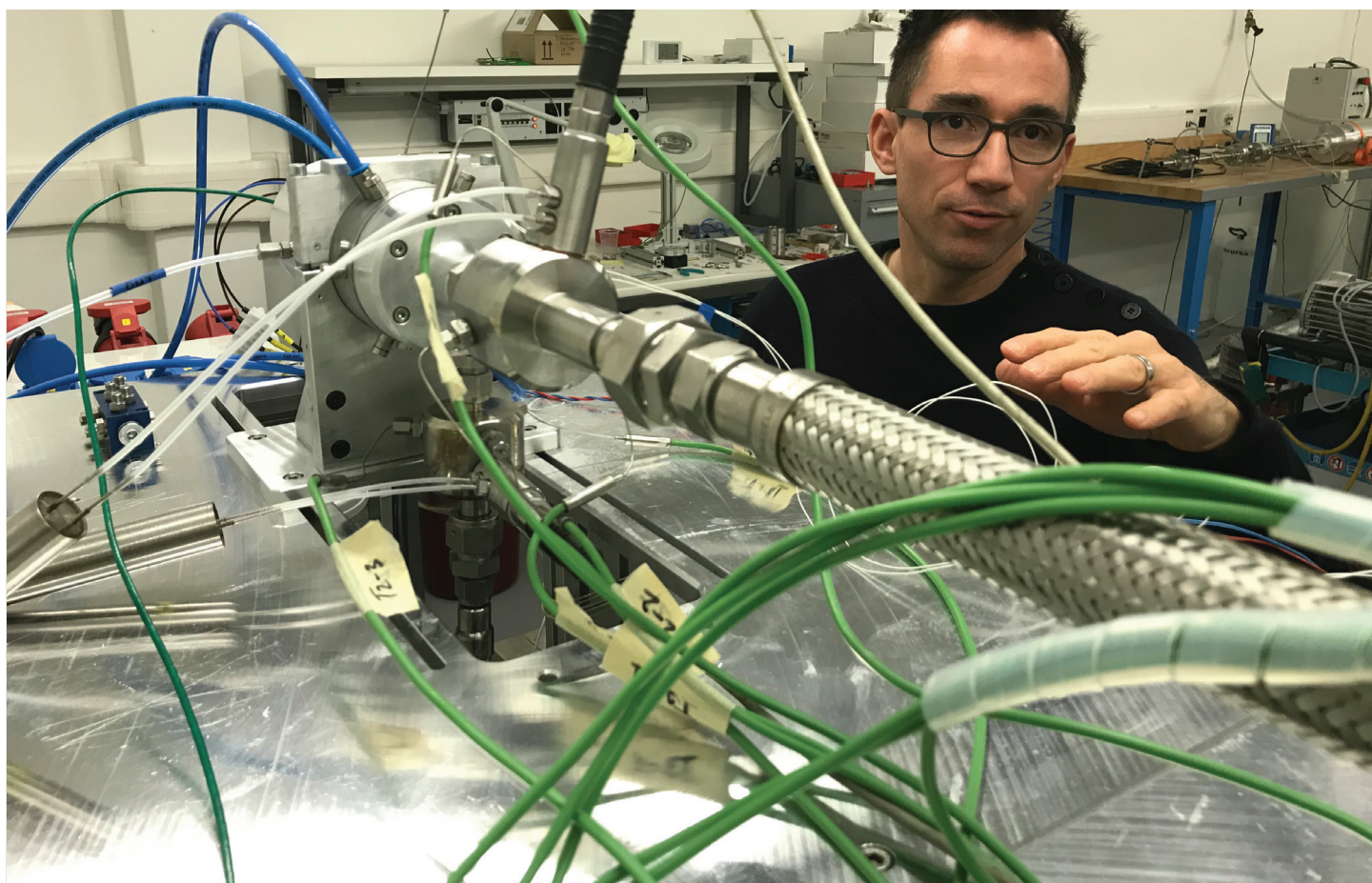


NEUENBURG ERFINDET DIE WÄRMEPUMPE NEU

Wärmepumpen werden heute breit eingesetzt. Sie produzieren Heizwärme und Warmwasser zuverlässig und umweltgerecht. Was nicht heisst, dass man sie nicht noch besser machen könnte: Ein Forscherteam der Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) am Standort Neuenburg will eine Hauptkomponente von Wärmepumpen – den Verdichter – nochmals deutlich verbessern und so die Effizienz von Wärmepumpen um rund 20% steigern. Im Rahmen eines BFE-Forschungsprojekts wurde ein ölfreier Radialverdichter entwickelt, der gute Chancen hat, das ambitionierte Ziel zu erreichen.



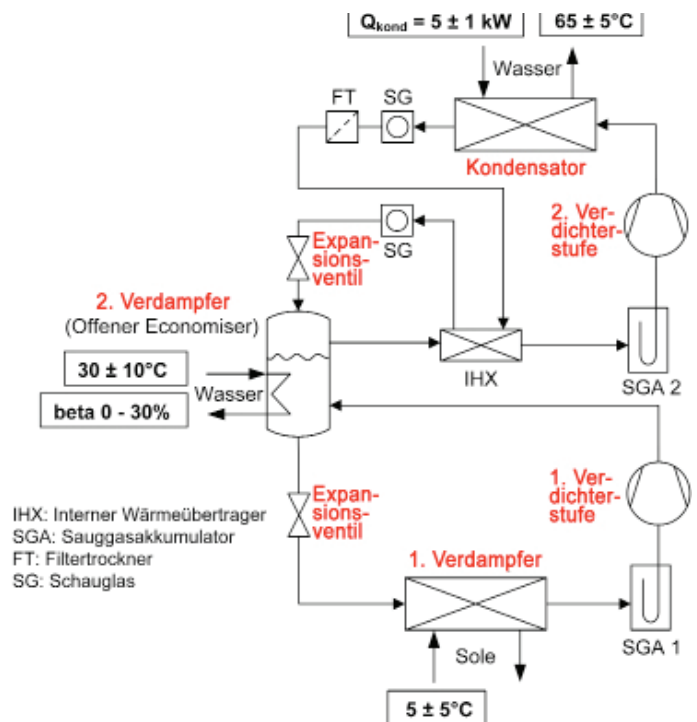
Prof. Jürg Schiffmann zeigt im Labor den Prüfstand, an dem der ölfreie Radialverdichter als Komponente eines Kühlmittelkreislaufs getestet werden kann. Foto: B. Vogel

Will die Schweiz das Ziel einer nachhaltigen Energieversorgung umsetzen, muss die Energie vermehrt aus erneuerbaren Quellen gewonnen werden, und die verfügbare Energie muss wirksamer genutzt werden. «Wir verstehen die nationale Energiestrategie als Auftrag, Maschinen zu entwerfen, die Energieträger effizienter nutzen und so den Energieverbrauch wie die CO₂-Emissionen reduzieren», sagt Jürg Schiffmann, Professor am Labor für Angewandtes Mechanisches Design (Laboratory for Applied Mechanical Design/LAMD) der EPFL am Standort Neuenburg. Mikrotechnik hat am Jurasüdfuss, dem traditionsreichen Zentrum der Uhrenindustrie, eine lange Tradition. Nur sind die Maschinen, die Jürg Schiffmann und sein Forscherteam bauen, keine Uhren. Vielmehr entwickeln die Wissenschaftler kleine Turbomaschinen, nämlich Verdichter und Turbinen im Leistungsbereich von ein paar Watt bis zu wenigen Kilowatt.

Turbomaschinen kommen in verschiedenen Bereichen zum Einsatz. Dank der grossen Verbreitung können die Maschinen – energiesparend konstruiert – einen wichtigen Beitrag zu einer effizienten Energieversorgung leisten, selbst wenn jede einzelne von ihnen eine relativ geringe Leistung hat. Die Neuenburger Forscher haben gezeigt, dass Auto- und Lastwagenmotoren durch Wärmerückgewinnung aus den heissen Abgasen mittels Turbine um 10% effizienter betrieben werden könnten. Dieselbe Technologie kann man bei Brennstoffzellen vom Typ SOFC, die Erdgas, Biogas oder Wasserstoff ohne Verbrennung in Strom umwandeln, heranziehen. Damit wird ein Wirkungsgrad von 66% erzielt – ein exzellenter Wert für eine derartige Kleinanlage. Herzstück der Innovation ist in beiden Fällen eine kleine, schnell drehende Turbomaschine.

Siegeszug der Wärmepumpe

Jürg Schiffmann hat in den 1990er Jahren an der EPFL in Lausanne Maschinenbau studiert. Später arbeitete er bei Fischer Engineering Solutions (Herzogenbuchsee) und schrieb ab 2005 – betreut von EPFL-Professor Daniel Favrat – seine Doktorarbeit über Turbomaschinen. Heute befasst sich der Wissenschaftler unter anderem mit Turboverdichtern, wie sie in Wärmepumpen verbaut werden. Für diese Heizgeräte stellen Turboverdichter eine zentrale Komponente dar: Hat das Kältemittel Wärme aus der Umgebungsluft oder dem Erdreich aufgenommen, muss es durch einen Verdichter komprimiert und damit auf ein höheres Temperaturniveau gebracht werden, um anschliessend zur Bereitstellung von Heizwärme und Warmwasser genutzt werden zu können. Wärmepumpen waren schon in den 1970er Jahren im Zuge der Ölkrise



Schema einer Wärmepumpe, bei der die Verdichtung in zwei Stufen erfolgt, so wie sie den Arbeiten der EPFL-Forscher in Neuenburg zugrunde liegt: Das Kältemittel nimmt im ersten Verdampfer Umgebungswärme auf und wechselt vom flüssigen in den gasförmigen Aggregatzustand. Das Gas gelangt in die erste Verdichterstufe, die es auf einen höheren Druck und damit auch auf eine höhere Temperatur komprimiert. Nach der zweiten Verdichterstufe gelangt das Kältemittel mit erhöhter Temperatur in den Kondensator und gibt Wärme ab (Heizung, Warmwasser). Dabei wechselt das Kältemittel zurück in den flüssigen Aggregatzustand. Im Expansionsventil (ebenfalls zweistufig) wird der Druck reduziert. Damit die beiden Verdichterstufen möglich sind und gleichzeitig der Wirkungsgrad gesteigert werden kann, haben die Forscher einige Besonderheiten eingebaut: Das gasförmige Kältemittel wird nach der ersten Verdichterstufe mit teilweise expandiertem Kältemittel aus dem Kondensator verflüssigt und durch die Zufuhr von Wärme aus einer zusätzlichen Wärmequelle wieder verdampft. Vor der Kompression im zweiten Verdichter wird das Kältemittel zudem durch einen internen Sauggaswärmetauscher weiter erhitzt. Damit wird eine deutlich höhere Temperatur erreicht und der Wirkungsgrad der Wärmepumpe verbessert. Grafik: NTB

propagiert worden. Durchgesetzt haben sie sich damals allerdings nicht. Lange eilte den Geräten der Ruf voraus, sie seien unzuverlässig.

Inzwischen hat sich das geändert. In den letzten zwei Jahrzehnten erlebten Wärmepumpen in der Schweiz einen eigentlichen Boom. Sie avancierten zum bevorzugten Heizsystem bei Neubauten. Eine wichtige Voraussetzung für diese Erfolgsgeschichte war die Entwicklung des sogenann-

ten Scrollverdichters in den frühen 1990er. Der Scrollverdichter arbeitet wie der zuvor eingesetzte Kolbenverdichter nach dem Verdrängerprinzip, ermöglichte dank konstruktiver Neuerungen aber einen höheren Wirkungsgrad. «Ein solcher Technologiesprung könnte heute abermals gelingen und die Wärmepumpen nochmals um 20% effizienter machen», sagt Jürg Schiffmann. Bestand die Innovation damals aus dem Scrollverdichter, ruhen die Hoffnungen heute auf dem Radialverdichter. Schiffmann arbeitet mit seinem Forscherteam an einer neuen Generation dieses Verdichtertyps. «Verbesserungen bei den Verdichtern sind ein Schlüssel zur energetischen Verbesserung von Wärmepumpen, denn der Verdichter ist in einer Wärmepumpe für rund die Hälfte der Umwandlungsverluste verantwortlich», betont Schiffmann.

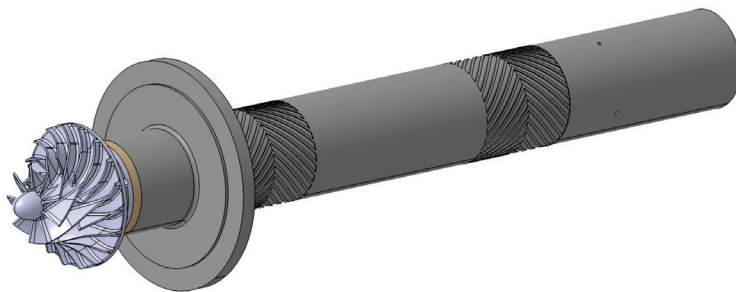
Stabile und reibungsfrei Lagerung

Der zentrale Unterschied zwischen Scrollverdichter und Radialverdichter ist die Art und Weise, wie das in der Wärmepumpe zirkulierende, gasförmige Arbeitsmedium (Kältemittel) verdichtet wird (vgl. Textbox S. 4). Beim Radialverdichter gelangt das Kältemittel auf ein schnell drehendes Schaukelrad, welches das Gas seitlich (radial) ablenkt und dabei verdichtet. Der Radialverdichter der Neuenburger Wissenschaftler hat

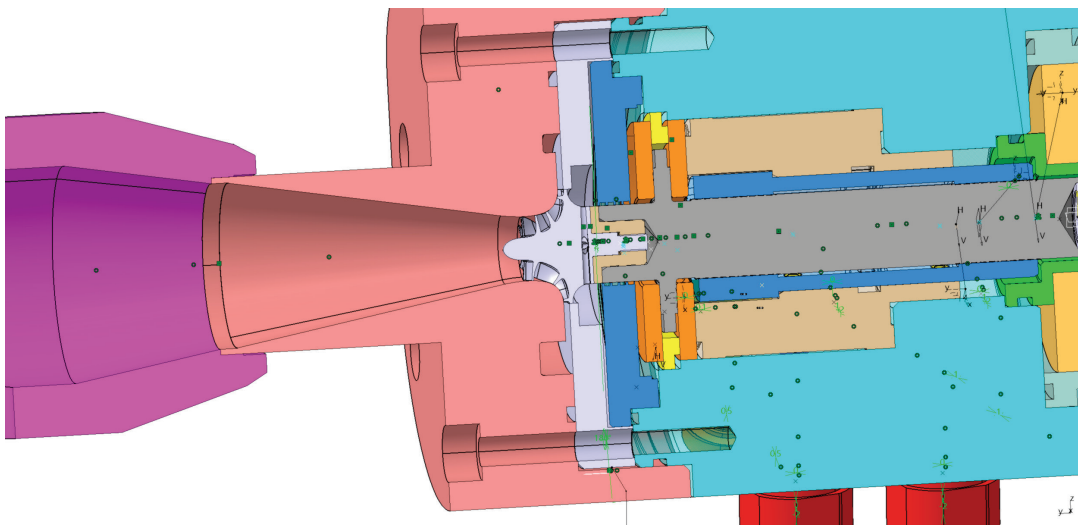
die Eigenschaft, dass die (von einem Elektromotor angetriebene) Welle mit dem Schaukelrad sehr schnell dreht (bis zu 300 000 Umdrehungen pro Minute; engl.: revolutions per minute/rpm). Bei solch hohen Drehzahlen muss die Welle stabil und zugleich praktisch reibungsfrei gelagert werden.

Die Neuenburger Wissenschaftler erreichen dieses doppelte Ziel mit einem Gaslager: Die Welle (ca. 10 mm Durchmesser) schwebt auf einem 5 bis 10 Mikrometer starken «Luftkissen» (das nicht aus Luft, sondern aus dem gasförmigen Kältemittel besteht). Dieses Luftkissen wird allein durch die Rotation der Welle aufgebaut, entsteht also ohne aktives Einblasen einer zusätzlichen Substanz. Dank des Luftkissens gibt es während des Betriebs keine Berührung zwischen Welle und statischem Teil, womit auf Schmieröl verzichtet werden kann.

Diesen ölfreien Radialverdichter stabil zu lagern ist eine grosse Herausforderung. Durch die Rotation der Welle entstehen innerhalb des Lagerspalts Kräfte, welche die Welle tangential auslenken und zu einer Instabilität führen können. Diese Kräfte bändigten die Neuenburger Forscher, indem sie den Luftspalt zwischen Welle und Lager vorerst sehr klein wählten und die Oberfläche mit gegenläufigen, V-förmigen Rillen ver-



CAD-Darstellung des Rotors eines Radialverdichters: An der Spitze befindet sich das beschaukelte Verdichterlaufrad, das das (von links anströmende) gasförmige Kühlmittel der Wärmepumpe seitlich ablenkt. Die Welle ist mit V-förmigen Rillen versehen, welche durch die Rotationsbewegung ein Luftbett aufbauen, so dass die Welle ohne Berührung der statischen Teile «schwebt». Illustration: LAMD

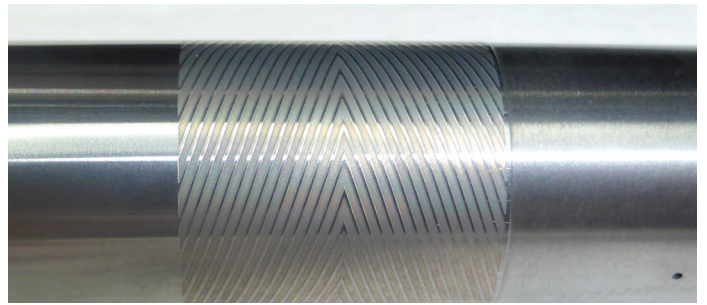


CAD-Schnittbild eines Radialverdichters: Das gasförmige Kältemittel gelangt über einen Eintrittskonus auf das Verdichterlaufrad (hellgrau in der Bildmitte). Das Laufrad versetzt das Kältemittel mit kinetischer Energie (Bewegungsenergie) und lenkt es radial ab. Illustration: LAMD

sahen. Die Rillen erzeugen eine Pumpwirkung und erhöhen dadurch den Druck im Lagerspalt, was die Dämpfung erhöht, den tangentialen Kräften entgegenwirkt und die Welle stabilisiert. Allein das Muster dieser Rillen ist eine Wissenschaft für sich: Durch die Wahl geeigneter Formen konnten die Forscher den Luftspalt im Vergleich zu klassischen Rillen um 60% erhöhen. Wenn der Luftspalt grösser wird, verringern sich die Scherkräfte, die im Gasfilm entstehen, was die Reibung (sprich die Verluste) reduziert. Ein grösserer Luftspalt erlaubt zudem die Herstellungstoleranzen zu erweitern und damit die Kosten zu reduzieren.

Industrie zeigt lebhaftes Interesse

Die Entwicklung eines ölfreien Radialverdichters durch die EPFL-Forscher in Neuenburg wurde durch das Bundesamt für Energie (BFE) finanziell unterstützt. Im Rahmen des Projekts wurden wichtige Zwischenerfolge erzielt: Im Labor läuft der



Die V-förmigen Rillen werden in die Welle aus Stahl gelasert oder geätzt. Das Muster der Rillen wurde so gewählt, dass der Luftspalt zwischen Rotor und Lager möglichst gross ist, weil das betriebliche Vorteile hat. Illustration: LAMD

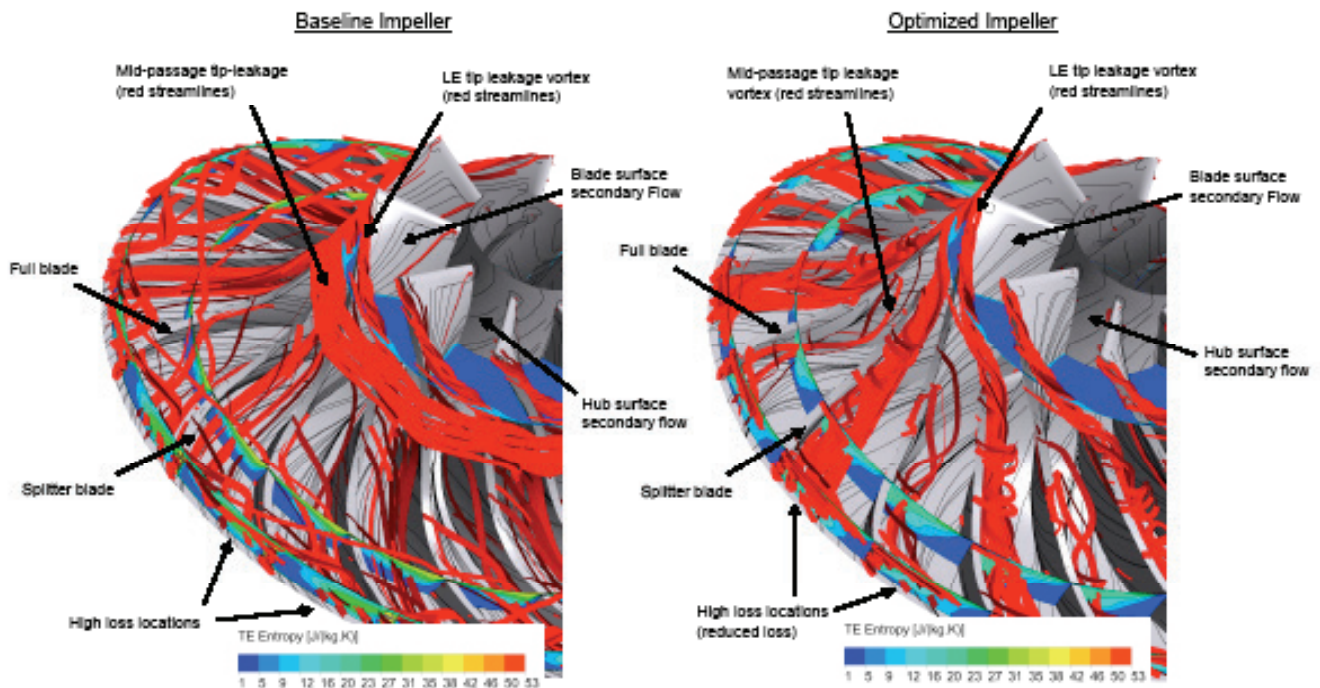
ölfreie Radialverdichter unterdessen stabil bis zu einer Drehzahl von 260'000 rpm. Die Wissenschaftler konnten in der Zwischenzeit auf einem eigens aufgebauten Teststand auch zeigen, dass der Verdichter nicht nur mit Luft läuft, sondern

VOM SCROLLVERDICHTER ZUM RADIALVERDICHTER

Ein Verdrängungsverdichter dient ganz allgemein dazu, ein mit Gas gefülltes Volumen zu verkleinern. Dabei erhöhen sich der Druck und die Temperatur des Gases. Ein bekannter Anwendungsfall ist der Verbrennungsmotor; hier erfolgt die Verdichtung durch einen Kolben. Beim Scrollverdichter hingegen bewegen sich zwei spiralförmige Elemente in der Art, dass sich die Volumina in den Zwischenräumen (Kammern) verkleinern. Nochmal anders funktionieren Radialverdichter: Hier strömt das Gas frontal auf ein schnell drehendes Schaufelrad und wird von diesem seitlich (radial) abgelenkt. Das Schaufelrad versetzt das Gas mit kinetischer Energie, die anschliessend in einem sogenannten Diffusor in Druck umgewandelt wird.

Radialverdichter – auch Zentrifugalverdichter genannt – sind heute weit verbreitet und werden für grössere (100 bis 1000 kW) bis sehr grosse (2 bis 20 MW) Wärmepumpen und Kältemaschinen eingesetzt (so etwa von der Schweizer Firma Friothersm in ihren sehr leistungsstarken Unitop-Wärmepumpen). Radialverdichter kommen aber auch in Turboladern von Autos, in Helikopturburbinen, in Turboprop-Flugzeugen oder industriellen Prozessen zum Einsatz. Im Gegensatz dazu zielt die Forschung der Neuenburger Wissenschaftler auf die Entwicklung von Mikro-Radialverdichtern geringer Leistung (einige Watt bis wenige Kilowatt). Die Schweizer Firmen Celeroton und Fischer stellen bereits heute kleinskalige, ölfreie Radialverdichter für Wärmepumpen im Leistungsbereich von 700 W bis 12 kW her. Die BFE-Unterstützung von EPFL-Wissenschaftler Schiffmann hatte vorrangig das Ziel, die Grundlagen für einen mehrstufigen-Mikro-Radialverdichter zu erforschen.

Sollen Radialverdichter im Leistungsbereich von Haushalts-Wärmepumpen eingesetzt werden, müssen sie sehr schnell drehen (bis zu 300'000 rpm). Nur mit hoher Drehgeschwindigkeit – so die Gesetze der Physik – arbeiten sie bei kleinen Leistungen mit hohem Wirkungsgrad. Um wirtschaftlich zu arbeiten, wird eine Lebensdauer von 20 Jahren (sprich: 120'000 bis 150'000 Betriebsstunden) angepeilt. Energetische Vorteile ergeben sich, wenn es gelingt, einen Radialverdichter zu entwickeln, der kein Öl zur Abdichtung und als Schmiermittel benötigt. Wird in Verdichtern wie bisher üblich Öl verwendet, gelangt dieses nämlich zwangsweise in den Kühlkreislauf. Dort setzt sich das Öl am Inneren der Rohre einschliesslich der Wärmetauscher ab und vermindert den Wärmeübergang, was den Wirkungsgrad der Wärmepumpen reduziert. Diese negativen Effekte vermeidet der ölfreie Radialverdichter. BV



Das Verdichterlaufrad des Radialverdichters mit 15 mm Durchmesser in der ursprünglichen (links) und der optimierten (rechts) Version. Das sehr schnell drehende Laufrad überträgt Bewegungsenergie auf das anströmende Kühlmittel. Die Farbtafeln unten zeigen die Entropie der beiden Verdichterrad-Varianten: Bei der optimierten Variante fällt die Entropie geringer aus, was bedeutet, dass bei diesem Schaufeldesign weniger Verluste entstehen. Die Entropie ist eine Messgröße, die dem Auslegungingenieur hilft, die Beschauung des Verdichterrads so effizient wie möglich zu gestalten. Illustration: BFE-Schlussbericht

auch mit einem Kältemittel (R134a) die angestrebten Leistungswerte ermöglicht. Im Verlauf des Jahres 2020 wird der neuartige Verdichter nun als Komponente in der Systemumgebung von marktüblichen Wärmepumpen getestet. Diese Tests erfolgen unter der Leitung von Prof. Stefan Bertsch am Institut für Energiesysteme der Interstaatlichen Hochschule für Technik (NTB) in Buchs (SG).

Ziel der Forscher ist eine funktionsfähige Laboranlage (Proof of concept). Wird der ölfreie Radialverdichter später industrialisiert, steht eine Komponente für Wärmepumpen-Hersteller bereit, die das Potenzial hat, bei den Wärmepumpen einen breiten Innovationsschub auszulösen. «Wir sind überzeugt, mit dem Einsatz eines zweistufigen Radialverdichters Wärmepumpen zu ermöglichen, deren Wirkungsgrad (COP) um 20% höher liegt als bei den heute auf dem Markt erhältlichen Geräten», blickt Jürg Schiffmann in die Zukunft. Die Chancen, dass die Erkenntnisse aus dem EPFL-Labor schon bald bei den Nutzern von Wärmepumpen ankommen, stehen gut: Die Wissenschaftler arbeiten bereits mit zwei Herstellern

von Verdichtern sowie zwei Herstellern von Kühlaggregate zusammen, die den Verdichter künftig selber bauen wollen.

- **Schlussbericht** zum BFE-Forschungsprojekt «Ölfreie Radialverdichter für mehrstufige Wärmepumpen» unter: www.aramis.admin.ch/Grunddaten/?ProjectID=36212
- **Auskünfte** zu dem Projekt erteilt Stephan Renz (info[at]renzconsulting.ch), Leiter des BFE-Forschungsprogramms Wärmepumpen und Kälte.
- Weitere **Fachbeiträge** über Forschungs-, Pilot-, Demonstrations- und Leuchtturmprojekte im Bereich Wärmepumpen und Kälte finden Sie unter www.bfe.admin.ch/ec-wp-kaelte.