



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Departement für
Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK
Bundesamt für Energie BFE

Schlussbericht 07.11.2017

Konzeption und Design eines kostenopti- mierten Kompressors mit Luftlagerung für Brennstoffzellensysteme mit 0.5 – 2 kW

Auftraggeber:

Bundesamt für Energie BFE
Forschungsprogramm Energieforschung
CH-3003 Bern
www.bfe.admin.ch

Auftragnehmer:

Celeroton AG
Industriestrasse 22
CH-8604 Volketswil
www.celeroton.com

Autoren:

Christof Zwysig, Celeroton AG, christof.zwysig@celeroton.com
Martin Bartholet, Celeroton AG, martin.bartholet@celeroton.com

| | |
|----------------------------|-------------------|
| BFE-Bereichsleiter: | Stefan Oberholzer |
| BFE-Programmleiter: | Stefan Oberholzer |
| BFE-Vertragsnummer: | SI/501471-01 |

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

Ausgangslage

Hintergrund und Stand der Technik

Brennstoffzellensysteme kleinerer Leistung im Bereich 0.5-2 kW für mobile Applikationen und UAV verlangen vermehrt nach einem effizienten, ölfreien und kompakten Turbo Kompressor wie ihn Celeroton für grössere Stack-Leistungen im Bereich 5-15 kW bereits anbietet. Celeroton hat zahlreiche Anfragen in diesem tieferen Leistungsbereich erhalten und sieht Synergien zwischen diesen Anfragen, wodurch sich mit einem entsprechenden Kompressor mehrere Kunden bedienen lassen.

Aufgrund der tiefen Stack-Leistungen müssen auch die Fertigungskosten des Kompressors entsprechend tief sein. Dies ist vor allem eine Herausforderung für die Lagerung, da diese gleichzeitig öl-frei und von langer Lebensdauer bei hohen Drehzahlen sein muss. Daher kommen nur Luftlager in Frage. Um die Zielkosten zu erreichen muss nach alternativen Luftlagerkonzepten als den gegenwärtig von Celeroton eingesetzten Luftlagerkonzepten geforscht werden. Die kleinere Leistung und die damit tieferen Verluste und Temperaturen sowie die etwas tieferen Anforderungen an Leistungsdichte und Wirkungsgrad erlauben vereinfachte Lagerkonzepte zu berücksichtigen. Celeroton hat solche vereinfachten Lagerkonzepte erstellt, aber aus Kapazitäts- und Kostengründen nicht weiter verfolgt.

Hochdrehende Turbo Kompressoren sind ideal geeignet für Brennstoffzellen-Anwendungen in diesen Leistungsbereichen: Insbesondere betreffend Wirkungsgrad, Gewicht und Grösse schneiden diese klar besser ab als andere Kompressor-Technologien (Verdrängerkompressor, Seitenkanalverdichter, Membrankompressor), [1], [2], [3], [4]. Die höchsten Drehzahlen ermöglichen den Bau von sehr kompakten, leichten und effizienten Turbo Kompressoren [1]. In Tabelle 1 ist als Beispiel dazu ein Vergleich zwischen einem heutzutage in kleineren Brennstoffzellensystemen eingesetzten Membrankompressor und einem Turbo Kompressor mit Kugellagerung von Celeroton gezeigt. Mit einem Kompressor mit Celeroton-Technologie kann wie für grössere Leistungen werden [3], [5] auch hier der Leistungsverbrauch des Kompressors mehr als halbiert und das Gewicht um Faktoren verkleinert werden.

| Typ | Membran | Turbo Kompressor |
|---------------------------------------|---|---|
| Hersteller | Thomas 6025SE/12VDC | Celeroton CT-15-150 |
| |  |  |
| Max. Überdruck | 1.3 | 1.3 |
| Min-Max. Volumenstrom | 0 - 42.5 l/min | 50 - 250 l/min |
| Nenn Drehzahl | Unbekannt / tief | 300'000 U/min |
| Eingangsleistung (200 mbar, 50 l/min) | 4 x 25 W (4 Kompressoren in parallel nötig) | 30 W |
| Gewicht | 4 x 1.5 kg | 0.1 kg + Elektronik |
| Abmessungen | 4 x (84 x 116 x 127 mm) | Ø48 x 51 mm |
| Lebensdauer | 3'000 h | 10 h |

Tabelle 1: Vergleich zweier Kompressoren für Brennstoffzellen: Membrankompressor (Stand der Technik) und Turbo Kompressor CT-15-150 mit Kugellagern von Celeroton.

Motivation des Projektes

Gegenwärtig bietet Celeroton mit dem Turbo Kompressor CT-17-700/1000.GB mit Luftlagerung einen Kompressor an, welcher die Anforderungen an Druck und Volumenstrom für Range Extender Brennstoffzellen im Bereich 5 - 15 kW erfüllt [6]. Aufgrund der Grösse, Leistungsaufnahme und den Herstellungskosten ist dieser Kompressor jedoch nicht geeignet für den kommerziellen Einsatz in mobilen Brennstoffzellen Applikationen kleinerer Leistung wie sie z.B. für Notstromaggregate oder für UAVs eingesetzt werden, wo im Stack-Leistungen von 0.5 bis 2 kW elektrisch erzeugt werden. Daneben bietet Celeroton noch den Turbo Kompressor CT-15-150 mit Kugellagern an, der jedoch bezüglich Volumenstrom (zu gross, insbesondere minimaler Volumenstrom) und Lebensdauer (zu tief) ebenfalls nicht geeignet ist für den kommerziellen Einsatz in mobilen Brennstoffzellen Applikationen kleinerer Leistung.

In diesem Projekt wird daher in einem ersten Schritt in enger Interaktion mit existierenden und potentiellen Kunden von Celeroton die Spezifikationen bezüglich Massenstrom (minimaler und maximaler), Druckverhältnis, Spannungslevel, benötigte Anzahl Start/Stopp, Lebensdauer, etc. erarbeitet. Im Anschluss daran wird für einen Turbo Kompressor tiefer Leistung die von Celeroton erarbeiteten alternativen Luftlagerkonzepte untersucht und erforscht.

Weiter wird in diesem Projekt für das am geeignetsten erachtete Konzept die Gaslagerung und die Aerodynamik ausgelegt und der Turbo Kompressor mittels CAD konstruiert.

Abschliessend wird die Quantifizierung und Darstellung des Fertigungsaufwands des kostenoptimierten Luftlagers im Vergleich zum Standardluftlager von Celeroton durchgeführt. Dabei soll die Komplexitätsreduktion (und allfälliger weiterer Vorteile) aufgezeigt werden.

Ziele der Arbeit

Ein erstes Projektziel ist die konzeptionelle Untersuchung und Erforschung der von Celeroton erarbeiteten alternativen Luftlagerkonzepte mit potentiell tieferen Fertigungskosten als das gegenwärtig von Celeroton eingesetzte Konzept. Die verschiedenen Konzepte sollen einander hinsichtlich Performance (Stabilität, Rotordynamik) und Kosten gegenübergestellt werden. Anschliessend wird das beste Konzept für den weiteren Projektverlauf selektiert.

Als zweites Projektziel wird ein Turbo Kompressor mit dem selektierten Lagerkonzept theoretisch ausgelegt und optimiert. Wobei immer der Trade-off zwischen tiefen Fertigungskosten in der Serie und Performance des gesamten Kompressors (Wirkungsgrad, Leistungsdichte) im Auge behalten werden muss. Die Spezifikationen des Turbo Kompressors (Druckverhältnis, Massenstrom) werden basierend auf den zu diesem Zeitpunkt verfügbaren Kundenspezifikationen definiert.

Im Anschluss an die theoretische Auslegung wird der Kompressor konstruiert. Für diese Konstruktion wird ein Vergleich erstellt hinsichtlich Fertigungskosten und Performance (Wirkungsgrad, Leistungsdichte) zwischen bestehenden auf dem Markt verfügbaren Produkten (Membranpumpen, etc.), einem Turbo Kompressor mit Standardluftlager von Celeroton und dem Turbo Kompressor mit neuem Luftlagerkonzept aus diesem Projektantrag.

Basierend auf dieser Konstruktion plant Celeroton im Anschluss an dieses Projekt Prototypen und danach Serien herzustellen und diese dann an bestehende und neue Kunden im Bereich Brennstoffzellensysteme mit 0.5 - 2 kW Leistung zu vertreiben.

Vorgehen / Methode

Erstellen der Spezifikation

In einem ersten Schritt wurden die Spezifikation des Turbo Kompressors erstellt. Diese dienen dann als Basis für APII und APIII. Die Spezifikation ist Voraussetzung für die nachfolgende Konzeption der Luftlagerung sowie Detailauslegung und Konstruktion des Turbo Kompressors.

Konzeption

In einem zweiten Schritt wurden die Konzeption der Luftlagerung und des gesamten Turbo Kompressors sowie die Erforschung der Möglichkeiten zur Vereinfachung des Luftlagerkonzeptes durchgeführt. Das Konzept soll möglichst wenige und möglichst einfache Lagerkomponenten enthalten, da diese die Kosten massgeblich beeinflussen.

Detailauslegung und Konstruktion (CAD)

In einem dritten Schritt erfolgt basierend auf der ausgearbeiteten Spezifikation aus API sowie der Konzeptphase (AP II) die Detailauslegung und Konstruktion des Turbo Kompressors. Die Detailauslegung des Kompressors soll einen Betrieb bei den in APII definierten Spezifikationen erlauben.

Quantifizierung und Darstellung des Fertigungsaufwands

In einem vierten Schritt sollen basierend auf der Konzeption und der Konstruktion die Fertigungskosten von Einzelbauteilen mit Lieferanten, und die restlichen Teile und die Montage durch Celeroton selber abgeschätzt werden. Danach wird der Fertigungsaufwand sowie die zu erwartende Performance des in diesem Projekt gewählten Luftlagerkonzeptes im Vergleich zu einem Kompressor mit Standardluftlager von Celeroton und einem auf dem Markt verfügbaren Produkt (z.B. Membranpumpen), quantifiziert und dargestellt. Dabei soll die Komplexitätsreduktion (und allfällige weitere Vorteile) aufgezeigt werden.

Darstellung der Projektresultate

Der Vergleich hinsichtlich Performance und Fertigungskosten soll im Schlussbericht einfach verständlich dargestellt und erklärt werden. Abschliessend soll eine Präsentation erstellt werden um die Vorteile des hochkompakten Kompressors an möglichen Kunden und Projektpartnern für spätere Projektzusammenarbeiten vorzustellen.

Ergebnisse / Erkenntnisse

Erstellen der Spezifikationen

Für die Erstellung der Spezifikationen des Turbo Kompressors wurde das nationale und internationale Netzwerk von Celeroton genutzt um Sets von Spezifikationen aus diversen Anwendungen aufzulisten.

Eine Voranalyse dieser Spezifikationen hat ergeben dass für den breiten Bereich an Spezifikationen nicht ein einziger Kompressor verwendet werden kann, da dieser die Zielkosten nicht erreichen würde. Hingegen anforderungsreichere Spezifikationen auch einen Mehrpreis rechtfertigen, da keine vergleichbaren Kompressoren im Markt verfügbar sind. Daher wurden zwei Sets an Spezifikationen definiert:

- «High performance» Kompressor
 - Detailspezifikationen sind in Tabelle 3 zusammengefasst.
 - Der Fokus in diesem Projekt liegt auf diesem Kompressor. Die Arbeitspakete Spezifikation, Konzeption, Detailauslegung werden für diesen Kompressor durchgeführt.
- «Low performance» Kompressor

- Detailspezifikationen sind in Tabelle 3 zusammengefasst.
- Die Detailauslegung dieses Kompressors wird aus Gründen der zeitlichen Limitation ausserhalb dieses Projektes weiterverfolgt. Jedoch wird für diesen Kompressor die Konzeption und darauf basierend die Quantifizierung und Darstellung des Fertigungsaufwandes abgeschätzt.

| | | High performance Kompressor | Low performance Kompressor |
|---|-------|------------------------------------|-------------------------------------|
| Max. Druckverhältnis | - | 1.66 | 1.3 |
| Max. Überdruck | bar | 0.66 | 0.3 |
| Nenn-Überdruck | bar | 0.4 | 0.2 |
| Nenn-Volumenstrom | l/min | 100 | 50 |
| Minimaler Volumenstrom | l/min | n/a | 25 |
| Maximale Leistungsaufnahme im Nennarbeitspunkt | W | 200 | 40 |
| Betriebsspannung im Nennarbeitspunkt | VDC | n/a | 12 |
| Minimale Anzahl Start/Stop | - | 100'000 | 15'000 |
| Minimale Lebensdauer | h | 10'000 | 3'000 |
| Diverses | | Öl-frei | Öl-frei |
| Im Markt verfügbarer Referenzkompressor für Vergleich Fertigungsaufwand und Performance | | n/a | Membran-Kompressor gemäss Tabelle 1 |
| Celeroton Kompressor mit Standard-Luftlagern für Vergleich Fertigungsaufwand und Performance | | CT-17-700.GB | CT-17-700.GB |

Tabelle 3: Zwei Sets an Spezifikationen für die selektierten zwei Kompressoren.

Der im Markt verfügbare Referenzkompressor und der Kompressor von Celeroton mit Standardluftlagern wurden gemäss Tabelle 1 bestimmt. Diese werden benötigt für den Vergleich des Fertigungsaufwandes und der Performance.

Konzeption

Die Konzeption wurde für beide Kompressor-Varianten (low + high performance) durchgeführt. Die Konzeption der beiden Turbo Kompressoren verfolgt zwei Hauptziele:

- Das Gesamt-Konzept muss die Erfüllung der Spezifikationen gemäss Tabelle 3 erfüllen
- Das Gesamt-Konzept soll möglichst wenige und möglichst einfache Lagerkomponenten enthalten, da diese die Kosten massgeblich beeinflussen, dies gilt insbesondere für den «low performance» Kompressor

Die Gesamtkonzeption wurde aufgeteilt in 2 Unterkonzeptionen:

Aero-Konzept

Für beide Kompressor-Varianten wurde ein gegenüber zwei Vergleichskompressoren CT-15-150 (sie-

he Tabelle 1) und CT-17-700.GB (siehe Tabelle 4) vereinfachtes Aero-Konzept gewählt. Das vereinfachte Aero-Konzept basiert auf einem 2D Impeller statt einem 3D Impeller, gemäss Abbildung 1. Ein 2D Impeller bringt die folgenden Vorteile gegenüber einem 3D Impeller:

- Vereinfachte Fertigung des Impellers mit kostengünstigem 2 Achs-Fräsen oder Spritzguss (statt 5 Achsfräsen).
- Vereinfachte Form und daher Fertigung des Impellergehäuses.
- Erwünschte Verschiebung des Kennfeldes zu kleineren Volumenströmen bei höheren Drücken und damit bessere Abdeckung der Spezifikationen.

Der Nachteil des Aero-Konzepts mit 2D Impeller ist ein verminderter Wirkungsgrad. Da der Wirkungsgrad von Turbo Kompressoren gegenüber Membran Kompressoren aber massiv höher ist, bleibt der Gesamtwirkungsgrad gegenüber dem im Markt verfügbaren Kompressoren gemäss Tabellen 1 und 4 höher.

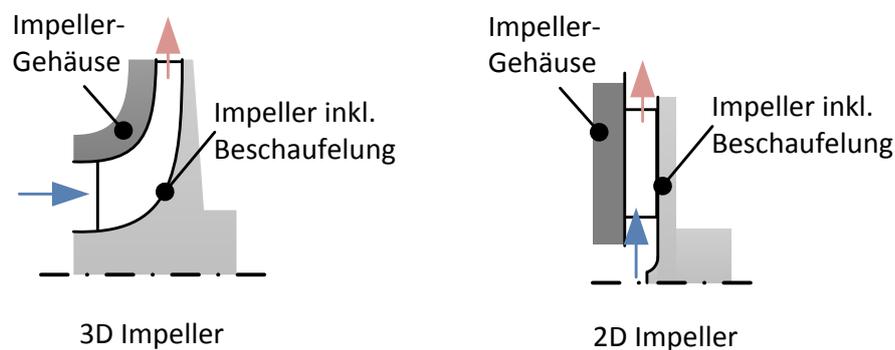


Abbildung 1: Konzeptevaluation für die Aerodynamik. Konzept des CT-15-150 und CT-17-700.GB (3D Impeller) und Konzept des low+high performance Kompressors dieses Projektes (2D Impeller).

Detailauslegung und Konstruktion (CAD-Design)

Die Detailauslegung für den high-performance Kompressor zeigte folgende Resultate:

- Die Aerodynamikauslegung erlaubt die geforderten Druck-/Volumenstromspezifikationen gemäss Tabelle 3 bei 350 krpm (gemäss Konzeption) zu erreichen. Die Kennfelder der Auslegung sind in Abbildung 3 gezeigt.
- Die Detailauslegung des Elektromotors zeigt, dass die geforderte Drehzahl und Leistung und damit die erforderlichen Spezifikationen gemäss Tabelle 3 erreicht werden können.
- Die Lagerauslegung zeigt ein stabiles Verhalten über den ganzen geforderten Drehzahlbereich (bis 350 krpm).
- Die thermische Auslegung zeigt, dass die Temperaturen im Luftlager und Motor innerhalb des tolerierbaren Bereichs gehalten werden können.
- Die finale Überprüfung der Rotordynamik und mechanische Festigkeit erlauben einen Betrieb über den ganzen geforderten Drehzahlbereich (bis 350 krpm).

Für die Abschätzung der Erreichbarkeit der geforderten Spezifikationen des low-performance Kompressors wurde die Aerodynamik des high-performance Kompressors verwendet und bis zu der aus der Konzeptphase abgeschätzten Maximaldrehzahl von 220 krpm ausgewertet, gezeigt in Abbildung 4. Dabei zeigt sich das die geforderten Spezifikationen abgedeckt werden können.

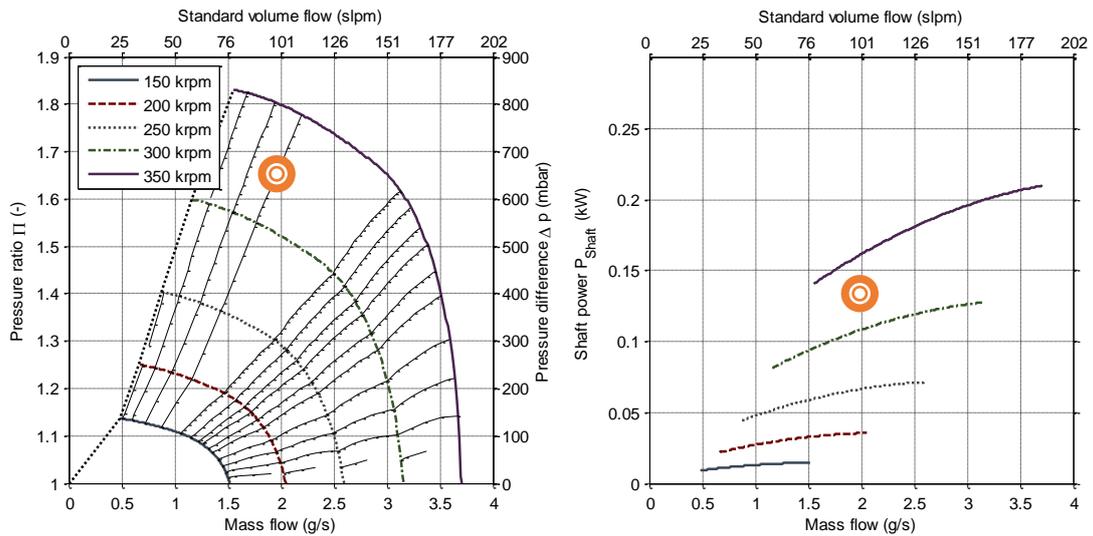


Abbildung 3: Kennfeld des «high performance» Kompressors, Maximaler Auslegungspunkt gemäss Tabelle 3 eingezeichnet.

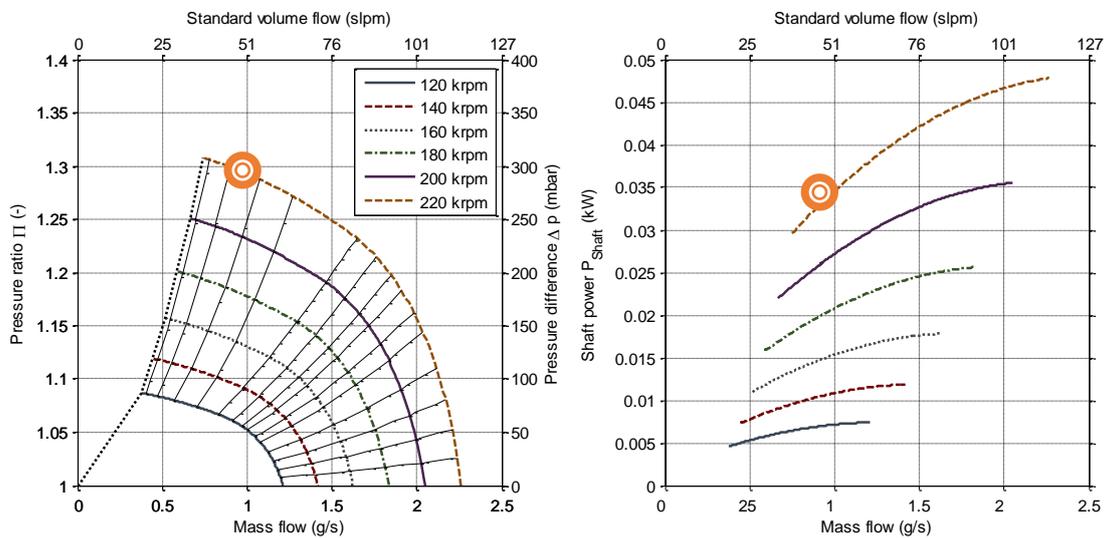


Abbildung 4: Kennfeld des «low performance» Kompressors. Maximaler Auslegungspunkt gemäss Tabelle 3 eingezeichnet.

Das Resultat der Konstruktion des high-performance Kompressors ist in Abbildung 5 gezeigt.

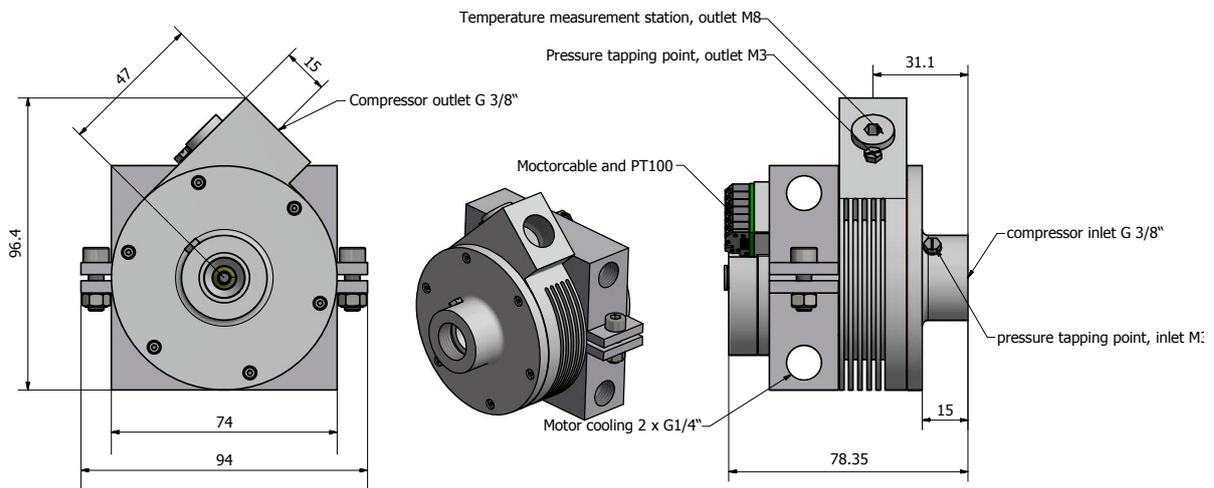


Abbildung 5: Konstruktion des «high performance» Kompressors.

Quantifizierung und Darstellung des Fertigungsaufwands

Die Quantifizierung des Fertigungsaufwandes erfolgt für den low-performance Kompressor, da dieser für kostensensitive Anwendungen zum Einsatz kommen soll. Die Quantifizierung erfolgt mittels:

- Anfragen bei Lieferanten für ausgewählte, kostentreibende Lagerbauteile. Diese Teile gezeichnet basierend auf der Konzeption des low-performance Kompressors.
- Abschätzung für restliche Kompressor-Bauteile durch Celeroton.
- Abschätzung Aufwand für die Montage durch Celeroton.

| | Celeroton Kompressor mit Standard-Luftlagern | Im Markt verfügbarer Referenzkompressor | Low performance Kompressor (aus diesem Projekt) |
|--|---|--|--|
| |  |  | n/a |
| Typ | CT-17-700.GB | Thomas 6025SE/12VDC | n/a |
| Performance Druck/Volumenstrom/Leistung | Kann 10-fachen Volumenstrom erreichen. Basisspezifikation bezüglich Eingangsleistung bei gleichem Volumenstrom | 4 Stück parallel nötig für Erreichen von Basisspezifikationen 3-fache Eingangsleistung nötig für Erreichen Basisspezifikation | Basisspezifikation (100%) |
| Performance Grösse/Gewicht | 1.5 kg + Elektronik | 4 x 1.5 kg | 0.6 kg + Elektronik |
| Performance Lebensdauer | Mindestens 10-fache Lebensdauer | Dito Basisspezifikationen | Basisspezifikationen (zu testen) |
| Fertigungsaufwand Bauteile | 500% | 100% (für 4 Stück) | 150% |

Tabelle 4: Quantifizierung der Performance und des Fertigungsaufwandes verschiedener Kompressor-Typen.

Diskussion / Würdigung der Ergebnisse / Erkenntnisse

Die gesteckten Ziele des Projektes wurden erreicht. Bei der Durchführung des ersten Arbeitspaketes (Spezifikationsphase) hat sich gezeigt, dass der ganze identifizierte Spezifikationsbereich nicht mit einem Kompressor abgedeckt werden kann. Daher wurde die Vorgehensweise gegenüber dem Projektantrag mittels Aufteilung in zwei Sets von Spezifikationen angepasst, statt einem Set wie ursprünglich vorgesehen. Damit wurden auch die verbleibenden Arbeitspakete in diese zwei Sets aufgeteilt:

- Die Konzeption wurde für den low- und den high-performance Kompressor durchgeführt.
- Die Detailauslegung und Konstruktion wurde für den high-performance Kompressor durchgeführt.
- Die Quantifizierung des Fertigungsaufwandes und der Performance wurden für den low-performance Kompressor durchgeführt.

Die Quantifizierung des Fertigungsaufwandes des low-performance Kompressors zeigt, dass der Preis eines auf dem Markt verfügbaren Kompressors mit einem gasgelagerten Turbo Kompressor nicht erreicht werden kann. Die Quantifizierung der Performance des low-performance Kompressors zeigt, dass bezüglich Wirkungsgrad/Leistungsaufnahme, Gewicht und Grösse massive Vorteile gegenüber im Markt verfügbaren Lösungen erreichbar sind. Aus diesen beiden Gründen müssen für die Evaluierung der Marktfähigkeit des low-performance Kompressors weitere Marktabklärungen vorgenommen werden, spezifisch müssen Brennstoffzellen-Anwendungsgebiete im Bereich kleiner Leistung identifiziert werden, die mit besserer Performance (Wirkungsgrad/Leistungsaufnahme und damit energetisches Potential, Grosse, Gewicht) einen höheren Zielpreis des Kompressors erlauben gegenüber auf dem Markt verfügbaren Lösungen.

Schlussfolgerungen, Ausblick, nächste Schritte nach Projektabschluss

Schlussfolgerung

Bei der Durchführung des Projektes wurde basierend auf den Erkenntnissen des ersten Arbeitspaketes die Vorgehensweise angepasst (Aufteilung in zwei Sets von Spezifikationen statt einem Set) und die verbleibenden Arbeitspakete wurden in diese zwei Sets aufgeteilt. Die gesteckten Ziele des Projektes wurden erreicht, wichtige Erkenntnisse gewonnen und daraus die nächste Schritte für nachfolgende Projekte abgeleitet.

Ausblick

Im Anschluss an dieses Projekt plant Celeroton weitere Abklärungen mit potentiellen Kunden bezüglich Zielkosten im Zusammenspiel mit den Vorteilen der Turbo Kompressor Technologie gegenüber auf dem Markt erhältlichen Lösungen hinsichtlich Performance (Wirkungsgrad/Leistungsaufnahme, Grosse, Gewicht), um die Anwendungsgebiete zu identifizieren die höhere Zielpreise erlauben.

Nach Identifikationen von weiteren Anwendungsgebieten und Kunden sollen erste Prototypen des high-performance Kompressors hergestellt werden. Damit können Anwendungen mit low- und high-performance Anforderungen getestet werden. Mit der Detailauslegung und Konstruktion des high-performance Kompressors ist die Grundlage dafür gelegt, diese Prototypen mit limitiertem Zeit- und Kostenaufwand zu realisieren.

Nach Testen in Anwendungsgebieten mit low-performance Anforderungen wird entschieden ob die Detailauslegung und Prototyprealisierung für low-performance Kompressoren gestartet wird.

Referenzen

- [1] M. V. Casey, D. Kraehenbuehl, C. Zwysig, "The Design of Ultra-High-Speed Miniature Centrifugal Compressors," European Conference on Turbomachinery Fluid Dynamics and Thermodynamics ETC 10, 2013.

- [2] D. Zhao, K. Daniel, B. Blunier, C. Zwyssig, D. Manfeng, A. Miraoui, "Design and Control of an Ultra High Speed Turbo Compressor for the Air Management of Fuel Cell Systems," Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), 2012.
- [3] B. Blunier, A. Miraoui, "Proton Exchange Membrane Fuel Cell Air Management in Automotive Applications", Journal of Fuel Cell Science and Technology, 2010
- [4] W. Yu, X. Sichuan, H. Ni, "Air Compressors for Fuel Cell Vehicles: An Systematic Review," SAE International Journal of Alternative Powertrains, 2015
- [5] C. Zwyssig, M. Bartholet, "Weiterentwicklung eines ultrahochdrehenden Turbokompressors für mobile Brennstoffzellentauglichkeit," Schlussbericht BfE-Projekt SI/501296-01, 2016.
- [6] Online: <http://www.celeroton.com/technologie/tech-blog/detail/turbo-kompressoren-fuer-brennstoffzellenfahrzeuge.html>

Anhang

Keine Anhänge