



Was ist Temperatur?
Mit einer Horde
Seeleute in der Sauna

Im Club der 17
Eine Skala mit
Fixpunkten

Annäherungsversuche
Tief – tiefer –
absolut Null

37 °C
Der besondere
Thermostat

**Im Kühlschrank
der Welt**
Zu Gast in der Antarktis

**Der lange
Hindernisparcours**
100 000 Jahre bis zum
Sonnenbrand





Vorwort

Liebe Leserin, lieber Leser,

bitte seien Sie vorsichtig, wenn Sie jetzt gleich aufs Geratewohl weiterblättern und diese *maßstäbe* an einer beliebigen Stelle aufschlagen. Mit etwas Glück finden Sie sich zwar in gemäßigten Breiten wieder, in denen es wohltemperiert zugeht und Sie ganz unbesorgt entspannen können. Aber ebenso gut – wenn nicht gar mit größerer Wahrscheinlichkeit – landen Sie in extremen Zonen, in denen es entweder heiß hergeht oder Ihnen ein eisiger Hauch um die Nase weht.

Diese *maßstäbe* bieten Ihnen nämlich eine kleine Reise durch die Welt der Temperatur an – eine Reise von eisig kalt (und denken Sie jetzt nicht an das Gefrierfach Ihres Kühlschranks – denn ich meine so richtig kalt) bis ziemlich heiß (wobei damit nicht die Strandtemperaturen des letzten Sommerurlaubs gemeint sind).

Sollten Sie also ein wenig reiselustig sein (was wir als Reiseveranstalter freilich hoffen), dann darf ich Sie zu den unterschiedlichsten Schauplätzen einladen. Kommen Sie doch mit in die Sauna, in der es sich schon eine Horde von Seeleuten gemütlich gemacht hat. Lassen Sie uns – als Kontrastprogramm – in die Antarktis fahren und dort nicht nur den Pinguinen Guten Tag sagen. Auch im Angebot: eine Torpedofahrt durch die Weltmeere, ein kurzer Abstecher an den Rand des Universums und natürlich ein paar Stippvisiten in diversen Physiker-Laboratorien. Denn „Temperatur“ begleitet den Physiker auf Schritt und Tritt. Mal ist die Temperatur des Physikers ärgste Feindin, wenn etwa eine kleine Temperaturschwankung schon wieder die Präzisionsmessung stört. Mal ist die Temperatur sein bester Freund, wenn sich in einem ganz bestimmten Temperaturfenster besonders attraktive Phänomene zeigen. Und manchmal – dies ganz besonders in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) – wird die Temperatur von den Messkünstlern „adoptiert“; sie geben ihr erst ihre richtigen Werte.

Falls Sie jetzt keine kalten Füße bekommen haben, kann die Lesereise ja starten. Aber: Ziehen Sie sich warm an! Sicherheitshalber!

Mit den besten Grüßen aus der *maßstäbe*-Redaktion

IHR JENS SIMON

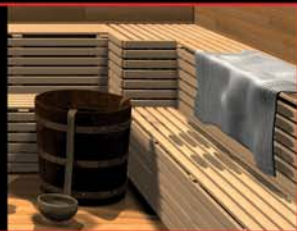


Foto: original-okerland

Die *maßstäbe*-Redaktion vor der Wärmebildkamera im Phäno, Wolfsburg. Von links nach rechts: Erika Schow, Alberto Parra del Riego und Jens Simon.



Inhaltsverzeichnis



Jens Simon
1: **Vorwort**

Jens Simon
10: **Was ist Temperatur?**

Frank Frick
20: **Im Club der 17**

Brigitte Röhlein
28: **Unter dem Hügel...
Das wohltemperierte Labor**

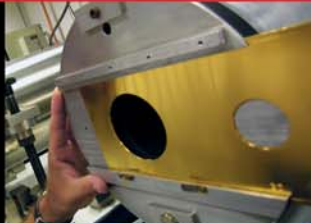


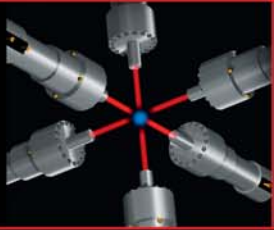
Nicole Geffert
4: **Perfekt im Griff**

Anne Hardy
15: **Kirchhoffs schwarzer Kasten**

Jan Oliver Löffken
23: **Thermometer für alle Fälle**

Anne Hardy
32: **Annäherungsversuche**





Imke Frischmuth
38: Das Atom, das aus der Kälte kam



Dörte Saße
44: 37 °C – der besondere Thermostat



Erika Schow
54: Der Herr der gelben Torpedos



Axel Tillemans
60: Der lange Hindernisparcours der Sonnenwärme



Brigitte Röhlein
64: Aus der Glut geboren... wird das Universum in der Kälte enden



Andrea Hoferichter
35: Entspannt auf Kältekurs



Birgit Ehlbeck
42: Tierisch extrem



Ute Kehse
50: Zu Gast im Kühlschranks der Welt

Erika Schow
57: Die Rebellen



Axel Tillemans
62: Das eiskalte Auge in die Vergangenheit

Jens Simon
68: Das Letzte

Leben

Klima

Himmliches

Perfekt im Griff

Da sage einer, Temperaturen, die uns tagtäglich im Alltag oder im Beruf begegnen, seien eine schlichte Sache. Egal ob minus 10 Grad Celsius oder plus 2200 Grad Celsius – die Menschen, die professionell mit diesen Temperaturen arbeiten, haben eine Menge darüber zu erzählen. Vier Portraits.

Und was machst du beruflich?“ Melanie Schaper kennt ihn schon, den überraschten Gesichtsausdruck, wenn sie auf diese Frage antwortet. „Eismeisterin ist ja auch ein ungewöhnlicher Beruf. Deshalb mag ich ihn so“, erzählt die 26-Jährige, die mit drei Kollegen in der Eis Arena Wolfsburg für den perfekten Belag sorgt. Bevor sie 2003 diesen coolen Job übernahm, hat sie Gärtnerin bei der Stadt Wolfsburg gelernt. Statt Pflanzenschere oder Harke ist jetzt die Eisbearbeitungsmaschine ihr wichtigstes Arbeitsgerät. Wenn die Kufen von Schlittschuhläufern und Eishockeyspielern Kratzer im Eis hinterlassen haben, zieht Melanie Schaper mit dem schweren Gerät ihre Bahnen. „Vorne trägt ein Messer einen halben bis ganzen Millimeter von der Eisschicht ab, hinten wird 60 Grad heißes Wasser mit einem Lappen auf der Fläche verteilt“, erklärt sie. „Das Wasser taut die Eisfläche an und friert dann mit dem Eis fest – das gibt eine besonders gute Verbindung.“ Im April, nach Ende

der Saison, schmilzt das Eis dahin, bis nur noch nackter Beton übrigbleibt. Doch bereits Mitte August, wenn die Freunde im Freibad in der Sonne braten, bricht für Melanie Schaper die Eiszeit an. Dann wird die 30 Meter mal 60 Meter große Eisfläche neu hergestellt. „Unter dem Beton laufen – wie bei einer Fußbodenheizung – Rohrleitungen. Durch sie strömt Ammoniak, das dem Boden Wärme entzieht“, erläutert sie. Auf minus 10 Grad Celsius lassen die Eismeister

-10 °C: Fräulein Schapers Gespür für Eis



die Fläche abkühlen, auf die zunächst Sprühnebel verteilt wird.

„So bekommen Werbefolien und Linien, die auf den Beton geklebt sind, keine Luftblasen.“ Dann erst strömt Wasser aus Schläuchen auf die Fläche. Das Wasser lassen die Eismeister Schicht für Schicht gefrieren, bis das Eis drei Zentimeter dick ist. „Die Spieler des EHC Wolfsburg, die Grizzly Adams, bevorzugen hartes Eis, weil sie darauf schneller sind“, weiß die Eismeisterin und kühlt die Fläche dann auf minus 13 Grad Celsius. Im laufenden Eisbetrieb reicht eine Bodentemperatur von minus 7 Grad Celsius. Und was passiert im Sommer, haben Eismeister dann hitzefrei? „Nein“, lacht Melanie Schaper. „Wir sind für die gesamte Halle verantwortlich. Es gibt immer was zu tun. Da kommen auch wir Eismeister ins Schwitzen.“



Wenn es kräftig gewittert hat, weiß Ursula Gozdek, dass es Zeit ist zu handeln. „Haben sich Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit so deutlich geändert, dann ist mein Cembalo arg verstimmt“, erzählt die diplomierte Kirchenmusikerin aus Braunschweig und schlägt die Tasten ihres sensiblen Barockinstrumentes an. „Hören Sie das? Das zieht einem doch die Schuhe aus!“ Sie greift zu Stimmgerät und Stimmschlüssel, und keine zwanzig Minuten später hat sie ihr italienisches Cembalo gestimmt. Dann lässt die Spezialistin für Alte Musik Auszüge aus einem Werk des Italieners Girolamo Frescobaldi (1583 bis 1643) erklingen. Unwillkürlich kommt man ins Träumen und vergisst darüber alle Fragen. „Je wärmer es ist, desto mehr dehnen sich die Saiten aus – und schon stimmt nichts mehr“, fährt Ursula Gozdek gutgelaunt fort und holt den träumenden Zuhörer in ihr Wohnzimmer zurück. „Das Cembalo ist aus ganz dünnem Holz gefertigt, das den Saiten wenig Zug entgegengesetzt, im Gegensatz zum Stahlrahmen eines Flügels. Darum reagiert es empfindlich auf jede kleine Temperaturänderung.“ Drei der historischen Tasteninstrumente, die zwischen dem 16. und 18. Jahrhundert groß in Mode waren, hat die freie Musikerin in ihrem Wohnzimmer stehen. Regelmäßig muss sie vor dem Spielen – und manchmal sogar mitten im Konzert – ihr Stimm-Werkzeug holen. Am wohlsten fühlen sich die Instrumente bei konstanten 16 °C bis 18 °C. Ach, und das nennt man dann wohltemperiert wie einst bei Bach? „Nein“, lacht Ursula Gozdek. „Das Wohltemperierte Klavier‘ von Johann Sebastian Bach hat nichts mit der Raumtemperatur zu tun. Der Titel bezieht sich auf den barocken Musiktheoretiker Andreas Werckmeister, der unter der Sammelbezeichnung „temperierte Stimmungen“ verschiedene Möglichkeiten der Stimmung von Tasteninstrumenten entwickelte. Erst damit wurde es wirklich möglich, Stücke in allen Tonarten zu spielen.“ Ein extremer Fall einer wohltemperierten Stimmung ist die gleichschwebende Stimmung, die heute bei Flügeln und Klavieren üblich ist. „Damit können Sie jede Tonart gleich gut spielen – aber Sie haben nicht mehr die typische Charakteristik einer Tonart, die barocke Musikstücke doch so spannend macht“, sagt



Ursula Gozdek, der eine solche Temperatur nicht ins Haus oder vielmehr ins Cembalo kommt. Sie setzt lieber auf Stimmungen wie „Werckmeister III“, bei der einige Tonarten besonders rein klingen, andere dagegen nicht ganz so rein – was sie gerade interessant macht. „Und diejenigen Tonarten, die noch weiter von der Haupttonart entfernt liegen und entsprechend schief klingen, vermeidet man natürlich bei der Stückwahl für ein Konzert“, erklärt die Cembalistin schelmisch. „Aber jetzt zeige ich Ihnen noch eine Auswahl meiner Flöten und Barockposaunen, ja?“

18 °C: Wird's dem Cembalo zu warm, ist es verstimmt





kasse dafür sorgt, dass mittags viel Schmackhaftes und Gesundes auf den Tisch kommt, schwört auf Erdnussöl. „Das ist hoch erhitzbar, reich an ungesättigten Fettsäuren und vor allem geschmacksneutral.“ Damit lassen sich nicht nur Broccoli, Möhren und Co. im Wok knackig zubereiten, sondern auch Pommes und Kroketten frittieren – bei mehr als 170 Grad Celsius. Ansonsten gilt: „Finger weg von zu hohen Temperaturen. Die kritische Grenze liegt bei 70 Grad Celsius“, rät der Profikoch. „Bei Temperaturen darüber beginnt zum Beispiel das Eiweiß im Fisch zu stocken und das aromatische Steinbeißerfilet schmeckt faserig und trocken.“ Wer den Flossentieren ein Steak vorzieht, sollte bei der Zubereitung ebenfalls die richtige Temperatur im Blick behalten: „Bis 65 Grad Celsius wird das Steak medium, bei Temperaturen um die 70 Grad Celsius ist es durch.“ Nicht nur eingefleischten Vegetariern empfiehlt Mulder: „Frisches Gemüse gehört nicht gekocht, sondern besser bei 100 Grad Celsius gedämpft. Im Dampf bleiben Geschmack und Vitamine erhalten.“ Die Temperaturen exakt zu regulieren ist für Hobbyköche eine Herausforderung, wie Mulder aus seinen Kochseminaren weiß. Er selbst möchte auf eine Küchenhilfe nicht mehr verzichten: den In-

Olivenöl kommt ihm nicht in die Pfanne. „Das ist zum Braten zu empfindlich“, erklärt Küchenmeister Henk Mulder. „Erhitzt man es auf über 80 Grad Celsius, schmeckt es bitter.“ Der Niederländer, der als Küchenchef der Gästeküche in der Braunschweigischen Landesspar-

duktionsherd. Anders als das herkömmliche Kochfeld erzeugt die Induktionskochplatte durch ein starkes elektromagnetisches Feld die Wärme ausschließlich im Topfboden. Von dort gelangt sie direkt zum Kochgut. Das Ankochen gelingt also schneller, die Hitze lässt sich wie bei Gasherden fein und zügiger regulieren. Schwappt siedende Milch über, gibt es kein mühsames Abkratzen von Verbranntem mehr. Wird der Topf



170 °C: Hier bleibt die Küche niemals kalt

nach dem Kochen von der Kochfläche gezogen, ist diese sofort wieder kühl. Schluss

also mit leichtsinnig verbrannten Fingern. Und wenn es doch mal passiert? Mulders Hausrezept: „Fließend kaltes Wasser über die verletzte Stelle laufen lassen – mindestens zehn Minuten lang!“

Bei so einem Job braucht man keine Sauna mehr. Wer in der Stahlherstellung am Hochofen arbeitet, kennt Hitze in ganz anderen Dimensionen. „Im Hochofen herrschen Temperaturen von bis zu 2200 Grad Celsius. Da strahlt reichlich Wärme ab“, erklärt André Wittwer, Schmelzer bei der

Salzgitter Flachstahl GmbH.

Von Kopf bis Fuß trägt der 25-Jährige silberne Schutzkleidung aus hochfeuerfestem Material inklusive Schutzhaube und -handschuhe. Sicherheit ist oberstes

Gebot. „Ich habe immer noch einen Riesenrespekt vor diesen Urgewalten. Und das ist gut so, denn dann arbeitet man umsichtig und bringt sich nicht leichtfertig in Gefahr.“ Dass es bei ihm täglich auf der Arbeit so heiß hergehen könnte, hat Wittwer noch nicht geahnt, als er 1999 eine Ausbildung zum Industrieschlosser begann. Nach dem erfolgreichen Ab-

schluss ließ er sich zum Schmelzer schulen, „weil die Arbeit spannend ist und das Klima stimmt“, erzählt er und meint das Betriebsklima in seinem Team. Dank moderner Anlagen und Entstaubungstechniken ist die Arbeit am Hochofen längst nicht mehr eine so schmutzige Angelegenheit wie vermutet. Dennoch ist das kein Job für Zartbesaitete. Im Hochofen wird aus Eisenerz, dem Reduktionsmittel Koks und weiteren Zuschlagstoffen wie Kalk das Roheisen herausgeschmolzen. Die Temperatur wird mit 1200 Grad Celsius heißer Luft, die in den Hochofen ein-



geblasen wird, erzeugt. Im Laufe des Prozesses sammeln sich das flüssige Roheisen und die Schlacke im unteren Teil des Ofens. Bis zu 11-mal pro Tag lassen Wittwer und seine Kollegen das gelbglühende Roheisen über Abstichlöcher abfließen und durch abgedeckte Rinnen im Hallenboden in Transportbehälter ablaufen, damit es im Stahlwerk weiterverarbeitet werden kann. Die leichtere und oben schwimmende Schlacke wird abgetrennt, zu Hüttensand

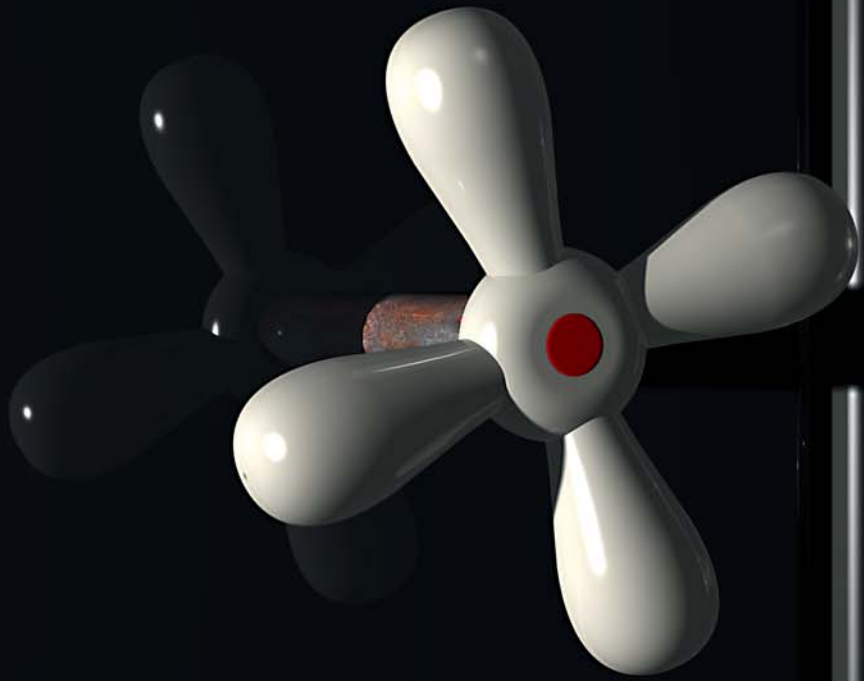
2200 °C: Ein Job, in dem es heiß hergeht

granuliert und von der Zementindustrie weiter verwendet. Während des Abstichs sind die Schmelzer von dem 1500 Grad Celsius heißen Material, das heißer als Lava ist, nur wenige Schritte entfernt. Da ist höchste Konzentration erforderlich. Nur der Griff zur Trinkflasche wird in diesem Job zur Routine. Wittwer: „Gegen die Hitze hilft Wasser. Ich trinke mindestens 3,5 Liter während der Arbeit.“

NICOLE GEFFERT



Fotos (8): original-okerland. Grafiken: Alberto Parra del Riego/PTB



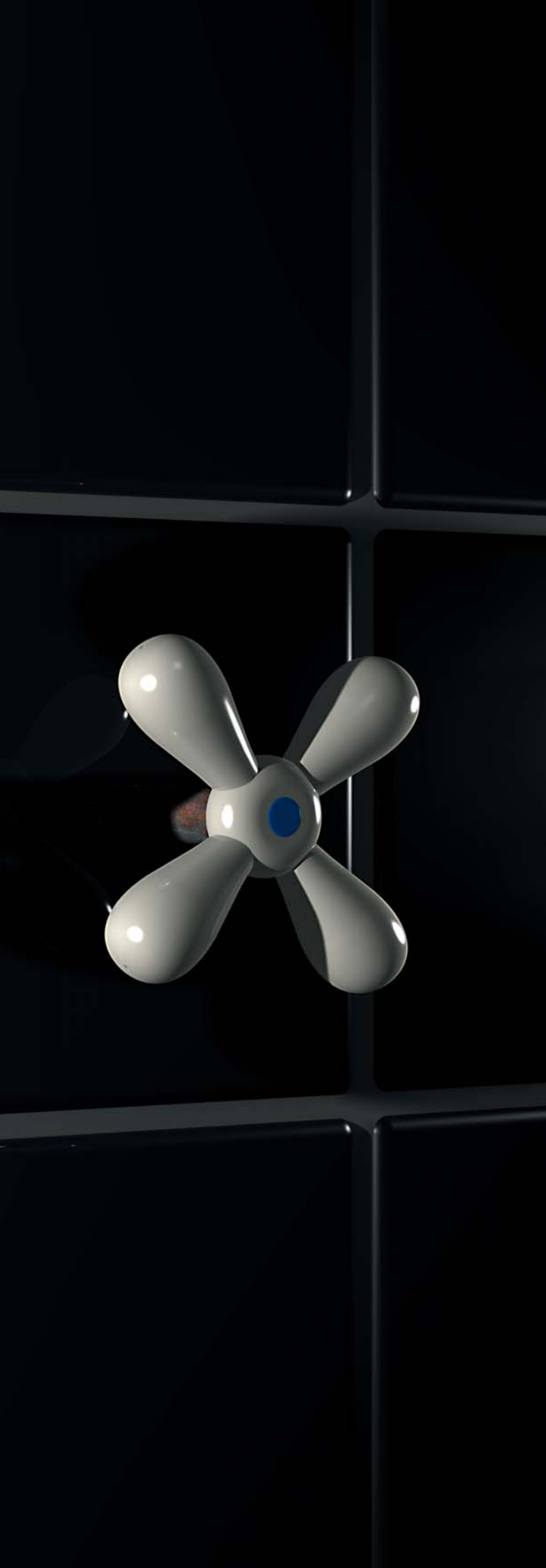


Abbildung: Alberto Parra del Riego/PTB

Theorie

Wer glaubt, dass eins und eins immer gleich zwei ist, der hat die Rechnung ohne die Temperatur gemacht. Zwar funktioniert bei den meisten physikalischen Größen diese elementare Mathematik. So muss derjenige, der nach fünf Minuten Wartezeit weitere fünf Minuten wartet, insgesamt zehn Minuten ausharren. Und an der Wursttheke führt ein „Ach, geben Sie bitte noch drei Scheiben dazu!“ zu einem entsprechend höheren Gewichtswert auf der Waage. Aber bei der Temperatur ist das anders. Schütte ich zwei gleich heiße Tassen Kaffee zusammen, ist die Temperatur im großen Kaffeepott nicht plötzlich doppelt so groß, sondern bleibt einfach unverändert. Und die Mischung von etwas Kaltem mit etwas Heißem gibt irgendeinen mittleren Wert und nicht die Summe aus Heiß und Kalt. Und das funktioniert auch dann noch, wenn wir das Kalte und das Heiße in ihren eigenen Gefäßen (vielleicht Tassen oder Reagenzgläser oder was auch immer) lassen, aber beide Gefäße ganz eng miteinander in Kontakt bringen. Die Temperaturen in den Gefäßen gleichen sich mit der Zeit immer mehr an. Wenn man diesen kleinen Versuch in der heimischen Küche macht und etwas länger wartet, dann werden die Flüssigkeiten in den Gefäßen sich irgendwann auf die Raumtemperatur „geeignet“ haben, denn die umgebende Luft ist ja sozusagen das dritte Gefäß und der größte Mitspieler, der das Rennen immer gewinnt. Genau diese Eigenschaft der Dinge ist in dem Begriff der „Temperatur“ abgebildet. In gewohnt schnoddriger Weise sagte es Richard Feynman in seinen Vorlesungen: „Das ist es eben, was wir mit gleicher Temperatur meinen – der endgültige Zustand, wenn die Dinge lange genug sich selbst überlassen werden und sich gegenseitig beeinflussen.“

JENS SIMON

Was ist Temperatur?

Eine Geschichte von vier nackten Männern
und einer Horde betrunkenen Seeleute



Foto: Benno Grifeshaber/VISUM. Abbildung (Hintergrund): Alberto Parra del Riego/PTB

Zum großen Glück funktioniert die Welt, auch ohne dass wir sie verstehen. Hier sind jetzt gar nicht einmal die hohe Politik weiser Kabinettsentscheidungen, das wundersame Börsengeschehen wild zuckender Aktienkurven oder die gelegentlich aufblitzende Spielstärke der Fußballnationalmannschaft gemeint. Nein, so schwierig und verwoben müssen die Dinge gar nicht sein, um einem das eigene Unwissen und die fehlende Einsicht in die tieferen Zusammenhänge zu demonstrieren. In den meisten Fällen genügt ein klitzekleiner Begriff, um uns an den Rand der Ratlosigkeit zu führen. Dies zumindest dann, sobald wir anfangen, über den Begriff und seine Bedeutung nachzudenken. Aus der großen Begriffsurne haben wir heute – ohne Zurücklegen – die „Temperatur“ gezogen. Auf den ersten Blick: ein Allerweltsbegriff. Schließlich haben wir ein gutes Gefühl dafür, wann uns die Außentemperatur eher zu Pullover oder T-Shirt greifen lässt, ob die Suppe jetzt doch noch zu heiß ist, um sie auszulöffeln, oder wann es hinter der fiebrigen Stirn auf die 40 zugeht. Aber bei all dem zeigt sich die Temperatur nur wie ein Model auf einer Modenschau: in immer neuen, mal mehr, mal weniger Kleidern. Dabei würden wir einmal gerne unter den Stoff gucken, einmal nackte Haut sehen. Und wo ließe sich das besser als in der Sauna. Also: Schnappen wir uns die Handtücher und rein in die Hitze!

Donnerstag, 20 Uhr 30. Irgendwo in Deutschland. Vier nackte Männer – nennen wir sie Otto, Helge, Rolf und Jens – betreten den Raum. Er misst zwei mal zwei mal zwei Meter, ist also eher ein Würfel und allseitig mit Holz

ausgekleidet. In einer Ecke steht ein Ofen, der schon seit gut zwei Stunden vor sich hinheizt. „Ah, lasst uns schwitzen, Männer!“ sagt Helge, findet seinen angestammten Platz in der oberen Sitzetage und prüft das Thermometer

an der Wand in Augenhöhe, das sich auf runde 95 Grad hochgeschraubt hat. „Schon ganz angenehme Temperatur, darf ruhig noch etwas mehr werden“, sagt Helge, erntet damit zustimmendes, zweifaches Kopfnicken und ein einfaches „Also, mir reicht das vollkommen“ von Jens, der es sich mittlerweile auf der unteren Holzbank bequem gemacht hat und der – wie es die Arbeitsteilung in der Gruppe vorsieht – die Sanduhr umdreht.

Im Inneren des Thermometers spürt derweil ein gewickelter Metallstreifen (aus zwei verschiedenen Metallsorten), welche Temperaturverhältnisse herrschen, dehnt sich, da es weiterhin wärmer wird, langsam aus und bewegt so einen Zeiger, der sich daraufhin gemächlich dem nächsten Strich auf der Celsius-Skala annähert. Gleich wird das Thermometer eine Temperatur von 96 °C anzeigen. Ist Temperatur also das, was man auf dem Thermometer ablesen kann? Eine solche Definition für die Temperatur wäre sehr einfach, sehr direkt und durchaus praktikabel (eine ähnliche Definition soll Einstein einmal für die Zeit vorgeschlagen haben: Zeit ist das, was man auf der Uhr ablesen kann). Aber bei der Temperatur haben wir die Chance, nicht ganz so bescheiden zu sein. Hier können wir durchaus hinter den Vorhang des Phänomens schauen. Mal sehen, was den Männern in der Sauna noch so einfällt.

Wenn Männer in kleiner Gruppe zusammenhocken, so wie hier, geht es zunächst einmal um das Wesentliche ... und Stille breitet sich in der Holzbox aus. Nur das leise Knistern des Elektro-Ofens ist zu hören. Doch nach einer kleinen Weile, in der der Kreislauf langsam begriffen hat, in welcher lebensfeindlicher Umgebung er sich hier aufhält, und die Schweißproduktion des Körpers auf Hochtouren geschaltet hat, fangen die Gedanken langsam wieder an alltäglich zu werden. Als Erster unterbricht Otto die Stille: „Eingepackt in diese Hitze kann man einmal den ganzen Alltag da draußen völlig vergessen, nicht wahr?“

Doch dieses Stichwort „vergessen“ hätte er vielleicht lieber nicht geben sollen, denn wie ein hungriger Fisch nach dem Köder schnappt plötzlich Jens zu: „Wisst ihr eigentlich, dass das große Vergessen um uns herum allgegenwärtig ist?“ Etwas verwirrt schauen sich die Männer an und nur der gelernte Philosoph und praktizierende Computer- und Softwarespezialist in der Runde, Rolf, weiß zu erwidern, dass ohne das Vergessen ja alle Speicher volllaufen würden und ein Datenstau im System zwangsläufig die verheerende Folge wäre. Aber bei dieser Bemerkung hat er die Rechnung ohne den Physiker gemacht, der sich so leicht nicht vom Thema abbringen lässt. „Nein, nein, nicht so tiefsinnig, ich bin ganz woanders“, sagt Jens. „Ich bin bei den Luftmolekülen, die hier im Wahnsinnstempo durch den Raum flitzen und sich alle naselang anrampeln und gegenseitig aus der Bahn werfen. Ein heilloses Chaos, das die ganze Verantwortung dafür trägt, dass wir hier überhaupt so etwas wie Temperatur haben.“

Die Luftmoleküle in dieser Holzkiste sind jetzt – bei nahezu 100 °C – tatsächlich ganz schön hektisch. Die meisten von ihnen haben ein beachtliches Tempo von rund 2000 km/h, also ein Vielfaches der Schallgeschwindigkeit (manche sogar deutlich mehr, allerdings auch manche deutlich weniger), können das aber nur ganz kurz „ausfahren“, denn nach kleiner Flugzeit, in der sie auch nur eine kleine Strecke zurückgelegt haben, stellt sich ihnen ein anderes Luftteilchen (höchstwahrscheinlich ein Stickstoff- oder ein Sauerstoffmolekül, denn hieraus besteht die Luft fast vollständig) in den Weg. Der Teilchencrash ist hier das Normalste der Welt.

„Warum macht, wie soll ich sagen, das Chaos die Temperatur und was hat das mit dem Vergessen zu tun?“, will nun Otto wissen und gibt Jens damit die Steilvorlage, endlich mit der Geschichte von den betrunkenen Seeleuten herauszurücken.

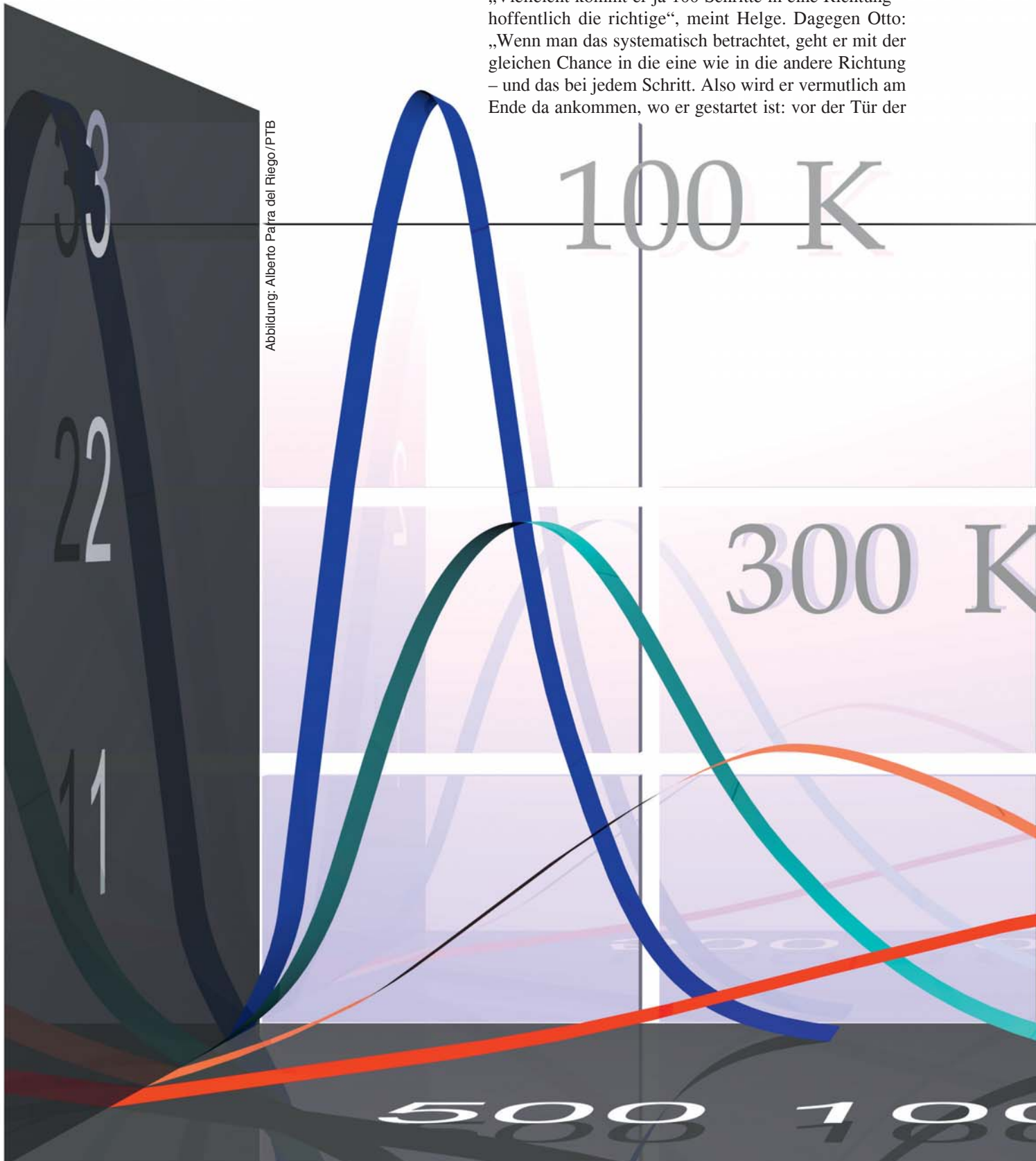
„Bei Physikern kann das ja schon einmal vorkommen, dass sie aus den abwegigsten Geschichten etwas lernen. Ihr wisst ja, da sperren sie Katzen in Holzboxen, telefonieren Ewigkeiten mit Alice und Bob, lassen Affen auf Schreibmaschinen einhämmern und dergleichen mehr – irgendwie gehören solche Dinge zum Physikerimage. Und in diese Rubrik gehören nun auch die Seeleute. Nehmen wir aber zunächst nur einen Seemann, dafür einen schwer betrunkenen. Der kommt gerade aus der Hafenkneipe, steht auf der Straße, rechts eine enge Häuserzeile, links eine enge Häuserzeile, und will nach Hause. Richtung natürlich komplett vergessen. Schlimmer noch: Nach jedem Schritt weiß er nicht mehr, woher er gekommen ist. Von links, von rechts? Da er auch „schweren Seegang“ hat, gelegentliche Pirouetten einlegt, hat er es mit „links“ und „rechts“, also einen Schritt vor oder einen Schritt zurück, ohnehin nicht leicht. Also, was meint ihr: Wie weit ist dieser arme Kerl wohl nach, sagen wir, 100 Schritten gekommen?“



Wie viele Luftmoleküle – in diesem Fall Sauerstoff O_2 – sausen mit welcher Geschwindigkeit durch den Raum? Genau das beantworten diese Verteilungskurven für verschiedene Raumtemperaturen (die Zahlenangaben an der Achse sind Promillewerte). Physiker nennen dies die Maxwell-Boltzmann-Verteilung.

An dieser Stelle setzt eine kleine Diskussion in unserer Männerrunde darüber ein, ob ein echter Mann nicht immer (!) seinen Weg nach Hause findet und diese Seemanns-Geschichte nicht an den Haaren herbeigezogen ist. Aber nach dem Einwurf von Jens: „Leute, klammert euch nicht an Details“, nehmen sich alle wieder des vergesslichen Seemanns an und wenden die Möglichkeiten hin und her. „Vielleicht kommt er ja 100 Schritte in eine Richtung – hoffentlich die richtige“, meint Helge. Dagegen Otto: „Wenn man das systematisch betrachtet, geht er mit der gleichen Chance in die eine wie in die andere Richtung – und das bei jedem Schritt. Also wird er vermutlich am Ende da ankommen, wo er gestartet ist: vor der Tür der

Abbildung: Alberto Patra del Riego/PTB



Hafenkneipe.“ Und das gibt dem Physiker in der Runde die Möglichkeit weiter zu erzählen:

„Möglich ist für den einen Seemann alles, aber nicht alles ist gleich wahrscheinlich. Wir müssten jetzt also versuchen, die Wahrscheinlichkeiten für alle möglichen Standorte des Seemanns herauszubekommen. Aber dafür reicht ein Seemann allein nicht mehr aus. Da müssen wir schon einen großen Feldversuch mit einer ganzen Horde von Seeleuten machen – und natürlich müssen alle gleich stark betrunken sein. Die lassen wir dann, jeden vor seiner Kneipe, loslaufen, schauen, was passiert, und notieren für jeden Einzelnen das Ergebnis. Wenn wir die Ergebnisse dann alle übereinander legen, haben wir unsere Frage „Wie weit kommt der Seemann?“ wirklich beantwortet.“

Wenn man diesen Versuch tatsächlich durchführt – vielleicht nicht mit Seeleuten, sondern mathematisch mit Stift und Zettel – kommt eine Verteilungsfunktion heraus: Der größte Balken (also die meisten Treffer) hat dann tatsächlich der Ort „Hafenkneipe“, also der Ort Null. Unser Seemann ist keinen Schritt weit gekommen. Links und rechts davon (also immerhin einen Schritt in der Summe geschafft) sind dann zwei etwas kleinere Balken. Links und rechts von diesen noch etwas kleinere Balken und so weiter – eine symmetrische Verteilung (Mathematiker nennen dies die Binomialverteilung) mit dem Zentrum bei Null. Wenn man dann noch „gute Statistik“ macht, also ganz viele Seeleute loslaufen und sie ganz viele Schritte machen lässt, dann rutschen die Balken in der graphischen Darstellung (damit sie überhaupt auf das Papier passen) ganz eng zusammen und die Verteilung sieht wie eine Glocke aus – wir haben die Gauß'sche Normalverteilung gefunden.

Nach dieser Geschichte ist in der Sauna wieder eine Weile Ruhe eingekehrt, sei es, dass so viele Seeleute den

kleinen Raum gedanklich bevölkern, sei es, dass unsere vier Saunagänger eine kurze Atempause einlegen. Das Thermometer hat mittlerweile die 98 °C erreicht. Der Ofen hat aufgehört zu knistern. Irgendwann wird jedoch Rolf unruhig: „Seeleute hin und her. Ich dachte, deine Geschichte sollte uns was zur Temperatur erklären. Wie kriegst du denn da jetzt die Kurve?“

„Bei diesen physikalischen Anekdoten muss man freilich immer ein wenig abstrahieren, um auf den gemeinten Kern zu kommen. Der Transfer auf die Wirklichkeit geht jetzt so, dass die Luftmoleküle hier im Raum unsere Seeleute sind. Freilich ganz viele Seeleute, schließlich fliegen hier rund 10 hoch irgendwas Moleküle herum. Und so wie die Seeleute bei keinem Schritt wissen, was sie vorher gemacht haben, sind auch die Moleküle bei jedem Stoß mit einem ihrer „Artgenossen“ wie neu, sie haben komplett „vergessen“, wie der vorherige Stoß aussah. Die Vergangenheit hat keine Auswirkungen auf die Zukunft. Und dann kann man mit den Luftmolekülen eine ganz ähnliche Statistik machen wie mit den Seeleuten. Ein paar Komplikationen müssen wir freilich noch einführen – etwa die Bewegung im Raum und nicht auf einer Linie. Und dann interessiert uns weniger der Ort der Luftmoleküle, sondern vielmehr ihre Geschwindigkeit. Aber wenn wir uns davon nicht beirren lassen, steckt hier in unserer Sauna ganz schön viel Seemannsgarn.“

Wenn man ein Zufallsexperiment, wie das mit den Seeleuten, nur in einer Dimension (also auf einer Linie) ablaufen lässt, kommt nach ein paar Verfeinerungen die Gauß'sche Glockenkurve als Normalverteilung heraus. Natürlich könnte man das Experiment mit den Seeleuten auch auf einer Fläche (auf einem Schachbrett) ablaufen lassen. Die Normalverteilung, die die Frage „Wie weit kommt der Seemann?“ beantwortet, sieht dann ein wenig anders aus. Der wahrscheinlichste Abstand vom Startpunkt, den unser Seemann zustande bringt, wird nicht mehr Null sein wie bei einer Dimension. Eine gewisse Wegstrecke (allerdings ist unklar, in welche Himmelsrichtung) wird er schaffen. Dies einfach deswegen, weil es viel mehr Wegzusammen-

In der Tendenz nimmt die Geschwindigkeit der Moleküle (hier aufgetragen in der Einheit Meter durch Sekunde) mit wachsender Temperatur zu. Bei Zimmertemperatur (300 Kelvin) ist es am wahrscheinlichsten, Moleküle mit rund 400 m/s anzutreffen.

setzungen (zusammengesetzt aus einzelnen Schritten) gibt, die zu Orten jenseits des Startpunktes führen. Bei einer vorgegebenen Maximalzahl von Schritten gilt das Argument übrigens auch für die maximale Entfernung, die ja nur erreicht wird, wenn der Seemann streng geradeaus läuft. Auch das Experiment in drei Dimensionen verläuft ganz ähnlich. Das Resultat ist eine nicht mehr symmetrische Normalverteilung, die bei Null beginnt, ein Stück jenseits des Startpunktes ein Maximum aufweist und dann wieder auf Null abfällt. Und die Geschwindigkeiten der Teilchen in einem Gas sortieren sich nun genau in diese dreidimensionale Normalverteilung ein.

Der Sand in der Uhr hat inzwischen fast die 10-Minuten-Marke erreicht. Die Saunabrüder schwitzen mehr als halb erschöpft vor sich hin und der eine oder andere wirft schon einmal – ob angesichts der herrschenden Temperatur oder angesichts des mathematischen Exkurses, ist ungewiss – einen verstohlenen Blick auf den rieselnden Sand. „Männer“, wagt sich Jens doch noch einmal vor, „wir können die Seeleute nicht einfach so im Raum stehen lassen, wir müssen die Geschichte schon noch zu Ende bringen.“ „Okay“, sagt Helge, „aber bitte ohne Mathematik, sonst krieg’ ich ganz schlechte Erinnerungen.“

Wer die Verteilungsfunktion hat, der hat nahezu alles, steckt doch in der Kurve das gesamte Wissen, das man – in diesem Fall über die Geschwindigkeiten der Moleküle in einem Gas – besitzen kann. Jetzt braucht man nur noch auf die Kurve zu schauen und kann ablesen, wie viele Moleküle mit welcher Geschwindigkeit unterwegs sind. Ganz rechts, wo die Kurve schon arg auf Null fällt, da sitzen die ganz wenigen, ganz schnellen Moleküle. Die meisten Moleküle tummeln sich dagegen rund um „die Mitte“, also ungefähr da, wo die Kurve ihr Maximum hat. („Helge“, schaltet sich Jens ein, „hör mal kurz weg.“) Mathematisch feinsinnig lässt sich jetzt die Mitte auch noch aufteilen. Die Geschwindigkeit, bei der die Kurve ihre Spitze hat, ist die wahrscheinlichste Geschwindigkeit, weil ja mit diesem Tempo die meisten Moleküle herumfliegen. Die mittlere Geschwindigkeit dagegen ist etwas größer als die wahrscheinlichste Geschwindigkeit. (Beide Geschwindigkeiten wären nur bei einer symmetrischen Verteilungskurve identisch.) Und dann gibt es auch noch („Helge, stark bleiben!“) die Wurzel aus dem mittleren Geschwindigkeitsquadrat, die größte dieser drei Geschwindigkeiten. Und auf das Geschwindigkeitsquadrat kommt es nun bei der Temperatur gerade an. Denn die Temperatur will kein Maß sein für die Geschwindigkeit der Moleküle, sondern für deren Energie, genauer: für die mittlere Bewegungsenergie. Und diese Energie hängt nun einmal quadratisch von der Geschwindigkeit ab.

„Seht ihr, Männer, so kommt man mit ein wenig Statistik diesem großen Begriff Temperatur auf die Spur“, sagt Jens. „Alles steckt im Wimmeln der Atome und Moleküle. Die Bewegung des ganzen Raumes ist dabei unerheblich. Wenn die Erde aufhören würde zu rotieren, stürte das die Temperatur in unserer Sauna überhaupt nicht. Wenn aber das Wimmeln schwächer wird, dann fällt die Temperatur.“

Die „richtige“ Temperaturskala ist aus diesem Grund eine, die keine negativen Werte kennt, die Kelvin-Skala. Sie startet einfach am absoluten Nullpunkt, bei dem jede atomare Bewegung eingefroren ist. Weniger als Stillstand geht halt nicht.

„Also, ich finde, du hättest uns vorwarnen können“, mault Helge von oben. „Zuerst lockst du uns mit Seeleuten, was ja vielleicht ganz amüsant ist, und schreckst uns dann doch mit – wie heißen die Dinger? – Verteilungsfunktionen, Wurzeln und Quadraten ab.“ Angesichts dieser völlig korrekten Situationsbeschreibung dauert es ungefähr ein paar hundert rieselnde Sandkörner, bis Jens etwas erwidern kann. Aber schließlich fällt ihm auch nicht mehr ein, als etwas von der Mathematik als der Sprache der Physik zu murmeln und dass der, der dem Begriff auf den Grund gehen will, zuweilen diese Sprache nicht vermeiden kann. „Außerdem könnt ihr noch ganz froh sein, Männer“, versucht Jens noch einen letzten Punkt zu landen. „Die Seemannsgeschichte ist ja schon eine Vereinfachung, schließlich sind Seeleute ja eindeutig Individuen, mit ganz eigener Statur, eigenem Namen. In Wirklichkeit dagegen müsste man die Temperatur mit einer Horde geklonter Seeleute, alle völlig ununterscheidbar, erzählen und die Geschichte mit Quantenmechanik aufpeppen, um ...“. Aber da greift Helge zum letzten Mittel: dem Aufguss. Und Jens verstummt angesichts der Hitze, die ihm da um die Ohren fegt.

Die Luftmoleküle kümmern sich um diesen kleinen Disput freilich nicht. Sie machen das, was sie immer tun: sich ungebremst anrempeln. Ein Stickstoffmolekül, das ganz schön flott unterwegs war, hatte, nachdem es millionenfach mit Seinesgleichen kollidiert ist, gerade „Kontakt“ mit einem dieser gewichtigen CO₂-Moleküle und dann kam auch noch gleich ein seltenes und edles Argon-Atom daher und schon ist es ausgebremst auf vielleicht zügiges Autobahntempo. Kaum einen Millimeter weiter ging es für ein Sauerstoffmolekül, das eher gemütlich unterwegs war, geradewegs in die andere Richtung: Von hinten kamen zwei rasende Spurengasatome und katapultierten das Sauerstoffmolekül in einen wahren Geschwindigkeitsrausch. Aber: Was immer auch den Individuen in diesem großen Crash-Massenversuch geschieht, im Ganzen bleibt das System davon unberührt – die Statistik der Verteilungsfunktion ändert sich nicht.

Das Thermometer hat sich nun auf 98 °C fest eingependelt. In der 15-Minuten-Uhr rieseln die letzten Sandkörner durch den engen Glashals. Die Köpfe signalisieren ihren Trägern langsam „Zur Flucht bereit machen!“ Man ist sich einig: Mit der Temperatur reicht es jetzt. Draußen wartet die Erlösung: kühle Luft, eiskaltes Wasser, mathematikfreie Zone. „Also Männer, lasst uns rausgehen – da fliegen die Moleküle langsamer!“ Donnerstag, 20 Uhr 45. Irgendwo in Deutschland. Vier nackte Männer verlassen den Raum. ■

JENS SIMON

Kirchhoffs schwarzer Kasten

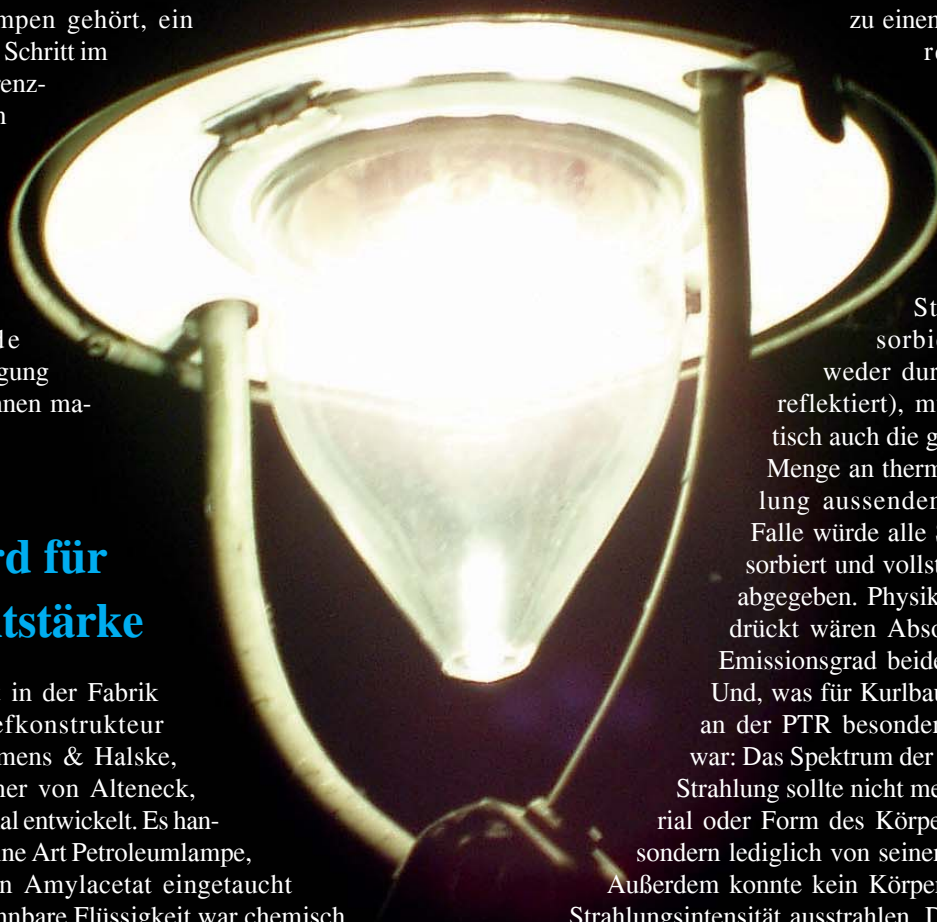
Als im April des Jahres 1885 im Lesesaal der Königlich-Preußischen Akademie der Wissenschaften zu Berlin das Licht angeht, sind nicht nur der Kronprinz und die anwesenden Würdenträger zufrieden. Auch Werner von Siemens sonnt sich in dem Erfolg seines Demonstrationsversuches, schließlich geht es ihm um nichts weniger, als die Vorteile des elektrischen Lichts gegenüber den bis dato üblichen Gaslampen zu zeigen. Mit diesem Versuch, der ganz ähnlich auch in einem Operationsaal der Universität, in der Maschinensammlung der Technischen Hochschule und im Aktsaal der Kunstakademie stattfindet, gelingt Siemens, der im Deutschen Reich zu den führenden Produzenten von elektrischen Kohlefadenlampen gehört, ein entscheidender Schritt im harten Konkurrenzkampf mit den Herstellern der bereits etablierten Gaslampen. Gas oder Strom? Welche Methode der Lichterzeugung würde das Rennen machen?

Standard für die Lichtstärke

Für die Arbeit in der Fabrik hatte der Chefkonstrukteur der Firma Siemens & Halske, Friedrich Hefner von Alteneck, ein Licht-Normal entwickelt. Es handelte sich um eine Art Petroleumlampe, deren Docht in Amylacetat eingetaucht war. Diese brennbare Flüssigkeit war chemisch sehr rein herstellbar, so dass die „Hefner-Kerze“ eine relativ stabile Referenzquelle war. Doch Siemens genügte das nicht. Da es auch keine einheitlichen Standards für Strom und Spannung gab und das den Verkauf seiner elektrotechnischen Geräte ins Ausland erschwerte, drang er weiter auf die Gründung einer staatlichen Stelle, die als Galshüter der physikalischen Einheiten fungieren sollte. Für dieses Projekt stiftete er ein fast 20 000 Quadratmeter großes Gelände in Charlottenburg, vor den Toren Berlins, auf dem die Gebäude der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt (PTR) errichtet wurden. Sein Freund, der Physiker Hermann von Helmholtz, wurde ihr erster Präsident.

Foto: Nils Stahlhut

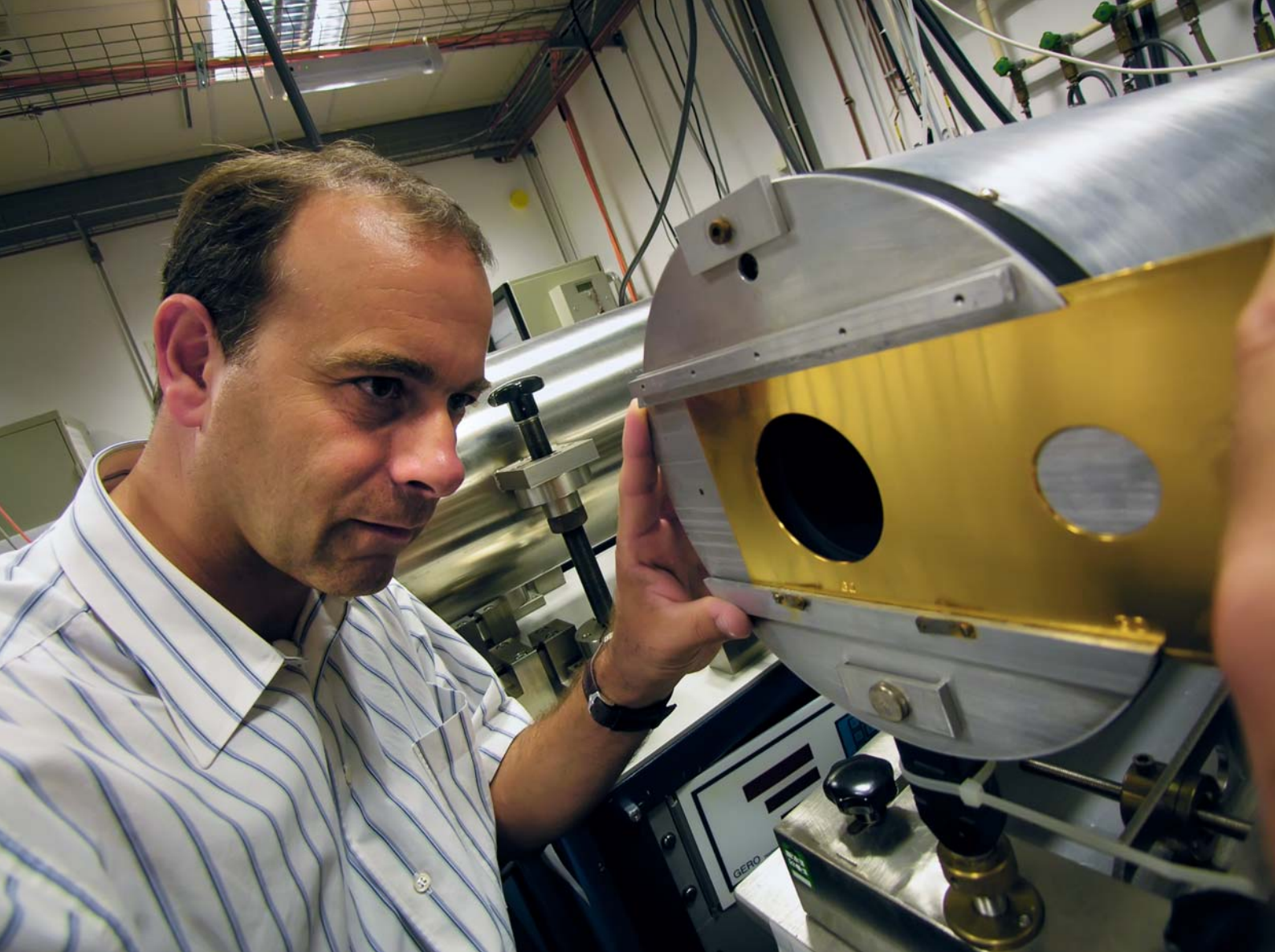
Zu den ersten Aufgaben der PTR bei ihrer Gründung im Jahr 1887 gehörte dementsprechend die Entwicklung eines Standards für die Lichtstärke. Die Wissenschaftler Willy Wien und Ferdinand Kurlbaum an der PTR griffen dabei auf eine Idee des Physikers Gustav Kirchhoff zurück, der sich bereits 1862 darüber Gedanken gemacht hatte, wie Gegenstände Licht und Wärme absorbieren und welchen Anteil davon sie wieder als thermische Strahlung an die Umgebung abgeben. Offenbar ist dies abhängig von den Eigenschaften des Materials: Beispielsweise heizen schwarze Oberflächen sich im Sommer schneller auf als weiße, weil sie die Sonnenstrahlung stark absorbieren, während weiße Flächen sie zu einem großen Teil reflektieren.



Kirchhoff überlegte, ein idealer Körper, der alle auftreffende Strahlung absorbiert (sie also weder durchlässt noch reflektiert), müsste theoretisch auch die größtmögliche Menge an thermischer Strahlung aussenden. Im besten Falle würde alle Strahlung absorbiert und vollständig wieder abgegeben. Physikalisch ausgedrückt wären Absorptions- und Emissionsgrad beide gleich eins. Und, was für Kurlbaum und Wien an der PTR besonders interessant war: Das Spektrum der ausgesandten Strahlung sollte nicht mehr von Material oder Form des Körpers abhängen, sondern lediglich von seiner Temperatur. Außerdem konnte kein Körper eine höhere Strahlungsintensität ausstrahlen. Damit war die Idee geboren, mit einem solchen „schwarzen Strahler“ einen Standard der Lichtstärke zu entwickeln.

Rätsel um schwarze Strahler

Kurlbaum und Wien realisierten schwarze Strahler, indem sie kugelförmige Hohlräume oder Röhren bauten, die von außen durch heiße Flüssigkeiten oder Gase auf die gewünschte Temperatur geheizt wurden. Die Strahlung, die, im Inneren des Hohlraums eingeschlossen, ein perfektes Gleichgewicht zwischen Emission und Absorption an



Hier sieht Jörg Hollandt wirklich schwarz. Denn der etwa einen Meter lange Zylinder mit seiner kleinen Öffnung an der Stirnseite ist einer von einem Dutzend nahezu perfekter schwarzer Strahler, mit denen die Wissenschaftler der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (der Nachfolgerin der PTR) Strahlungsthermometer kalibrieren. Die Temperatur im Zylinder, die zum Abgleich mit

den Strahlungsthermometern bekannt sein muss, wird mit Widerstandsthermometern aus Platin bestimmt. Im Gegensatz zu seinem Äußeren ist der innere Wandaufbau eines solchen Zylinders sehr komplex. Hier finden sich elektrische Heizungen, Kühlschlangen und spezielle Beschichtungen, um einen nahezu völlig schwarzen Hohlraum mit gleichmäßiger Temperaturverteilung zu erzeugen.

den Oberflächen erreichte, konnte durch ein kleines Loch austreten und außen gemessen werden. Willy Wien fand bald heraus, dass sich die Farbe des emittierten Lichts (genauer: des Lichtanteils mit der größten Intensität) mit der Temperatur ändert: je höher die Temperatur, umso kürzer die Wellenlänge. Im Alltag kann man dieses Phänomen, dass die Farbe die Temperatur verrät, ebenfalls beobachten: Eine heiße Herdplatte glüht dunkelrot, während viel heißeres, geschmolzenes Metall fast weiß leuchtet. Die Formel, mit der Wien die Abhängigkeit der gemessenen Größe, der spektralen Strahlendichte, von der Temperatur zu beschreiben versuchte, konnte die Daten für hohe Temperaturen und lange Wellenlängen jedoch nicht genau wiedergeben. Auch die Formel der englischen Physiker Lord Rayleigh und James Jeans hatte einen entscheidenden Fehler: Das nach ihnen benannte Rayleigh-Jeans-Gesetz sagte für tiefe Temperaturen und kurze Wellenlängen eine in der Praxis nicht auftretende unendlich hohe Strahlungsdichte vorher, die „Ultraviolettkatastrophe“.

Der Theoretiker Max Planck löste dieses Problem, indem er annahm, dass der Strahler seine Energie nur in kleinen Energiepaketen, so genannten Quanten, abgeben kann. Während Plancks Strahlungsgesetz den Auftakt zur Entwicklung eines neuen Gebiets der theoretischen Physik, der Quantentheorie, gab, nutzten die Physiker in der PTR den schwarzen Strahler zu einer präziseren Definition der Einheit für die Lichtstärke. Nach längeren Verhandlungen wurde 1948 die Candela als diejenige Lichtstärke definiert, die ein schwarzer Strahler bei der Schmelztemperatur des Platins aussendet. Dieser Standard blieb bis 1979 gültig.

Berührungslos messen

Die exakte Beschreibung des Zusammenhangs zwischen Strahlungsintensität und Temperatur durch das Planck'sche Strahlungsgesetz eröffnete für die praktische Verwendung des schwarzen Strahlers eine neue Möglichkeit,

die heute sehr verbreitet ist: das berührungslose Messen von Temperaturen mithilfe eines Strahlungsthermometers. Ein solches Thermometer schließt über die von einer Oberfläche abgegebene Strahlung auf die dazu gehörige Temperatur. Dieses Prinzip bewährt sich überall da, wo eine Temperaturmessung nur aus der Entfernung möglich ist: etwa bei einem Weltraumteleskop, das die Oberflächenstrahlung von Planeten misst, oder in der Lebensmitteltechnologie zur Überwachung der Temperatur von Gefriergut. Die Messung aus der Entfernung sorgt dafür, dass Lebensmittel nicht verunreinigt werden. Außerdem lässt sich die Temperatur viel schneller ermitteln als mit einem herkömmlichen Thermometer. Und so tauchen Strahlungsthermometer auch überall da auf, wo besser nichts berührt werden sollte. So in der metallverarbeitenden Industrie, in der die Schmelzen und Legierungen 1000 Grad Celsius und mehr erreichen, oder in der Lampenindustrie, die wissen muss, wie heiß der Glühfaden tatsächlich ist. Einerseits sind hohe Temperaturen erwünscht, da der Glühfaden umso heller leuchtet, je heißer der Draht ist. Andererseits darf das Material nicht zu stark erhitzt werden, weil es sonst zu schnell altert.

„Strahlungsthermometer und auch ihre Verwandten, die Wärmebildkameras, sind ein großer Wachstumsmarkt“, sagt Jürgen Hartmann von der Arbeitsgruppe Hochtemperaturskala der PTB. Nahezu alle deutschen Hersteller lassen ihre Werksnormale im Institut Berlin der PTB kalibrieren. Im Vergleich zu anderen nationalen Standardbüros gehört die PTB zu den wenigen, die den gesamten mit Strahlungsthermometern zugänglichen Temperaturbereich – zwischen -173 °C und 3250 °C – abdecken. Der Kalibriermessplatz der PTB umfasst zwei Tieftemperaturstrahler, vier Wärmerohrstrahler und zwei Graphit-Hochtemperaturstrahler, deren Strahlung einem idealen schwarzen Strahler so nahe kommt, wie es technisch möglich ist. So lässt sich die Kennlinie des zu kalibrierenden Strahlungsthermometers mit einer Unsicherheit von wenigen zehntel Grad Celsius der entsprechenden Temperatur zuordnen.

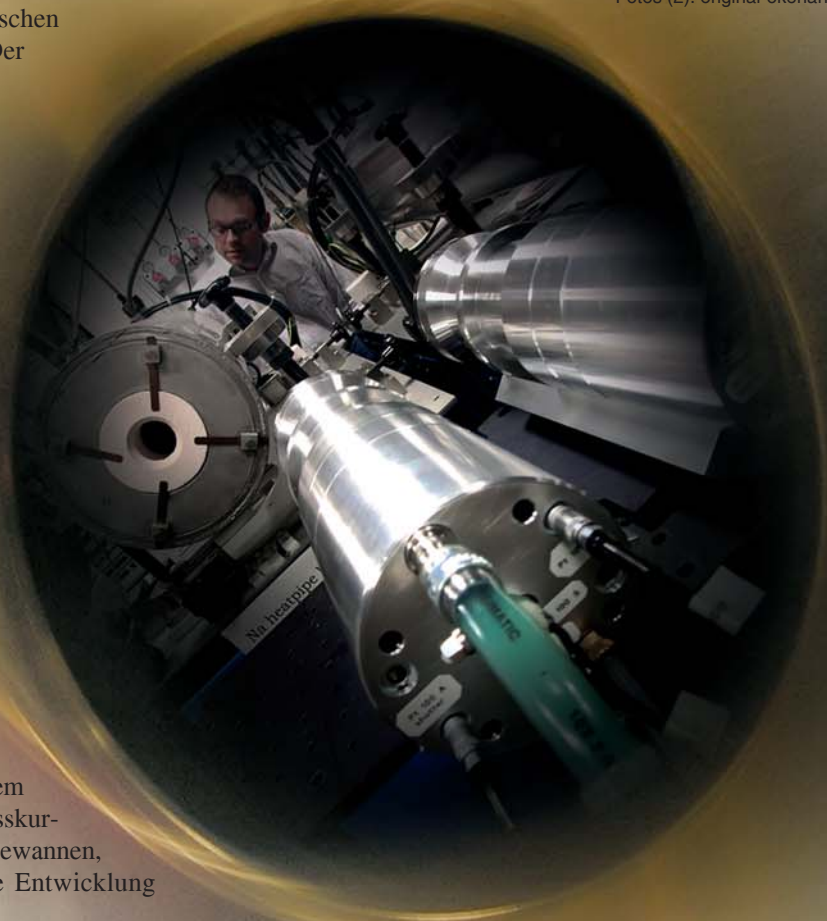
Die Geschichte des schwarzen Strahlers ist ein beeindruckendes Beispiel dafür, wie ein praktisches Problem – die Suche nach einem Standard für die Lichtstärke – zur Realisation eines theoretischen Konzepts, Kirchhoffs schwarzem Strahler, führt. Die sehr genauen Messkurven, die Wien und Kurlbaum damit gewannen, gaben wiederum den Impuls für die Entwicklung

der Quantentheorie. Und deren präzise Voraussagen über den Zusammenhang zwischen Strahlungsintensität und Temperatur bilden bis heute die Grundlage für die berührungslose Temperaturmessung mit Strahlungsthermometern. Wie gesagt, ein Wachstumsmarkt: Jährlich werden weltweit um die 600 000 Strahlungsthermometer und 15 000 Wärmebildkameras verkauft. ■

ANNE HARDY

Jeder schwarze Strahler in der PTB ist spezialisiert für einen Temperaturbereich oder für eine einzige exakte Temperatur. Entscheidend ist „die Füllung“ des Strahlers in seinem doppelwandigen inneren Zylinder. Die vier Wärme-Hohlraumstrahler etwa sind entweder mit Ammoniak, Wasser, Caesium oder Natrium befüllt und können Temperaturen zwischen -60 °C und 962 °C erzeugen. Der Ammoniak-Hohlraumstrahler (im Hintergrund: PTB-Mitarbeiter Klaus Anhalt) ist etwa für den Temperaturbereich von -60 °C bis 50 °C zuständig.

Fotos (2): original-okerland



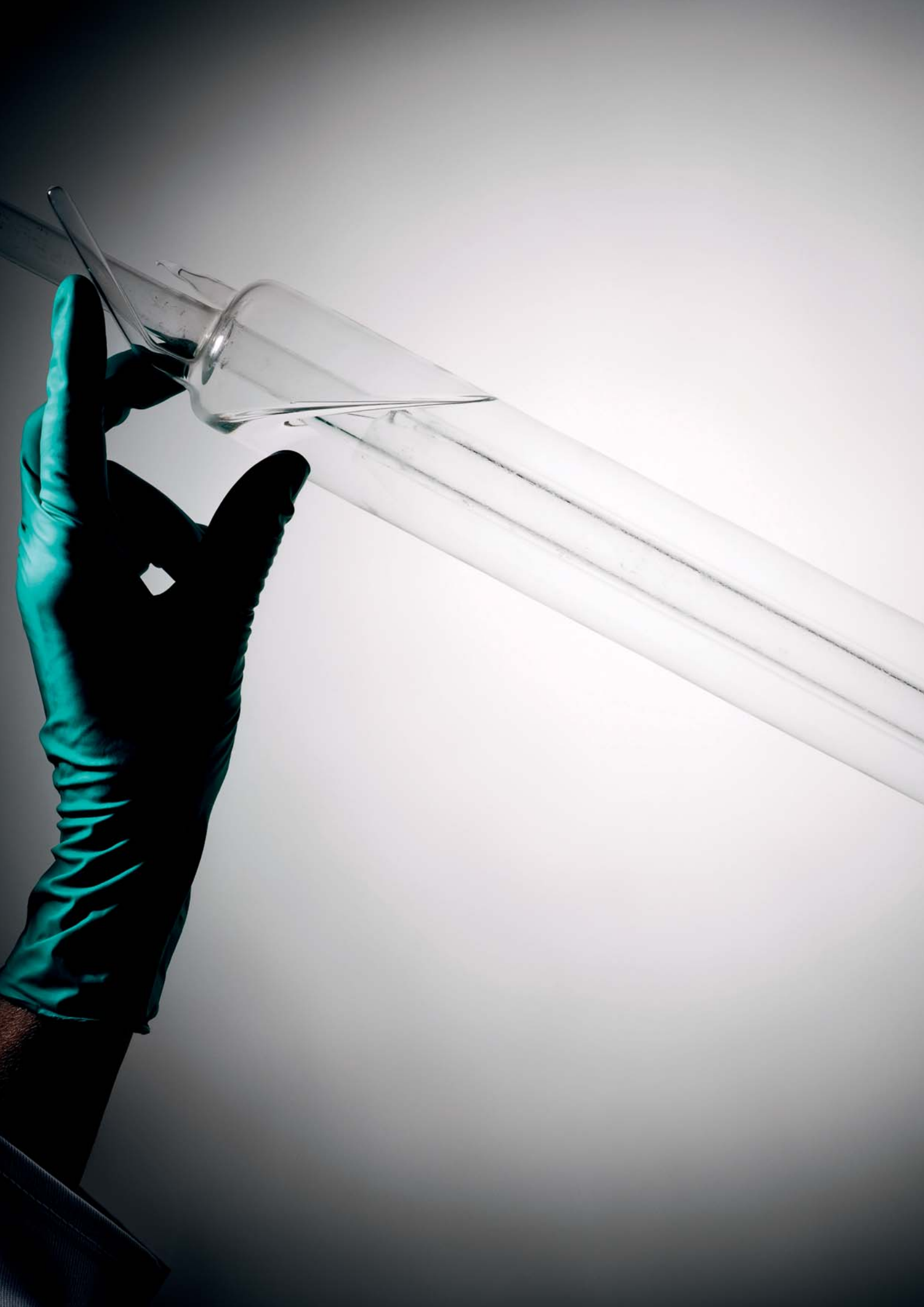




Foto: Marc Steinmetz/VISUM

Skala

Theoretische Physiker können es sich einfach machen. Zumindest gelegentlich können sie mit Papier und Bleistift, einigen Zahlenangaben und ein paar Zauberworten alles klären. Probieren Sie es aus und fragen Sie einen Theoretiker, ob er Ihnen eine Temperaturskala macht. Der Theoretiker holt vermutlich einen Zettel hervor, malt ein Achsenkreuz hin und schreibt an die horizontale Linie ein großes T für Temperatur. Dann markiert er mit zwei kleinen Strichen zwei Temperaturen auf dieser Linie, etwa beim Gefrier- und Siedepunkt von Wasser, also bei $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $100\text{ }^{\circ}\text{C}$. (Falls er nett ist, hat er Sie gefragt, welche Temperaturen Sie gerne hätten. Die Skala funktioniert nämlich mit zwei beliebigen Temperaturwünschen – und würde dann vielleicht Ihren Namen tragen.) „An die vertikale Achse“, so der Theoretiker, „schreiben wir jetzt eine Eigenschaft des idealen Gases. Eine Eigenschaft, die proportional zur Temperatur ist, also etwa Druck mal Volumen geteilt durch Teilchenzahl.“ (Haben Sie das Zauberwort gehört? Ideal.) Jetzt macht der Theoretiker irgendwo ein kleines Kreuzchen über der 0 und ein anderes, höher gelegenes über der 100, zieht aus dem Handgelenk eine Gerade durch diese beiden Kreuze und sagt: fertig! Wenn Sie jetzt verdutzt gucken, wird er vielleicht noch hinzufügen, dass Sie hier auch ganz wunderbar den absoluten Nullpunkt der Temperatur ablesen können – nämlich da, wo die Gerade die Temperaturachse schneidet – und dass Sie in Zukunft jedes ideale Gas als perfektes Thermometer benutzen können. Diese Theoretiker-Methode beschreibt – zumindest im Prinzip – genau das, was die Messkünstler tun, um einen Temperaturwert zu bekommen: Sie bedienen sich eines elementaren physikalischen Zusammenhangs, bei dem auf irgendeine Weise die Temperatur beteiligt ist, und können so Temperaturen absolut messen. (Die Messkünstler sprechen dann von Primärthermometern.) Da diese Messungen aber sehr schwierig und langwierig und also nicht für jedermann geeignet sind, hat man sich zusätzlich auf eine eher praktische Temperaturskala geeinigt. Diese wird von vielen Fixpunkten getragen (im Bild: eine Fixpunktzelle für den Tripelpunkt des Wassers) und arbeitet schlussendlich mit handfesten Thermometern. Wie gut, dass man die Temperatur dann nur noch abzulesen braucht.

JENS SIMON

Im Club der 17

Erfahren Sie, was die Reinheit von Metallen mit der Temperaturmessung zu tun hat und warum Wasser seit 1990 nicht beim gleichen Temperaturwert siedet wie zuvor. Vielleicht möchten Sie aber auch wissen, warum für einen Experten die Temperaturskala einer Gitarre unter lauter Cellos gleicht?



Alltag für Ute Noatsch im Labor für Angewandte Thermometrie in der PTB: In einem Ofen heizt sie eine Fixpunktzelle auf, lässt alles langsam abkühlen und nimmt die Temperaturkennlinie eines Widerstandsthermometers auf.


14 Uhr, einen Flug nach Berlin hinter sich, ein anspruchsvolles Gespräch vor sich: genau der richtige Zeitpunkt für eine Tasse Kaffee. Und eine gute Gelegenheit für Joachim Fischer, sofort zur Sache zu kommen: „Würden wir unseren Kaffee zusammenschütten, wäre er nicht doppelt so heiß wie zuvor. Legt man dagegen zu einem Ein-Kilo-Metallstück ein zweites, verdoppelt sich das Gewicht, das die Waage anzeigt“, sagt er. Dass sich die Temperatur nicht wie die anderen Größen des Einheitensystems additiv verhält, bestimmt das Arbeitsleben des Physikers Fischer und das seiner Mitarbeiter vom PTB-Fachbereich Temperatur. Denn dadurch ist der Weg von der Einheit Grad Celsius zur Temperaturskala nicht

so direkt wie etwa der von der Einheit Meter zu einem Maßstab. Den Unterschied versucht Fischer mit einem Vergleich zu verdeutlichen: „Bei einer gestimmten Gitarre muss man die Saiten nur auf den Stegen herunterdrücken, dann hat man den gewollten Ton – G, D und so weiter – hervorgerufen. Wenn man Cello spielt, muss man die Töne dagegen ohne feste Anhaltspunkte suchen.“ Offensichtlich sind die PTB-Physiker also Cellisten – schließlich können sie Temperaturen finden und bestimmen, ohne auf eine fertige Temperaturskala zurückzugreifen.

Wie man bestimmte Werte auf der Temperaturskala finden kann, zeigt der Besuch eines Raumes, der einem Sammler von Lautsprecherboxen und Tresoren gehören könnte. Tatsächlich handelt es sich um das Hauptlabor der Arbeitsgruppe Angewandte Thermometrie. Was auf den ersten Blick wie Boxen und Tresore aussieht, sind spezielle Kühlschränke und Öfen. Gekühlt oder geheizt werden darin Stoffe wie Quecksilber, Wasser, Gallium, Zink, Aluminium oder Silber – verpackt jeweils in säulenartigen Gefäßen. Schwer zu glauben, dass dieses unspektakuläre Labor am Anfang einer hierarchischen Kette von Vergleichsmessungen steht, an der letztlich alle deutschen Temperaturmessgeräte hängen. Am ehesten noch deuten auf einer Anzeige die großen, rot leuchtenden Ziffern, die gerade zwischen 0,99999897 und 0,99999530 schwanken, darauf hin, dass man sich in einem Hort der Präzision befindet.

Das Prinzip, nach dem hier beispielsweise 29,7646 Grad Celsius aufbewahrt werden: Man erwärmt langsam das feste Metall Gallium in seinem Gefäß, bis es beginnt, flüssig zu werden. Erwärmt man weiter, so wird immer mehr Gallium flüssig: Solange festes und flüssiges Metall – Fachleute sprechen von fester und flüssiger Phase – nebeneinander vorliegen, bleibt die Temperatur bei einem festen Wert stehen, denn das Gallium verwendet alle zugeführte Energie für die Phasenumwandlung. „Die Natur gibt vor, dass diese Phasenumwandlung immer bei der gleichen Temperatur stattfindet – das machen wir uns zunutze“, erläutert Fischer. Eine Einschränkung gibt es: Auch der herrschende Druck beeinflusst, wenngleich nur geringfügig, bei welcher Temperatur Gallium flüssig wird. Daher wurde vereinbart, die Messungen immer bei normalem Atmosphärendruck von 101,325 Kilopascal durchzuführen.

Ganz ähnlich werden unter anderem auch 419,527 °C sowie 660,323 °C und 961,78 °C gefunden: Bei diesen Temperaturen wandeln sich flüssiges Zink, Aluminium und Silber in ihre feste Phase um. Diese Werte heißen



Fixpunkte sind so etwas wie Markierungen auf der Temperaturskala. Experten nennen daher die säulenartigen Gefäße, in denen die Metalle erwärmt oder abgekühlt werden, Fixpunktzellen. Durch eine Öffnung in der Mitte der Säule lassen sich Thermometer einführen und letztlich auf die entsprechenden Werte kalibrieren.

Dieses Prinzip scheint so einfach zu sein, dass man sich fragt, warum sich nicht alle Thermometerhersteller oder entsprechende Dienstleister-Labore solche Fixpunktzellen verwenden. Eine der Antworten: Die Metalle müssen extrem rein sein, damit die Fixpunktzelle nicht einen geringfügig falschen Temperaturwert vorspiegelt. „Sie kennen den Effekt vom Salzstreuen im Winter: Verunreinigungen – in diesem Falle das Salz – können die Erstarrungstemperatur – in diesem Fall das Gefrieren des Wassers – deutlich heruntersetzen“, sagt Fischer. Daneben gibt es auch Verunreinigungen, die den Schmelzpunkt von Metallen erhöhen. Daher darf auf eine Million Metallatome in den PTB-Fixpunktzellen höchstens ein Atom eines anderen Stoffes kommen.

Erworben von entsprechenden Industrieunternehmen, werden die Metalle vor ihrem Einsatz genauestens auf Verunreinigungen untersucht. Fischer: „Einer unserer aktuellen Forschungsschwerpunkte ist es, die Verfahren zur Analyse von Fixpunktmetallen unter die Lupe zu nehmen. Gemeinsam mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung führen wir diese Verfahren auf die Basiseinheit der Stoffmenge zurück und ermitteln, wie fehlerhaft die gelieferten Angaben zum Gehalt an Fremdstoffen sind.“ Viel Know-how fließt auch in die Herstellung der säulenartigen Zellen, die das Verhalten des Metalls möglichst nicht beeinflussen dürfen.

Bei Temperaturen unterhalb von 25 Grad Celsius stößt das System der metallischen Fixpunkte an seine Grenzen: Außer Quecksilber werden elementare Metalle dann nicht mehr flüssig. Deshalb müssen andere Stoffe zum Einsatz kommen, darunter das Wasser. Allerdings ist der Wert der Schmelztemperatur oder der Erstarrungstemperatur bei Wasser und Quecksilber schon vergleichsweise stark vom herrschenden Druck abhängig. Eine ungenaue Einstellung des Drucks könnte daher bei der Temperaturmessung zu kleinen Abweichungen von einigen hundertstel Grad führen.

Abhilfe bietet wieder einmal die Natur. Wasser beispielsweise kann nicht nur wie am Schmelzpunkt als Eis und als Flüssigkeit vorliegen, sondern sogar auch als Eis, Flüssigkeit und Dampf zugleich. Wer sagt, er hat trotz der Allgegenwart von Wasser dieses Phänomen noch nie beobachtet, hat recht: Denn es existiert nur – und wirklich nur – bei einem Druck, der mit rund 612 Pascal weit unter dem üblichen Luftdruck unserer Atmosphäre liegt, und bei einer Temperatur von 0,01 Grad Celsius oder 273,16 Kelvin. Experimentell lässt sich dieser so genannte Tripelpunkt (Dreiphasenpunkt) des Wassers erreichen, indem man eine Fixpunktzelle zu mehr als zwei Dritteln mit Wasser befüllt, die Luft darin mit Hilfe einer Vakuumpumpe vollständig entfernt und anschließend die Zelle verschließt. Bei Raumtemperatur befinden sich dann flüssiges Wasser und Dampf in der Zelle. Beim Abkühlen bildet sich als dritte Phase zusätzlich Eis.

Die Tripelpunkte verschiedener Materialien sind für die Temperaturlöhner der PTB ideal geeignet, um auf der Skala beispielsweise minus 259,3467 °C (Wasserstoff) und minus 218,7916 °C (Sauerstoff) aufzuspüren. Denn sobald alle drei Phasen des jeweiligen Stoffes gleichzeitig vorliegen, räumt die Natur Druck und Temperatur keine

Gut, dass es auf der langen Temperaturskala festgelegte Etappenziele gibt, die für Orientierung sorgen. Ob der Tripelpunkt des Sauerstoffs, der Schmelzpunkt des Galliums oder der Erstarrungspunkt des Goldes – solche thermodynamischen Gleichgewichtszustände von reinen Substanzen dienen als eindeutige Markierungen auf der Skala. Insgesamt arbeiten die Temperaturexperten mit 17 solcher „Fixpunkte“, die ihnen die Messung von Temperaturen im Labor erleichtern.

Fotos (2): original-okerland

Freiheiten mehr ein. Unter den siebzehn Fixpunkten, die die Markierungen auf der Temperaturskala bilden, sind sechs Tripelpunkte.

Naturegeben und ewig gültig ist die resultierende Skala trotz allem keineswegs. „Das Internationale Komitee für Maß und Gewicht – und damit der Mensch – hat den Fixpunkten 1989 die derzeit gültigen Temperaturwerte zugewiesen und die ITS-90 (Internationale Temperaturskala von 1990) verabschiedet. Im Mai habe ich in Paris an einer Sitzung des beratenden Komitees für Thermometrie teilgenommen, um über eine eventuelle neue Temperaturskala zu sprechen“, berichtet Fischer. Tatsächlich überprüfen die Metrologie-Experten gerade wieder einmal, ob sie den Fixpunkten die exakt „richtigen“ Zahlenwerte zugeordnet haben. Dazu setzen sie so genannte Primärthermometer ein, mit denen sie die Temperatur messen können, ohne dass sie sich dabei auf einen anderen Temperaturwert beziehen müssen. Ausgenutzt wird jeweils ein physikalisches Gesetz, über das eine elektrische oder mechanische Messgröße mit der Temperatur verknüpft ist, wobei alle anderen Größen im Gesetz entweder Naturkonstanten sind oder unabhängig messbar. Solche Primärthermometer sind jedoch aufwendig und teuer zu bauen und zu betreiben, so dass ihr Einsatz selbst für nationale Metrologieinstitute im Alltag unsinnig ist. Ein ganzes Labor nimmt etwa allein die komplizierte Anlage ein, mit der die PTB seinerzeit zur Vorbereitung der ITS-90 die Wärmestrahlung erstarrenden Goldes und damit den Temperaturwert für den Gold-Fixpunkt bestimmt hat.

Der technologische Fortschritt ermöglicht es, immer bessere Primärthermometer zu konstruieren. „Wir wissen heute, dass man bei der ITS-90 in manchen Temperaturbereichen um bis zu 50 tausendstel Grad daneben liegt. Trotzdem ist es noch zu früh, eine neue Temperaturskala aufzustellen“, ist Fischer nach seinen Gesprächen in Paris überzeugt. Vorsicht ist angebracht, hat man doch 1989

beispielsweise die 100 °C-Markierung der Vorgängerskala – den Siedepunkt des Wassers – um 0,026 Grad und damit zu weit verschoben: Der Wert wurde „überkorrigiert“, wie Fischer sagt.

Eine Skala besteht nicht alleine aus Fixpunkten. Wie die Temperaturwerte dazwischen mit Hilfe so genannter Interpolationsinstrumente bestimmt werden, haben die Macher der ITS-90 ebenfalls festgelegt. Zwischen minus 259 und plus 962 Grad Celsius kommen zum Beispiel an den Fixpunktzellen abgegliche Platinthermometer zum Einsatz, bei denen sich der elektrische Widerstand mit der Temperatur ändert.

Die Hersteller von Tiefsttemperaturkühlgeräten und Wissenschaftler, die mit grundlegenden Experimenten etwa die Supraleitung von Stoffen erforschen, haben mit der ITS-90 ein Problem: Sie reicht nur bis zu 0,65 Grad über dem absoluten Nullpunkt (0,65 Kelvin) hinunter, also bis minus 272,5 Grad Celsius. Doch seit dem Jahr 2000 gibt es noch eine Skala, die PLTS-2000, für Temperaturen von 0,9 tausendstel Kelvin bis zu einem Kelvin. Als „Übergangslösung“ – PLTS steht für „Provisional Low Temperature Scale“ – eingestuft ist sie, weil die zugrunde liegenden Messergebnisse dreier Institutionen – darunter die PTB – am unteren Ende voneinander abwichen. Die PLTS-2000 beruht auf dem Phasengleichgewicht zwischen der flüssigen und festen Phase einer bestimmten Form des Edelgases Helium – so genanntes Helium-3. „Wir sind gegenwärtig das einzige Metrologieinstitut weltweit, das diese Tieftemperaturskala komplett realisiert und über Kalibrierungen an Kunden weitergibt“, sagt Fischer.

Während des Rückflugs von Berlin nach Köln-Bonn zeigt ein Monitor in 8000 Metern Höhe die Lufttemperatur von minus 46 Grad Celsius an. Und dann sagt der Pilot die Temperatur am Ankunftsflughafen durch: 23 °C. Ob er ahnt, was alles hinter diesen simplen Angaben steckt? ■

FRANK FRICK

Weg vom Wasser

Man kann über Österreichs Hauptstadt sicher vieles sagen, aber nicht, dass sie am Meer liegt. Trotzdem gibt es ein „Wiener Normal für mittleres Ozeanwasser“, das für die exakte Temperaturmessung eine wichtige Rolle spielt. Die Erklärung: Aufbewahrt wird dieses Wasser von der Internationalen Atomenergieorganisation IAEA, die ihren Sitz in Wien hat, und es entspricht einer Mischung weltweit gesammelter und destillierter Meerwasserproben. Entscheidend ist, dass es eine festgelegte Isotopenzusammensetzung besitzt. Diese Zusammensetzung wirkt sich auf die genaue Lage des Tripelpunktes des Wassers aus, also auf denjenigen Wert von Druck und Temperatur, bei dem Eis, flüssiges Wasser und Dampf nebeneinander vorliegen. Die Definition der Einheit der Temperatur „Das Kelvin ist der 273,16te Teil der thermodynamischen Temperatur des Tripelpunktes des Wassers“ lässt somit einen gewissen Spielraum, der erst durch die zu-

sätzliche Einigung auf das „Wiener Ozeanwasser“ als Normal eingeschränkt wurde. Hinzu kommt, dass sich die Definition des Kelvin aus einer eher willkürlich gewählten Materialeigenschaft – eben dem Wasser-Tripelpunkt – und nicht aus einer fundamentalen Naturkonstante ableitet. So etwas lässt die Messexperten nicht ruhen. PTB-Experte Joachim Fischer, Leiter eines umfangreichen Forschungsprojekts, an dem alle namhaften europäischen Metrologieinstitute beteiligt sind: „Wir arbeiten daran, dass man 2011 zusammen mit einer Reihe von anderen Basiseinheiten – Kilogramm, Ampere, Mol – auch das Kelvin neu definieren kann.“ Dabei soll das Kelvin an die Boltzmann-Naturkonstante angeknüpft werden. Die Wissenschaftler versprechen sich davon auch eine höhere Genauigkeit von Temperaturmessungen oberhalb des Kupfer-Fixpunktes, der bei rund 1085 °C liegt.

ff

Thermometer für alle Fälle

Der Griff ans Bierglas gibt Gewissheit: Der schäumende Inhalt ist kalt genug, um erfrischend die Kehle hinunter zu rinnen. Die heißen Kohlen in der Esse dagegen kann der Schmied nicht anfassen, dafür aber sehen: Ein Blick auf die gleißende Farbe der Glut verrät ihm, ob er das Feuer heiß genug geschürt hat. Auf den gleichen Prinzipien – Kontakt und Strahlung – beruhen alle Temperaturmessungen. Um hierbei nicht nur grob abzuschätzen, sondern die Temperatur auf möglichst viele Komma Stellen genau angeben zu können, braucht man verlässliche Thermometer. Der Ursprung dieser Verlässlichkeit liegt in Deutschland beim Berliner Institut der PTB – denn hier kennt man die „wahren Temperaturen“.

Vom Betrieb eines Kraftwerks über chemische Syntheseprozesse und Wetterstationen bis hin zum Glatteiswarner im Auto ist die Temperatur einer der am häufigsten gemessenen Parameter überhaupt“, sagt Joachim Fischer, Leiter des Fachbereichs Temperatur im Berliner Institut der PTB. Für den industriell wichtigsten Bereich zwischen -200 °C bis etwa 1500 °C wird die Temperatur zumeist im direkten Kontakt mit dem Messobjekt bestimmt: mit Widerstandsthermometern und Thermoelementen. Flüssigkeitsthermometer sind zu fragil und müssen mit dem Auge abgelesen werden, so dass sie heute nur noch eingeschränkt im Labor eingesetzt werden. Selbst in der Raumtemperatur- oder Fiebermessung wurden die mit Quecksilber oder Alkohol gefüllten Steigröhrchen von den kleinen, elektrischen Thermofühlern verdrängt. Widerstandsthermometer und Thermoelemente sind dagegen die Arbeitspferde der Gradmessung. Jedes Jahr werden weltweit etwa zwei Millionen Widerstandsthermometer und weit über drei Millionen Thermoelemente von Ingenieuren und Wissenschaftlern eingesetzt – mit steigender Tendenz. Ob im Kältesensor eines Kühlhauses oder in einer Kraftwerksturbine bei der Gasverbrennung – überall stecken optimierte Thermofühler. Den Präzisionsrekord halten Widerstandsthermometer aus Platin. Zwischen -200 °C und 500 °C liefern sie – abhängig von der Reinheit des Edelmetalls – Temperaturwerte auf wenige tausendstel Grad genau. Das Messprinzip: Abhängig von der Temperatur verändert sich die elektrische Leitfähigkeit von Metallen und Halbleitern. Bei Platin-Thermometern des Typs Pt-100 steigt beispielsweise bei einer Erwärmung von 0 °C auf 1 °C der elektrische Widerstand von 100 Ohm auf $100,4\text{ Ohm}$ an.

Während über die Kontakte eines Widerstandsthermometers elektrischer Strom fließen muss, kommen Thermoelemente ohne äußere Stromquelle aus. Bei ihnen werden zwei unterschiedliche Metalldrähte an einem Punkt miteinander verlötet oder verschweißt. Diese Messspitze berührt das zu messende Objekt, während die freien Enden der Metalldrähte auf einer Referenztemperatur gehalten werden. Zwischen diesen freien Enden entsteht nun eine Thermospannung, die von der gewählten Materialpaarung

abhängt. Dabei rangieren die so entstandenen Spannungen bei etwa 100 Mikrovolt pro Grad Temperaturdifferenz. Allerdings messen sie mit Unsicherheiten von etwa einem Grad nicht so präzise. Für die meisten technischen Anwendungen reicht das aber völlig aus.

Die verwendeten Kontaktmaterialien in den heute gebräuchlichen Thermoelementen sind fast vielfältiger als ihre Anwendungsgebiete. Die Kupfer-Nickel-Legierung Konstantan kann so für den Messbereich von -270 °C bis 400 °C mit Kupfer gepaart werden. Mit Eisen verschiebt sich die gut messbare Thermospannung zu höheren Werten (0 °C bis 750 °C). Nickelchrom verlötet mit Nickelaluminium bietet eine weite Messspanne von -270 °C bis 1370 °C . Und für wenige Minuten können gekoppelte Drähte aus den Metallen Wolfram und Rhenium sogar die glühende Hitze von bis 2800 °C auf etwa zwei Grad genau bestimmen.

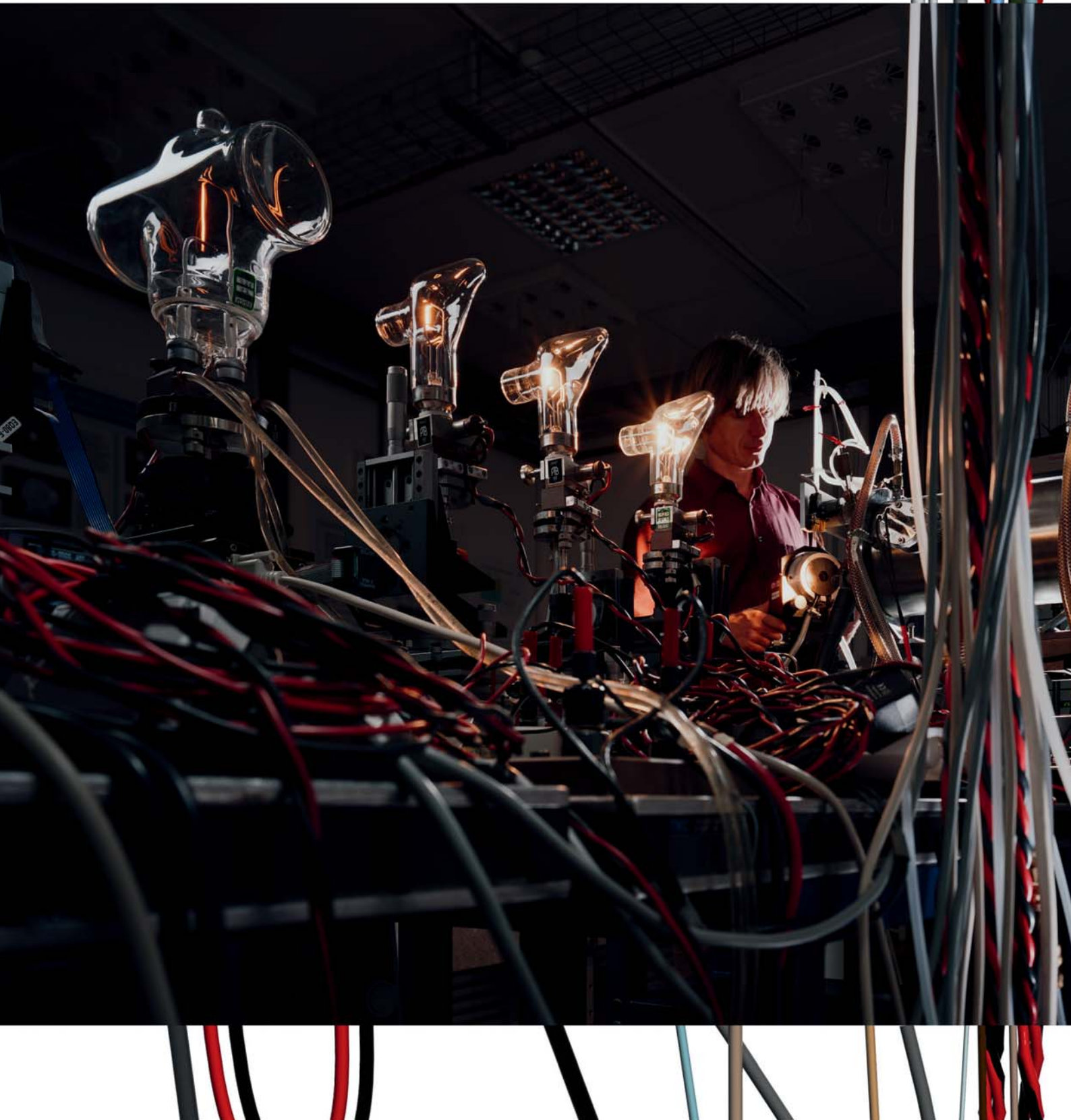
Die Präzision der Thermoelemente hängt direkt von dem regelmäßigen Aufbau der Drähte ab. „Und es ist wirklich eine Kunst, homogene Drähte zu ziehen“, weiß Fischer. Je nach Temperaturbereich und Einsatzgebiet weichen die Thermoelemente binnen einiger Monate bis hin zu wenigen Jahren von ihrer ursprünglichen Kalibrierung ab. Verantwortlich dafür ist die Alterung des Materials, das reicht von der oberflächlichen Oxidation bis zur kompletten Versprödung. Günstige Thermoelemente müssten dann ausgetauscht, teurere dagegen neu kalibriert werden.

Statt nur auf Metalldrähte zu setzen, werden Experimente mit Leitern aus Graphit gemacht. Dieses Kohlenstoffmaterial hat den Vorteil, sehr homogen und über lange Zeiten stabil zu sein. Für kleinste Messfühler im Nanometerbereich kann sich Fischer auch filigrane Nanoröhrchen vorstellen. Montiert auf die Tasterpitzen von Rasterkraftmikroskopen, wären damit Temperaturmessungen an Strukturen möglich, die tausendfach kleiner sind als der Durchmesser eines menschlichen Haares. Parallel dazu streben Thermoelemente in den Temperaturbereich oberhalb von 1500 °C . Wegen ihrer hohen Schmelzpunkte stehen hier heute die Kombinationen aus Wolfram (Schmelzpunkt 3407 °C) und Rhenium (3180 °C) mit einem Messbereich von bis zu 2800 °C an der Spitze der

Entwicklung. Doch mit steigender Temperatur wächst auch die Messunsicherheit auf einige Grad Celsius an – liegt doch der derzeit höchste Fixpunkt der Temperaturskala bei rund 1085 °C, dem Erstarrungspunkt von Kupfer. Neue Fixpunkte für eine zuverlässige Kalibrierung werden also gesucht. Der Übergang von der festen in die flüssige Phase, der eutektische Punkt von Metall-Kohlenstoffmischungen, bietet sich hier an. Für Ruthenium-Kohlenstoff liegt er bei 1953 °C und für Titancarbid-Kohlenstoff sogar bei 2761 °C.

Thermoelemente dringen damit in einen Messbereich vor, der bis heute einer völlig anderen Methode vorbehalten

war: der Strahlungsthermometrie. Sobald es – wie dem Schmied mit seinem Schmiedefeuer – zu heiß und gefährlich wird, um in direkten Kontakt mit dem glühenden Messobjekt zu treten, lässt sich die Temperatur quasi beobachten. Verbrennungsprozesse oder Stahlschmelzen lassen sich so mit einem Strahlungsthermometer, auch Pyrometer genannt, gefahrlos untersuchen. Der zentrale Sensor von hochwertigen Strahlungsthermometern besteht meistens aus einem lichtempfindlichen Halbleiter auf der Basis von Silizium oder Indium-Gallium-Arsenid. Wie in einer Solarzelle erzeugt



die Wärmestrahlung in dem Halbleiter einen elektrischen Strom, der als Maß für die Temperatur dient. Mit einer Genauigkeit von etwa 0,1 °C bis 2 °C erstreckt sich der Messbereich bis über 3000 °C. „Doch auch kalte Objekte senden die für die Messung notwendige Infrarotstrahlung aus“, sagt Jörg Hollandt, Leiter des Fachbereichs Hochtemperatur- und Vakuumphysik in der PTB. So sind auch kontaktlose Messungen bis unter –100 °C möglich.

Das grundlegende Prinzip der Strahlungsthermometrie ist einfach: „Jeder Körper mit einer Temperatur oberhalb des absoluten Nullpunkts sendet elektromagnetische Strahlung aus“, erklärt Hollandt. Diese Wärmestrahlung entsteht durch die Schwingungen von Atomen und Molekülen, die mit steigender Temperatur zunehmen. Daher steht deren Intensität und spektrale Verteilung direkt mit der Temperatur und dem Emissionsgrad eines Materials im Zusammenhang. Vor einer absoluten Temperaturmessung muss daher der Emissionsgrad bekannt sein. Die PTB verfügt über Messplätze, um diese Materialeigenschaft exakt zu bestimmen.

Für eine absolute Kalibrierung von Strahlungsthermometern braucht man Objekte, die jede auftreffende Strahlung vollständig absorbieren. Nur dann wird die ausgesendete Strahlung gemäß dem Planck'schen Strahlungsgesetz einzig und allein von der Temperatur des Objektes bestimmt. Physikalisch entspricht das einem Absorptions- und Emissionsgrad von exakt 1. Nur ein schwarzer Strahler verfügt über diese Eigenschaft. Diesem Ziel kommen die Strahlungsexperten in der PTB mit aufwendig konstruierten Hohlraumstrahlern so nah wie sonst niemand in Deutschland. Mit einem Dutzend unterschiedlicher Hohlraumstrahler erzeugen die PTB-Wissenschaftler damit Temperaturen von –170 °C bis zu 3000 °C.

Für die Industrie sind Fixpunktzellen und Hohlraumstrahler meist zu komplex, zu teuer und zu schwierig zu handhaben, um mit ihnen Thermometer zu kalibrieren. Eine überaus praktische Methode dagegen, definierte Temperaturen zu erzeugen und diese Temperaturen an ein Thermometer „weiterzugeben“, sind Bandlampen. Mit ihnen lassen sich auf einfache Weise hohe Temperaturen stabil erzeugen. Auch aus dem Laboralltag der PTB sind sie nicht wegzudenken. „Zum Glück haben wir Bandlampen“, sagt Jörg Hollandt, „sonst müssten wir ständig unseren Gold-Hohlraumstrahler anwerfen.“ Was ein langwieriges Geschäft wäre – schließlich müssen in diesem Hohlraumstrahler mehrere Kilogramm Gold aufgeschmolzen werden, um die Temperatur des Gold-Erstarrungspunktes zu finden.

Derweil genügt vielen Anwendern in der Industrie die Leistung der klassischen Strahlungsthermometer heute nicht mehr. Denn diese Geräte werfen ihren Blick lediglich auf ein einziges Messfeld und messen so immer nur eine einzige Temperatur. Zahlreiche Unternehmer sind zunehmend für Prozess- und Qualitätskontrollen an einer schnellen und zuverlässigen Bestimmung ganzer Temperaturverteilungen über größere Bereiche interessiert. Wärmebildkameras, die nicht nur sichtbares Licht, sondern auch Infrarotstrahlung wahrnehmen, sind hierzu in der Lage. Sie liefern bunte Wärmebilder von Menschen, Häusern oder Stahlschmelzen. Wie in einem Film lassen sich Heiz- und Kühlvorgänge fast in Echtzeit verfolgen. Die unterschiedlichen Temperaturen werden dabei in allen Farben des Regenbogens angezeigt. Je blauer, desto kühler. Je röter, desto wärmer.

„Doch die Qualität dieser Thermographie-Kameras schwankt erheblich“, sagt Hollandt. So weichen die Messwerte einfacher Modelle schon mal um einige Grad Celsius von der tatsächlichen Temperatur ab. Hochwertige Kameras dagegen erreichen mit 0,2 °C eine Präzision, die mit Strahlungsthermometern vergleichbar ist. Kalibriert werden diese Kameras mit Hohlraumstrahlern, wobei allerdings nur die Detektorpunkte im Zentrum des ortsaufauflösenden Wärmesensors auf die exakte Temperatur justiert werden. „Das ist nicht optimal“, gibt Hollandt zu bedenken. Daher verfolgt das Strahlungsthermometrie-Team in der PTB das Ziel, die Kalibriermethoden besser an Wärmekameras anzupassen. Großflächige, sehr homogene Flächenwärmestraher mit einer strukturierten und dadurch möglichst schwarzen Oberfläche bieten sich als Lösung an, um nicht mehr nur einen kleinen Bereich, sondern alle Detektorpunkte in einer Kamera gleichzeitig anzusprechen. „Wir beginnen gerade, genau diese Idee in die Tat umzusetzen“, sagt Hollandt. ■

JAN OLIVER LÖFKEN



Foto: Marc Steinmetz/VISUM. Abbildung: Alberto Parra del Riego/PTB





Foto: David Taylor/SPL/Agentur Focus

Labor

Der Mensch in seinem Alltag stellt meistens nur bescheidene Temperatursprüche. Das Wohnzimmer soll etwas wärmer sein als das Schlafzimmer und der Sommer soll für den Strand, der Winter für die Berge taugen. Der Physiker in seinem Labor wünscht sich dagegen oft ganz besondere Temperaturen und nicht zuletzt die Extreme. Versucht sich der Physiker daran, leichte Atomkerne miteinander zu verschmelzen, um die Kernfusion der Sonne auf die Erde zu holen, dann braucht er in seinen Experimentiermaschinen auch sonnenhafte Temperaturen – so um die paar Millionen Grad wären da nicht schlecht. Seine Kollegen in den Präzisionswerkstätten der Längenmessungen hingegen haben es gerne moderat und setzen auf Zimmertemperatur – diese soll aber bitte möglichst exakt 20 Grad Celsius betragen, denn jede noch so kleine Temperaturschwankung ließe den Maßstab wachsen oder schrumpfen. Und Nanometerfehler sind hier keine kleinen Fehler! Wieder eine andere Physikergruppe ist ganz heiß auf Quanteneffekte und muss dazu (für die Supraleitung bis zur Bose-Einstein-Kondensation) die Temperaturleiter ganz schön tief hinab steigen – mit flüssigem Helium als getreuem Wegbegleiter. Die Techniken, um die wirklich tiefen Temperaturen zu erreichen, die Kryotechniken, sind dabei fast genauso anspruchsvoll wie die physikalischen Phänomene, die sich bei diesen tiefen Temperaturen zeigen – Abkühlung als Wissenschaft.

JENS SIMON

Unter dem Hügel

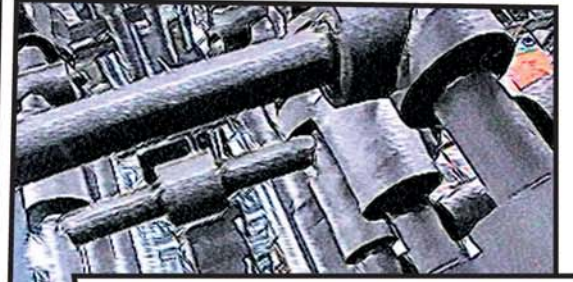


Und abwärts zu den peniblen Längenmessern.



... zwei Stockwerke tief vergraben liegt er, der Ort höchster Präzision. Kein Nanometer geht hier verloren.

Ohne Reinraummode geht hier nichts, auch nicht für die Wissenschaftler Jens Flüge und Christoph Weichert.



Prima Klima! Hinter tausend Röhren eine stabile Temperaturwelt.



Fahl leuchten die Monitore!



Lass leuchten, Laser!



Countdown für die Messung.

Das wohltemperierte Labor

Ohne konstante Umweltbedingungen gibt es keine Präzisionsmessungen. Jens Flüge und seinem Team in der PTB ist deshalb kein Aufwand zu hoch, um die Temperatur in ihrem Labor auf einem stabilen Wert zu halten.

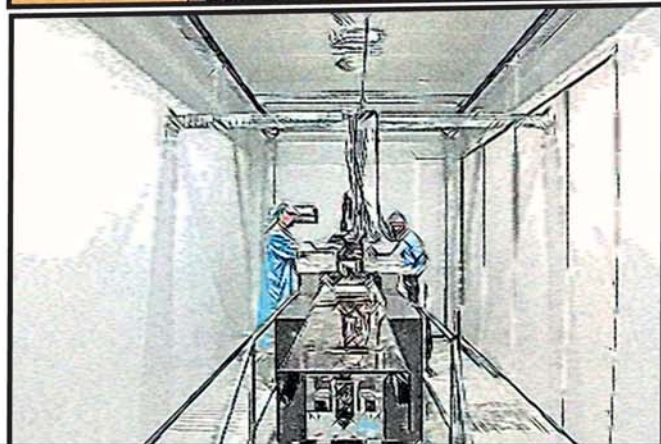
Eigentlich ist dieser Block zu dünn“, sagt Jens Flüge und deutet auf einen sechs Tonnen schweren, 70 Zentimeter dicken und zwei Meter langen Granitblock in seinem Labor, der als Führungsschiene für einen Aluminiumschlitten dient. „Er wird bei Bewegungen des Schlittens etwas verbogen und verfälscht dadurch unsere Messungen. Wir müssen das nachmessen und anschließend rechnerisch korrigieren.“ Tatsächlich verbiegt sich der Steinblock, auf dem auch die Messapparatur montiert ist, aufgrund der geänderten Schwerkraft in der Mitte lediglich um drei bis vier Nanometer. Aber das stört bereits, denn Flüge und sein Team messen mit einer für den Außenstehenden schier unfassbaren Genauigkeit. Das ist auch nötig, denn sie prüfen die Standards für extrem exakt arbeitende Maschinen und Anlagenteile in der Industrie – beispielsweise für die lithographischen Masken der Chiphersteller. Da kommt es auf den Nanometer an, und deshalb schalten Flüge und seine Mitarbeiter in ihrem Labor für Längenteilungen alle Einflüsse aus, die die Messungen verfälschen oder stören könnten. Andernfalls würde der Nanometerkomparator, so der fachliche Terminus der Anlage, seinem Namen auch nicht gerecht werden können.

Dazu gehört auch jegliche Temperaturschwankung. Das Ideal ist, alle Messungen bei exakt 20 Grad Celsius auszuführen, denn für diese Temperatur sind die Längenstandards definiert. Werden sie wärmer, dehnen sich die Materialien aus, bei Kälte ziehen sie sich zusammen. Wirklich exakt sind Vergleiche mit einem Längennormal also nur bei genau 20 Grad Celsius. Und so scheuen Jens Flüge und seine Mitarbeiter keinen Aufwand, um die Temperatur in ihrem Labor stets bei exakt 20 Grad Celsius zu halten, und zwar auf ein Millikelvin genau – sommers wie winters, tagsüber wie nachts.

Es begann schon beim Bau des knapp 100 Quadratmeter großen Labors im Jahr 2000. Die gesamten Räumlichkeiten wurden unter die Erde verlegt, denn so laufen die Schallwellen vom Straßenverkehr in den oberen Erdschichten über das Gebäude hinweg und stören nicht. „Außerdem ist die Umgebung dort thermisch stabiler“, weiß Jens Flüge. Das umgebende Erdreich hat immer eine Temperatur unter 20 Grad Celsius, auch im Sommer. Deshalb wird der Boden des Labors ständig elektrisch beheizt. Seine Wände sind gut isoliert, und in ihrem Inneren strömt Luft, die sie kühlen oder heizen kann.

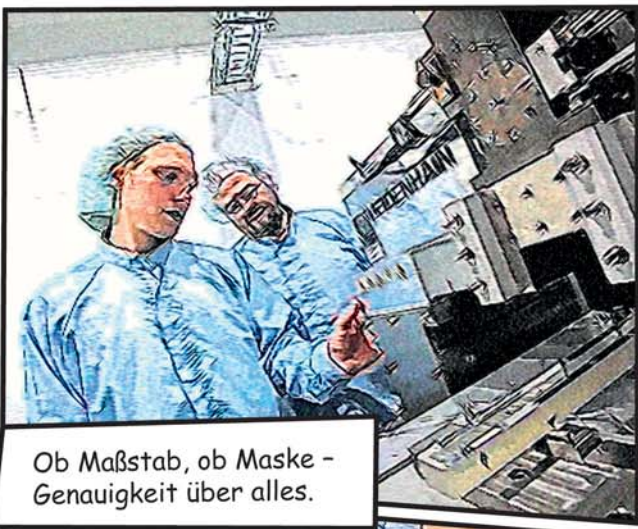


Leise schwingt die Tür auf.
Rein in die Messkabine.



Obacht Nanometer. Jetzt geht's dir an die Länge.





Ob Maßstab, ob Maske -
Genauigkeit über alles.



Mensch weg, Licht aus, Messung an!



Und die Labormenschen dürfen

Die Lampen sind mit Wärmeschutzglas umgeben. So kommt es, dass die Forscher, die hier arbeiten, keinen Unterschied erkennen zwischen den heißesten Sommertagen, die draußen herrschen, und bitterster Kälte im Winter. Alles bleibt stets wohltemperiert.

Vom Labor aus, in dem ein Großteil der Elektronik sowie der Laser untergebracht sind, führt eine dicke Tür in das „Allerheiligste“, einen kleineren Raum in der Mitte des Labors, in dem die eigentlichen Messungen stattfinden. Hier steht der Sechs-Tonnen-Granitblock mit dem Schlitten. Auf ihm sind außerdem all die Messgeräte und Apparaturen befestigt, die nötig sind, um mit Hilfe eines Laserstrahls Abstände von wenigen Nanometern zu erfassen. Der Laserstrahl selbst läuft durchs Vakuum, man führt ihn in Bälgen aus Stahl, die luftleer gepumpt sind. Ein Linearmotor schiebt die Maske, die ausgemessen werden soll, unter dem Mikroskop hin und her. Erkennt es die Strukturen, gibt es das Signal für den Stopp. Beim Messvorgang ermitteln dann die Forscher mit Hilfe des Laserstrahls und eines Interferometers den Abstand zum vorigen Haltepunkt.

In dieser inneren Kammer gibt es also einige Geräte, die Wärme erzeugen: den Linearmotor, den Fotoverstärker für das Mikroskop, sein Licht sowie Stromzuführungen und Relais. Mit viel Mühe und genauer Überlegung haben die Wissenschaftler ihren Einfluss immer geringer gemacht, indem sie sie abschirmten und kontrollierten: Sie haben den Linearmotor durch eine lange Stange mit dem Schlitten verbunden, damit seine Wärme nicht zu nahe an die Maske kommt; der Fotoverstärker wird eingepackt, die Kabel und Relais ebenfalls. Beim fast reibungsfreien Luftlager für den Schlitten hingegen hat man einen Kühleffekt: Pressluft fließt durch eine Vielzahl von kleinen Bohrungen und tritt unten aus, um dort ein Luftkissen zu formen. Beim Austritt aus den Düsen kühlt sie sich ab. Bisher schützen die Forscher das Messgut mit Isolierfolien, in Zukunft soll diese Luft aber mit kleinen Heizwiderständen sanft erwärmt werden.

Auch die Materialauswahl hat sich zum großen Teil an Wärmegesichtspunkten orientiert: Der Messschlitten ist aus Aluminium, das Wärme besonders leicht abführt, die Halterungen für Spiegel und Mikroskop hingegen aus Invar, einer

... wieder an die Sonne.



Legierung, die sich bei Erwärmung fast gar nicht ausdehnt. „Glaskeramik wäre noch besser, aber es ist schwierig, aus diesem Material technische Komponenten anzufertigen, weil es sehr spröde ist“, sagt Jens Flügge, „dennoch planen wir, für künftige Versuche den unteren Teil der Messapparatur daraus zu fertigen.“

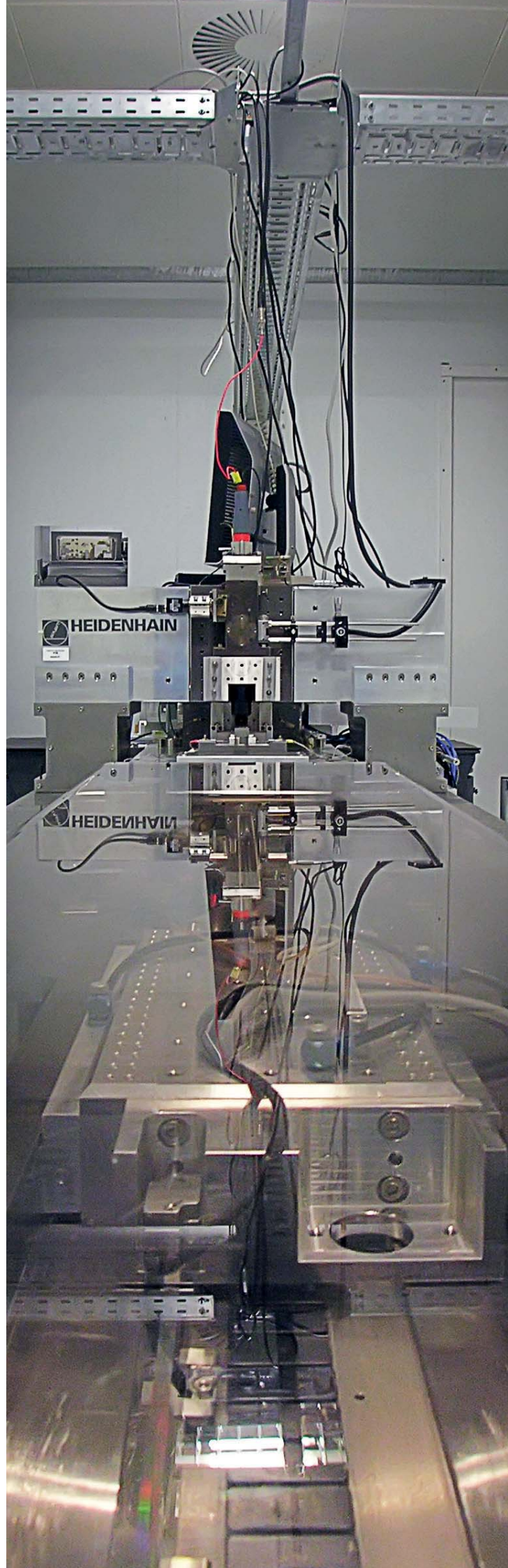
Überall im Raum, vor allem an den kritischen Stellen, befinden sich hochgenaue Temperaturmessgeräte, insgesamt an die 50. „Am liebsten hätten wir auch Wärmesensoren im Inneren der Maßstäbe“, meint der Laborchef, „aber meist müssen wir uns mit Sensoren zufrieden geben, die wir außen befestigen.“ All diese Messgeräte leiten ihre Informationen zu einem Computer, der sie auswertet und zur Korrektur der Maßstabslänge benutzt. Um die Klimatisierung weiter zu verbessern, werden die hochpräzisen Temperaturmessungen zukünftig auch zur Steuerung der Klimaanlage genutzt. Die Klimatechnik ist in einem Nachbarraum untergebracht, der mit knapp 83 Quadratmeter fast so groß ist wie das Labor selbst. Riesige, schwingungsfrei gelagerte Maschinen sorgen hier dafür, dass die Luft vorgereinigt, angefeuchtet und exakt temperiert wird, bevor sie in das Labor geleitet wird. Das Labor wird so von einem kaum fühlbaren Luftschleier überstrichen, der aus Öffnungen in der Decke kommt und am Boden abgesaugt wird. Damit wirbelt er keinen Staub auf, und die Strömung ist möglichst frei von Turbulenzen.

Was aber passiert, wenn Menschen in das Labor gehen? Sie sind besondere Störquellen, denn so viel Wärme wie eine Person gibt keines der Geräte ab. Aber ohne Wissenschaftler geht es nicht, sie müssen die Messapparatur aufbauen und genauestens justieren. Doch selbst wenn sie dabei mal ins Schwitzen geraten sollten, ist der Erfolg der Messung nicht gefährdet. Denn wenn die Experimentatoren die Kabine verlassen haben, lässt man das Labor erst einmal mindestens 24 Stunden in Ruhe. In dieser Zeit gleichen sich Temperaturschwankungen aus. Noch besser sind zwei Tage Wartezeit, so dass die Forscher oft am Freitag die Apparatur einstellen, um dann am Montag mit den Messungen zu beginnen. Auf diese Weise gelingt es ihnen, die Schwankungen der Temperatur im Labor unter einem tausendstel Kelvin zu halten – ein Wert, der rekordverdächtig ist. ■

BRIGITTE RÖTHLEIN

Manchmal können ein paar Nanometer schon über Top oder Flop entscheiden – wenn es etwa darum geht, Halbleiterstrukturen auf Chips lithographisch herzustellen oder in einer Koordinatenmessmaschine präzise Positionen anzufahren. Um also etwa die Strukturabstände auf Photomasken oder die Strichteilungen auf Längenmaßstäben in eben dieser Nanometergenauigkeit ausmessen zu können, hat die PTB gemeinsam mit der Heidenhain GmbH einen Längenkomparator entwickelt, der auch große Objekte (bis zu rund einem halben Meter Länge) auf den Nanometer genau unter die Lupe nehmen kann. Bei einer derartigen Präzision wird die Raumtemperatur zu einem echten Gegner. Die Baumaterialien des Komparators sind von Temperaturschwankungen ebenso betroffen wie das zu untersuchende Objekt. Ein Quarzglasmaßstab, der beispielsweise bei exakt 20 °C eine Länge von einem halben Meter hat, dehnt sich um satte 3 Nanometer aus, wenn die Temperatur um ein tausendstel Grad hochfährt. Wenn es auf den Nanometer ankommt, kann das schon zuviel sein. Kein Wunder, dass die Nanometer-Wissenschaftler sehr auf die Temperatur achten.

Fotos: original-okerland. Abbildungen: Alberto Parra del Riego/PTB



Annäherungsversuche

10 K

Rekorde, und seien sie auch noch so unsinnig, haben die Menschen seit jeher fasziniert. Kälterekorde haben dazu noch eine eigentümliche Eigenschaft: Kein Ort und kein Gegenstand im Universum kann kälter werden als $-273,15$ Grad Celsius. Der englische Physiker Lord Kelvin wählte daher diesen Punkt als absoluten Nullpunkt der nach ihm benannten Temperaturskala. Aber dieser tiefste Punkt, 0 Kelvin, wird niemals erreichbar sein, denn je weniger Restwärme ein System enthält, desto länger braucht man, sie zu entfernen. Dazu wäre eine Maschine mit den Abmessungen des Universums notwendig und unendlich viel Zeit.

1 K

Die kälteste Region auf der Erde, die Antarktis, ist im Vergleich zum restlichen Universum noch richtig warm: In der Heimat der Pinguine liegt die tiefste gemessene Temperatur bei -89 Grad Celsius oder 184 Kelvin, während die mittlere Temperatur im Weltraum nur noch drei Kelvin beträgt. Der Boomerang-Nebel im Sternbild Stier ist noch kälter, weil er sich sehr schnell ausdehnt und dabei stärker abkühlt als seine Umgebung. Die vermutlich tiefsten Temperaturen im Universum herrschen aber in den Laboratorien der Tieftemperaturphysiker. Dort wird die Materie auf einige millionstel Grad bis an den absoluten Nullpunkt herab abgekühlt und ist damit kälter als alle bisher bekannten Objekte im Weltraum.

0,1 K

„Einige meiner Fachkollegen meinen deshalb, wenn an irgendeinem Ort im Universum ähnlich tiefe Temperaturen gemessen würden wie in irdischen Tieftemperaturlaboren, wäre das ein Hinweis auf intelligentes außerirdisches Leben“ erklärt Peter Strehlow, Leiter der Arbeitsgruppe „Materialverhalten und Quantenphänomene“ in der PTB. „Ich finde diesen Standpunkt zu anthropozentrisch. Aus der Thermodynamik kann man ableiten, dass supermassive Schwarze Löcher noch wesentlich kälter sind. Diese kosmischen Objekte sind ideale Kältemaschinen.“ Allerdings ist es praktisch kaum möglich, deren Temperatur zu messen.

0,01 K

Wettlauf zum Nullpunkt

Bleiben wir also auf der Erde und nähern wir uns dem absoluten Nullpunkt auf den Spuren der Pioniere des 19. Jahrhunderts. Ungefähr zur gleichen Zeit, als Polarforscher die kältesten Orte der Erde erkundeten, erreichten auch die Tieftemperaturphysiker einen vorläufigen Höhepunkt auf ihrem Weg zum absoluten Nullpunkt. Ähnlich dramatisch wie der Wettlauf zum Südpol zwischen dem Briten Robert Scott und dem Norweger Roald Amundsen verlief das Kräftemessen im Labor zwischen dem Schotten James Dewar und dem Niederländer Heike Kamerlingh Onnes.

Am Beginn der abenteuerlichen Reise standen die Experimente des britischen Autodidakten Michael

Faraday, der Anfang des 19. Jahrhunderts Gase verflüssigt hatte. Da einige, wie Stickstoff, Sauerstoff und Wasserstoff, seinen Bemühungen hartnäckig widerstanden, nannte Faraday sie „permanente Gase“. Erst 1873 fand der niederländische Theoretiker Johannes Diderik van der Waals den Grund dafür: Es genügte nicht, diese Gase stark zusammendrücken und die entstehende Wärme abzuführen, sondern man musste sie auch unter eine kritische Temperatur abkühlen. Dank dieser Erkenntnis gelang es zuerst Sauerstoff zu verflüssigen (-183 Grad Celsius) und dann Stickstoff (-196 Grad Celsius).

Dies war der Stand der Dinge, als Dewar und Kamerlingh Onnes sich der wie sie meinten letzten großen Herausforderung stellten: der Verflüssigung von Wasserstoff. Ihre Strategie: Sie wollten als Kühlmittel eine Reihe von Gasen verwenden, die bei immer tieferen Temperaturen flüssig werden. Dabei diente das erste verflüssigte Gas als Kühlmittel für das zweite Gas in der Kühlkette und so fort.

Explosionsgefahr

Die Versuche waren nicht ungefährlich, denn der zu verflüssigende Wasserstoff musste unter einem enormen Druck, dem 180-Fachen des Atmosphärendrucks, in die Kühlschlange gepresst werden. Die Glaswände der Apparaturen wurden allein schon wegen der großen Kälte spröde – unter dem zusätzlichen Druck geschah es mehr als einmal, dass sie explodierten. Einige Assistenten Dewars verloren bei solchen Zwischenfällen ein Auge. Kamerlingh Onnes' Labor wurde sogar für zwei Jahre geschlossen, weil die Leidener Stadtväter wegen des Explosionsrisikos besorgt waren.

Diese Situation verschaffte dem Konkurrenten in Schottland einen Vorteil. 1898 gelang es Dewar, nach fast zwanzigjährigen Bemühungen, Wasserstoff bei -252 Grad Celsius zu

Die Mikrokelvinanlage der PTB schafft, was ihr Name sagt: tiefe Temperaturen, nur wenige millionstel Kelvin über dem absoluten Nullpunkt. Dazu arbeitet die Anlage (hier aus verformendem Kaleidoskop-Blickwinkel aufgenommen) mit zwei Kühlstufen: In der Bildmitte ist die zylinderförmige, vergoldete Kupferkernkühlstufe zu erkennen und im unteren Bildteil die von einem vergoldeten Aluminiumschild umgebene Platinkernstufe. Mit diesem Aufbau können die PTB-Wissenschaftler (im Bild: Peter Strehlow) kondensierte Materie bei einigen Mikrokelvin und in hohen Magnetfeldern bis zu 9 Tesla untersuchen.

0,001 K



0,0001 K

verflüssigen und sich dem absoluten Nullpunkt bis auf 21 Grad zu nähern. Doch der Triumph war nur von kurzer Dauer, denn kurz darauf zeichnete sich bereits eine neue Herausforderung ab: Nach van der Waals' Theorie sollte sich das leichte Edelgas Helium bei noch tieferen Temperaturen als Wasserstoff verflüssigen lassen, und zwar bei -268 Grad Celsius oder fünf Kelvin. Das Problem: Helium war nicht in genügend großen Mengen verfügbar. Dieses Mal hatte Kamerlingh Onnes die Nase vorn. Nach drei Jahren ausdauernder Arbeit gelang ihm am 10. Juli 1908 das entscheidende Experiment. Er kam damit dem absoluten Nullpunkt so nahe wie noch niemand vor ihm.

0,00001 K

1911, in dem Jahr, als Amundsen die norwegische Flagge am Südpol aufpflanzte, machte der niederländische Physiker eine weitere erstaunliche Entdeckung: Quecksilber verlor bei Kühlung mit flüssigem Helium plötzlich seinen elektrischen Widerstand; es wurde supraleitend. Ein weiteres faszinierendes Phänomen beobachtete er in flüssigem Helium, das plötzlich die Gefäßwand hochkroch, aus Behältern tropfte, die eigentlich dicht sein sollten, oder ohne Antrieb in einem unendlichen Springbrunnen sprudeln konnte. Die Flüssigkeit hatte ihre innere Reibung verloren; sie war superfluid. 1913 wurde Heike Kamerlingh Onnes mit dem Nobelpreis für Physik geehrt.

0,000001 K

Doch auch der niederländische Physiker stieß mit seinem Kühlverfahren an Grenzen: Bis zu seinem Tode im Jahr 1926 konnte er die Temperatur des Heliums noch bis zu 0,7 Kelvin absenken, indem er es unter stark erniedrigtem Druck verdampfen ließ. Aber weiter nach unten ging es nicht. Noch im gleichen Jahr schlugen jedoch Debye und fast gleichzeitig der kanadische Chemiker und spätere Nobelpreisträger William Francis Giauque einen Ausweg aus der Sackgasse vor: die magnetische Kühlung. Nun konnte der Wettstreit um die tiefsten Temperaturen fortgesetzt werden.

Tieftemperaturmaschinen

0,0000001 K

Mit dieser Methode arbeitet auch der Berliner Mikrokelvinkryostat der PTB. Er zählt weltweit zu den besten Tieftemperaturmaschinen. Die eigentliche Kühlstufe passt locker auf den Schreibtisch von Peter Strehlow, doch für den Betrieb ist eine beeindruckende dreistöckige Halle notwendig, ausgestattet mit einem starken supraleitenden Magneten, einem aufwendigen System zur Kühlung mit flüssigem Helium, einer gegen Hochfrequenzstrahlung abgeschirmten Kabine sowie jeder Menge Elektronik.

Die magnetische Kühlung beruht auf der Idee, Metalle wie beispielsweise Kupfer an ihrem

magnetisierbaren Atomkern zu packen und sie wie winzige Magneten in einem starken Magnetfeld auszurichten. Die dabei freiwerdende Wärme wird vom Arbeitspferd der Anlage, dem Verdünnungskryostaten, abtransportiert. Da für seinen Betrieb pro Tag mehrere Liter flüssiges Helium benötigt werden, verfügt die PTB über eine eigene Anlage zur Verflüssigung des Kühlmittels. Auf diese Weise lassen sich die Kupfer-Atome in der so genannten Kernstufe innerhalb von drei Tagen auf zehn tausendstel Kelvin herunterkühlen.

Als nächstes wird der Wärmeaustausch mit der Umgebung abgeschnitten, wie bei einer überdimensionalen Thermoskanne, und das Magnetfeld allmählich zurückgefahren. Die Kernspins können sich dann wieder stärker bewegen, brauchen dazu aber Energie, die sie ihrem Umfeld, der umgebenden Elektronenwolke, entziehen. So kühlt sich das System als Ganzes noch weiter ab. „Die tiefsten Temperaturen, auf die man Festkörper heute abkühlen kann, liegen bei etwa zwei Mikrokkelvin, also zwei millionstel Grad über dem absoluten Nullpunkt“, sagt Strehlow. Diesen Kälterekord erreichten 1997 erstmals Tieftemperaturphysiker der Universität Bayreuth unter Leitung von Frank Pobell, wenig später gelang es auch in Strehlows Labor, Festkörpertemperaturen in diesem Bereich zu erzeugen.

Noch näher an den absoluten Nullpunkt kommt man heran, wenn man die magnetischen Kernmomente eines Metalls so schnell abkühlt, dass kein Wärmeaustausch zwischen den Atomkernen und der Elektronenwolke stattfinden kann. Das Teilsystem der Atomkerne kann durch dieses „Schockgefrieren“ durchaus unter ein milliardstel Grad an den absoluten Nullpunkt heran abkühlen, während die Elektronenwolke wärmer bleibt. (Der Rekord, aufgestellt bei der Suche nach der kernmagnetischen Ordnung im Element Rhodium, liegt hier derzeit bei 250 Pikokelvin bzw. einem Viertel Nanokelvin.) Da die Zeit, in der sich das thermische Gleichgewicht zwischen Atomkernen und Elektronen einstellt, mehrere Stunden betragen kann, lässt sich dem System der Atomkerne näherungsweise eine Temperatur zuordnen. Aber das ist schon fast wieder eine philosophische Frage, denn eigentlich ist die Temperatur nur für einen Gleichgewichtszustand definiert.

Strehlow ist überzeugt, dass die Erforschung tiefster Temperaturen längst nicht abgeschlossen ist und es noch unendlich viele Temperaturdekaden zu erobern gibt. Dabei spielen sich in dem nur schwer vorstellbaren Bereich zwischen einem millionstel und einem tausendstel Kelvin genauso viele physikalische Phänomene ab wie beispielsweise im Bereich zwischen einem und tausend Kelvin. „Die Leistung der Tieftemperaturphysik wird erst deutlich, wenn wir uns vor Augen führen, dass wir Materie hundert Millionen mal kälter als unsere Umgebung machen können“, sagt Strehlow. „Aber können wir Materie hundert Millionen mal wärmer machen als unsere Umgebung und sie bei diesen extremen Temperaturen untersuchen? Bestimmt nicht!“ ■

ANNE HARDY

Entspannt auf Kältekurs

Was Physiker so in ihren Laboren treiben, lässt sich manchmal schon an den nackten Verbrauchszahlen ablesen. Während sich ein normaler Bürger mit Gas, Wasser und Strom begnügt, stehen auf der Abrechnung des Physikers zusätzliche gerne die Elemente Stickstoff und Helium, beide mit dem Zusatz „flüssig“. Offensichtlich lieben es viele Physiker kalt, sehr kalt, denn allein die Wissenschaftler im Institut Berlin der PTB verbrauchen bei ihren Experimenten und Messungen jährlich knapp 60 000 Liter flüssigen Stickstoff (flüssig unterhalb -196 °C) und rund 50 000 Liter Helium (flüssig unterhalb -268 °C). Vor allem Helium ist knapp und teuer. Darum wird es in der PTB in einer eigenen Anlage verflüssigt und nach der Nutzung wiederaufbereitet.

Gewappnet mit einem Pott Kaffee und einem Blick auf den Speiseplan – „Menü 2: Warme Hefeklöße mit heißem Marillenkompott“ – geht es heute an einen Ort, an dem einem buchstäblich das Blut in den Adern gefrieren könnte: in die Heliumzentrale der PTB. „Wir produzieren hier flüssiges Helium, das eine Temperatur von minus 269 Grad Celsius hat“, sagt Götz Klaukin, Ingenieur und Herr des Kältereichs. Noch kälter geht es kaum: Nur 4,2 Grad weniger und der absolute Nullpunkt wäre erreicht, also die Temperatur, bei der der Theorie zufolge alle Atome und Moleküle ihre Bewegungen einstellen.

Die flüssige Kälte lagert in einem kleinwagengroßen 2000-Liter-Tank aus blitzblankem Edelstahl. Doch obgleich Klaukin direkt daneben steht, zeigt er nicht die Spur eines Fröstelns. Der Tank ist im Grunde eine riesige doppelwandige Thermoskanne, erklärt er. „Zwischen innerer und äußerer Wand sorgt ein Vakuum dafür, dass Wärme nicht weitergeleitet wird und die Kälte drin bleibt.“ Zusätzlich ist die Außenwand innen mit metallbeschichteten Folien ausgekleidet, die Strahlungswärme aus der Umgebung zu fast 100 Prozent vom kalten Inhalt des Kessels fernhalten.

„Wir versorgen von hier aus mehrere PTB-Arbeitsgruppen mit flüssigem Helium“, sagt Klaukin. Die Wissenschaftler benötigen die ultrakalte Flüssigkeit für Experimente zur Tieftemperaturskala und als Ausgangssubstanz auf

dem Weg zu neuen Kälte-Rekorden. Und sie kühlen damit Supraleiter: Substanzen, die den elektrischen Strom ohne elektrischen Widerstand leiten, aber eben nur bei diesen äußerst niedrigen Temperaturen. Supraleiter stecken unter anderem im PTB-eigenen Kernspintomographen und in hochempfindlichen Magnetsensoren, die hier gebaut und erforscht werden.

Die Verflüssigung des edlen Gases hat in der PTB eine lange Tradition. Als Pionier auf diesem Gebiet gilt Walther Meißner, der hier in den 1920er und 1930er Jahren forschte. Ihm wurde sogar ein eigenes „Kältehäuschen“ zur Verfügung gestellt und auf dem Gebiet der Supraleitungs-Forschung machte er sich einen Namen mit Weltrenommee. Meißner hatte als Dritter weltweit und in Deutschland sogar als Erster eine Apparatur konstruiert, mit der sich zimmerwarmes Heliumgas in eine mehr als minus 200 Grad kältere Flüssigkeit verwandeln ließ – wenn er auch im ersten Anlauf nur 200 Milliliter ernten konnte.

Anlagen von heute produzieren jede Stunde rund 20 Liter flüssiges Helium. So auch der Verflüssiger in





Klaukins Kältereich: ein königsblauer Kasten, schlank wie ein Kühlschrank und übermannshoch. Obenauf thronen zwei nudeltopfgroße, in Edelstahl gekapselte Turbinen. Leider lässt sich die Metamorphose vom Gas zur Flüssigkeit nicht von außen beobachten. Doch was in der „blue box“ geschieht, ist keine Zauberei, sondern reine Thermodynamik, versichert Klaukin. „Der Prozess beruht darauf, die Wärmebewegung der Gasatome und damit die Temperatur des Gases in zwei nacheinander geschalteten Schritten drastisch zu verringern.“

Zunächst strömt Heliumgas unter einem Druck von 12 bar in die Turbinen. „Hier muss das Gas arbeiten und die Schaukelräder

der Turbinen auf mehrere tausend Umdrehungen pro Sekunde antreiben“, beschreibt Klaukin den Prozess. Die Energie, die es dafür braucht, zieht es quasi aus sich selber. Das wiederum geht auf Kosten der Wärmebewegung der Gasatome und das Gas kühlt auf rund minus 260 Grad Celsius ab. So vorgekühlt, wird es anschließend über ein Ventil blitzartig in einen Raum mit deutlich niedrigerem Gasdruck entlassen. Bei dieser Ausdehnung, die Wissenschaftler Entspannung nennen, entfernen sich die Heliumatome voneinander. Dabei müssen sie Anziehungskräfte überwinden. Für das gastypische Umherflitzen haben sie dann kaum noch Energie. Das Gas kühlt sich noch weiter ab und wird schließlich flüssig.

„Jeder, der schon einmal eine Sprühdose verwendet hat oder Luft aus einem Luftballon hat pfeifen lassen, kennt das Phänomen, dass sich Gase abkühlen, wenn sie sich plötzlich ausdehnen können“, veranschaulicht Klaukin den Effekt, der nach seinen Entdeckern Joule-Thomson-Effekt heißt. Allerdings kann dieser Effekt auch nach hinten losgehen und sich das Ganze plötzlich erwärmen – je nach der Art des Gases und je nach der Temperatur, bei der dieses Verfahren gestartet wird. „Bei Helium funktioniert er nur in der gewünschten Richtung, wenn es kälter als minus 239 Grad Celsius ist. Darum die Vorkühlung in den Turbinen“, erklärt der Kälte-Experte.

Nur wenige Meter vom Verflüssiger entfernt, füllt PTB-Mitarbeiter Uwe Weichelt in blauer Arbeitskluft flüssiges Helium aus dem großen Edelstahltank in eine dickbauchige, etwa einen Meter hohe Stahlkanne auf Rädern. Dazu schiebt der gelernte Schlosser einen fingerdicken Überfüllstab von oben in die Kanne. An einigen Metallteilen gefriert sofort Luftfeuchtigkeit, wird in der wärmeren Umgebung wieder flüssig und sinkt in dicken weißen Nebelschwaden zu Boden. Weichelt zieht den Überfüllstab wieder heraus und schraubt die Kanne zu. „In solchen 100-Liter-Kannen wird das flüssige Helium zu Messplätzen und Apparaturen transportiert“, erläutert er. Der Bedarf ist ausgesprochen schwankend. Manchmal gehen in einem Monat 6500 Liter flüssiges Helium raus und er kommt mit dem Abfüllen kaum nach. In anderen Monaten sind es nicht einmal 2000 Liter.

„Einen Helium-Bringdienst gibt es aber nicht“, sagt Weichelt. Die Wissenschaftler holen die Kannen persönlich ab und rollen sie über den asphaltierten Hof zum Einsatzort. Zum Beispiel in die zimmergroße, graue Metallkabine der Arbeitsgruppe „Kryosensoren“. Hier werden so genannte SQUIDs gebaut und vermessen. „Das sind hochempfindliche Sensoren aus supraleitenden Materialien, die nur bei Tiefsttemperaturen funktionieren und mit denen sich selbst sehr schwache Magnetfelder und elektrische Ströme messen lassen“, erklärt Thomas Schurig, der die Arbeitsgruppe leitet. Mit den flachen, etwa fingernagelgroßen SQUIDs lassen sich zum Beispiel biomagnetische Felder des Herzens oder des Gehirns

messen – MEG oder MKG, das biomagnetische Pendant zum EEG oder EKG. Zudem kann man mit SQUIDs auch die Verteilung neuartiger Medikamente im Körper beobachten; gekoppelt an magnetische Nanopartikel, werden diese Medikamente über ein äußeres Magnetfeld direkt zum Krankheitsherd, etwa einen Tumor, gelenkt.

Die PTB-SQUIDs kommen außerdem in Geräten zur Materialanalyse zum Einsatz und werden für die Entwicklung zukünftiger satellitengestützter Teleskope für die Röntgenastronomie genutzt. „Weil das zur Kühlung der SQUIDs erforderliche flüssige Helium nicht überall verfügbar ist, wird verstärkt an neuen Kühlaggregaten gearbeitet, für deren Betrieb man lediglich eine Steckdose braucht“, berichtet Schurig. Doch zurzeit ist die SQUID-Forschung ohne flüssiges Helium noch völlig undenkbar.

Insgesamt brauchen die PTB-Forscher in Berlin jedes Jahr mehr als 50000 l flüssiges Helium, das bei den kalten Experimenten wieder wärmer und dabei gasförmig wird. Eine Wiederaufbereitung der riesigen Gasmengen – aus jedem Liter Kühlflüssigkeit werden 750 l Gas – rechnet sich in jedem Fall, meint der Chef der Heliumzentrale Götz Klaukin: „Die wirtschaftliche Bilanz unserer Verflüssigungsanlage fällt schon ab einem Bedarf von etwa 25000 Litern im Jahr positiv aus.“ Immerhin kostet ein Liter frisches flüssiges Helium im Handel zwischen sieben und zehn Euro.

Zur Wiederaufbereitung wird das benutzte Helium von den Laborplätzen und Messapparaturen durch armdicke Rohre in eine Sammelblase geführt. Auch unter der etwa fünf Meter hohen Decke der Heliumzentrale hängt so eine Blase: knallgelb und vom Format eines Schlauchbootes mit Platz für eine größere Patchworkfamilie. Rund 40 Laborplätze seien an diese und drei weitere Sammelblasen in anderen Gebäuden angeschlossen, sagt Klaukin. „Von dort strömt das Gas durch ein Rohrsystem in einen Vorratstank im Keller und wird unter einem Druck von 150 bar zwischengelagert, bis es wieder in den Verflüssiger kommt.“ Dann beginnt der Kreislauf der Kälte von Neuem. ■

ANDREA HOFERICHTER

Frisch gezapft: Uwe Weichelt befüllt eine Kanne mit flüssigem Helium.



Edel und leicht

Zwei Neutronen, zwei Protonen und zwei Elektronen: So einfach ist die Zutatenliste für ein außergewöhnliches chemisches Element. Helium riecht nicht, schmeckt nach nichts und verbindet sich, selbst unter extremen Bedingungen, nicht mit anderen Substanzen. Wegen seiner vornehmen Zurückhaltung in Sachen chemischer Reaktionen wird Helium auch als Edelgas bezeichnet und kommt unter anderem als Schutzgas beim Schweißen zum Einsatz. Weil es zudem leichter ist als Luft, bringt es Ballons und sogar Zeppeline zum Schweben. Und wenn es eingeatmet wird, wovon Ärzte allerdings abraten, ändert es die Schallgeschwindigkeit im Mund und verleiht einem eine quietschige Stimme à la Micky Maus. Gewonnen wird Helium aus Erdgas. Zurzeit sind weltweit nur wenige Erdgasquellen erschlossen, die das Edelgas in nutzbaren Mengen enthalten. Diese Quellen könnten in wenigen Jahrzehnten erschöpft sein – ein zunehmendes Problem, denn der Bedarf steigt pro Jahr um rund 6 %. Schuld daran sind nicht nur die Tieftemperaturphysiker, sondern vor allem die Industrie, die von der Chipherstellung bis zum Laserschweißen mit flüssigem oder gasförmigem Helium arbeitet.

ah

Fotos (3): original-oerkerland

Das Atom, das aus der Kälte kam

Wie man Atome mit Laserlicht kühlt und warum Polarforscher davon ein Lied singen können.

Man kann nur ahnen, wie sich der britische Offizier und Polarforscher Robert Falcon Scott und seine Begleiter 1912 auf ihrer Antarktisexpedition gefühlt haben, als die Schritte immer langsamer wurden, die Sinne unklarer. Sie hatten einen Monat nach Roald Amundsen den geographischen Südpol erreicht. Und nun, auf dem Rückweg, lähmten klirrende Kälte und Unterernährung ihre Kraft, eisiger Wind machte das Vorwärtkommen schließlich unmöglich. Am Ende kam niemand mehr aus dem Zelt. Der Wettlauf zum Südpol war verloren und endete in tödlicher Erstarrung.

Schon längst liegen die kältesten Orte der Erde nicht mehr am Pol, sondern im Labor. Weltweit schicken Wissenschaftler Atome ins Rennen um den Kälterekord – Atome,

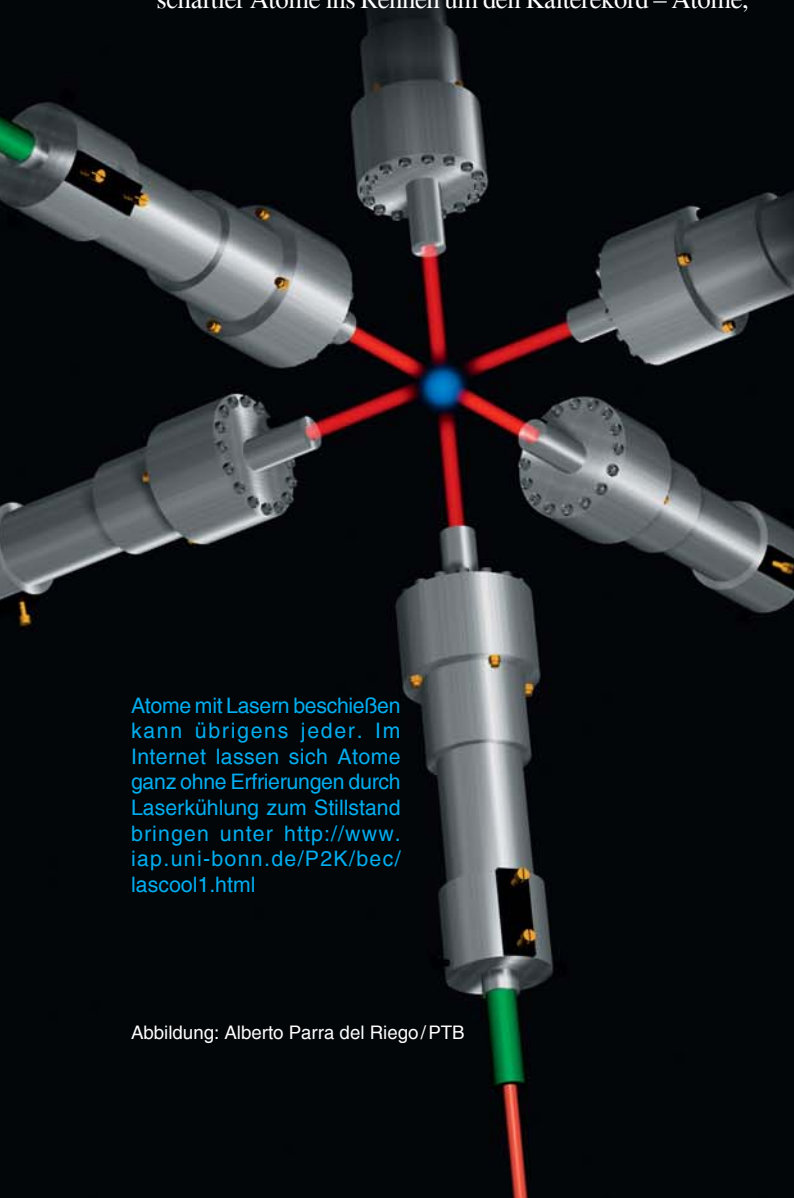
die ein „Gegenwind“ aus Laser-Photonen mit Millionen Treffern pro Sekunde ausbremst und nahezu zum Stillstand bringt. Mal werden die Atome einzeln auf den Weg gebracht, mal als Wolke oder als Strahl. Immer geht es darum, ihre unermüdliche Bewegung zu bremsen, jedes Zappeln und Vibrieren auf ein Minimum zu beschränken. Und das ist es, was nicht nur am Pol über Leben und Tod entscheidet, sondern auch rein physikalisch betrachtet Wärme und Kälte bestimmt: die Bewegung. Genauer gesagt: die innere kinetische Energie der sich bewegenden Atome in einer Ansammlung von Teilchen.

Die PTB-Wissenschaftler um Robert Wynands gehören zu denen, die Atomwolken kalt machen. Kalte Atome sorgen für die hohe Genauigkeit der PTB-Atomuhren, die Deutschland und seine Nachbarländer millisekundengenau mit der korrekten Zeit versorgen. Zum Kühlen richten die Physiker ihren Laser auf eine Wolke aus handwarmen, also wild durcheinander fliegenden Cäsium-Atomen. Jedes Mal, wenn ein Atom von einem Photon, einem Lichtteilchen, getroffen wird, bekommt es einen kleinen Schubs entgegen seiner Flugrichtung und wird dadurch gebremst. Nach etwa 80 000 Schubsen – der Physiker spricht hier von Impulsüberträgen – hat sich die Geschwindigkeit des Atoms von 300 Metern pro Sekunde auf einen Zentimeter pro Sekunde verringert. Wie ein Sturm, der dem Polarforscher Millionen kleiner Eiskristalle entgegenschleudert, bis er keinen Schritt mehr weiter kann, so bremst der Beschuss mit Laserlicht einer genau abgestimmten Frequenz die Bewegung der Atome. „Die Teilchen bewegen sich schließlich mit der schleppenden Geschwindigkeit einer mittelschnellen Ameise“, erklärt Wynands. Kommen die Laserstrahlen gar aus allen sechs Raumrichtungen, bleibt das Atom stecken wie in einer dickflüssigen Melasse.

Auf diese Weise haben Wynands' Cäsiumatome in Windeseile nur noch eine Temperatur von zwei millionstel Kelvin. Zwar nehmen sie kurzzeitig bei jeder Absorption eines Photons wieder zusätzliche Energie auf, doch diese wird bereits nach kürzester Zeit wieder abgegeben – was dem Atom einen klitzekleinen Rückstoß in eine beliebige Richtung beschert. Dieser kleine Rückstoß beeinflusst zwar minimal die Flugbahn des Atoms, doch bei Zehntausenden von Impulsen, verteilt über alle Raumrichtungen, hebt sich dieser Effekt praktisch auf. Was in der Summe übrig bleibt, ist die bremsende Kraft aller absorbierten Photonen, die dem Atom entgegenkommen. Wie ein beständiger Gegenwind.

Atome mit Lasern beschießen kann übrigens jeder. Im Internet lassen sich Atome ganz ohne Erfrierungen durch Laserkühlung zum Stillstand bringen unter <http://www.iap.uni-bonn.de/P2K/bec/lascool1.html>

Abbildung: Alberto Parra del Riego/PTB



Damit das Atom wirklich immer genau von vorne gebremst wird, verwenden die Physiker einen Trick: Atome können nämlich nur Licht bestimmter Wellenlänge absorbieren. Stellt man nun einen Laser auf diese Wellenlänge ein und legt noch ein bisschen was drauf (ja genau: man macht die Welle einen Tick länger, als eigentlich passend wäre), „sieht“ das Atom genau die Frequenz, die es absorbieren kann – aber nur, wenn es auf den Laser zufliegt. Durch die Bewegung aufeinander zu erscheint die Lichtwelle sozusagen gestaucht und mit höherer Frequenz – das nennt man Dopplereffekt. Ergo: Das Atom schluckt das Photon – aber eben nur, wenn es von vorne kommt. Kommen Photonen wie ein lästiger Seitenwind oder gar von hinten daher, ist das dem Atom schnurzpiegal, weil die dann nicht die richtige Frequenz haben. Das Kühlen und Einfangen von Atomen mit Hilfe von Laserlicht ist noch eine recht junge Technik: 1997 gab es dafür den Physik-Nobelpreis.

Und wozu das Ganze? Anders als Polarforscher, die in gefrorenem Zustand kaum mehr von Nutzen sind, eröffnen eiskalte Atome den Physikern ganz neue Möglichkeiten: Endlich sind sie so langsam, dass man sie mal in Ruhe untersuchen kann. Robert Wynands und seine Kollegen zum Beispiel fangen ihre kalte Atomwolke in einer Falle aus sechs Laserstrahlen und einem Magnetfeld. Dann kommt eine zweite Sorte Strahlung ins Spiel: Mikrowellen. Mit deren Hilfe lassen sich die Elektronen in der Atomhülle des Cäsiums auf ein höheres Energieniveau heben – aber nur, wenn die Strahlen die richtige Frequenz haben. Atome sind da wählerisch. Wenigstens sind sie durch die Kühlungs-Prozedur soweit gebändigt, dass sie schön stillhalten und es den Forschern gestatten, die ihnen angenehme Mikrowellenfrequenz besser einzustellen. Ist die richtige Frequenz gefunden, lässt sich damit die Basiseinheit Sekunde darstellen: Die Dauer von 9 192 631 770 Schwingungen ergibt im Fall des Cäsiums eine Sekunde; so ist es seit 1967 international definiert. In den zurzeit genauesten Uhren der PTB, den Cäsiumfontänen, kühlt man zuerst eine Wolke von rund zehn Millionen Atomen und wirft sie dann mit Laserlicht einen Meter in die Höhe. (Dieses Laserlicht hat nichts mit der Kühlung zu tun; es ist gewissermaßen die dritte Strahlung, die die Atome trifft). Die kalten Atome fallen von selber wieder herunter, passieren also zweimal den Mikrowellen-Vorhang, und die Forscher haben zweimal die Gelegenheit, die richtige Mikrowellenfrequenz zu treffen. Solche Uhren erreichen eine Ungenauigkeit von besser als $1 \cdot 10^{-15}$. Anders gesagt: Liefere diese Uhr schon seit 30 Millionen Jahren, würde sie heute höchstens um eine Sekunde falsch gehen.

Doch das reicht den Forschern nicht, sie wollen es noch genauer wissen. Und so experimentiert PTB-Kollege Uwe Sterr nicht mit Mikrowellen, sondern mit optischem, also sichtbarem Licht. Daher heißt sein Forschungsprojekt auch „optische Atomuhr“. Sterr und seine Kollegen kühlen ihre Strontiumatome ebenso wie Wynands mit Laserlicht und einigen anderen Tricks. Wenn die dann nur noch ein eiskaltes millionstel Grad haben und kaum mehr träge zucken, werden sie durch sichtbares Licht auf ein höheres Energieniveau gehoben. Hat Uwe Sterr die genaue Refe-

renzfrequenz gefunden, mit der sich die Strontiumatome anregen lassen, hat er Zeit. Und zwar eine sehr genaue. Denn ebenso wie bei den bisherigen Atomuhren kann er mit Hilfe der Frequenz die Sekunde darstellen – aber viel exakter und stabiler, weil die Frequenz sichtbaren Lichts viel höher als die von Mikrowellenstrahlung ist. Wenn die neue optische Atomuhr erstmal läuft, werden nicht etwas mehr als 9 Milliarden Schwingungen eine Sekunde ausmachen, sondern mehr als 429 Billionen.



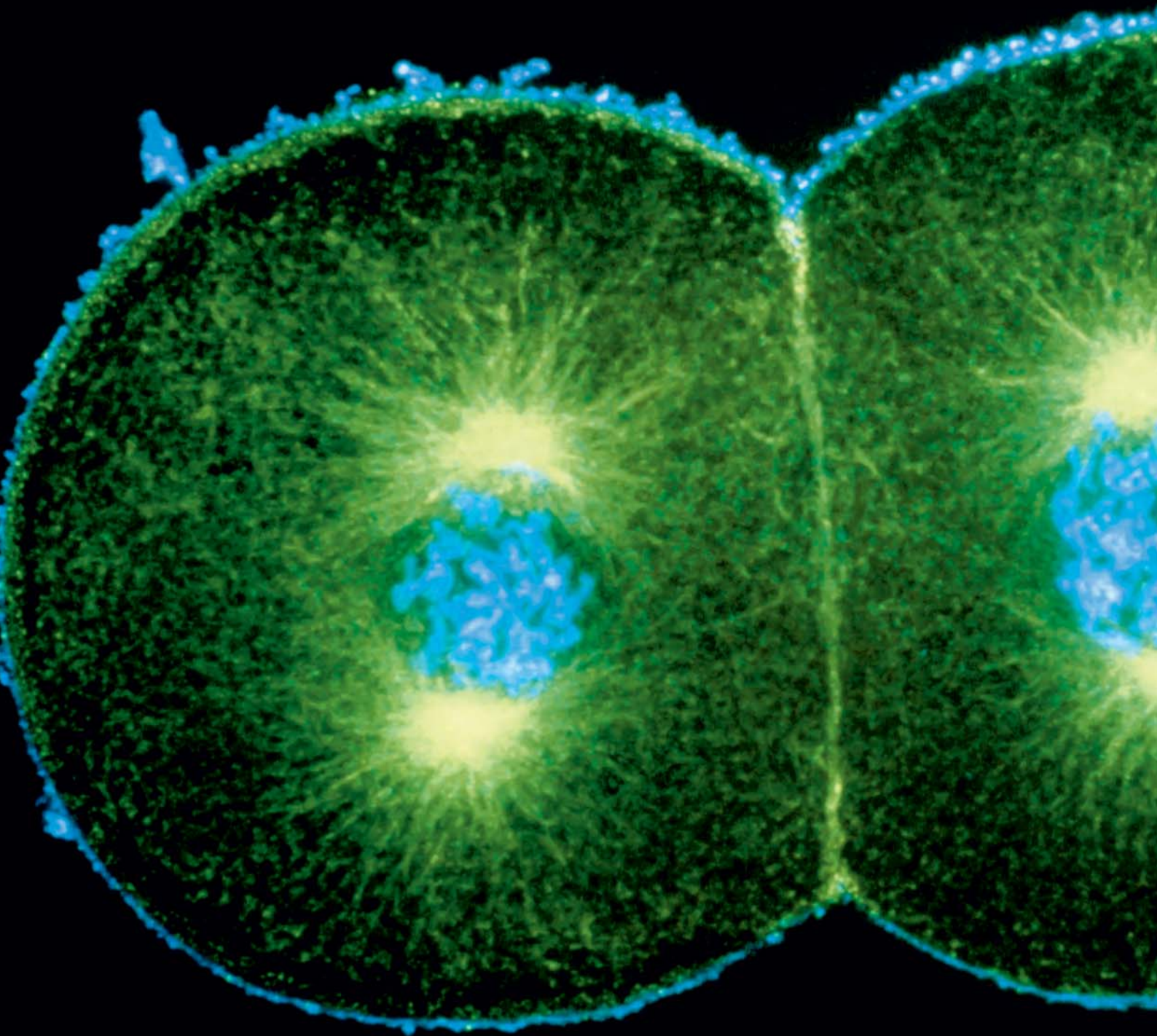
Foto: Marc Steinmetz/VISUM

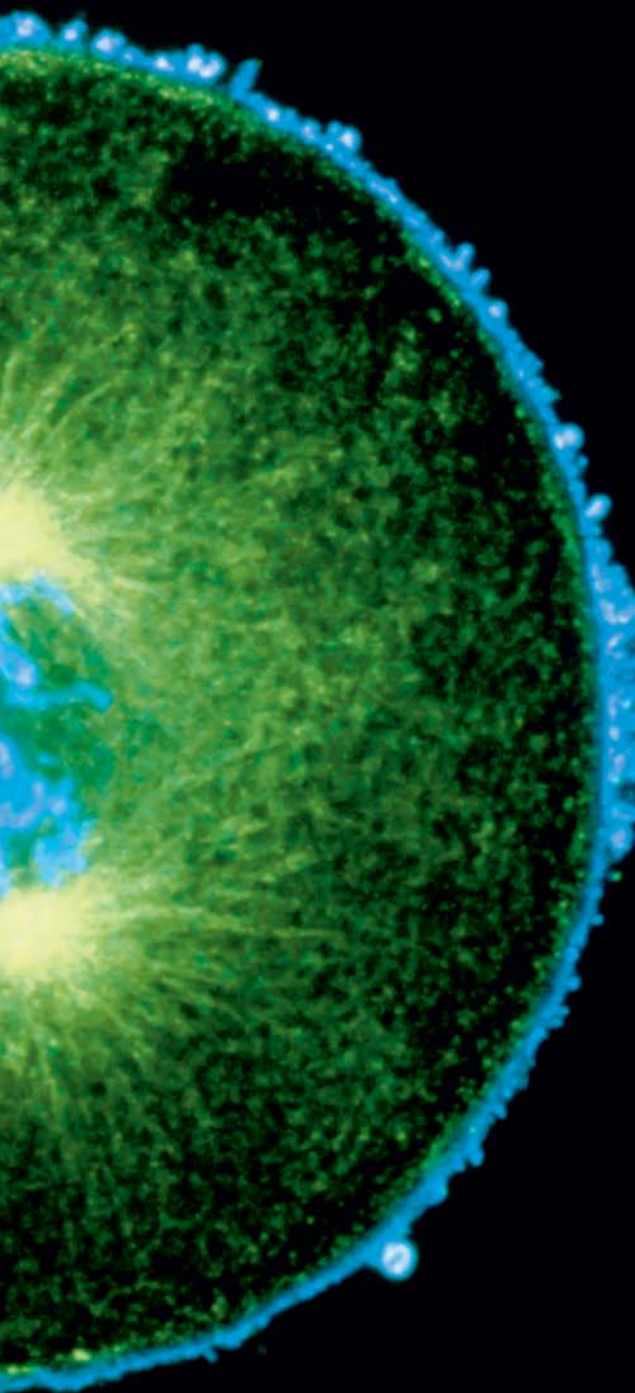
Robert Wynands überprüft die Einkopplung der Laserstrahlen bei einer der beiden PTB-Fontänenuhren.

„Optische Uhren gelten als die Atomuhren der Zukunft“, stellt Uwe Sterr bescheiden fest. „Sie könnten das GPS verbessern und Planetenmissionen begleiten – allerdings müssten sie dazu noch deutlich kleiner werden.“ Wohl wahr, angesichts der quadratmetergroßen optischen Bank mit all ihren Linsen und Blenden. Mögliche Anwendungen haben die Forscher bei ihrer Tüftelei an immer genaueren Uhren wohl im Hinterkopf, aber liegt der wahre Antrieb nicht einfach in der Gewissheit, es schaffen zu können? Im Wunsch, die Erfahrung aus dem Bau einer Uhr in die Entwicklung der nächsten einfließen zu lassen und so die Grenze des Erreichbaren weiter zu verschieben?

Diese Motivation könnte auch die unglücklichen Polarforscher 1912 angetrieben haben: Sie wollten versuchen, was noch keinem vor ihnen gelang, und sie waren überzeugt, es schaffen zu können: als erste Menschen den geographischen Südpol zu erreichen. Doch ob Antarktis oder Labor – ungeahnte Schwierigkeiten können jeden noch so guten Plan durchkreuzen. Im ersten Fall führt das zum Tod, im zweiten schlimmstenfalls zum Verlust von Motivation und Reputation. Nur ganz selten führt der Weg – wie bei Scott – auch direkt ins Geschichtsbuch. Und zum Trost sei gesagt: Alle, die dort stehen, sind längst kalt. ■

IMKE FRISCHMUTH





Leben

Was ist Leben? Schon viele, ob Naturwissenschaftler oder Philosophen, haben sich mit dieser Frage herumgequält. Sie haben lange Listen mit notwendigen Kriterien entworfen, um das gewisse Etwas, das ein Mensch hat, das ein Bakterium hat, nicht aber – beispielsweise – das Feuer, erschöpfend zu charakterisieren. Die folgenden Kriterien gehören sicher dazu: Energie-, Stoff- und Informationsaustausch, Reaktion auf Veränderungen der Umwelt, Wachstum und Fortpflanzung. Die letzten beiden beruhen bei allen bekannten Lebewesen der Erde auf denselben Bausteinen: RNA und DNA, mit deren Hilfe Aminosäuren und Eiweiße hergestellt werden. Wenn man sich das im Einzelnen anschaut – so wie bei dem Seeigel-Ei auf dem Foto, das bereits befruchtet ist und sich ein erstes Mal geteilt hat; auch die zweite Teilung steht schon bevor – dann ist es leicht zu verstehen, dass die feinen, äußerst präzisen Strukturen ziemlich störungsanfällig sind. Kälte beispielsweise lässt das Wasser in den Zellen gefrieren, die Eiskristalle wirken wie ein Rammbock auf die feinen Bausteine des Lebens. Dagegen hilft ein äußerer Schutz (Federn, Fell und Co), der aber höheren Lebewesen vorbehalten ist. Die anderen können rechtzeitig vor einer extremen Periode Überdauerungsstadien wie Sporen oder Zysten bilden, in denen das Leben auf die nächste gute Zeit wartet. Sind die Bedingungen ständig frostig, hilft für die Einzeller und Bakterien nur die chemische Lösung: Frostschutzmittel, die bei den Spitzenreitern auch bei $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ noch wirken. Hitze dagegen zerstört die chemische Struktur der Körpereiwieße. Wieder sind es Bakterien, die mit Hilfe spezieller Schutz-Enzyme auch noch Temperaturen von $121\text{ }^{\circ}\text{C}$ quicklebendig überstehen. Wie derartige „Tricks“ funktionieren, ist den Forschern noch weitgehend ein Rätsel. Es ist schwierig, Bakterien aus Extremstandorten unversehrt ins Labor zu transportieren und dort die Lebensbedingungen auch noch anständig zu simulieren. Und vielleicht sind die wahren Rekordhalter noch gar nicht gefunden worden. Darum kann man nur vermuten, wo die letztgültige obere Grenze für Leben liegt: Bei $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ dürfte Schluss sein.

Foto: Prof. G. Schatten/SPL/Agentur Focus

ERIKA SCHOW

Tierisch extrem

Heiß heute, sehr heiß!! Mein T-Shirt klebt mir am Rücken, literweise trinke ich lauwarmes Wasser; ich sollte die Flaschen in den Kühlschrank ... nein, ich sollte ganz in den Kühlschrank übersiedeln – oder doch gleich in die Tiefkühltruhe? Auch da ist Leben möglich, wenn auch nicht unbedingt menschliches. Überhaupt sind wir Menschen ja Schwächlinge, wenn es darum geht, große Hitze oder große Kälte auszuhalten. Am besten lege ich mich aufs Sofa, genieße die Bewegungslosigkeit und lese, wie gut andere Kreaturen mit extremen Temperaturen zurechtkommen.

heiß

Für manche Lebewesen wäre dies gerade der richtige Tag. Thermophil nennt man diejenigen, die bei Temperaturen oberhalb von 45 °C noch sehr anständig leben können. Darunter einige Wüstenbewohner wie der Fennek (Wüstenfuchs). Er kommt gut mit der Hitze zurecht, aber große Anstrengungen wie die Jagd verlegt er doch lieber in die Dämmerungsstunden. Immerhin kann er seinen Wasserbedarf, wenn nötig, ausschließlich über die Nahrung decken. Anders macht es der Nebeltrinker-Käfer, der in den frühen

Morgenstunden Hinterbeinchen und Flügel in die Luft reckt, um den Tau aufzufangen und das nanoskopische Wassersrinnsälchen direkt in die Mundwerkzeuge zu leiten.

Der Nebeltrinker-Käfer ist ein Hitzespezialist. An einer anderen Käferart, die ebenfalls in der Namib-Wüste lebt und sich recht ähnlich verhält, haben Forscher genauer untersucht, wie die Käfer den Nebel aus der Luft auffangen. Der Clou ist eine Kombination von Wasser anziehenden und Wasser leitenden Strukturen auf seinem Rücken. Im Magazin „Nature“ schlugen sie vor, mit speziellen Zeltplanen könne auch der Mensch nach Käfer-Vorbild Wasser sammeln.

Foto: wikipedia.org/www.biodiversity.org.na

Um die Flüssigkeitszufuhr muss jener Kollege sich gar nicht kümmern: *Thermus aquaticus*, ein wärmeliebendes Bakterium, das zu den aus frühester Zeit der Erde stammenden Archaeobakterien gehört und heiße Bäder schätzt. Im Yellowstone-Nationalpark in den USA hat er in 50 °C bis 80 °C heißen Quellen einen exquisiten Lebensraum gefunden.

Und für Strain 121 wäre der heutige Tag sogar unangenehm kalt. Strain 121 ist der derzeitige Spitzenreiter unter den wärmeliebenden Lebewesen und stellt schon bei weniger als 85 °C seine Vermehrung ein. Richtig gut geht es ihm bei der Temperatur, bei der medizinische Geräte sterilisiert werden (121 °C) und bei der alle anderen Mikroben auch ordnungsgemäß ihren Geist aufgeben. Strain 121 konnte sich dabei noch problemlos vermehren und verwies nebenbei den bisherigen Rekordhalter *Pyrolus fumarii* auf Rang 2 (denn der vermehrt sich nur bei maximal 113 °C). Ob sich die Ärzte jetzt Gedanken über die Sicherheit ihrer Sterilisatoren machen müssen?

Zum Glück ist es unwahrscheinlich, dass sich Strain 121 in Arztpraxen verirrt. Er wurde 2003 in der Tiefsee in der Umgebung eines „Schwarzen Rauchers“, eines heißen Schlots, am Boden des Pazifiks entdeckt.

Jetzt ist mir noch heißer geworden. Selbst schuld. Also, erstmal ein Eis aus der Tiefkühltruhe – und dann sind die anderen Extremisten dran: die Lebewesen in enormer Kälte.

kalt

Zurück aus der Küche, komme ich ins Träumen: Ob ich nicht doch mal in den Yellowstone-Park reisen sollte? (Die Tiefsee ist mir doch nicht so geheuer.) Da fällt mir aus dem Stapel neben dem Sofa ein Kinderbuch in die Hände: „Affenheiß und schweinekalt – die Überlebenstricks der Tiere“ –, und ich lese, dass der „totale Gewinner“ unter den Tieren gleich um die Ecke lebt: im Park nebenan oder im Garten. Es ist, so die Autoren, „das allerstärkste Tier der Welt, das es überlebt, gefroren, gekocht und zerquetscht zu werden und noch einige andere Dinge mehr“. Und das, obwohl es aussieht wie ein Witz, wie ein winziges Gummibärchen nämlich. Es heißt folgerichtig Bärtierchen und ist nahezu weltweit anzutreffen, bevorzugt in Mooskissen und Gewässern. Allerdings sind die größten Exemplare nur rund einen Millimeter groß. Genauso wie die

Archaeobakterien, leben Bärtierchen schon sehr lange auf der Erde, sie tauchten vor mehr als 530 Millionen Jahren hier auf. Sie haben alle Eiszeiten und Dürreperioden überstanden, weil sie es schaffen, extreme Temperaturen mit einem wirkungsvollen Trick zu überleben: Beim ersten Anzeichen von Gefahr – ein bisschen Dürre oder ein Kälteeinbruch – ziehen sie ihre Körperglieder ein und falten ihren Körper zusammen wie ein Teleskop. Sie füllen ihre Zellen mit Zucker, um sie haltbar zu machen, trocknen aus und verlieren bis auf 1 Prozent sämtliches Wasser aus dem Körper. In diesem Zustand, in dem sie auch „Tönnchen“ genannt werden, sind sie fast unzerstörbar. Wissenschaftler haben diese Tönnchen bis auf 150 °C erhitzt, sie bis ganz nahe an den absoluten Nullpunkt eingefroren, sie unter Vakuum gesetzt oder mit Röntgenstrahlen beschossen – hinterher kamen die Bärtierchen stets wieder zu sich und lebten weiter, als sei nichts geschehen. Im September 2008 haben Wissenschaftler herausgefunden, dass Bärtierchen zehn Tage lang ungeschützt im Weltraum überleben können. Das bedeutete gleich dreifachen Stress: extreme Strahlung, ein fast perfektes Vakuum und auch hier wieder Temperaturen nahe am absoluten Nullpunkt.

An so etwas Kaltes zu denken hilft mir ungemein – langsam macht das freie Sinnieren auch wieder Spaß. Warum interessieren sich Forscher eigentlich für die Rekordhalter unter den Lebewesen? Naja, herauszufinden, wie sich das Leben auf der Erde gebildet haben könnte, das muss schon spannend sein. Oder gar zu untersuchen, wie es in Vergangenheit oder – wer weiß? – in der Zukunft mit Leben außerhalb der Erde aussieht.

Im All passiert ja momentan überhaupt so einiges. Im Mai ist auf dem Mars die Expedition Phoenix auf der Suche nach Spuren von flüssigem Wasser fündig geworden: „Wir haben Eis und Wasser geschmeckt!“, jubelten die Wissenschaftler euphorisch, so als ob sie selber dort oben gewesen wären. (Tja, eine gute Phantasie ist alles, das merke ich heute schon die ganze Zeit.) Ein mehr als zwei Meter langer Roboterarm mit einer kleinen Schaufel hatte sechs Zentimeter tief in den Boden gekratzt, die Proben auf 1000 °C erhitzt, und anschließend hat Phoenix dann die Gase mit einem Massenspektrometer untersucht, das zeigen soll, ob in der Gegend Leben möglich (gewesen) wäre. War das Eis auf dem Mars wirklich jemals flüssig? Gibt es vielleicht sogar periodisch wiederkehrende Tauzeiten? Wenn ja, dann und nur dann könnte auf dem Mars, dessen Klima als lebensfeindlich (viel zu kalt!) gilt, Leben stattgefunden haben oder vielleicht sogar weiterhin geschehen, wenn auch nur in mikrobiologischen Dimensionen.

Aber nicht nur auf dem Mars selbst soll eine Antwort auf diese Frage gefunden werden. Die Untersuchung besonders kälteresistenter Bakterien auf der Erde soll vom blauen Planeten aus Rückschlüsse auf den roten



Wenn es ums Überleben unter widrigen Bedingungen geht, sind Kleinheit und Einfachheit eindeutig von Vorteil. Das gilt auch für die weniger als einen Millimeter großen Bärtierchen, die vielleicht robusteste Gruppe unter den Vielzellern.

Foto: www.tardigrades.com

Planeten erlauben. Und wieder sind es Bakterien, die unter den Lebewesen die Kälterekorde aufstellen. *Colwellia psycherythraea* produziert Frostschutzmittel und Enzyme, die es vor Kälteschäden schützen. Selbst bei Temperaturen um die –200 °C lassen sich noch Stoffwechselaktivitäten feststellen.

Inzwischen ist es Abend geworden, herrlich kühle Luft – und, siehe da, ich spüre auch wieder Stoffwechselaktivitäten. Zeit fürs Abendessen! ■

BIRGIT EHLBECK

In den 1960ern Jahren war *Thermus aquaticus* die „Sensation vom Yellowstone Park“. Danach beachtete niemand mehr das Bakterium – bis 20 Jahre später Gentechniker auf die Daten stießen, die sein Entdecker Thomas Brock in eine Datenbank gestellt hatten. Dieses Bakterium hatte genau das zu bieten, was sie suchten: ein besonders hitzeunempfindliche Enzym, das die so genannte Polymerase-Kettenreaktion entscheidend vereinfachte. Heute ist sie eine Routinemethode der Gentechnik. Mit ihrer Hilfe kann ein winziger DNA-Schnipsel so vervielfältigt werden, dass innerhalb von wenigen Stunden genügend Material für die aufwendigsten Untersuchungen und Analysen vorliegt. So hilft *Thermus aquaticus* weltweit bei der Erkennung von Erbkrankheiten und Virusinfektionen oder bei der Erstellung und Überprüfung genetischer Fingerabdrücke.

Foto: [wikipedia.org/Kanadisches Landwirtschaftsministerium](http://wikipedia.org/Kanadisches_Landwirtschaftsministerium)

37 °C - der besondere Thermostat

Warum hält der Mensch in der Sauna 100 °C aus, wenn er doch bei 43 °C Fieber schon stirbt? Und warum erfrieren manche schon knapp unter dem Nullpunkt, obwohl andere in minus 60 °C leben oder gar viele Minuten in Eiswasser ohne Spätfolgen überstehen? Thermoregulation ist das Zauberwort: die flexible Antwort des Körpers auf ständig wechselnde Umweltbedingungen.

Treffen sich ein Eskimo und ein Afrikaner in Berlin. Sagt der Eskimo: „Heißes Pflaster hier!“. Sagt der Afrikaner: „Genau. Voll cool!“ – Die siebenjährige Marie schüttelt sich vor Lachen: „Verstehste? Weil, beim Eskimo isses ja immer kalt sonst. Und so'n Afrikaner friert bestimmt in Berlin. Besonders bei Sauwetter...“, und kichert weiter. Dabei hat Marie gerade am eigenen Leib das Körnchen Wahrheit gespürt, das auch in

Ein Mann sonnt sich, beobachtet von einer Wärmekamera. Sie zeigt, wie gut die Wärmeregulation seines Körpers funktioniert – aber auch deren Grenzen. Während sein Körperkern mit den lebenswichtigen Organen darin gleichwarm bleibt, heizt sich sein Kopf, mit nicht minder lebenswichtigen Organen, immer mehr auf. Schließlich erreicht sein Gesicht etwa 35 °C. Spätestens jetzt sollte der Mann lieber in den Schatten gehen.

Abbildung: Dr. Arthur Tucker/SPL/Agentur Focus

den simpelsten Witzen steckt. Im Experimentierunterricht testete sie den „Versuch mit dem Wasserglas“: Linke Hand im Eiswasser, rechte Hand in ziemlich heißem, und nach einer Minute alle Finger zusammen in ein nur noch lauwarmes Bad tauchen. Da kommt nicht nur das kindliche Hirn schon mal durcheinander. Warum kribbelt die linke Hand wohligh warm, während die rechte fröstelt – wo doch beide klar im lauwarmen Nass liegen?

Die Antwort steckt im Hirn. Genauer gesagt im Hypothalamus, jenem walnussgroßen Teil des Zwischenhirns, das vollautomatisch die meisten Körperfunktionen regelt: die Atmung, die Organfunktionen, grundlegende Emotionen und eben auch die Körpertemperatur. Hier laufen die Signale von Sinnesorganen und Hormonsystem zusammen – und die Befehle für körperliche und psychische Reaktionen wieder in alle Richtungen auseinander.

Marie hat zwar von Thermoregulation noch nie gehört, doch die erfolgt ja auch ohne Nachdenken. Futter liefern die Kälterezeptoren in der Haut: Nervenenden, die den Unterschied zwischen der Körpertemperatur und der Umgebung wahrnehmen, rund zwölf auf jedem Quadratzentimeter Haut und rund um die Uhr bei der Arbeit. Allerdings melden Kälterezeptoren keine absolute Temperatur, sondern immer nur Veränderungen. Anschauliches Beispiel ist der Frosch im heißen Wassertopf, von dem sogar Marie schon gehört hat. „Total fies!“ findet sie das: Setzt man den Quaker direkt in heißes Wasser, wird er entsetzt wieder heraushüpfen. Setzt man ihn aber in lauwarmes und erhitzt es nur langsam, so kann es passieren, dass er die Gefahr erst spürt, wenn es zu spät ist – wenn sein Körperinneres schon so weit überhitzt ist, dass es Schaden nimmt.

Ab 40 °C wird's kritisch

Wie bei hohem Fieber oder Hitzschlag: „Bei mehr als 41 °C zersetzen sich die Eiweiße im Körper und die Zellen werden unwiderruflich geschädigt. Bereits 43 °C sind tödlich“, so die Physiologin Frances Ashcroft von der Oxford University. Ihr Buch „Life at the Extremes“ beschreibt, wie der menschliche Körper mit extremen Bedingungen wie Hitze, Kälte, Wassermangel, dünner Höhenluft oder auch im Weltall umgeht. Wenn der Körperkern eine bestimmte Temperatur überschreitet, rächt sich, dass er zum guten Teil aus Proteinen (Eiweißen) besteht. Wird es zu heiß, geht es einigen lebenswichtigen unter ihnen wie dem Eiweiß im Spiegelei: Sie gerinnen, denaturieren, ihre hochgeordnete Struktur wird zum wirren Knäuel. Eigentlich ist das das Ziel von Fieber: Wenn Marie krank im Bett liegt, fährt ihr Immunsystem die Körpertemperatur gerade so hoch, dass biochemische Abläufe beschleunigt und hitzeempfindliche Erreger „zu Klump gekocht“ werden. Doch gerät das Fieber außer Kontrolle, erhitzt den Körper mehrere Stunden lang über 40 °C oder steigt gar noch höher, dann schädigt es auch die körpereigenen Proteine. Sie können weder ihre spezifischen Aufgaben länger wahr-



nehmen noch werden sie von Rezeptoren erkannt. Was anfangs noch reparabel, umkehrbar ist, legt schließlich die gesamte Sauerstoff- und Energieversorgung lahm. Der Grundstoffwechsel bricht zusammen – tödlich.

Spätestens ab 40 °C sind also Wadenwickel oder fiebersenkende Medikamente fällig. Die feuchtkalten Wickel entziehen der Haut die Wärme – Wärme fließt immer von heiß nach kalt, auch beim „Wasserglas-Versuch“ – und die Rezeptoren melden nur die Veränderung: Etwas fühlt sich warm an, wenn Wärmeenergie in die Haut hineinfließt, und kalt, wenn sie hinausfließt. Physikalisch gesehen geben die wild vibrierenden Moleküle im Körper Bewegungsenergie an ihre Nachbarn und so schließlich an die ruhigeren Moleküle im kühleren Wadenwickel ab, bis alle sich angeglichen haben. Zeit für den Wickelwechsel.

Währenddessen sorgt auch die Feuchtigkeit auf der Haut für Verdunstungskälte: Wenn das Wasser den Aggregatzustand wechselt, von Flüssigkeit zu Dampf wird, entzieht es der Oberfläche weitere Energie. Und weht dann noch ein laues Lüftchen, das die Dampf-moleküle direkt fortträgt, so können gleich die nächsten Tropfen verdunsten: Das Abkühlen beschleunigt sich.

Das Weinkühler-Prinzip

Nach demselben Prinzip funktioniert das Schwitzen. Die äußeren Blutgefäße weiten sich, die Haut wird besser durchblutet, um Wärme abzuführen, und die Schweißdrüsen werden aktiv. „Der Körper kann durch Schwitzen Wärme bis zu zwanzigmal besser abführen“, so Frances Ashcroft, und sie nennt den Weinkühler aus Ton, der allein durch Verdunstungskälte im Inneren kalt bleibt. Doch schwüle Luft boykottiert das effektive System: Dschungelläufer heizen mehr auf als Wüstenläufer, weil die Luft ringsum schon nass ist und neuen Dampf – vom Schweiß – nicht mehr so gut aufnimmt. Und kein Wind trägt die wenigen neuen Dampf-moleküle fort. Um die Haut legt sich ein warmes Polster, darunter rinnt der Schweiß.

Deshalb Fächer, Luftwedel und Ventilatoren: Sie reißen das Polster weg, schaffen Raum für neue Verdunstung. Deshalb aber auch hält man es in der heißen, feuchten Sauna eine ganze Weile aus, obwohl die Umgebungsluft sich langsam 100 °C nähert – hier ist das Luftpolster an der Haut im Vergleich kühler und schützt vor der Hitze. Bis es der nächste Aufguss oder die birkenbüschel-schwingende Saunakraft wieder fortscheucht.

Und dann wird die Hitze unangenehm. Die Thermorezeptoren in der Haut spielen hier keine Rolle mehr, stattdessen melden Signale aus dem ganzen Körper dem Hypothalamus,



Eisbären per Wärmebildkamera zu zählen ist keine gute Idee: Außer vereinzelt Nasen und Augen sieht man nämlich gar nichts – und dies auch nur, wenn sich ein Eisbär nicht gerade abgewandt hat. Denn ein Eisbär ist fast perfekt isoliert: mit einer dicken Fettschicht und einem Fell, bei dem die innen hohlen Haare wie eine Mini-Daunendecke wirken.

dass ab etwa 38 °C die Überhitzung droht, die Hyperthermie. Entscheidend ist die Kerntemperatur: die Temperatur des Körperinneren, des Rumpfes. Während Haut, Arme und Beine auch schon mal heißer oder kälter werden dürfen, braucht der Körperkern, in dem alle wichtigen Organe sitzen, eine einigermaßen gleichbleibende Arbeitstemperatur – beim Menschen rund um 37 °C.

Arbeitet der Körper jetzt an der Abkühlung, muss er allerdings ein paar Kompromisse eingehen: Wegen der verstärkten Hautdurchblutung werden Hirn und Verdauungssystem weniger versorgt; die Schweißdrüsen spülen auf Dauer Wasser und wichtige Salze nach außen, so dass es zu Krämpfen kommen kann, das Blut verdickt sich und kann das Gewebe nicht mehr richtig durchfließen. Schlappeit, Schwindel und Übelkeit treten auf, je mehr die Temperatur steigt. Austrocknung kommt meist dazu, bis die Organe die Arbeit einstellen.

Damit es gar nicht erst soweit kommt, nutzt die Natur das Prinzip „möglichst große Oberfläche pro Volumen, durch die das Blut abkühlen kann“. Deshalb haben Wüstenfüchse und Elefanten so große Ohren, dicht mit Adern durchzogen. Libellen leiten ihr heißes Blut durch eine Art Kühlkörper im Hinterleib und die großen, adern-durchzogenen Nüstern der Kamele nutzen die Feuchte der ausgeatmeten Luft zum Kühlen.

Abbildung: T-Service/SPL/Agentur Focus

Wärmetauscher in den Beinen

Im anderen Extrem der Erde, in den Eiswüsten, gilt das gegenteilige Prinzip: möglichst kleine Oberfläche pro Volumen und möglichst dicke Isolierschicht drumherum. Tiere in der Arktis und Antarktis sind eher klein, auf jeden Fall aber gedrunken und mit kurzen Extremitäten, gut geschützt durch dicke Fettschichten oder Felle. Eisföchse haben nur sehr kleine Ohren, Wale und Robben tragen viel Speck und Pinguine frieren auf dem Eis nicht fest, weil in ihren Beinen ein Wärmetauscher sitzt: Das aufsteigende Blut aus den kalten Füßen fließt direkt am absteigenden vorbei und nimmt Wärme auf, bevor es in den Körperkern gelangt.

Beim Menschen funktioniert das weniger gut. Arme und Beine dürfen zwar kälter werden als der Kern, bei sinkender Temperatur mindert der Körper sogar die Durchblutung der Extremitäten, um weniger Wärme zu verlieren. Kleine herausstehende Gewebeteile wie Ohrläppchen, Finger, Nase, Wangen oder Zehen sind besonders gefährdet. Zunächst werden die Finger weißlich, erste Anzeichen von Erfrierungen, die sich durch Aufwärmen noch aufhalten lassen. Dann bilden sich Blasen oder Ödeme, Frostbeulen treten auf, bevor sich im Wasser in und um die Zellen schließlich große Eiskristalle bilden, die die Zellwände schädigen: Das Gewebe friert ab. Bergsteiger und Arbeiter im Eis können ein Lied davon singen.

Wie lange das Abfrieren dauert, hängt natürlich von der Lufttemperatur ab und davon, wie dick der Mensch eingepackt ist. Und vom Wind. Auch in der Kälte legt sich ein leichtes, warmes Luftpolster um die Haut. Wird es nicht von Kleidung festgehalten, kann der Wind es immer wieder fortreißen. Was bei Hitze noch als willkommene

Verdunstungskälte dient, kühlt bei Kälte den Körper aus. Je stärker der Wind, desto schneller das Abkühlen: Tabellen über den Windchill-Faktor zeigen, dass eine Lufttemperatur von 0 °C schon bei schwachem Wind von rund 30 Kilometern pro Stunde wie minus 6,5 °C wirken. Ein starker bis stürmischer Wind in kalten Gegenden kann die gemessene Temperatur noch einmal um 30 °C senken – gefährlich, wenn der Mensch nicht warm verpackt ist.

Fieber messen

„Die absolute Körpertemperatur gibt es nicht. Misst man an verschiedenen Stellen zu unterschiedlichen Zeiten, bekommt man unterschiedliche Werte“, weiß Jürgen Hartmann, Fieberthermometer-Spezialist der PTB in Berlin. Selbst die Kerntemperatur, im Schnitt 36,5 °C bis 38 °C, schwankt im Laufe des Tages (und bei Frauen auch im Laufe des Zyklus). Am höchsten liegt sie meist am frühen Abend, am niedrigsten gegen vier Uhr nachts. Vor allem aber muss jede verlässliche Messung möglichst nah an den Körperkern, so Hartmann. Wenn keine klinischen Thermometer im Einsatz sind, deren Sensoren, verkabelt, direkt im Körper stecken, dann ist das rektale Messen – das Thermometer im Po – der „Goldstandard“. Denn beim Messen unter der Achsel hängt es davon ab, wie eng die Arme angelegt sind, unter der Zunge können kalte Atemluft oder heiße Getränke eine Weile das Messergebnis beeinflussen. Vor allem seit neue, digitale Thermometer nur noch eine halbe Minute angelegt werden. „Da wird die Anfangserhöhung gemessen und dann extrapoliert“, erklärt Hartmann. Neben der klassischen Thermometerform, die die Wärme über direkten Kontakt auf den Sensor übertragen, nutzen Ohrthermometer die Wärmestrahlung. Auch sie können sehr zuverlässig und vor allem sehr schnell messen, wenn sie denn richtig angewendet werden: Die Temperatur, die das Trommelfell gut geschützt in der Ohrhöhle hat, liegt recht genau an der Kerntemperatur. „Wenn man das Thermometer korrekt in das Ohr hineindrückt, für den richtigen Blickwinkel aufs Trommelfell, dann bekommt man auch reproduzierbare Ergebnisse“, so Hartmann. „Wenn ich das bei meinen Kindern mache, dann tut das auch ein bisschen weh.“ Hartmann ist mit für die Messtechnik von Fieberthermometern zuständig und arbeitet im internationalen Normenausschuss daran, Thermometer in der EU und im Rest der Welt miteinander in Einklang zu bringen: Welche Techniken sind zuverlässig, welche Tests notwendig, wieviel Teilgrade an Abweichung noch akzeptabel? Bis 2010 könnte die neue Norm stehen. Doch für die Ärzte, so Hartmann, bilden Thermometer ohnehin nur die Richtschnur: „Wenn's hart auf hart kommt, dann vertrauen sie häufig nicht auf das Messinstrument, sondern auf ihr Gefühl.“

ds

sammen, werden weniger durchblutet. Arme und Beine werden steifer. „Die Feinmotorik leidet, kalte Muskeln arbeiten langsamer und Nervensignale werden langsamer weitergegeben“, so Frances Ashcroft.

Dann kämpft der Körper darum, die Kerntemperatur hochzuhalten, und produziert mit aller Kraft Wärme: Alle Stoffwechselfvorgänge werden angeregt, Herz- und Atemfrequenz steigen und die Muskeln zittern, spannen und lösen sich unkontrolliert. Je größer das Zittern, desto mehr Wärme produziert es – verbraucht aber auch Energiereserven.

Experimente haben gezeigt, dass zwar eine Wärmeweste, die aktiv den Körperkern heizt, dann auch das Arbeiten ohne Handschuhe möglich macht: Der Kern hat genug Wärme übrig, um auch die Extremitäten gut zu durchbluten. Im Normalfall aber wirkt die Kleidung nur passiv, hält die vorhandene Wärme innen und die Kälte draußen. Wenn dies nicht ausreicht, droht die Hypothermie, die Unterkühlung.

Beliebt bei Forschern sind kontrollierte Experimente, in denen sich Freiwillige in die Kältekammer begeben: Wie zeigt sich das Auskühlen im Verhalten? Zunächst minimiert der Körper den Wärmeverlust an den Extremitäten: Die Schweißdrüsen schalten ab und die Blutgefäße in der Haut ziehen sich zu-

Sinkt die Kerntemperatur unter 35 °C, dann verlangsamen sich die biochemischen Reaktionen, lebenswichtige Enzymreaktionen werden gestört, in den Zellen stocken die Natrium-Kalium-Pumpen, die unter anderem für einen geregelten Herzrhythmus, für die Signalübermittlung der Nerven und die Hirnfunktionen essenziell sind. Das Sprechen fällt schwer, erste Halluzinationen können auftreten. Unterhalb von 32 °C Kerntemperatur wird der Mensch apathisch, das Zittern hat längst aufgehört, um Energie zu sparen. Ab etwa 30 °C tritt Bewusstlosigkeit ein, unterhalb von etwa 27 °C steht der Kreislauf still. Der Mensch ist so gut wie tot.

Beim Auftauen: Reihenfolge beachten!

Allerdings nur so gut wie. Immer wieder werden Fälle bekannt, bei denen Menschen aus der Kälte gezogen wurden und nach vorsichtigem Erwärmen kaum einen Schaden davon trugen. Weil das kalte Hirn und die anderen Organe weniger Sauerstoff benötigen, können sie auch bis zu zwei Stunden ohne ihn überstehen – ein Umstand, den sich Transplantationschirurgen zunutze machen, wenn sie Spenderorgane in Nährlösung in einer Eisbox durch die halbe Republik transportieren.

Wichtig beim Auftauen ist aber die Reihenfolge. Manch ein Lawinen- oder Kenteropfer ist auch schon nach der Rettung gestorben, nachdem man es in warme Decken gehüllt und die Gliedmaßen massiert hatte: Dann schießt das kalte Blut aus den Extremitäten ins Körperinnere und versetzt ihm einen Kälteschock, bei dem das Herz aussetzen und der Organismus zusam-

menbrechen kann. Oberste Maxime für Notfallretter ist es also, den Körperkern warm zu halten und den Rest erst langsam zu erwärmen. In speziellen Rettungsanzügen für tief Unterkühlte haben Arme und Beine eigene, kühlere Kammern, während in der warmen Hauptkammer eine Herz-Lungen-Maschine beim aufwärmenden Wiederbeleben hilft.



Sie werden „Neuropatienten“ genannt: Diejenigen, die nicht das Geld für eine Ganzkörper-Konservierung haben und dennoch auf die großen Fortschritte der modernen Medizin hoffen, überlassen nur ihren Kopf den Alcor-Experten für Lebensverlängerung. Er wird erst in einen Metallbehälter gesteckt (kleines Bild) und dann zwischen vier Behältern mit „Ganzkörper-Patienten“ versenkt. In solch großen „Thermoskannen“, in einem permanenten Bad aus -196 °C kaltem Flüssigstickstoff, warten sie dann gemeinsam auf bessere Zeiten.

Fotos: Alcor Life Extension Foundation

Und wenn das Einfrieren Absicht ist? Wenn die Eiskälte Schutz bedeutet vor dem Lauf alles Irdischen, vor dem Verwesen – für ein späteres Leben? Daran glauben Kryoniker, die 1972 die „Alcor Life Extension Foundation“ in Phoenix, Arizona, gründeten. Das Argument ist schlicht, die Technik aufwendig: Wenn Gewebe in der Kälte ohne Sauerstoff überleben kann, lässt sich dann nicht auch der endgültige Tod verhindern? Kann man Menschen einfrieren, bis ein Mittel gegen ihre Krankheiten gefunden ist? Heute lagern rund 80 „Patienten“ in Stickstofftanks bei minus 196 °C – teils auch nur als Kopf, der später einen neuen Körper bekommen soll. Möglichst schnell nach dem ersten „Ableben“ werden die Körper gekühlt und die Zellflüssigkeit vor dem Einfrieren gegen Konservierungsflüssigkeit ausgetauscht,

die die Kristallbildung verhindert. Immerhin hüpfen Flöhe auf Gletschern und schwimmen Fischarten in der Arktis, die den selben Effekt durch natürliche Frostschutzmittel im Blut erzielen. Es ist eine Investition in die Zukunft. Vielleicht wird Marie eines Tages den Erfolg der Kryoniker noch miterleben. ■

DÖRTE SASSE





Foto: mauritius images/Alaska Stock

Klima

Ein Gletscher in Alaska, so hoch wie ein zehnstöckiges Haus, „kalbt“. Die Chancen, dies mitzuerleben, stehen so gut wie nie. Weltweit schmelzen die Gletscher, aber auch die polare Meereisdecke und der grönländische Eisschild – eine Folge der Klimaerwärmung. Kein ernstzunehmender Wissenschaftler bezweifelt mehr, dass es sie gibt und dass sie weit überwiegend vom Menschen verursacht ist. Denn keine natürliche Faktoren wie Sonnenaktivität und Erdbahn-Parameter (die Auslöser der Eiszeiten) könnten gegenwärtig eine Erwärmung erklären. Dagegen ist die Konzentration der Atmosphäre an Treibhausgasen wie Kohlendioxid oder Methan heute höher als innerhalb der letzten 800 000 Jahre. Das zeigen Bohrkern-Messungen im Antarktis-Eis. An ihnen sieht man auch, dass eine höhere Konzentration an CO_2 stets mit einer höheren Temperatur verbunden war. Vor allem in den letzten Jahrzehnten ist es dramatisch wärmer geworden. „Elf der letzten Jahre (1995 - 2006) gehören zu den zwölf wärmsten Jahren seit der ersten instrumentellen Messung der globalen Erdoberflächentemperatur im Jahr 1850“, stellte der zwischenstaatliche Ausschuss für Klimawandel, IPCC, in seinem 4. Sachstandsbericht 2007 fest. Seit 1850 sei die weltweite Jahresdurchschnittstemperatur um $0,76^\circ\text{C}$ gestiegen. Der IPCC, der 2007 den Friedensnobelpreis bekam, gilt als weltweit maßgebliche Autorität in Sachen Klimawandel – auch oder sogar vor allem deshalb, weil er als abgewogen und eher vorsichtig gilt. Doch seine Prognose ist eindeutig: Bis zum Jahr 2100 wird die Jahresdurchschnittstemperatur weltweit zwischen 1°C und 6°C ansteigen, je nach Emissions-Szenario. Und selbst wenn alle Staaten der Welt ihre CO_2 -Emissionen sofort komplett einstellen, könnten wir einen Anstieg der Temperatur nicht mehr verhindern. Unsere Enkel werden wohl kaum noch einen kalbenden Gletscher bestaunen dürfen.

ERIKA SCHOW

Zu Gast im Kühlschrankschrank der Welt



Foto: Hans Center/AWI

Ein Begrüßungskomitee

Zum Südpol soll es gehen, in die Antarktis. Genauer gesagt: ins Weddellmeer – den Teil des Südpolarmeers, der auf dem Globus ein bisschen rechts unterhalb von Südamerika liegt. Meine Diplomarbeit ist abgegeben, das Studium praktisch beendet, nun heißt es: elf Wochen ins Eis. Die Expedition trägt die Nummer ANT XII/3. Es ist der dritte Fahrabschnitt in der zwölften Antarktis-Saison des Forschungsschiffes Polarstern. Antarktis, das bedeutet vor allem unbarmherzige Kälte. Denken alle. Immer wieder höre ich den gleichen Kommentar: Hoffentlich frierst du nicht! Meine Mutter kauft vorsorglich atmungsaktive High-Tech-Unterwäsche, Oma steuert einen extrawarmen Fleecepullover bei, eine Freundin schenkt einen Handwärmer zum Abschied.

Im Südpolarmeere

Die Angst vor dem Frost ist unbegründet. Wie alle Expeditionsteilnehmer werde ich vom Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Bremerhaven mit einem großen Seesack voll molliger Sachen ausgestattet. Jeder bekommt einen knallroten, dicken Overall, eine lange Fleece-Unterhose, gefütterte Arbeitshandschuhe, wasserdichte Handschuhe, Handschuhe zum Unterziehen,

Nirgendwo auf der Erde ist es so kalt wie in der Antarktis, nirgendwo so trocken, so windig, so einsam. Ein Erfahrungsbericht über das Leben im ewigen Eis – und darüber, wie Wissenschaftler dort das Weltklima erforschen.

Die Polarstern, der Forschungs-Eisbrecher des Alfred-Wegener-Institutes, kann sich auch noch unter widrigen Bedingungen zu den Stationen in der Antarktis vorkämpfen. Gleichzeitig ist sie ein schwimmendes Forschungsinstitut, vollgestopft mit neun Labors, Geräten, Messinstrumenten, Computern sowie Kühlräumen, in denen die Eisproben unversehrt nach Hause transportiert werden können.

drei Paar dunkelgraue Wollsocken, Mützen, Troyer, eine Daunenjacke. Und überhaupt: Moderne Forschungsschiffe sind dank Klimaanlage stets wohltemperiert. Auf der „Polarstern“ kann man nach längeren Aufenthalten im Freien sogar in der Sauna ordentlich durchglühen. Die Arbeiten an Deck sind meist nach zwei, drei Stunden beendet, höchstens die Hände werden mal kalt. Außerdem ist gerade Sommer. Die Sonne geht nie unter, die Temperaturen klettern bis zum Gefrierpunkt. Bei null Grad und Sonnenschein reicht der Blaumann zum Arbeiten draußen völlig aus. Und in der seltenen Freizeit kann man sich im dicken Overall auf dem Peildeck bestens sonnen.

Wenn die Antarktis ihre ungemütliche Seite zeigt, geht niemand mehr freiwillig nach draußen. Meer, Eis und Himmel vermischen sich zu einem eintönigen Grau. Feste, kleine Eisflocken tanzen durch die Luft, ihre Berührung beißt auf der Haut. Schnell fallen die Temperaturen unter minus 20 Grad Celsius. Einmal müssen wir bei so einem Wetter raus aufs Packeis, um unsere Messgeräte abzusetzen. Es wird der abenteuerlichste Hubschrauberflug der Reise. Am Ziel angekommen, sieht es erst so aus, als könnten wir gar nicht landen. Unter uns nur eine weiße Suppe, Konturen sind nicht erkennbar. Solche Sichtverhältnisse nennen Polarforscher „White-Out“: Schnee und Himmel gehen wegen des diffusen Lichts ineinander über, der Pilot kann nicht sehen, wo der Boden ist. Eine Landung ist zu riskant. Doch dann taucht ein schwarzer Fleck im weißen Nichts auf: Eine Pinguin-toilette macht die Landung doch noch möglich. Nun muss alles schnell gehen, der Treibstoff ist knapp: Wegen der Kälte muss der Motor angeschaltet bleiben, sonst könnten die Rotoren vereisen. Rasch stecken wir unsere Schallaufnehmer ins Eis, die Bewegung hält uns

warm. Nur an den Haaren und am Schal gefriert der Atem. Auf dem Rückflug dauert die schlechte Sicht an, der Pilot bleibt dicht über dem zugefrorenen Weddellmeer. Hoffentlich liegt kein Eisberg im Weg! Erst kurz vor der Ankunft lichtet sich der Nebel, mit Erleichterung sehe ich unser Schiff näher kommen.

Am Ende der Reise wird es herbstlich. Die tief stehende Sonne taucht die Eislandschaft in ein unwirkliches Zwielflicht. An schönen Tagen verleiht das Herbstlicht den Eisbergen einen goldenen Schein, im Gegenlicht heben sich die Kolosse wie schwarze Bastionen vor dem leuchtenden Himmel ab. Auf dem Meer wächst eine neue Eisschicht. Die Wellen spielen noch damit, reißen die dünne Haut auseinander und lassen die Bruchstücke wieder zusammenprallen. Ein regelmäßiges Muster entsteht, das „Pfannkucheneis“. Ein Zeichen dafür, dass es kälter wird. Meerwasser friert erst bei minus 1,8 Grad Celsius. Die Luft wird nun schon mal minus 30 Grad kalt. Es wird Zeit, die Antarktis wieder zu verlassen. Im Winter, wenn das Meereis wächst und die Schollen vom Wind zu mehrere Meter dickem Presseis aufgetürmt werden, kommen selbst Eisbrecher wie die Polarstern nicht weit. Wir legen noch einmal an der deutschen Forschungsstation Neumayer an und nehmen die letzten Sommergäste mit: Wissenschaftler, die hier während des Südsommers Messungen durchgeführt oder die Station als Basis für eine Expedition genutzt haben.

Überwintern in der Antarktis

Als wir ablegen, bleiben neun rote Punkte an der Eiskante zurück. Die Überwinterer auf der Neumayer-Station zählen zu den gut 1000 Menschen, die im polaren Winter, wenn die Temperaturen auf Werte zwischen minus 40 und minus 90 Grad Celsius absinken, auf dem Kontinent ausharren. Ein dreiviertel Jahr lang, von März bis November, ist das Team auf der Neumayer-Station ganz auf sich allein gestellt: vier Wissenschaftler, ein Arzt, ein Koch, ein Techniker, zwei Ingenieure, meist zur Hälfte Männer und Frauen. Die Observatorien der Station, die ihre Messwerte in weltweite Datennetze einspeisen, müssen auch im Winter betreut werden. „Die Qualität der Daten ist bei bemannten Stationen einfach besser“, sagt Mathias Zöllner. Der Meteorologe war von Dezember 2004 bis Januar 2006 auf Neumayer. Die zwei unterirdischen Röhren der Station liegen auf dem Ekström-Schelfeis, einer mehrere hundert Meter dicken Eiszunge, die sich vom Kontinent ins Weddellmeer vorschiebt. Nur sechs Kilometer von der Eiskante entfernt, liegt das Jahresmittel

dort bei verhältnismäßig milden minus 16 Grad, im Winter erreicht das Thermometer an wenigen Tagen Tiefstwerte um minus 45 Grad. Für Zöllner waren die häufigen, oft von starkem Schneetreiben begleiteten Stürme die extremste Erscheinung im Alltag. „Bei Windgeschwindigkeiten um 90 Kilometer pro Stunde einen wabbeligen, einen Meter großen Wetterballon steigen zu lassen, das gehört zu den Erlebnissen, die ich nicht vergessen werde“, sagt Zöllner. Die Kälte war dagegen ein weniger großes Thema. Genügend Schichten warmer Kleidung, berichtet der Forscher, sind das beste Rezept dagegen. Ausreichend Schlaf und Essen und eine gute Portion Motivation tragen ebenfalls dazu bei, dass der Mensch die Kälte nicht so stark fühlt. Lediglich Hände und Gesicht lassen sich nicht immer ausreichend schützen, bei starkem Wind kann es im Gesicht schon mal Erfrierungen geben. Meist heilen die Blessuren ohne dauerhafte Folgen ab, sagt Zöllner: „Das ist so ähnlich wie ein Sonnenbrand.“ Einmal musste der Meteorologe im Winter einen ausgefallenen Windsensor auf einem zehn Meter hohen Messmast austauschen, bei minus 40 Grad: „Nach einer halben Minute Schrauben musste ich erstmal fünf Minuten lang die Hände wärmen, bevor ich weitermachen konnte.“

Dem Forscher hat die großartige, unberührte Natur in der Antarktis so gut gefallen, dass er Ende 2008 noch einmal hinfährt – für eine weitere Überwinterung. „Im Augenblick entsteht dort die neue deutsche Antarktis-Station Neumayer III, da gibt es beim Aufbau der neuen Observatorien viel zu tun“, berichtet er. Die neue Station wird auf Stelzen stehen und nicht, wie die beiden Vorgängerstationen,

Eine Forschungsexpedition in die Antarktis – für die Geophysikerin und heutige Wissenschaftsjournalistin Ute Kehse war das ein großes Erlebnis.

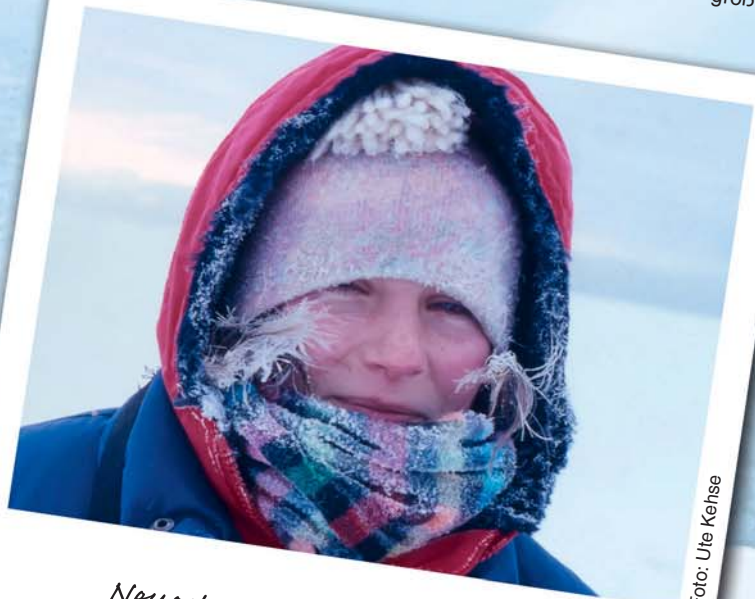


Foto: Ute Kehse

Neuester Polarmoden-Schick!



5-Sterne-Unterkunft à la Antarktis

Foto: Sepp Kipfstuhl/AWI

Oben: Ein Betriebsteam trifft an der Kohlen-Station ein. Während der Sommermonate leben hier bis zu 20 AWI-Mitarbeiter. Weil die Temperaturen selbst im Sommer kaum minus 30 Grad übersteigen, finden die Eiskernbohrungen nicht im Freien statt, sondern in einem 66 Meter langen, 6 Meter tiefen und 4,8 Meter breiten Graben, der eigens dafür aus dem Schnee ausgehoben und mit einem Holzdach versehen wurde.

Unten: Der Meteorologe Mathias Zöllner in der antarktischen Polarnacht

unterirdisch in Röhren verpackt. „Den Witterungsbedingungen ist man dort ganz anders ausgesetzt, sicherlich wird man von den Stürmen im polaren Winter mehr mitbekommen“, sagt Zöllner. Auf das Tageslicht im Büro freut er sich. Die täglichen Fußmärsche zum meteorologischen Messfeld werden Zöllner allerdings nicht erspart bleiben: Weil die 30 Meter hohen Aufbauten von Neumayer III die Luft verwirbeln und lange Schatten werfen, müssen die Sensoren für Windgeschwindigkeit, Feuchte, Temperatur, Sonneneinstrahlung und Luftdruck einige hundert Meter entfernt von dem Gebäude stehen. Die Messdaten fließen weltweit in Wettervorhersagemodelle ein. „Unser Observatorium liefert Daten aus einer Gegend, wo es sonst nicht viele Messpunkte gibt“, sagt Zöllner. Für die Vorhersagemodelle der Südhalbkugel sind Antarktis-Stationen als Randpunkte besonders wichtig.

Außerdem bilden die Wetterdaten der Neumayer-Station inzwischen eine langjährige Messreihe, die dazu beiträgt, das globale Klima besser zu verstehen. Die Daten zeigen, wie kompliziert Klimaforschung ist. Von Erwärmung kann auf dem Ekström-Schelfeis zwar keine Rede sein, die Temperaturen haben sich seit 1981 nicht nennenswert verändert. Aber: Strahlungsmessungen zeigen, dass die Bewölkung seit langem abnimmt. „Normalerweise müssten als Folge auch die Bodentemperaturen sinken“, erklärt Mathias Zöllner. Tun sie aber nicht. Womöglich zeigt sich der Klimawandel hier also dadurch, dass alles bleibt, wie es ist.

Auf dem Inlandeis

Weiter weg vom Meer, hoch auf dem antarktischen Eisplateau, herrscht ein frostklirrendes Wüstenklima. Die amerikanische Amundsen-Scott-Station direkt am Südpol registriert zum Beispiel pro Jahr 2,5 Millimeter Niederschlag und eine Durchschnittstemperatur um minus 50 Grad. „Die Tiefdruckgebiete dringen nicht ins Innere des Kontinents vor, im Sommer sieht man manchmal wochenlang kein Wölkchen am Himmel“, berichtet der Glaziologe Sepp Kipfstuhl vom AWI. Das Plateau erstreckt sich über tausende von Kilometern und liegt auf Hochgebirgsniveau, 3000 Meter über dem Meeresspiegel. Dort ist es immer bitterkalt. „Selbst im Sommer wird es selten einmal minus 30 Grad warm“, sagt Kipfstuhl.

Im Winter gehört ein Aufenthalt auf dem antarktischen Plateau zum Extremsten, was ein Mensch erleben kann. Nur drei ganzjährig bemannte Stationen liegen im Inneren des Kontinents, die Arbeiten im Freien kommen während der grimmigen Polarnacht vollständig zum Erliegen. Viele Materialien sind nur für Temperaturen



Foto: Kolja Giedke/AWI

bis minus 30 Grad ausgelegt, unterhalb von minus 45 Grad versagen die meisten Geräte den Dienst. Plastik und Metall werden extrem spröde und zersplittern bei der kleinsten Belastung. Selbst Routineaufgaben geraten zu einem Kampf zwischen Mensch und Material, erzählt Sepp Kipfstuhl: „Man flucht nirgendwo so viel wie bei extremer Kälte.“

Der Polarforscher hat in den letzten Jahren viele Monate im Herzen der Antarktis verbracht. 2001 hat das AWI 750 Kilometer südlich der Neumayer-Station ein Bohrcamp aufgebaut, die Kohnen-Station. Elf Container bieten dort im Sommer Platz für etwa 20 Personen. Es gibt eine Funkstation, eine Messe, eine Küche, Duschen und Toiletten, zwei Schlafräume, eine Schneeschmelze zur Wassergewinnung, einen Lagerraum, eine Werkstatt und die Stromversorgung. Treibstoff und Lebensmittel müssen mit Pistenbullys von der Küste hergebracht werden. Zehn bis zwölf Tage dauert das, bei einer Geschwindigkeit von fünf bis sieben Stundenkilometern.

Klimaarchiv Antarktis

Die Kohnen-Station ist einer von zwei Orten in der Antarktis, an dem europäische Klimaforscher das ehrgeizige Projekt EPICA (European Project for Ice Coring in Antarctica“) verwirklicht haben: Sie erbohrten Eiskerne, in denen das Klima der letzten acht Eiszeitzyklen aufgezeichnet ist. Zwischen 2000 und 2006 haben Sepp Kipfstuhl und seine Kollegen ihre Bohrgeräte an der Kohnen-Station und am weiter östlich gelegenen Dome Concordia im pazifischen Sektor der Antarktis um die 3000 Meter tief in den Eispanzer getrieben und sind mit jedem Meter tiefer in die Vergangenheit vorgedrungen. Denn jedes Jahr legt sich eine neue, dünne Schneeschicht auf die Oberfläche. Mit der Zeit versinkt der Schnee in der Tiefe und wird durch den Druck der aufliegenden Schichten zu kristallklarem Eis. Der größte Schatz darin sind die winzigen, eingeschlossenen Luftblasen, die eine Zeitreise in die Vergangenheit erlauben. Wie hoch die Konzentration von Treibhausgasen wie Kohlendioxid, Lachgas und Methan in der Eiszeit-Luft waren, kann direkt gemessen werden. Indirekt lassen sich auch andere Klimadaten wie Temperatur, vorherrschende Windgeschwindigkeiten und Niederschlagsmengen ermitteln.

Die Botschaft aus der Vergangenheit ist klar, sagt Kipfstuhl: „Während der letzten 800 000 Jahre hat die Kohlendioxid-Konzentration immer nur in bestimmten Grenzen variiert.“ In den Kaltzeiten sank der Anteil des Treibhausgases in der Atmosphäre nie unter 0,017 Prozent, die Forscher drücken das als 170 ppm aus („parts per million“, Teile pro Million). In den Warmzeiten stieg die CO₂-Konzentration auf maximal 300 ppm. Treibhausgaskonzentrationen

und Temperaturen verliefen streng parallel: In den Kaltzeiten war es an den Orten der beiden Eisbohrungen gut acht Grad kälter als heute, in einigen Warmzeiten lagen die Temperaturen auch schon mal ein oder zwei Grad über dem heutigen Wert.

Inzwischen aber hat sich die CO₂-Konzentration aus dem Bereich herausbewegt, in dem sie sich während der letzten 800 000 Jahre aufhielt. Der heutige Wert liegt bei 385 ppm, mit steigender Tendenz. Jedes Jahr nimmt er um 1,5 bis 2 ppm zu.

Rückkehr aus dem Eis

Meine Reise in die Antarktis ist nun schon 13 Jahre her. In Erinnerung bleibt vor allem der Zauber der unberührten Eislandschaft, ihre Weite, die Ruhe. Es ist ein seltsames Gefühl, als die „Polarstern“ nach elf Wochen Antarktis in den Hafen von Punta Arenas im Süden Chiles einläuft. Der Lärm, die Autos, fremde Menschen, Straßen, Hochhäuser – nach drei Monaten im Eis muss man sich an die Begleiterscheinungen der Zivilisation erst wieder gewöhnen. ■

UTE KEHSE

Dieser EPICA-Eisbohrkern stammt aus einer Tiefe von ca. 2650 m und ist älter als 150 000 Jahre. Das Sägeblatt, mit dem er in 1-Meter-Stücke zersägt wird, scheint deutlich durch das Eis hindurch; Eis aus dieser großen Tiefe ist kristallklar.



Foto: Hans Oerter/AWI

Ein Stück davon in die Cola – und es wär' der teuerste Drink der Welt!

Der Herr der gelben Torpedos

Prof. Dr. Martin Visbeck ist stellvertretender Direktor des Leibniz-Instituts für Meereswissenschaften (IFM-GEOMAR) in Kiel und einer der prominentesten Ozeanographen Deutschlands. Er erforscht unter anderem die Tiefe der Ozeane, um mehr über die Klimaerwärmung und ihre Folgen herauszufinden. Das Interview führte Erika Schow.

Herr Visbeck, wie viele Kilometer haben Sie in Ihrem Forscherleben schon per Schiff zurückgelegt?

Inzwischen habe ich es wohl schon einmal um die Welt geschafft.

Ein Objekt Ihrer Arbeit bewegt sich auch ständig um die Welt herum: die großen globalen Meeresströmungen. Warum sind sie so wichtig für das Klima?

Weil sie Wärme transportieren. Die wichtigste Eigenschaft des Ozeans ist ja seine hohe Wärmekapazität: Er nimmt im Sommer Wärme auf und gibt sie im Winter wieder ab, und dadurch mäßigt er das Klima. Außerdem bewegt er das Wasser. Und die großen

globalen Strömungen, die alle Weltmeere miteinander verbinden, bringen wärmeres Wasser von den Tropen in die mittleren Breiten. Dort wird, insbesondere im Winter, die Atmosphäre erwärmt. Vor allem in Europa ist der Ozean sehr wichtig; er ist nach der Atmosphäre (mit den Sturmsystemen) der zweitwichtigste Klimafaktor. Das liegt am Golfstrom, Europas Zentralheizung. Er besteht aus zwei Teilen: aus dem oberen, vom Wind angetriebenen Teil der Strömung und aus einer Rückströmung in der Tiefe, bei der sogar noch viel mehr Wärme bewegt wird. Darum ist meine Arbeitsgruppe vor allem an der Tiefenströmung interessiert. Was da passiert, nennt man thermohaline Zirkulation, also eine von Wind und Salzgehalt angetriebene Bewegung. Beim Golfstrom sieht das so aus: Der Wind treibt das in den Tropen aufgewärmte Wasser nach Norden. Dort ist die Luft zunehmend kälter, auch das Wasser wird kälter und damit dichter. An einigen wenigen Stellen im Nordatlantik sinkt es in die Tiefe und wird dort in Richtung des Äquators in Bewegung gesetzt.



Als Meereswissenschaftler muss man den Ozean lieben. Auch wenn Martin Visbeck als Professor inzwischen viel zuhause im Kieler Institut arbeitet und nicht mehr so viel Zeit für eigene Forschungsreisen hat, fährt er doch hin und wieder beispielsweise an den Ausgang der Labradorsee, um eigenhändig einen Tiefendrifter (wie hier) oder einen Gleiter im Ozean auszusetzen oder wieder einzusammeln.

Foto: IFM-GEOMAR

Und was passiert mit diesem System, wenn das Klima durch den Treibhauseffekt wärmer wird?

Die Klimaerwärmung hat dafür gesorgt, dass bereits jetzt das Grönlandeis immer schneller schmilzt. Damit gelangen immer größere Mengen Süßwasser in die Ozeane. Das Wasser wird weniger salzig, somit weniger schwer und sinkt nicht mehr so schnell ab. Als Folge davon müsste sich die kalte Tiefenströmung verlangsamen.

Könnte im Extremfall der Golfstrom ganz versiegen?

Nein. Man darf nie vergessen, dass der Golfstrom in erster Linie vom Wind angetrieben wird. Und keine Klimavorhersage sagt, dass der Wind aufhören wird. Also wird der Golfstrom nicht versiegen. Aber man kann natürlich fragen, ob er sich abschwächt.

Und schwächt er sich ab?

Bisher ist das nicht messbar, obwohl wir an einigen Stellen schon seit über zehn Jahren kontinuierlich und ziemlich genau messen. Dabei sehen wir starke Schwankungen auf Monatszeitskalen, aber keinen Trend. Aber das ist auch kein Wunder. Die Modelle sagen, dass sich die Strömung bis heute um maximal 5 % verringert haben dürfte. Das kann niemand messen, weil die natürlichen Schwankungen viel zu groß sind. Erst wenn die Strömungen sich um 20 % verlangsamt haben, werden wir etwas sehen können. Wenn die Modelle stimmen, dann dürfte das nach dem Jahr 2050 der Fall sein.

Trotzdem behaupteten britische Kollegen schon 2006, der Golfstrom hätte sich bereits um 30 Prozent abgeschwächt.

Ja, das ging durch die Presse. In Wahrheit hatten die Kollegen die natürlichen Schwankungen gemessen und keine Trends. Sie hatten sich nur auf einzelne Schiffmessungen gestützt. Nachdem sie auch auf Dauer-Beobachtungssysteme umgestellt hatten, mussten sie ihre Aussagen revidieren.

Was bedeuten Ihre Zahlen für die Klimaveränderung?

Der Nordatlantik mit seinen Strömungen ist eines der zentralen Becken für die Klimaveränderung. Und die Modelle sagen, dass sich bis zum Ende des 21. Jahrhunderts die Tiefenzirkulation um 30 Prozent abschwächen wird.

Foto: Pierre Testor/LOCEAN Paris



Mühelos segelt er durchs Wasser, nicht sehr schnell, aber kontrolliert und mit minimalem Stromverbrauch. Auf solche Gleiter setzen die Kieler Meereswissenschaftler und ihre Kollegen aus aller Welt große Hoffnungen.

Wenn die „Zentralheizung“ Golfstrom schwächer wird, steuern wir dann in Europa auf eine Eiszeit zu, wie manche Medien schon getitelt haben?

Nein, die Klimaerwärmung wird trotzdem kommen. Aber sie wird in Europa weniger deutlich sein. Man sagt jetzt, es könnte nur 1 °C bis 4 °C statt 4 °C bis 6 °C wärmer werden. Das klingt zunächst gut für die Lebewesen; sie müssen sich auf weniger Hitze einstellen. Aber wer weiß, ob die Temperaturangaben so stimmen. Denn wenn weniger kaltes Tiefenwasser gebildet wird, dann kann der Ozean auch weniger CO₂ binden und somit unschädlich machen. Also bleibt ein größerer Anteil des CO₂, das wir mit Autos, Kraftwerken usw. in die Atmosphäre schicken, oben, und das verstärkt natürlich das Klimaproblem. Womöglich ist das Gesamt-Szenario für die Klimaerwärmung eher zu milde gerechnet.

Umso wichtiger ist es sicherlich, dass Sie am Ball bleiben und die Tiefenströmungen überwachen. Wie machen Sie das?

Unsere wichtigste Forschungsplattform ist immer noch das Schiff. Dort können wir die genauesten Messungen machen. Aber es ist natürlich sehr teuer. Deswegen werden roboterartige Methoden immer wichtiger. Am etabliertesten ist die Verankerung: ein Gewicht am Boden, darüber ein Draht, der mit Hilfe von luftgefüllten Auftriebskörpern gespannt wird. An diesem Draht sind selbstregistrierende Messgeräte angebracht. Wir benutzen dort klassischerweise Thermometer, Leitfähigkeitssensoren zur Messung des Salzgehalts sowie Strömungsmesser. Damit bekommen wir etwa jede halbe Stunde einen Messwert. Diese kontinuierliche Messung ist ein weiterer, großer Vorteil gegenüber der einmaligen Messung vom Schiff aus.



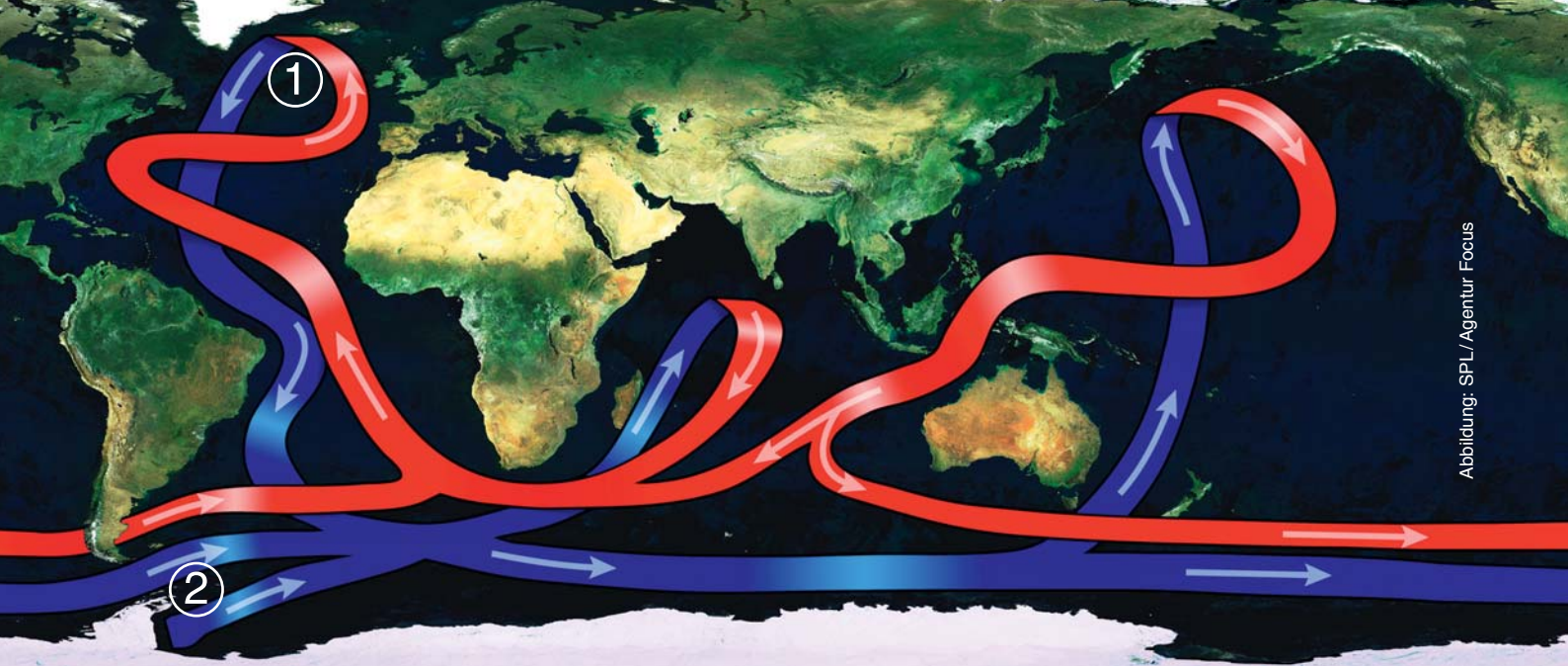


Abbildung: SPL / Agentur Focus

Ständig in Bewegung: die Wassermassen der Weltmeere, auch „globales Förderband“ genannt. Zwei seiner Antriebe sitzen in der Labradorsee (1) und im Weddellmeer (2). Hier sinkt laufend kaltes Wasser ab. In Bewegung gebracht vom ständigen „Nachschub“ von der Oberfläche und von den großen Windsystemen der Erde, geht die lange Reise des Wassers los. Rot: warme Oberflächenströmungen. Blau: kalte Tiefenströmungen.

Aber Sie arbeiten auch mit beweglichen Messgeräten – mit Ihren gelben Torpedos.

Ja, unsere Tiefendrifter sehen wirklich wie Torpedos aus. Sie treiben frei in der Strömung und enthalten die gleichen selbstregistrierenden Messgeräte zur Messung von Temperatur und Salzgehalt. Die Drifter können, einfach durch Pumpen von Öl in eine externe Gummiblase und zurück, ihr Volumen ändern und so mal leichter, mal schwerer als Wasser werden. Normalerweise schweben sie in 1000 Metern Wassertiefe. In regelmäßigen Abständen taucht jeder Drifter auf 2000 Meter ab und kommt dann wieder nach oben. Auf dem Weg misst er Temperatur und Salzgehalt. An der Wasseroberfläche angekommen, schaltet er sein Handy ein und schickt die Daten per SMS nach Hause.

Sind Sie die einzigen Forscher, die mit diesen Geräten arbeiten?

Nein, wir koordinieren dieses Projekt für Deutschland, aber weltweit sind 26 Nationen beteiligt. Inzwischen hat die Weltgemeinschaft der Meereswissenschaftler ein Netzwerk mit 3000 Driftern erstellt. Es ist seit einem Jahr komplett. Dadurch können wir zum ersten Mal flächendeckend im eisfreien Ozean genau bestimmen, wie sich die Wärme- und vor allem auch die Salzgehaltsverhältnisse verändern.

Ihre neuesten „Kinder“ haben Sie liebevoll Teenager getauft.

Ja, weil sie manchmal noch ein bisschen rebellisch sind. Aber sie werden stetig besser. Es begann damit, dass uns öfter mal ein Drifter just in dem Moment wegtrieb, wenn es spannend wurde. Daher haben wir sie in Zusammenarbeit mit amerikanischen Firmen mit kurzen Flügeln versehen und steuerbar gemacht. So ein Glider oder Gleiter kann quasi durchs Wasser segeln, und das mit einem minimalen Stromverbrauch. Sein Gesamtstromverbrauch beträgt drei Watt, so viel wie bei einer Fahrradrücklichtbirne.

Damit kann er schwimmen, messen, funken – schon beeindruckend.

Sie planen ganze Schwärme von Gleitern auszuschicken.

Bisher haben wir nur drei Gleiter. Aber wir werden mehr bekommen und sie ausschwärmen lassen. Wir setzen sie rund ums Forschungsschiff aus und untersuchen systematisch eine ganze Meeresfläche. So können wir beispielsweise kleinräumigere Strömungen und Wirbel untersuchen, deren Einfluss auf die Klimaänderung noch viel zu wenig bekannt sind.

Wie gut ist der Ozean bis jetzt überhaupt verstanden?

Viel besser als früher. Für uns ist die Zeit der großen Entdeckungen vorbei. Anders als noch vor 15 Jahren kennen wir jetzt alle Tiefenströmungen. Nun geht es um die kleineren Dinge, zum Beispiel um die kleinen Wirbel und Turbulenzen im Ozean. Die haben wir in den Modellen bisher nur mit einem Schätzwert belegt. Doch so einfach sind sie nicht zu fassen. Wenn ich meine exakten Messungen mit dem vergleiche, was die Modelle sagen, dann sind sie vielleicht zu 80 Prozent in den Modellen schon ganz gut erfasst. Aber es verbleibt ein gewisses Unbehagen, ob die letzten 20 Prozent nicht doch noch wichtig sind. Wenn beispielsweise mehr dieser kleineren Faktoren erfasst werden, dann verändern sich natürlich auch die Prognosen. Vor zehn Jahren hieß es tatsächlich noch, der Golfstrom werde quasi zum Erliegen kommen, denn man glaubte, die Tiefenwasserbildung werde auf Null sinken. Das hatten die Modelle gezeigt. Die heutigen Modelle, die deutlich mehr Faktoren berücksichtigen, zeigen nicht mehr 100 Prozent, sondern nur noch 30 Prozent Reduzierung. Aber wenn wir jetzt noch mehr Faktoren berücksichtigen, nämlich alle regionalen Wirbel und Strömungen, dann könnte die Prognose wieder höher gehen – wer weiß. Die Forschung ist noch längst nicht am Ende. □

Danke für das Gespräch!

Die Rebellen

Wir befinden uns im Jahre 2008 n. Chr. Alle Salinitätsmesser sind von einem einzigen Gedanken besessen: Sie wollen ganz genau messen. Alle Salinitätsmesser? Nein! Eine von unbeugsamen Metrologen besetzte Arbeitsgruppe hört nicht auf zu mahnen. Ausgerechnet in der PTB sitzt diese Arbeitsgruppe, wo man doch auf höchste Genauigkeit so großen Wert legt. „Aber manchmal sind andere Dinge wichtiger – in diesem Fall die Vergleichbarkeit der Messungen über Jahre hinweg“, erläutert Arbeitsgruppenleiterin Petra Spitzer.

Spitzer und ihre Kollegen wollen nichts Geringeres als den Umsturz eines Systems – genauer: Sie wollen dessen Spitze stürzen. Es geht um die Messung der Salinität, des Salzgehalts von Meerwasser. Misst man ihn, kann man beispielsweise überprüfen, in welchem Umfang ein Ozean wegen der vielen Zuflüsse von geschmolzenem Eis „süßer“ wird – und das wiederum wäre ein deutlicher Hinweis auf das Ausmaß der Klimaerwärmung. An der Spitze des Messsystems, das die PTB-Wissenschaftler im Visier haben, prangt eine Art „Urkilogramm der Salinität“. Es ist eine definierte Kaliumchloridlösung. Spitzers Kollege Steffen Seitz erläutert: „Salopp ausgedrückt lagert irgendwo ein Sack voll hochreinen, kristallinen Kaliumchlorids. Regelmäßig nehmen Chemiker einen Teil davon heraus und geben Wasser hinzu, bis die definierte Konzentration eingestellt ist. Anschließend verdünnen oder verdampfen sie natürliches Meerwasser aus dem Nordatlantik so lange, bis es die gleiche Leitfähigkeit hat. Heraus kommt dann so genanntes *Standard-Meerwasser.“ Jeder Wissenschaftler, der auf die Weltmeere hinausfährt und die Salinität messen möchte, hat Fläschchen mit solchem Standard-Meerwasser dabei. Kurz vorm Einsatz auf hoher See kalibriert er damit seine Messgeräte; die lange Schiffsfahrt mit all ihren Erschütterungen, Temperatur-, Druck- und Feuchtigkeitsänderungen könnte den Geräten ja zugesetzt haben. „Angegeben wird die gemessene Salinität dann in den Werten der so genannten Praktischen Salinitätsskala. Durch den Bezug der Messergebnisse auf die Kaliumchloridlösung hat sie aber nichts mit dem anerkannten internationalen Einheitensystem (SI) zu tun“, betont Seitz.

Zwar arbeitet die Firma, die diese Fläschchen mit Standard-Meerwasser herstellt, sauber und verlässlich und alle Ozeanographen sind mit dieser Kalibriermethode zufrieden. „Trotzdem geht es so nicht!“, klagt Petra Spitzer. Irgendwann wird es zwangsläufig Probleme geben, wenn die Kaliumchloridlösung nicht mehr exakt neu hergestellt werden kann. Es muss ja nicht so weit kommen, dass die Firma pleite und damit deren Erfahrung verloren geht. Das wäre der GAU. Irgendwann wird aber beispielsweise der Sack – der in Wahrheit nicht einfach ein Sack, sondern ein Chemikalienbehälter aus Kunststoff ist – schließlich einmal leer sein. Dann muss

ein neuer, zwangsläufig mit anderen Verunreinigungen, verwendet werden. „Dann kann es ein böses Erwachen geben“, prognostiziert die Chemikerin. „Man wird zwar eine neue Lösung herstellen und verteilen, aber in diesem Moment bekommen alle Messreihen höchstwahrscheinlich einen Sprung. Und das, obwohl die Ozeanographen und Klimaforscher händeringend verlässliche, vergleichbare Datenreihen über Jahrzehnte hinweg haben wollen.“

Deshalb leisten Spitzer, Seitz und ihre Kollegen mühsame Überzeugungsarbeit: Die Fläschchen und ihr durchsichtiger Inhalt sollen bleiben, wie sie sind. Aber das Standard-Meerwasser muss auf die entsprechende SI-Basiseinheit rückgeführt werden. Das bedeutet, seine Leitfähigkeit muss mit einem Primärnormal für Leitfähigkeit wie dem in der PTB oder in anderen metrologischen Staatsinstituten gemessen werden. Ein solches Primärnormal verwendet nicht die Praktische Salinitätsskala, sondern misst direkt in der SI-Einheit der Leitfähigkeit (Siemens durch Meter). Damit wird ermittelt, wie viele Salzionen im Meerwasser gelöst sind. Je mehr von ihnen da sind, desto mehr Strom fließt, sobald man eine Spannung anlegt.

Die Sache hat nur einen Haken „Diese Methode ist mit einer höheren Messunsicherheit verbunden“, gibt Petra Spitzer zu. „Das ist in der Ozeanforschung, wo ohnehin mühsam um präzise Angaben gerungen wird, natürlich nicht populär“. Immerhin haben jetzt die Hersteller der kostbaren Wasserfläschchen Kooperationsbereitschaft signalisiert. Wer weiß, vielleicht wird die Rebellion der unbeugsamen Metrologen irgendwann doch noch Erfolg haben. ■

ERIKA SCHOW

* Dieses Standard-Meerwasser (festgelegter Salzgehalt) hat nichts mit dem „Wiener Ozeanwasser“ (festgelegte Isotopenzusammensetzung, s. Seite 22) zu tun.





Foto: Stefan Borgius / VISUM

Himmliches

Physikern wird vieles unterstellt, üblicherweise aber nicht, dass sie Romantiker sind. Dabei liegen auch Physiker bisweilen gerne unter dem Sternenhimmel, schauen ins Unendliche, suchen darin das große Ganze und sinnieren über Anfang und Ende. Allerdings – und dies trennt sie dann doch von den waschechten Romantikern, die vorwiegend auf ihr Herz und ihre Seele hören – benutzen sie eine Vielzahl technischer Hilfsmittel und theoretischer Konzepte, um diverse „Fenster“ in den Himmel zu öffnen. Denn allein mit der inneren Stimme und dem bloßen Auge können sie dem All, seiner Geschichte und seiner Zukunft kaum auf die Spur kommen. Und so ist der Technikpark der Astrophysiker angefüllt mit Radiointerferometern, Mikrowellenobservatorien, Infrarot- und Ultraviolett-Teleskopen sowie riesigen irdischen Antennenschüsseln und unterschiedlichsten Satelliten auf Erdorbits oder auf erdfernen Bahnen durch das Sonnensystem. Alle diese Instrumente sind spezialisiert auf einen ganz gewissen Ausschnitt aus dem großen Spektrum der elektromagnetischen Strahlung, mit der das Weltall angefüllt ist. Sehen die Röntgensatelliten eher die heißen „Flecken“, also vielleicht die heißen Gaswolken vom Zusammenprall zweier Galaxien oder die Strahlung von Neutronensternen, so sehen die Mikrowellenteleskope dagegen in die Kältezonen und fangen beispielsweise die älteste Strahlung auf, die durch das All geistert: Mit nur noch drei Grad über dem absoluten Nullpunkt erreicht uns die Strahlung, die kurz nach dem Urknall in unvorstellbarer Hitze gestartet ist. Und so reicht der Blick weit in die Vergangenheit, bis fast an den Anfang von Allem – was dann doch wieder eine ganz romantische Vorstellung ist.

JENS SIMON

Der lange Hindernisparcours der Sonnenwärme

Die Energie, die Ihren letzten Sonnenbrand verursachte, wurde vor vielen tausend Jahren im Kern der Sonne erzeugt. Erst nach einer langen Odyssee durch ihr Inneres gibt die Sonne sie frei.

Wer oder was ist schuld an Ihrem letzten Sonnenbrand? „Wer“ ist schnell beantwortet: Sie selbst, denn Sie haben sich nicht ordentlich eingecremt. Die Antwort auf das „Was“ dauert etwas länger. Denn die Energie der Sonnenstrahlung, die Ihren Sonnenbrand verursachte, hat eine lange Reise hinter sich, die vor mehreren zehntausend Jahren mitten im Kern der Sonne begann.

Die Sonne ist etwa 150 Millionen Kilometer von der Erde entfernt. Da ihre Strahlung mit Lichtgeschwindigkeit, also mit etwa 300 000 Kilometern pro Sekunde, unterwegs ist, benötigt sie für diese gewaltige Entfernung nur ein wenig mehr als acht Minuten. Doch schwieriger zu überwinden sind die ersten 700 000 Kilometer vom Mittelpunkt der Sonne bis zu ihrer Oberfläche. Denn hier, tief in ihrem Innern verborgen, sitzt der eigentliche Brennofen der Sonne, in dem bei einer Temperatur von etwa 15 Millionen Grad Celsius die Energie erbrütet wird, die unter anderem die Erde zu einem bewohnbaren, lebensfreundlichen Planeten macht.

Kernfusion ist der erste Schritt zum Sonnenbrand

Bei dieser riesigen Temperatur haben die Wasserstoffatome, aus denen die Sonne heute zu 75 Prozent besteht, längst ihre Elektronen verloren. Die Kerne der Wasserstoffatome, die aus nur einem Proton bestehen und sich aufgrund ihrer gleichartigen positiven Ladungen eigentlich gegenseitig abstoßen müssten, haben hier der-

artig hohe Bewegungsenergien, dass sie die elektrische Abstoßung überwinden und fusionieren können. Dabei verwandelt sich ein Proton in ein Neutron und bildet mit einem anderen Proton einen Deuteriumkern. Die nun überzählige positive Ladung wird von einem Positron, dem Antiteilchen des Elektrons, fortgetragen. Über mehrere Zwischenschritte vereinigen sich schließlich zwei Deuteriumkerne zu einem Heliumkern – die Kernfusion ist perfekt.

Insgesamt haben sich bei dieser Fusion also vier Wasserstoffkerne in einen Heliumkern verwandelt – und dabei die Energie erzeugt, die irgendwann einmal für den Sonnenbrand eines Menschen auf der Erde mitverantwortlich sein wird. Der größte Teil dieser Energie macht sich nun in Form von Gammastrahlung vom Sonnenkern aus auf den Weg zur Sonnenoberfläche. Gammastrahlung ist die energiereichste Strahlung des elektromagnetischen Spektrums und besteht wie alle elektromagnetische Strahlung aus Photonen. Weit kommen die Gammaphotonen aber nicht. Bereits nach wenigen Millimetern treffen sie auf den ersten Atomkern, werden von ihm absorbiert und wieder abgestrahlt – jedoch nicht in ihrer ursprünglichen Form. Die Energie der Photonen nimmt nach jedem Kontakt mit einem Atomkern ab, während ihre Anzahl gleichzeitig zunimmt. Auf diese Weise verwandelt sich die Gammastrahlung zunächst in Röntgenstrahlung, dann weiter in UV-Strahlung und zuletzt in sichtbares Licht. Aus einem Gammaphoton, das im Sonnenkern erzeugt wird, werden so Millionen von Lichtteilchen, die schließlich von der Sonnenoberfläche abgestrahlt werden.



Noch hunderttausend Jahre bis zum Sonnenbrand

Obwohl die Photonen fortwährend mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs sind, dauert ihr Aufstieg eine halbe Ewigkeit. Haben sie erst einmal ihre Kinderstube, den Sonnenkern, hinter sich, wartet auf sie ein weiteres, langwieriges Hindernisrennen über eine Distanz von 500 000 Kilometern. Würden sich den Photonen nicht dauernd Atomkerne in den Weg stellen, dann könnten sie die so genannte Strahlungszone in etwas mehr als einer Sekunde durchqueren. Tatsächlich benötigen sie für den ihnen aufgezwungenen Zickzackkurs gemäß neueren Modellrechnungen jedoch zwischen 10 000 Jahren und 170 000 Jahren.

Bis zur Grenze zwischen der Strahlungszone und der sich anschließenden Konvektionszone ist die Temperatur auf etwa 2 Millionen Grad Celsius abgefallen. Einigen Atomkernen ist das zu kalt. Insbesondere die Kerne der in der Sonne in geringem Prozentsatz vorhandenen schweren Elemente wie beispielsweise Kohlenstoff, Stickstoff oder Sauerstoff „bekleiden“ sich mit Elektronen und verwandeln sich wieder in vollständige Atome. Diese Atome absorbieren die aufstrebenden Photonen, ohne sie sofort wieder abzustrahlen. Stattdessen benutzen sie deren Energie, um sich aufzuheizen. Das an der Grenze zwischen Strahlungs- und Konvektionszone aufgeheizte Gas steigt schließlich nach oben, während gleichzeitig abgekühltes Gas aus höheren Schichten nach unten sinkt. Scheinbar paradox: Obwohl die Energie jetzt nicht mehr mit Lichtgeschwindigkeit unterwegs ist (denn sie steckt ja in den massiven Gasatomen), benötigt sie für die restlichen 200 000 Kilometer bis zur Sonnenoberfläche nur noch wenige Monate.

Achtung, eincremen! Noch acht Minuten

Den „Deckel“ der Konvektionszone bildet die nur wenige hundert Kilometer dicke Photosphäre. Die Atome haben sich inzwischen auf etwa 5500 Grad Celsius abgekühlt.

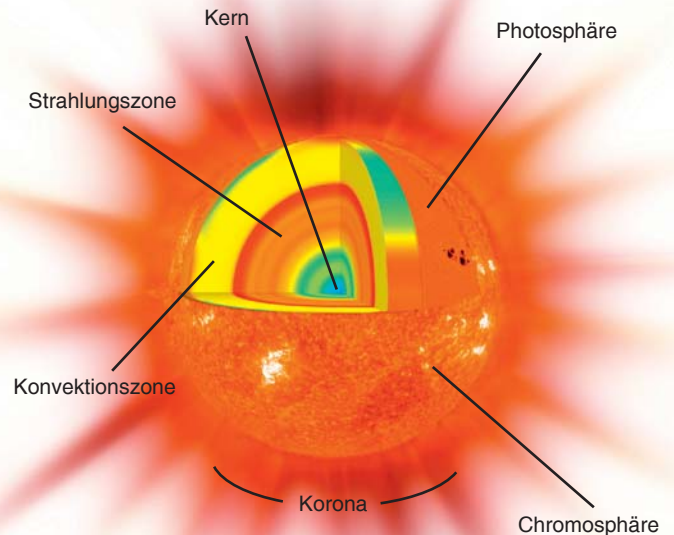


Abbildung: NASA

Die Sonne ist weit mehr als ein gleichmäßig glühender Feuerball und besteht aus mehreren Schichten oder Zonen. So ist der Sonnenkern umhüllt von einer Strahlungszone und diese von einer Konvektionszone, in denen jeweils ganz eigene physikalische Prozesse dominieren. Auf dem Weg von innen nach außen schließt sich nun die Photosphäre an, die als Oberfläche der Sonne gilt, denn die Strahlung der Photosphäre ist das, was wir als Sonnenlicht wahrnehmen. Aber auf der Oberfläche ist die Sonne noch nicht zu Ende. Allein die nächste atmosphärische Schicht, die Chromosphäre, erstreckt sich bis in eine Höhe von 2000 km, über der sich, nach einer kurzen Übergangszone, die Sonnenkorona bis zu Höhen von ein bis zwei Millionen Kilometern ausdehnt.

Gleichzeitig hat die Dichte der Materie drastisch abgenommen. Während sie in der Sonnenmitte noch zehnmals so dicht wie Blei war, hat sie in der Photosphäre nur noch ein Millionstel der Dichte von Wasser. Die Atome können ihre Wärmeenergie in diesem dünnen Gas nun ungehindert als Strahlung abgeben.

Die Energie Ihres nächsten Sonnenbrandes hat nun 700 000 Kilometer innerhalb von einigen zehntausend Jahren zurückgelegt. Vor sich hat sie noch eine Strecke von 150 Millionen Kilometern. Doch auf dieser letzten großen Etappe stellt sich der Strahlung kein Hindernis mehr in den Weg. Für den Beginn Ihres Sonnenbrandes bedeutet das: noch acht Minuten.

AXEL TILLEMANS



Foto: mauritius images/age

Das eiskalte Auge in die Vergangenheit

Der Nachfolger des Weltraumteleskops Hubble wird im Jahr 2013 weit weg von der Erde im Weltraum ausgesetzt. Der Grund: Die geringe Wärmeabstrahlung der Erde würde die Beobachtungen stören.

Zu den Zeiten von Galileo Galilei war Astronomie noch ein Ein-Mann-Geschäft. Im Jahr 1609 hatte Galilei gehört, dass in Holland ein Instrument erfunden worden war, mit dem man in die Ferne sehen kann. Kurze Zeit später hatte er das Instrument nachgebaut und Anfang des nächsten Jahres entdeckte er mit einer verbesserten Version seines Fernrohres vier der Jupitermonde.

Inzwischen ist die Astronomie ein wenig aufwendiger geworden. Von den ersten Planungsanfängen des Nachfolgeprojekts für das Weltraumteleskop Hubble bis zu seinem Start, der

zur Zeit für das Jahr 2013 vorgesehen ist, werden mehr als zwanzig Jahre vergangen sein. An dem inzwischen nach einem ehemaligen NASA-Chef benannten „James Webb Space Telescope“ (JWST) sind die NASA, die ESA und die kanadische Welt- raumbehörde CSA beteiligt. Und auch die PTB wird ihren Beitrag leisten: Sie wird für die Kalibrierung eines der vier Beobachtungsinstrumente des JWST sorgen.

Während Hubble für den sichtbaren und ultravioletten Frequenzbereich des Lichts zuständig ist, wird das JWST das All im Infraroten durchforsten. Damit kann das JWST nicht nur neue Erkenntnisse über bereits bekannte Sterne und Galaxien gewinnen, sondern auch Objekte beobachten, die Hubble nicht sehen kann – wie zum Beispiel Sterne, die gerade dabei sind, zusammen mit ihren Planeten aus einem Staubnebel zu entstehen. Auch das hinter Staub verborgene Zentrum unserer Milchstraße wird das JWST ins Visier nehmen. Außerdem soll es etwa 13 Milliarden Jahre weit in die Vergangenheit schauen und herausfinden, wann die „Dunkle Ära“ des Universums endete, wann also die ersten Sterne entstanden sind.

Um all diese Aufgaben zu erfüllen, muss das JWST dazu in die Lage versetzt werden, selbst schwächste Infrarotstrahlung aus großen Entfernungen empfangen zu können. Doch dabei gibt es ein Problem:

Jedes Objekt, das nicht bis auf den absoluten Nullpunkt, der bei minus 273 Grad Celsius liegt, abgekühlt wurde, strahlt Infrarotstrahlung ab, also auch das JWST selbst. Um diese Strahlung in einem akzeptablen Maße zu halten, dürfen die für die Beobachtung relevanten Teile des JWST eine Temperatur von etwa minus 220 Grad Celsius nicht überschreiten.

Christian Monte kalibriert Strahlungsthermometer auch für einen Einsatz unter extremen Bedingungen, etwa für das James-Webb-Teleskop. Die Apparatur beherbergt einen Hohlraumstrahler in einer Vakuumkammer und kann mit flüssigem Stickstoff gekühlt werden, um der unwirtlichen Kälte im Weltraum mit etwa -190 °C möglichst nahe zu kommen und unerwünschte Umgebungsstrahlung zu unterdrücken.

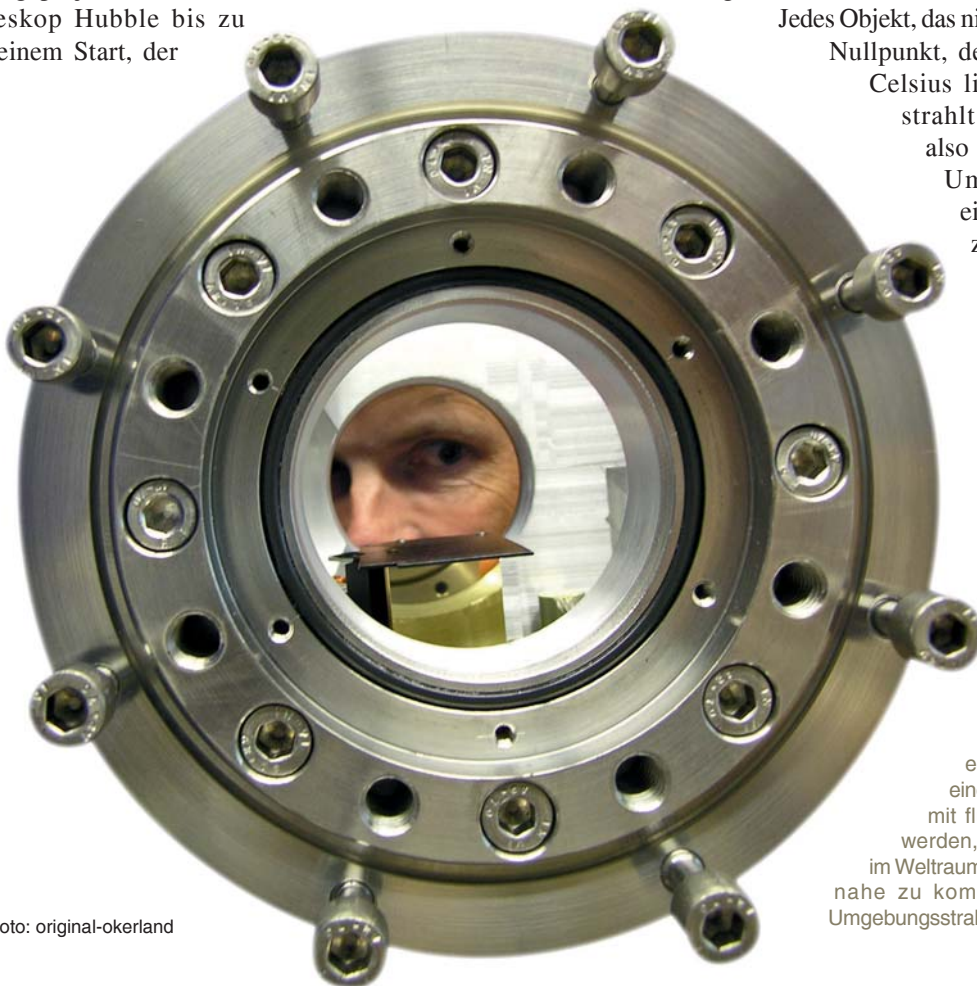


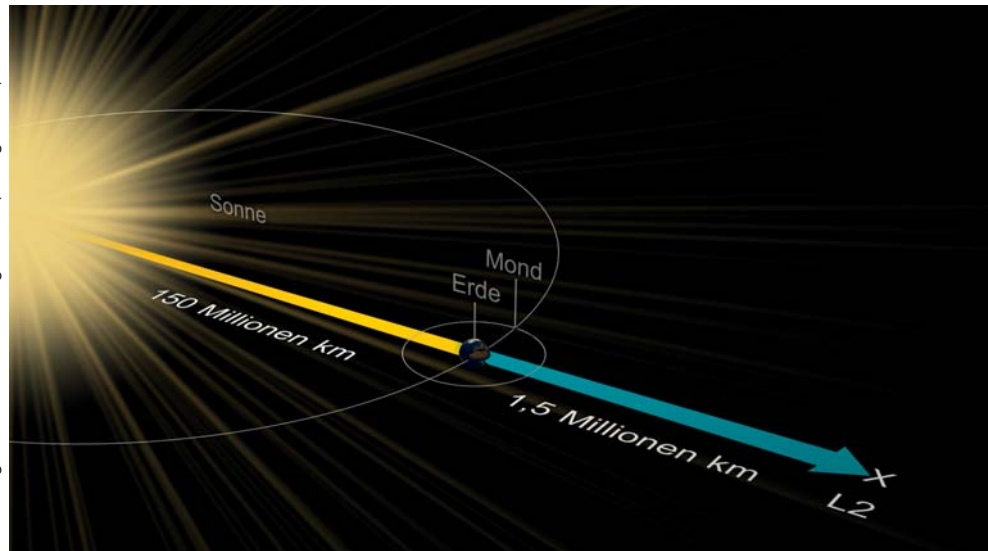
Foto: original-okerland

Die naheliegende Möglichkeit, eine solch niedrige Temperatur mit einem Kühlmedium wie flüssigem Helium aufrechtzuerhalten, ist bei einer geplanten Lebensdauer des Teleskops von mindestens fünf Jahren nicht durchführbar. Bleibt nur die zweite Option: verhindern, dass das Teleskop von der Sonne, aber auch von der Wärmestrahlung von Erde und Mond aufgeheizt wird. Dazu verfügt das JWST über einen etwa 12 Meter mal 22 Meter großen Sonnenschild.

genbereich von 0,6 bis 5 tausendstel Millimeter abgedeckt.“ Aus den von NIRSpec durchgeführten Analysen wird man später Rückschlüsse auf die chemische Zusammensetzung der beobachteten Objekte ziehen können. Unter anderem soll NIRSpec das „erste Licht“ analysieren, das von den ersten Galaxien im Universum ausgesandt wurde. Sie sind vermutlich einige 100 Millionen Jahre nach dem Urknall entstanden.

Nahezu kräftefrei wird das James-Webb-Teleskop im Lagrange-Punkt L2 seine Bahn ziehen. Bei dem vereinfachten System eines um einen Zentralstern kreisenden Planeten – also hier: Sonne und Erde – lassen sich insgesamt fünf solcher Punkte finden. Aber nur einer von ihnen, nämlich L2, sitzt gleichzeitig im Erdschatten und wird nicht durch die Sonnenstrahlung aufgeheizt.

Abbildung: Alberto Parra del Riego / PTB (Vorlage: ESA)



Doch damit stellt sich gleich das nächste Problem: Würde das JWST wie Hubble die Erde umkreisen, dann bräuchte es drei solcher Schilde, jeweils einen zum Schutz vor der Strahlung der Sonne, der Erde und des Mondes. Die einzige praktikable Lösung für dieses Problem ist, das Teleskop irgendwohin zu „setzen“, von wo aus es alle drei Himmelskörper in der gleichen Richtung sieht. Will man darüber hinaus nicht permanent Treibstoff verbrauchen, dann ist der einzig mögliche Platz für das JWST der so genannte Lagrange-Punkt L2, der etwa 1,5 Millionen Kilometer von der Erde entfernt liegt – und zwar auf der Verlängerung der Linie Sonne-Erde. In einem Lagrange-Punkt (von denen es bei einem vereinfachten System aus Zentralgestirn und Planet insgesamt fünf gibt) kann das Teleskop „geparkt“ werden, da hier die Gravitationskräfte von Erde und Sonne durch die Zentrifugalkraft gerade kompensiert werden.

Die Analyse nutzt aus, dass jedes chemische Element und jede chemische Verbindung einen charakteristischen „Fingerabdruck“ aus verschiedenen Spektrallinien besitzt, deren energetische Verteilung und Intensität davon abhängen, welche quantenmechanischen Bahnen die Elektronen der Stoffe einnehmen können. Beim Sprung von einer energetisch höheren auf eine niedrigere Bahn geben die Elektronen Licht einer bestimmten Wellenlänge ab.

Durch die niedrige Temperatur, die das JWST aufgrund der Platzierung am L2 aufrechterhalten kann, wird störende Wärmestrahlung nicht nur von den Infrarotkameras des JWST ferngehalten, sondern auch vom Infrarotspektrometer NIRSpec (Near Infrared Spectrograph). Dieses Instrument wird vom europäischen Raumfahrtkonzern EADS Astrium in Ottobrunn und Friedrichshafen gebaut. Für seine Kalibrierung, also für den Abgleich mit exakt bekannten Referenzwerten, sorgt der Fachbereich Hochtemperatur- und Vakuumphysik der PTB.

Für NIRSpec gibt es zwei Kalibrierquellen, eine relative, die mitfliegt, und eine absolute, mit der NIRSpec am Boden vor dem Flug kalibriert wird. Die PTB kalibriert die absolute Quelle, die den Namen RCSS (Radiometric Calibration Spectral Source) trägt und ebenfalls von EADS Astrium hergestellt wird. Es müssen sowohl die Wellenlängenmessung als auch die Intensitätsmessung kalibriert werden. „Die Wellenlängenkalibrierung geschieht zum Beispiel mit Niederdruckentladungslampen, die mit bestimmten Metaldämpfen oder Gasen gefüllt sind, oder mit Lasern“, erläutert Monte. Die Kalibrierung der Intensitätsmessung geschieht dagegen durch Vergleich des RCSS mit einem Hohlraumstrahler. Denn bei diesem hängt die Intensitätsverteilung über die einzelnen Wellenlängen nur von der Temperatur ab und ist sehr gut bekannt. NIRSpec wird daher bei tiefen Temperatur kalibriert, um den realen Einsatzbedingungen im All möglichst nahe zu kommen – beste Voraussetzungen für einen klaren Blick in den infraroten Himmel und damit in die tiefe Vergangenheit unseres Universums. ■

„NIRSpec misst gleichzeitig für viele kontinuierlich aufeinanderfolgenden Wellenlängen die Intensität des eingefangenen Lichts“, erklärt Christian Monte von der PTB. „Dabei wird im nahen Infrarot der gesamte Wellenlän-

AXEL TILLEMANS

Aus der Glut geboren... wird das Universum in der Kälte enden

Am Anfang war die Hitze. Nichts anderes gab es in jenem großen Knall, dem Urknall oder Big Bang, mit dem unser Universum vor rund 14 Milliarden Jahren begann: keine Materie, keine Kräfte, vor allem keinerlei Ordnung. Die Welt war nichts anderes als ein unvorstellbar heißes und dichtes Energiepaket, das mit atemberaubender Kraft explodierte. Bereits einen Wimpernschlag später begannen sich daraus die Anfänge dessen zu formen, was wir heute kennen: die vier Grundkräfte und die Materie. Dass aus einem Energieklumpen letztlich so feine Dinge entstehen konnten wie eine goldene Taschenuhr oder das Rad eines Pfaus, war nur möglich, weil sich das Universum danach als Ganzes abkühlte, aber gleichzeitig immer wieder neue Glutnester aufflackerten. Und so erzählt uns die Geschichte der Temperatur im Kosmos auch die Geschichte, wie unsere Welt überhaupt entstand.

Foto: Axel Mellinger, Potsdam

Das Wechselbad aus heiß und kalt begann in einer Hitze, deren Temperatur man zwar nennen kann – es waren mehr als 10^{32} Grad –, zu der uns aber jeglicher Vergleich fehlt. Der Urknall trieb das Weltall auseinander, es dehnte sich aus, verdünnte sich und kühlte sich dabei gleichzeitig ab. Wenige Mikrosekunden danach bestand das gesamte Universum bereits aus einem etwa zehn Kilometer dicken Feuerball mit einer Temperatur von rund zehn Billionen Grad. Es gab inzwischen schon die vier Grundkräfte, aber immer noch keine Protonen und Neutronen, wie wir sie heute kennen, ganz zu schweigen von Atomen. Dafür war es noch viel zu heiß. Das Einzige, was in dieser Höllenglut existieren konnte, war eine superdichte, extrem energiereiche Mischung aus verschiedenen Elementarteilchen wie Quarks, Gluonen, Elektronen, Myonen und Neutrinos.

Einige dieser Teilchenarten kennt man heute nicht mehr aus der Natur. Wissenschaftler haben sie erst in den letzten Jahrzehnten wieder entdeckt, als sie in großen Beschleunigern Verhältnisse schufen, wie sie kurz nach dem „Big Bang“ herrschten. In der ersten Sekunde danach aber war die ganze Welt erfüllt von ihnen. In den folgenden drei Minuten ballten sich in der am Ende etwa 900 Millionen Grad heißen Strahlungs- und Teilchensuppe die Quarks in Dreiergrüppchen zu stabilen Teilchen wie Protonen und Neutronen zusammen, und aus diesen entstanden dann erste, extrem einfache Atomkerne – die Leichtgewichte Wasserstoff und Deuterium. Der Grundstein für unseren Kosmos war damit gelegt.

Die Welt bestand aber nicht lange nur aus Wasserstoffkernen. Häufig stießen sie mit anderen Protonen und Neutronen zusammen und bildeten dabei Klümpchen aus zwei Neutronen und einem Proton oder aus zwei Protonen und einem Neutron. Diese konnten dann jeweils noch ein

weiteres Teilchen einfangen, und so entstand Helium, mit zwei Protonen und zwei Neutronen im Atomkern das zweitleichteste Element des Universums. Erst als es sich weiter abkühlte, konnten sich die positiv geladenen Atomkerne nach und nach negativ geladene Elektronen einfangen (zuvor hatte die Temperatur jede Elektronenbindung sofort zerstört) und mit ihnen zusammen Atome bilden, die nach außen hin elektrisch neutral waren.

Danach herrschte erst einmal vergleichsweise Ruhe. Das Universum, das nun in der Hauptsache aus den Gasen Wasserstoff und Helium bestand, dehnte sich weiter aus und kühlte sich immer mehr ab, seine Temperatur war nach einer Million Jahren schon auf rund 1000 Grad gesunken. Eigentlich eine langweilige Zeit ohne besondere Höhepunkte. In ihr wurden jedoch die Keime gelegt für die Sterne und Galaxien und damit auch für die Entstehung der schwereren Elemente. Diese begann einige Millionen Jahre nach dem Urknall und hält auch heute noch an.

Die dazu nötigen Vorgänge, die aus unserer menschlichen Perspektive langsam, fast statisch aussehen, erscheinen im Zeitraffer wie ein ständiges Wabern und Brodeln im Weltall: Unter dem Einfluss der Schwerkraft ballen sich an vielen Stellen Gaswolken zusammen. In manchen Bereichen werden sie aufgrund natürlicher Schwankungen immer dichter und wärmer, bis nach vielen Millionen Jahren erst Gasnebel und dann Gaskugeln entstehen. Die Gravitation drückt sie weiter zusammen, und in ihrem heißen Inneren beginnt ein Prozess der kosmischen Alchemie. Die chemischen Elemente des Periodensystems bis hinauf zum Eisen werden sozusagen bei großer Hitze „im Bauch der Sterne gebacken“, so der Astrophysiker Günther Hasinger. Die ersten typischen Schritte dazu können wir an unserem Muttergestirn, der Sonne, aus

nächster Nähe „beobachten“: Derzeit besteht unsere Sonne noch fast vollständig aus Wasserstoff. Etwa 600 Millionen Tonnen Wasserstoffkerne verschmelzen in ihr pro Sekunde zu Heliumkernen. Diese Phase des Wasserstoffbrennens wird noch ein paar Milliarden Jahre anhalten. Aber mit zunehmendem Alter verändert sich die chemische Zusammensetzung der Sonne und in ihrem Zentrum wird der Druck so hoch, dass die Temperatur dann 100 Millionen Grad beträgt und die Heliumkerne zu schwereren Elementen wie Kohlenstoff verschmelzen, dabei setzen sie weitere Energie frei. Kohlenstoff wiederum kann weitere Heliumkerne einfangen; es entsteht Sauerstoff.

Wenn das Helium im Inneren eines Sterns irgendwann verbraucht ist, geht das Spiel des Abkühlens und Erhitzens weiter: Die Mischung aus Kohlenstoff- und Sauerstoffkernen kann sich erneut „entzünden“; Kernreaktionen erzeugen nun alle möglichen schweren Elemente. Es entstehen beispielsweise Magnesium, Natrium und Neon oder Schwefel, Phosphor und Silizium. Schließlich, wenn sich der Stern auf zwei bis vier Milliarden Grad aufgeheizt hat, können aus der inzwischen komplizierten Mischung verschiedenster Atomkerne durch Verschmelzung Elemente wie Eisen, Kobalt, Chrom, Mangan und Nickel entstehen. Man nennt dieses Stadium „Silizium-Bremen“. Noch schwerere Elemente bilden sich danach noch durch den Einfang von Neutronen.

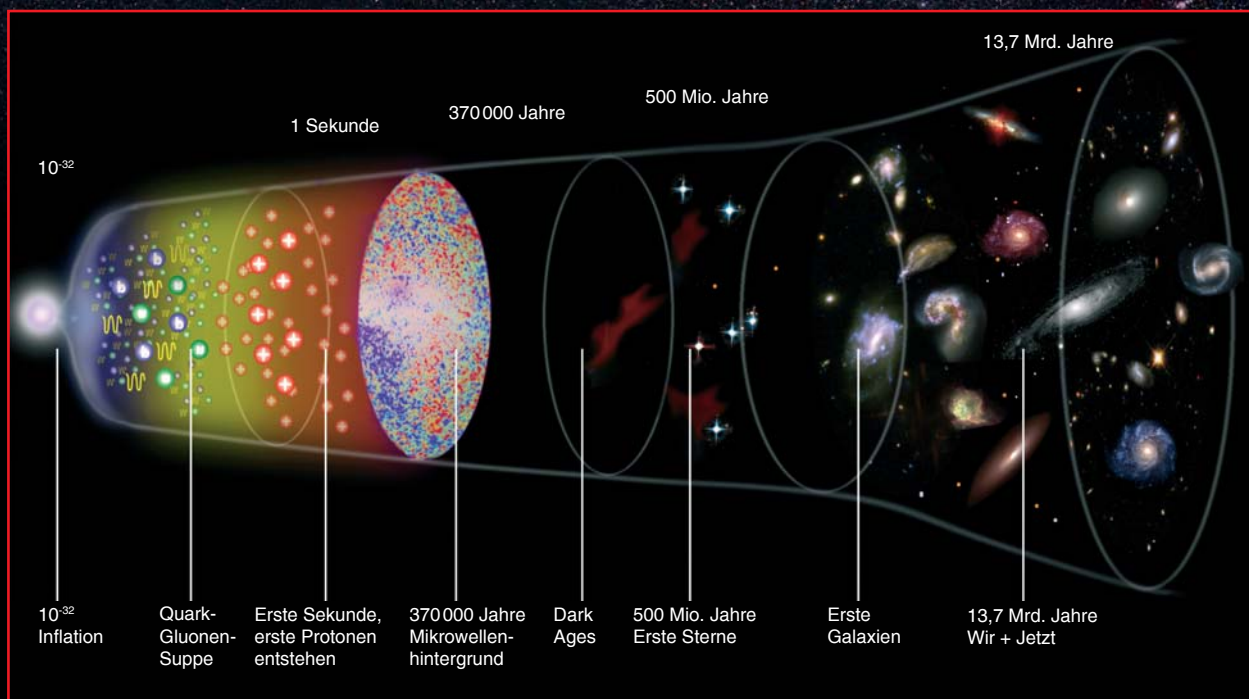
Erst am Ende ihres Lebens werden Sterne zur Brutstätte solch extrem schwerer Elemente. Wenn in ihrem Inneren der Brennstoff verbraucht ist, stürzen sie in einer

gigantischen kosmischen Katastrophe – beispielsweise als Supernova – in sich zusammen und schleudern dabei gleichzeitig ihre äußeren Schichten hinaus ins Weltall. Dabei sind die Temperaturen so hoch und es gibt einen solchen Neutronenregen, dass selbst die schwersten Elemente entstehen können. Sie werden ins All hinausgeschleudert, wo sie sich wieder abkühlen und als kosmischer Staub durch die Weiten des Raums fliegen. Der Rest bleibt zurück und bildet einen Neutronenstern, der anfangs 100 Milliarden Grad heiß sein kann, bevor er sich ebenfalls ganz allmählich abkühlt.

Solche dramatischen Ereignisse sind also dafür verantwortlich, dass beispielsweise unsere Erde entstand mit allem, was wir darauf finden, einschließlich uns selbst. Außerhalb der kosmischen Explosionen jedoch bleibt alles beim Alten: Das Material des Urknalls strebt nach wie vor immer weiter auseinander und kühlt sich immer noch ab. Inzwischen ist vom unvorstellbar heißen Feuer des Urknalls nur noch ein letztes Glimmen übrig geblieben: eine infrarote Hintergrundstrahlung, die für eine All-Temperatur von drei Kelvin, also nur noch drei Grad über dem absoluten Nullpunkt, sorgt.

Und die Abkühlung ist noch nicht zu Ende. Nach heutigen Erkenntnissen wird sich das Universum in aller Zukunft weiter ausdehnen und immer kälter werden. „Am Ende ist es so weit verdünnt, dass es gegenüber der Energie des Vakuums verschwindet – es bleibt ‚Nichts‘ übrig“, glaubt der Astrophysiker Günther Hasinger. Am Ende bleibt die große Leere und Kälte. ■

BRIGITTE RÖTHLEIN



Die Vorstellung mutet befremdlich an, ist aber wahr: Wir entstammen alle einer Quark-Gluonen-Suppe kurz nach dem Urknall. Seitdem sind immerhin 13,7 Milliarden Jahre vergangen und die Suppe hat sich abgekühlt. Die Abbildung zur Entwicklungsgeschichte des Universums entstammt dem bei C.H. Beck erschienen Buch von Günther Hasinger: „Das Schicksal des Universums“; vgl. die Lesetipps auf S. 67.

Leserbriefe zu Heft 8 „Innenansichten“



Die neuen *maßstäbe* sind mal wieder großartig. Gratulation!!
Uta Altmann, Leinfelden-Echterdingen, 22.10.2007

Ich bewundere mit jedem Heft mehr Ihre grandiose Fertigstellung dieser Hefte. Das Layout sieht einfach toll aus und die Texte sind für jeden einfach und verständlich gehalten. Besonders gefällt mir, dass die einzelnen Themen und Probleme mit Bildern und Berichten aus dem wahren Leben erzählt werden. Dadurch kann man sich so einiges besser verdeutlichen, als wenn einem ein sturer, ein wissenschaftlich geschriebener Text vorliegt.
Sebastian Lorenz, 24.10.2007

Habe soeben die neue Ausgabe bekommen. Danke! Es ist eine Lust, das Heft in der Hand zu halten und durch die Beiträge zu stöbern. Geht eigentlich nicht, man liest sich fest. Weiter so!
Wilhelm Basse, Neuerburg, 25.10.2007

Das Warten hat sich gelohnt!!! Regelrecht verschlungen habe ich die Artikel. Danke an Erika Schow für „Viele Kabel – und ein ganz bisschen Kind“. Einmal mehr die Augen geöffnet, dass das Leben keine Selbstverständlichkeit ist.
K. Geißler, 29.10.2007

Ich habe vor ein paar Tagen per Abo das erste Mal eine Ausgabe von *maßstäbe* bekommen. Ich habe die Artikel in 1 ½ Tagen „verschlungen“. Sie waren allesamt informativ und super geschrieben. Auch die etwas „fachfremden“ Artikel haben gut in das Gesamtkonzept gepasst und waren interessant zu lesen. Ich freue mich schon auf die nächste Ausgabe. Weiter so!
Thomas Hauth, Karlsruhe, 29.10.2007

Vielen Dank für die Zusendung des neuen *maßstäbe*-Heftes. Es setzt selbst einen Maßstab! Ich bin begeistert über die redaktionelle Aufbereitung des Themas „Innenansichten“ und schätze sehr das Layout der Beiträge. Auch die Schülerinnen und Schüler meines Kurses zum Thema „Naturwissenschaftliche Grundlagen der Medizin“ werden diese Einschätzung zweifellos teilen.
Jürgen Brockhoff, Kleve, 29.10.2007

Vielen Dank für das PTB-Magazin *maßstäbe*: „Innenansichten“. Diese Informationen sind bei meiner weiteren politischen Arbeit sicherlich hilfreich.
Heidmarie Mundlos, Braunschweig, 29.10.2007

Dieses Magazin bekomme ich von Ihnen seit mehreren Jahren und ich bin mit dem Inhalt sehr zufrieden. Es enthält viele interessante Informationen aus den verschiedenen Gebieten der Wissenschaft und Technik und ist dazu gut lesbar. Auch seine grafische Gestaltung ist ausgezeichnet. Ich möchte mich bei allen Autorinnen und Autoren sowie allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern dieser Zeitschrift recht herzlich bedanken.
Jaroslav Hrdy, Pardubice, Tschechische Republik, 31.10.2007

Zunächst vielen Dank für die Zusendung der neuen Ausgabe, die wie immer hervorragend gemacht und sehr lesenswert ist. Ein winziges Detail möchte ich dennoch kritisieren. In dem Beitrag „Lass leuchten ...“ schreibt Jens Simon den Satz: „Diese Untersuchung trägt den Namen Positronen-Emissions-Tomographie, den sich nur Wissenschaftler dauerhaft

merken können.“ Ach? Nur Wissenschaftler? Wissen Sie, was mich an diesem Satz so ärgert? Sie verkaufen Ihre Leser für dumm. Alle Welt klagt, dass das Interesse an Wissenschaft und Technik zurückginge, weniger junge Menschen Ingenieurs- oder wissenschaftliche Studiengänge verfolgen. Und Sie? Sie unterstützen das zurückgehende Interesse mit solchen Sätzen. Weil Sie den Lesern einreden, dass alles so furchtbar kompliziert ist, dass es sich sowieso nicht lohnt, sich so was Kompliziertes wie PET zu merken. Sie bestärken die Leser, die sich nur von der Technik verzaubern lassen, ohne sie zu verstehen, ohne sie verstehen zu wollen.
Ekkehard Plicht, 4.11.2007

Zu Birgit Ehlbecks „Beim Betrachten von Tante Wandas Schädel“. Vorschlag, um Tante Wandas Vermächtnis zu erfüllen: Das Rezept für die „Aprikosen-Sahne-Torte mit Walnüssen“ in *maßstäbe* veröffentlichen.
Karl-Heinz Remscheidt, Essen, 6.11.2007

(Anmerkung der Redaktion: Danke für die Anregung! Sie finden das Rezept auf den Internetseiten der Ausgabe 8, „Innenansichten“, beim Artikel von Birgit Ehlbeck: <http://www.ptb.de/de/publikationen/mass-staebe/mst08/0813.html>)

Ich freue mich jedes Mal, wenn Ihre *maßstäbe* kommen. Die Themen sind meist äußerst interessant und stets leichtverständlich dargestellt. Ferner kann ich es nur begrüßen, dass Ihr Heft frei von Werbung ist. Machen Sie so weiter!
Christian Krauß, Esslingen, 7.11.2007

Vielen Dank für die Zusendung der neuen, wie immer sehr interessanten Ausgabe. Auch die optische Gestaltung hat Qualität, und ich freue mich schon auf das nächste Heft.
Max Erhart, Wien, Österreich, 10.11.2007

Als begeisterte *maßstäbe*-Leser würden meine Frau und ich uns freuen, dieses und die künftigen Hefte zu erhalten, die für mich eine willkommene Verbindung zu meiner früheren

beruflichen Wirkungsstätte darstellen. Eine Bemerkung noch zum Schluss: Ich fände es gut, wenn die Autoren der Beiträge in den *maßstäbe*-Heften jeweils kurz vorgestellt würden und auch ihre Adressen angegeben wären, damit man sich zur Diskussion direkt an sie wenden kann.

Reinhard Probst, Braunschweig, 12.11.2007

Heute erhielt ich das neue *maßstäbe*-Heft. Ich will den naheliegenden Vergleich von wegen „Maßstäbe setzen“ nicht bemühen, das haben viele Leserbrief-Schreiber bereits getan, aber Ihr Heft ist wirklich hervorragend gelungen. Ein Kompliment an Ihr kleines Team!

Jörg Maas, Berlin, 14.11.2007

Seit einigen Ausgaben erhalte ich das *maßstäbe*-Magazin von Ihnen. Es ist immer wunderbar zu lesen und Sie haben mit mir einen sehr zufriedenen und begeisterten Leser!

Johannes Burmeister, München, 14.11.2007

Von diesen großartigen PTB-Magazinen, die ich bei einem Bekannten gesehen habe, bin ich restlos begeistert und bitte Sie darum, mit künftig diese *maßstäbe* zu schicken. Herzlichen Dank!

Finn Viehberg, Leipzig, 16.11.2007

Unser Physiklehrer hat uns das Heft im Leistungskurs vorgestellt. Super Qualität, super Artikel und das umsonst. *Daumen hoch*

Marco Akrutat, Berlin, 16.11.2007

Die von Ihnen vorgeschlagene finanzielle Unterstützung kann ich nicht leisten, da der Schuletat viel zu knapp ist. Eine Bemerkung zum Leserbrief des Herrn Meier aus Freising sei mir noch gestattet. Meine Tochter würde nach Beendigung einer fundierten Ausbildung zur Buchhändlerin monatlich mit 860 € auskommen müssen. Soviel bleiben ihr nach Bezahlung aller Steuern und der notwendigen Versicherungen. Eine Teilnahme an der Kultur unseres Landes ist dann nur sehr eingeschränkt möglich – Riester oder *maßstäbe*! „Um die anderen ist es nicht schade!“, so Herr Meier; welch Verachtung spricht aus diesen Worten.

Wilfried Paszkowski, Meine, 25.11.2007

Von Anfang an bin ich von *maßstäbe* begeistert. Die Zeitschrift ist ausgezeichnet gestaltet. Ich konnte sie schon vielfach in meiner Arbeit einsetzen. Ich gebe nämlich Unterricht an zwei Berufsschulen. Auch bei meinen privaten Aktivitäten, z. B. im philosophischen Café, habe ich schon viele Ideen aus dieser Zeitschrift geschöpft. Gerne hatte ich die

Nr. 7 gesponsert, und sollte es wieder einmal nötig werden, einer weiteren Nummer finanzielle Unterstützung zu leisten, tue ich das gerne.

Mathias Schmögner, Kronach, 11.12.2007

Ich bin immer etwas traurig, wenn Sie in Ihren auf teurem Hochglanzpapier gedruckten Texten der *maßstäbe* immer von der Annahme ausgehen, als seien alle Ihre Leser mathematisch ganz unterentwickelte Leute. Meine Lebenserfahrung ist, dass alle Mühe, „Lieschen Müller und Onkel Heini“ etwas zu „verklickern“, verlorene Zeit ist und verlorene Unkosten bedeuten.

Hans-Jürgen Brockmann, Muurla, Finnland, 13.1.2008

Ich bin eifriger Leser Ihres Magazins und freue mich auf jedes neue Exemplar, das ich von vorne bis hinten lese. Machen Sie weiter so.

Dieter Simm, Obergünzburg, 13.1.2008

Das Magazin hat mir während der Schule und auch in der Ausbildung sehr geholfen, um bestimmte Dinge nachvollziehen zu können oder einfach nur, um meinen Horizont zu erweitern. Für die Bereitstellung des Magazins möchte ich Ihnen danken.

Dirk Höppner, Berlin, 5.2.2008

Lesenswertes zu diesem Heft:

Ashcroft, Frances: Life at the Extremes: The Science of Survival. University of California Press, 2000, 0-52023420-0

Carwardine, Mark: Extreme der Natur. National Geographic, Deutschland, Hamburg, 2006, 3-937606-57-2

Davies, Nicola; Layton, Neal: affenheiß und schweinekalt. Die Überlebenstricks der Tiere. Sauerländer, Düsseldorf, 2007, 978-3-7941-5172-1

Hasinger, Günther: Das Schicksal des Universums. Eine Reise vom Anfang zum Ende. C.H.Beck, München, 2007, 978-3-406-56203-7

Müller, Michael; Fuentes, Ursula; Kohl, Harald (Herausgeber): Der UN-Weltklimareport. Bericht über eine aufhaltsame Katastrophe. Kiepenheuer & Witsch, Köln, 2007, 978-3-462-03960-3

Rees, Martin (Herausgeber): Das Universum. Die große Bild-Enzyklopädie. Dorling Kindersley, Starnberg, 2006, 978-3-8310-0946-5

Shachtman, Tom: Minusgrade – Auf der Suche nach dem absoluten Nullpunkt. Eine Chronik der Kälte. Rowohlt, Hamburg, 2001, 978-3-49961118-6 (Original: „Absolute Zero and the conquest of cold“. Unter dem gleichen Titel erschien auch ein Filmbeitrag der BBC, zu finden unter www.youtube.de)

Völz, Horst; Ackermann, Peter: Die Welt in Zahlen und Skalen. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, 1996, 978-3-86025118-8

Walker, Gabriel; King, David: Ganz heiss. Die Herausforderung des Klimawandels. Berlin Verlag, Berlin, 2008, 978-3-8270-0766-7

Das Letzte

Als der Physiker K. eines Morgens den Fahrstuhl betrat, um sich in sein Tieftemperaturlabor bringen zu lassen, registrierte zuerst sein Rückenmark – K.s Bewusstsein war noch in der Aufwachphase –, dass heute die Dinge anders lagen als gewöhnlich. K.s Arm streckte sich automatisch auf Hüfthöhe aus, der Zeigefinger seiner rechten Hand zielte auf die Stelle, auf die er jeden Morgen zielte: auf den Knopf für das Untergeschoss und ... verhartete. Irgendein Spaßvogel musste sich einen Scherz erlauben haben, denn statt der üblichen Etagenknöpfe zog sich ein matt leuchtendes, schmales Lichtband wie ein Streifen von der Kabinendecke bis zum Fußboden. „Willkommen und guten Morgen! Ich bin Ihr logarithmischer Fahrstuhl. Wohin darf ich Sie bringen?“

K.s Unterkiefer klappte, während die Fahrstuhltür sich mit einem satten Schmatzen hinter ihm schloss, nach unten; sein Gehirn setzte sich träge und etwas widerwillig in Bewegung. „Träume ich?“, dachte K. und kniff sich vorsichtshalber in die rechte Wange, um in die Wirklichkeit zurückzukommen. Aber die Szenerie blieb wie zuvor. „Ähem“, räusperte sich der Fahrstuhl, „ist Ihnen nicht wohl?“ „Nein, nein, ich bin nur ... wie soll ich sagen, etwas verwirrt. Kann mich nicht erinnern, dass je ein Fahrstuhl mit mir gesprochen hätte.“ „Na, dann wird es ja höchste Zeit. Wohin darf ich Sie also bringen? Eher nach oben in die heißen Zonen oder eher nach unten in die Kälte?“ K. bemerkte jetzt mitten im Lichtband, etwa in Augenhöhe, einen blinkenden Fleck, auf dem bei jedem Aufblitzen die Zahl 294 zu erkennen war. „Wir befinden uns jetzt immer noch dort, wo Sie eingestiegen sind“, sagte der Fahrstuhl, „also bei der ganz gewöhnlichen Zimmertemperatur von 21 °C bzw. 294 Kelvin. Wohin darf es jetzt also, bitte schön, gehen?“ K. glaubte, eine gewisse Ungeduld in der Stimme des Fahrstuhls herausgehört zu haben, und sagte, um überhaupt etwas zu sagen: „Wie wär’s mit einem Abstecher zur Sonne?“ Kaum gesagt, ruckelte es kurz, der Fahrstuhl setzte sich in Bewegung und der blinkende Fleck kletterte langsam und gleichmäßig nach oben. Wie um die zurückgelegten Etappen zu markieren, leuchtete etwa nach jeder handbreiten Strecke eine Zahl auf:

1000 – 10 000 – 100 000 – 1000 000, bis der Fleck – mittlerweile musste sich K. auf die Zehenspitzen stellen, um die Zahl lesen zu können – zur Ruhe kam und 15 000 000 anzeigte. „Wir haben unser Ziel erreicht“, sagte der Fahrstuhl, „wollen Sie aussteigen?“ „Oh!“ sagte K., der etwas bleich geworden war und unwillkürlich an seine Kollegen von der Plasmaabteilung denken musste, die immer nur mit nackten Atomkernen ohne schützende Hülle spielten. Seine eigenen Atome wollte K. schon gerne noch etwas länger zusammenhalten. „Ich glaube, das Chaos da draußen muss ich mir nicht ansehen. Ich liebe auch vielmehr die Ordnung – schließlich bin ich Tieftemperaturphysiker. Du weißt schon, Fahrstuhl, immer

unterwegs zu absolut Null.“ Wieder ruckelte es kurz, der Fahrstuhl brummelte: „Wenn der Herr sich mal entscheiden könnte!“ und die Kabine glitt jetzt offensichtlich abwärts, denn auch der blinkende Fleck – 100 000 – 10 000 – 1000 – 100 – rutschte immer tiefer. Während sie so in aller Stille dahinfuhren – 10 – 1 – 0,1 – 0,01 – fühlte sich K. immer heimischer. Sie mussten sein Tieftemperaturlabor bei einem Mikrokkelvin ja bald erreicht haben. Der Fleck blinkte – 0,000 001 – mittlerweile auf Kniehöhe und K. fasste in seine Hosentasche, um zu prüfen, ob er seinen Laborschlüssel auch dabei hatte. Jetzt – 0,000 000 1 – waren sie bei „seiner“ Temperatur, doch der Fleck sackte ungerührt tiefer – 0,000 000 01 – und näherte sich K.s Knöchel.

„He, Fahrstuhl! Ich wollte aussteigen!“ schrie K., langsam die Fassung verlierend. „Ich führe nur aus, was Sie gewünscht haben, verehrter Fahrgast“, sagte der Fahrstuhl ungerührt. „Sie wollten zu absolut Null. Eine echte Reise. Eine echte Herausforderung für einen logarithmischen Fahrstuhl.“ K. dämmerte, dass er einen Fehler gemacht hatte – diese logarithmische Fahrt würde nie enden. Die Erkenntnis traf ihn wie ein Schlag. Bevor er das Bewusstsein verlor, sah er aus dem Augenwinkel den Fleck im Fußboden verschwinden und dachte noch: „Absolut Null – das Unerreichbare.“

JENS SIMON

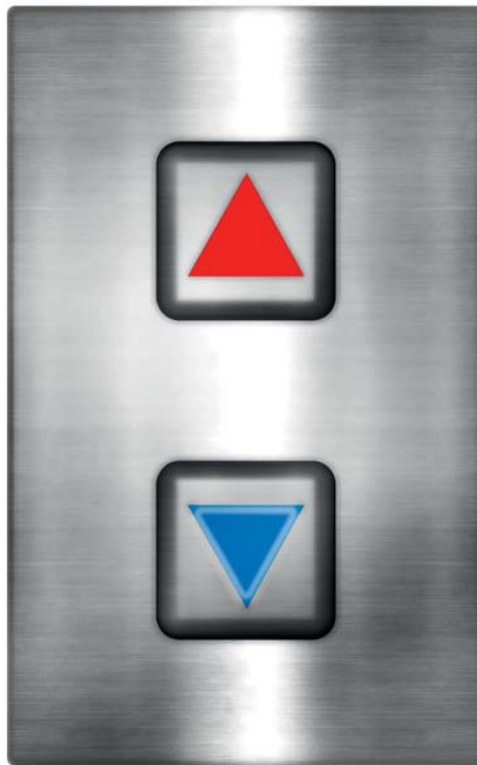


Abbildung: Alberto Parra del Riego/PTB

Sollten Sie hier keine Karte mehr vorfinden, können Sie die *maßstäbe* als kostenloses Abonnement bei der Redaktion direkt bestellen. Ein Abo-Formular finden Sie auf unserer Internetseite (www.ptb.de und dort unter „Publikationen“).

Ich möchte die *maßstäbe* kostenlos abonnieren. Bitte schicken Sie sie mir ab

- der kommenden Ausgabe (Heft 10)
- dieser Ausgabe = Heft 9 (Die Gradmesser) an die umseitig angegebene Adresse.

Bitte schicken Sie mir (falls noch vorrätig) zusätzlich die früheren Ausgaben

- Heft 8 (Innenansichten)
- Heft 7 (Die Unveränderlichen)

Die Hefte 1 bis 6 sind vergriffen. Und auch die Restauflagen der Hefte 7 und 8 sind bald aufgebraucht. Sie finden die *maßstäbe* aber im Internet (www.ptb.de) unter „Publikationen“. Dort können Sie die Hefte im pdf-Format herunterladen.



Ich möchte die *maßstäbe* kostenlos abonnieren. Bitte schicken Sie sie mir ab

- der kommenden Ausgabe (Heft 10)
- dieser Ausgabe = Heft 9 (Die Gradmesser) an die umseitig angegebene Adresse.

Bitte schicken Sie mir (falls noch vorrätig) zusätzlich die früheren Ausgaben

- Heft 8 (Innenansichten)
- Heft 7 (Die Unveränderlichen)

Die Hefte 1 bis 6 sind vergriffen. Und auch die Restauflagen der Hefte 7 und 8 sind bald aufgebraucht. Sie finden die *maßstäbe* aber im Internet (www.ptb.de) unter „Publikationen“. Dort können Sie die Hefte im pdf-Format herunterladen.



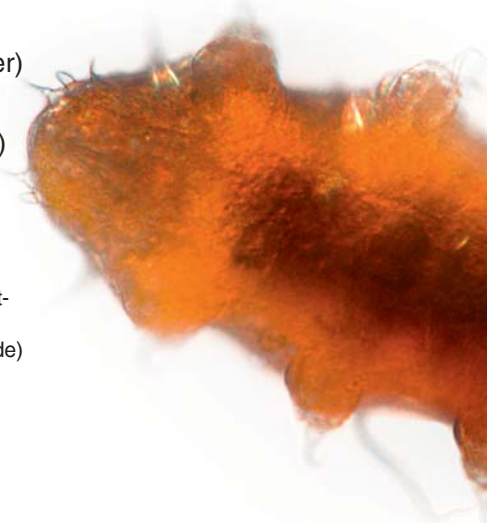
Ich möchte die *maßstäbe* kostenlos abonnieren. Bitte schicken Sie sie mir ab

- der kommenden Ausgabe (Heft 10)
- dieser Ausgabe = Heft 9 (Die Gradmesser) an die umseitig angegebene Adresse.

Bitte schicken Sie mir (falls noch vorrätig) zusätzlich die früheren Ausgaben

- Heft 8 (Innenansichten)
- Heft 7 (Die Unveränderlichen)

Die Hefte 1 bis 6 sind vergriffen. Und auch die Restauflagen der Hefte 7 und 8 sind bald aufgebraucht. Sie finden die *maßstäbe* aber im Internet (www.ptb.de) unter „Publikationen“. Dort können Sie die Hefte im pdf-Format herunterladen.



bitte
frankieren

Absender

Name/Vorname

Straße/Hausnummer/Postfach

PLZ/Ort

Land

Telefon

E-Mail

Antwort

Physikalisch-Technische
Bundesanstalt
Presse- und
Öffentlichkeitsarbeit
Postfach 3345
38023 Braunschweig

bitte
frankieren

Absender

Name/Vorname

Straße/Hausnummer/Postfach

PLZ/Ort

Land

Telefon

E-Mail

Antwort

Physikalisch-Technische
Bundesanstalt
Presse- und
Öffentlichkeitsarbeit
Postfach 3345
38023 Braunschweig

bitte
frankieren

Absender

Name/Vorname

Straße/Hausnummer/Postfach

PLZ/Ort

Land

Telefon

E-Mail

Antwort

Physikalisch-Technische
Bundesanstalt
Presse- und
Öffentlichkeitsarbeit
Postfach 3345
38023 Braunschweig

Sollten Sie hier keine Karte mehr vorfinden, können Sie die Maßstäbe als kostenloses Abonnement bei der Redaktion direkt bestellen. Ein Abo-Formular finden Sie auf unserer Internetseite (www.ptb.de und dort unter „Publikationen“).

Ansprechpartner in der PTB

Folgende Mitarbeiter der PTB sind in den Beiträgen dieses Heftes namentlich erwähnt:

S. 15-17: Kirchhoffs schwarzer Kasten
Dr. Jörg Hollandt (joerg.hollandt@ptb.de)
Dr. Jürgen Hartmann (juergen.hartmann@ptb.de)
Klaus Anhalt (klaus.anhalt@ptb.de)
Fachbereich „Hochtemperatur- und Vakuumphysik“

S. 20-22: Im Club der 17
Dr. Joachim Fischer (joachim.fischer@ptb.de)
Ute Noatsch (ute.noatsch@ptb.de)
Fachbereich „Temperatur“

S. 23-25: Thermometer für alle Fälle
Dr. Joachim Fischer (joachim.fischer@ptb.de)
Fachbereich „Temperatur“
Dr. Jörg Hollandt (joerg.hollandt@ptb.de)
Fachbereich „Hochtemperatur- und Vakuumphysik“

S. 28-31: Das wohltemperierte Labor
Dr. Jens Flügge (jens.fluegge@ptb.de)
Christoph Weichert (christoph.weichert@ptb.de)
Fachbereich „Dimensionelle Nanometrologie“

S. 32-34: Annäherungsversuche
Prof. Dr. Peter Strehlow (peter.strehlow@ptb.de)
Fachbereich „Tiefemperaturthermodynamik und -technologie“

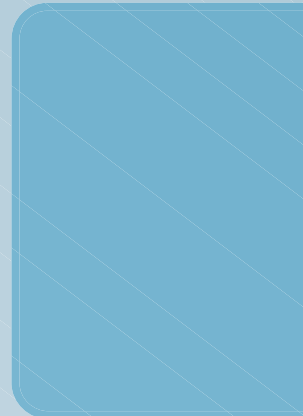
S. 35-37: Entspannt auf Kältekurs
Dr. Thomas Schurig (thomas.schurig@ptb.de)
Götz Klaukin (goetz.klaukin@ptb.de)
Fachbereich „Tiefemperaturthermodynamik und -technologie“
Uwe Weichelt (uwe.weichelt@ptb.de)
Technische Dienste Berlin

S. 38-39: Das Atom, das aus der Kälte kam
Dr. Robert Wynands (robert.wynands@ptb.de)
Fachbereich „Zeit und Frequenz“
Dr. Uwe Sterr (uwe.sterr@ptb.de)
Fachbereich „Quantenoptik und Längeneinheit“

S. 44-47: 37 °C – Der besondere Thermostat
Dr. Jürgen Hartmann (juergen.hartmann@ptb.de)
Fachbereich „Hochtemperatur- und Vakuumphysik“

S. 57: Die Rebellen
Petra Spitzer (petra.spitzer@ptb.de)
Dr.-Ing. Steffen Seitz (steffen.seitz@ptb.de)
Fachbereich „Metrologie in der Chemie“

S. 62-63: Das eiskalte Auge in die Vergangenheit
Dr. Christian Monte (christian.monte@ptb.de)
Fachbereich „Hochtemperatur- und Vakuumphysik“



Impressum

Herausgeber

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin

Redaktion

Presse- und Öffentlichkeitsarbeit, PTB
Postfach 3345, 38023 Braunschweig
Telefon: (0531) 592-3006
Fax: (0531) 592-3008
E-Mail: presse@ptb.de, massstaebe@ptb.de
Redakteure: Jens Simon (jes, verantwortlich), Erika Schow (es)
Grafik und Layout: Alberto Parra del Riego (alb)
Autoren: Birgit Ehlbeck, Frank Frick (ff), Imke Frischmuth, Nicole Geffert,
Anne Hardy, Andrea Hoferichter (ah), Ute Kehse, Jan Oliver Löffken,
Brigitte Röthlein, Dörte Saße (ds), Axel Tillemans
Redaktionsassistent: Cornelia Land, Bernd Warnke

Druck

DruckVerlag Kettler, Bönen/Westf.

Die *maßstäbe* finden Sie auch im Internet unter www.ptb.de

© PTB. Alle Rechte vorbehalten.

Bitte geben Sie bei einem auszugsweisen Nachdruck Quelle und Autor an und benachrichtigen Sie die Redaktion.

Braunschweig, November 2008

Falls Sie die *maßstäbe* unterstützen möchten:

Die *maßstäbe* bleiben weiterhin kostenfrei. Wir freuen uns aber über jede finanzielle Hilfe. Für alle, die etwas für die *maßstäbe* übrig haben, folgt hier die Bankverbindung. Wenn Sie bei Ihrer Überweisung unter dem Verwendungszweck den angegebenen Code eintragen, kommen die Gelder auch einzig und allein der Redaktionsarbeit und der Produktion des Magazins zu Gute.

Deutsche Bundesbank, Filiale Dresden
Bankleitzahl: 850 000 00
Kontonummer: 850 010 11
Verwendungszweck: PTB-770100626262

Für Überweisungen aus dem Ausland:
IBAN: DE 23 8500 0000 0085 0010 11
BIC: MARKDEF1850

