

Herausforderungen bei der Entwicklung eines ölfreien Turbo Kompressors für mobile Brennstoffzellenanwendungen

Der Kompressor als Teil der Luftversorgungseinheit von Brennstoffzellen ist eine kritische Komponente in der Balance of Plant (BoP), speziell in mobilen Anwendungen. Die Hauptanforderungen an den Kompressor stellen das Druckverhältnis, der Massenstrom und die Effizienz bei minimalem Bauraum und Gewicht dar. Die Turbo Kompressor Technologie ist ideal um diese Anforderungen zu erfüllen. Lebensdaueranforderungen und die Notwendigkeit einer öl- und partikelfreien Druckluftversorgung erfordern den Einsatz von Luftlagern. Allerdings widerspricht der Luftbedarf der Brennstoffzelle dem Luftangebot des Turbo Kompressors hinsichtlich Druckverhältnis und Massenstrom. Lösungsansätze und ihr Einfluss auf die Kompressorauslegung und den Betrieb der Brennstoffzelle sind in diesem Beitrag beschrieben.

1 Einleitung

Brennstoffzellen in mobilen Anwendungen, wie z.B. im Automobilbereich, werden üblicherweise mit Wasserstoff und verdichteter Umgebungsluft betrieben. Typische Anforderungen an die Luftversorgung solcher Brennstoffzellen sind hohe Effizienz bei gleichzeitig hinreichender Lebensdauer und Betriebssicherheit, um den Bedürfnissen des automobilen Umfelds zu genügen. Die Empfindlichkeit von Brennstoffzellen gegenüber Verunreinigungen durch Partikel, Öl und andere Einflüsse bedingt öl- und kontaktfreie Lagerung. Speziell in der mobilen Anwendung sind ein geringes Gewicht und Bauvolumen weitere Anforderungen.

Zentrifugalverdichter, auch Turbo Kompressoren genannt, erreichen die Leistungsdaten von Kolben- oder Schraubenverdichtern bei bis zu 50-fach niedrigerem Gewicht und geringerem Bauraum.

Turbo Kompressoren arbeiten, genau wie Brennstoffzellen, kontinuierlich und weisen keine Druckpulse oder -stöße auf. Die Hochdrehzahl ermöglicht die Miniaturisierung des Motors und der Aerodynamik, wodurch eine hohe Leistungsdichte erzielt werden kann. Daher eignen sich Turbo Kompressoren ideal für mobile Anwendungen (Blunier & Miraoui, 2010). Mit Luftlagern ausgerüstet sind sie am besten geeignet, die Anforderungen an Lebensdauer und ölfreie Luftversorgung sicherzustellen (Casey, Krähenbühl, & Zwysig, 2013) (Kolar, Zwysig, & Round).

Verglichen mit Verbrennungskraftmaschinen, die mit Turboladern betrieben werden, bei denen eine Turbine den Turbo Kompressor antreibt, ist die Abgasenthalpie bei Brennstoffzellen zu gering, um den Kompressor anzutreiben. Daher werden elektrisch unterstützte Turbolader benötigt. Für PKW, die häufig bei niedriger konstanter Last betrieben werden, ist ein elektrisch unterstützter Turbolader zu komplex, weshalb vereinfacht rein elektrisch angetriebene Turbo Kompressoren ohne Unterstützung durch eine Abgasturbine eingesetzt werden. Mit einem aktiven Gegendruckventil kann die Luftversorgung vom Betriebspunkt der Brennstoffzelle entkoppelt werden, wodurch die Regelung des gesamten Brennstoffzellensystems verbessert werden kann.

Abb. 1 zeigt ein Schnittbild eines luftgelagerten Turbo Kompressors.

Der Turbo Kompressor basiert auf mehreren voneinander unabhängigen Technologien wie z.B. der aerodynamischen Kompressor-Stufe, dem elektrischen Antrieb und der Lagerung. Die Lagertechnologie (Luft-, Wälz- oder Magnetlager) definiert dabei die erreichbare Lebensdauer und hat gleichzeitig einen signifikanten Einfluss auf alle anderen Auslegungsaspekte. Die durch die Miniaturisierung erreichbare kompakte Bauweise erfordert eine sorgfältige thermische Auslegung.

Die ganzheitliche Systemauslegung unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Designaspekte ermöglicht ein optimiertes Systemdesign des miniaturisierten Turbo Kompressors.

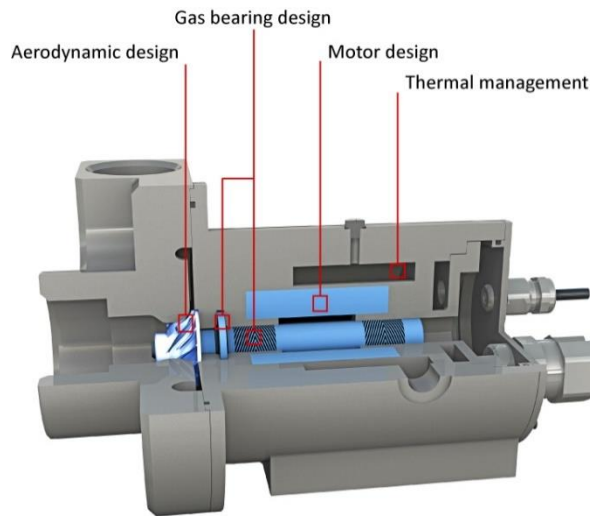


Abb. 1: Schnittbild eines luftgelagerten Turbo Kompressors.

2 Brennstoffzellen-Luftbedarf vs. Kompressor Betriebscharakteristik

2.1 Arbeitsprinzip von Brennstoffzellen

Brennstoffzellen stellen elektrische Energie durch die Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser bereit. Dabei wird der Sauerstoff wie bei praktisch allen mobilen Anwendungen aus der Umgebungsluft verwendet. Der vom Kompressor geförderte Luftmassenstrom definiert die Leistung der Brennstoffzelle. Um den Druckverlust der Brennstoffzelle zu überwinden, muss die Luft mit Überdruck durch diese gefördert werden. Genau wie bei Verbrennungskraftmaschinen kann die Leistungsdichte und der Wirkungsgrad von Brennstoffzellen durch Erhöhung des Reaktionsdrucks in der Brennstoffzelle selbst gesteigert werden. Mobile Anwendungen werden typischerweise bei einem erhöhten Reaktionsdruck betrieben (Jens, et al., 2016). Aus diesen beiden von der Brennstoffzelle definierten Randbedingungen ergeben sich die Anforderungen eines definierten Luftmassenstroms bei einem (definierten) absoluten Druck am Eintritt der Brennstoffzelle bei einer gegebenen elektrischen Leistung.

2.1.1 Betriebsstrategien von Brennstoffzellen

Im Nutzfahrzeugbereich werden Brennstoffzellen als sogenannte "Range Extender" in Kombination mit einer Batterie mit hoher Kapazität oder als Direktantrieb ab Brennstoffzelle in Verbindung mit Batterien mit kleiner Kapazität eingesetzt. Letztere Betriebsstrategie wird auch als «Full Range Brennstoffzelle» bezeichnet.

Die gewählte Betriebsstrategie definiert die Anforderung an das dynamische Verhalten, das die Brennstoffzelle und damit verbunden der Kompressor aufweisen muss. Darüber hinaus werden Brennstoffzellen mit oder ohne Gegendruckventil geregelt, was zu unterschiedlichen Bedarfen an Luftmassenstrom versus Druck wie in Abb. 2 dargestellt führt. In Range Extender-Anwendungen wird die Brennstoffzelle üblicherweise an einem stationären Betriebspunkt bei optimalem (Brennstoffzellen) Systemwirkungsgrad mit oder ohne variablem Gegendruck betrieben (rote Linie). In Full Range Brennstoffzellenanwendungen wird typischerweise ein einstellbares Gegendruckventil eingesetzt, was einen hohen (Brennstoffzellen-) Systemwirkungsgrad über einen grossen Leistungsbereich ermöglicht (grüne Linie).

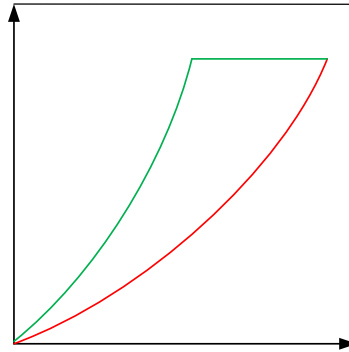


Abb. 2: Betriebsstrategie der Brennstoffzelle mit variablem Gegendruckventil (grün) und konstantem Gegendruck (rot).

2.2 Arbeitsprinzip von Turbo Kompressoren

Turbomaschinen sind Strömungsmaschinen mit einem definierten Druckverhältnis Π und einem definierten Massenstrom \dot{m} bei einer gegebenen Drehzahl. Das Kennfeld des Kompressors stellt das Druckverhältnis über dem Massenstrom dar, siehe Abb. 3. Leistungsgrenzen durch die aerodynamischen und mechanischen Belastbarkeitsgrenzen definieren den stabilen Betriebsbereich.

Pumpen, eine bekannte aerodynamische Instabilität durch Strömungsablösung bei zu geringem Massenstrom und gleichzeitig hohem Druckverhältnis, wird im Kompressorkennfeld als Pumpgrenze dargestellt. Stopfen oder Drosseln tritt bei Erreichen der Schallgeschwindigkeit in der Strömung auf, wodurch eine weitere Steigerung des Massenstroms nicht mehr möglich ist.

Der Kompressor darf nicht im Pumpen betrieben werden. Damit stellt die Pumpgrenze die linke (tiefer Volumenstrom) und die Stopfgrenze die rechte (hoher Volumenstrom) Grenze des Kennfeldes dar. Nach oben ist das Kennfeld durch die Maximaldrehzahl des Kompressors begrenzt, die wiederum von der Werkstofffestigkeit oder dem maximalen Drehmoment der Antriebsmaschine abhängig ist.

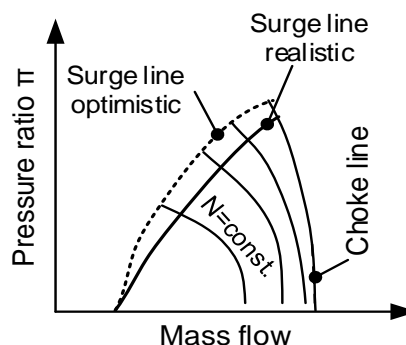


Abb. 3: Kompressorkennfeld.

Die Temperatur- und Druckabhängigkeit des Kompressorkennfeldes wird anhand der folgenden Abb. 4 bis 6 exemplarisch für unterschiedliche Lufteintrittsdrücke, die u.a. beim Höhenbetrieb auftreten und anhand Abb. 7 bis 9 für den Einfluss unterschiedlicher Lufteintrittstemperaturen, die in praktisch jeder Höhe auftreten können, dargestellt. Die maximale Drehzahl des Kompressors (N_{max}) ist dabei für eine bessere Vergleichbarkeit konstant.

Abb. 4 und 7 zeigen das Kompressor-Kennfeld mit dem Druckverhältnis über den Massenstrom. Abb. 5 und 8 stellen das Leistungsbedarfskennfeld des Kompressors (ohne Reibungs- oder elektrische Verluste aus dem Antriebsstrang) dar. Abb. 6 und Abb. 9 zeigen den Absolutdruck am Kompressoraustritt über den Massenstrom.

Die Zusammenhänge werden anhand einer sich ändernden Eintrittsgröße erklärt; alle übrigen bleiben unverändert. Wird die Lufteintrittsdichte durch eine Eintrittsdruckerhöhung (Abb. 4) oder Temperaturabsenkung (Abb. 7) erhöht, führt das zu einer Massenstromerhöhung bei konstanter Drehzahl und damit zu einem höheren Leistungsbedarf (Abb. 5 und 8). Mit steigender Lufteintrittstemperatur sinkt das Druckverhältnis (Abb. 7), was einen abnehmenden Leistungsbedarf zur Folge hat (Abb. 8). Der absolute (Kompressor-)Austrittsdruck sinkt mit sinkendem Eintrittsdruck bei konstantem Druckverhältnis (Abb. 6).

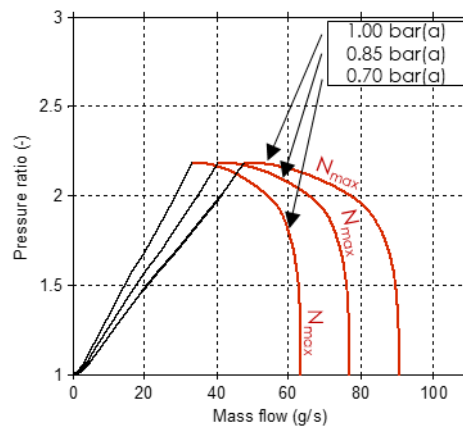


Abb. 4: Kompressor-Kennfeld bei konstanter Einlasstemperatur (20°C).

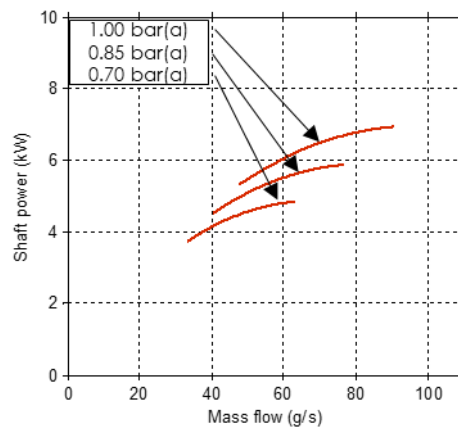


Abb. 5: Leistungskennfeld bei konstanter Einlasstemperatur (20°C).

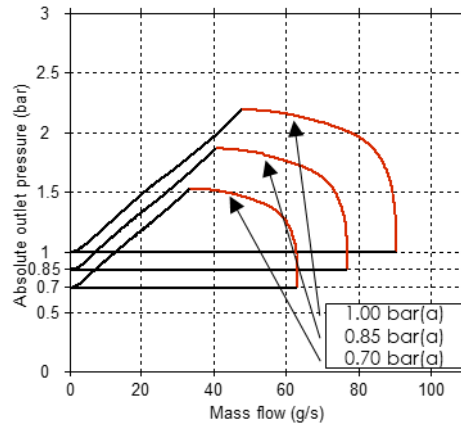


Abb. 6: Kompressor-Kennfeld mit Absolutdruck bei konstanter Einlasstemperatur (20°C).

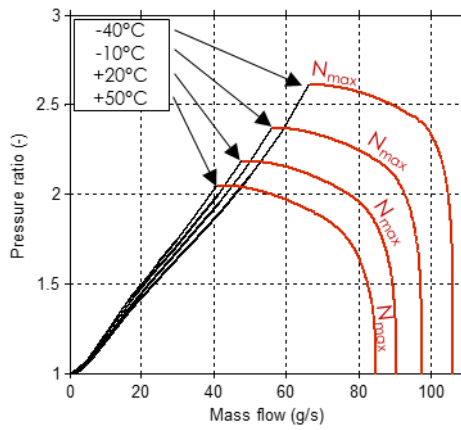


Abb. 7: Kompressor-Kennfeld bei konstantem Einlassdruck (1 bar abs.).

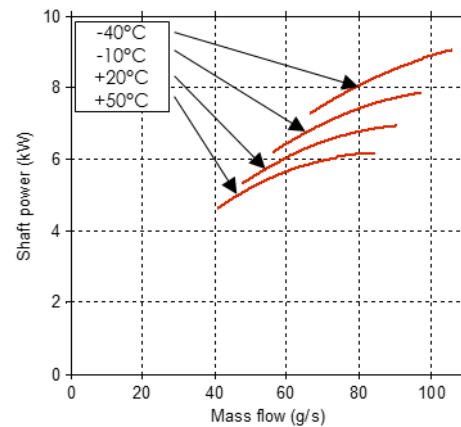


Abb. 8: Leistungskennfeld bei konstantem Einlassdruck (1 bar abs.)

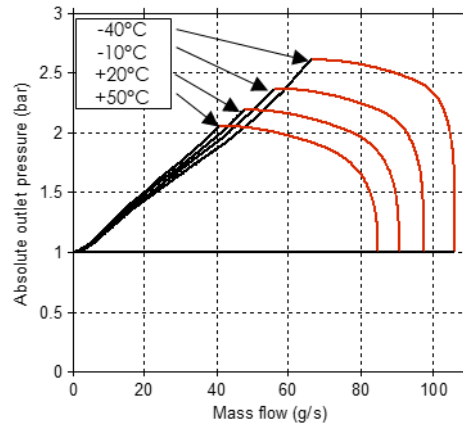


Abb. 9: Kompressor-Kennfeld mit Absolutdruck am Auslass bei konstantem Einlassdruck (1 bar abs.).

2.3 Widerspruch zwischen Brennstoffzellen-Luftbedarf und Turbo Kompressoren Luftangebot

Dieses Kapitel fasst den Zielkonflikt zusammen, der sich aus dem Betriebsverhalten von Brennstoffzellen (Kapitel 2.1.1) und Turbo Kompressoren (Kapitel 2.2) ergibt.

Um den Luftbedarf der Brennstoffzelle auf Meereshöhe und im Höhenbetrieb (z.B. 1'000 m Höhe) zu decken, muss eine gewisse Reserve zur Kompensation der unterschiedlichen Luftertrittszustände vorgehalten werden. Diese Überdimensionierung wird Höhenreserve genannt und üblicherweise durch gesteigerte Drehzahlen realisiert. Die folgende Betrachtung geht von der Annahme aus, dass der benötigte Luftmassenstrom bei 110 g/s und einem Absolutdruck von 2.0 bar abs. liegt, um die geforderte elektrische Leistung der Brennstoffzelle bereitzustellen. Die volle Brennstoffzellenleistung ist dann bei Meereshöhe verfügbar, wenn die Leistung des Kompressors bei ca. 10.5 kW liegt. Soll die Brennstoffzellenleistung bis in eine Höhe von 4'000 m konstant bleiben, benötigt der Kompressor bis zu 18 kW Leistung.

Höhe	Meereshöhe	1'000 m	2'000 m	4'000 m
p_{in} (bar abs.)	1.013	0.891	0.784	0.606
T_{in} (°C)	20	20	0	-10
PR (-)	2.0	2.3	2.6	3.3
p_{out} (bar abs.)	2.0	2.0	2.0	2.0
\dot{m} ($\frac{g}{s}$)	110	110	110	110
P_{in} (kW) ¹	10.5	13.4	14.6	18

Tabelle 1: Beispiel eines Kompressor-Leistungsbedarf und Druckverhältnisbereichs.

¹ Voraussetzungen: Konstanter Wirkungsgrad $\eta_{com, isentropic} = 72\%$, $\eta_{motor} = 95\%$, $\eta_{converter} = 95\%$

In diesem Beispiel wird der Einfluss des Kompressorwirkungsgrades in Abhängigkeit von der Position im Kompressor-Kennfeld nicht berücksichtigt. Der maximale Wirkungsgrad sinkt ab bei Annäherung an die Pump- sowie die Stopfgrenze.

3 Lösungen des Zielkonfliktes und ihre Folgen

Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten die Anforderungen der Brennstoffzelle mit dem Betriebsverhalten von Turbo Kompressoren anzugleichen.

Entweder wird der Turbo Kompressor auf den maximalen Luftmassenstrom- und Druckbedarf der Brennstoffzelle ausgelegt, was bei niedrigstem Eintrittsdruck und maximaler Umgebungstemperatur auftritt, oder eine Leistungsreduktion bei bestimmten Betriebspunkten, «Derating», wird in Kauf genommen.

3.1 Überdimensionierung des Kompressors

Um den Luftbedarf der Brennstoffzelle in grossen Höhen zu decken, wird ein höheres Druckverhältnis als das auf Meereshöhe benötigt. Wenn der Kompressor auf den ungünstigsten Betriebspunkt (siehe Tab. 1, Spalte "4'000 m") ausgelegt wird, führt der gesteigerte Leistungsbedarf zu einer Überdimensionierung der Maschine. Folglich wird der Kompressor in allen anderen Betriebspunkten im Teillastbereich betrieben und einzelne Betriebspunkte können u.U. durch die in 2.3 beschriebenen technischen Grenzen gar nicht erreicht werden.

3.2 Derating der Brennstoffzelle

Derating bezieht sich auf die elektrische Leistung der Brennstoffzelle, die bei bestimmten Lufteintrittsbedingungen unterhalb der Nennleistung liegt. In diesem Fall wird der Kompressor auf den Betriebspunkt im Nennarbeitspunkt der Brennstoffzelle ausgelegt. Für höhere Leistungsanforderungen, z.B. bei Beschleunigung (kurzzeitiger Bedarf an erhöhtem Massenstrom und Druckverhältnis) oder im Höhenbetrieb kann der Kompressor in Überlast, ausserhalb des optimalen Betriebsbereichs zum Beispiel bei niedrigem Wirkungsgrad bis zum Erreichen der thermischen Einsatzgrenze betrieben werden. Gleichzeitig ist der geförderte Massenstrom und Austrittsdruck zu niedrig, um den Betriebspunkt "4'000 m" aus Kapitel 2.3 zu erreichen, was zum Derating des Brennstoffzellensystems und damit der verfügbaren elektrischen Leistung führt.

3.3 Kombination aus Überdimensionierung und Derating

Der benötigte Luftmassenstrom und Druck muss bis zu einer bestimmten Höhe aufrechterhalten werden. Wie in Kapitel 2.2 beschrieben nimmt der Massenstrom und Auslassdruck mit abnehmender Luftdichte bei konstanter Kompressordrehzahl und Einlasstemperatur ab. Zur Steigerung des Drucks am Auslass und des Luftmassenstroms ist eine Erhöhung der Drehzahl nötig, die auch als Drehzahl- oder Höhenreserve bezeichnet wird. In höherer Höhe wird Derating der Brennstoffzelle toleriert. Typischerweise wird der Massenstrom und der Kompressorausstrittsdruck bis in eine Höhe von 1'000 m ü.d.M. aufrechterhalten.

Eine solche Kombination aus Überdimensionierung auf der einen und Derating auf der anderen Seite wird typischerweise bei der Neuauslegung von Brennstoffzell-Systemen angestrebt.

4 Literaturverzeichnis

- [1] B. Blunier and A. Miraoui: *Proton Exchange Membrane Fuel Cell Air Management in Automotive Applications*, 2010.
- [2] M. Casey; D. Krähenbühl and C. Zwysig: *The design of ultra-high-speed miniature centrifugal compressors*, *10th Europ. Conf. on Turbomachinery, Fluidynamics and Thermodynamics*, Finland, 2013.
- [3] J. W. Kolar; C. Zwysig and S. D. Round: *Megaspeed drive systems: pushing beyond 1 million r/min*, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, accepted for further publication.
- [4] M. Jens, G. Erich, K. Alexander; H. Jürgen, A. S. Samuel; P. Piotr; A. Iker and T. Georgis: *Identification of critical parameters for PEMFC stack performance characterization and control strategies for reliable and comparable stack benchmarking*, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016.