

Schützt Turbinen: Die von Dr. Werner Stamm (unten) entwickelte, nur 300 Mikrometer dünne Schicht verlängert die Lebensdauer von Turbinenschaufeln – auch die der weltgrößten Gasturbine (ganz rechts).



Run aufs Riesenrad

Neue Materialien machen Gas- und Dampfturbinen immun gegen Hitze und Korrosion. Der Lohn: Höherer Wirkungsgrad, geringerer Brennstoffverbrauch und damit weniger Umweltbelastung.

Jeder Koch weiß: Eine kleine Prise Salz entscheidet mitunter, ob eine Speise eher fad schmeckt oder den Gaumen erfreut. Wie groß die Prise sein muss, ist meist Erfahrungssache, und manchmal führt erst die richtige Kombination mit anderen Gewürzen zum Geschmacksziel. Das weiß auch Dr. Werner Stamm, der Paul

Bocuse der Materialforscher bei Siemens Power Generation (PG) in Mülheim an der Ruhr. Stamm denkt sich ständig neue Rezepte aus und wurde dafür zwar nicht mit Sternen oder Kochmützen ausgezeichnet, aber immerhin mit 52 Patenten und dem Titel „Erfinder des Jahres 2006“. Seine Rezepte helfen, die Schau-

fel von Gasturbinen hitze- und korrosionsbeständiger zu machen.

Neuestes Gewürz in Stamms Suppe ist Rhenium, ein seltenes Metall mit sehr hohem Schmelzpunkt und hoher Dichte. In geringen Mengen von ein bis zwei Prozent verleiht es einer Mischung aus Kobalt, Nickel, Chrom, Alu-

minium und Yttrium – so genannten MCrAlY-Schichten – bemerkenswerte Eigenschaften. Die komplizierte Mixtur bildet bei hohen Temperaturen auf der MCrAlY-Oberfläche eine Art Barriere aus Aluminiumoxid – und schützt die Schaufeln vor dem Sauerstoff im Brenngas. Das Rhenium verbessert dabei die mechanischen Eigenschaften der Schutzschicht und verhindert gleichzeitig, dass das Aluminium in den Grundwerkstoff diffundiert. „Die Schicht verhindert die Oxidation des Grundwerkstoffs“, sagt Stamm. Ohne sie würde die Nickel-Basislegierung der Schaufeln nur 4.000 Stunden bei höchsten Einsatztemperaturen überleben. Mit Schicht trotzt sie den Angriffen des Sauerstoffs mehr als 25.000 Stunden und damit länger, als von den Betreibern als Mindestwert gefordert.

Stamms nur etwa 300 Mikrometer dünne Schutzschicht hat noch eine weitere Funktion: Sie dient als Haftvermittler für keramische Wärmedämmschichten. Ausgehend von einer Gastemperatur von circa 1.500 Grad Celsius senkt dieses Verbundsystem aus Haftvermittler und Keramik zusammen mit einer speziell ausgelegten Schaufelkühlung, die Luft aus dünnen Düsen über die Schaufeln bläst, die Oberflächentemperatur an der ersten Schaufelreihe von rund 1.200 Grad Celsius auf etwa 950 Grad am Metall. Neueste Wärmedämmschichtsysteme lassen sogar Keramikoberflächentemperaturen bis zu 1.350 Grad zu.

Kampf um Zehntelprozent. Doch das reicht den Entwicklern noch nicht. Denn mit zunehmender Temperatur verbessert sich auch der Wirkungsgrad der Anlage – also der Anteil an nutzbarer Energie, die aus der Verbrennung gewonnen wird. Wegen steigender Rohstoffpreise kämpfen Betreiber und Konstrukteure

technologisches Neuland“, sagt Dr. Johannes Teysen, Chief Operating Officer und Mitglied des Vorstands der E.ON AG, Düsseldorf. „Dank des höheren Wirkungsgrades sind geringere Erzeugungskosten zu erwarten.“

Weitere Prozentpunkte ließen sich herauskitzeln, wenn man die Luftkühlung in den Turbinenschaufeln deutlich reduzieren würde – denn die Luft wird durch die Turbine mitgeschleppt und reduziert den Wirkungsgrad. Weniger Kühlluft würde die Temperatur an den ersten Schaufeln allerdings um mehr als 100 Grad erhöhen – zuviel für derzeitige Materialien. Die Irschinger Gasturbine besitzt bereits eine optimierte Kühlung: Dort ist Werner Stamms MCrAlY-Schutzschicht im Einsatz. Doch erst nach einigen Jahren im Alltagsbetrieb könne man sagen, wie die Turbine die Be-

lastungen im Detail erträgt, meint Stamm: „Labor und echte Maschine sind zwei Paar Stiefel.“

Derart hitzebeständige und wärmedämmende Schutzschichten haben noch großes Potenzial. Gelingt es den Forschern, die Oberflächentemperaturen der Keramik zu erhöhen und die Oxidbildung der MCrAlY-Schicht zu reduzieren, lassen sich Wirkungsgrad und auch die Laufzeit deutlich verbessern. Letztlich sind sie aber nur ein Zwischenschritt auf dem Weg zur Vollkeramik, die dann ganz ohne Kühlung auskäme. Doch dieser Weg sei noch weit, meint Werner Stamm und schmunzelt: „Vielleicht in 15 Jahren – aber das haben meine Vorgänger vor 15 Jahren auch schon gesagt.“

schaften dem Diamant ähnelt. Es ist aus der Raumfahrt bekannt und hochfest, hat aber einen entscheidenden Nachteil: Es oxidiert, wenn es bei hohen Temperaturen mit Sauerstoff in Kontakt tritt, und der ist in Gasturbinen reichlich vorhanden. Die Siemens-Forscher setzen deshalb auf die Entwicklung von Oxidkeramiken, die bereits mit Sauerstoff reagiert haben. Die geringere Festigkeit des Materials ist kein Nachteil, denn entscheidend ist die tatsächlich nutzbare Dehnung, und die ist höher als bei Siliziumcarbid.

Doch Keramikschaufeln brauchen Verstärkung, wenn sie die von den Kunden geforderten 25.000 Stunden durchhalten sollen, denn Keramiken sind spröde. Dr. Ulrich Bast von Siemens Corporate Technology in München entwickelt und testet daher zusammen mit Kolle-

2014 soll es kohlebefeuerte Dampfkraftwerke mit Wirkungsgraden von gut 50 Prozent geben.

gen in Orlando, Florida, faserverstärkte Keramiken. „Die Fasern liefern eine Belastungsreserve und halten die Keramik intakt – auch wenn diese schon Risse hat“, sagt Bast. Die Kombination zweier spröder Materialien, Keramikmatrix und Fasern, führt zu einer hohen Dehnungs- und Schadenstoleranz. Dennoch bleiben die oxidischen Fasern aus Aluminiumoxid und Siliziumdioxid das schwache Glied in der Kette. Sie reagieren zwar ebenfalls nicht mehr mit Sauerstoff, halten aber nur 1.200 Grad aus – die Keramik alleine schafft bis zu 1.700 Grad und käme damit bei einigen Bauteilen einer Gasturbine ohne Kühlung aus. Der Faserverbund muss deshalb durch eine dicke keramische Isolierschicht vor den extremen Temperaturen des Heißgases geschützt werden. Tests an einem Ringsegment aus faserverstärkter Keramik verliefen bereits vielversprechend.

Generation 50plus. Im Jahr 2014 will E.ON eine neue Generation von Dampfkraftwerken mit Kohlebefeuerung bauen, die einen Wirkungsgrad von über 50 Prozent erreichen sollen. Für die Generation „50plus“, so der E.ON-Name, laufen zurzeit mehrere Vorprojekte, in denen auch Siemens die Komponenten für ein solches Kraftwerk entwickelt. Das Projekt COMTES700 etwa prüft im Kraftwerkspark Scholven bei Gelsenkirchen Materialien für Kessel, Rohrleitungen und Turbinen für eine Dampftemperatur von 700 Grad. Die ist nötig, wenn das Kraftwerk den Sprung von heute maximal 46 auf 50 Prozent Wirkungsgrad schaffen soll. Allein durch die höhere Temperatur werde das aber nicht gelingen, schätzt Dr. Ernst-Wilhelm



um jedes Zehntelprozent. Wie bei der modernsten und mit 340 Megawatt größten Gasturbine der Welt, die Siemens 2007 für das E.ON-Kraftwerk in Irsching geliefert hat – der Koloss soll ab 2011 im Kombibetrieb mit einer Dampfturbine erstmals die 60-Prozent-Grenze beim Wirkungsgrad knacken (S.54). „Damit betreten wir

Seit der Übernahme von Westinghouse durch Siemens konzentrieren sich die Ingenieure auf einen neuen Materialansatz – sie versuchen nun, mit Oxidkeramiken die Temperaturen und damit den Wirkungsgrad hochzutreiben. Andere Hersteller setzen auf Siliziumcarbid als Grundstoff, das im Aufbau und in seinen Eigen-

Pfzinger, Projektleiter für die 700-Grad-Turbine in Mülheim. Das letzte Prozent werde von einem günstigen Standort mit guten Kühlbedingungen, zum Beispiel an der Ostsee, abhängen. In der Studie NRWPP700 arbeiten mehrere Partner, darunter Siemens, schon am Design eines Demokraftwerks, das sogar 720 Grad aushalten soll.

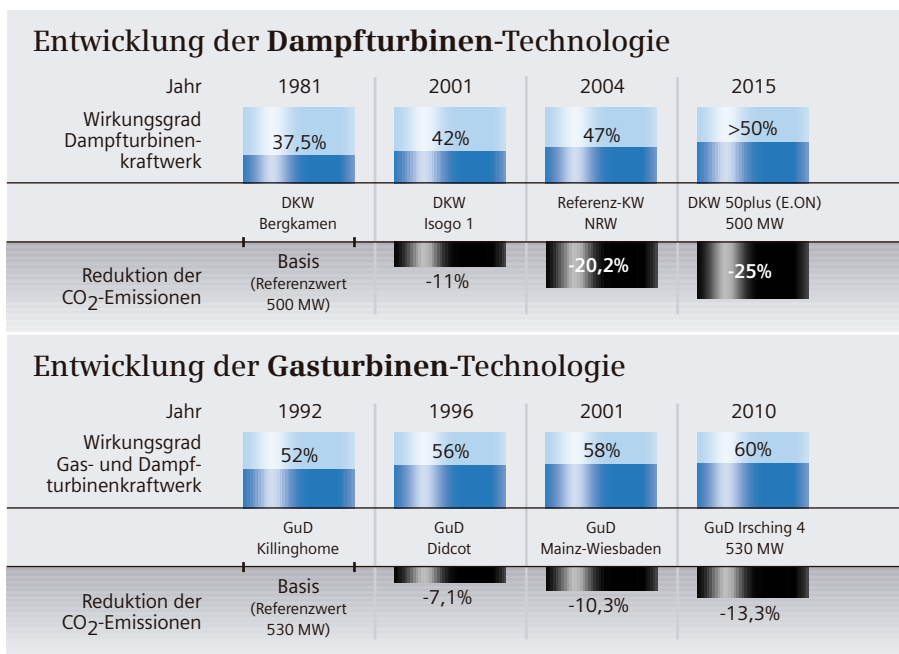
720 Grad – verglichen mit den höllischen Temperaturen in einer Gasturbine klingt das geradezu winterlich frisch. Doch die Anforderungen für die Hoch- und Mitteldruck-Turbinen sind enorm: Zur Hitze kommen Belastungen durch den hohen Druck von 250 bar, beim 50plus-Kraftwerk der E.ON werden es wahrscheinlich sogar 350 bar sein. Zum Vergleich: In einer Gasturbine herrschen nur etwa 25 bar.

nicht so tief ins Metall hinein. Die Verarbeitung der Legierungen zu dickwandigen Schmiede- und Gusskomponenten macht auch eine langwierige Neubestimmung der Werkstoffdaten in heißer Dampfatosphäre notwendig. Der Aufwand fällt bei den Kosten ins Gewicht, auch die Legierung ist über fünfmal teurer als hochwertiger Turbinenstahl. Die Konstrukteure wollen deshalb nur die Teile in Nickel-Basislegierung ausführen, die wirklich hochbelastet sind – zum Beispiel Rotorkern, Schaufeln und das innere Gehäuse. „Das erfordert nicht nur neue Bearbeitungstechniken für Verbindungen unter-

dratmeter Abströmfläche hat die größte volltourige Endstufe made by Siemens. „Der Trend geht aber zu noch größeren Flächen“, sagt Bettentrup. Deshalb peilt sein Team mit einer Schaufelradfläche von 16 Quadratmetern die größte volltourige Dampfturbinenschaufel der Welt an, die ebenfalls im E.ON-Kraftwerk Irsching in Betrieb gehen soll. Selbst die Triebwerke des Airbus A380 verblassen neben diesem Giganten.

Dass das Riesenrad für Kunden äußerst attraktiv ist, hat einen einfachen Grund: Eine 16-Quadratmeter-Turbine ersetzt zwei 8-Quadrat-

20 Tonnen schwere Teile dürfen nur wenige hundertstel Millimeter von der Zielform abweichen.



Die Dampfturbinenbauer bei PG in Mülheim können zwar auf das Material-Know-how ihrer Kollegen aus der Gasturbinenentwicklung zurückgreifen, doch die Verarbeitung ist extrem schwierig. Wo Gehäuse, Schaufeln und Welle einer Gasturbine filigran konstruiert sind und aus Scheiben und Blechen verarbeitet werden, sind die geschmiedeten Wellen einer großen Dampfturbine bis zu einem Meter dick. Dabei können einzelne Teile mehr als 20 Tonnen wiegen, dürfen aber nach der Bearbeitung nur wenige hundertstel Millimeter von der berechneten Form abweichen. Schweißnähte mit 20 Zentimeter Breite erfordern völlig neue Schweißtechniken und vor allem neue Prüfmethoden wie Röntgenverfahren – denn die heute üblichen Ultraschallmethoden spähen

schiedlicher Metalle, sondern auch neue Kühlkonzepte“, sagt Pfzinger. „Weitere Steigerungen über 720 Grad müssten aber machbar sein.“

Weltweit größte Turbinenschaufel. Wegen zu großer Hitze muss sich Jörn Bettentrup keine Sorgen machen. Der Entwicklungsprojektleiter von Siemens PG entwirft neue Laufschaufeln für die letzte Stufe von Niederdruckdampfturbinen, die mit Hoch- und Mitteldruckturbinen in der Regel einen Dreierverbund bilden. Während der Dampf in den drei Turbinen stufenweise expandiert, entspannt er sich am Ende auf kühle 30 Grad und einen Druck von 45 Millibar. Doch durch die Expansion wächst der Volumenstrom enorm an, sodass das letzte Schaufelrad am größten sein muss. 12,5 Qua-

dratmeter-Turbinen. Das spart Maschinenraum, Lager, Rohre und damit viel Geld. Für die Turbinenentwickler ist dies allerdings eine große Herausforderung, denn vor allem die Fliehkraft belastet die großen Schaufeln enorm: Bei 3.000 Umdrehungen pro Minute wirken mehrere hundert Tonnen auf Füße und Nuten, die die Schaufeln mit dem Rotor verbinden. Beim Einsatz von konventionellem Schaufelstahl würden die Festigkeiten nicht ausreichen.

Die Ingenieure benötigen also ein überaus festes Material, das leicht ist und die Fliehkräfte reduziert. Ihre Wahl: Titan. Das teure Metall mit dem matten Glanz, den auch die Juweliere schätzen, wiegt etwa die Hälfte von Turbinenstahl, ist etwas fester und weist eine gute Erosionsbeständigkeit auf. Titan hat aber eine etwas niedrigere Dämpfung gegen Schwingungen als Stahl. Daher werden die Schaufeln mit speziellen Koppel- und Stützelementen versehen. Die Auslegung dieses Schaufelverbands ist äußerst komplex.

Die meisten Hersteller haben mittlerweile Titanschaufeln für die Endstufe ihrer Niederdruckturbinen im Angebot, keiner traut sich jedoch an die Größen heran, die Siemens herstellen will. Bis zur Designfreigabe sind noch zahlreiche Tests und Experimente nötig, um die technischen Hürden zu nehmen. So wurden sämtliche Betriebsparameter etwa zwei Jahre lang an einer kleinen Modellturbine geprüft.

Die Aufgabe des Entwicklungsteams ist es nun, den edlen Werkstoff in einem optimalen Design kostengünstig zu verwenden. Die Fertigung von Titanschaufeln ist aufwändiger als bei konventionellem Schaufelstahl. Das treibt die Kosten in die Höhe, hinzu kommt der hohe und zunehmend schwankende Preis für das Rohmaterial. Dennoch zeigen Bettentrops Berechnungen eindeutig: „Das rechnet sich für die Kunden auf jeden Fall.“ ■ Bernd Müller