TURBOVERDICHTER FÜR NACHHALTIGE MOBILITÄT

Nachhaltige Antriebssysteme für Personen- und Güterfahrzeuge sind eine der grossen Herausforderungen bei der Neugestaltung der Schweizer Energieversorgung. Zu der Vielzahl technischer Fragestellungen gehört die Entwicklung kompakter Turboverdichter, die zum Beispiel in Wasserstoff-betriebenen Elektro-LKWs eine zentrale Rolle spielen. Die Firma Celeroton (Volketswil/ZH) hat in den letzten gut zehn Jahren Produkte für den noch jungen Markt entwickelt.

Geschäftsführer Dr. Martin Bartholet zeigt einen der Prüfstände, mit dem Celeroton-Ingenieure das Betriebsverhalten von Turbokompressoren testen. Foto: B. Vogel

Fachbeitrag zu den Erkenntnissen aus der aktuellen Brennstoffzellen-Forschung. Das Bundesamt für Energie unterstützt wichtige Fragestellungen dieses Forschungsbereichs. Der Beitrag ist unter anderem in der Fachzeitschrift TIR transNews (Ausgabe vom September 2020) erschienen.

Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Energie BFE

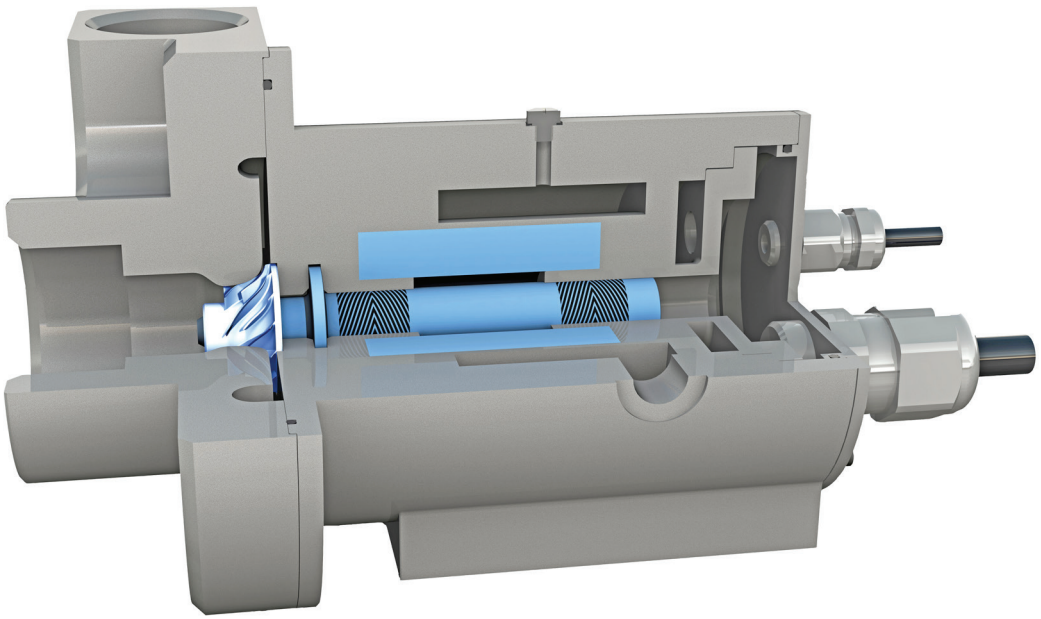
Die Schlagzeile stammt aus dem Jahr 2008: «Rekordantrieb: Höchste Drehzahl der Welt», lautete damals ein Titel im deutschen Magazin «Focus». Der Doktorand Christof Zwyssig, konnte man dort lesen, habe am Lehrstuhl für Leistungselektronik der ETH Zürich einen neuartigen Antrieb entwickelt, der die unglaubliche Zahl von einer Million Umdrehungen pro Minute erreicht.

Zwölf Jahre sind seit der Schlagzeile vergangen und aus der damaligen Rekordmeldung ist eine wirtschaftlich selbsttragende Schweizer Industriefirma mit 38 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern hervorgegangen, die in Volketswil eine weitläufige Etage in einer Gewerbeliegenschaft belegt. Zwyssig hatte Celeroton 2008 mit Martin Bartholet, ebenfalls Doktorand an der ETHZ, gegründet. Die Geschäftsidee sind Verdichter mit sehr hohen Drehzahlen. Die Turboverdichter haben den Vorzug, dass sie sich sehr kompakt bauen lassen – und damit für Anwendungen eignen, wo wenig Platz vorhanden ist wie beispielsweise in Fahrzeugen. Auch brauchen die Turboverdichter keine Schmiermittel, da die Welle nicht mehr auf Kugellagern ruht, sondern auf einem Gaslager «schwebt».

Verdichter mit einer Leistung von 150 bis 20'000 Watt

Die faustgrossen Turbokompressoren kommen in der dezentralen Druckluftversorgung zur Anwendung, dienen etwa der Reinigung von Linsen in Inspektionsanlagen. Das Haupteinsatzgebiet aber sind Brennstoffzellensysteme für Fahrzeuge, die Wasserstoff (aus dem Tank) und Sauerstoff (aus der Umgebungsluft) direkt in elektrische Energie umwandeln (vgl. Grafik S.4 unten links). Für eine hohe Effizienz und damit eine hohe Leistungsdichte wird die Luft komprimiert zugeführt, was über spezielle Turbokompressoren gelingt. Diese Verdichter werden von einem Elektromotor angetrieben, der seine Leistung aus der Brennstoffzelle bezieht (und damit deren Leistungsertrag um 10 bis 20% mindert). Turbokompressoren mit dazugehöriger Elektronik sind neben Wasserstoff-Tanks, Befeuchter, Kühlkreislauf und Wasserstoff-Rezirkulation wichtige Komponenten, die den eigentlichen Brennstoffzellenstapel («Stack») ergänzen. Sie müssen so beschaffen sein, dass das Gesamtsystem effizient und kostengünstig arbeitet.

«Die Innovation von Celeroton ist das integrale System aus Turbokompressor und Steuerungselektronik», sagt Geschäftsführer Dr. Martin Bartholet und ergänzt: «Wir betreiben eine Miniaturisierung und erzielen erst noch eine höhere Effizienz.» Die Kompressoren decken einen Leistungsbereich von 150 Watt bis 20 kW ab. Wird beispielsweise ein Gabelstapler über eine Brennzellzelle (10 kW) mit Strom versorgt, wird ein Turboverdichter mit ca. 1 kW Leistung benötigt. In der Wasserstoff-betriebenen Variante des Renault Kangoo steckt eine 10 kW-Brennstoffzelle als Range Extender mit einem 700 W-Turboverdichter. In einem 40-Tonnen-LKW von Hyundai Motor steckt typischerweise eine 190 kW-Brennstoffzelle mit einem Turboverdichter mit ca. 20 kW Leistung. «Unser Zielmarkt sind europäische Hersteller von leichten Nutzfahrzeugen, wobei wir nicht die Fahrzeughersteller be-



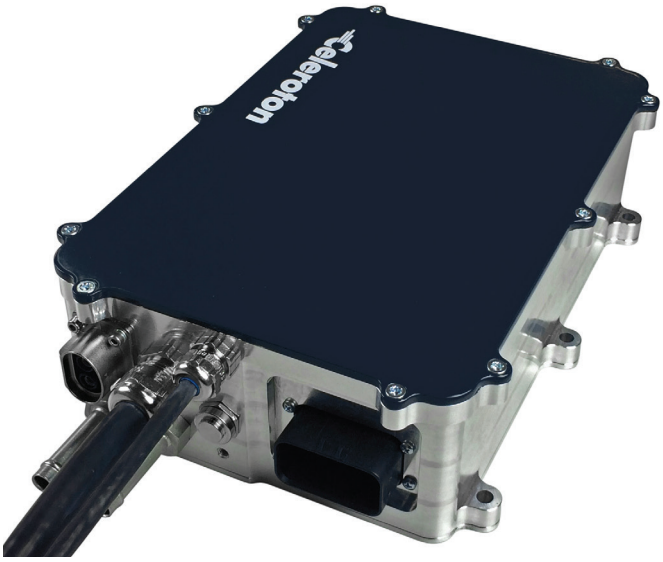
Das Herzstück des Turbokompressors ist die gasgelagerte Welle mit dem Schaufelrad, das die von links anströmende Luft radial ablenkt und damit komprimiert. Das Schaufelrad dreht mit bis zu 280'000 Umdrehungen pro Minute. Als Antrieb dient ein Synchronmotor mit Permanentmagnet. Illustration: Celeroton

liefern, sondern die Hersteller der Brennstoffzellensysteme», stellt Bartholet fest.

Ansteuerungselektronik konstruktiv vereinfacht

Verdichter sind in stationären Industrieanwendungen weit verbreitet und gut erprobt. Der Bau schnelldrehender, kompakter Turbokompressoren für Mobilitätsanwendungen bedarf allerdings intensiver Anstrengungen in Forschung und Entwicklung. Im Gegensatz zu anderen Herstellern von luftgelagerten Turbokompressoren liefert Celeroton nicht nur den Verdichter, sondern auch die dazugehörige Elektronik zur Ansteuerung des Verdichter-Motors als optimal aufeinander abgestimmtes System aus einer Hand. Celeroton hat in den letzten Jahren verschiedene Forschungsprojekte zu konstruktiven, betrieblichen und fertigungstechnischen Fragestellungen durchgeführt. Das Bundesamt für Energie hat relevante Forschungsfragen unterstützt.

In einem bereits 2018 abgeschlossenen Projekt wurde eine neue, vereinfachte Elektronik zur Ansteuerung von Turbokompressoren im Leistungsbereich 3 bis 5 kW entwickelt (vgl. Foto rechts oben). Früher wurden für die Ansteuerung des Turbokompressors drei Elektronikkomponenten (eine Kompressorelektronik, zwei DC-DC-Umrichter) benötigt, um die Stromversorgung während des Startvorgangs (ab Batterie) und während der Fahrt (ab Brennstoffzelle) sicherzustellen. Durch Integration dieser drei Komponenten in einer einzigen Ansteuerungselektronik konnte das System vereinfacht werden. Auch wurde damit die Stromversorgung des Kompressors effizienter, und die Herstellungskosten konnten gesenkt



Integrierte Kompressor-Elektronik (Umrichter CC-550-7500), wie sie in einem 60 kW-Brennstoffzellensystem zum Einsatz kommt, wo drei Komponenten zusammengefasst werden. Damit kann der Energieverbrauch des Verdichters um geschätzt 10% gesenkt werden. Foto: Celeroton

werden. Der Prototyp der Ansteuerungselektronik wurde intern weiterentwickelt und ist heute unter der Bezeichnung CC-550-7500 auf dem Markt.

Zuverlässiger Betrieb ohne Kondensation

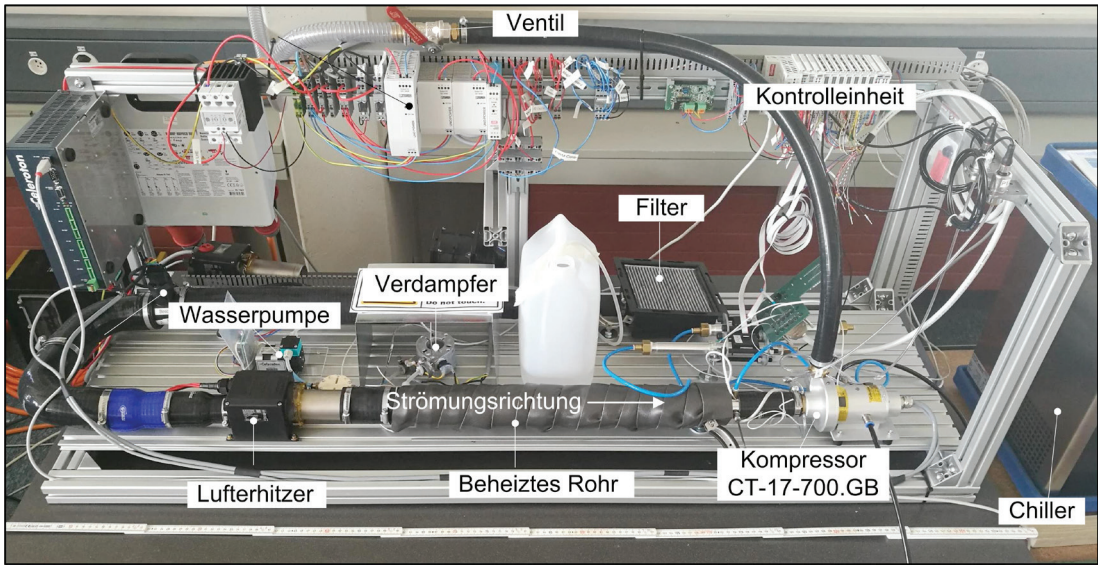
Nicht nur die Konstruktion, auch der Betrieb von Brennstoffzellen in mobilen Anwendungen wirft Fragen auf. Ausgangspunkt ist die Befürchtung, im Kompressor könnte es kurz nach dem Start, wenn dieser noch kalt ist, zu Kondensation

TURBOKOMPRESSOREN FÜR BUSSE, AUTOS UND SCHIFFE

Die Firma Celeroton hat eine integrierte Kompressor-Elektronik für einen Umrichter mit der Bezeichnung CC-550-7500 entwickelt. Dieser wird kommerziell vertrieben und kommt unter anderem in der mit Wasserstoff betriebenen Variante des «Businova»-Busses der französischen Firma SAFRA zur Anwendung. Die Brennstoffzelle, die den Strom für den Elektromotor des Busses liefert und die Celeroton-Elektronik enthält, stammt von der französischen Firma Symbio FCell.

Celeroton arbeitet in weiteren Projekten mit der Industrie zusammen: So hat das Unternehmen den Kompressor für einen von der Firma Swiss Hydrogen entwickelten Brennstoff-Range Extender beigesteuert. Auch in Schiffen steckt mitunter Technologie des Zürcher Unternehmens: Ein Turbokompressor von Celeroton versorgt eine Brennstoffzelle, die seit 2017 den Elektromotor eines Passagierschiffs im französischen La Rochelle antreibt.

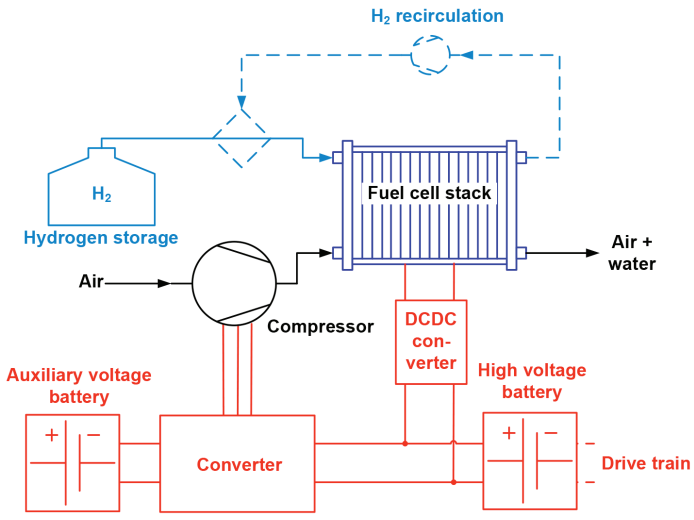
Neben der Anwendung in Brennstoffzellensystemen werden die Turbokompressoren für den Transport von Edel- und Inertgasen sowie zur Reinigung von optischen Linsen genutzt. BV



Mit diesem Prüfstand haben Ingenieure mögliche Beeinträchtigungen des Kompressors durch Kondensat untersucht. Foto: Celeroton

kommen, wenn das Brennstoffzellenfahrzeug in einem Bereich mit warmer, feuchter Luft fährt (zum Beispiel in einen vom Erdinnern erwärmten Tunnel oder eine geheizte Garage).

Kommt es zu Kondensatbildung, könnten die Wassertröpfchen das Gaslager und andere Bestandteile des Turboverdichters beschädigen und zu Korrosion führen. Experimentelle und theoretische Untersuchungen haben gezeigt, dass eine kritische Akkumulation von Kondensation auftreten kann, wenn der Kühlwasserkreislauf des Kompressors zu träge reagiert, sich das Kühlwasser also nicht schnell genug erwärmt, um die Kondensation zu unterbinden. Mit geeigneten Gegenmassnahmen lässt sich Kondensation vermeiden: Mögliche Gegenmassnahmen beinhalten Vorgaben für die Auslegung des Kühlsystems des Kompressors, Aufheiz- und Anfahrvorgänge im Kompressor und/oder Brennstoffzellensystem sowie konstruktive Anpassungen und Vorgaben für die Kompressoren selber.



In einem Brennstoffzellensytem für automotive Anwendungen sind neben dem eigentlichen Brennstoffzellenstapel eine Vielzahl von zusätzlichen Komponenten verbaut. Um eine möglichst hohe Gesamteffizienz zu erreichen, ist es wichtig, dass die parasitären Lasten des Kompressors und Umwandlungsverluste möglichst klein gehalten werden können. Grafik: Celeroton

Kompakte Elektromotoren für die Serienproduktion

Bis vor zwei Jahren wurde Celeroton als Prototypen- und Engineering-Firma für Turbokompressoren wahrgenommen. «Wir entwickeln uns nun zu einem produzierenden KMU, das Turbokompressoren mit zugehöriger Steuerelektronik in Serie baut», sagt Geschäftsführer Bartholet. Damit rücken mehr und mehr auch fertigungstechnische Fragen in den Vordergrund wie eine optimierte Motorentopologie. Im Zentrum steht die Frage, wie der Stator des Elektromotors, der den Turbokompressor antreibt, gewickelt werden muss bzw. wie die einzelnen Spulen der Wicklung anzuordnen sind.

Die Ergebnisse sollen es unter anderem ermöglichen, die leistungsstarken Turbokompressoren mit 12 kW und mehr noch kompakter zu bauen, dies auch in industrieller Serienfertigung. Um derartige Konstruktionsprobleme erfolgreich zu meistern, hat Celeroton firmenintern das entsprechende Know-how zum Bau elektrischer Maschinen aufgebaut.

Nutzfahrzeug-Flotten von Unternehmen

Celeroton ist also gut aufgestellt, um eine wichtige Komponente für Brennstoffzellenfahrzeuge zu liefern. Welchen Anteil die Wasserstofftechnologie in der Mobilität der Zukunft spielen wird, lässt sich im Moment nicht verlässlich sagen. Die Technologie muss noch kostengünstiger werden, und unabdingbar ist ein Netz aus Wasserstoff-Tankstellen. Celeroton setzt auf einen Durchbruch der Technologie bei leichten und schweren Nutzfahrzeugen, weil diese oft zu einer Flotte gehören, die an zentraler Stelle betankt werden kann.

In einem aktuellen Projekt arbeitet die Firma aus Volketswil mit einem Unternehmen zusammen, das ab 2021 eine Flotte aus kleinen LKWs mit Wasserstoff einsetzen will. Im Idealfall wird das Projekte zu einem Leuchtturm, der andere Unternehmen von den Vorzügen der Technologie überzeugt.

- **Auskünfte** erteilt Dr. Stefan Oberholzer (stefan.oberholzer[at]bfe.admin.ch), Leiter des BFE-Forschungsprogramms Wassserstoff und Brennstoffzellen.

- Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Wasserstoff und Brennstoffzellen finden Sie unter www.bfe.admin.ch/ec-h2.

Autor: Dr. Benedikt Vogel, im Auftrag des Bundesamts für Energie (BFE)
Stand: November 2020