählten Anwendungen gescannt. Sobald die Anwendung erwähnt wurde, wurde der Name aufgeschrieben, damit am Ende die Anzahl der Nennung in Punkte umgerechnet werden kann. Um zu überprüfen, ob eine Anwendung zum Hamburger Hafen passt, wurde geprüft wie weit die Anwendung in die Handlungsfelder des Hafenentwicklungsplans passt. Dabei wurde die Übereinstimmung mit den ersten vier Handlungsfeldern überprüft, wie in Kapitel 4.2 ausgeführt wurde. Alle Anwendungen passten zum 2. Handlungsfeld „Klimaschutz, Kreislaufwirtschaft und Ökologie“, da durch alle Anwendungen die Umstellung auf regenerative Energieträger gefördert wird. Im letzten Kriterium wurde überprüft, ob bereits ein Standort in Hamburg oder dem Hamburger Hafen vorhanden ist. Die Grundlage dieser Bewertung stellte die Recherche der Muss-Anforderungen dar. Zwei der Anwendungen werden bereits im Hamburger Hafen angewendet und vier weitere in Hamburg.

In Tabelle 14 befindet sich die Zusammenfassung aller Bewertungen der Nutzwertanalyse. Anhand dieser wurden die Ergebnisse in Punkte umgerechnet. Die Umrechnung in Punkte erfolgt über die in Tabelle 7 aufgeführten Beschreibungen.

### *Schritt 8: „Berechnung des Nutzwerts bzw. Scores“*

Die Berechnung der Nutzwertanalyse fand in Excel statt, sowie die Berechnungen der Sensitivitätsanalyse. Dafür wurden die Einzelwertungen mit den Gewichtungen multipliziert und zu einer Gesamtsumme addiert.

## 5. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten Nutzwertanalyse präsentiert. In dieser wurden neun verschiedene Anwendungen der Kälteenergie anhand ausgewählter Kriterien und mithilfe von Gewichtungsfaktoren miteinander verglichen. Das festgelegte Entscheidungsproblem der Nutzwertanalyse entspricht der Forschungsfrage, welche die Anwendungen der Kälteenergie mit dem größten Potenzial für den Hamburger Hafen zu identifizieren versucht. Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse werden in diesem Kapitel vorgestellt und es wird der 9. Schritt der Nutzwertanalyse, die Sensitivitätsanalyse, durchgeführt. Mit dieser kann die Robustheit der Ergebnisse überprüft werden. Die Ergebnisse der Nutzwertanalyse sind in Tabelle 12 abgebildet.

Mit 345 Punkten, ist die Luftzerlegung die Anwendung mit der höchstens Punktzahl, grün markiert. Die Anwendung mit den zweit meisten Punkten, ist die kryogene CO<sub>2</sub>-Abscheidung, die 315 Punkte hat. Damit belegen die beiden Anwendungen, die in Großanlagen im Hamburger Hafen angewendet werden können, den ersten und zweiten Platz. Darunter kommen mit 295 Punkten die Kombination aus LAES und LNG und mit 280 Punkten Supraleiter. Diese beiden Anwendungen liegen beide oberhalb des Mittelwerts von 271,1 Punkten. Anschließend kommen vier Anwendungen jeweils in einem Abstand von 10 Punkten von 260 Punkten bis 230. Die Kühlung von Rechenzentren hat mit 225 Punkten die niedrigste Punktzahl, rot markiert.

In Tabelle 8 ist abgebildet wie oft welche Bewertung für die verschiedenen Bewertungskriterien abgegeben wurde. Dabei wird deutlich, dass bei der Temperatur der Anwendung jeweils drei Anwendungen die beste und die schlechteste Bewertung bekommen haben. Die meisten schlechtesten Bewertungen hat das Kriterium „Erwähnung in den untersuchten Arbeiten“ bekommen. Heißt fünf der Anwendungen wurden nur in einer Arbeit genannt. Bei den Handlungsfeldern gab es keine Anwendung die in gar kein Handlungsfeld passen würde, allerdings gab es auch keine Anwendung die in alle vier Handlungsfelder gepasst hat. Beim Standort Kriterium ist die Verteilung der Bewertungen relativ ausgeglichen. Allerdings gab es hierbei auch nur drei mögliche Werte die vergeben wurden.

Tabelle 8: Zählung wie oft welche Bewertung innerhalb der Nutzwertanalyse vergeben wurde

<b>Kriterium/ Zählung der Bewertung</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
Temperatur der Anwendung (niedrige Temperatur)	3	1	1	1	3
Erwähnung in den untersuchten Arbeiten (hohe Zahl)	5	2	0	2	0
Handlungsfeld (passend zu möglichst vielen)	0	4	3	2	0
Standort (nein, HH, HH Hafen)	3	0	4	0	2

### *Schritt 9: Sensitivitätsanalyse*

In der Sensitivitätsanalyse einer Nutzwertanalyse wird die Gewichtung der Kriterien variiert und es kann untersucht werden, ob und wie der Einfluss auf das Endergebnis ist. Es kann außerdem herausgefunden werden, welche Parameter einen starken Einfluss auf das Ergebnis haben und es können Bewertungsfehler aufgedeckt werden. Das Vorgehen beinhaltet vier Schritte, die in Kapitel 3.2 vorgestellt wurden. Die ersten drei Schritte werden gleich durchgeführt. Der letzte Schritt wird im nächsten Kapitel kurz angerissen, aber nicht anhand einer eigenen Berechnung durchgeführt. Dies ist damit zu begründen, dass die Bewertung der Kriterien nicht von mehreren Personen vorgenommen wurde und dadurch kein Vergleich auf dieser Ebene passieren kann.

Die Gewichtungsveränderungen für die drei Schritte der Sensitivitätsanalyse sind in Tabelle 9 abgebildet. Im ersten Schritt sind alle Gewichtungen bei 25 %. Im zweiten wurden die Abstände verringert, sodass die Spanne von 20-30 % geht. Dies stellt eine Veränderung um 5% zur ursprünglichen Veränderung da. Im 3. Schritt wurde die Spannweite erhöht, sodass die niedrigste Gewichtung bei 10% und die höchste bei 40 % lag. Dies erhöhte den Fokus auf die Temperatur der Anwendung, mit 35% und die Handlungsfelder des Hamburger Hafens, mit einer Gewichtung von 40%.

Tabelle 9: Gewichtungsänderungen der Nutzwertanalyse

<b>Kriterium</b>	<b>ursprüngliche Gewichtung</b>	<b>Sensitivitätsanalyse 1</b>	<b>Sensitivitätsanalyse 2</b>	<b>Sensitivitätsanalyse 3</b>
Temperatur der Anwendung	30 %	25 %	25 %	35 %
Erwähnung in den untersuchten Arbeiten	15 %	25 %	20 %	10 %
Handlungsfeld Hamburger Hafen 2040	30 %	25 %	30 %	40 %
Standort vorhanden	25 %	25 %	25 %	15 %
<b>Summe</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>

Die Ergebnisse der drei Schritte sind im Anhang in Tabelle 15, Tabelle 16 und Tabelle 17 abgebildet. In diesen sind ebenfalls die höchsten und niedrigsten Wertungen grün beziehungsweise rot markiert. In Tabelle 10 sind die Minimal, Maximal und Durchschnitts Punktzahlen der ursprünglichen Rechnung und der drei Sensitivitätsberechnungen abgebildet. Zusätzlich sind zu den Minimal und Maximal Punktzahlen die Anwendungen genannt, die die entsprechende Punktzahl hatten. Die Anwendung der Luftzerlegung erreicht mit einer Punktzahl zwischen 340 und 350, in allen vier Rechnungen, immer die höchste Wertung. Die Schwankung der minimal Werte liegt mit einer Differenz von 30 Punkten, höher als die Schwankung der Minimalwerte. In der ursprünglichen Rechnung erreicht die Kühlung von Rechenzentren die niedrigste Punktzahl. Bei den Rechnungen der Sensitivitätsanalyse haben in Schritt eins und zwei mehr als eine Anwendung die niedrigste Punktzahl. Bei beiden ist die Kühlung von Rechenzentren weiterhin mit auf dem letzten Platz und die Lebensmittelkonservierung kommt hinzu. Im 3. Schritt der Sensitivitätsanalyse hat nur noch die Lebensmittelkonservierung die niedrigste Punktzahl.

Tabelle 10: Minimal, Maximal und Durchschnitts Punktzahlen der Nutzwertanalyse und der Sensitivitätsanalyse

Punktzahl	Ursprüngliche Rechnung	Sensitivitätsanalyse 1	Sensitivitätsanalyse 2	Sensitivitätsanalyse 3
Minimal	225 – Rechenzentren	225 – Rechenzentren, Fernkälte, Lebensmittelkonservierung, Kälte-dienst für Unternehmen	230 – Rechenzentren, Lebensmittelkonservierung	200 – Lebensmittelkonservierung
Maximal	345 – Luftzerlegung	350 – Luftzerlegung	340 – Luftzerlegung	340 – Luftzerlegung
Mittelwert	271,1	261,1	265,6	276,7

Bei der Gleichgewichtung der Kriterien ist der Mittelwert mit 261,1 Punkten am geringsten und bei der Spreizung der Gewichtung mit einer Punktzahl von 276,7 am höchsten.

In Tabelle 11 ist die Reihenfolge aller neun analysierten Anwendungen der Kälteenergie für die ursprüngliche Rechnung, sowie für die drei Rechnungen der Sensitivitätsanalysen dargestellt. Die Reihenfolge der ursprüngliche Rechnung, sowie der 1. und 2. Rechnung der Sensitivitätsanalysen sind identisch. In der 1. und 2. Rechnung der Sensitivitätsanalysen haben einige der Anwendungen dieselbe Punktzahl, wie in Tabelle 10 bereits sichtbar wird. Bei der 3. Rechnung der Sensitivitätsanalyse bleibt der erste Platz gleich, die restliche Reihenfolge ist anders. Bei genauer Betrachtung fällt auf, dass sich die Reihenfolge so verändert hat, dass sie ungefähr der absteigenden Reihenfolge der Anwendungstemperaturen entspricht. Die Fernkälte auf dem sechsten Platz liegt auf einem höheren Platz und die beiden Anwendungen mit den höchsten Temperaturen haben ihre Plätze getauscht. Allerdings haben die Kühlung der Rechenzentren und die Lebensmittelkonservierung beide nur einen Punkt für die Bewertung der Anwendungstemperatur erhalten.

Tabelle 11: Rangfolge der ursprünglichen Rechnung und der drei Rechnungen für die Sensitivitätsanalyse

<b>Rangfolge</b>	<b>Ursprüngliche Rechnung</b>	<b>Sensitivitätsanalyse 1</b>	<b>Sensitivitätsanalyse 2</b>	<b>Sensitivitätsanalyse 3</b>
1.	Luftzerlegung	Luftzerlegung	Luftzerlegung	Luftzerlegung
2.	CO <sub>2</sub> -Abscheidung	CO <sub>2</sub> -Abscheidung	CO <sub>2</sub> -Abscheidung	Kombi LAES und LNG
3.	Kombi LAES und LNG	Kombi LAES und LNG	Kombi LAES und LNG	Supraleiter
4.	Supraleiter	Supraleiter	Supraleiter	CO <sub>2</sub> -Abscheidung
5.	Lagerung von Tiefkühlkost	Lagerung von Tiefkühlkost	Lagerung von Tiefkühlkost	Kältedienst für Unternehmen
6.	Kältedienst für Unternehmen	Kältedienst für Unternehmen	Kältedienst für Unternehmen	Fernkälte
7.	Fernkälte	Fernkälte	Fernkälte	Lagerung von Tiefkühlkost
8.	Lebensmittelkonservierung	Lebensmittelkonservierung	Lebensmittelkonservierung	Kühlung von Rechenzentren
9.	Kühlung von Rechenzentren	Kühlung von Rechenzentren	Kühlung von Rechenzentren	Lebensmittelkonservierung

Tabelle 12: Ergebnisse der durchgeführten Nutzwertanalyse

Bewertungskategorie/ -kriterien	Gewichtung	Rechenzentren		Fernkälte		Lebensmittelkonservierung		Lagerung von Tiefkühlkost		Kältedienst für Unternehmen		CO <sub>2</sub> -Abscheidung		Supraleiter		Kombi LAES und LNG		Luftzerlegung	
		Ziel-ertrag	Nutz-wert	Ziel-ertrag	Nutz-wert	Ziel-ertrag	Nutz-wert	Ziel-ertrag	Nutz-wert	Ziel-ertrag	Nutz-wert	Ziel-ertrag	Nutz-wert	Ziel-ertrag	Nutz-wert	Ziel-ertrag	Nutz-wert	Ziel-ertrag	Nutz-wert
<b>technische Kriterien</b>																			
Temperatur der Anwendung (niedrige Temperatur)	30	1	30	1	30	1	30	2	60	3	90	4	120	5	150	5	150	5	150
Erwähnung in den untersuchten Arbeiten (hohe Zahl)	15	2	30	1	15	1	15	1	15	1	15	4	60	1	15	2	30	4	60
<u>Summe (technische Kriterien)</u>	45	3	60	2	45	2	45	3	75	4	105	8	180	6	165	7	180	9	210
<b>Hafenspezifische Kriterien</b>																			
Handlungsfeld (möglichst vielen)	30	3	90	4	120	2	60	2	60	4	120	2	60	3	90	3	90	2	60
Standort (nein, HH, HH Hafen)	25	3	75	3	75	5	125	5	125	1	25	3	75	1	25	1	25	3	75
<u>Summe (Hafenspezifische Kriterien)</u>	55	6	165	7	195	7	185	7	185	5	145	5	135	4	115	4	115	5	135
<b>Gesamtsumme</b>	100	9	225	9	240	9	230	10	260	9	250	13	315	10	280	11	295	14	345

## 6. Diskussion

In den vorangegangenen Kapiteln wurden Anwendungen der Kälteenergie von LNG und Flüssigwasserstoff zunächst durch Literaturrecherche identifiziert und anschließend analysiert. Als Analyseverfahren wurde die Nutzwertanalyse angewendet und untersucht, welche der Kälteenergieanwendungen das größte Potenzial für den Hamburger Hafen aufweisen. In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Nutzwertanalyse diskutiert und in Kontext zur Forschungsfrage gesetzt. Anschließend werden die Beschränkungen der Forschung aufgezeigt und Empfehlungen für weitere Forschung gegeben.

### 6.1. Diskussion der Ergebnisse

Die Nutzwertanalyse hat ergeben, dass die Anwendung mit dem größten Potenzial für die Nutzung von Kälteenergie aus Flüssigwasserstoff im Hamburger Hafen die Luftzerlegung ist. Die Sensitivitätsanalyse untersucht die Robustheit dieses Ergebnisses. Der erste und zweite Schritt der Sensitivitätsanalyse deuten auf eine Robustheit der Ergebnisse hin, da beide die gleiche Rangfolge aufweisen, siehe Tabelle 11, wie die ursprünglichen Ergebnisse. Im dritten Schritt der Sensitivitätsanalyse verschiebt sich die Rangfolge der Ergebnisse, was auf eine Sensitivität der höher gewichteten Kriterien hinweist. Die Anwendungstemperatur und die Handlungsfelder des Hamburger Hafens wurden höher gewichtet, als in der ursprünglichen Berechnung. Bei näherer Betrachtung der Reihenfolge des 3. Schrittes wird deutlich, dass die Reihenfolge nahezu absteigenden Reihenfolge der Temperatur entspricht. Die Kombination aus dem LAES-System und LNG liegt an zweiter Stelle und ist gleichzeitig die Anwendung mit der zweitniedrigsten Temperatur. Es wird jedoch auch deutlich, dass die Reihenfolge nicht nur von der Temperatur abhängt, da zum einen weil die Fernkälte einen höheren Rang einnimmt, als es ihrer Temperatur entsprechen würde und zum anderen die Kühlung von Rechenzentren die Anwendung mit der höchsten Temperatur ist, aber nicht die Anwendung mit dem niedrigsten Rang.

Insgesamt kann die Robustheit des ersten Ranges, der Luftzerlegungsanlage, durch die Sensitivitätsanalyse als bestätigt angesehen werden kann. Eine Luftzerlegungsanlage kann in Industrieprozessen, wie der Metallverarbeitung oder der chemischen Produktion, eingesetzt werden (Cryospain, 2024). Damit kann auch die Forschungsfrage beantwortet werden, da in dieser gefragt wird, welche potenziellen Anwendungsmöglichkeiten sich für die Kälteenergie von Flüssigwasserstoff im Hamburger Hafen ergeben. Eine Ansiedlung wäre beispielsweise im Sustainable Energy Hub des Hamburger Hafens möglich, dieser ist in Abbildung 4 hellgrün hinterlegt.

Es ist jedoch sinnvoll, sich nicht auf diese Anwendung zu beschränken, sondern eine Kombination der Anwendungen in Betracht zu ziehen. Die kryogene CO<sub>2</sub>-Abscheidung findet auch

Anwendung in industriellen Prozessen. Durch den Einsatz eines LAES Systems mit der Kälteenergie von Flüssigwasserstoff, könnte Energie gespeichert werden, was insbesondere mit bei einem immer größer werdenden Anteil an erneuerbaren Energien sinnvoll ist. An vierter Stelle steht der Supraleiter. Durch den Einsatz einer hybriden Pipeline könnten Flüssigwasserstoff und Strom transportiert werden, was ebenfalls ein großes Potenzial beinhaltet. Allerdings sind insbesondere die Kühlung von Supraleitern noch wenig erforscht.

Die Rangfolge der Nutzwertanalyse gibt Ansatzpunkte, welche Anwendungen sich am besten für den Hamburger Hafen eignen. Im Anschluss an diese Arbeit könnte ein technisches Machbarkeitskonzept für eine Kombination der Anwendungen geschrieben werden.

## 6.2. Limitationen dieser Arbeit

Eine der Limitationen dieser Arbeit war der Forschungsstand zu Flüssigwasserstoff und den Anwendungen von Flüssigwasserstoff. Mit Ausnahme des Supraleiters wurde keine der untersuchten Anwendungen explizit für Flüssigwasserstoff getestet. Ein Vergleich zwischen LNG und Flüssigwasserstoff wurde in Kapitel 2.3 durchgeführt, um eine Übertragbarkeit von LNG auf Flüssigwasserstoff aufzuzeigen. LNG ist besser erforscht als Flüssigwasserstoff, aber auch hier sind die meisten Anwendungen bisher nur in Forschungsprojekten und nicht im kommerziellen Maßstab getestet worden. Einige der Anwendungen wurden in Arbeiten, die Übersichten für Kälteenergie erstellt haben, gefunden. Es wurden jedoch nur der Name der Anwendung und das Temperaturniveau angegeben, und auch bei weiteren Recherchen konnten keine Informationen gefunden werden, weshalb die Anwendungen in dieser Arbeit zwar genannt, aber nicht näher erläutert wurden. Der Kältebedarf in der Region Hamburg und im Hamburger Hafen ist ebenfalls nicht ausreichend erforscht, die letzte Studie zu diesem Thema wurde 2010 veröffentlicht und daher in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. (Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt & Unternehmen für Ressourcenschutz, 2010).

Der begrenzte Forschungsstand führte dazu, dass die Wahl der Entscheidungskriterien dieser Arbeit mehrfach überarbeitet wurde. Aufgrund der fehlenden Forschung zum technischen Reifegrads der einzelnen Anwendungen wurde anstelle dessen das Bewertungskriterium „Anzahl der Arbeiten in denen die Anwendung erwähnt wurde“ verwendet. Vereinfachungen wie diese führten zu Ungenauigkeiten der Nutzwertanalyse, da das Kriterium weniger Aussagekraft hat, als die anderen.

Zukünftige Forschung könnte die in dieser Arbeit aufgezeigte Forschungslücke schließen. Weitere Kriterien die untersucht werden sollten, aber aufgrund fehlender Daten nicht angewendet wurden, waren:

- Wirkungsgrade der Anwendungen
- Technischer Reifegrad der Anwendungen

- Emissionsreduktionspotenzial
- Umweltverträglichkeit

Ein derzeit laufendes Forschungsprojekt, dessen Ergebnisse für eine Wiederholung der Nutzwertanalyse interessant sein könnte, ist „AppLHy!“. Dabei handelt es sich um Forschungsarbeiten des Wasserstoff-Leitprojektes TransHyDE, das die hybride Pipeline von Supraleiter und Flüssigwasserstoff näher untersucht (Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion et al., 2024). Der Supraleiter ist eine der untersuchten Anwendungen und solche Forschungsprojekte für alle Anwendungen würden einen großen Mehrwert für eine erneute Durchführung der Nutzwertanalyse darstellen.

## 7. Fazit und Ausblick

Das Ziel dieser Arbeit war es Anwendungspotenziale für die Kälteenergie von Flüssigwasserstoff im Hamburger Hafen zu identifizieren. Der Hamburger Hafen wird weltweit einer der ersten Häfen sein, der in einem großen Maßstab Wasserstoff importieren wird. Außerdem zeigen die Netzwerkaktivitäten von **cruh21** in Norddeutschland eine signifikante Aktivität hinsichtlich des Imports und der Nachfrage von flüssigem Wasserstoff in der Region. Methodisch kamen in dieser Arbeit eine Literaturrecherche und eine Nutzwertanalyse zum Einsatz. Die Kombination aus beiden ermöglichte es erst eine Übersicht möglicher Anwendungen der Kälteenergie zu erstellen und diese anschließend zu analysieren. Durch die Muss-Anforderungen der Nutzwertanalyse wurden die 21 Anwendungen der Kälteenergie auf neun reduziert. Diese wurden mittels vier Kategorien bewertet und anschließend wurde das Ergebnis mit einer Sensitivitätsanalyse überprüft.

Die Nutzwertanalyse ergab, dass die Anwendung mit dem größten Potenzial für die Nutzung von Kälteenergie aus Flüssigwasserstoff im Hamburger Hafen die Luftzerlegung ist. Durch die Sensitivitätsanalyse konnte die Robustheit der Luftzerlegungsanlage bestätigt werden. In der restlichen Nutzwertanalyse ist die Robustheit über zwei der drei Schritte der Sensitivitätsanalyse bestätigt.

Auf der Grundlage der vorgestellten Ergebnisse wird die Forschungsfrage wie folgt beantwortet: Alle neun analysierten Anwendungen bieten sich für die Anwendung im Hamburger Hafen an. Unter diesen beinhaltet die Luftzerlegungsanlage das meiste Potenzial. Eine Ansiedlung der Anwendungen wäre beispielsweise im Sustainable Energy Hub des Hamburger Hafens möglich.

Die Erkenntnisse aus dieser Arbeit könnten als Grundlage für zukünftige Forschungsarbeiten im Bereich der Kälteenergie von Flüssigwasserstoff dienen. Zum einen könnten, die in dieser Arbeit aufgezeigten Forschungslücken, geschlossen werden. Dabei könnten die Wirkungsgrade der Anwendungen, der technische Reifegrad der Anwendungen, das Emissionsreduktionspotenzial und die Umweltverträglichkeit im Vordergrund stehen. Damit wäre eine weitere Durchführung einer Nutzwertanalyse möglich, die die Erkenntnisse dieser Arbeit erweitern würde. Zum anderen könnte ein technisches Machbarkeitskonzept für eine Kombination der Anwendungen erstellt werden.

## Literaturverzeichnis

Alekseev, A., Arndt, T., Haberstroh, C., Jordan, T., Lindackers, D., Palacios, S., Pundt, A., Saß, P., Schulz, C., Weiss, K.-P., Wolf, C., Wolf, M. J., & Wu, C. (2023). *Wasserstoff-Verflüssigung, Speicherung, Transport und Anwendung von flüssigem Wasserstoff*. [object Object]. <https://doi.org/10.5445/IR/1000155199>

Almeida, A., Tulloch, M., Maghrebi, M., Neumann, M., Hertzsch, V., Kratzer, S., Gätsch, C., & Zibell, L. (2024). *Enabling Green Hydrogen Exports: Matching Scottish Production to German Demand* (S. 77) [Report]. Net Zero Technology Centre; cruh21 GmbH. <https://www.netzerotc.com/reports/enabling-green-hydrogen-exports-matching-scottish-production-to-german-demand-2/>

Atienza-Márquez, A., Bruno, J. C., & Coronas, A. (2018). Cold recovery from LNG-regasification for polygeneration applications. *Applied Thermal Engineering*, *132*, 463–478. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.073>

Aziz, M. (2021). Liquid Hydrogen: A Review on Liquefaction, Storage, Transportation, and Safety. *Energies*, *14*(18), Article 18. <https://doi.org/10.3390/en14185917>

Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt, & Unternehmen für Ressourcenschutz. (2010). *Kältemarktanalyse der Stadt Hamburg im Juni 2010* (S. 50). Behörde für Stadtentwicklung und Umwelt; Unternehmen für Ressourcenschutz. <https://www.kaeltenetz-hamburg.de/files/kaeltemarktanalyse.pdf>

Behörde für Umwelt, Klima, Energie und Agrarwirtschaft. (o. J.). *Bis 2045 CO<sub>2</sub>-neutral: Hamburgs neue Klimaziele*. #moinzukunft. Abgerufen 9. Juni 2024, von <https://www.moinzukunft.hamburg/was-bedeutet-klimaschutz-in-hamburg/das-macht-die-stadt-hamburg/hamburgs-klimaziele-785194>

Böhm, E., Hillenbrand, T., Liebert, J., Schleich, J., & Walz, R. (2002). *Kosten-Wirkungsanalyse von nachhaltigen Maßnahmen im Gewässerschutz—Kurzfassung*

[Forschungsbericht]. Fraunhofer-Institut für Systemtechnik und Innovationsforschung.

<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/short/k2101.pdf>

BWI. (2023a). *Hafenentwicklungsplan 2040—Im Überblick* (S. 23). Behörde für Wirtschaft und Innovation (BWI). <https://cdn.sanity.io/files/sxgebz2d/production/61cf7b32a2e-abf799b5a9bd72643e5f0cbb4697e.pdf>

BWI. (2023b). *Hafenentwicklungsplan 2040—Operative Umsetzung* (S. 61). Behörde für Wirtschaft und Innovation (BWI). <https://cdn.sanity.io/files/sxgebz2d/production/65b97e754fb04a48c0f2b907a27e36aeb9c28bc3.pdf>

BWI. (2023c). *Hafenentwicklungsplan 2040—Strategische Vision* (S. 61). Behörde für Wirtschaft und Innovation (BWI). <https://cdn.sanity.io/files/sxgebz2d/production/566e208fabdb0e3041d80193d56cdb5627c39e01.pdf>

Cox, A. (2024). *Was ist Liquefied Natural Gas (LNG)?* DVGW. <https://www.dvgw.de/themen/gas/gase-und-gasbeschaffenheit/liquefied-natural-gas-lng>

Cryospain. (2024, Mai 21). Luftzerlegungsanlage (LZA): Funktionsprinzip und Anwendungen. *Cryospain*. <https://cryospain.com/de/luftzerlegungsanlage-funktionsprinzip-anwendungen>

Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena) (Hrsg.). (o. J.). *Infoblätter Kältetechnik: Physikalische Grundlagen der Kälteerzeugung*. dena. Abgerufen 1. August 2024, von [https://andreasjahnke.de/index\\_htm\\_files/Infoblaetter\\_Kaeltetechnik.pdf](https://andreasjahnke.de/index_htm_files/Infoblaetter_Kaeltetechnik.pdf)

Dr. Schwarz, S. (2024). *Import von Wasserstoff*. DVGW. <https://www.dvgw.de/themen/energiewende/wasserstoff-und-energiewende/wasserstoff-import>

EnArgus. (2024). *Enthalpie*. enArgus. [https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d3357-2/\\*/\\*/Enthalpie?search=enthalpie&scope=all&op=Wiki.getwiki](https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/d3357-2/*/*/Enthalpie?search=enthalpie&scope=all&op=Wiki.getwiki)

Erstes Gesetz zur Änderung des Bundes-Klimaschutzgesetzes, 277959 3905 (2021). [http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger\\_BGBL&jumpTo=bgbl121s3905.pdf](http://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?startbk=Bundesanzeiger_BGBL&jumpTo=bgbl121s3905.pdf)

Essler, J. (2021). *Physikalische und technische Aspekte der Ortho-Para-Umwandlung von Wasserstoff* [Technischen Universität Dresden]. <https://tud.qucosa.de/api/qucosa%3A27220/attachment/ATT-0/>

F.A.Z. (2024, Juni 3). *Hochwasser in Süddeutschland. Kaum Entspannung in den Flutgebieten*. Frankfurter Allgemeine. <https://www.faz.net/aktuell/gesellschaft/ungluecke/hochwasser-in-sueddeutschland-olaf-scholz-besucht-reichertshofen-19762005.html>

Felixberger, J. K. (2017). *Chemie für Einsteiger*. Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-52821-1>

Frigo Coldstore Logistics, Kompetente Kühllogistik. (2024). *Daten und Fakten*. Frigo Coldstore Logistics. <https://frigo.de/daten-und-fakten/>

Frucht- und Kühl-Zentrum (FKZ). (2024). *Fruchthafen Hamburg*. HHLA Hamburger Hafen und Logistik AG. <https://hhla.de/unternehmen/tochterunternehmen/fruchthafen>

GeoBasis-DE & Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG). (2009a). *Google Maps—Rechenzentren Hamburg* [Karte]. <https://www.google.com/maps/search/rechenzentrum/@53.5502942,9.9702514,12.54z?entry=ttu>

GeoBasis-DE & Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG). (2009b). *Google Maps—Trockeneisproduktion Hamburg* [Karte]. <https://www.google.com/maps/search/trockeneisproduktion/@53.5734984,9.9407075,11.68z?entry=ttu>

Gochermann, J. (2021). Wasserstoff. In J. Gochermann (Hrsg.), *Halbzeit der Energiewende? An der Schwelle in eine neue Energiegesellschaft* (S. 237–276). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-63477-6\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-63477-6_8)

Guo, L. N., An, B. L., Chen, L. B., Chen, J. X., Wang, J. J., & Zhou, Y. (2019). Progress of liquefied natural gas cold energy utilization. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 502, 012148. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/502/1/012148>

Gupta, S., Parande, G., & Gupta, M. (2024). Comparison of Shallow ( $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) and Deep Cryogenic Treatment ( $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) to Enhance the Properties of a Mg/2wt.%CeO<sub>2</sub> Nanocomposite. *Technologies*, 12(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/technologies12020014>

Hamburg. (2024). *Kühlhaus in Hamburg*. Hamburg.de. <https://www.hamburg.de/branchenbuch/hamburg/10238232/n0/>

Hamburger Energiewerke. (2024). *Das Fernkältenetz in der City Nord*. Hamburger Energiewerke. <https://unternehmen.hamburger-energiewerke.de/wissen-themen/fernkaelte/das-fernkaeltenetz-in-der-city-nord>

Hank, C., Sternberg, A., Köppel, N., Holst, M., Smolinka, T., Schaadt, A., Hebling, C., & Henning, H.-M. (2020). Energy efficiency and economic assessment of imported energy carriers based on renewable electricity. *Sustainable Energy & Fuels*, 4(5), 2256–2273. <https://doi.org/10.1039/D0SE00067A>

He, T., Chong, Z. R., Zheng, J., Ju, Y., & Linga, P. (2019). LNG cold energy utilization: Prospects and challenges. *Energy*, 170, 557–568. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.170>

HIW Hamburg Invest Wirtschaftsförderungsgesellschaft. (2024, Februar 9). *OECD-Studie: So kann Hamburg klimaneutral wirtschaften*. Hamburg Business - Das Wirtschaftsportal. <https://hamburg-business.com/de/news/oecd-studie-so-kann-hamburg-klimaneutral-wirtschaften>

International Society for Biological and Environmental Repositories (ISBER). (2008). Collection, Storage, Retrieval and Distribution of Biological Materials for Research. *Cell Preservation Technology*, 6(1), 3–58. <https://doi.org/10.1089/cpt.2008.9997>

IPCC. (o. J.). *Der IPCC. IPCC: Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen*. IPCC Deutsche Koordinierungsstelle. Abgerufen 13. Juli 2024, von <https://www.de-ipcc.de/119.php>

IRENA. (2022). *Global Hydrogen Trade to Meet the 1.5°C Climate Goal—Part II - Technology review of hydrogen carriers*. International Renewable Energy Agency.

<https://www.irena.org/%20%20%20%20Publications/2022/Apr/Global-hydrogen-trade-Part-II>

Janczura, S. (2022, August 1). *LNG-Terminals: Warum Wasserstoff für die Planung unerlässlich ist*. idw - Informationsdiest Wissenschaft. <https://idw-online.de/de/news799202>

KIT. (2024, Februar 22). *Flüssigwasserstoff – ein Überblick zu einem besonderen Energieträger* (KIT) [Text]. KIT – Karlsruher Institut für Technologie; Autor. [https://www.itep.kit.edu/fluessigwasserstoff\\_ein\\_ueberblick\\_zu\\_einem\\_besonderen\\_energie-traeger.php](https://www.itep.kit.edu/fluessigwasserstoff_ein_ueberblick_zu_einem_besonderen_energie-traeger.php)

Kühnapfel, J. B. (2021). *Scoring und Nutzwertanalysen: Ein Leitfaden für die Praxis*. Springer Fachmedien. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-34810-6>

Lausecker, W. (2021). *Tieftemperaturbehandlung ist nicht gleich Tieftemperaturbehandlung !!* (S. 5). cooltech. <https://cooltech.at/wp-content/uploads/TTB-ist-nicht-gleich-TTB.pdf>

Li, B., Yang, Q., Zhang, R., & Yang, S. (2020). Design and simulation optimization of cold storage and air conditioning system in LNG powered carrier by using cold energy of LNG based on HYSYS. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 467, 012019. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/467/1/012019>

LUMITOS AG. (2024a). *Energiedichte*. chemie.de. <https://www.chemie.de/lexikon/Energiedichte.html>

LUMITOS AG. (2024b, Juni 18). *Joule-Thomson-Effekt*. chemie.de. <https://www.chemie.de/lexikon/Joule-Thomson-Effekt.html>

Max-Planck-Institut für Chemische Energiekonversion, Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG, & cruh21 GmbH - Part of Drees & Sommer. (2024). *Transport- und Speicherinfrastruktur für Grünen Wasserstoff* (S. 32). Wasserstoff-

Leitprojket TransHyDe. [https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/lw\\_resource/datapool/systemfiles/elements/files/E91E9A6BBB920D99E0537E695E863178/current/document/TransHyDE\\_Projektbroschuere.pdf](https://www.wasserstoff-leitprojekte.de/lw_resource/datapool/systemfiles/elements/files/E91E9A6BBB920D99E0537E695E863178/current/document/TransHyDE_Projektbroschuere.pdf)

Messineo, A., & Panno, G. (2011). LNG cold energy use in agro-food industry: A case study in Sicily. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 3(1), 356–363. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2011.02.002>

Mokhatab, S., Poe, W. A., & Speight, J. G. (Hrsg.). (2006). Chapter 10—Natural gas liquids recovery. In *Handbook of Natural Gas Transmission and Processing* (S. 365–400). Gulf Professional Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-075067776-9/50015-4>

NDR. (2024, April 26). *LNG: Fakten zu Flüssigerdgas und Projekten in Norddeutschland*. <https://www.ndr.de/nachrichten/info/LNG-Fakten-zu-Fluessigerdgas-und-Projekten-in-Norddeutschland,lnghintergrund100.html>

NOAA Global Monitoring Laboratory, Tank, P., & Thoning, K. (2020, September). *Global Monitoring Laboratory—Carbon Cycle Greenhouse Gases. How we measure background CO2 levels on Mauna Loa*. NOAA Global Monitoring Laboratory. [https://gml.noaa.gov/ccgg/about/co2\\_measurements.html](https://gml.noaa.gov/ccgg/about/co2_measurements.html)

Noor Akashah, M. H., Mohammad Rozali, N. E., Mahadzir, S., & Liew, P. Y. (2023). Utilization of Cold Energy from LNG Regasification Process: A Review of Current Trends. *Processes*, 11(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/pr11020517>

NORDFROST GmbH & Co. KG. (2024). *Unternehmensflyer. Nordfrost. 40 Standorte—Unser Netzwerk* (S. 2). NORDFROST GmbH & Co. KG. [https://nfcnd.nordfrost.de/wp\\_assets/NORDFROST\\_Unternehmensflyer\\_DE.PDF](https://nfcnd.nordfrost.de/wp_assets/NORDFROST_Unternehmensflyer_DE.PDF)

Ortiz, C. R., Dolci, F., & Weidner, R. E. (2022). *Assessment of hydrogen delivery options*. <https://doi.org/10.2760/869085>

OSSE Logistik. (2024). *Kühllager / Klimalager. Wir machen auch krumme Geschäfte*. OSSE Logistik. <https://www.osse-logistik.de/index.php/kuehllagerklimalager.html>

Peschka, W. (1984). *Flüssiger Wasserstoff als Energieträger: Technologie und Anwendungen*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-8748-7>

Riaz, A., Qyyum, M. A., Min, S., Lee, S., & Lee, M. (2021). Performance improvement potential of harnessing LNG regasification for hydrogen liquefaction process: Energy and exergy perspectives. *Applied Energy*, 301, 117471. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117471>

Rohnstock, J. (2023, November 23). *Stab und Strategie—Strom und Wasserstoff in einer gemeinsamen Leitung* (KIT) [Text]. KIT – Karlsruher Institut für Technologie; Julia Rohnstock. [https://www.sts.kit.edu/expertinnen-und-experten-des-kit\\_arndt.php](https://www.sts.kit.edu/expertinnen-und-experten-des-kit_arndt.php)

Saboor, F. H., & Hajizadeh, O. (2020). Separation of Light Hydrocarbons: A Mini-review. *Advanced Journal of Chemistry-Section A*, 3(6). <https://doi.org/10.22034/ajca.2020.114713>

Saur, E. (1958). Flüssiger Wasserstoff. *Nachrichten der Giessener Hochschulgesellschaft* 27 (1958), 92 - 108. <http://dx.doi.org/10.22029/jlupub-2489>

Staiß, F., Adolf, J., Ausfelder, F., Erdmann, C., Fishedick, M., Hebling, C., Jordan, T., & Klepper, G. (2022). *Analyse: Optionen für den Import grünen Wasserstoffs nach Deutschland bis zum Jahr 2030. Transportwege – Länderbewertungen – Realisierungserfordernisse* ((Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft)). <https://www.acatech.de/publikation/wasserstoff/>

Staudt, C., Hofsäß, C., von Lewinski, B., & Mörs, F. (2024). *Kurzstudie zu Transportoptionen von Wasserstoff* (S. 102). DVGW-EBI. <https://www.dvgw.de/medien/dvgw/forschung/berichte/g202224-h2-import-abschlussfolien-akt20240311.pdf>

Tan, H., Sun, N., Lin, C., & Li, Y. (2016). *Experimental study on a self-refrigerated auto air conditioning system based on LNG-fuelled trucks*. 1586–1591. <https://doi.org/10.1109/ICIEA.2016.7603838>

University of Brighton. (2024, Juli 3). *Future Energy: Liquid Air Energy Storage (LAES) research*. University of Brighton. <https://www.brighton.ac.uk/research/research-news/feature/b-liquid-air-energy-storage.aspx>

Wnuck, C. (2010, Oktober 20). *Nordfrost kauft Kühlhaus Zentrum*. FINANCE. <https://www.finance-magazin.de/deals/ma-deals/nordfrost-kauft-kuehlhaus-zentrum-11591/>

Yan, F., & Xu, B. (2013). The Project Design for Cold Energy Recovery of LNG Vehicle Air-Conditioning System. *Advanced Materials Research*, 773, 43–46. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.773.43>

Zhang, Y., Evans, J. R. G., & Yang, S. (2011). Corrected Values for Boiling Points and Enthalpies of Vaporization of Elements in Handbooks. *Journal of Chemical & Engineering Data*, 56(2), 328–337. <https://doi.org/10.1021/jc1011086>

# Eidesstattliche Erklärung

## Eidesstattliche Erklärung und Veröffentlichungserklärung Student oder Studentin

—  
Nutzwertanalyse der Kälteenergie von Flüssigwasserstoff: Anwendungspotenziale im Hamburger Hafen

### Eidesstattliche Erklärung Student oder Studentin

verfasst von: Frau **Zibell** Lotta

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem o.a. formulierten Thema ohne fremde Hilfe selbständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen sind unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Datum: 19.8.24

Unterschrift: 

Lotta Zibell

---

## Anhang

Im Folgenden wird jede Anwendung kurz erläutert. Für einige Anwendungen lagen keine Quellen vor, sodass keine Erläuterungen erfolgen konnte. Dies ist direkt bei der jeweiligen Anwendung vermerkt.

### -253 °C bis -163 °C Verflüssigung von LNG oder LH<sub>2</sub>

Die Kälteenergie von Flüssigwasserstoff kann verwendet werden um LNG zu verflüssigen. Alternativ kann auch LNG zur Wasserstoff Verflüssigung verwendet werden (Riaz et al., 2021). Diese Anwendung ist vermutlich sehr unüblich, weil dazu Länder die das eine Gas importieren das andere exportieren müssten. (IRENA, 2022)

### -193 °C bis -191 °C – Luftzerlegung

Luft setzt sich aus 78 Volumen-% Stickstoff, 20,94 Volumen-% Sauerstoff, 0,93 Volumen-% Argon, 0,04 Volumen-% Kohlenstoffdioxid zusammen und weniger als 1 Volumen-% nehmen weitere Edelgase ein (NOAA Global Monitoring Laboratory, et al., 2020). Luftzerlegungsanlagen zerlegen die Luft in ihre einzelnen Bestandteile, dafür wird viel Energie gebraucht, da für reinen Sauerstoff und Stickstoff tiefe Temperaturen benötigt werden (Guo et al., 2019). Kälteenergie von LNG kann bei der Erreichung der tiefen Temperaturen behilflich sein und damit die Gesamteffizienz erhöhen und den Stromverbrauch von Luftzerlegungsanlagen verringern. Eine Luftzerlegungsanlage bietet sich in Industrieprozessen, zum Beispiel der Metallverarbeitung oder der chemischen Produktion, an (Cryospain, 2024).

### -180 °C bis -150 °C – Kombination aus LAES (liquid air energy storage system) und LNG

Bei einem LAES-System handelt es sich um ein Flüssigluftspeichersystem, was als Energiespeicher genutzt wird (University of Brighton, 2024).. Dieser macht sich das gespeicherte Wärmepotenzial von kryogenen Flüssigkeiten zunutze (ebd.). Die zugrundeliegende Technik ist eine Druckluftspeicherung in Kombination mit einem Niedrigtemperatur-Verflüssigungsverfahren, bei dem die unter hohem Druck stehende Druckluft abkühlt und für die Speicherung bei normalem Druck verflüssigt wird (Guo et al., 2019). Ein hybrides LAES-System, dass die LNG-Kälteenergie nutzt, kann die Effizienz eines LAES-System verbessern und gleichzeitig die Kälteenergie von LNG über lange Zeit speichern (Noor Akashah et al., 2023). In weiterer Kombination mit einem Organic Rankine Cycle (ORC)-System, kann zusätzlicher Strom während des Entladungsprozesses ermöglicht werden (ebd.). In einer mathematischen Berechnung des Systems konnte festgestellt werden, dass die Stromspeicherleistung und -dichte im Vergleich zu alleinigen LAES-Systemen, höher ausfällt (ebd.).

### -163 °C – Supraleiter

Bei Supraleitern handelt es sich um Leitungen bei denen ein verlustfreier Stromtransport möglich ist, wenn die Temperatur des Supraleiters dauerhaft unterhalb der Sprungtemperatur bleibt (Alekseev et al., 2023; Saur, 1958). Bisher findet die Kühlung meist mit flüssigem Helium oder mit flüssigem Stickstoff statt (Alekseev et al., 2023). Die Kühlung würde auch mit Flüssigwasserstoff funktionieren, der Vorteil dabei wäre, dass keine extra Energie zur Kühlung aufgewendet werden muss (ebd.). Bei der Idee einer „hybriden Pipeline“, würde in ein Supraleiterkabel für Strom in die Flüssigwasserstoff-Pipeline integriert werden (Rohnstock, 2023). Das Supraleiterkabel hat keinen störenden Effekt auf den Flüssigwasserstoff, dieser hätte allerdings den positiven Effekt den Supraleiter zu kühlen (ebd.). So wäre der Transport von Flüssigwasserstoff mit dem Transport von verlustfreiem Strom in einer Pipeline kombiniert (ebd.). Dies hätte nicht nur energetische, sondern auch platzsparende und damit auch wirtschaftliche Vorteile. (Alekseev et al., 2023; Saur, 1958)

### -145 °C – Abtrennung von leichten Kohlenwasserstoffen

Einer der wichtigsten und energieintensivsten petrochemischen Prozesse ist die Abtrennung von leichten Kohlenwasserstoffen (LH). Basierend auf traditionellen Trennverfahren wie Destillation und Extraktion wurden verschiedene Techniken entwickelt. Dabei sind vor allem der hohe Energieverbrauch und der geringe Wirkungsgrad problematisch. Eine Option der Abtrennung ist die mittels kryogener Destillation. Hierbei kann LNG als kryogene Flüssigkeit fungieren und so die Energiekosten verringern. (Saboor & Hajizadeh, 2020)

### -140 °C Kryogene CO<sub>2</sub>-Abscheidung

Eine Option Kohlenstoffdioxid (CO<sub>2</sub>) abzuscheiden, ist die kryogene CO<sub>2</sub>-Abscheidung. Dabei wird CO<sub>2</sub> aus dem Rauchgas abgeschieden, indem es verflüssigt wird. Hierfür wird ein externer Kühlkreislauf zur Kühlung und Verflüssigung des CO<sub>2</sub> benötigt, der mit einem erheblichen Stromverbrauch verbunden ist. Die Integration des LNG-Regasifizierungsprozesses mit der kryogenen Kohlendioxidabscheidung kann zu erheblichen Energieeinsparungen bei gleichzeitiger Verringerung der CO<sub>2</sub>-Bilanz beitragen, wenn das Kraftwerk Erdgas oder LNG als Brennstoff verwendet. Um flüssiges CO<sub>2</sub> zu erhalten, kühlt LNG das aus dem Kessel austretende Rauchgas im Kondensator auf eine Temperatur unterhalb der Taupunkttemperatur des CO<sub>2</sub> ab. Das regasifizierte Erdgas wird dann dem Kessel als Brennstoff zugeführt. Von unterschiedlichen Forschenden wurde verschiedene Spezifizierungen des Systems erforscht und bei allen wurde die Nutzung der Kälteenergie in den Fokus gerückt. (He et al., 2019)

### -140 °C bis -120 °C – Kryogene Zerkleinerung

Im Paper „Progress of liquefied natural gas cold energy utilization“ werden in der ersten Abbildung Anwendungen zur Nutzung der Kälteenergie von LNG dargestellt. Kryogenische Zerkleinerung ist eine dieser Anwendungen mit einem Temperaturlevel von -140 °C bis -120 °C. Im Paper wird diese Anwendungen nicht weiter aufgegriffen, erklärt oder im Literaturverzeichnis die Quelle für die Anwendung angegeben. Zur Vollständigkeit wird die Anwendung hier trotz dessen aufgeführt. (Guo et al., 2019)

### -120 °C – Langzeitlagerung von biologischen Materialien

Die Anwendung zur Langzeitlagerung von biologischen Materialien, wird in dem Paper „Progress of liquefied natural gas cold energy utilization“ ebenfalls aufgeführt und nicht näher erläutert. Das Temperaturlevel liegt bei -120 °C und die Langzeitlagerung von biologischen Materialien scheint durch flüssiges Erdgas effizienter gestaltet werden zu können (Guo et al., 2019). Flüssigstickstoff (LN<sub>2</sub>) kommt dabei bereits zum Einsatz. Die extreme Kälte von LN<sub>2</sub> verlangsamt die meisten chemischen und physikalischen Reaktionen, die zu einer Schädigung der Proben führen, und verringert die Abhängigkeit von elektrischer Energie, mit der mechanische Gefriergeräte betrieben werden. (International Society for Biological and Environmental Repositories (ISBER), 2008)

### -90 °C bis 0 °C – „KälteDienst“ für Unternehmen

Die Kälteenergie von LNG kann in ein nahe gelegenes Industriegebiet eingeleitet werden und so an Unternehmen weitergegeben werden, die einen hohen Kühlungsbedarf haben. Dieser „KälteDienst“ ist mit dem Modell des „Wärmedienst“ vergleichbar, indem ein System Wärme produziert und anschließend verteilt und in dem anderen Kälte. Die Unternehmen die davon profitieren kommen aus unterschiedlichen Bereichen: Agrar- und Tiefkühlkost, Pharmazie, Mikroelektronik und große Verbrauchermärkte sowie Unternehmen, die Luft verflüssigen, Stickstoff und Sauerstoff produzieren. Die eben genannten Unternehmen führen teilweise die Anwendungen durch, die in diesem Kapitel vorgestellt werden. Die Kälteenergie als „KälteDienst“ zu verwenden, stellt damit eine übergeordnete Anwendung da, durch die ermöglicht wird, die Kälteenergie effizient nutzen zu können. (Messineo & Panno, 2011)

### -80 °C – Oberflächlich kryogene Behandlung

Bei der oberflächlich kryogenen Behandlung tritt wie bei der Langzeitlagerung von biologischen Materialien ein Phänomen auf, dass im Paper „Progress of liquefied natural gas cold energy utilization“ aufgeführt wird, wodurch auf eine Nutzung der Kälteenergie von LNG zu schließen ist (Guo et al., 2019). Außerdem wird in einem anderen Paper beschrieben, dass die Kälteenergie von Flüssigstickstoff für die oberflächliche kryogene Behandlung genutzt wird. Allerdings findet diese Anwendung bei -20 °C und nicht bei -80 °C statt. (Gupta et al., 2024)

### -78,5 °C – Trockeneisproduktion

Im Paper „Progress of liquefied natural gas cold energy utilization“ werden in der ersten Abbildung Anwendungen zur Nutzung der Kälteenergie von LNG dargestellt. Trockeneisproduktion ist eine dieser Anwendungen mit einem Temperaturlevel von -78,5 °C. Im Paper wird diese Anwendungen nicht weiter aufgegriffen, erklärt oder im Literaturverzeichnis die Quelle für die Anwendung angegeben. Zur Vollständigkeit wird die Anwendung hier trotz dessen aufgeführt. (Guo et al., 2019)

### -60 °C – Kühlkette für Lebensmitteltransporte

In der Lebensmittelindustrie ist eine konstante Kühlkette sehr wichtig, damit die Lebensmittel frisch bleiben. Bei Arzneimittel ist die Kühlkette besonders relevant, damit die Wirksamkeit garantiert werden kann. Zum Einfrieren und Konservieren von Lachs, ist beispielsweise eine Temperatur von mindestens -60 °C notwendig. Für die Betreibung von Kühllhäusern, wird sehr viel Strom benötigt. Die Nutzung der Kälteenergie von LNG kann die Menge an benötigtem Strom reduzieren. Die Kälteenergie kann zur Kühlung des Kühlmittels eingesetzt werden, um die niedrige Kühltemperatur beizubehalten. (He et al., 2019)

### -50 °C bis -35 °C – Tiefkühl-/ Kühllagerhaus

Antonio Atienza-Márquez (2018) hat auf Seite 468 seiner Arbeit eine Abbildung von LNG Kälteenergie Anwendungen, für die keine Quelle angegeben wird. In dieser Grafik wird bei -50 °C bis -35 °C Tiefkühl-/ Kühllagerhaus als Anwendung genannt.

### -35 °C bis 18 °C Lagerung von Tiefkühlkost

Antonio Atienza-Márquez (2018) hat auf Seite 468 seiner Arbeit eine Abbildung von LNG Kälteenergie Anwendungen, für die keine Quelle angegeben wird. In dieser Grafik wird bei -35 °C bis -18 °C Lagerung von Tiefkühlkost als Anwendung genannt.

### -30 °C – NGL-Rückgewinnung

Die Abkürzung NGL steht für natural gas liquids und kann mit Erdgasflüssigkeiten übersetzt werden. Daraus besteht ein Großteil des Erdgases und dazu gehören Ethan, Propan, Butan und Naturbenzin (Kondensat) (Mokhatab et al., 2006). Die Rückgewinnung kann als Einnahmequelle dienen, da NGIs einzeln einen höheren Wert haben, als der Erdgasstrom selbst. Die einzelnen Komponenten können beispielsweise als Brennstoff oder Ausgangsmaterial an Raffinerien verkauft werden (ebd.). Der notwendige Energieverbrauch kann gesenkt werden, wenn die Rückgewinnung während des Regasifizierungsprozesses erfolgt (He et al., 2019). Beim

herkömmlichen NGL-Rückgewinnungsverfahren ist eine Abkühlung des Erdgases auf mindestens  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  notwendig (ebd.).

#### $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ – Meerwasserentsalzung

Es gibt verschiedene Methoden zur Entsalzung von Meerwasser, eine davon ist die Gefrierentsalzung. Bei dieser Methode werden Eiskristalle gebildet, die Salze zurückhalten und so Mineralien aus dem Meerwasser entfernen. Für diesen sehr energieintensiven Prozess kann die Kälteenergie von LNG genutzt werden, um die Temperatur nicht auf andere Weise absenken zu müssen. (He et al., 2019; Noor Akashah et al., 2023)

#### $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ Lebensmittelkonservierung

Antonio Atienza-Márquez (2018) hat auf Seite 468 seiner Arbeit eine Abbildung von LNG Kälteenergie Anwendungen, für die keine Quelle angegeben wird. In dieser Grafik wird bei  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  Lebensmittelkonservierung als Anwendung genannt.

#### $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ Fernkälte

Antonio Atienza-Márquez (2018) hat auf Seite 468 seiner Arbeit eine Abbildung von LNG Kälteenergie Anwendungen, für die keine Quelle angegeben wird. In dieser Grafik wird bei  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$  Fernkälte als Anwendung genannt.

#### $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ – Kühlung von Rechenzentren

Die Klimatisierung von Gebäuden, insbesondere die Kühlung von Rechenzentren, ist notwendig, um Überhitzungen und Brände zu vermeiden. Um die Kälteenergie von LNG für diesen Zweck nutzbar zu machen, wird ein Wärmeträger eingesetzt, der die Kälteenergie durch den Wärmetauscher leitet. Als Wärmeträger wird häufig Ethylenglykol verwendet, da es einen niedrigen Gefrierpunkt hat und damit den niedrigen Temperaturen von LNG entspricht. Der kalte Ethylenglykolstrom wird verwendet, um die Wärme des heißen Kühlmittelstroms aufzunehmen, der aus dem Rechenzentrum austritt. Der regenerierte kalte Strom wird dann wieder in das Rechenzentrum eingespeist, um es weiter zu kühlen. (He et al., 2019)

#### $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ Klimaanlage

Antonio Atienza-Márquez (2018) hat auf Seite 468 seiner Arbeit eine Abbildung von LNG Kälteenergie Anwendungen, für die keine Quelle angegeben wird. In dieser Grafik wird bei  $21\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $24\text{ }^{\circ}\text{C}$  Klimaanlage als Anwendung genannt.

#### Stromerzeugung

Die häufigste Anwendung der Kälteenergie von LNG ist die kryogene Stromerzeugung. Dabei kann LNG das Kühlwasser ersetzen, als Wärmesenke dienen und insgesamt die Stromerzeugungseffizienz erhöhen (Guo et al., 2019; He et al., 2019). Die Grundverfahren zur Erzeugung

von Strom durch die Nutzung der Kälteenergie sind der Direktexpansionszyklus, der organische Rankine-Zyklus und der Brayton-Zyklus (Guo et al., 2019). Die Effizienz der Grundverfahren ist begrenzt, weshalb sich seit den 1970er Jahren Forschungen mit Kombinationen der Zyklen auseinandersetzen, um die Effizienz der Verfahren zu erhöhen (ebd.). Eine dieser Kombinationen besteht aus dem Direktexpansionszyklus, dem Brayton-Zyklus und dem Rankine-Zyklus und verfügt über einen thermischen Wirkungsgrad von 56,72% (ebd.). Bei allen Verfahren besteht nur ein geringer Bedarf an kalter Energie, weshalb eine Umwandlung in eine minderwertige Energieform stattfinden (ebd.). Dies hat die Verringerung der Exergie der kalten Energiegewinnung zufolge. Daher kann die kryogene Stromerzeugung, unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Effizienz und der Kältenutzung von LNG, nicht als optimale Option zur Nutzung der Kälteenergie betrachtet werden (ebd.).

In einer Kurzstudie des DVGW und des ebi wurden unterschiedliche Transportoptionen miteinander verglichen. Flüssigwasserstoff wurde dabei ebenfalls untersucht, einmal zum aktuellen Zeitpunkt und einmal unter Berücksichtigung des Zukunftspotenzials. Mit letzterem weist Flüssigwasserstoff den höchsten Ausnutzungsgrad auf, beim Vergleich der benötigten Gesamtenergie um 1 kg H<sub>2</sub> in das Importland zu importieren. Dies liegt vor allem am optimierten Schiffstransport. (Staudt et al., 2024)

Tabelle 13. Vergleich benötigter Gesamtenergie, verschiedener Transportoptionen, um 1 kg H<sub>2</sub> zu importieren (Staudt et al., 2024)

Eingesetzte Energie in kWh für 1 kg H <sub>2</sub>	LH <sub>2</sub> – Ready now	LH <sub>2</sub> - Future	NH <sub>3</sub> + Cracking	LNG + SR	LOHC
Input H <sub>2</sub>	33,3	33,3	44,2	60,2	33,3
Hilfsenergie Exportland	12,5	8	5,3	5,7	1,1
Lagern und Verladen	2,4	2,3	0,01	2,7	0,1
Schifftransport	26,4	1,3	1,8	1,2	1,2
Hilfsenergie Importland	0,3	0,3	2,1	2	13,2
<b>Ausnutzungsgrad</b>	<b>45 %</b>	<b>74 %</b>	<b>62 %</b>	<b>47 %</b>	<b>68 %</b>

### Recherche Ergebnisse zu den Muss-Anforderungen

In Abbildung 6 ist ein Screenshot von Google Maps zu sehen, dieser wurde am 31.07.2024 erstellt und zeigt die Rechenzentren Hamburgs. Es befinden sich mehrere Rechenzentren in Hamburg, allerdings keine im Hamburger Hafen.

Abbildung 7 zeigt eine Karte die auf die Daten aus dem Branchenbuch Hamburgs zugreift. Es gibt sechs Kühlhäuser in Hamburg und fünf davon liegen im Hamburger Hafen und sind auf der Abbildung abgebildet. Die Temperaturspanne aller liegt zwischen  $-22\text{ °C}$  und  $25\text{ °C}$  (Frigo Coldstore Logistics, Kompetente Kühllogistik, 2024; Frucht- und Kühl-Zentrum (FKZ), 2024; NORDFROST GmbH & Co. KG, 2024; OSSE Logistik, 2024). Die Kühlhaus Zentrum Aktiengesellschaft wurde von der Nordfrost GmbH & Co. KG aufgekauft, wodurch diese zwei Kühlhäuser im Hamburger Hafen besitzt (Wnuck, 2010).

In einer weiteren Recherche bei Google Maps, wurde nach Trockeneisproduktionen gesucht. In Abbildung 8 wird deutlich, dass im Hamburger Hafen keine Trockeneis produziert wird.

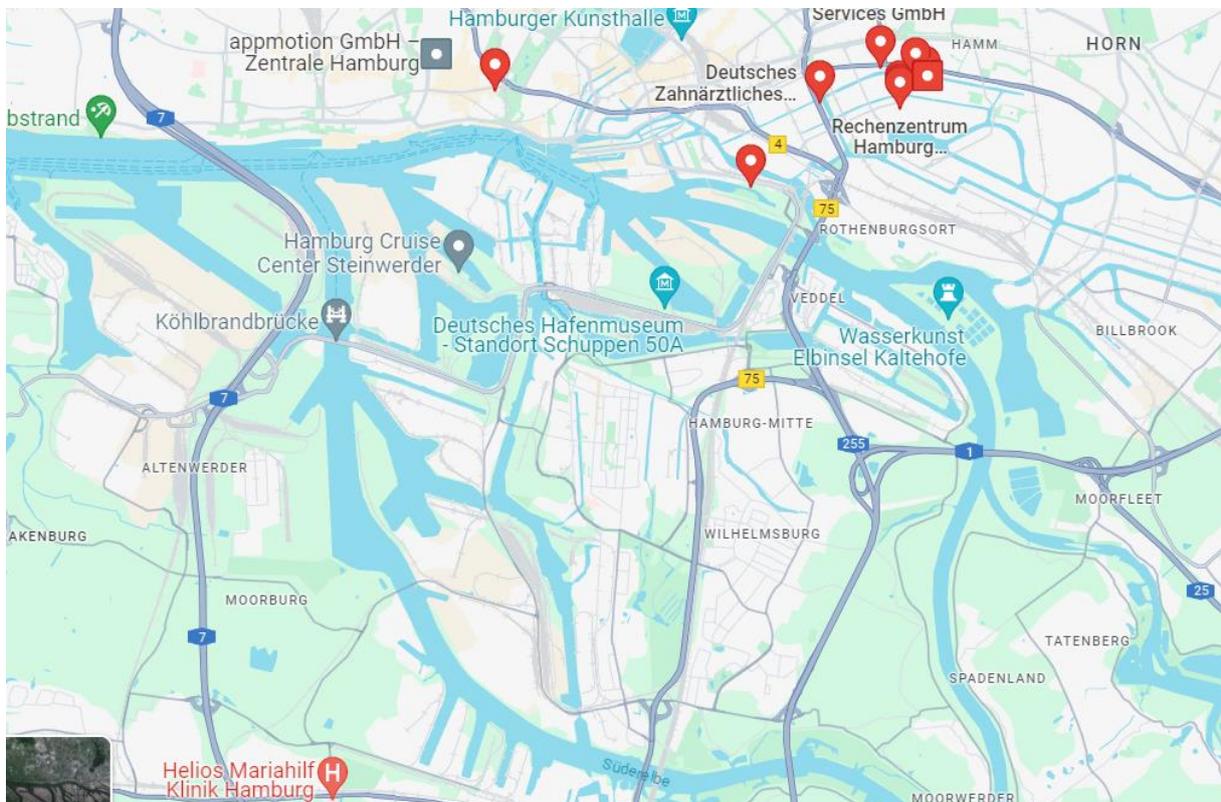


Abbildung 6: Google Recherche zu Rechenzentren im Hamburger Hafen (GeoBasis-DE & Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), 2009a)



Abbildung 7: Recherche zu den Kühlhäusern im Hamburger Hafen (eigene Darstellung, Karte von Hamburg, 2024 Temperaturdaten von; Frucht- und Kühl-Zentrum (FKZ), 2024; Frigo Coldstore Logistics, Kompetente Kühllogistik, 2024; NORDFROST GmbH & Co. KG, 2024; OSSE Logistik, 2024)

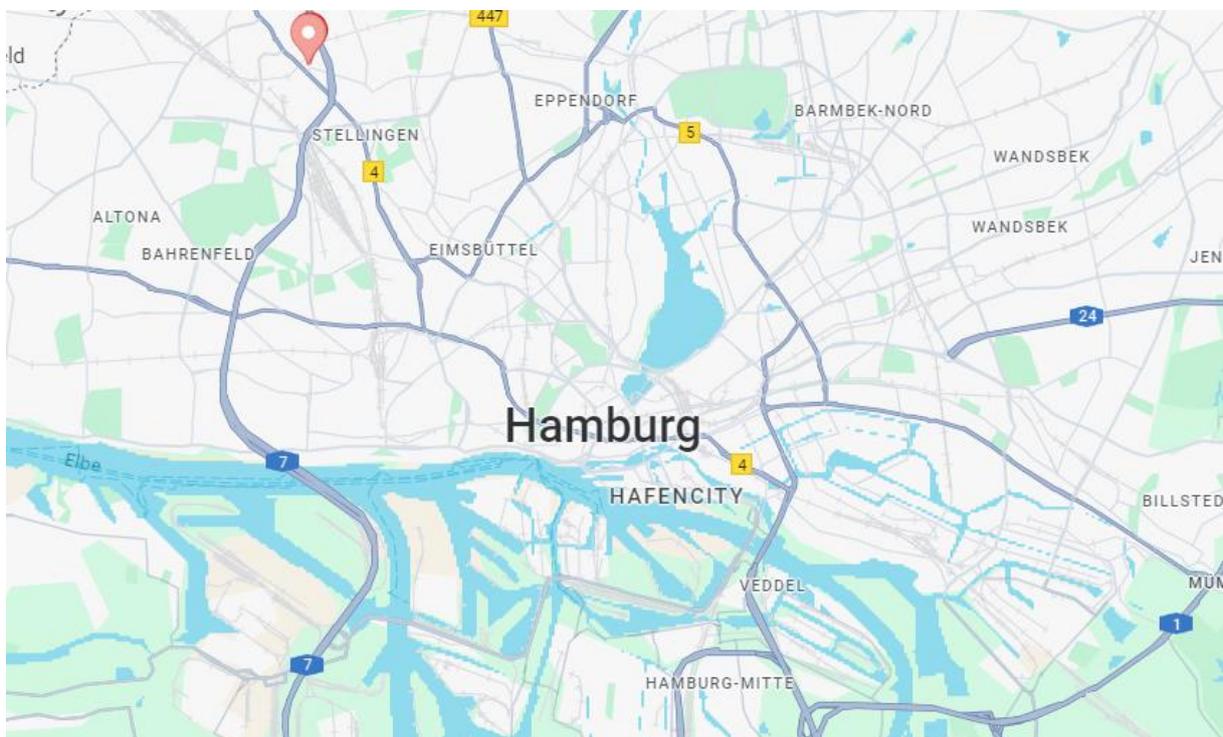


Abbildung 8: Google Recherche zu Trockeneisproduktion im Hamburger Hafen (GeoBasis-DE & Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG), 2009b)

In Tabelle 14 ist die Bewertungsgrundlage für die Auswertung der Nutzwertanalyse dargestellt. In Tabelle 15, 16 und 17 befinden sich die Ergebnistabellen für die drei Schritte der Sensitivitätsanalyse der Nutzwertanalyse.

Tabelle 14: Bewertungsgrundlage der Nutzwertanalyse

Bewertungsgrundlage										
Bewertungs-kategorien/ -kriterien	Gewichtung	Rechenzen-tren	Fernkälte	Lebensmittel-konservie-rung	Lagerung von Tiefkühlkost	Kältedienst für Unterneh-men	CO <sub>2</sub> -Abschei-dung	Supraleiter	Kombi LAES und LNG	Luftzerlegung
<b>technische Kriterien</b>		Zielertrag	Zielertrag	Zielertrag	Zielertrag	Zielertrag	Zielertrag	Zielertrag	Zielertrag	Zielertrag
Temperatur der Anwen-dung (nied-rige Tempera-tur)	30	7°C	4 °C bis 10 °C	0 °C bis 20°C	-35 °C bis -18 °C	-90 °C bis 0°C	-140 °C	-163 °C	-180 °C bis -150 °C	-193 °C bis -191 °C
Erwähnung in den unter-suchten Ar-beiten (hohe Zahl)	15	Noor Akas-hah, He	Atienza-Márquez	Atienza-Márquez	Atienza-Márquez	Messineo und Panno	Guo, Atienza-Márquez, Noor Akas-hah, He	Alekseev	Guo, Noor Akashah	Guo, Atienza-Márquez, Noor Akas-hah, He
<u>Summe (All-gemein)</u>	45									
<b>Hafenspezifi-sche Kriterien</b>										
Handlungsfeld (passend zu möglichst vie-len)	30	1.; 2.	2.;3.;4.	2.	2.	2.;3.;4.	2	2.;3.	2.;4.	2.
Standort (nein, HH, HH Hafen)	25	Hamburg	Hamburg	HH Hafen	HH Hafen	Nein	Hamburg	Nein	Nein	Hamburg
<u>Summe (Ham-burger Hafen)</u>	55									
<b><u>Gesamt-summe</u></b>	100									

Tabelle 15: Ergebnisse des 1. Schritts der Sensitivitätsanalyse der Nutzwertanalyse, die Gewichtungen aller Kriterien sind gleich

Sensitivitätsanalyse Schritt 1: Gewichtung aller Kriterien gleich																			
Bewertungskate- gorien/ -kriterien	Gewich- tung	Rechenzen- tren				Lebensmittel- konservie- rung				Kälte- dienst für Unterneh- men				CO <sub>2</sub> -Abschei- dung		Kombi LAES und LNG		Luftzerlegung	
		Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert
<u>technische Krite- rien</u>																			
Temperatur der An- wendung (niedrige Temperatur)	25	1	25	1	25	1	25	2	50	3	75	4	100	5	125	5	125	5	125
Erwähnung in den untersuchten Ar- beiten (hohe Zahl)	25	2	50	1	25	1	25	1	25	1	25	4	100	1	25	2	50	4	100
<u>Summe (technische Kriterien)</u>	50	3	75	2	50	2	50	3	75	4	100	8	200	6	150	7	175	9	225
<u>Hafenspezifische Kriterien</u>																			
Handlungsfeld (passend zu mög- lichst vielen)	25	3	75	4	100	2	50	2	50	4	100	2	50	3	75	3	75	2	50
Standort (nein, HH, HH Hafen)	25	3	75	3	75	5	125	5	125	1	25	3	75	1	25	1	25	3	75
<u>Summe (Hafenspe- zifisch)</u>	50	6	150	7	175	7	175	7	175	5	125	5	125	4	100	4	100	5	125
<u>Gesamtsumme</u>	100	9	225	9	225	9	225	10	250	9	225	13	325	10	250	11	275	14	350

Tabelle 16: Ergebnisse des 2. Schritts der Sensitivitätsanalyse der Nutzwertanalyse, bei dem die Gewichtungsspitzen geglättet wurden

Sensitivitätsanalyse Schritt 2: Gewichtungsspitzen glätten																																	
Bewertungskate- gorien/ -kriterien	Gewich- tung	Rechenzen- tren				Lebensmittel- konservie- rung				Lagerung von Tiefkühlkost				Kälte- dienst für Unterneh- men				CO <sub>2</sub> -Abschei- dung				Supraleiter				Kombi LAES und LNG				Luftzerlegung			
		Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel-er- trag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert												
<b>technische Krite- rien</b>																																	
Temperatur der Anwendung (nied- rige Temperatur)	25	1	25	1	25	1	25	2	50	3	75	4	100	5	125	5	125	5	125														
Erwähnung in den untersuchten Ar- beiten (hohe Zahl)	20	2	40	1	20	1	20	1	20	1	20	4	80	1	20	2	40	4	80														
<b>Summe (techni- sche Kriterien)</b>	45	3	65	2	45	2	45	3	70	4	95	8	180	6	145	7	165	9	205														
<b>Hafenspezifische Kriterien</b>																																	
Handlungsfeld (passend zu mög- lichst vielen)	30	3	90	4	120	2	60	2	60	4	120	2	60	3	90	3	90	2	60														
Standort (nein, HH, HH Hafen)	25	3	75	3	75	5	125	5	125	1	25	3	75	1	25	1	25	3	75														
<b>Summe (Hafenspe- zifisch)</b>	55	6	165	7	195	7	185	7	185	5	145	5	135	4	115	4	115	5	135														
<b>Gesamtsumme</b>	100	9	230	9	240	9	230	10	255	9	240	13	315	10	260	11	280	14	340														

Tabelle 17: Ergebnisse des 3. Schritts der Sensitivitätsanalyse der Nutzwertanalyse, bei dem die Gewichtungen gespreizt wurden

Sensitivitätsanalyse Schritt 3: Spreizung der Gewichtungen																			
Bewertungskate- gorien/ -kriterien	Gewich- tung	Rechenzen- tren		Fernkälte		Lebensmittel- konservie- rung		Lagerung von Tiefkühlkost		KälteDienst für Unterneh- men		CO <sub>2</sub> -Abschei- dung		Supraleiter		Kombi LAES und LNG		Luftzerlegung	
		Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel-er- trag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert	Ziel- ertrag	Nutz- wert
<b>technische Krite- rien</b>																			
Temperatur der Anwendung (nied- rige Temperatur)	35	1	35	1	35	1	35	2	70	3	105	4	140	5	175	5	175	5	175
Erwähnung in den untersuchten Ar- beiten (hohe Zahl)	10	2	20	1	10	1	10	1	10	1	10	4	40	1	10	2	20	4	40
<b>Summe (techni- sche Kriterien)</b>	45	3	55	2	45	2	45	3	80	4	115	8	180	6	185	7	195	9	215
<b>Hafenspezifische Kriterien</b>																			
Handlungsfeld (passend zu mög- lichst vielen)	40	3	120	4	160	2	80	2	80	4	160	2	80	3	120	3	120	2	80
Standort (nein, HH, HH Hafen)	15	3	45	3	45	5	75	5	75	1	15	3	45	1	15	1	15	3	45
<b>Summe (Hafenspe- zifisch)</b>	55	6	165	7	205	7	155	7	155	5	175	5	125	4	135	4	135	5	125
<b>Gesamtsumme</b>	100	9	220	9	250	9	200	10	235	9	290	13	305	10	320	11	330	14	340