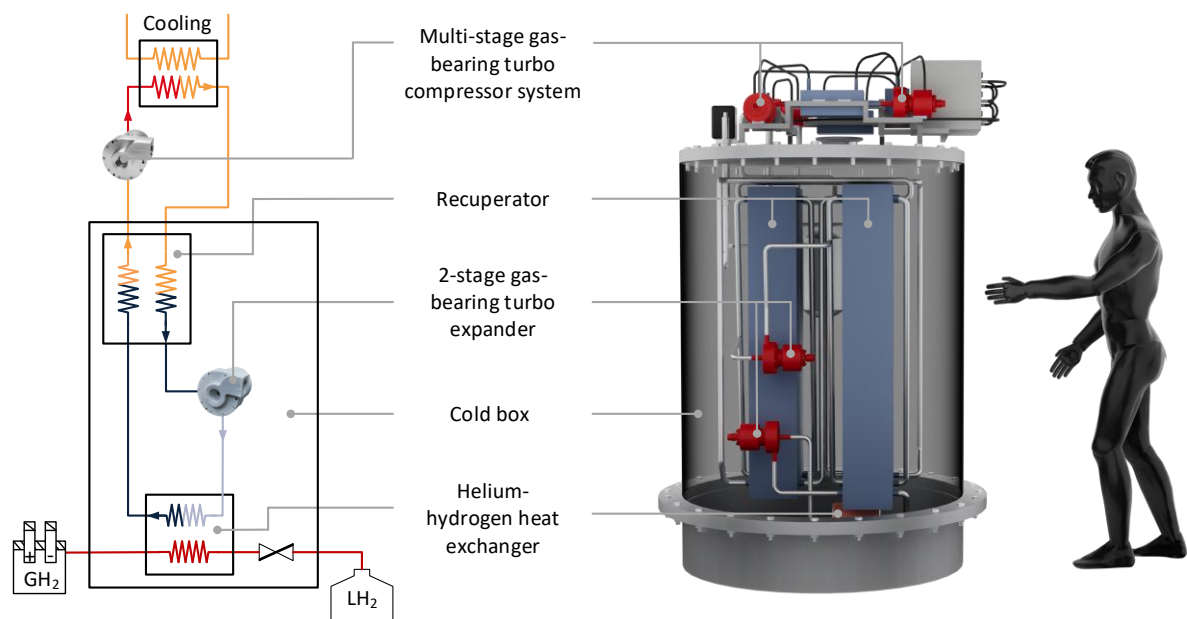




Schlussbericht vom 5. August 2026

CryoLH2

Systembausteine für Tieftemperatur-Kälte- maschinen zur Wasserstoff-Verflüssigung



Quelle: Celeroton, 2026



Celeroton



Subventionsgeberin:

Bundesamt für Energie BFE
Sektion Energieforschung und Cleantech
CH-3003 Bern
www.energieforschung.ch

Subventionsempfänger:

Celeroton AG
8604 Volketswil
www.celeroton.com

shirokuma GmbH
8620 Wetzikon
www.shirokuma-gmbh.ch

Autoren:

Christof Zwyssig, Celeroton AG, christof.zwyssig@celeron.com
Fridolin Holdener, shirokuma GmbH, fridolin-holdener@shirokuma-gmbh.ch

BFE-Projektbegleitung:

Stefan Oberholzer, stefan.oberholzer@bfe.admin.ch

BFE-Vertragsnummer: SI/S502953-01

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen sind ausschliesslich die Autoren dieses Berichts verantwortlich.



Zusammenfassung

Flüssigwasserstoff (LH₂) gewinnt als Energieträger zunehmend an Bedeutung, insbesondere dort, wo hohe Energiedichten, saisonale Energiespeicherung oder der emissionsarme Transport grosser Energiemengen erforderlich sind, zum Beispiel für Anwendungen in Mobilität, Luftfahrt und Energiespeicherung. Insbesondere für die Rückverflüssigung von Wasserstoff sowie für dezentrale und kleinskalige Verflüssigungssysteme besteht Bedarf an kompakten, effizienten und ölfreien Technologien zur Bereitstellung von Kälte bei rund 20 K. Vor diesem Hintergrund untersuchte das Projekt «CryoLH₂ – Systembausteine für Tieftemperatur-Kältemaschinen zur Wasserstoff-Verflüssigung» die technologischen Grundlagen modularer Turbo-Brayton-Kryokühler (TBKK) für zukünftige Wasserstoffverflüssiger und weitere Kryonanwendungen im Leistungsbereich von 100 W bis 1 kW bei einer Kühltemperatur von 20 K. Ziel des Projekts war die Definition eines Referenzsystems, die thermodynamische Auslegung des Kälteprozesses sowie die Spezifikation der wesentlichen Schlüsselkomponenten als Grundlage für nachfolgende Entwicklungsprojekte.

Ausgehend von einer Analyse zukünftiger Anwendungsfelder wurden die Anforderungen an einen modularen TBKK abgeleitet und ein Referenzsystem mit einer Kälteleistung von 500 W bei 20 K definiert. Darauf aufbauend wurde ein mehrstufiger Reverse Turbo-Brayton-Prozess thermodynamisch ausgelegt und hinsichtlich Energiebedarf und Wirkungsgrad bewertet. Ergänzend wurden die Anforderungen an die Schlüsselkomponenten – insbesondere Verdichter, Rekuperatoren und einen kryogenen Turbo-Expander mit Generatorbremse – systematisch untersucht und spezifiziert.

Die Arbeiten zeigten, dass gasgelagerte Turbo-Brayton-Kryokühler ein vielversprechendes Konzept für zukünftige Kryonanwendungen darstellen. Während für die Verdichter weitgehend auf bestehende Hochgeschwindigkeitstechnologien aufgebaut werden kann, wurden die Rekuperatoren sowie der kryogene Expander als zentrale Entwicklungsschwerpunkte identifiziert. Insbesondere die Auslegung der Wärmeübertrager besitzt einen wesentlichen Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad und die spätere industrielle Umsetzbarkeit.

Die Projektergebnisse schaffen die wissenschaftlich-technische Grundlage für die Entwicklung und experimentelle Validierung zukünftiger modularer Turbo-Brayton-Kryokühler sowie deren Integration in kleinskalige Wasserstoffverflüssiger und weitere kryogene Energiesysteme.

Kernbotschaften («Take-Home Messages»)

- Das Projekt hat ein Referenzsystem eines modularen Turbo-Brayton-Kryokühlers für eine Kälteleistung von 500 W Kälteleistung bei 20 K als Grundlage für zukünftige Entwicklungsarbeiten definiert.
- Die thermodynamische Auslegung bestätigt das Potenzial gasgelagerter Turbo-Brayton-Kryokühler für energieeffiziente Wasserstoffverflüssiger und weitere Kryonanwendungen.
- Als Schlüsselkomponenten mit besonderem Entwicklungsbedarf wurden die Rekuperatoren sowie der kryogene Turbo-Expander mit Generatorbremse identifiziert.
- Die Projektergebnisse schaffen die Grundlage für die experimentelle Validierung und die Integration modularer Turbo-Brayton-Kryokühler in zukünftige kleinskalige Wasserstoffverflüssiger.



Résumé

L'hydrogène liquide (LH_2) prend une importance croissante en tant que vecteur énergétique, en particulier pour les applications nécessitant une forte densité énergétique, le stockage saisonnier de l'énergie ou le transport à faibles émissions de grandes quantités d'énergie, par exemple dans les domaines de la mobilité, de l'aviation et du stockage de l'énergie. En particulier, la reliquéfaction de l'hydrogène évaporé ainsi que les systèmes de liquéfaction d'hydrogène décentralisés et de petite capacité nécessitent des technologies compactes, efficaces et exemptes d'huile permettant de produire du froid à environ 20 K. Dans ce contexte, le projet «CryoLH2 – Composants de systèmes frigorifiques cryogéniques pour la liquéfaction de l'hydrogène» a étudié les bases technologiques de réfrigérateurs cryogéniques modulaires à cycle inverse de Turbo-Brayton destinés aux futurs systèmes de liquéfaction de l'hydrogène ainsi qu'à d'autres applications cryogéniques dans une plage de puissance frigorifique comprise entre 100 W et 1 kW à une température de 20 K. L'objectif du projet était de définir un système de référence, de réaliser son dimensionnement thermodynamique et de spécifier les principaux composants nécessaires aux développements futurs.

À partir d'une analyse des besoins des applications visées, un système de référence fournissant une puissance frigorifique de 500 W à 20 K a été défini. Un procédé multi-étagé à cycle inverse de Turbo-Brayton a ensuite été dimensionné et évalué du point de vue de la consommation d'énergie et du rendement global. Les exigences applicables aux principaux composants – compresseurs à grande vitesse, échangeurs de chaleur régénératifs et turbo-détendeur cryogénique avec freinage par générateur – ont également été étudiées de manière systématique.

Les résultats montrent que les réfrigérateurs cryogéniques à Turbo-Brayton sur paliers à gaz constituent une technologie prometteuse pour les applications cryogéniques futures. Alors que les compresseurs peuvent largement s'appuyer sur des technologies existantes, les échangeurs de chaleur et le turbo-détendeur cryogénique ont été identifiés comme les principaux axes de développement. Les résultats du projet constituent une base scientifique et technologique pour les futurs projets de développement et de validation expérimentale de cette technologie.



Summary

Liquid hydrogen (LH₂) is gaining increasing importance as an energy carrier, particularly in applications requiring high energy density, seasonal energy storage, or the low-emission transport of large amounts of energy, such as mobility, aviation, and energy storage. In particular, hydrogen boil-off re-liquefaction as well as decentralized and small-scale hydrogen liquefaction systems require compact, efficient, and oil-free technologies capable of providing refrigeration at around 20 K. Against this background, the project «CryoLH₂ – Building Blocks for Cryogenic Refrigeration Systems for Hydrogen Liquefaction» investigated the technological foundations of modular Reverse Turbo-Brayton cryocoolers (TBCCs) for future hydrogen liquefaction systems and related cryogenic applications in the cooling capacity range from 100 W to 1 kW at 20 K. The project focused on defining a representative reference system, performing a thermodynamic process design and specifying the key system components required for future development activities.

Based on an assessment of future application requirements, a reference cryocooler providing 500 W of cooling power at 20 K was defined. A multi-stage Reverse Turbo-Brayton process was subsequently designed and analysed with respect to energy consumption and overall efficiency. Furthermore, the requirements for the key components – high-speed compressors, recuperative heat exchangers and a cryogenic turbo-expander with generator braking – were systematically evaluated and specified.

The investigations demonstrated that gas-bearing Turbo-Brayton cryocoolers represent a promising technology for future cryogenic applications. While the compressor technology can largely build upon existing high-speed turbomachinery, the recuperators and the cryogenic turbo-expander were identified as the main development challenges. In particular, the heat exchangers were found to have a decisive influence on overall system efficiency and industrial implementation.

The project provides the scientific and technological basis for the further development and experimental validation of modular Turbo-Brayton cryocoolers and their future integration into small-scale hydrogen liquefaction systems and other cryogenic energy applications.





Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	3
Kernbotschaften («Take-Home Messages»).....	3
Résumé.....	4
Summary	5
Inhaltsverzeichnis	7
Abkürzungsverzeichnis	8
1 Einleitung	9
1.1 Kleinskalige Kryotechnologie im Wasserstoffbereich	9
1.2 Anwendungsfelder ausserhalb des Energiesektors	10
1.3 Technologische Lücke und Potenzial von Reverse-Brayton-Kryokühlern	10
1.4 Technologische Herausforderungen	11
1.5 Projektziele	11
2 Vorgehen, Methode, Ergebnisse und Diskussion.....	13
2.1 Vorgehen und Methode	13
2.2 Ergebnisse und Diskussion	13
2.2.1. Anforderungen und Spezifikation des TBKK	13
2.2.2. Systemkonzept	14
2.2.3. Spezifikation der Schlüsselkomponenten.....	15
2.2.4. Verdichter	16
2.2.5. Rekuperatoren	18
2.2.6. Expander	19
2.2.7. Konzeption des kryogenen Expanders.....	19
2.2.8. Energetische Bewertung.....	22
2.2.9. Technologische Einordnung und zukünftige Anwendungen	24
3 Schlussfolgerungen und Ausblick	24
3.1 Schlussfolgerungen	24
3.2 Ausblick	25
4 Nationale und internationale Zusammenarbeit	26
5 Publikationen und andere Kommunikation	27
6 Literaturverzeichnis	28



Abkürzungsverzeichnis

BFE	Bundesamt für Energie
TBKK	Turbo-Brayton-Kryokühler
CAD	Computer-Aided Design
COP	Coefficient of Performance
LH ₂	Flüssiger Wasserstoff



1 Einleitung

1.1 Kleinskalige Kryotechnologie im Wasserstoffbereich

Wasserstoff ist eine zentrale Säule vieler nationalen und internationalen Energie- und Mobilitätsstrategien [1–4]. Als Energieträger wird Wasserstoff insbesondere für energetische Anwendungen diskutiert, wo eine direkte Elektrifizierung nur schwierig machbar oder unmöglich ist. Dabei kann Wasserstoff in unterschiedlichen Formen gespeichert transportiert werden, als komprimiertes Gas, als Flüssigwasserstoff (LH₂) oder chemisch gebunden in Wasserstoffträgern [5].

Die Speicherung in Flüssigform wird in der Raumfahrt schon seit Jahrzehnten angewendet und breitet sich in immer weitere Anwendungen wie Schiffe, Flugzeuge, Drohnen, Schienenfahrzeuge, LKWs oder als Energiespeicher für diverse Anwendungen aus [6]. Die Verflüssigung erfolgt heute grösstenteils in Grossanlagen, typischerweise auf Basis des Claude-Prozesses. Dabei wird der Wasserstoff durch mehrstufige kryogene Kälteprozesse abgekühlt und anschliessend mittels Joule-Thomson Expansion verflüssigt [6]. Übliche Anlagengrössen liegen im Bereich 1-30 Tonnen pro Tag. Eine Kerntechnologie solcher Anlagen ist die Tieftemperatur-Kältemaschine (Kryokühler) mit den Schlüsselkomponenten Kompressor, Expander und Wärmeübertrager.

Zunehmend wird Wasserstoff dezentral erzeugt, wodurch auch der Bedarf an dezentralen Speicherung und Verflüssigungslösungen steigt. Hierzu werden kleinere Verflüssigungsanlagen im Bereich von rund 0.01 bis 1 Tonnen pro Tag und damit kompaktere Kryokühler mit entsprechend kleinerer Kälteleistung benötigt [7,8]. Eine dezentrale Erzeugung hat den Vorteil, dass diese näher beim Verbraucher erfolgen kann und somit der Transportaufwand wegfällt. Bei kurzen Speicherzeiten kann auch auf eine beschleunigte ortho-para Umwandlung verzichtet und damit eine signifikante Energieeinsparung in der Verflüssigung von bis zu 40% erreicht werden [9].

Ein weiterer Anwendungsbereich liegt in der Rückverflüssigung von verdampftem Wasserstoff sowie in der Vermeidung Verdampfungsverlusten in Speichern und bei Transferprozessen (Zero Boil-Off) [10]. Hierfür braucht es ebenfalls kompakte Tieftemperatur-Kältemaschinen.

Relevante Anwendungsfelder für dezentrale/kleinskalige Wasserstoffverflüssigung, Rückverflüssigung und kryogene Speicherung sind zusammengefasst:

Kleinskalige Wasserstoffverflüssigung:

- Langstreckendrohnen/UAVs
- Dezentrale Energiespeicher
- Forschung und Entwicklung: beispielsweise für die Erprobung und Qualifizierung von Komponenten für LH₂-Systeme (kryogene Ventile)
- Kleinere Fahrzeugflotten und lokale Betankungsinfrastrukturen

Rückverflüssigung und Zero Boil-off

- LH₂-Betankungsstationen: Rückverflüssigung von Boil-off-Gas zur Reduktion von Wasserstoffverlusten
- Maritime LH₂-Speicher und Tanksysteme
- Flughäfen und Bodeninfrastruktur für LH₂-basierte Luftfahrt
- Luft- und Raumfahrt: beispielsweise LH₂ Speicher für Flugzeuge, Langzeit-Weltraummissionen, Betankung von Raketen
- Wasserstofflogistik, Tanklager und Umschlagterminals: Rückverflüssigung von Boil-off-Gas während Lagerung, Umschlag und Be- bzw. Entladung von Flüssigwasserstoff.

Kryogene Wasserstoffspeicherung ohne vollständige Verflüssigung

- Cryo-compressed Wasserstoff (CcH₂), beispielsweise für Luftfahrt- und Mobilitätsanwendungen (Firmen wie Verne oder Cryomotive)

Celeroton ist bereits als Komponentenlieferant in Projekten für Zero Boil-off aktiv.



1.2 Anwendungsfelder ausserhalb des Energiesektors

Der Bedarf an kompakten Kryokühlern beschränkt sich nicht auf Wasserstoffanwendungen. Auch in anderen Technologiefeldern werden effiziente und kompakte Tieftemperatur-Kältemaschinen für Temperaturen von wenigen Kelvin bis zu mehreren zehn Kelvin benötigt:

- **Quantencomputing** benötigt grosse Mengen an Kühlleistung nahe dem absoluten Temperaturnullpunkt und hat daher ein Energieproblem und Bedarf nach effizienten Kryokühlern. Dies erfolgt nicht über Flüssigwasserstoff, sondern typischerweise über Heliumkreisläufe [11]. Es werden hier ebenfalls Kryokühler in verschiedenen Leistungsgrössen benötigt, d.h. auch kleinskalige Kühler, wie sie im Projekt «CryoLH2» entwickelt werden.
- **Supraleitende Kabel, Motoren, und Generatoren** benötigen grosse Mengen an Kühlleistung bei sehr tiefen Temperaturen. Eine der Methoden ist die Kühlung über Flüssigwasserstoff [12], aber auch andere Methoden erfordern Kryokühler in verschiedenen Leistungsgrössen, d.h. auch die Kühlleistung wie im «CryoLH2»-Projekt geplant.
- **Spezifische physikalische Experimente und medizinische Anwendungen**, die Kryotemperaturen voraussetzen. Auch hier kann die Kühlung über Flüssigwasserstoff und andere Methoden erfolgen. Es werden jeweils Kryokühler in verschiedenen Leistungsgrössen benötigt..

Diese Anwendungen ergeben damit neben dem Wasserstoffsektor ein weiteres, grosses Marktpotential für kompakte effiziente Kryokühler.

1.3 Technologische Lücke und Potenzial von Reverse-Brayton-Kryokühlern

Bezüglich Kälteleistung besteht eine technologische Lücke zwischen Kryokühler, wie sie in heutigen grossen Verflüssigungsanlagen mit einer Kapazität bis minimal 1 Tonne H₂ pro Tag eingesetzt werden, und kleineren Kryokühlern wie Gifford-McMahon- oder Stirling-Kryokühler, welche für Kryo-Kühlung im Bereich 4-30 Kelvin eingesetzt werden [10]. Diese Lücke soll mit einem Reverse-Brayton Kryokühler basierend auf der Celeroton-Technologie geschlossen werden. Das «CryoLH2» Projekt legt hierfür den Grundstein. Reverse-Brayton-Kryokühler sind keine neue Technologie und werden heute bereits eingesetzt. Für industrielle Anwendungen im Leistungsbereich zwischen grossen Wasserstoffverflüssigungsanlagen und kleineren Kryokühlern existieren jedoch bislang kaum skalierbare und wirtschaftliche Lösungen.

Neben dem schliessen dieser Lücke haben Reverse-Brayton Kryokühler signifikante Vorteile gegenüber bisher eingesetzter Technologien zur Kryokühlung kleinerer Leistung. Dazu zählen insbesondere eine hohe Effizienz sowie eine hohe Leistungsdichte. Bei 20 Kelvin sind spezifische Leistungsaufnahmen von weniger als 100 Watt elektrischer Leistung pro Watt Kälteleistung möglich [13]), was deutlich effizienter ist als bei Gifford-McMahon- oder Stirling-Kryokühlern vergleichbarer Leistung [14].

Kompakte Reverse-Brayton-Kryokühler mit Kälteleistung im Bereich 100W bis 1kW bei 20 K sind ein Enabler für die beschriebenen Wasserstoff- und Kryoanwendungen. Dank Skalierbarkeit und hoher Effizienz erlauben sie Energieeinsparungen gegenüber heutigen Lösungen. Im Projekt wird eine 20% höhere Effizienz im Vergleich zu einem Pulse-Tube-Kryokühler angestrebt.

Trotz einem grossen Potenzial sind Reverse-Brayton-Kryokühler im genannten Leistungsbereich heute auf dem Markt nicht verfügbar. Die meisten Reverse-Brayton-Kryokühler mit kleinerer Kälteleistung sind anwendungsspezifische Spezialentwicklungen, z. B. für Weltraumanwendungen [13,15].

Um eine industrielle Nutzung in den beschriebenen Wasserstoff- und Kryoanwendungen zu ermöglichen, ist weitere Forschung und Entwicklung notwendig. Insbesondere die Schlüsselkomponenten Kompressor, Expander und Wärmeübertrager (Rekuperator) sind technologisch anspruchsvoll in Auslegung, Aufbau und Betrieb, und müssen im Detail aufeinander abgestimmt sein. Ziel ist die Entwicklung modularer, industriell fertiger und mittlere Stückzahlen skalierbarer Systeme:



- **Modular**, damit verschiedene Anwendungen mit verschiedenen Temperatur- und Leistungsanforderungen auf Basis derselben Kernkomponenten (Expander, Kompressor, Rekuperator) abgedeckt werden können;
- Eine **industrielle Fertigung**, damit eine Skalierung zu mittleren Stückzahlen und damit eine Kostenreduktion möglich werden. Im Gegensatz zu Weltraumanwendungen mit singulären, bei denen Kosten und Entwicklungszeiten zweitrangig sind, ist dies eine Voraussetzung für breite Markteinführung..

1.4 Technologische Herausforderungen

Die Ausführung des Reverse-Brayton-Kryokühlers mit gasgelagertem Turbokompressor und Turbinenexpander wird als Turbo-Brayton-Kryokühler (TBKK) bezeichnet. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Entwicklung eines Turbo-Brayton-Kryokühlers (TBKK) im vorgesehenen Leistungsbereich erfordert bringt mehrere technologische Herausforderungen mit sich in Bezug auf die Schlüsselkomponenten Kompressor, Expander und Rekuperator:

Kompressor: Bei der Skalierung zu kleinerer Leistung sinkt der Wirkungsgrad von Kompressoren aufgrund zunehmender relativer Fertigungstoleranzen, höheren Drehzahlen und damit Hochfrequenzverlusten. Dies muss verhindert werden. Entscheidend ist dabei ist die Kompressor-Technologie mit höchstmöglicher Effizienz: der Turbo-Kompressor. Zudem muss der Kompressor öl-, vibrations- und wartungsfrei arbeiten, was mit Gaslagern ermöglicht wird.

Expander: Beim Expander gibt es ähnliche Herausforderungen wie beim Kompressor. Zusätzlich muss der Expander aber noch bei kryogenen Temperaturen arbeiten. Auch hier kommt die Gaslager-Technologie zum Einsatz, aber es benötigt Spezialauslegungen und Spezialmaterialien, um bei kryogenen Temperaturen und den damit verbundenen Ausdehnungseffekten die Gaslager-Tragfähigkeit und Rotorstabilität zu erreichen. Besonderes Augenmerk muss auf den Wirkungsgrad des Expanders gelegt werden, da dieser direkten Einfluss auf die erreichbare Tieftemperatur hat.

Rekuperator: Damit die extremen Temperaturunterschiede zwischen Kryogen-Anwendung innerhalb der Cold box und Wärmeabfuhr nahe Raumtemperatur erreicht werden kann, braucht es einen hoch-effizienten Wärmeübertrager.

Neben den Herausforderungen in den Einzelkomponenten bedarf es auch eine Abstimmung der Komponenten und daher eine Optimierung der Gesamt-Systemauslegung.

1.5 Projektziele

Ziel des Projekts war die Erarbeitung der wissenschaftlich-technischen Grundlagen für einen modular aufgebauten TBKK, der als Schlüsseltechnologie für zukünftige kleinskalige Wasserstoffverflüssiger sowie weitere Kryonanwendungen dienen kann. Im Mittelpunkt stand dabei die Definition der Systemanforderungen, die Konzeption der Gesamtarchitektur sowie die Spezifikation der wesentlichen Schlüsselkomponenten.

Ein weiterer Schwerpunkt bestand in der Konzeption eines kryogenen Expanders mit Generatorbremse. Ziel war es, die wesentlichen technologischen Herausforderungen hinsichtlich des Betriebs bei Kryotemperaturen sowie der thermomechanischen Auslegung zu identifizieren und daraus Anforderungen für zukünftige Entwicklungsarbeiten abzuleiten.

Ergänzend wurden das energetische Potenzial des TBKK sowie eines darauf basierenden Verflüssigers bewertet sowie die Einsatzmöglichkeiten modularer Turbo-Brayton-Kryokühler für verschiedene zukünftige Kryonanwendungen analysiert. Die gewonnenen Erkenntnisse dienen als Grundlage für die zukünftige Entwicklung und Integration solcher Kryokühler in zukünftige Wasserstoffverflüssiger sowie weitere kryogene Energiesysteme.

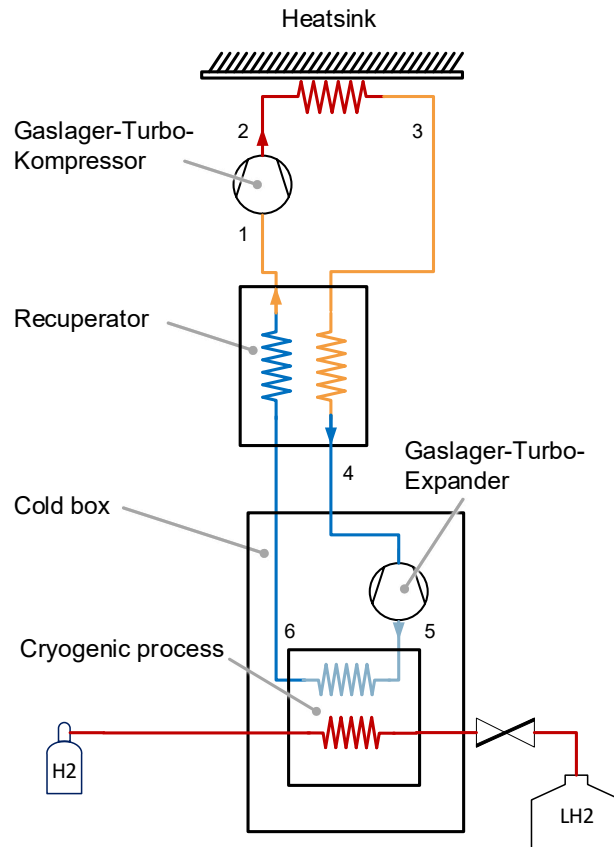


Abbildung 1: Vereinfachte Darstellung des TBKK mit Schlüsselkomponenten Gaslager-Turbo-Kompressor, Recuperator und Gaslager-Turbo-Expander, inklusive der Verwendung des TBKK in einem Kleinverflüssiger.



2 Vorgehen, Methode, Ergebnisse und Diskussion

2.1 Vorgehen und Methode

Der Schwerpunkt lag auf der Definition der Systemanforderungen, der Ausarbeitung eines Referenzsystems sowie der Spezifikation der wesentlichen Schlüsselkomponenten.

Ausgangspunkt bildete eine Analyse zukünftiger Anwendungsfelder. Darauf aufbauend wurden die Anforderungen an einen TBKK hinsichtlich Kühlleistung, Betriebstemperatur, Prozessgas, Energieeffizienz sowie Modularität abgeleitet. Diese Anforderungen dienten als Grundlage für die Definition eines Referenzsystems und die nachfolgenden thermodynamischen Untersuchungen.

Für das definierte Referenzsystem wurden anschliessend die Prozessarchitektur und die wesentlichen Komponenten spezifiziert, basierend auf einem in diesem Projekt entwickelten thermodynamischen Simulationsmodell des TBKK. Neben den Kompressor- und Expanderstufen wurden insbesondere die Rekuperatoren sowie deren Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad betrachtet. Ergänzend erfolgte eine Bewertung der Schlüsseltechnologien hinsichtlich ihres technologischen Reifegrads und ihrer Eignung für zukünftige Kryonanwendungen.

Ein Schwerpunkt des Projekts lag auf der Konzeption eines kryogenen Expanders mit Generatorbremse. Hierfür wurden die wesentlichen Randbedingungen des Betriebs bei Kryotemperaturen analysiert sowie Anforderungen an die thermomechanische Auslegung abgeleitet.

Während der Projektbearbeitung wurde der Arbeitsplan in einzelnen Punkten angepasst. Die Betrachtung des Gesamtsystems wurde vertieft, um die Schnittstellen zwischen TBKK und zukünftigen Wasserstoffverflüssigern besser zu verstehen. Zusätzlich wurden Wärmeübertrager detaillierter untersucht, da sich deren Einfluss auf Wirkungsgrad, Druckverlust und spätere industrielle Realisierbarkeit als grösser erwies als zu Projektbeginn angenommen. Die vorgenommenen Anpassungen dienten der Konkretisierung des Referenzsystems; die übergeordneten Projektziele blieben unverändert.

2.2 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse werden entlang der Entwicklung des Referenz-TBKK dargestellt. Ausgehend von der Anforderungsanalyse werden zunächst die Spezifikationen des Referenzsystems beschrieben. Anschliessend werden das Systemkonzept, die Spezifikation der Schlüsselkomponenten sowie die Konzeption des kryogenen Expanders vorgestellt. Abschliessend erfolgt eine energetische Einordnung des Gesamtkonzepts sowie eine Diskussion zukünftiger Anwendungsfelder.

2.2.1. Anforderungen und Spezifikation des TBKK

Die Analyse der Zielanwendungen zeigte, dass zukünftige Systeme zur Wasserstoffverflüssigung, zur Rückverflüssigung von Boil-off-Gasen sowie verschiedene weitere Kryonanwendungen vergleichbare Anforderungen hinsichtlich Kühltemperatur und Kälteleistung aufweisen. Als Referenz wurde deshalb ein Turbo-Brayton-Kryokühler mit einer Kälteleistung von 500 W bei einer Kühltemperatur von 20 K definiert. Dies entspricht einer Verflüssigungskapazität von 0,1 Tonnen LH2 pro Tag. Dieses Referenzsystem gemäss Abbildung 2 und Tabelle 1 bildete die Grundlage sämtlicher nachfolgender Untersuchungen.

Die Spezifikation wurde so gewählt, dass sie den Anforderungen zukünftiger kleinskaliger Wasserstoffverflüssiger entspricht und gleichzeitig auf weitere Kryonanwendungen übertragbar ist. Der Leistungsbe-
reich schliesst die Lücke zwischen heute verfügbaren Kryokühlern kleiner Leistung und grossskaligen Reverse-Brayton-Kälteanlagen.



2.2.2. Systemkonzept

Als Referenzsystem wurde ein geschlossener Reverse-Turbo-Brayton-Prozess mit Helium als Arbeitsgas gewählt. Mit Hilfe der thermodynamischen Simulation wurden verschiedene Prozessarchitekturen gerechnet (unterschiedliche Anzahl Rekuperatoren, Expanderstufen und Kompressorstufen) und hinsichtlich der Machbarkeit, der Komplexität und des Prozesswirkungsgrads verglichen. Die final gewählte Prozessarchitektur umfasst fünf Verdichterstufen, drei Rekuperatorstufen sowie zwei Expanderstufen.

Die Anzahl der Verdichterstufen wurde im Rahmen der thermodynamischen Prozessauslegung bestimmt. Der erforderliche Temperaturhub des Kälteprozesses bestimmt das notwendige Gesamtdruckverhältnis des Kreisprozesses. Ziel war die Aufteilung dieses Druckverhältnisses auf mehrere Verdichterstufen, um hohe isentrope Wirkungsgrade bei gleichzeitig technisch realisierbaren Druckverhältnissen, Umfangsgeschwindigkeiten und Drehzahlen der einzelnen Turbomaschinen zu erreichen. Varianten mit weniger Verdichterstufen führten zu höheren Druckverhältnissen pro Stufe und damit zu geringeren Wirkungsgraden, während zusätzliche Verdichterstufen den konstruktiven Aufwand erhöhten, ohne einen wesentlichen Effizienzgewinn zu erzielen. Die gewählte Konfiguration stellt somit einen geeigneten Kompromiss zwischen Energieeffizienz und Systemkomplexität dar.

Die Anzahl der Expanderstufen wurde nach denselben thermodynamischen Überlegungen festgelegt. Durch die Aufteilung der Expansion auf zwei Stufen können die Druckverhältnisse und Umfangsgeschwindigkeiten in einem Bereich gehalten werden, der hohe isentrope Wirkungsgrade ermöglicht. Da in der Expansion grundsätzlich grössere Druckverhältnisse pro Stufe realisierbar sind als bei der Verdichtung, stellen zwei Expanderstufen für den untersuchten Referenzprozess das technisch und thermodynamisch sinnvolle Minimum dar.

Die Anzahl der Rekuperatoren ergibt sich unmittelbar aus der gewählten Prozessarchitektur. Nach jeder Expanderstufe muss der kalte Niederdruckstrom mit dem warmen Hochdruckstrom in einem Rekuperator Wärme austauschen, um die erforderliche Vorkühlung für die nachfolgenden Prozessstufen sicherzustellen. Zusätzlich ist ein weiterer Rekuperator vor der ersten Expanderstufe erforderlich, um das Hochdruckgas möglichst weit vorzukühlen und dadurch den Gesamtwirkungsgrad des Prozesses zu erhöhen. Für den Referenzprozess ergibt sich daraus eine Konfiguration mit drei Rekuperatoren.

Durch die mehrstufige Verdichtung und Expansion wird ein hoher Prozesswirkungsgrad bei gleichzeitig machbaren Druckverhältnissen der einzelnen Turbomaschinen ermöglicht, welche durch Anpassung von existierenden Turbokompressoren erreichbar sind.

Die Rekuperatoren übernehmen den überwiegenden Teil der internen Wärmerückgewinnung und beeinflussen sowohl den Gesamtwirkungsgrad als auch die erforderliche Verdichterleistung massgeblich. Aus den Untersuchungen ergab sich, dass insbesondere die Auslegung der Wärmeübertrager einen entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems besitzt und deshalb im weiteren Entwicklungsverlauf besondere Aufmerksamkeit erfordert.

Die beiden Expander sind als generatorgebremste Turbomaschinen ausgeführt. Im Gegensatz zu einer rein dissipativen Bremsung kann dadurch ein Teil der Expansionsarbeit elektrisch zurückgewonnen werden. Gleichzeitig erlaubt diese Architektur eine entkoppelte Regelung von Verdichter- und Expanderdrehzahl und bietet damit zusätzliche Freiheitsgrade für den Betrieb des Gesamtsystems.

Die Analyse des Referenzsystems zeigte, dass für die Verdichter auf bestehenden Hochgeschwindigkeitstechnologien aufgebaut werden kann. Demgegenüber wurden die Rekuperatoren sowie der kryogene Expander als Komponenten mit dem grössten weiteren Entwicklungsbedarf identifiziert. Diese beiden Komponenten bestimmen den Gesamtwirkungsgrad des TBKK wesentlich und bilden daher die Schwerpunkte der nachfolgenden Kapitel.



Tabelle 1: Spezifikation des Referenz-TBKK.

Parameter	Wert
Kälteleistung	500 W
Kühltemperatur	20 K
Prozessgas	Helium
Elektrische Leistungsaufnahme	ca. 41 kW
Spezifische Leistungsaufnahme	ca. 82 W/W
Anzahl Verdichterstufen	5
Anzahl Rekuperatorstufen	3
Anzahl Expanderstufen	2
Verdichter-Drivetrain-Wirkungsgrad	80 %
Expander-Drivetrain-Wirkungsgrad	75 %

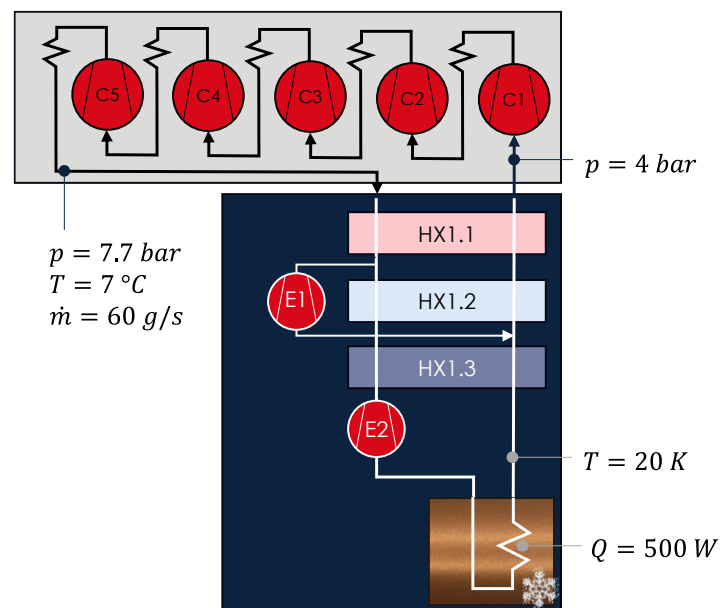


Abbildung 2: Referenzsystem des untersuchten Turbo-Brayton-Kryokühlers. Die Abbildung zeigt den vollständigen Reverse-Turbo-Brayton-Prozess mit fünf Verdichterstufen, drei Rekuperatorstufen und zwei generatorgebremsen Expanderstufen. Diese Konfiguration diene als Grundlage für sämtliche thermodynamischen Untersuchungen und die Spezifikation der Schlüsselkomponenten.

2.2.3. Spezifikation der Schlüsselkomponenten

Ausgehend vom Referenzsystem wurden die Anforderungen an die wesentlichen Schlüsselkomponenten des TBKK, siehe Tabelle 2, abgeleitet. Dabei standen ein hoher Gesamtwirkungsgrad, ein öl- und verschleissfreier Betrieb sowie die Eignung für den Einsatz bei Kryotemperaturen im Vordergrund.



Tabelle 2: Schlüsselkomponenten des Referenz-TBKK.

<i>Komponente</i>	<i>Funktion</i>	<i>Wesentliche Anforderungen</i>
Verdichter	Verdichtung des Prozessgases	Hoher isentroper Wirkungsgrad, hoher Drivetrain-Wirkungsgrad, ölfreier Betrieb
Rekuperatoren	Interne Wärmerückgewinnung	Hohe Effektivität, geringer Druckverlust, kompakte Bauweise
Expander	Erzeugung der Kälteleistung und Energierückgewinnung	Hoher Wirkungsgrad, Betrieb bei Kryotemperaturen, Generatorbremse, ölfreier Betrieb

2.2.4. Verdichter

Für die Verdichter wurde auf die bestehende Hochgeschwindigkeitstechnologie von Celeroton mit gasgelagerten Turbomaschinen aufgebaut. Diese Technologie ermöglicht einen öl- und verschleissfreien Betrieb bei sehr hohen Drehzahlen und hohen Wirkungsgraden und bildet damit eine geeignete Grundlage für den Einsatz in einem TBKK.

Die thermodynamische Auslegung des Referenzsystems führte zu einer fünfstufigen Verdichtung, siehe Kompressorkennfeld in Abbildung 3 und Spezifikationen in Tabelle 3. Durch die Aufteilung des Gesamtdruckverhältnisses auf mehrere Stufen können hohe isentrope Wirkungsgrade erreicht und gleichzeitig die Anforderungen an die einzelnen Maschinen begrenzt werden. Die Verdichter stellen damit keine grundlegende technologische Herausforderung dar, sondern erfordern primär eine Anpassung bestehender Technologien an die Randbedingungen des Kryoprozesses.

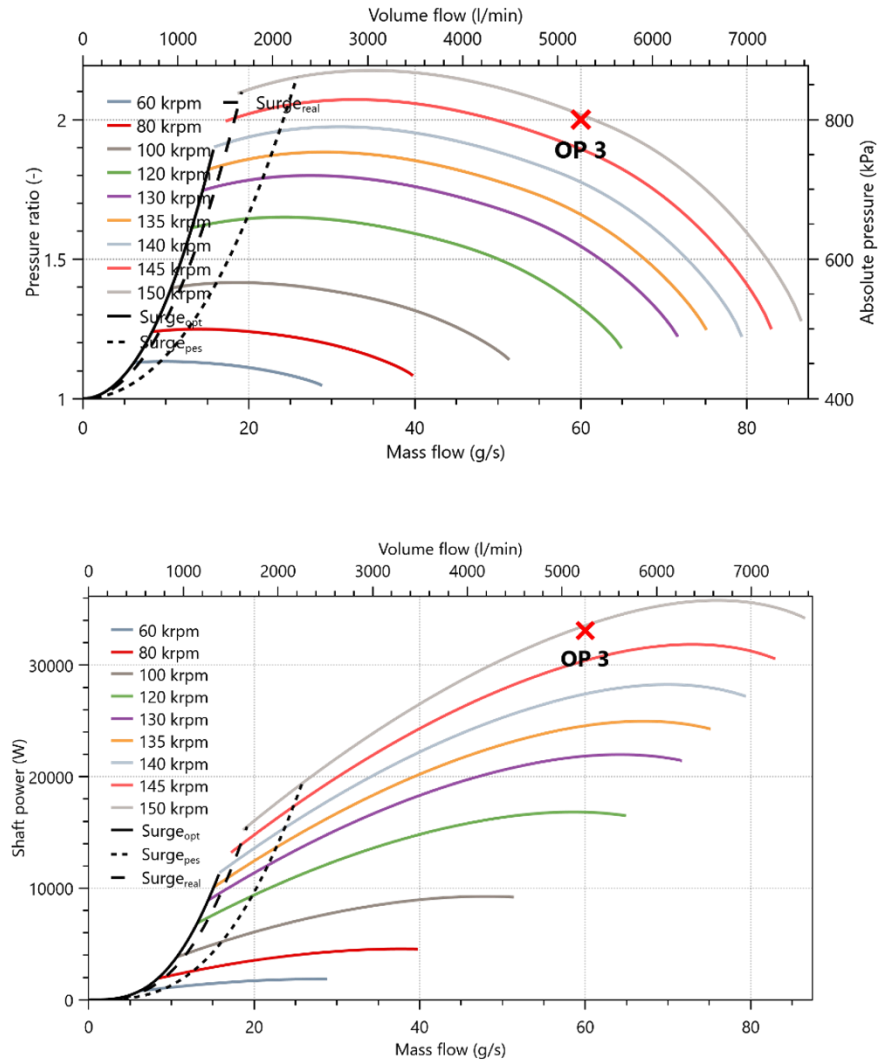


Abbildung 3: Kompressorkennfeld des 5-stufigen Kompressor-Systems.

Tabelle 3: Spezifikationen des 5-stufigen Kompressor-Systems mit den fünf Kompressoren C1 bis C5.

		Komp. C1	Komp. C2	Komp. C3	Komp. C4	Komp. C5
Eintrittstemperatur	°C	7	7	7	7	7
Eintrittsdruck	bar	4.00	4.55	5.18	5.90	6.74
Massenstrom	g/s	60	60	60	60	60
Wellenleistung	kW	6.6	6.7	6.8	6.9	7.0



2.2.5. Rekuperatoren

Die Rekuperatoren übernehmen die interne Wärmerückgewinnung zwischen dem kalten und dem warmen Prozessstrom und bestimmen den Gesamtwirkungsgrad des TBKK wesentlich. Bereits während der Projektbearbeitung zeigte sich, dass ihre Auslegung einen grösseren Einfluss auf die Systemleistung besitzt als ursprünglich angenommen.

Zur Unterstützung der Komponentenentwicklung wurden für das Referenzsystem detaillierte Spezifikationen der erforderlichen Rekuperatoren erarbeitet und potenziellen Herstellern zur Evaluation geeigneter Wärmeübertragerkonzepte zur Verfügung gestellt. Die Spezifikationen umfassten insbesondere folgende Anforderungen:

- Arbeitsmedium: Helium
- Gegenstrom-Wärmeübertrager (Counterflow Heat Exchanger)
- Vollständige Trennung von Warm- und Kaltstrom (keine Leckage zwischen den Strömen)
- Druckfestigkeit
- Möglichst geringer Druckverlust
- Hohe Effizienz

Die Spezifikationen sind in

Tabelle 4 zusammengefasst, Auf Basis dieser werden ausserhalb des Projektes verschiedene Rekuperator-Konzepte sowie potenzielle Lieferanten evaluiert. Die Untersuchungen bestätigten die zentrale Bedeutung der Rekuperatoren für den Gesamtwirkungsgrad des Systems und führten zu einer Vertiefung dieses Arbeitspakets gegenüber dem ursprünglichen Projektplan.

Tabelle 4: Spezifikationen der drei Rekuperatoren HX1 bis HX3.

	<i>Rekuperator HX 1</i>	<i>Rekuperator HX 2</i>	<i>Rekuperator HX 3</i>
$p_{hot,in}$ (bara)	7.65	7.55	7.50
$T_{hot,in}$ (K)	280.0	74.0	62.2
$T_{hot,out}$ (K)	74.00	62.17	21.10
$p_{cold,in}$ (bara)	4.01	4.04	4.10
$T_{cold,in}$ (K)	69.55	61.42	20.00
$T_{cold,out}$ (K)	275.65	69.55	61.42



2.2.6. Expander

Der Expander stellt die zentrale Komponente des Turbo-Brayton-Kryokühlers dar. In ihm wird die Enthalpie des Prozessgases in mechanische Arbeit umgewandelt und dadurch die für den Kälteprozess erforderliche Temperaturabsenkung erzeugt. Gleichzeitig bietet ein generatorgebremster Expander die Möglichkeit, einen Teil der Expansionsarbeit elektrisch zurückzugewinnen.

Im Gegensatz zu den Verdichtern konnte für den Expander nicht unmittelbar auf bestehende Lösungen zurückgegriffen werden. Der Betrieb bei Temperaturen um 20 K stellt zusätzliche Anforderungen an Werkstoffe, thermische Ausdehnung, Rotorgeometrie und Lagerung. Die Identifikation dieser Randbedingungen bildete deshalb einen Schwerpunkt des Projekts und diente als Grundlage für die nachfolgende Konzeptentwicklung.

Für den Einsatz im Referenz-TBKK wurden folgende wesentliche Anforderungen an den Expander identifiziert:

- **Grosser Temperaturbereich:** Der Expander muss einen zuverlässigen Betrieb vom Start bei Umgebungstemperatur (ca. 293 K) bis zum stationären Betrieb bei rund 20 K gewährleisten. Die Abstimmung der thermischen Ausdehnung der eingesetzten Werkstoffe ist dabei von zentraler Bedeutung.
- **Hoher aerodynamischer Wirkungsgrad:** Zur Erreichung hoher Turbinenwirkungsgrade sind sehr kleine Schaufelspaltweiten (Tip Clearances) erforderlich. Deren Auslegung muss die thermische Kontraktion der Komponenten über den gesamten Temperaturbereich berücksichtigen.
- **Hohe Reinheitsanforderungen:** Aufgrund der tiefen Betriebstemperaturen muss der Expander vollständig öl- und verschleissfrei betrieben sowie unter hohen Reinheitsanforderungen montiert werden. Bereits geringe Verunreinigungen können infolge Kondensation oder Erstarrung zu Betriebsstörungen führen. Kritisch sind insbesondere Sauerstoff (90,2 K), Argon (87,3 K) und Stickstoff (77,4 K), deren Kondensations- bzw. Erstarrungstemperaturen deutlich oberhalb der Zieltemperatur des TBKK liegen.

Die Identifikation dieser Randbedingungen bildete die Grundlage für die anschliessende Konzeptentwicklung des kryogenen Expanders und die Ableitung der Anforderungen an Konstruktion, Werkstoffwahl und Fertigung.

2.2.7. Konzeption des kryogenen Expanders

Die Konzeption des Expanders konzentrierte sich auf die Identifikation der technologischen Herausforderungen, welche sich aus dem Betrieb bei Kryotemperaturen ergeben. Ziel war die Ableitung eines Konzepts, das die Anforderungen des Referenzsystems erfüllt und gleichzeitig auf der bestehenden Hochgeschwindigkeitstechnologie aufbaut.

Das Grundkonzept basiert auf einer direkt an einen Hochgeschwindigkeitsgenerator gekoppelten Turbine mit gasgelagerter Rotorlagerung. Die Generatorbremse ermöglicht die kontrollierte Aufnahme der Expansionsleistung sowie die elektrische Rückgewinnung der erzeugten Wellenleistung.

Die Untersuchungen zeigten, dass die thermomechanische Auslegung des Expanders massgeblich durch die grossen Temperaturunterschiede zwischen Montage- und Betriebszustand bestimmt wird. Insbesondere die thermische Kontraktion der Bauteile beeinflusst die Spaltweiten innerhalb der Strömungsmaschine und muss bereits während der Konstruktion berücksichtigt werden.

Ein weiterer Schwerpunkt war die Analyse des thermischen Managements innerhalb der Maschine. Während einzelne Komponenten Temperaturen nahe der Umgebungstemperatur aufweisen, befinden sich Turbine und angrenzende Bauteile im Bereich von etwa 20 K. Die daraus resultierenden Temperaturgradienten stellen hohe Anforderungen an Konstruktion, Materialwahl und die Führung der Wärmeströme innerhalb der Maschine.



Im Rahmen der Konzeptentwicklung wurden zwei etablierte Ansätze betrachtet, dargestellt in Abbildung 4. Für das thermische Management kryogener Turbo-Expander sind die Spezifikationen in Tabelle 5 aufgeführt:

- **Konzept 1 – Long Shaft / Thermal Barrier:** Durch eine verlängerte Welle und eine thermische Barriere werden die Verlustleistungen auf höherem Temperaturniveau abgeführt. Dieses Konzept reduziert den Wärmeeintrag in den kryogenen Bereich, ist jedoch mit zusätzlichen mechanischen Verlusten und einem geringeren Gesamtwirkungsgrad verbunden.
- **Konzept 2 – Short Shaft:** Turbine und Generator sind kompakt angeordnet. Dadurch lassen sich höhere Gesamtwirkungsgrade erzielen, allerdings werden die verbleibenden Verlustleistungen auf tieferem Temperaturniveau eingetragen. Dieses Konzept wird unter anderem in Raumfahrtanwendungen eingesetzt und bildet auch die Grundlage der im Projekt verfolgten Hochgeschwindigkeitstechnologie.

Aufgrund der höheren zu erwartenden Systemeffizienz wurde das Short-Shaft-Konzept als Grundlage für die weitere Entwicklung des kryogenen Expanders verwendet. Eine CAD-Visualisierung ist, in Abbildung 5 dargestellt, das entsprechende Turbinen-Kennfeld in Abbildung 6. In der Turbinenauslegung ist der Wirkungsgrad entscheidend: Das Turbinenkennfeld zeigt dass im Nennarbeitspunkt gemäss Tabelle 5 ein Wirkungsgrad von annähernd 80% erreicht werden kann, dafür aber die höchstmögliche Drehzahl von 240 krpm gefahren werden muss.

Die Konzeptentwicklung zeigte, dass sich die bestehende Hochgeschwindigkeitstechnologie grundsätzlich auf Kry oanwendungen übertragen lässt. Gleichzeitig wurden wesentliche Fragestellungen identifiziert, die in nachfolgenden Entwicklungsprojekten experimentell untersucht und validiert werden müssen. Hierzu zählen insbesondere die thermomechanische Auslegung, die Beherrschung der Spaltweiten sowie das thermische Management des Gesamtsystems.

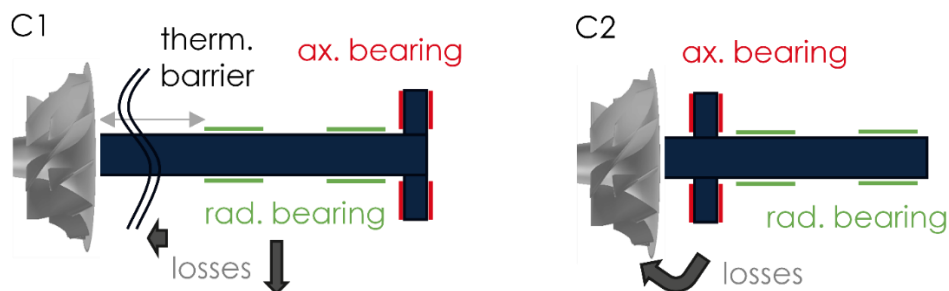


Abbildung 4: Vergleich von Konzept C1 (Long Shaft / Thermal Barrier) und Konzept C2 (Short Shaft).

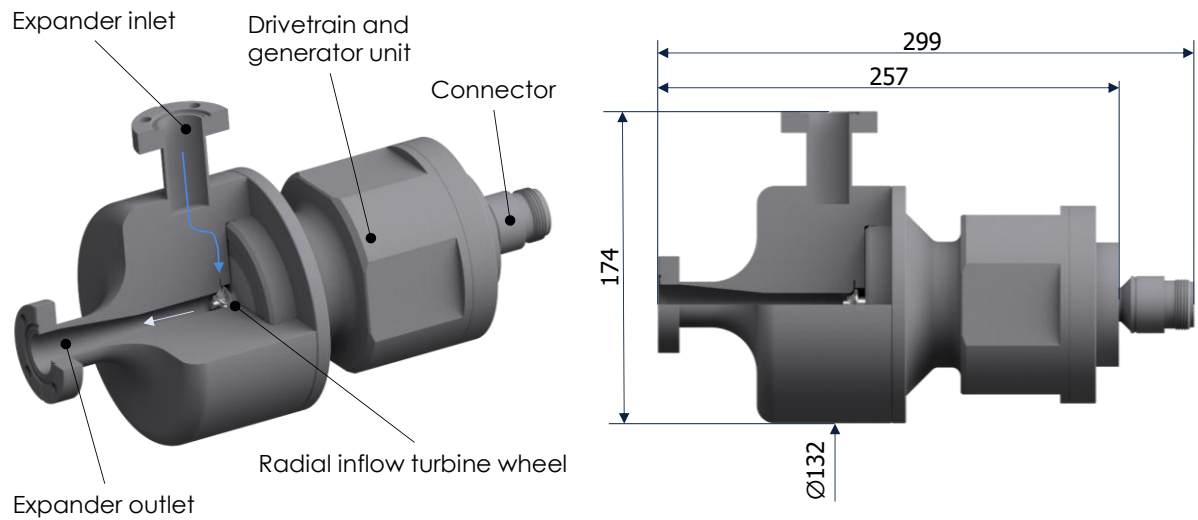


Abbildung 5: CAD-Visualisierung des konzipierten kryogenen Expanders.

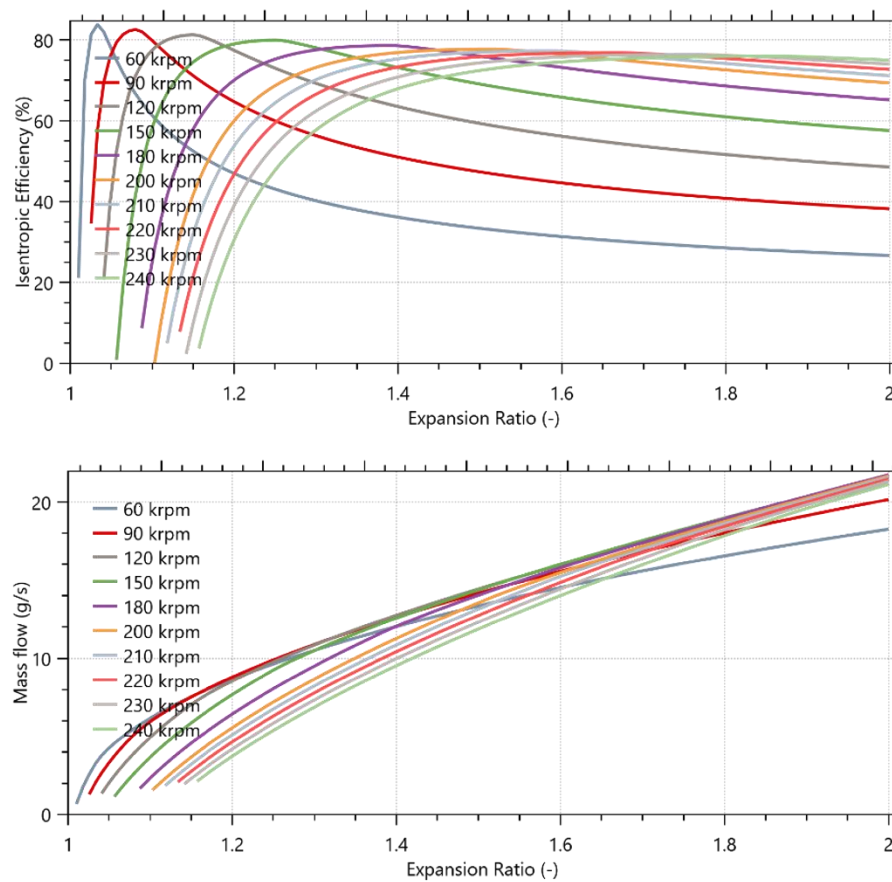


Abbildung 6: Turbinen-Kennfeld des kryogenen Expanders.



Tabelle 5: Spezifikationen der zwei Expander E1 und E2.

<i>Parameter</i>		<i>Expander E1</i>	<i>Expander E2</i>
Eintrittstemperatur	K	74.0	21.1
Expansionsverhältnis	-	1.87	1.73
Drehzahl	krpm	240	180
Wellenleistung	kW	1.26	0.68
Temperaturdifferenz	K	12.5	12.5

2.2.8. Energetische Bewertung

Die thermodynamische Auslegung des Referenzsystems ergab für den betrachteten Betriebspunkt eine elektrische Leistungsaufnahme von rund 41 kW zur Bereitstellung einer Kälteleistung von 500 W bei 20 K. Daraus resultiert eine spezifische Leistungsaufnahme von rund 82 W/W.

Dieser Wert berücksichtigt die wesentlichen Komponenten des TBKK, insbesondere die Verdichter, die Rekuperatoren sowie die generatorgebremsen Expander. Gleichzeitig zeigt die Auslegung, dass der Gesamtwirkungsgrad des Systems wesentlich durch den Wirkungsgrad der Turbomaschinen sowie die Effektivität und die Druckverluste der Rekuperatoren bestimmt wird.

Die Analyse verdeutlicht, dass bereits vergleichsweise kleine Änderungen einzelner Komponenten einen messbaren Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad und daher die Kühlleistung des Systems besitzen. Insbesondere bei den Rekuperatoren besteht Potenzial zur weiteren Verbesserung des Gesamtwirkungsgrads, weshalb deren Auslegung als wesentliche Fragestellung für zukünftige Entwicklungsarbeiten identifiziert wurde.

Die generatorgebremsen Expander tragen zusätzlich zur Reduktion der elektrischen Leistungsaufnahme bei, indem ein Teil der Expansionsarbeit zurückgewonnen wird. Neben der energetischen Verbesserung bietet dieses Konzept den Vorteil einer unabhängigen Regelung der Expanderdrehzahl und erweitert damit die Möglichkeiten zur Betriebsführung des Gesamtsystems.

Insgesamt bestätigt die thermodynamische Auslegung, dass der gewählte Reverse-Turbo-Brayton-Prozess eine geeignete Grundlage für zukünftige Kryokühler im Leistungsbereich von mehreren hundert Watt bis etwa einem Kilowatt Kälteleistung bei 20 K darstellt, siehe Tabelle 6.

Tabelle 6: Energetische Bewertung und Einordnung des TBKK dieses Projekts.

<i>Technologie</i>	<i>Kühltemperatur (K)</i>	<i>spez. Leistungsaufnahme (W/W)</i>	<i>Bemerkung</i>
TBKK (dieses Projekt)	20	82	Thermodynamische Auslegung des Referenzsystems
Gifford-McMahon	20	~90–150	Je nach Baugrösse und Hersteller [16]
Zweistufiger Stirling	20	~100–200	Typische kommerzielle Systeme und Literaturwerte [17]
Grosser Stirling-Prozesskühler	80	~11	1 MW-Klasse bei 80 K [17]
TBKK (hochgerechnet*)	80	~8–15	Erwarteter Bereich aufgrund des deutlich höheren Carnot-COP; nicht Bestandteil der Projektauslegung



Zur Einordnung der energetischen Leistungsfähigkeit wurde die spezifische Energieaufnahme des im Projekt betrachteten Referenzverflüssigers bestimmt. Ausgehend von einer elektrischen Leistungsaufnahme des Turbo-Brayton-Kryokühlers von 41 kW und einer Verflüssigungskapazität von 0,1 tpd (100 kg LH₂ pro Tag) ergibt sich eine spezifische Energieaufnahme von rund 9,8 kWh/kg LH₂. Dieser Wert liegt im Bereich der heute besten grossskaligen Wasserstoffverflüssiger und unter den typischen Werten kommerzieller Grossanlagen von etwa 11–13 kWh/kg LH₂. Dabei ist zu berücksichtigen, dass im vorliegenden Projekt ausschliesslich der Tieftemperatur-Kryokühler als Schlüsselkomponente des Verflüssigungsprozesses untersucht wurde und keine vollständige Anlagenauslegung einschliesslich aller Nebenaggregate erfolgte. Der Vergleich, dargestellt in Tabelle 7 und Abbildung 7, dient daher der energetischen Einordnung des entwickelten Konzepts und nicht als direkte Gegenüberstellung kompletter Verflüssigungsanlagen.

Tabelle 7: Energetische Bewertung und Einordnung eines kleinskaligen Verflüssigers auf Basis des TBKK dieses Projekts.

System	Verflüssigungs-Kapazität (tpd)	Elektrische Leistung (kW)	Spezifische Energieaufnahme (kWh/kg LH ₂)
Referenzverflüssiger dieses Projekts (TBKK)	0,1	41	9,8
State-of-the-Art Grossverflüssiger	>5 bis 50	–	11–13

Berechnung des Referenzverflüssigers: $(41 \text{ kW} \times 24 \text{ h}) / (100 \text{ kg LH}_2) = 9,84 \text{ kWh/kg LH}_2$.

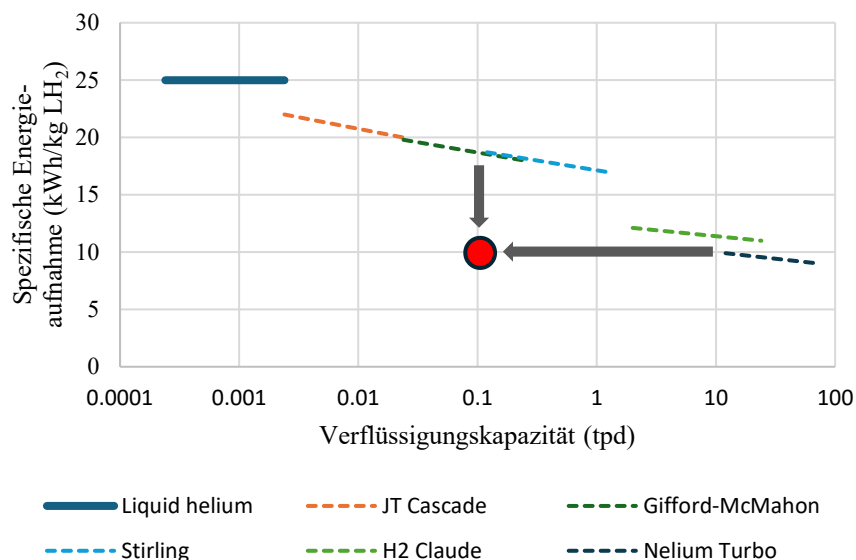


Abbildung 7: Energetisches Potenzial des im CryoLH2 konzipierten Turbo-Brayton-Kryokühlers: energetische Leistungsfähigkeit die mit heutigen grossskaligen Anlagen vergleichbar ist, verbesserte Leistungsfähigkeit gegenüber anderen Kryokühlern die für kleinskalige Verflüssiger eingesetzt werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass der im Projekt entwickelte Turbo-Brayton-Kryokühler grundsätzlich das Potenzial besitzt, auch im Leistungsbereich kleinskaliger Wasserstoffverflüssiger eine energetische Leistungsfähigkeit zu erreichen, die mit heutigen grossskaligen Anlagen vergleichbar ist. Die endgültige Effizienz eines Gesamtsystems hängt jedoch zusätzlich von der Auslegung der Wasserstoffprozessstufen sowie der Nebenaggregate ab und war nicht Gegenstand des vorliegenden Projekts.



2.2.9. Technologische Einordnung und zukünftige Anwendungen

Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse bilden die wissenschaftlich-technische Grundlage für die weitere Entwicklung modularer Turbo-Brayton-Kryokühler. Durch die Definition eines Referenzsystems, die Spezifikation der Schlüsselkomponenten sowie die Konzeption des kryogenen Expanders konnten die wesentlichen Anforderungen an zukünftige Entwicklungen systematisch abgeleitet werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass ein einheitliches TBKK-Konzept nicht auf die Wasserstoffverflüssigung beschränkt ist. Vielmehr adressiert der betrachtete Leistungs- und Temperaturbereich eine Reihe weiterer Kryonanwendungen, aufgelistet in Tabelle 8, mit vergleichbaren Anforderungen.

Tabelle 8: Potenzielle Anwendungsfelder eines modularen TBKK

Anwendung	Typischer Temperaturbereich (K)	Relevanz des TBKK
Kleinskalige Wasserstoffverflüssigung	~20	Hauptanwendung
Rückverflüssigung von Wasserstoff (Boil-off)	~20	Hoch
Rückverflüssigung weiterer Kryogene	20–80	Hoch
Supraleitende Magnete und Energietechnik	20–30	Mittel bis hoch
Wissenschaftliche Kryotechnik	20–80	Mittel
Quantencomputing	Vorkühlung: 20–80 Kryogene Infrastruktur: 1–4	Mittel

Die gemeinsame Betrachtung dieser Anwendungen verdeutlicht, dass zahlreiche zukünftige Systeme vergleichbare Anforderungen hinsichtlich Kühltemperatur, Kälteleistung, Energieeffizienz und Wartungsfreiheit aufweisen. Daraus ergibt sich das Potenzial, unterschiedliche Anwendungen auf einer gemeinsamen technologischen Plattform aufzubauen.

Das Projekt zielte bewusst nicht auf die Entwicklung eines vollständigen Wasserstoffverflüssigers ab. Vielmehr wurden die Anforderungen an einen Turbo-Brayton-Kryokühler als dessen zentrale Schlüsselkomponente untersucht und die wesentlichen technologischen Fragestellungen identifiziert. Die gewonnenen Erkenntnisse schaffen damit die Grundlage für nachfolgende Entwicklungsprojekte, in denen die detaillierte Auslegung, Integration und experimentelle Validierung eines Gesamtsystems erfolgen kann.

3 Schlussfolgerungen und Ausblick

3.1 Schlussfolgerungen

Ziel des Projekts war die Erarbeitung der wissenschaftlich-technischen Grundlagen eines modularen Turbo-Brayton-Kryokühlers (TBKK) für den Leistungsbereich von 100 W bis 1 kW bei einer Kühltemperatur von 20 K. Der Fokus lag auf der Definition eines Referenzsystems, der Spezifikation der Schlüsselkomponenten sowie der Konzeption eines kryogenen Expanders als zentrale Komponente des Kälteprozesses.

Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse, siehe Tabelle 9, erfüllen diese Zielsetzung. Auf Grundlage einer Analyse zukünftiger Anwendungsfelder wurde ein Referenz-TBKK definiert und thermodynamisch



ausgelegt. Daraus konnten die Anforderungen an die Verdichter, Rekuperatoren und den kryogenen Expander systematisch abgeleitet werden.

Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse, siehe Tabelle 9, erfüllen diese Zielsetzung. Auf Grundlage einer Analyse zukünftiger Anwendungsfelder wurde ein Referenz-TBKK definiert und thermodynamisch ausgelegt. Daraus konnten die Anforderungen an die Verdichter, Rekuperatoren und den kryogenen Expander systematisch abgeleitet werden.

Die im Projekt erarbeiteten Ergebnisse, siehe Tabelle 9, erfüllen diese Zielsetzung. Auf Grundlage einer Analyse zukünftiger Anwendungsfelder wurde ein Referenz-TBKK definiert und thermodynamisch ausgelegt. Daraus konnten die Anforderungen an die Verdichter, Rekuperatoren und den kryogenen Expander systematisch abgeleitet werden.

Tabelle 9: Erreichung der Projektziele

<i>Projektziel</i>	<i>Ergebnis</i>
Analyse zukünftiger Anwendungsfelder	Anforderungen für einen modularen TBKK definiert
Spezifikation eines Referenzsystems	Referenzsystem mit 500 W Kälteleistung bei 20 K festgelegt
Thermodynamische Systemauslegung	Prozessarchitektur und Betriebsparameter bestimmt
Spezifikation der Schlüsselkomponenten	Anforderungen an Verdichter, Rekuperatoren und Expander definiert
Konzeption des kryogenen Expanders	Technologische Herausforderungen identifiziert und Konzept entwickelt
Bewertung des energetischen Potenzials	Spezifische Leistungsaufnahme des Referenzsystems bestimmt und gegenüber dem Stand der Technik eingeordnet

Die Arbeiten zeigten insbesondere, dass der Rekuperator und der kryogene Expander wesentlichen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Gesamtsystems besitzen. Während für die Verdichter weitgehend auf bestehende Hochgeschwindigkeitstechnologien aufgebaut werden kann, erfordern diese beiden Komponenten zusätzliche Entwicklungsarbeiten für den Einsatz bei Kryotemperaturen. Die Identifikation dieser Entwicklungsschwerpunkte stellt ein zentrales Ergebnis des Projekts dar.

Die Untersuchungen bestätigten zudem, dass das betrachtete Leistungs- und Temperaturfenster nicht ausschliesslich für die Wasserstoffverflüssigung relevant ist. Vielmehr weisen auch Anwendungen wie die Rückverflüssigung von Boil-off-Gasen, supraleitende Energiesysteme sowie wissenschaftliche Kryonanwendungen vergleichbare Anforderungen auf. Damit eröffnet sich die Möglichkeit, einen modularen TBKK als gemeinsame technologische Plattform für verschiedene Kryonanwendungen einzusetzen.

3.2 Ausblick

Das Projekt bildete die wissenschaftlich-technische Grundlage für die weitere Entwicklung eines modularen Turbo-Brayton-Kryokühlers. Die erarbeiteten Spezifikationen, die thermodynamische Auslegung sowie die Konzeption der Schlüsselkomponenten stellen eine belastbare Basis für nachfolgende Entwicklungsprojekte dar.

Im Mittelpunkt zukünftiger Arbeiten stehen die detaillierte Auslegung der Schlüsselkomponenten, deren konstruktive Umsetzung sowie die experimentelle Validierung unter kryogenen Betriebsbedingungen. Dies betrifft insbesondere den kryogenen Expander und die Rekuperatoren, deren Auslegung einen wesentlichen Einfluss auf den Gesamtwirkungsgrad besitzt.



Darüber hinaus bilden die im Projekt entwickelten Systemkonzepte eine Grundlage für die Integration eines TBKK in zukünftige kleinskalige Wasserstoffverflüssiger. Die detaillierte Auslegung und Validierung eines solchen Gesamtsystems war nicht Gegenstand des vorliegenden Projekts und stellt den nächsten Entwicklungsschritt dar.

Die Projektergebnisse besitzen darüber hinaus Relevanz für weitere Kryoanwendungen mit vergleichbaren Anforderungen an Temperaturbereich, Energieeffizienz und Zuverlässigkeit. Dadurch eröffnet sich langfristig das Potenzial einer modularen Kryokühlerplattform, die in unterschiedlichen industriellen und wissenschaftlichen Anwendungen eingesetzt werden kann.

4 Nationale und internationale Zusammenarbeit

Das Projekt wurde in enger Zusammenarbeit zwischen der Celeroton AG und der shirokuma GmbH durchgeführt. Während Celeroton ihre Expertise im Bereich gasgelagerter Hochgeschwindigkeitsturboomaschinen und Systemsimulation einbrachte, unterstützte shirokuma die Arbeiten insbesondere in den Bereichen Konzeption, Kryotechnik und Systemüberlegungen. Die Zusammenarbeit ermöglichte eine ganzheitliche Betrachtung des Turbo-Brayton-Kryokühlers und der Anwendung innerhalb Wasserstoff-Verflüssiger von der Anforderungsanalyse über die thermodynamische Auslegung bis zur Spezifikation der Schlüsselkomponenten.

Ergänzend wurden während der Projektbearbeitung zahlreiche nationale und internationale Fachkontakte genutzt, um Anforderungen zukünftiger Anwendungen sowie Spezifikationen einzelner Komponenten mit potenziellen Anwendern, Industriepartnern und Forschungseinrichtungen zu diskutieren. Diese Rückmeldungen flossen insbesondere in die Definition des Referenzsystems, die Bewertung potenzieller Anwendungsfelder sowie die Spezifikation der Rekuperatoren und des kryogenen Expanders ein.

Parallel zum Projekt wurde ein internationales Konsortium für eine weiterführende Entwicklung eines kleinskaligen Wasserstoffverflüssigers aufgebaut. Auf dieser Grundlage wurde ein Projektantrag im Rahmen des Horizon Europe Clean Hydrogen Joint Undertaking Calls *HORIZON-JU-CLEANH2-2026-02-04 – Cost-efficient small scale hydrogen liquefaction* vorbereitet beziehungsweise eingereicht. Ziel dieser Ausschreibung ist die Entwicklung energieeffizienter und wirtschaftlicher Wasserstoffverflüssiger im kleinen Leistungsbereich und adressiert damit unmittelbar die im Projekt CryoLH2 untersuchten Fragestellungen. Die im vorliegenden Projekt erarbeiteten Ergebnisse bildeten eine Grundlage für die Definition der Systemarchitektur, der Schlüsselkomponenten und der technischen Entwicklungsziele des internationalen Konsortiums.

Darüber hinaus wurden die Projektergebnisse im Rahmen verschiedener nationaler und internationaler Fachveranstaltungen diskutiert. Hierzu gehörten unter anderem Veranstaltungen von Hydropole Schweiz, die International Cryocooler Conference (ICC), die European Cryogenics Days (ECD-CHMT), die International Cryogenic Engineering Conference / International Cryogenic Materials Conference (ICEC/ICMC), die H2Tech Expo Europe sowie die International Conference on Environmental Systems (ICES). Der regelmässige Austausch mit Industrie und Forschung trug wesentlich zur Einordnung der Projektergebnisse sowie zur Identifikation zukünftiger Entwicklungsfelder bei.



5 Publikationen und andere Kommunikation

Die Ergebnisse des Projekts wurden kontinuierlich an nationale und internationale Fachkreise kommuniziert. Ziel war es, die technologischen Grundlagen modularer Turbo-Brayton-Kryokühler sowie deren Potenzial für zukünftige Wasserstoffverflüssiger und weitere Kryonanwendungen einem breiten Fachpublikum zugänglich zu machen und gleichzeitig den Austausch mit Industrie und Forschung zu fördern.

Im Rahmen des Projekts beziehungsweise auf Basis der Projektergebnisse wurden folgende wissenschaftliche Beiträge und Präsentationen erstellt oder vorbereitet:

- Wissenschaftlicher Beitrag an der International Conference on Environmental Systems (ICES) 2025 in Prag.
- Fachvortrag an den European Cryogenics Days (ECD-CHMT) in Twente.
- Fachvortrag sowie wissenschaftlicher Beitrag an der DKV-Tagung 2025.
- Posterpräsentation an der Generalversammlung von Hydropole Schweiz (2026).
- Fachvortrag an der ICEC30 / ICMC2026.
- Präsentation der Projektergebnisse und der zugrunde liegenden Technologien an internationalen Fachkonferenzen und Industriemessen, unter anderem an der International Cryocooler Conference (ICC 24) sowie der ASME Turbo Expo 2026.

Ergänzend wurden die Projektaktivitäten und deren Ergebnisse über Unternehmenswebseiten, Fachbeiträge und soziale Medien kommuniziert, um die Sichtbarkeit der Entwicklungen im Bereich energieeffizienter Kryotechnologien sowie modularer Wasserstoffverflüssiger zu erhöhen und den Wissenstransfer zwischen Forschung und Industrie zu unterstützen.



6 Literaturverzeichnis

- [1] Bundesamt für Energie BFE. "Wasserstoffmobilität in der Schweiz: Positionspapier." (Januar 2016).
- [2] Bundesamt für Energie BFE. "Thesen zur künftigen Bedeutung von Wasserstoff in der Schweizer Energieversorgung." (27 September 2022).
- [3] Alekseev, Alexander, Arndt, Tabea, Haberstroh, Christoph, Jordan, Thomas, Lindackers, Dirk, Palacios Vera, Juan Sebastian, Pundt, Astrid, Saß, Paul, Schulz, Camelia, Weiss, Klaus-Peter, Wolf, Christian, Wolf, Michael J., and Wu, Chengyuan. "Hydrogen liquefaction, storage, transport and application of liquid hydrogen." (2023).
- [4] Ghafri, Saif ZS. Al, Munro, Stephanie, Cardella, Umberto, Funke, Thomas, Notardonato, William, Trusler, J. P. Martin, Leachman, Jacob, Span, Roland, Kamiya, Shoji, Pearce, Garth, Swanger, Adam, Rodriguez, Elma Dorador, Bajada, Paul, Jiao, Fuyu, Peng, Kun, Siahvashi, Arman, Johns, Michael L., and May, Eric F. "Hydrogen liquefaction: a review of the fundamental physics, engineering practice and future opportunities." *Energy & Environmental Science* (2022): pp. 2690–2731.
- [5] Martyr, Anthony J. and Rogers, David R. "Energy storage." *Engine Testing*. Elsevier (2021): pp. 191–215.
- [6] Wolf, Michael J., Arndt, Tabea, Jordan, Thomas, Pundt, Astrid, Weiss, Klaus-Peter, Schulz, Camelia, Haberstroh, Christoph, Wu, Chengyuan, Wolf, Christian, Alekseev, Alexander, Saß, Paul, Lindackers, Dirk, and Palacios Vera, Juan Sebastian. "Wasserstoff-Verflüssigung, Speicherung, Transport und Anwendung von flüssigem Wasserstoff." (2023).
- [7] *Liquid hydrogen-powered aircraft: refuelling, ground operations and standardisation*.
- [8] Derking, Hendrie, Vanapalli, Srinivas, Annema, Cynthia, Keezer, Marcel, and Goos, Niels. "Development of a lab-scale hydrogen liquefaction system." *29th International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference 2024*. Geneca, CH.
- [9] Baker, C.R. and Shaner, R.L. "A study of the efficiency of hydrogen liquefaction." *International Journal of Hydrogen Energy* Vol. 3 (1978): pp. 321–334.
- [10] Beens, Harro. "C1Or4C-04: Towards Economic Zero Boil-Off Technology for Liquid Hydrogen Storage." *30th International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference 2024*. Peppermill Reno, US.
- [11] Martin, Florian, Szmigiel, Mathieu, Crispel, Simon, and Bernhardt, Jean-Marc. "Cryogenics for Quantum Computer Upscale challenges." *29th International Cryogenic Engineering Conference/International Cryogenic Materials Conference 2024*. Geneca, CH.
- [12] Shirai, Yasuyuki, Shiotsu, Masahiro, Kobayashi, Hiroaki, Nonaka, Satoshi, Naruo, Yoshihiro, Inatani, Yoshifumi, Hirai, Hirokazu, Yoshikawa, Seiichiro, Tanaka, Teiichi, and Sakamoto, Orie. "Prospect of Liquid Hydrogen Cooled Superconducting Power Apparatus and Carbon Free Energy System." *13th European Conference on Applied Superconductivity*. Geneca, CH, 17.09.2017 - 21.09.2017.
- [13] B.T. Nugent, R.J. Grotenrath, W.L. Johnson. "20 Watt 20 Kelvin Reverse Turbo-Brayton Cycle Cryocooler Testing and Applications." *22nd International Cryocooler Conference, 2022*.
- [14] Biglia, Alessandro, Bilardo, Matteo, Comba, Lorenzo, Ricauda Aimonino, Davide, Grella, Marco, Fabrizio, Enrico, and Gay, Paolo. "Performance analysis of a nitrogen-based Brayton cryocooler prototype." *Energy* Vol. 290 (2024): p. 130095. DOI 10.1016/j.energy.2023.130095.
- [15] Zagarola, M. V., Swift, W. L., Sixsmith, H., McCormick, J. A., and Izenzon, M. G. "Development of a Turbo-Brayton Cooler for 6 K Space Applications." *Cryocoolers 12*. Springer US, Boston, MA (2003): pp. 571–578.
- [16] "bluefors.com." URL <https://bluefors.com/>.
- [17] "uspas.fnal.gov." URL <https://uspas.fnal.gov/>.