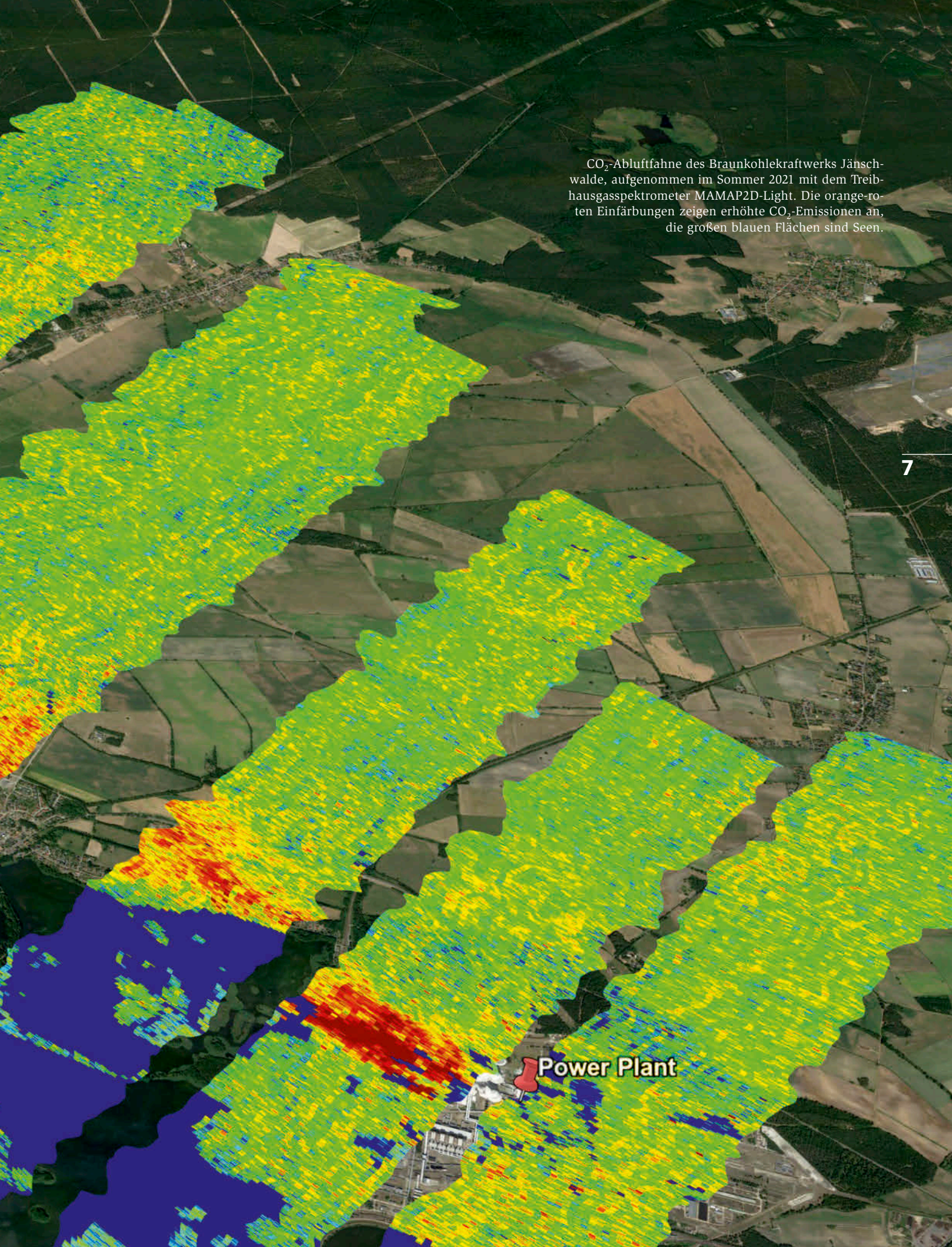
#IR-Spektroskopie
#CO_2-Detektion
#Satellitenanwendung
#Spezialfasern

CO_2-Emissionen spektroskopisch aus dem Weltraum erfassen

AUTOREN Holger Bäuerle und Hilmar Hassel | Ceramoptec
Heinrich Bovensmann und Konstantin Gerilowski | Universität Bremen, Institut für Umweltphysik

Ab 2026 sollen im Rahmen einer Satellitenmission spektroskopische Messungen der Kohlendioxidkonzentration in der Erdatmosphäre mit bislang unerreichter Abdeckung und Genauigkeit möglich werden. Für präzise Messergebnisse sorgt dabei unter anderem ein neuartiger 2-D-Spalthomogenisator, der auf optischen Fasern basiert.

Bild: Universität Bremen, Institut für Umweltphysik



CO_2-Abluftfahne des Braunkohlekraftwerks Jänschwalde, aufgenommen im Sommer 2021 mit dem Treibhausgasspektrometer MAMAP2D-Light. Die orange-roten Einfärbungen zeigen erhöhte CO_2-Emissionen an, die großen blauen Flächen sind Seen.

Bild: A. Fix, DLR

Braunkohlekraftwerk Jänschwalde

Bild: Universität Bremen, Institut für Umweltphysik

Das Forschungsflugzeug (Motorsegler) der Jade-Hochschule Wilhelmshaven beim Einbau des MAMAP2DL-Sensors im Außenlastbehälter unter dem Flügel. Damit wurden im Jahr 2021 das Braunkohlekraftwerk in Jänschwalde überflogen und dessen Emissionen gemessen.

Menschengemachte CO_2-Emissionen sind nachweislich ein wesentlicher Beschleuniger des Klimawandels. Wie viel CO_2 einzelne Städte und Länder weltweit tatsächlich ausstoßen, lässt sich mit herkömmlichen Messungen durch Bodenstationen jedoch kaum verlässlich bestimmen. Deutlich präzisere Daten verspricht nun ein satellitengestützter Ansatz: Im Rahmen des größten europäischen Erdbeobachtungsprogramms ‚Copernicus' werden ab 2026 die ersten Satelliten der neuen CO2M-Mission (Copernicus Anthropogenic Carbon Dioxide Monitoring) in den Orbit geschickt. Die Satelliten basieren weitgehend auf dem Carbonsat-Konzept des Instituts für Umweltphysik der Universität Bremen, das die Aufnahme räumlich hochaufgelöster Bilder der atmosphärischen CO_2- und Methan-Konzentrationen umfasst.

Ausgestattet mit spektroskopischen Messinstrumenten, sollen die CO2M-Satelliten die atmosphärischen Kohlenstoffdioxidkonzentrationen mit bislang unerreichter Detailliertheit, Präzision und räumlicher Abdeckung vermessen und so ein globales Kartografieren der CO_2-Emissionen unterstützen. Mithilfe dieser Technik wird es sogar möglich sein, die Abgasfahnen von einzelnen Emissionsquellen wie etwa großer Kohlekraftwerke zielgenau zu identifizieren. So lässt sich schneller bestimmen, wo und in welchem Umfang CO_2 emittiert wird – sowohl von großen Industrieanlagen als auch von Städten oder ganzen Ländern. Die Mission soll somit die derzeitigen Unsicherheiten bei der Bestimmung von CO_2-Emissionen entscheidend verringern, was eine kontinuierliche und zuverlässige Überwachung der Einhaltung nationaler Emissionsreduktionsziele und der Auswirkungen politischer Maßnahmen auf die Dekarbonisierung ermöglichen soll.

IR-Spektrometer misst die CO_2-Konzentration

Herzstück der CO2M-Mission ist ein Push-Broom-Imaging-Spektrometer, das im kurzwelligen Infrarot arbeitet. Und zwar zum einen im NIR zwischen 747 und 773 nm und zum anderen in den SWIR-Bereichen zwischen 1590 und 1675 nm sowie zwischen 1990 und 2095 nm. Durch Messungen der CO_2-Konzentration in der Atmosphäre werden somit die Quellen des Treibhausgases identifiziert. Um dabei anthropogene von biologischen CO_2-Flüs-

sen unterscheiden zu können, detektiert das Messgerät zusätzlich Stickstoffdioxid (NO_2), das bei der Verbrennung fossiler Energieträger entsteht. Die Bodenszene – also der analysierte Abschnitt der Erdoberfläche und der darüber befindlichen Atmosphäre – wird dabei über ein Teleskop auf den Eingangsspalt eines Spektrometers abgebildet. Während seines Satellitenfluges in der Erdumlaufbahn tastet das Spektrometer die Erdoberfläche kontinuierlich entlang der Bodenspur des Satelliten in Flugrichtung (Along Track, ALT) ab. Die Schwad-Breite, also die Breite des Aufnahmestreifen senkrecht zur Flugrichtung (Across Track, ACT), wird dabei durch die Größe des Spektrometer-Eintrittsspalts festgelegt. Auf diese Weise erfasst das Instrument eine Bodenszene von 800 m in ALT- und 256 km in ACT-Richtung. Mittels dieser Technik wird eine bislang unerreicht hohe räumliche Auflösung erzielt, womit sich sogar einzelne Emissionsquellen identifizieren lassen.

Die Messgenauigkeit, mit der die CO_2-Konzentration in der gesamten Atmosphäre bestimmt wird, muss mindestens 0,7 ppm betragen – das entspricht lediglich rund 0,18 % des in der Atmosphäre vorkommenden Kohlenstoffdioxidgehalts. Um diese sehr hohe Messgenauigkeit zu gewährleisten, muss eine Vielzahl von möglichen Fehlerquellen beseitigt werden – darunter die inhomogene Ausleuchtung des Spektrometerspalts. Diese entsteht bei sich verändernden Kontrasten in der beobachteten Erdszene, den sogenannten inhomogenen Szenen, die beispielsweise durch die planetare Albedo oder Wolken hervorgerufen werden. Bei einer inhomogenen Bestrahlung variiert die spektrale Antwortfunktion des Instruments (Instrument Spectral Response Function, ISRF), was zu falschen Messergebnissen führen kann. Für den Erfolg des Projekts ist eine stabile ISRF daher unerlässlich. Ohne Korrektur dieses Effekts kann die Messgenauigkeit etwa um den Faktor 3 schlechter ausfallen, als sie für homogene Szenen und basierend auf Labormessungen eigentlich zu erwarten wäre. >>>

Spalthomogenisierung mit Glasfasern

Doch wie lässt sich die Stabilisierung der ISRF technisch umsetzen? Eine mögliche Lösung ist die Abschwächung des Erdszenenkontrasts durch Mehrfachreflexionen im Eingangsspalt. Hierzu werden beispielsweise zwei parallele Spiegel – gekoppelt mit einer anamorphen Optik – eingesetzt, die das Licht in Längsrichtung spektral streuen. Dieses Spalthomogenisierungskonzept, auch als 1-D-Slit-Homogenizer (1DSH) bezeichnet, soll erstmals in dem UVNS-Spek-

FASER FÜR RAUE BEDINGUNGEN

Ceramoptec bietet mit seiner WFNS-Faser eine Spezialfaser an, die sich selbst für raue Umfeldbedingungen im Weltall eignet. Die Dämpfungsverluste sind äußerst gering: Nach einer Faserstrecke von 1000 m erreicht sie im Infrarotbereich noch immer eine Übertragungsrate von mehr als 99,9 %. Zudem besitzt sie eine hohe Solarisationsresistenz und bietet dadurch trotz starker UV-Strahlenbelastung im Weltall hohe Langzeitstabilität und eine exzellente Transmission. Die Faser widersteht extremen Temperaturschwankungen außerhalb der Erdatmosphäre. Sie lässt sich unter Betriebstemperaturen zwischen -190 und +350 °C einsetzen.

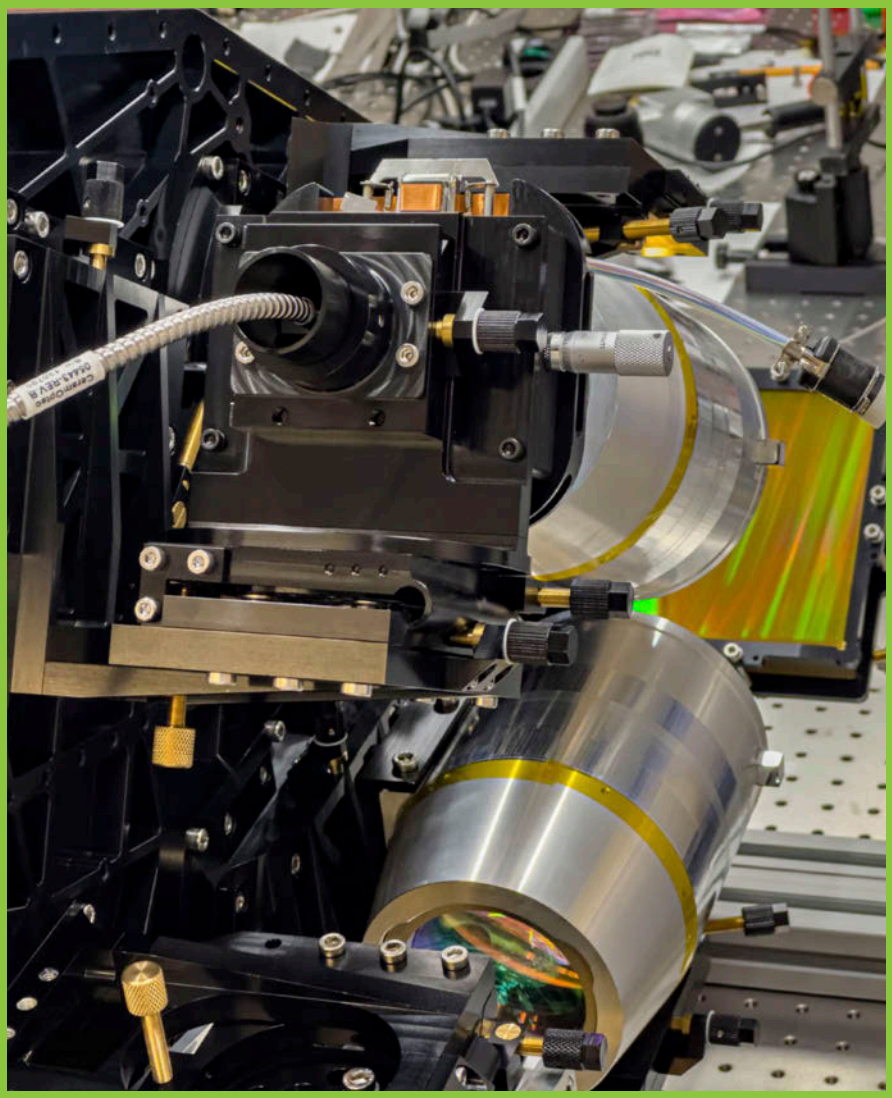


Bild: Universität Bremen, Institut für Umweltphysik

MAMAP2D-Laboraufbau: Einkopplung des Glasfaserbündels mit 2DSH in die Spaltebene, dahinter die Spektrometeroptik mit Reflexionsgitter

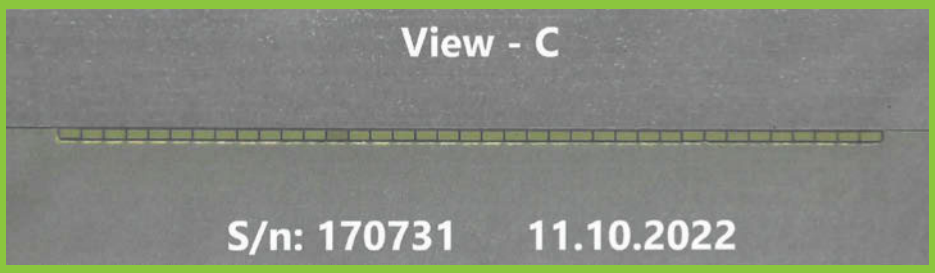


Bild: Ceramoptec

Querschnitt des Faserbündels für den 2DSH, der im MAMAP2D eingesetzt wird

trometer-System der Copernicus-Sentinel-5- sowie der NASA-Geocarb-Mission eingesetzt werden. Für die anspruchsvollen Kohlenstoffdioxid-Messungen der geplanten Erdbeobachtungsmission CO2M reicht der Homogenisierungseffekt dieses Konzepts jedoch nicht aus, da das Licht den Spalt nach wie vor ohne Streuungseffekte in Querrichtung passieren kann.

Im Rahmen der CO2M-Mission soll deshalb erstmals ein faserbasiertes Spalthomogenisator-Konzept eingesetzt werden, das auf den Forschungen und Entwicklungen des Instituts für Umweltphysik an der Universität Bremen basiert. Bei diesem 2-D-Slit-Homogenizer (2DSH) werden anstelle von Spiegeln 120 rechteckige Multimode-Faseroptiken im Spalt entlang des Sichtfelds des vorgelagerten Teleskops gestapelt, und zwar in ACT-Richtung. Jeder Faserkern stellt dabei einen einzelnen Teilspalt dar, dessen Abmessung von 319 x 121 µm² das momentane Sichtfeld in ACT-Richtung definiert. Aufgrund der speziellen Kerngeometrie wird das eingehende Licht auf seinem Weg entlang einer 20 mm langen Faser mehrfach reflektiert, was eine gleichmäßige Energieverteilung bewirkt. Die Homogenisierung wird dabei gegenüber dem spiegelbasierten Konzept nicht nur in spektraler ALT-Richtung, sondern auch in räumlicher ACT-Richtung erreicht. Das gewährleistet stabile Spaltbilder in der Fokusebene ohne ergebnisverfälschende ISRF-Variationen aufgrund sich verändernder Kontraste in der beobachteten Erdszene.

Bild: Ceramoptec

WFNS-Faserbündel von Ceramoptec

In Kooperation mit Ceramoptec entwickelte die Universität Bremen bereits vor mehr als zehn Jahren einen ersten Prototyp des 2DSH. Dieser wurde in ein flugzeuggestütztes Spektrometersystem implementiert und konnte in Praxistests überzeugen: Selbst über inhomogenen Bodenszenen wurde die notwendig hohe Messgenauigkeit erreicht. 2021 wurde das 2DSH dann auch erfolgreich im durch das BMBF geförderten flugzeuggestützten Spektrometersystem MAMAP2D-Light der Universität Bremen getestet: Es erfasste dabei sogar einzelne CO_2-Abluftfahnen, darunter die des Braunkohlekraftwerks Jänschwalde. Zur Vorbereitung auf die CO2M-Mission wird aktuell zudem der Einsatz einer weiterentwickelten Version des Spalthomogenisator-Konzepts an Bord des Flugzeugdemonstrators CAMAP erprobt, der – diesmal im Auftrag der ESA – ebenfalls an der Universität Bremen entwickelt und gebaut wird. ■

www.ceramoptec.com