Die Vermessung der Erde

Der Struve-Meridianbogen – ein Weltkulturerbe in zehn Staaten

Wilhelm Struves Weg zu einem der bedeutendsten Astronomen des 19. Jahrhunderts begann mit einem Sprung aus dem Fenster. Seine Erdvermessung wurde 150 Jahre später von der UNESCO als Weltkulturerbe geadelt.

Von Dietrich Lemke

IN KÜRZE

- Auf Grund ihrer Rotation ist die Erde keine Kugel, sondern ein Rotationsellipsoid.
- Der Nachweis dieser Form gelang erst im 19. Jahrhundert durch aufwändige astronomische und geodätische Messungen längs eines Meridianbogens vom Nordmeer bis zum Schwarzen Meer.
- Das von Wilhelm Struve geleitete Unternehmen dauerte 36 Jahre und ist ein frühes Beispiel für internationale wissenschaftliche Zusammenarbeit.
- Die Landmarken des Meridianbogens können interessante Ziele für eigene Exkursionen sein.

W I S wissenschaft in die schulen!

Didaktische Materialien zum Thema für die Arbeit mit Schülern der Oberstufe finden Sie kostenfrei unter www.wissenschaft-schulen.de/artikel/1070005.

Die UNESCO erhob im Jahr 2005 ein europäisches Denkmal in den Rang eines »Kulturerbes der Menschheit«, das in seiner Ausdehnung nur von der Chinesischen Mauer übertroffen wird. Doch im Unterschied zu dem massiven Bauwerk ist vom gut 2800 Kilometer langen Struve-Bogen wenig Greifbares vorhanden: nur einige Dutzend Markierungspunkte zwischen Nordkap und Schwarzem Meer.

Der nach dem Astronomen Wilhelm Struve benannte Bogen stellt vor allem eine grandiose wissenschaftliche Leistung dar: Er diente der präzisen Vermessung der Erdkugel entlang eines Längenkreises, eines Meridians, um daraus die genaue Form des Erdkörpers abzuleiten. 150 Jahre nach Abschluss der Messungen sind uns neben den Landmarken die Veröffentlichungen Struves und seiner internationalen Kollegen über dieses großartige Werk geblieben. Das Unternehmen Struve-Bogen war nach der Beobachtung des Venusdurchgangs von 1769 die erste große Gemeinschaftsarbeit von Wissenschaftlern verschiedener Länder, unterstützt durch ihre jeweiligen Kaiser und Könige.

Schon im Jahr 230 v. Chr. hatte Eratosthenes in Ägypten die Größe der Erde ermittelt. Unter der Annahme einer Kugelform maß er den Abstand zweier Punkte längs eines Meridians. Den Winkelabstand bestimmte er astronomisch: Am Tag der Sommersonnenwende wurde die Sonnenhöhe in Alexandria und in dem sieben Grad weiter südlich gelegenen Syene (dem heutigen Assuan) gemessen. Mit seinem Ergebnis von – in heutigen Einheiten – 128,5 Kilometer pro Grad folgte durch Multiplikation mit 360 Grad ein Erdumfang von 46 260 Kilometern, ein Wert, der den tatsächlichen Umfang nur um 15 Prozent übersteigt.

Die Messungen in den folgenden Jahrhunderten in China, durch islamische Gelehrte im Gebiet des heutigen Irak und später vor allem in Frankreich, lieferten zwar brauchbare astronomische Winkelbestimmungen, aber die Messung großer Entfernungen auf der Erdoberfläche blieb ein Schwachpunkt. Man zählte Schritte oder Seilknoten, Tagesreisen von Pferden oder Kamelen. Erstaunlicherweise weichen die zahlreichen im 17. und 18. Jahrhundert unabhängig voneinander durchgeführten einfachen Messungen für die Länge eines Breitengrads nur um ungefähr zwei Prozent voneinander ab.

Die Erde: Kugel oder Sphäroid?

Eine neue Herausforderung brachte Isaac Newtons theoretische Mechanik: Da die Erde rotiert, sollten Fliehkräfte sie am Äquator ausbeulen und am Pol abplatten. Also wäre der Erdkörper keine Kugel, son-

UNESCO

Meridiansäule Hammerfest, Norwegen

Markus Sirkka

Gipfel des Lille-Raipas, Norwegen

Wikimedia Commons / Flying Saucer

Sternwarte Tartu, Estland

Wikimedia Commons / Islander

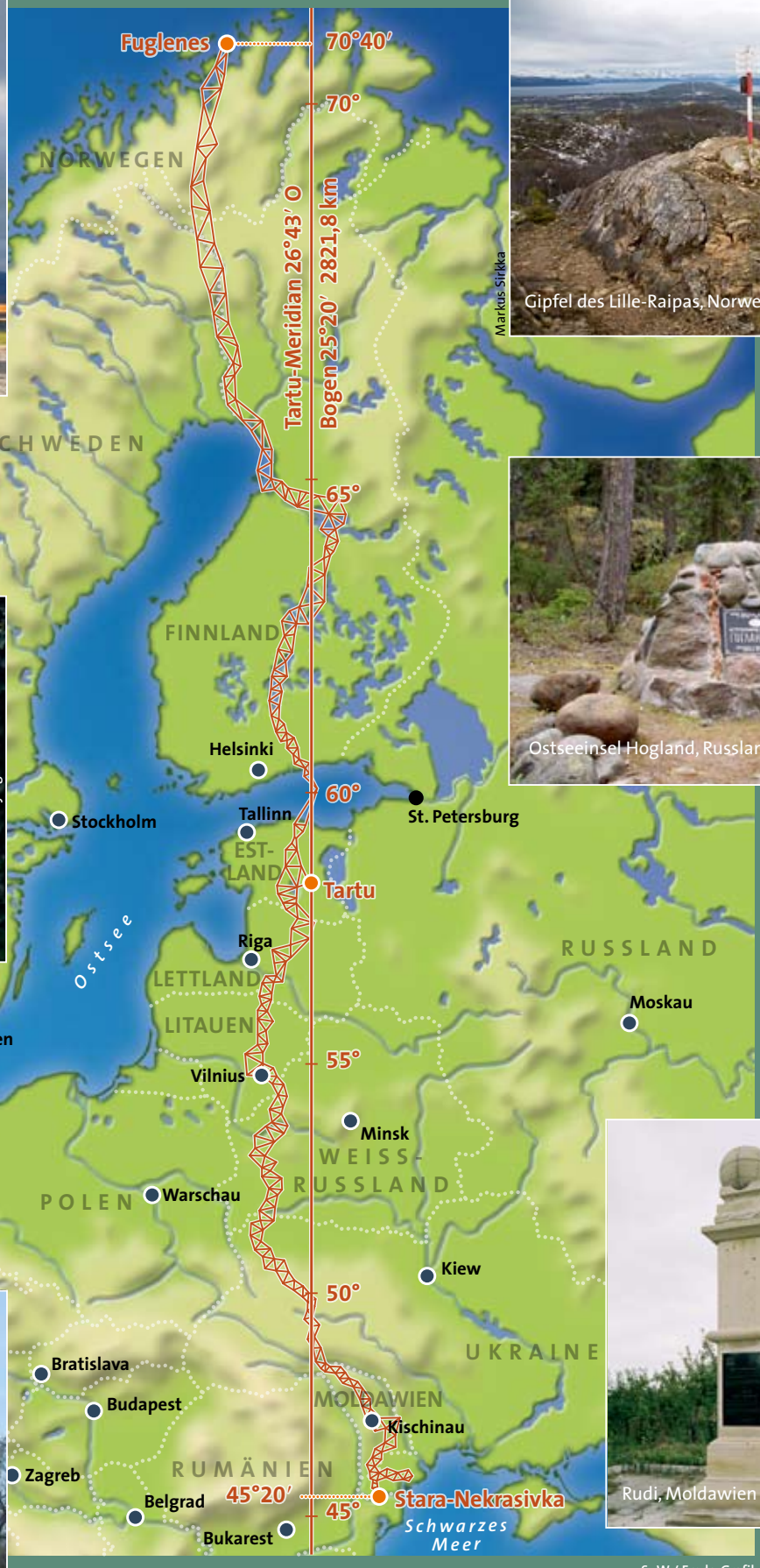
Ostseeinsel Hogland, Russland

Wikimedia Commons / Assedo

Stara-Nekrasivka, Ukraine

Planetarium Bârlad, Rumänien

Rudi, Moldawien

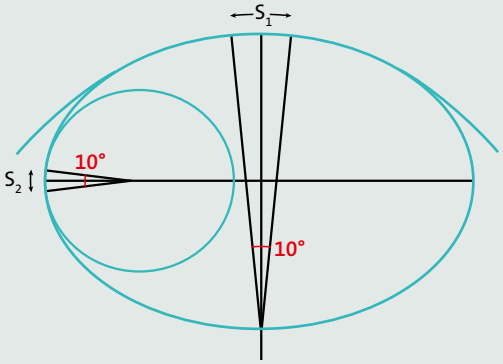


SuW / Emde-Grafik

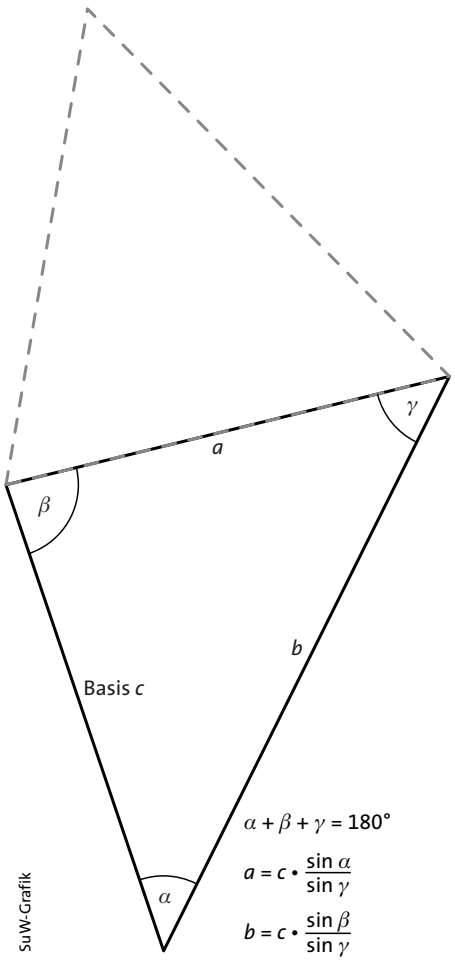
Von Tartu in Estland ausgehend erstreckt sich der Struve-Bogen nach Norden bis zum Nordmeer und nach Süden bis zum Schwarzen Meer. Die 2821,8 Kilometer lange Strecke wurde durch Triangulation mit 265 Festpunkten vermessen. Einige Monumente erinnern an die technische Meisterleistung des 19. Jahrhunderts.

Die Erde, ein Rotationsellipsoid?

Nachdem Isaac Newton Ende des 17. Jahrhunderts die Grundlagen der klassischen Mechanik gelegt hatte, stellte sich die Frage, ob Fliehkräfte die Kugelgestalt der rotierenden Erde zu einem Rotationsellipsoid verzerren. In diesem Fall sollte die Erde am Äquator stärker gekrümmt sein als an den Polen. Kreise, die sich an den Äquator und den Pol anschmiegen, hätten dann unterschiedliche Durchmesser (siehe Grafik). Einem Breitenunterschied von beispielsweise zehn Grad, der sich mit astronomischen Mitteln messen lässt, entspräche dann am Äquator einer kürzeren Strecke auf der Erdoberfläche als in den Polargebieten. Die Grundidee der Struve'schen Erdvermessung war also, zu messen, wie viele Kilometer einem Breitengrad entsprechen, und zu prüfen, ob sich dieser Wert längs eines Meridians ändert.



SuW-Grafik / Quelle: J.R.Smith, The Struve Geodetic Arc



SuW-Grafik

Das Prinzip der Triangulation: Sind in einem Dreieck zwei Winkel und die Länge einer Seite (der Basis c) gemessen, folgen daraus die Größe des dritten Winkels (da die Winkelsumme in jedem Dreieck 180 Grad beträgt) und die Längen der beiden anderen Seiten. Durch Anfügen weiterer Dreiecke (gestrichelt) lassen sich so lange Strecken genau vermessen. Nötig sind nur noch Winkelmessungen zu herausgehobenen Festpunkten wie Kirchtürmen oder Signalmasten; das Aneinanderlegen von Messlatten ist nicht mehr erforderlich.

dern ein Rotationsellipsoid (genauer: ein Sphäroid). Um diese Vorhersage zu überprüfen, sollten zwei Meridianbögen gemessen werden, einer in der Nähe des Äquators und der andere nahe des Nordpols. Wenn die Erde am Äquator stärker gekrümmt ist, wäre dort eine kürzere Strecke nach Norden zurückzulegen, um ein Grad Breitenunterschied gegenüber den Sternen am Himmel zu messen; im Polargebiet mit der flacheren Erdkrümmung müsste man sich eine längere Strecke bewegen, um ein Grad Unterschied gegenüber dem Ausgangspunkt feststellen zu können (siehe Kasten oben). Tatsächlich begannen in den 1730er Jahren von Frankreich aus zwei solcher Expeditionen: nach Peru am Äquator und nach Lappland am Polarkreis.

Inzwischen war das Messen großer Entfernungen auf der Erde einfacher und genauer geworden – dank der aus Holland übernommenen Triangulation. Die Endpunkte einer langen Strecke werden dabei durch ein Netz von Dreiecken miteinander verbunden. Es sind nur noch eine Seite im Anfangsdreieck – die Basis – genau zu vermessen und von ihren Endpunkten aus die genauen Winkel zur Spitze des Dreiecks zu bestimmen. Da die Winkelsumme in jedem Dreieck 180 Grad beträgt, lassen sich dann der dritte Winkel und die Längen der beiden anderen Seiten leicht berechnen (siehe Bild links). Eine dieser so bestimmten Seitenlängen dient dann wiederum als Basis für ein anschließendes Dreieck in Richtung Ziel.

Die Lappland-Geodäten brachen auf Wunsch des französischen Königs 1736 von Paris aus zu ihrer beschwerlichen Reise zum Polarkreis auf. Geleitet wurde die Expedition von Pierre Louis Moreau de Maupertuis. Er wählte als Ausgangspunkt die Hafenstadt Torneå am Bottnischen Meerbusen, heute an der finnisch-schwedischen Grenze. Hier mündet der aus Norden kommende Torne älv in den nördlichen Ausläufer der Ostsee (siehe Bild rechts). Auf der winterlichen Eisfläche des Flusses bestimmten die Forscher bei Temperaturen um minus 45 Grad Celsius eine Basislänge von über 7406 Toises, einem damals gebräuchlichen Längenmaß von etwa zwei Meter Länge. Zur Eichung ihrer Messlatten aus Holz mit Eisenkappen hatten sie einen eisernen Toise-Maßstab aus Frankreich mitgebracht.

Der Vergleich der Messungen aus Lappland und aus Peru am Äquator zeigte zwar qualitativ das erwartete Ergebnis (am Polarkreis entfielen mehr Kilometer auf das Grad), aber die Messungen waren zu ungenau für die präzise Bestimmung der Erdkrümmung. Etwa zur gleichen Zeit erzielte Jacques Cassini in Frankreich sogar das gegenteilige Ergebnis: Die Erde sei flacher am Äquator, also nicht ein abgeplattetes, sondern ein verlängertes Rotationsellipsoid. Die Messfehler waren um 1740 noch deutlich größer als der gesuchte Effekt, der, wie wir heute wissen, nur 0,3 Prozent Unterschied zwischen Pol- und Äquatorradius beträgt.

Europa im Umbruch

Die Französische Revolution führte zu zahlreichen Veränderungen auf dem europäischen Kontinent. So wurde das metrische System eingeführt, nach dem der Abstand vom Äquator zum Pol, also ein Viertel eines Meridians, 10 Millionen Meter beträgt. Aber eine solche revolutionäre Festsetzung, wie lang ein Meter ist, konnte keine Messung ersetzen.

In der Folge der Revolution kam Napoleon an die Macht, der ganz Europa mit

Bereits in den Jahren 1736/37 versuchte eine französische Expedition, am nördlichen Polarkreis mittels Triangulation den Abstand zwischen zwei Breitenkreisen zu messen. Ausgangspunkt war die Stadt Torneå (das heutige Tornio in Finnland) am Bottnischen Meerbusen. Geleitet wurde die Vermessung längs des von Norden kommenden Flusses Torne älv (finnisch: Tornionjoki) von dem Gelehrten Pierre Louis Moreau de Maupertuis. Auch der schwedische Astronom Anders Celsius, auf den unsere Temperaturskala zurückgeht, war Mitglied der Gruppe.

Pierre Louis Moreau de Maupertuis et al., Paris 1738

Wikimedia Commons

Pierre Louis Moreau de Maupertuis (1698–1759)

Universität Uppsala / Gemälde von Olof Arenius

Anders Celsius (1701–1744)

Kriegen überzog, vom Atlantik bis Moskau, vom Nordkap bis Kairo. Nach dem endgültigen Sieg über Napoleon stellten die europäischen Herrscher auf dem Wiener Kongress 1814/15 die alte »Ordnung« wieder her. Einige Gebiete kamen unter neue Herrschaft, und es wurden internationale Ländergrenzen eingeführt. Aber die Monarchen trauten dem Frieden nicht. Neue Machtbestrebungen und Unabhängigkeitsbewegungen drohten, und deshalb gab es in vielen Ländern den Wunsch, gute Landkarten für militärische Zwecke zu schaffen. Besonders wichtig war das für das riesige russische Reich, das nach dem Wiener Kongress Finnland, Teile Polens sowie Bessarabien mit der Donaumündung erworben hatte.

Einer der Urheber der Landesvermessung in den westlichen Provinzen Russlands wurde Friedrich Georg Wilhelm Struve, ein Astronom, der mit diesem Unternehmen auch die Form des Erdkörpers bestimmen wollte (siehe Bild S. 46).

Struve wurde 1793 in Altona (bei Hamburg) als Sohn eines Schuldirektors geboren und erhielt eine hervorragende Ausbildung, besonders in Mathematik. Ab 1806 gehörte seine Heimat zum Machtbereich Napoleons, und als 15-Jähriger drohte er französischen Militärwerbern in die Hände zu fallen, denen er aber durch einen beherzten Sprung aus dem Fenster entkam. Die Eltern schickten Wilhelm sofort ins Ausland, nach Dorpat in Livland (dem heutigen Tartu in Estland), das damals zum russischen Imperium gehörte. Dort war sein Bruder als Lehrer tätig, und mit dessen Unterstützung begann Wilhelm an der Universität Dorpat Mathematik und Astronomie zu studieren. Nach der Promotion 1813 wurde er Observator an der dortigen Sternwarte. Im Alter von nur 20 Jahren wurde er zum außerordentlichen Professor und ab 1820 zum Direktor der Sternwarte Dorpat berufen. Seine erfolgreichsten wissenschaftlichen Arbeiten betreffen die Gebiete der Doppel- und Mehrfachsternsysteme. Aber auch als Geodät hat er sich Ruhm verdient, wovon im Folgenden die Rede sein soll.

Beginn der Messungen

Bereits im Jahr 1814 hatte Bernhard von Lindenau, der Direktor der Seeberg-Sternwarte bei Gotha, seinem Kollegen Struve und dem russischen General Carl Tenner die Messung eines langen Meridianbogens durch das westliche Russland vorgeschlagen. Er sollte vom Weißen Meer südwärts führen. Struve aber wollte zunächst nur einen kleineren Bogen durch die Ostsee-Provinzen ausführen. Auch ließ sich über die Messinstrumente keine Einigung erzielen. Gegen den großen Plan sprach vor allem, dass die Gebiete am Weißen Meer und auf der Halbinsel Kola fast unbesiedelt und schwer zugänglich waren.

Struve wählte deshalb für seine Arbeiten den Meridian von 27 Grad östlicher Länge, der durch seine Dorpater Sternwarte verläuft: »Der Plan erhielt die Genehmigung unseres allergnädigsten Monarchen, der auch der Universität ein Geschenk von Tausend Ducaten zur Anschaffung der nöthigen Instrumente machte.« Nach einigen Jahren hatte Struve einen über drei Grad langen Bogen von der Insel Hogland im Finnischen Meerbusen bis nach Lettland vermessen. Seine Arbeiten wurden von Zar Alexander I. finanziert.

Unabhängig davon hatte General Tenner im Auftrag des Fürsten Wolkonsky, des Chefs des Generalstabs der russischen Armee, eine ähnliche Messung in Litauen auf dem Meridian von Wilna (dem heutigen Vilnius) begonnen. Struve und Tenner trafen sich 1828 in Dorpat, wurden Freunde und beschlossen, ihre Bögen zu einer Gesamtlänge von über acht Grad zu verbinden. Dieser Bogen aus vielen Dreiecken hatte hohe Qualität: mehrere Basislängen waren genau vermessen worden,

Porträt von Eduard Hau, 1837

Wilhelm Struve et al.

Wilhelm Struve (1793 – 1864), geboren in Altona bei Hamburg, verließ als 15-Jähriger seine von napoleonischen Truppen besetzte Heimat. In Livland begann er eine Karriere als Astronom. Zu seinen großen Leistungen gehört die Messung eines Meridianbogens. Die nördlichsten zwei Grad in Norwegen, vermessen von Christopher Hansteen, waren wegen des unerschlossenen Terrains besonders schwierig zu bewältigen.

und an fünf astronomischen Stationen waren die Positionen in Länge und Breite bestimmt worden.

Aber auch acht Grad reichten nicht aus, um die vermutete ellipsoide Form des Erdkörpers sicher bestimmen zu können. So beschlossen die beiden Forscher, die Bögen zu verlängern, Struve nach Norden und Tenner nach Süden. Der Struve-Meridian, der später als großer Wurf gefeiert wurde, begann tatsächlich als Flickwerk.

Zwanzig Jahre in der Wildnis

In den Jahren 1835 bis 1840 konnte Tenners Gruppe die Triangulation durch Weißrussland und die Ukraine bis an den Fluss Dnjestr fortsetzen. Bis 1852 schaffte Tenner nochmals über drei Grad und erreichte als südlichsten Punkt seines Teilbogens die Stadt Ismail am Donaudelta in Bessarabien.

Struve hatte das schwierigere Gelände vor sich, und er plante die Triangulation bis nach Lappland auszudehnen. Zunächst musste der ungefähr hundert Kilometer breite Finnische Meerbusen überwunden werden. Als Stützpunkt fungierte die auf halbem Weg gelegene kleine Insel Hogland. Auf Empfehlung des russischen Weltumseglers Admiral von Krusenstern wurde Struve für die maritimen Arbeiten eine Segeljacht zur Verfügung gestellt. Bei den Messungen von der Insel Hogland durch ganz Finnland wurde er ab 1831 von Friedrich Woldstedt, dem späteren Direktor der Sternwarte Helsinki, unterstützt. Der schaffte fünf Grad durch schwieriges, teils sumpfiges Gelände bis zur finnisch-schwedischen Grenze bei Torneå. Ab hier überschritt der Bogen den russischen Herrschaftsbereich, und es mussten Vereinbarungen mit dem Königreich Schweden getroffen werden.

Struve erhielt 1844 bei einem Treffen mit König Oscar I. von Schweden und Norwegen die Genehmigung zur Fortsetzung der Triangulation bis zum Nordmeer. Ab 1845 wurden unter der Leitung des schwedischen Astronomen Nils Selander die Messungen über drei Grad längs der Grenze bis nach Kautokeino in der Finnmark durchgeführt. Hier wurde eine neue Grenze überschritten, die zu Norwegen. Dieses Land gehörte zum schwedischen Königreich, hatte aber eine eigene Regierung. Der norwegische Astronom und Geodät Christopher Hansteen erhielt den Auftrag, das nördliche Bogenstück von der Finnmark bis nach Fuglenes an der Nordseite des Hafens von Hammerfest zu vermessen (siehe Bild links). Für die gebirgige Strecke von zwei Grad Länge benötigte er zwölf Dreiecke mit einer eigenen vermessenen Basislänge. Der ursprüngliche Plan, den Endpunkt am Nordkap zu haben, wurde wegen des dort häufig schlechten Wetters mit dichtem Nebel aufgegeben. Selbst die Messungen in Fuglenes entwickelten sich zu einem kleinen Drama: Der Astronom Daniel Lindhagen musste sehr lange auf klaren Himmel zur Breitenbestimmung warten. Er erreichte mit der rasch abgebauten Beobachtungsstation gerade noch das letzte Schiff vor dem Beginn der Polarnacht, sein Assistent starb auf der beschwerlichen Rückreise nach Pulkowo.

Mit einigen Nachmessungen war der gesamte Bogen im Jahr 1855 vollendet (siehe Tabelle rechts). Er hatte eine Länge von 2821,833 Kilometer erreicht und verband Ismail auf der geografischen Breite von 45 Grad mit Fuglenes am Eismeer bei fast 71 Grad Breite (siehe Bild S. 43). Struve sammelte alle Messunterlagen und be-

Statenskartverk, Norwegen / Pistor & Martins, Berlin

Während frühere Geodäten wie Maupertuis für Winkelmessungen Quadranten nutzten, konnte Struve hochgenaue Theodoliten der Hersteller Reichenbach & Ertel einsetzen. Solche Instrumente erlaubten eine Ablesegenauigkeit von vier Bogensekunden.

Teilstücke der Vermessung des Meridianbogens

Teilstück	Jahr	Leitung	geografische Breite	Endpunkte
7	1845–1850	Hansteen	70°40′ N 68°54′ N	Hammerfest Kautokeino
6	1845–1852	Selander	68°54′ N 65°50′ N	Kautokeino Torneå
3	1830–1851	Struve	65°50′ N 60°05′ N	Torneå Hogland
1	1816–1831	Struve	60°05′ N 56°30′ N	Hogland Jacobstadt
2	1816–1828	Tenner	56°30′ N 52°03′ N	Jacobstadt Belin
4	1835–1840	Tenner	52°03′ N 48°45′ N	Belin Dnjestr
5	1844–1852	Tenner	48°45′ N 45°20′ N	Dnjestr Ismail

gann in seiner neuen Sternwarte in Pulkowo mit der sorgfältigen Auswertung.

Die ersten beiden Bände des »Arc du Meridien des 25°20' entre le Danube et la Mer Glaciale mesure depuis 1816 jusqu'en 1850« erschienen 1857 und 1860 in Sankt Petersburg. Als Mitherausgeber dieses frühen Dokuments internationaler wissenschaftlicher Zusammenarbeit zeichneten Hansteen, Selander und Tenner. Struve schaffte wegen einer schweren Erkrankung die Herausgabe des dritten Bandes nicht mehr selbst. Das wertvolle Werk, ein Meilenstein in der Geschichte der Erdvermessung, ist leider nur noch in wenigen Bibliotheken vorhanden, nicht einmal mehr in den heutigen zehn Staaten, durch die der Struve-Bogen führt.

Erstaunliche Genauigkeit

Struve benutzte für seine Messungen einen Theodoliten von Reichenbach & Ertel aus München (ein baugleiches Gerät siehe Bild links). Das Instrument besaß einen horizontalen Kreis von 32,5 Zentimetern und einen vertikalen von 27,5 Zentimetern. Mit der Fünf-Bogenminuten-Teilung lies sich eine Ablesegenauigkeit von etwa vier Bogensekunden erreichen. »So wie ohne Zweifel der Meridiankreis Reichenbachs der Idee und der Ausführung nach das vollkommenste Meridianinstrument ist, welches die Geschichte der Astronomie aufzuweisen hat, so möchte ich unter den tragbaren Winkelmessern, die der Geodäsie bestimmt sind, in beiden Rücksichten das Universalinstrument desselben großen Künstlers obenan stellen«, so Struve 1823. Tenner benutzte Theodoliten verschiedener Hersteller, darunter auch solche von Reichenbach.

Schwieriger gestalteten sich die Längenmessungen. Struve benutzte die französische Toise (1 Toise = 1,949 Meter). Tenner maß in der russischen Einheit Saschen (1 Saschen = 2,1336 Meter), die auf dem englischen Fuß basierte (1 Saschen = 7 Fuß). Ab 1850 wurden in Pulkowo 19 benutzte Standardlängen miteinander verglichen und später in Meter umgerechnet. Struve berechnete in seinem fundamentalen Werk die erreichte Messgenauigkeit des Bogens mit fünf Millimeter pro Kilometer. Diese für die damalige Zeit erstaunliche Genauigkeit ist absolut glaubwürdig. Beim Wiederaufsuchen von verloren gegangenen Dreieckspunkten mit modernen Hilfsmitteln nach über 150 Jahren wurden diese innerhalb von Zentimetern vom vorhergesagten Ort gefunden.

Hier interessiert die mit dem Struve-Bogen gemessene Erdkrümmung. Die zwischen Donau (45 Grad nördliche Breite) und Eismeer (71 Grad nördliche Breite) gemessene Länge pro Grad steigt polwärts an (siehe Grafik S. 48). Trotz kleinerer Messfehler folgt dieser Kurvenverlauf sehr gut der heute bekannten wahren Form des Erdkörpers: einem Rotationsellipsoid, so wie von Newton vorhergesagt. Aus der Kurve lässt sich ablesen, dass die Länge eines Grads polwärts um etwa 14 Meter pro Grad steigt, also nur um 1/8000 eines 111 Kilometer langen Grads. Die Länge eines Meridian-Quadranten bestimmte Struve zu 10 002 174 Meter, die Krümmung der Erde zu 1 : 294,73. Die entsprechenden modernen Werte betragen 10 001 986 Meter und 1 : 298,24. Der Erdradius am Äquator ist also ungefähr 20 Kilometer größer als am Pol. Aus den gemessenen Erdparametern wurde für die Geodäsie ein Erd-

FASZINATION UNIVERSUM
Eine Reise durch Raum und Zeit

8. April - 18. September 2011
Di-So 10.30-17 Uhr

Tel 07931/52212
www.deutschordensmuseum.de

Deutschordensmuseum
Bad Mergentheim

Uwe Reichert

Dietrich Lemke

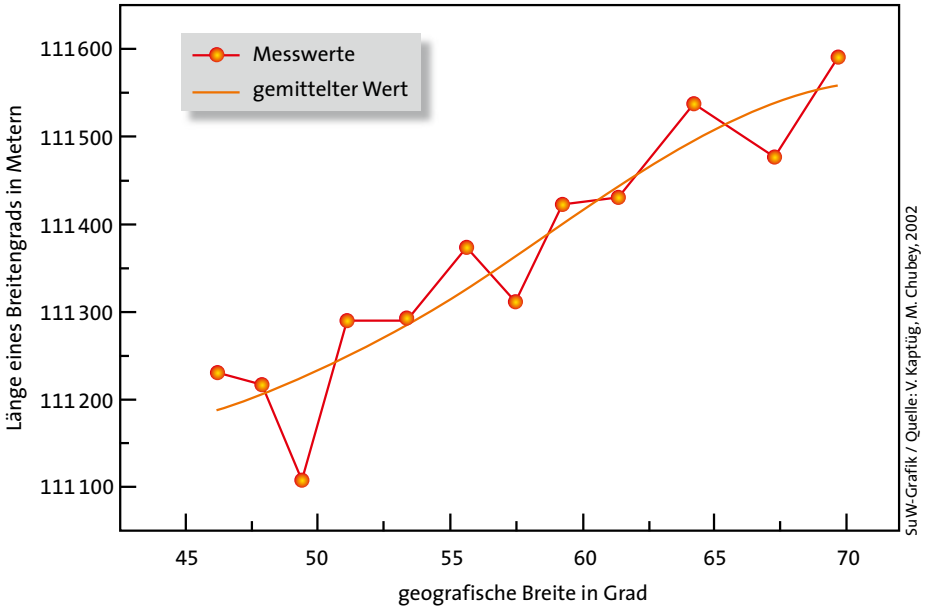
modell abgeleitet, so von Friedrich Wilhelm Bessel in Königsberg in den 1840er Jahren, das mit Werten von 10 000 966 Metern und 1 : 299,15 den modernen Werten sehr nahe kam.

Die heutige Kartografie benutzt für die geografische Breite den Winkel zwischen der Äquatorebene und der Senkrechten (Normalen) auf dem Erdellipsoid. Die astronomisch bestimmte Breite dagegen ist der Winkel zwischen der Äquatorebene und der Lotrichtung (gemessen beispielsweise mit einem Zenitteleskop). Die beiden Breiten können sich durch die Lotabweichung, wie sie Gebirgsmassen hervorrufen, um bis zu eine Bogenminute unterscheiden. Die geozentrische Breite, der Winkel zwischen Äquatorebene und der Richtung zum Erdmittelpunkt, stimmt nur am Pol und Äquator mit der geografischen Breite überein, dazwischen können sie bis zu 0,2 Grad differieren.

Markierung des Bogens

Struve und Tenner markierten die Stationen ihrer Triangulation sorgfältig. Da der größte Teil des Bogens über flaches Terrain führte, wurden, wo immer möglich, Türme benutzt, so die Sternwarte Dorpat oder Kirchen. Im flachen Finnland dienten fünf Zentimeter tiefe Bohrungen in den Fels als Stationsmarken, über denen hölzerne Signalmasten errichtet waren. Die Bohrlöcher wurden mit Blei gefüllt und mit einer Messingplatte verschlossen. Im bergigen Nordteil des Bogens bezeichnen Kreuze auf Felskuppen die Stationen. Die beiden Endpunkte nahe Ismail und Hammerfest erhielten steinerne Monumente (siehe Bild S. 43). Das schönste ist zweifelsfrei die Meridiansäule in Fuglenes, am Hafen von Hammerfest (siehe Bild oben). Die insgesamt vier Meter hohe Säule besteht in ihrem Mittelteil aus poliertem rötlichem Marmor, mit vergoldeten Inschriften in lateinischer und norwegischer Sprache. Damit ließ König Oscar II. an die bedeutende Vermessung erinnern. Auf der Spitze der Säule befindet sich eine kupferne Erdkugel, auf der ein Stift die Stadt Hammerfest markiert.

Als Jahrzehnte nach Struves Triangulation für die Landvermessung in Finnland Anschluss an das alte Netz gesucht wurde, waren die meisten Markierungen beschädigt – die Messingplatten waren entfernt, und das Blei hatten Jäger für ihre Geschosse mitgenommen. Aber die Bohrungen konnten dank der genauen Mes-



Das Ergebnis der Meridianvermessung: Die Länge eines Breitengrads auf der Erdoberfläche steigt polwärts an, und zwar durchschnittlich um 14 Meter pro Grad. Das bestätigte die Idee von der Erde als Rotationsellipsoid.

Die Meridiansäule

Am nördlichen Endpunkt des Struve-Bogens im norwegischen Hammerfest befindet sich eine »Meridiansäule« (linkes Bild; im Panorama mit Kreis markiert). Dieses Monument lässt sich bequem bei einer der bekannten Seereisen auf einem Hurtigruten-Schiff längs der norwegischen Küste aufsuchen. Auf der südgehenden Route von Kirkenes nach Bergen liegt das Schiff 90 Minuten in Hammerfest (im Vordergrund). Der Besuch kann mit einer auf dem Schiff angebotenen Besichtigungsfahrt durch Stadt und Hafen erfolgen. Möglich ist der Ausflug auch per Taxi oder mit einem der auf den Hurtigruten-Schiffen verfügbaren Leih-Fahrräder. Die Entfernung vom Schiffsanleger zur Meridiansäule beträgt knapp drei Kilometer.

sungen und der guten Dokumentation wiedergefunden werden.

Lief der Bogen ursprünglich nur durch drei Länder, nämlich das zaristische Russland, Schweden und Norwegen, so teilen sich nach den Unabhängigkeitsbestrebungen der osteuropäischen Völker heute zehn Staaten die Stationen: Moldawien, Ukraine, Weißrussland, Litauen, Lettland, Estland, Russland, Finnland, Schweden und Norwegen. Russland, als Veranlasser des gewaltigen Unternehmens, ist wenig geblieben: zwei Stationen auf der Insel Hogland im finnischen Meerbusen. Diese ursprünglich finnisch besiedelte Insel (namens Suursaari) wurde am Ende des Zweiten Weltkriegs von der damaligen Sowjetunion annektiert.

Was ist geblieben?

Der Struve-Bogen ist vor allem ein wissenschaftlich-kulturelles Denkmal ersten Ranges. Seine Vermessung führte durch unbekanntes und kaum besiedeltes Land mit rauem Klima. Empfindliche Messgeräte, Fernrohre, Chronometer und Pendeluhren zur astronomischen Längen- und Breitenbestimmung mussten auf Fuhrwerken, Booten und Schlitten über Hunderte von Kilometern durch die Wildnis bewegt werden. Die beteiligten Astronomen und Geodäten hatten jahrelange Entbehrungen auf sich zu nehmen.

Struves Bogen ist gewissermaßen die Mutter aller späteren großen Triangulationen, die zur genauen Vermessung der Erde führten und die sich in einer riesigen Zahl von Festpunkten auf allen Kontinenten widerspiegeln. Auf ihnen basierten alle Landkarten. Indem die Meridianmessung zum Vorbild vieler folgender Messungen auf der ganzen Erde wurde, trug sie auch dazu bei, das metrische System international durchzusetzen.

Was wissen wir von den damals handelnden Menschen? Wilhelm Struve begann als Observator an der 1806 noch un-

Eine finnische Briefmarke, die im Mai 2011 herausgegeben wurde, listet einige Stationen des Struve-Bogens auf und zeigt, wie zur Vermessung einer kilometerlangen Basislinie für die Triangulation meterlange Messlatten hintereinandergelegt wurden.

Itella Posti Oy, Finnland

Tartu Observatooriumi Virtuaalne Muuseum

Vermaß große Teile des nach Struve benannten Meridians: der russische General Carl Friedrich Tenner (1783 – 1859).

bedeutenden Sternwarte Dorpat zu arbeiten und baute sie zu einer der damals leistungsfähigsten der Welt aus. Berühmt wurde der Dorpater Refraktor, den Joseph Fraunhofer aus München lieferte. Mit diesem Instrument entstanden die großen Doppelsternkataloge.

Struve war Astronom und Geodät zugleich, wie viele seiner zeitgenössischen Kollegen. Er bildete in seiner Wahlheimat Livland und später Russland viele Studenten in Astronomie aus und unterrichtete junge Offiziere des Generalstabs in den geodätischen Bereichen der Astronomie. Nach dem Aufbau der noch größeren Sternwarte Pulkowo, die gefördert von Zar Nicolaus I. 1839 eröffnet wurde und die durch Struves Leitung Weltgeltung erlangte, beschäftigte er sich neben der astronomischen Forschung intensiv mit der hier geschilderten Vermessung der Erde. Aber auch die Bestimmung der Höhenunterschiede zwischen Schwarzem und Kaspischem Meer wurden nach seinem Plan ausgeführt.

Nach Struves Tod im Alter von 71 Jahren schrieb der bedeutende Astronom Friedrich Argelander über seinen Freund: »Als Gelehrter zeichneten ihn Scharfsinn, Consequenz und Ausdauer in hohem Grade aus, ein seltenes Beobachtungstalent und eine ungewöhnliche Beweglichkeit des Geistes, die ihn befähigte, eine Menge von oft ziemlich heterogenen Arbeiten und Studien gleichzeitig zu betreiben.«

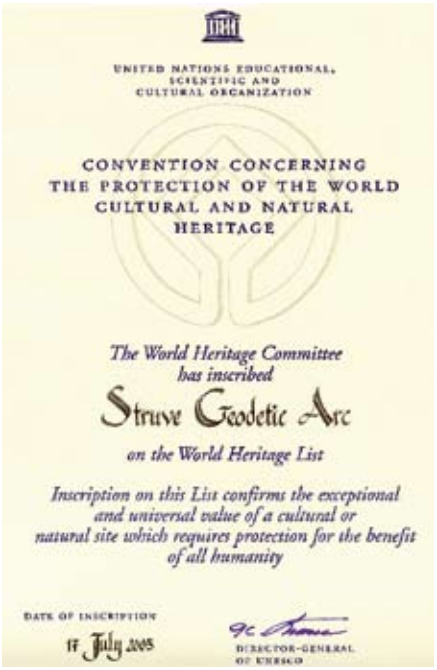
Struve war zweimal verheiratet und wurde Vater von 18 Kindern. Sein Sohn Otto wurde sein Nachfolger als Direktor der Sternwarte Pulkowo. Vater und Sohn gehörten zu den Gründungsmitgliedern der Astronomischen Gesellschaft, die 1863 in Heidelberg entstand. Zwei seiner Töchter heirateten Professoren für Astronomie, Olga den Daniel Lindhagen von der Universität Uppsala, der uns in Hammerfest begegnet war. Zwei Enkel wurden Direktoren der Sternwarten in Königsberg (dem heutigen Kaliningrad) beziehungsweise Charkow (dem heutigen Charkiw in der Ukraine). Der Urenkel Otto wurde 1932 Direktor der Yerkes-Sternwarte bei Chicago und als Mitbegründer des McDonald Observatory und des Green Bank Radio Observatory berühmt.

Carl Tenner (siehe Bild links), der in den Befreiungskriegen gegen Napoleon als General der Infanterie großen Mut bewiesen hatte, erlernte die Geodäsie fast im Selbststudium. Er wurde zum Ehrenmitglied der Russischen Akademie der Wissenschaften berufen.

Christopher Hansteen leitete die Osloer Sternwarte und das Norwegische Geodätische Institut und wurde mit Arbeiten zum Geomagnetismus bekannt. Bei seinen magnetischen Kartierungen glaubte er zeitweise, die Erde habe vier magnetische Pole. Nils Selander war Direktor der Sternwarte der Königlich Schwedischen Akademie der Wissenschaften und wurde 1850 Professor für Geodäsie. Er leitete dann die Landvermessung Schwedens.

Maupertuis, der ein Jahrhundert vorher die Messungen in Lappland begonnen hatte, war so angetan von seinem Erfolg, dass er sich später oft in der traditionellen Kleidung der Samen zeigte. Friedrich der Große berief ihn 1740 auf Empfehlung Voltaires an die Akademie der Wissenschaften in Berlin. Im Jahr 1746 wurde er deren Präsident, aber nach allerlei Missverständnissen (er beherrschte die neue Landessprache kaum) blieb er nur bis 1753 in diesem Amt.

Der Struve-Bogen hat vor 50 Jahren seine Fortsetzung nach Süden durch ganz Afrika gefunden. Heute liefert ein Netz von Satelliten unsere geografischen Koordinaten metergenau auf ein preiswertes GPS-Gerät. Wenn wir im bequemen Autositz das »Navi« wieder einschalten, dürfen wir gelegentlich derer gedenken, die vor 200 Jahren unter größten Entbehrungen die Grundlagen für die Geodäsie geschaffen haben. Und deren großes Werk jetzt mit Recht als Weltkulturerbe geehrt wird (siehe Bild oben).



UNESCO

Die UNESCO nahm den Struve-Bogen auf Antrag der zehn durchquerten Staaten im Jahr 2005 in die Liste des Weltkulturerbes auf.

DIETRICH LEMKE leitete bis zu seiner Emeritierung am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg verschiedene Weltraumprojekte.

Literaturhinweise

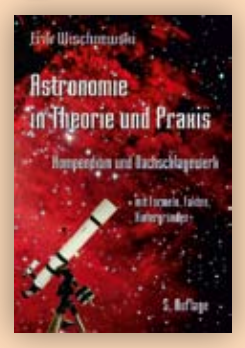
de Graeve, J., Smith, J.: The Struve Geodetic Arc. In: History of Surveying, FIG Publication No. 50, S. 13 – 20. International Federation of Surveyors, 2010 (www.fig.net/pub/figpub/pub50/figbub50.htm)

Härmälä, S.: Struve Arc. FIG Working Week. Prag 2000. In: History of Surveying and Measurement

Smith, J.: The Struve Geodetic Arc. International Institution for History of Surveying and Measurement. 2005 (www.fig.net/hsm/struve.htm)

Weitere Weblinks finden Sie unter www.astronomie-heute.de/artikel/1069701

Unser besonderer Tipp:



Erik Wischnewski

Astronomie in Theorie und Praxis

Kompendium und Nachschlagewerk mit Formeln, Fakten, Hintergründen

5. Auflage 2011, 800 S. m. zahlreichen Diagrammen und farbigen Abbildungen, geb.

Bestell-Nr. 2290 € 69,90 (D), € 72,90 (A)

Das Buch behandelt alle Fragen der praktischen Astronomie und der Astrophysik in verständlicher Form, ohne dabei wissenschaftliche Ansprüche aufzugeben. Es wendet sich an anspruchsvolle Amateure, die systematisch und mit wissenschaftlicher Akribie den Sternenhimmel beobachten möchten – egal, ob Einsteiger oder fortgeschrittener Hobby-Astronom. Sechzig Übungsaufgaben mit Lösungen ermöglichen den Selbsttest. Ein Register mit 3.700 Stichworten macht das Buch zum einzigartigen Nachschlagewerk.

Erweiterte Themen der 5. Auflage: Gravitationswellenastronomie, Radioastronomie, Speckle-Interferometrie, Photometrie, Farbenskalen, Sonnenfleckenaktivität, Mondfinsternisse, Sternbedeckung, Doppelsterne, Supernovae

Weitere Informationen halten wir für Sie bereit unter: www.science-shop.de/artikel/854520

Klaus M. Schittenhelm

Sterne beobachten in der Stadt

Himmelstouren für klare Nächte

2011, 126 S. m. zahlr. farb. Abb. u. Stern-Ktn., geb., Kosmos.

Bestell-Nr. 3283

€ 14,95 (D), € 15,40 (A)

In 26 Himmelstouren stellt dieser Sternführer die schönsten Beobachtungsobjekte am Stadthimmel vor. Realitätsnahe Sternkarten zeigen Sterne und Sternbilder sowie Haufen und Nebel, die selbst unter städtischer Beleuchtung mit dem bloßen Auge oder einem Fernglas zu sehen sind. Auch Mond und Planeten, die Paradeobjekte für jeden Himmel, werden ausführlich beschrieben. So können auch Städter erfolgreich von zu Hause aus den Sternenhimmel erkunden.

Bestellen Sie direkt: 06221 9126-841 @ info@science-shop.de

Ulrich Ellwanger

Vom Universum zu den Elementarteilchen

Eine erste Einführung in die Kosmologie und die fundamentalen Wechselwirkungen

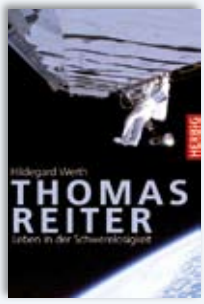
2. Aufl. 2011, 245 S. m. 58 Abb., geb., Springer.

Bestell-Nr. 2592

€ 29,95 (D), € 30,80 (A)

In diesem einführenden Lehrbuch werden die Grundlagen der Teilchenphysik und der Kosmologie gleichermaßen behandelt. Dabei werden Themen der modernen Astrophysik wie der Urknall, Dunkle Materie und Dunkle Energie behandelt und spekulative Theorien wie die Stringtheorie und zusätzliche Dimensionen der Raum-Zeit skizziert.

Eine Leseprobe finden Sie unter: http://www.science-shop.de/artikel/936618



Hildegard Werth

Thomas Reiter

Leben in der Schwerelosigkeit

2011, 271 S., 42 Farbfotos, geb., Herbig.

Bestell-Nr. 3285

€ 19,95 (D), € 20,60 (A)

5.600 Mal hat er die Erde umrundet, 350 Tage im Weltraum verbracht und dabei einige Außenbordeinsätze bei 28.000 km/h Geschwindigkeit absolviert. Thomas Reiter lebt ein Leben der Extreme, er hat sich voll und ganz der Raumfahrt verschrieben.

Die Wissenschaftsjournalistin Hildegard Werth zeichnet alle wichtigen Stationen seiner Karriere nach. Dazu gehören die beiden Missionen »Euromir 95« und »Astrolab 2006«, bei denen Thomas Reiter sowohl die russische Raumstation Mir, als auch die Internationale Raumstation ISS besuchte.

Axel Mellinger, Ronald Stoyan

Fotografischer Sternatlas

Der gesamte Himmel auf 82 Kartenblättern

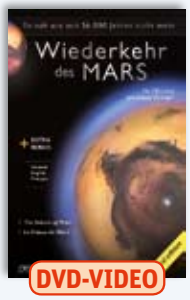
2010, 176 Seiten, Nord- und Südhimmel im Maßstab 1° pro cm, 34 × 25 cm, durchgehend farbig, geb., Oculum.

Bestell-Nr. 3107

€ 39,90 (D), € 41,10 (A)

Als Grundlage für diesen Atlas dienen 3000 digitale Aufnahmen des Himmels, die der Astrofotograf Axel Mellinger zu einem einheitlichen Bild des gesamten Sternhimmels zusammenfügte. Jeder Atlasseite gegenüber gestellt ist eine invertierte Reproduktion, auf der alle abgebildeten Deep-Sky-Objekte markiert sind, insbesondere Doppelsterne, Veränderliche, Offene Sternhaufen, Galaktische und Planetarische Nebel, Kugelsternhaufen sowie Galaxien. Mehr als 1500 Deep-Sky-Objekte und 2500 Sterne lassen sich somit auf den Karten finden und identifizieren.

Besuchen Sie uns im Internet unter:
www.science-shop.de



Sebastian Voltmer

Wiederkehr des Mars, DVD-Video

So nah wie seit 56.000 Jahren nicht mehr

2010, Laufzeit 60 Min. + 20 Min. Bonus, Ton: Surround 5.1, in drei Sprachen: Deutsch, Englisch und Französisch, Lichtenstern.

Bestell-Nr. 3077

€ 24,95 (D), € 24,95 (A)

Der Filmemacher Sebastian Voltmer setzt sein Hobby, die Astronomie, in Szene. Stimmungsvoll zeigt er uns seine Begegnungen mit dem Mars und wie er mit einfachen Amateurmitteln Zeuge gewaltiger Veränderungen auf dem roten Planeten wird. Er lässt uns aber auch an anderen spektakulären Himmelsereignissen teilhaben, wie z. B. an einer Sonnenfinsternis. Sein Film ist eine Hommage an ein faszinierendes Hobby!

Portofreie Lieferung nach Deutschland und Österreich*

Don Lincoln

Die Weltmaschine

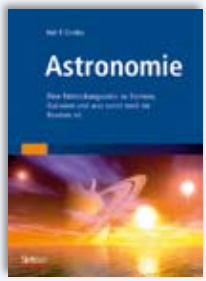
Der LHC und der Beginn einer neuen Physik

2011, 330 S. m. 88 s/w-Abb., geb., Spektrum Akademischer Verlag.

Bestell-Nr. 3238

€ 24,95 (D), € 25,70 (A)

Unter der Grenze zwischen Frankreich und der Schweiz läuft ein Teilchenbeschleuniger mit der höchsten Energie, die je ein von Menschen gebauter Beschleuniger erreicht hat: der Large Hadron Collider (LHC). Durch die Kollision von Teilchen kann der LHC Bedingungen erzeugen, wie sie unmittelbar nach dem Urknall im Universum geherrscht haben. Der Physiker Don Lincoln erläutert, wie der Beschleuniger funktioniert und welche Entdeckungen man erwartet: So werden wir vielleicht die Natur der Dunklen Materie entschlüsseln, Anzeichen für zusätzliche Raumdimensionen erkennen und den Ursprung der Masse verstehen.



Neil F. Comins

Astronomie

Eine Entdeckungsreise zu Sternen, Galaxien und was sonst noch im Kosmos ist

2010, 516 S. m. 520 Farbabb., geb., Spektrum Akad. Verlag.

Bestell-Nr. 3105

€ 59,95 (D), € 61,70 (A)

Dieses Buch ist in den USA bereits ein Klassiker. Es wurde für Collegekurse entwickelt und bietet einen didaktisch sehr ausgefeilten Einstieg. Der Autor reduziert die weite Welt der Astronomie auf die wesentlichen Grundlagen und Inhalte, die jeder Studierende und Astroneugierige kennen sollte. Die mathematisch-physikalischen Voraussetzungen übersteigen nicht das Mittelstufenniveau und werden im Buch solide entwickelt. Auf einer eigenen Website zum Buch befinden sich thematisch passende Himmelsführungen von *Redshift*, der führenden deutschsprachigen Planetariumssoftware.

Eine Leseprobe des Buches finden Sie unter: www.science-shop.de/astronomie

*Für Bestellungen außerhalb Deutschlands und Österreichs berechnen wir € 3,50 Versandkosten. Alle Preise inkl. Umsatzsteuer. Preise unter Vorbehalt. Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH