Deutsches Museum

Das Magazin aus dem Deutschen Museum **2/2022** | 8,90 Euro | B 9797

4750202202

Über Menschen und Würmer Geistreicher Dialog über einen omnipräsenten Begriff und seine Bedeutung

CQ de Delta Lima Null… Die Funkamateure des Deutschen Museums sind regelmäßig auf Sendung

Die Wächter Das International Monitoring System betreibt weltweit 289 Messstationen für Kernexplosionen

KULTUR & TECHNIK

Netzwerke

Netzwerkforschende versuchen, eine Metapher unserer Zeit zu verstehen, zu beschreiben und zu beherrschen.

Degussa
GOLD UND SILBER.

DIE GANZE WELT DER EDELMETALLE. BEI DEGUSSA IN MÜNCHEN.

DEGUSSA-GOLDHANDEL.DE

Degussa Goldhandel GmbH
Promenadeplatz 12 · 80333 München
Telefon: 089 1392613-18
E-Mail: muenchen@degussa-goldhandel.de

Augsburg Berlin Düsseldorf Frankfurt Hamburg Hannover Köln München Nürnberg Pforzheim Stuttgart
Zürich Genf Madrid London

Liebe Leserin,
lieber Leser,

Netze als komplexe Gebilde aus Knoten und Verbindungen begegnen uns auf Schritt und Tritt. Sie sind zu Metaphern für alle möglichen Arten von Beziehungen geworden. Überall erkennen wir vernetzte Strukturen, in die wir zu allem Überfluss auch noch selber verstrickt sind. Wie angenehm war da doch die Vorstellung von der Welt als mechanischem Räderwerk. Erst mit dem ausgehenden 19. Jahrhundert wurden diese mechanistischen Vorstellungen in Frage gestellt. Evolutionstheorie, Genetik, physikalische Entdeckungen und neue Kommunikationstechnologien ermöglichten einen veränderten Blick auf die Welt. Mehr und mehr erkennen wir heute die Innen- wie die Außenwelt als interagierende und manchmal sogar chaotische Systeme.

Wir stehen also noch ganz am Anfang eines neuen Positionierungsprozesses. Im universalen Beziehungsgeflecht erscheint der Mensch derzeit allerdings eher ein Störfaktor zu sein. Dabei sind wir doch durchaus kreativ damit beschäftigt, selber immer neue Netze zu knüpfen. Eisenbahnnetze, Stromnetze, Verkehrsnetze, Wirtschaftsnetze und wie sie alle heißen. Mittlerweile nimmt sich sogar ein eigener Forschungszweig dieses Phänomens an. Keine einfache Ausgangslage für die Arbeit an diesem Heft also. Damit wir uns uns nicht vollkommen im Netz verfangen, haben wir uns daher einige ganz alltägliche Netze herausgepickt, selbstverständlich nicht ohne einleitend zu fragen, was ein »Netz« überhaupt ist.

Ohne Netz und doppelten Boden laden wir Sie nun aber endlich in die neuen Ausstellungen des Deutschen Museums ein. Unser Team hat Großartiges geleistet und am 7. Juli ist es soweit. Für Sie als Mitglied haben wir uns einige besondere »Schmankerl« ausgedacht. Informationen darüber finden Sie auf unserer Homepage. Erfolgreich eröffnen konnten wir bereits einen Teilbereich des neu gestalteten Deutschen Museums in Bonn. Hier dreht sich künftig alles um die digitale Welt und künstliche Intelligenz. Planen Sie doch einmal einen Besuch in die ehemalige Bundeshauptstadt und besuchen Sie uns vor Ort.

Für uns auf der Insel wird es mit der Eröffnung der neuen Ausstellungen nur ein kurzes Verschnaufen geben. Schon laufen die Vorbereitungen zur Sanierung der noch ausstehenden alten Ausstellungen, die nun für die kommenden Jahre geschlossen werden müssen. Zu sehen und zu erleben gibt es aber wie immer mehr als genug!

Ich freue mich auf Sie
und grüße Sie herzlich

Ihr Wolfgang M. Heckl

Titelbild: rawpixel.com

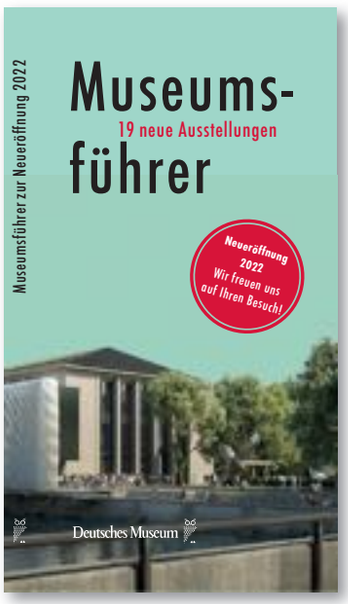
Von der Sonnenuhr zum Fischer-Dübel

100 faszinierende Porträts von Objekten zeigen die Entwicklung von Naturwissenschaft und Technik und spiegeln die großen Zusammenhänge der Weltgeschichte.

686 Seiten | 290 Abbildungen, davon 203 in Farbe | € 39,95 | ISBN 978-3-406-78314-2

alle Abb. © Deutsches Museum

C.H.BECK
WWW.CHBECK.DE



In unserem Führer durch die erneuerten Dauerausstellungen finden Sie neben thematischen Einführungen und der Präsentation ausgewählter Highlights auch Übersichtspläne und individuelle Tourenvorschläge durchs Haus.

Museumsführer
Deutsches Museum Verlag
ISBN 978-3-948808-07-5

NETZWERKE

6 **Über Menschen und Würmer**
Dialog über einen omnipräsenten Begriff | **Von Christian Sicka**

12 **Neuronale Netze**
Kommunikation im Gehirn und im Computer | **Von Rudolf Seising**

18 **Meteore im Visier**
Das Feuerkugelnetz überwacht den Nachthimmel | **Von Dieter Heinlein**

24 **CQ de Delta Lima Null Delta Mike**
Das weltweite Netz der Funkamateure | **Von Luise Allendorf-Hoefer**

28 **Der Traum vom Supergrid**
Zwei Utopien rund um Stromnetze | **Von Sebastian Kasper und Frank Dittmann**

34 **Die Wächter**
Kernexplosionen auf der Spur | **Von Joachim Schulze, Matthias Zähringer, Thomas Hoffmann, Martin Kalinowski, Florian Haslinger, Lars Ceranna**

Internes

40 **Neues aus dem Freundes- und Förderkreis Deutsches Museum**
Ein tränenreicher Abschied vom Bergwerk | **Von Monika Czernin**

42 **Die Welt der Technik in 100 Objekten**
Sammlungsstücke aus dem Deutschen Museum | **Von Kathrin Mönch**

44 **Mit 0,0 km/h über die Autobahn**
Fotoausstellung im Verkehrszentrum

46 **Mission Künstliche Intelligenz**
Ausstellungseröffnung im Deutschen Museum Bonn

STANDARD

3 **Editorial**

48 **Schlusspunkt**
Liebesbeweis | **Von Daniel Schnorbusch**

50 **Vorschau, Impressum**

Über Menschen und Würmer

Dialog über einen omnipräsenten Begriff, seine Bedeutung für das Ganze und seine Teile sowie die Komplexität von Welt und Wurm.

Von Christian Sicka mit Impulsen von Rudolf Seising

Simplicio sitzt am Computer, er tippt.
Auf dem Bildschirm erscheint Text.

»Es hat geschneit. In München ist man das nicht mehr gewohnt – schon gar nicht im März. Wird schon gehen denke ich. Dann am Schramminger Weg Endstation, 30 Zentimeter Neuschnee auf eisigem Grund. Das Schild ›Isar-Inn-Radweg‹ jetzt eher Ironie. Also absteigen – Rad schieben. Es gäbe noch andere Wege, solche die geräumt sind, aber die sind länger, wesentlich länger, das lohnt sich nicht. Also werde ich zum Fußgänger. Das Radwegenetz ist über Nacht zu einem Fußwegenetz geworden. Natürlich wäre auch die B304 eine Möglichkeit gewesen. Dann hätte ich das Netz der Bundesstraßen benutzt, das ja eigentlich zum Netz der Autostraßen gehört – obwohl, zumindest wenn ein Radweg vorhanden ist, gehört es ja auch zum Netz der Radwege.

Nach hundert Metern Waldweg fällt mir die Stille auf. Der frische Schnee schluckt den Schall. Das erste Sonnenlicht scheint durch die Bäume. Ein frisch verschneiter Wald hat einen besonderen Reiz. Ich lasse mein Rad stehen und biege nach links in den Wald ab. Nach einer Weile schaue ich zurück zum Weg und sehe meine Fußstapfen im Schnee. Jeder könnte den Fußstapfen leicht folgen – ein neuer Fußweg – Teil des Fußwegenetzes. Ich stehe irgendwie verloren, allein im verschneiten Wald und wundere mich über mich selbst. Warum bin ich vom Weg abgewichen, eigentlich wollte ich ja schnell in die Arbeit kommen. Vielleicht war es die Stille, ein wenig Stille, in der das Gehirn die gewohnten Denkbahnen verlässt.

In meinem Kopf, in dem Netz von Neuronen, zeigen einige korrelierte Aktivität. Zwischen bestimmten Neuronen werden vermehrt Signale gesendet. Synapsen, über die die Neuronen in Verbindung stehen generieren neue Wege für elektromagnetische Signale. Am Ende sind bestimmte Synapsen gestärkt – erst Fußstapfen, dann Trampelpfade für die elektrischen Ströme in der Zukunft – mein Gehirn, meine »Wetware«, wird nie mehr dieselbe sein. Ein paar Wochen später fahre ich wieder an der Stelle vorbei. Der Schnee ist längst geschmolzen und überall dringt zartes Grün aus dem Boden. Die Fußstapfen im Schnee sind noch da – in meinem Kopf, der eigentlich ein Netzwerk aus Neuronen ist und auf einem Körper sitzt, der wiederum aus einem Netzwerk aus 40 Billionen Zellen besteht, die gegenseitig Stoffe und Information austauschen. Jeder dieser Zellanhäufungen, die wir Menschen nennen, steht mit anderen Menschen in Kontakt und knüpft Netzwerke – die Familie, der Staat, der Kaninchenzüchterverein. Letztlich besteht alles Leben auf der Erde aus hierarchisch ineinander verschachtelten und nebeneinander existierenden, sich gegenseitig beeinflussenden Netzwerken – alles, alles ist ein Netzwerk.«

Salvati betritt das Büro, kommt von hinten, beugt sich über den Bildschirm, liest, nach einer Zeit ergreift er das Wort:

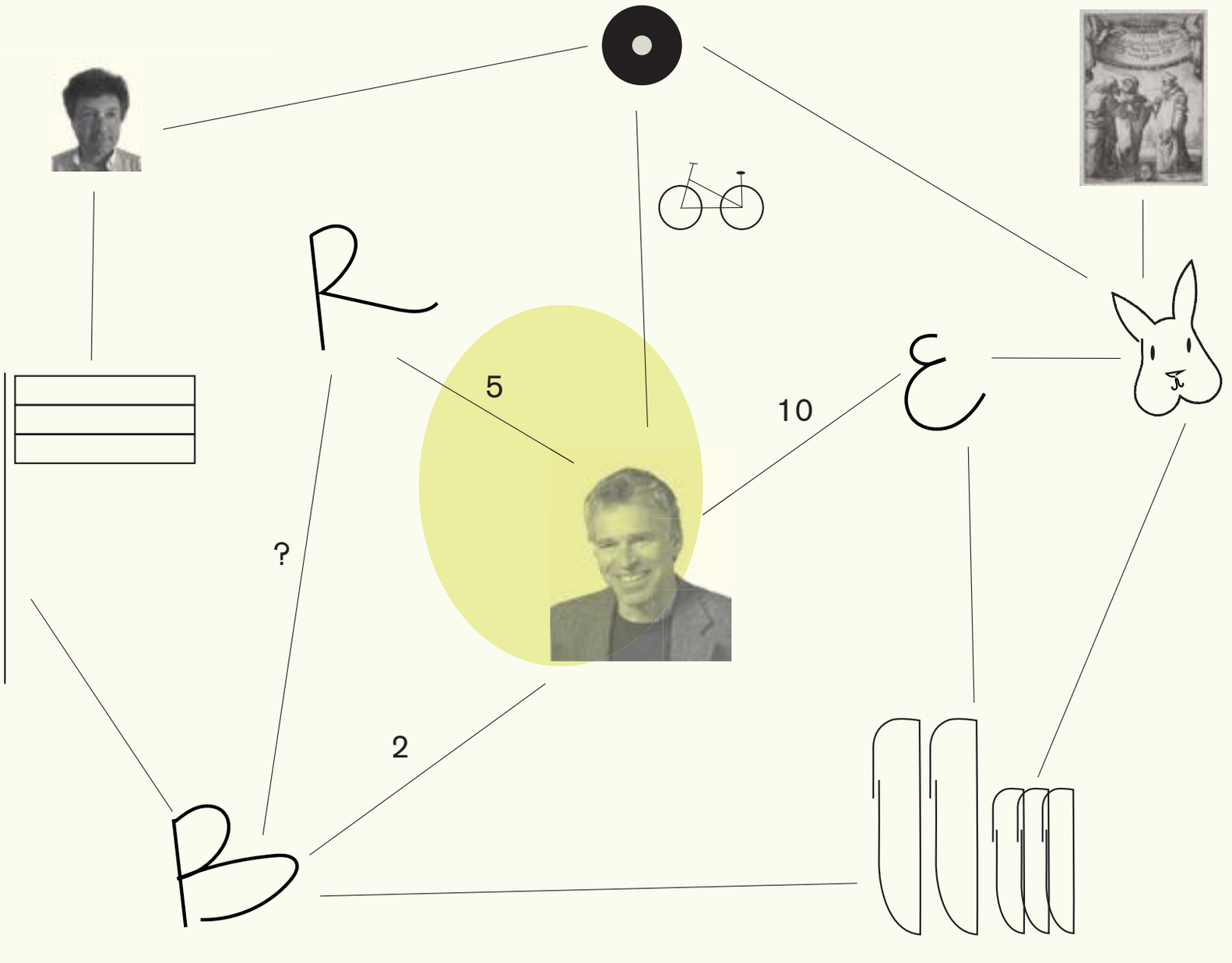
»Oh, ich sehe, Sie sind im Assoziationsnetz der Netzwerke gefangen – und Ihr Hang zum Narrativen geht wieder mit Ihnen durch. Wir wollten den Artikel doch gemeinsam schreiben …« *Simplicio murmelt vor sich hin, halb in Trance …* »Alles ist ein Netz. Netzstrümpfe. Wissensnetz, Fischernetz, Internet, Tarnnetz, Schienennetz, Beziehungsnetz, Warennetz. Soziales Netz, Trinkwassernetz, Schmetterlingsnetz, Sicherheitsnetz, Netzfahndung, Nachbarschaftsnetz, Netzschlange …« *Salvati unterbricht den Sprachfluss:* »Haaalt! So kommen wir doch nicht weiter. Sie reiten den Netzwerkgaul bis er tot ist. Hier *(zeigt sein Handy):* Ich habe gerade ›network‹ in Google eingegeben. Das Ergebnis: Ungefähr 2 860 000 000 Treffer. Wollen Sie bitte alle nacheinander vorlesen? Bringt uns das irgendeine neue Erkenntnis abgesehen von der Tatsache, dass Netzwerk und Netz zu den absoluten Modewörtern zählen? Wir müssen das Ganze systematisch angehen. Da gibt

es erst mal eine äußere Struktur – wie das Spinnennetz. Es gibt Knoten und Verbindungen zwischen den Knoten. Mathematisch nennt man das Graph. Ein Graph G ist ein geordnetes Paar (V, E), wobei V eine Menge von Knoten und E eine Menge von Kanten (so werden die Verbindungen genannt) bezeichnet.«

Simplicio gähnt gelangweilt: »Oh Gott, der Mathematikus. Bevor Sie zu den praktischen Problemen kommen, habe ich das ganze Internet vorgelesen.« *Salvati macht unbeirrt weiter.* »Man unterscheidet ungerichtete Graphen ohne Mehrfachkanten, gerichtete Graphen ohne Mehrfachkanten, ungerichtete Graphen mit Mehrfachkanten und gerichtete Graphen mit Mehrfachkanten. Ein ungerichteter Graph gilt als zusammenhängend, wenn es zu jedem beliebigen Knotenpaar einen Weg von dem einen zu dem anderen Knoten gibt. Nicht zusammenhängende Graphen erkennt man …« *Simplicio fängt an zu schnarchen, so laut, dass man Salvatis Ausführungen nicht mehr folgen kann, nach einer ganzen Weile schreckt er plötzlich auf:* »Der Graf von Monte Christo blieb auch ungerichtet! Hihi, verstehen Sie? Er wurde ja nicht gerichtet, sondern …« *Salvati schnaubt empört*: »Also wirklich Simplicio, Sie machen Ihrem Namen wieder einmal alle Ehre. Aber gut, auch diese Abenteuergeschichte kann man als Netzwerk begreifen, denn im

Der Schaltplan zeigt mehr als 4500 der 8000 Neuron-zu-Neuron-Verbindungen, oder Synapsen, im Nervensystem des Wurms Caenorhabditis elegans. Jeder Punkt stellt ein Neuron dar. Rot: Sensorische Neuronen, blau: Verbindungsneuronen, gelb: Motorneutronen.

Abbildungen: Illustration Rosa Süß; researchgate



Grunde basiert sie auf einem ungeheuer komplizierten Gewebe aus Beziehungen zwischen vielen Menschen: der Graf selbst, der zu Anfang der Geschichte ein junger Seemann war, der Kapitän des Schiffs ›Pharao‹, der ihm einen Brief an den Großmarschall Henri-Gratien Bertrand auf der Insel Elba gibt, dem Exilort Napoleons, das Mädchen Mercédès, die er heiraten will, der stellvertretende Staatsanwalt de Villefort, der ihn einkerkern lässt, um den Inhalt des Briefes nicht ans Licht kommen zu lassen…«

Simplicio gähnt. »Das steht alles in dem Buch? Ich dachte da geht es um einen Ausbruch aus der Festung Château d'If und wie Monte Christo Rache nimmt.« *Salvati fasst sich an den Kopf.* »Ja sicher, aber das Ganze hat auch eine Vor- und eine Nachgeschichte. Es gibt Gründe für das Geschehen, es gibt Beziehungen zwischen all den Figuren in dem Roman: das ist sozusagen ein Beziehungsgeflecht, ein Netzwerk!« *Simplicio, immer noch gelangweilt:* »Und jetzt wollen Sie mir sicher erzählen, dass Sie dieses komplexe Netzwerk auf ein paar Kanten und Knoten reduzieren können. Da wird Ihnen aber nicht mehr viel übrig bleiben von der schönen Geschichte. *Salvati:* »Die Kanten und Knoten sind erst einmal die Grundstruktur der Graphentheorie. Die Kanten lassen sich zusätzlich gewichten. So kann man den Beziehungen unter den Knoten eine Qualität zuordnen.« *Simplicio:* »Was meinen Sie, lieber Salvati? Welche Qualität soll ich der Kante zuordnen die uns beide (als Knoten) verbindet – gemeinsame Interessen = 0?«

Salvati: »Ich sehe schon, sie werden kein zweiter Mark Zuckerberg werden. In letzter Zeit wurden bei Facebook und Twitter Graphendatenbanken geschaffen, bei denen die Verbindungen zwischen den Daten so wichtig sind wie die Daten selbst. In den Datenbanken, die ein soziales Netzwerk abbilden, können der Kante beispielsweise Informationen darüber zugeordnet werden wie lange sich zwei Personen kennen, wie sie sich kennengelernt haben und welche Art der Beziehung sie verbindet.« *Simplicio:* »Und ob Sie schon mal was miteinander hatten!«

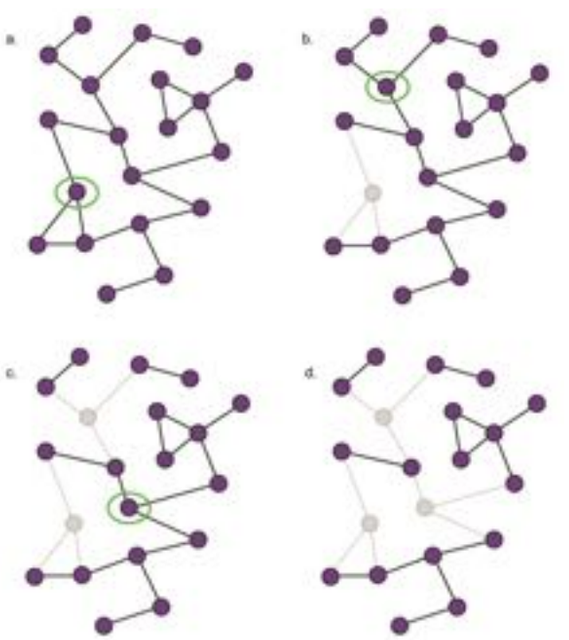
Salvati: »Na ja – mit einem solchen Graphen könnte man die Ausbreitung sexuell übertragbarer Krankheiten sicher gut untersuchen. Aber jetzt zu einem anderen Thema. Ich hörte, Sie hatten Schwierigkeiten heute Morgen mit Ihrem Rad hier anzukommen. Sie können beispielsweise jeder Kante – also jedem Verbindungsweg – eine Zeit zuordnen, die Zeit, die sie mit dem Fahrrad von einem Ort – einem bestimmten Knoten – zu einem anderen Ort

brauchen. Mit so einem Graphen und einem geeigneten Algorithmus können Sie dann die Fahrtstrecke bestimmen, auf der Sie in kürzester Zeit ankommen. Den Algorithmus hat übrigens der niederländische Programmierer Edsger W. Dijkstra schon 1959 gefunden. Aber das braucht Sie ja nicht zu interessieren, das macht ja Ihr Navi für Sie.« *Simplicio blättert in seinem Notizbuch:* »Die Kante von mir zu Bärbel bekommt eine 2, die zu Renate eine 5, die zu Emma eine 10…« *Salvati:* »Mit Ihnen ist kein vernünftiges Gespräch zu führen. Wenn Sie vielleicht kurz innehalten könnten, bei Ihrem Beziehungschaos wird Ihnen die Netzwerktheorie nicht weiterhelfen. Aber vielleicht interessiert Sie das: Wussten Sie, dass jeder Mensch mit jedem anderen Menschen angeblich über nur ganz wenige Bekanntschaftsbeziehungen verbunden ist? Wir kennen über fünf oder sechs Leute den Papst oder Britney Spears.«

Simplicio sehr erstaunt: »Sie kennen Britney Spears – kann ich mir nicht vorstellen.« *Salvati:* »Es gibt einen Namen dafür: das ›Kleine-Welt-Phänomen‹. Eigentlich ist es nicht sehr neu, denn schon 1967 hat Stanley Milgram, ein amerikanischer Psychologe, die ersten empirischen Forschungen angestellt. Er wählte einen Börsenmakler in Boston und einen Theologiestudenten in Sharon, Massachusetts, als Ziele aus. Anschließend suchte er nach dem Zufallsprinzip einige Einwohner von Wichita und Omaha aus und schickte ihnen einen Brief mit einer kurzen Zusammenfassung des Zwecks der Studie, einem Foto, dem Namen, der Adresse und Informationen über die jeweilige Zielperson. Sie wurden gebeten, den Brief an einen Freund, Verwandten oder Bekannten weiterzuleiten, der die Zielperson höchstwahrscheinlich kennt. 64 der 296 Nachrichten schafften es zurück, einige jedoch fast über ein Dutzend Zwischenstationen. Diese vollständigen Ketten ermöglichten es Milgram, die Anzahl der Personen zu bestimmen, die erforderlich sind, um den Brief zum Ziel zu bringen. Er fand heraus, dass die mittlere Anzahl von Zwischenprodukten 5,2 betrug.«

Simplicio: »Sie wollen, doch nicht ernsthaft aus diesem kleinen Experiment auf ein allgemeines Gesetz schließen?« *Salvati:* »Nein, durchaus nicht. Es gab weitere Untersuchungen: Erst 2006 haben Jure Leskovec von der Carnegie Mellon University und Eric Horvitz von Microsoft Research 240 Millionen Instant-Messenger-Accounts ausgewertet. Die Protokolle umfassten 30 Milliarden Einzelverbindungen. Danach ist die Kette der Personen die zwei Menschen verbindet durchschnittlich 6,6 Personen lang.« *Simplicio:* »Und – was bringt mir das?« *Salvati:* »Sie sollten sich wundern, denn es zeigt, wie eng die Menschheit vernetzt ist. Und als neugieriger Mensch könnten Sie sich vielleicht fragen warum das so ist.« *Simplicio:* »Sie werden es mir ja gleich sagen – also, warum ist das so?«

Salvati: »Erst einmal müssen wir eine grobe Modellvorstellung vom Beziehungsnetz der Menschen untereinander entwickeln. Dabei ist ein Begriff zentral – der Knotengrad. Der Knotengrad eines Knotens ist die Anzahl der Kanten – also der Verbindungen zu anderen Knoten, die von dem jeweiligen Knoten ausgehen. Maximal kann ein Knoten mit allen anderen Knoten in Verbindung stehen, minimal mit keinem. Man kann dann eine Liste machen und die Knotengrade der einzelnen Knoten des Netzwerks aufschreiben.« *Simplicio blättert wieder in seinem Notizbuch.* »Also ich habe Knotengrad 381, soviel Bekannte stehen zumindest in meinem Adressbuch. Sie als alter Nerd vermutlich 0, oder sagen wir 1 – wir reden ja gerade miteinander.«



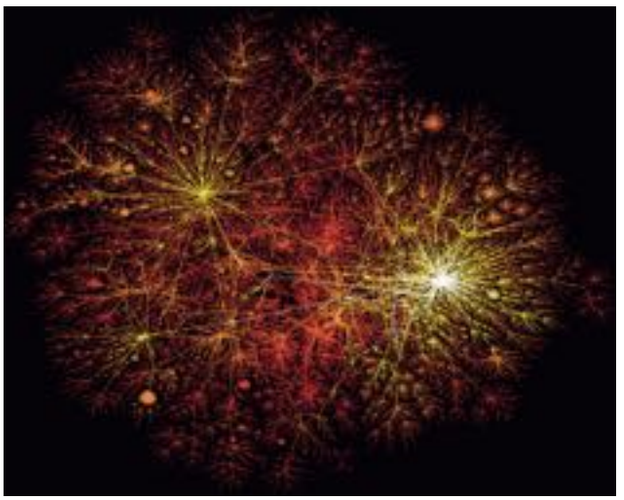
Die Grafiken zeigen die allmähliche Fragmentierung eines kleinen Netzwerks nach dem Zusammenbruch seiner Knoten. In jedem Panel entfernen wir einen anderen Knoten (hervorgehoben mit einem grünen Kreis) zusammen mit seinen Links.

Während das Entfernen des ersten Knotens nur begrenzte Auswirkungen auf die Integrität des Netzwerks hat, isoliert das Entfernen des zweiten Knotens zwei kleine Cluster vom Rest des Netzwerks. Schließlich fragmentiert das Entfernen des dritten Knotens das Netzwerk und zerlegt es in fünf nicht kommunizierende Cluster der Größen $s = 2, 2, 2, 5, 6$.

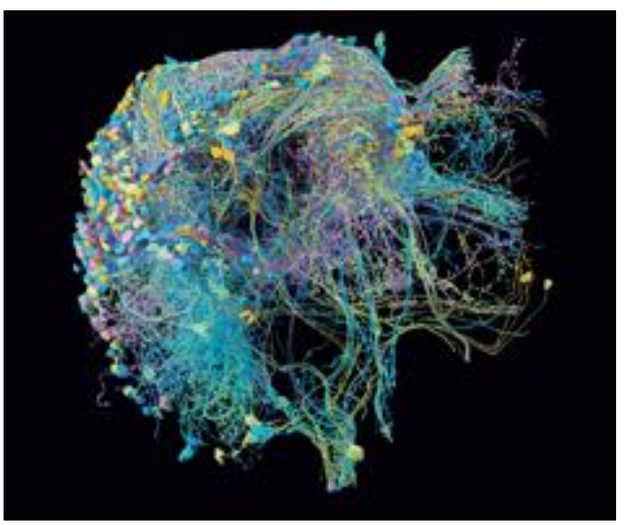
Salvati unbeeindruckt: »Das einfachste Modell ist vielleicht das, in dem die Knotengrade rein zufällig verteilt sind. Wir gehen jede mögliche Verbindung zwischen jeweils zwei Knoten durch und nehmen eine bestimmte Wahrscheinlichkeit dafür an, dass die Kante zwischen den beiden Knoten zustande kommt. So können wir verschiedene Realisierungen eines zufälligen Netzwerks konstruieren. Betrachtet man viele Realisierungen, so kann man für jeden Knotengrad eine Wahrscheinlichkeit ableiten. Bei zufälligen Netzwerken führt die Wahrscheinlichkeitsverteilung der Knotengrade auf die bekannte Binomialverteilung. Genauer gerechnet kennt nach dem Zufallsmodell jeder eine beliebige andere Person über im Mittel 3,28 Bekanntschaften.«

Simplicio: »Also waren die Experimente mit dem Ergebnis ›fünf bis sechs Zwischenbekanntschaften‹ falsch?« *Salvati:* »So kann man das nicht sagen. Während die Experimente ja immer eine Stichprobe der gesamten Menschheit betrachten und damit

Abbildungen: Rosa Süß (Illustration); networksciencebook.com/chapter/8#percolation-theory



Diese Teilkarte des Internets basiert auf Daten vom 15. Januar 2005, die auf opte.org gefunden wurden. Jede Linie wird zwischen zwei Knoten gezeichnet, die zwei IP-Adressen darstellen. Die Länge der Leitungen zeigt die Verzögerung zwischen diesen beiden Knoten an. Dieses Diagramm stellt weniger als 30 Prozent der Netzwerke der Klasse C dar, die Anfang 2005 durch das Datenerfassungsprogramm erreichbar waren.



Wissenschaftler von Google und dem Janelia Research Campus in Virginia haben 2020 eine hochaufgelöste Karte der Verbindungen im Gehirn der Fruchtfliege erstellt. Hier ist ein Ausschnitt des 3D-Modells zu sehen, das 20 Millionen Synapsen zeigt, die etwa 25 000 Neuronen im Gehirn einer Fruchtfliege verbinden.

falsch sein können, so können natürlich andererseits auch die Modellannahmen falsch sein. Trotzdem findet man in vielen Netzwerken die ›Kleine-Welt-Eigenschaft‹, dass zwei beliebige Knoten über nur wenige Zwischenknoten verbunden sind. Beispiele sind das Internet, Energieversorgungsnetzwerke, Flugverbindungen oder Proteininteraktionen in menschlichen Zellen. Es wurde auch festgestellt, dass die strukturelle und funktionelle Konnektivität im Gehirn die Small-World-Topologie widerspiegelt.«

Simplicio: »Das wundert mich bei Ihnen. Mir scheint, als ob Sie immer um sehr viele Ecken herumdenken. Und das bei echten Netzwerken die Verbindung der Knoten nicht rein zufällig zustande kommt, hätte ich Ihnen auch gleich sagen können. Ich suche mir meine Freunde ja auch nicht zufällig aus – Sie vielleicht? Ich denke, dass das Modell des zufälligen Netzwerks eigentlich nicht viel taugt. Eben wieder so eine mathematische Spinnerei.«

Salvati: »Sie haben nichts verstanden, mein lieber Simplicio. Naturwissenschaftler sind wie Kinder. Durch Herumspielen mit einfachen mathematischen Modellen lernen sie die Welt kennen. Auch wenn die Modelle die Welt erst einmal nicht beschreiben können. Aber man ist ja lernfähig. In zufälligen Netzwerken haben die meisten Knoten einen mittleren Knotengrad, stark vernetzte Knoten und wenig vernetzte Knoten kommen selten vor. Reale Netze zeigen dagegen oft eine skalenfreie Verteilung der Knotengrade. Das bedeutet, dass stark vernetzte Knoten, sogenannte Hubs, deutlich häufiger vorkommen und auch wenig vernetzte Knoten häufiger sind als beim Zufallsnetzwerken. Für soziale Netzwerke bedeutet das, dass bei sehr bekannten Personen die Wahrscheinlichkeit für eine weitere Bekanntschaft weit größer ist als für den Durchschnitt – wer schon bekannt ist, wird leicht noch bekannter.«

Simplicio singt ein Lied von Leonard Cohen vor sich hin: »Everybody knows the fight was fixed, the poor stay poor, the rich get rich. That's how it goes, everybody knows …« *Salvati:* »So scheint es zu sein. Die These, dass schon bekannte Personen einer Gesellschaft leicht noch bekannter werden und damit auch reicher, wird durch die Erkenntnis, dass auch die menschliche Gesellschaft als skalenfreies Netzwerk gesehen werden kann, auf jeden Fall unterstützt.« *Simplicio:* »›Skalenfrei‹ habe ich schon mal gehört. Sind nicht Fraktale skalenfrei? Ich kann mich an die lustige Mandelbrotmenge, an dieses Apfelmännchen aus den 1970er Jahren erinnern. Wenn man die Mandelbrotmenge bildlich darstellt und einen Ausschnitt vergrößert, trifft man immer wieder auf die gleichen Strukturen. Das gefällt mir. Selbstähnlichkeit ist ein sehr raffiniertes Prinzip, das kommt mir sehr entgegen. Damit sind komplexe Netzwerke gar nicht so komplex. Wenn ich also den Ausschnitt einer Karte des WWW anschaue und herauszoome und nur noch Knoten mit hohem Kantengrad sehe, dann sieht die Karte wieder ähnlich aus.«

Salvati: »Ja aber die Mandelbrotmenge ist ein Monster, das sich in die Unendlichkeit erstreckt. In der wirklichen Welt gibt es das nicht. Ob Küstenlinien, Schneeflocken oder auch Netzwerke. Es gibt immer eine obere und eine untere Grenze – bei Netzwerken einen kleinsten und größten Knotengrad. Übrigens kann man auch skalenfreie Netzwerke simulieren. Ein Konstruktionsprinzip dafür haben Albert-László Barabási und seiner Doktorandin Réka Albert formuliert und damit ein Modellsystem geschaffen, mit dem man im Prinzip so unterschiedliche Netzwerke wie Internet-Links, Energieversorgungsnetzwerke, Flugverbindungen, Proteininteraktionen oder auch Beziehungsgeflechte unter Menschen untersuchen kann.«

Simplicio: »Und was kommt dabei heraus?« *Salvati:* »Das hängt von der Fragestellung ab. Netzwerke haben ja unter anderem den großen Vorteil, dass beim Ausfall von einzelnen Komponenten nicht gleich das ganze System zusammenbricht. Erinnern sie sich an den Morgen, an dem sie im Schnee stecken geblieben sind? Sie hätten einfach eine andere Straße nehmen können und wären

Abbildungen: opte.org; FlyEM bei HHMI/Google Research

auch ans Ziel gekommen. Gerade bei Infrastrukturen wie Trinkwasserversorgung, Abwasserentsorgung, Kommunikation sowie Transport und Verkehr bis hin zu Absatz- und Lieferketten hätten wir doch gerne eine gewisse Ausfallsicherheit. Die gute Nachricht ist, dass skalenfreie Netze sehr unempfindlich auf den zufälligen Ausfall einzelner Knoten oder Kanten reagieren. Zum Beispiel passieren unzählige Fehler in unseren Zellen. Von der fehlerhaften Entfaltung von Proteinen bis hin zur verspäteten Ankunft eines Transkriptionsfaktors – das macht aber im Großen und Ganzen wenig aus.« *Simplicio:* »Und die schlechte Nachricht?«

Salvati: »Ich hatte ja erwähnt, dass sich skalenfreie Netzwerke durch die Existenz von Knoten mit sehr vielen Anschlüssen auszeichnen, sogenannten Hubs. Wenn viele von denen ausfallen, fragmentiert das Netzwerk in unzusammenhängende Stücke. Es tritt eine Art Dominoeffekt auf und das Netzwerk bricht zusammen.« *Simplicio:* »Achso – deshalb kann das Fahrrad, das ich gerade gekauft habe, erst in ein paar Monaten geliefert werden. Vermutlich auch so ein Hub-Effekt im Verteilungsnetz der Waren. Und als das Containerschiff Ever Given im Suezkanal feststeckte, sind vermutlich auch ein paar Hubs des Handelsnetzes zusammengebrochen. Können Sie auch die Finanzkrise von 2009 erklären?«

Salvati: »Nicht direkt. Sie verlangen mal wieder zu viel. Irgendwie sind an Wirtschaftsengpässen ja Handelsnetzwerke, Unternehmensnetzwerke, Kreditnetzwerke und politische Strukturen beteiligt. Es gibt aber neuerdings Ansätze, bei denen man die Spieltheorie, die sich ja mit Entscheidungen von interagierenden Menschen beschäftigt, mit dem zugrundeliegenden skalenfreien Netzwerk der menschlichen Gesellschaft zusammenbringt. Grundsätzlich aber erforscht die Graphentheorie erst einmal die Struktur von Netzwerken. Das ist wie ein leeres Haus. Ein Haus kann sehr unterschiedlich genutzt werden. Es kann eine Firma einziehen und Büros einrichten oder eine Familie, die Wohnzimmer, Esszimmer, Bäder und Schlafzimmer braucht. So können Netzwerkstrukturen zum Sammeln von Daten eingesetzt werden, wie zum Beispiel beim Messnetz zur Überwachung des Atomwaffentestabkommens oder beim Netz aus Himmelskameras zur Beobachtung von Meteoroiden. Eine andere Funktion ist der Austausch von Information wie beim Amateurfunknetz oder zur Verteilung von elektrischer Energie wie beim Stromnetz – davon später.«

Simplicio: »Wenn eine Netzstruktur wie ein Haus ist, von was wird dann das neuronale Netz in unserem Kopf bewohnt? Mir scheint da wird es schwierig. Unsere Wetware verändert sich ja ständig – meine zumindest, bei Ihrer bin ich mir da nicht so sicher.« *Salvati:* »Durch Denken das Denken ergründen – ein vermessenes Ziel. So einfach wie das Internet als Infrastrukturnetzwerk, dessen Knoten Computer sind und dessen Verbindungen physischen Kupferverbindungen entsprechen, ist unsere Wetware sicher nicht. Aber auf der Informationsebene gibt es vielleicht mehr Gemeinsamkeiten. Links, die im WWW die URLs sind, könnten in unserem Denken die Analogien bilden.« *Simplicio*: »Sie meinen, als ich über den Link ›ungerichtet‹ auf den Graf von Monte Christo kam oder über den Link ›skalenfrei‹ zu den Fraktalen? Wir springen im Netzwerk unserer Gedanken und dabei verhindern Analogien, dass wir uns geistig im Kreis drehen. Der Gedanke gefällt mir!«

Salvati: »Mein lieber Simplicio. Sie heben schon wieder ab. Ihre Ideen in allen Ehren, aber verfolgen Sie die Denkansätze auch mal in die Tiefe. Das menschliche Gehirn hat etwa hundert Milliarden Neuronen, das genetische Netzwerk einer menschlichen Zelle hat etwa 20 000 Gene als Knoten, das soziale Netzwerk besteht aus sieben Milliarden Individuen und das WWW wird auf über eine Billion Webdokumente geschätzt. Das einzige Netz, das Sie im Detail untersuchen können, ist wohl das neuronale Netz des Wurms Caenorhabditis elegans, das einzige vollständig kartierte Nervensystem eines lebenden Organismus, der hat nur 302 Neuronen.

Die Netzwerkforschung ist in vielen Bereichen erst am Anfang. Doch auch wenn die Modelle der Graphentheorie noch nicht die Welt erklären. Irgendwo muss man anfangen.« *Simplicio, sichtlich ermattet:* »Und auch irgendwann aufhören – mir raucht schon der Kopf.«

Dr. Christian Sicka
Der Physiker leitet am Deutschen Museum die Abteilungen Astronomie, Planetarium, Atomphysik und Zeitmessung.

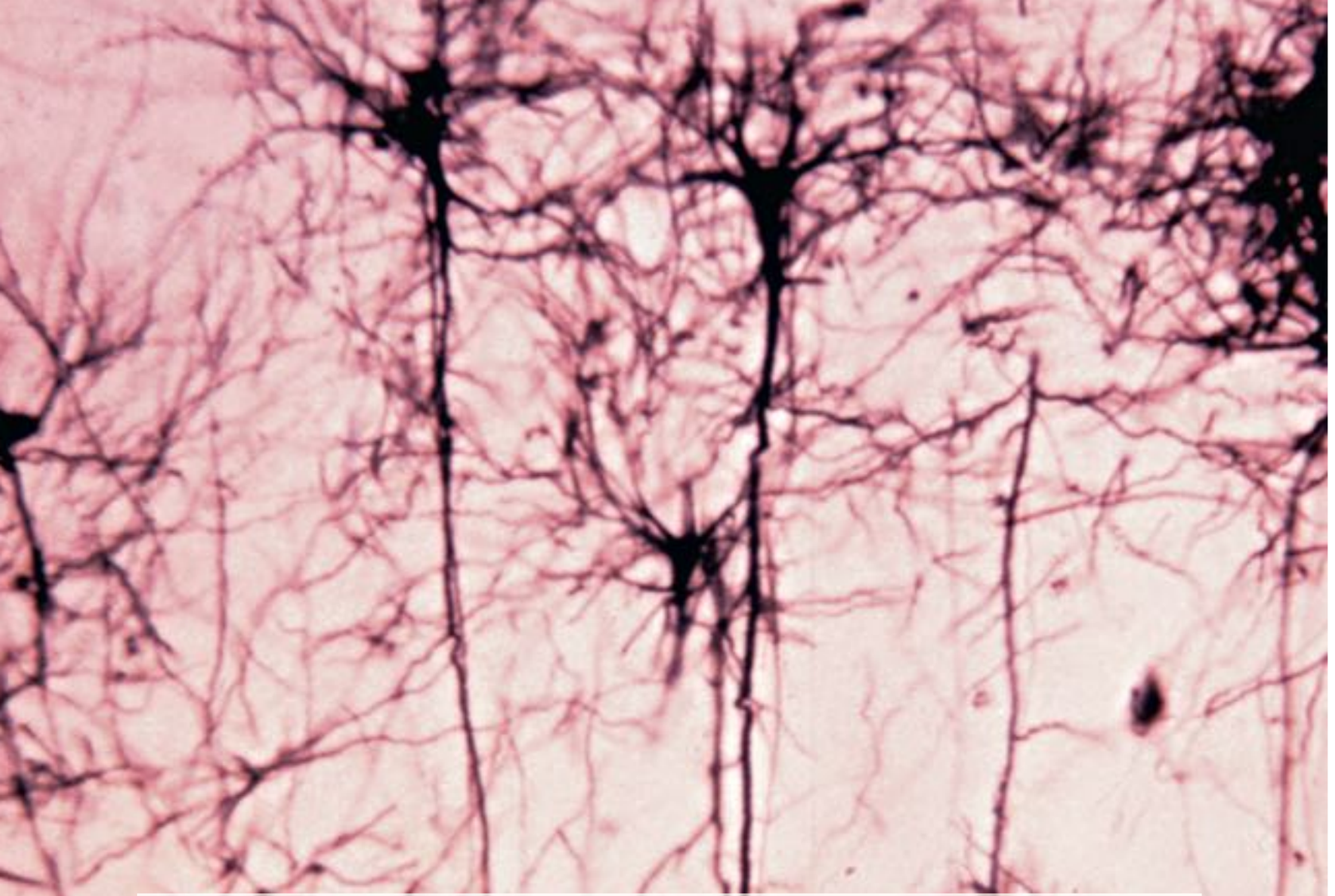
Anzeige

ERZDIÖZESE MÜNCHEN UND FREISING

Erzbischöfliches Pater-Rupert-Mayer Schulzentrum in Pullach
-staatl. anerkannt-
Wir sind eine Schulfamilie!

- Gymnasium mit sprachlicher und naturwissenschaftlich-technologischer Ausbildungsrichtung
- Realschule mit den Wahlpflichtfächergruppen I und II (mathem./naturwissenschaftlich/technisch, wirtschaftlich)
- Volksschule mit Teilhauptschule im Ganztag
- Kindertagesstätte
- Durchlässige Übergänge zwischen den Einrichtungen
- Bewährtes Tagesheimkonzept
- Tagesheimzeugnisse
- Fördernde und fordernde Vorbereitung auf den Abschluss
- Großflächige Außenanlagen
- Umfangreiches Zusatzangebot: Chöre, Streichorchester, Schulband, Sprachreisen, Theaterwerkstatt, Football, Skilager, Orientierungstage Schülercafeteria, u.v.a.m.

Vom Kindergarten bis zur Mittleren Reife oder bis zum Abitur- eine Biographie - eine Einrichtung. **Sind Sie interessiert?**
Erzb. Pater-Rupert-Mayer Gymnasium & Realschule Wolfratshauserstr. 30 82049 Pullach Tel.: 089/74426100 www.prmths.de



Neuronale Netze

Die enorme Kommunikations- und Leistungsfähigkeit des menschlichen Gehirns inspirierte von Anfang an auch die Computerwissenschaften. Bis Ende der 1960er Jahre boomte die Forschung an künstlichen neuronalen Netzen, wurde dann als wissenschaftliche Sackgasse kritisiert und erlebt heute eine Renaissance. **Von Rudolf Seising**

Woraus bestehen unsere Gehirne? Wie alle unsere Körperteile bestehen auch unsere Gehirne aus Zellen, die wir – wenn wir überhaupt jemals ein nacktes Gehirn zu sehen bekommen – mit bloßem Auge nicht voneinander unterscheiden können. Vielmehr würden wir eine cremefarbige Masse sehen und wenn wir diese berührten, würden wir ihre Konsistenz vielleicht mit der von Pudding vergleichen.

Im Wesentlichen gibt es zwei verschiedene Gehirnzellentypen: Nervenzellen und Gliazellen. Letztere erhielten ihren Namen Mitte des 19. Jahrhunderts von dem Gelehrten, Arzt und Politiker Rudolf Virchow (1821–1902). »Glia« kommt aus dem Griechischen und bedeutet »Leim«, denn man dachte damals, dass diese Zellen lediglich stützende Funktion für das Gewebe der als viel wichtiger erachteten Nervenzellen (Neuronen) haben. Wir wissen auch heute längst nicht alles über die Gliazellen, obwohl deren Anzahl in unserem Gehirn vielleicht genauso groß ist, wie die der Neuronen; andere Wissenschaftler sagen, es seien im Verhältnis 1 : 50 mehr.

Was wissen wir noch über die Gliazellen? Sie grenzen das Neuronengewebe gegenüber der Hirnoberfläche und den Blutgefäßen ab. Sie sind für die Ernährung der Nervenzellen und für deren Schutz gegenüber Fremdkörpern zuständig. Sie strukturieren das Wachstum des Nervengeflechts während der Entwicklung im Embryonalstadium und wenn das Gehirn ausgewachsen ist, sorgen sie dafür, dass sich das Neuronennetz in möglichst stets gleichem Milieu (pH-Wert und Konzentration

der Elektrolyte) befindet. Gliazellen sind auch die Markscheiden um die Nervenfasern herum, die zwar Teil der Neuronen sind, aber als Leitungen zur Übertragung von Signalen zwischen den Neuronen dienen.

Damit diese Kommunikation überhaupt zustande kommt, müssen sowohl elektrische als auch chemische Voraussetzungen erfüllt sein, also lenken nicht nur die Neuronen, sondern auch der in ihrer Umgebung befindliche »Leim« der Gliazellen die Signalübertragung im Gehirn: Damit eine Nervenzelle aktiv wird, muss ein Wechselspiel von positiven Natrium- und Kaliumionen eine elektrische Ladung, das sogenannte Aktionspotenzial aufbauen. Diese Ionen können durch kleine Kanäle in der Zellwand in die Neuronen hinein und aus ihnen heraus gelangen. Sind die Natriumkanäle fast alle geschlossen, gewisse Kaliumkanäle dagegen durchlässig, dann ist das Neuron im Zustand der Ruhe. Empfängt das Neuron ein elektrisches Signal von einer anderen Zelle, so ändert es in wenigen Millisekunden seine elektrische Ladung. Daraufhin können Natriumionen durch die Kanälchen aus der Zelle hinausgelangen und ein Aktionspotenzial baut sich auf. Dieses baut sich wieder ab, wenn die Kaliumionen durch die Kanälchen aus dem Neuron entweichen. So wird ein elektrischer Impuls über eine Nervenfaser zu einem anderen Neuron gesandt: Das Neuron »feuert«.

Der kanadische Psychologe Donald Olding Hebb (1904–1985) schlug 1949 zwei aus neurophysiologischen Experimenten abgeleitete Prinzipien für eine Theorie dazu vor. Das erste Prinzip ist als »Hebbsche Regel« bekannt: Wenn eine Nervenfaser einer Zelle A nahe genug ist, um die Zelle B zu erregen, und dies wiederholt oder andauernd tut, dann führt dies in einer der beiden oder in beiden Zellen zu einer stoffwechselbedingten Veränderung, so dass die Erregungswirkung von Zelle A auf Zelle B erhöht wird. Diese Regel fand bald eine eingängigere Formulierung: »Neurons that fire together wire together« – Neuronen, die zusammen feuern, sind miteinander verbunden. Hebbs ehemalige Studentin Brenda Milner ergänzte diese Idee der neuronalen Anregung durch die entsprechende Idee der neuronalen Hemmung: Wenn Zelle A wiederholt oder anhaltend ein Signal an Zelle B sendet, aber B nicht feuert, so wird es weniger wahrscheinlich sein, dass Signale aus Zelle A Zelle B in Zukunft zum Feuern verleiten werden.

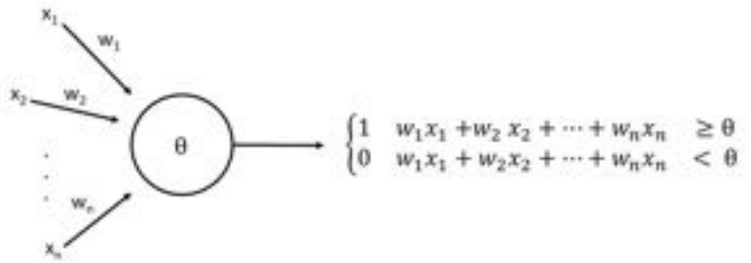
Für Strukturen, die Elemente miteinander verbinden, haben sich Mathematiker die Graphentheorie ausgedacht. Ein Graph hat Knoten und Kanten. Knoten sind in unserem Beispiel die Neuronen, Kanten sind die Nervenfasern mit den Synapsen. Wenn sich Graphen so ausbilden, dass es geschlossene Züge gibt, wenn also die Signale von Knoten A über andere Knoten schließlich wieder zu A zurückgelangen, spricht man von einer Masche. Viele Maschen bilden ein Netzwerk. Sie werden den Ausdruck vom Stricken her kennen und die Pullover, die Ihnen vielleicht irgendwann einmal jemand gestrickt hat, sind somit liebevoll hergestellte Netzwerke. Irgendwie haben auch unsere Gehirne mit Liebe zu tun, aber das ist ein Thema, das wir hier nicht vertiefen können. Dagegen halten wir fest, dass unsere Neuronen sich über die Nervenfasern zu Netzwerken verknüpfen, in dessen Maschen sich die für die neuronale Kommunikation ebenfalls wichtigen Gliazellen befinden.

Es ist eine wertvolle Eigenschaft moderner Wissenschaftler, von realen Systemen zu abstrahieren und Modelle zu finden, die nur die im jeweiligen Falle interessierenden Eigenschaften der realen Systeme berücksichtigen. So abstrahierte der Mathematiker John von Neumann (1903–1957) im Juni 1945 von vielen der oben beschriebenen physiologischen Feinheiten natürlicher Gehirne, als er schrieb, dass entsprechend vereinfachte neuronale Funktionen durch Telegrafenrelais oder Vakuumröhren nachgebildet werden könnten. Es handelt sich um eine Passage in seinem berühmten *First Draft of a Report on the EDVAC*, seinem Bericht über die logischen Prinzipien des zukünftigen Computers EDVAC, in denen er eine Verbesserung gegenüber dem damals gerade fertiggestellten Computer ENIAC sah. Er ging sogar noch weiter bei seiner Analogiebetrachtung zwischen diesen technischen Systemen und natürlichen Organismen, als er schrieb, dass der zukünftige Computer aus drei wesentlichen Teilen bestehen werde, dem zentralen arithmetischen Teil (CA – central arithmetic), dem zentralen Teil zur Steuerung (CC – central control) und dem Speicher M – eine Abkürzung für »memory«: Gedächtnis. Sodann argumentierte er, dass diese Computerteile CA, CC und M den assoziativen Neuronen im menschlichen Nervensystem entsprächen!

Damals wie heute ist es sonderbar, die Komponenten eines technischen Rechenautomaten mit der Vorstellung von Arealen des menschlichen Nervensystems zusammenzubringen. Entsprechende Ideen gehen auf die Kybernetik der 1940er Jahre zurück, eine von dem Mathematiker Norbert Wiener (1894–1964) eingeführte »Über-Wissenschaft«, die insbesondere auf solche Analogiebetrachtungen aufmerksam machte. Das gleichnamige Buch von Wiener trug den Untertitel *Communication and Control in the Animal and the Machine*. Bei seinen theoretischen Arbeiten über Flugabwehrgeschütze und die Steuerung und Regelung technischer Systeme hatte er Parallelen bei der Informationsverarbeitung in den technischen und in den lebendigen Systemen ausgemacht. Bei beiden finden sich Regelkreise mit Rückkopplungen (engl. feedback) etwa bei der Dampfmaschine und in Thermostaten, bzw. wenn in Organismen negative Rückkopplungen dafür sorgen, dass gewissen Abweichungen verschiedener Eigenschaften von ihren Zielwerten entgegengewirkt wird. Unter Wieners Analogiebetrachtungen findet sich in diesem Buch auch der Vergleich des natürlichen Gehirns mit den damaligen Rechenautomaten.

Aber die Geschichte ist noch älter: Noch vor dem Ende des Zweiten Weltkriegs, im Winter 1943/44 hatte der amerikanische Computerpionier Howard Hathaway Aiken (1900–1973), der Konstrukteur des Mark I, gemeinsam mit Wiener und von Neumann in Princeton zu einem interdisziplinären Treffen mit Elektroingenieuren, Neurowissenschaftlern und Mathematikern eingeladen, um über Parallelen zwischen den Abläufen in Gehirnen und Computern zu diskutieren. Hier wurde beschlossen, dass der ursprünglich aus der Servomechanik in

Abbildungen: doc-stock/Health&Wellness



Darstellung eines Schwellenwert-Elements. Die x_j sind die Eingänge, die w_j sind deren Gewichtungen, θ ist der Schwellenwert. Erreicht die Summe der $w_j \cdot x_j$ den Schwellenwert θ, dann feuert das Neuron (Wert 1), sonst nicht (Wert 0).

Darstellung des logischen »und« und des logischen »oder« durch Schwellenwert-Elemente. Links: logisches »und«: Die zwei Eingangswerte x_j haben jeweils den Wert 1, Schwellenwert θ = 2 wird erreicht. Rechts: logisches »oder«: Der Schwellenwert θ = 1 wird schon erreicht, wenn nur einer der Eingangswerte x_j den Wert 1 hat.

die Elektrotechnik übernommene Ausdruck »Feedback« auch zur Beschreibung von ähnlichen Phänomenen in Lebewesen taugen sollte: Man kam zu der Ansicht, dass der Informationsgehalt von Nachrichten durch die Anzahl der Ja- bzw. Nein-Antworten auf entsprechende Fragen gemessen werden und das Wort »Memory« nicht mehr nur von Neurophysiologen und Psychologen, sondern auch von Computerwissenschaftlern benutzt werden könne. Wohl wegen dieser Einigungen nannte Wiener dieses Treffen später den »Geburtstag der neuen Wissenschaft der Kybernetik«.

An diesem Treffen in Princeton hatten auch der Psychiater und Neurologe Warren S. McCulloch (1898–1969) und sein Mitarbeiter, der autodidaktische Logiker Walter Pitts (1923–1969) teilgenommen, die im Jahr zuvor unter der Überschrift *Ein Logikkalkül für die der Nerventätigkeit immanenten Gedanken* einen Artikel publiziert hatten, in dem sie einen logischen Kalkül vorgestellt hatten, der das Verhalten von Neuronen als Aktionen von elektrischen Schaltkreisen, und zwar binären Schwellenwertelementen, in einem Netzwerk beschrieb. Solche Elemente können nur zwei Zustände einnehmen: Erregung oder Hemmung.

Kommunikation in einem solchen künstlichen Nervennetz bedeutet, dass ein Neuron seinen Erregungs- bzw. Hemmungszustand über die Verbindungsfasern (Kanten) dem Empfängerneuron signalisiert und dieses damit in den Zustand der Erregung bzw. Hemmung versetzt wird. Diese »McCulloch-Pitts-Neuronen« (MCP), wie sie bald genannt wurden, gehorchen also einem »Alles-oder-nichts-Prinzip«. Mit der Annahme dieser Zweiwertigkeit vollzogen die beiden Forscher die Verbindung zur Aussagenlogik: »Feuern« oder »Nichtfeuern« der Neuronen wurde mit Fließen oder Nichtfließen von Strom in Schaltkreisen in Analogie gesetzt, mit denen wiederum die logischen Wahrheitswerte »wahr« und »falsch« dargestellt wurden. Entsprechend miteinander verknüpfte Neuronen konnten so als die logischen Operationen »und«, »oder« usw. fungieren.

McCulloch und Pitts konzipierten ihre abstrakten Neuronen als Schwellenwert-Elemente: Die aufsummierten Werte der ein solches Neuron durch dessen Eingänge erreichenden Erregungsimpulse müssen einem Schwellenwert mindestens gleichkommen, damit das Neuron feuert. Wenn die Summe dieser Erregungswerte dagegen kleiner als der Schwellenwert bleibt, dann feuert das Neuron nicht.

Der Artikel von McCulloch und Pitts wurde bei dem Princeton-Treffen ausführlich diskutiert. Später, in seinem *First Draft* sprach von Neumann dann nicht mehr nur von »Memory«, sondern allgemeiner sogar von den »Organen« des Computers.

Als wenige Jahre später der junge Marvin Lee Minsky (1927–2016), der gemeinsam mit seinem Kommilitonen Dean Edmonds ein erstes sehr kleines künstliches neuronales Netzwerk erdacht und gebaut hatte, mit diesem Thema promovierte, war von Neumann Mitglied im Gutachterausschuss. Dieses künstliche neuronale Netzwerk hieß SNARC (Stochastic Neural-Analogue Reinforcement Computer). Es bestand aus 40 »Neuronen« mit Synapsen, Röhren, Motoren, Getriebe. SNARC konnte seine Gewichte schon automatisch justieren, wurde aber nie in der Praxis eingesetzt.

Vom Erkennen zum Lernen

1947 schlugen McCulloch und Pitts vor, dass ein Netz aus den von ihnen modellierten MCP-Neuronen in die Lage versetzt werden könne, räumliche Muster zu erkennen, und bald darauf begann der Psychologe Frank Rosenblatt (1928–1971) mit der Entwicklung des »Perceptrons«, einem einschichtigen Netz künstlicher Neuronen, das, wie der Name sagt, perzipieren könne (lat. percipere: einnehmen, wahrnehmen). Es sollte Zeichen – zunächst Quadrate und Kreise, später Ziffern und Buchstaben erkennen und wurde von Rosenblatt zunächst auf einem IBM-Rechenautomat simuliert, bevor es später auch von seinen Mitarbeitern als realer Apparat namens »Perceptron Mark I« hergestellt wurde, das mit seinem 20 x 20 Pixel großen Bildsensor Ziffern zu erkennen lernte.

Rosenblatt orientierte sich bei der Signalverarbeitung im Perceptron an der Hebbschen Regel für natürliche Neuronen. Diese Regel wurde »Lernregel« genannt, denn zu unseren Lernprozessen gehören zweifellos die Veränderungen der Signalübertragung zwischen den Neuronen. Rosenblatt übertrug diese Interpretation auf sein künstliches neuronales Netz, indem er diese Veränderungen der Signalübertragung als Gewichtsänderungen des neuronalen Graphen modellierte. Die Veränderung Δw_{AB} des Gewichtes von Neuron A zu Neuron B (also die Änderung der Verbindungsstärke dieser beiden Neuronen) kann dann als Produkt aus den Werten der Aktivierung von Neuron a_A, der Aktivierung von Neuron a_B, das mit Neuron A

verbunden ist, und einer »Lernrate« LR, die geeignet zu wählen ist, ausgerechnet werden: $\Delta w_{AB} = a_A \cdot a_B \cdot LR$.

Die Hebbsche Regel war ein erster einfacher Ansatz für eine neuronale Lernregel, die aus der Beobachtung in der Natur abgeleitet wurde. Rosenblatt modifizierte diese Regel für sein mathematisches Modell insofern, als er nicht die Gewichtung der einzelnen Eingangswerte, sondern für die Lernregel in seinem Perceptron die Differenz zwischen Soll- und Istwert berücksichtigte. Mathematisch ausgedrückt beschreiben solche Lernregeln das Streben nach einer möglichst guten und zuverlässigen Abbildung von den Input-Werten auf die Output-Werte. Die Güte dieser Abbildung wird dabei durch eine Fehlerfunktion beschrieben. Dieser Fehler sollte natürlich in der Folge der »Lernschritte« kleiner werden. Nach der Lern- oder Trainingsphase war das künstliche neuronale Netzwerk dann imstande, in einer nächsten Phase neue Zeichen-Inputs zu »erkennen« und zu klassifizieren.

In Deutschland konstruierte Karl Steinbuch (1917–2005), der 1958 Professor für Nachrichtentechnik an der TH Karlsruhe geworden war, etwa gleichzeitig seine »Lernmatrix« als eine elektrische Schaltungsstruktur, die eine Anzahl von »Eigenschaftsleitungen«, deren Bezeichnungen lediglich zwei Zustände annehmen können, also binär sind, mit einer Anzahl »Bedeutungsleitungen« mit ebenfalls binären Bezeichnungen verknüpfte. Wenn diesem Schaltungssystem während der »Lernphase« einige Eigenschaften und die zugehörigen Bedeutungen gleichzeitig mitgeteilt wurden, bildeten sich »bedingte Verknüpfungen«. Wurden dem System in dem von Steinbuch »Kann-Phase« genannten zweiten Arbeitsabschnitt dann Eigenschaften angeboten, so favorisierte es die »ähnlichste« Bedeutung dazu, das heißt, diejenige, die sich vom angegebenen Eigenschaftssatz am wenigsten in der Anzahl der binären Aussagen unterscheidet.

Schneller und genauer »lernte« das Adaline (adaptive linear neuron), das Bernard Widrow (geb. 1929) und sein damaliger Doktorand Marcian Edward Hoff (geb. 1937) im Jahre 1960 in der Arbeit *Adaptive switching circuits* vorstellten. Es beruhte auf einem Algorithmus der sich mittels der Methode der kleinsten mittleren Quadrate (Least-Mean-Squares-Algorithmus, LMS-Algorythmus) der Lösung annäherte. Das Adaline ähnelt dem Perceptron, hat aber wieder eine modifizierte Lernregel.

Der Name Perceptron setzte sich schnell für künstliche neuronale Netzwerke durch. Bald konstruierte man Varianten mit mehreren Neuronen, die in einer Schicht angeordnet waren. Bei der mathematischen Analyse solcher Perceptron-ähnlichen Netzwerkmodelle, die Marvin Minsky und Seymour Papert (1928–2016) zum Ende der 1960er Jahre in einem Buch mit dem Titel *Perceptrons* veröffentlichten, zeigte sich, dass Perceptrons viele wichtige Probleme gar nicht darstellen können. So konnte es den logischen Operator für das »exklusive Oder« (XOR), dessen Wahrheitswert nur dann »1« ist, wenn eine ungerade Anzahl von Eingängen den Wert »1« hat, während die anderen den Wert »0« haben. Damit verbunden waren andere für das Perceptron nicht lösbare Probleme, so dass Minsky und

Das Perceptron Mark I, 1958 mit Charles Wightman, dem Ingenieur, Mitarbeiter von Frank Rosenblatt und Konstrukteur dieses Apparates.

Papert die Unbrauchbarkeit jeglicher künstlichen neuronalen Netzwerke, die dem Perceptron ähneln, als die Konsequenz ihrer Analyse ausgaben.

In dieser Allgemeinheit war dies falsch. Zwar stimmt, dass Perceptrons, wenn sie nur aus einer Neuronenschicht bestehen, nur linear klassifizieren können, doch konstruiert man ein künstliches neuronales Netz mit mehr als einer Neuronenschicht, dann ist dieses auch zu nichtlinearen und komplexeren Klassifikationen in der Lage.

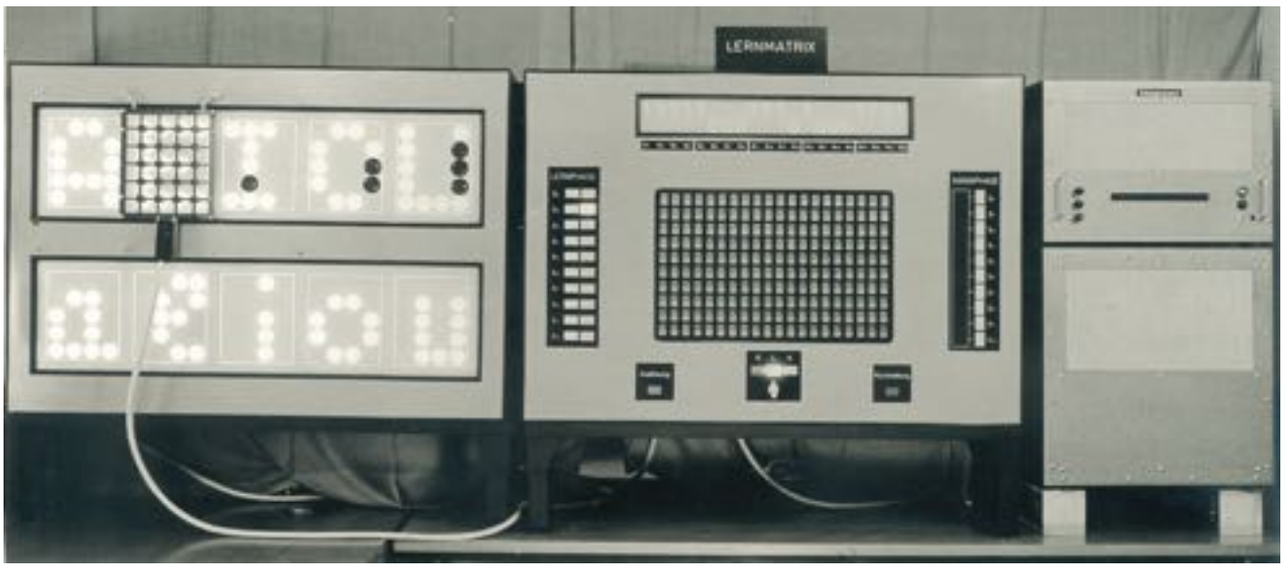
Die Veröffentlichung des Buchs von Minsky und Papert brachte allerdings fast die gesamte Forschung zu künstlichen neuronalen Netzwerken zum Erliegen, da sie nun als eine Sackgasse innerhalb der Forschung zur Künstlichen Intelligenz angesehen wurde. Gut anderthalb Jahrzehnte flossen die finanziellen Mittel an diesen Projekten vorbei in andere Forschungen zur Künstlichen Intelligenz.

Die Renaissance der künstlichen neuronalen Netze

Eine Renaissance der Forschungen an künstlichen neuronalen Netzwerken setzte in den 1980er Jahren ein, als man mehrschichtige Perceptrons (Multilayer-Perceptron: MLP) untersuchte. Diese bestehen aus mehreren einschichtigen Perceptrons, die miteinander verschaltet werden. Die Perceptrons innerhalb einer jeden Schicht haben zwar keinerlei Verbindung miteinander, sie sind aber jeweils mit jedem Perceptron der vorwärts gerichteten Schicht verschaltet.

Inzwischen hatte sich für die gewünschte Minimierung des Fehlers in der Lernregel eine Funktion durchgesetzt, bei der der Fehler E berechnet wird, indem die Summe für alle n Neuronen der quadrierten Differenzen zwischen dem jeweiligen Soll-Output-Wert ti (target) und dem errechneten Ist-Output-Wert oi (output) gebildet wird. Mit einem Faktor ½, der aus Gründen der Vereinfachung weiterer Berechnungen dazu kommt, schreibt sich diese Fehlerfunktion so (wobei die Summe für alle $i = 1, \ldots n$ gilt): $E = \frac{1}{2} \sum (t_i - o_i)^2$.

Abbildungen: Zeichnungen Seising (2); Cornell University, Faculty of Psychology, Biographical File



Lernmatrix von Karl Steinbuch.

Dass sich wieder mehr Forscher mit künstlichen neuronalen Netzen beschäftigten, hat seinen Grund nicht zuletzt darin, dass sich ein neuer Algorithmus als geeignet für die Konstruktion eines Lernverfahrens in mehrschichtigen Perceptrons erwies. Nach der ursprünglichen Perceptron-Lernregel war nach jedem Schritt auszurechnen, wie die Gewichtungen neu angepasst werden müssen, damit Ist- und Sollwert ähnlicher werden. Eine neue Idee war es, den Fehler schrittweise durch alle Schichten des Netzes zurückzuverfolgen und in jeder dieser Schichten die Gewichtungswerte zu verbessern. Dieses »Backpropagation« genannte Fehlerrückführungsverfahren wurde schon 1969 von Arthur Earl Bryson (* 1925) und Yu-Chi Ho (* 1934) als Spezialfall eines Regelungsverfahrens eingeführt. Ebenso wie die davon unabhängige Entwicklung des Verfahrens durch den Mathematiker Paul John Werbos (* 1947) in dessen Dissertation an der Harvard-Universität im Jahre 1974, blieb sie aber weitgehend folgenlos. Weitere unabhängige Entwicklungen dieses Verfahrens erfolgten im Jahre 1985 durch David B. Parker sowie durch den französischen Informatiker Yann LeCun (* 1960), der in seiner Dissertation eine frühe Form von Backpropagation sogar schon für künstliche neuronale Netzwerke eingeführt hatte.

Bei diesem algorithmischen Verfahren werden die Gewichte der einzelnen Perceptrons anfangs mit zufälligen Werten initialisiert. Während des Lernvorgangs werden die auf bestimmte Input-Werte sich einstellenden Output-Werte erzeugt. Diese werden mit einem Signal verglichen, das dem gewünschten Wert entspricht. Die Differenz des Output-Werts zu diesem Sollwert wird dann in Form der Fehlerfunktion rückwärts durch die einzelnen Schichten propagiert, so dass die Gewichte der einzelnen Perceptrons entsprechend verändert werden können. Dieser Teil der Fehlerrückführung im Netz gibt dem Lernverfahren seinen Namen. Der Algorithmus wird so oft durchlaufen, bis die Differenz von Output-Wert und Sollwert kleiner als ein zuvor bestimmter Toleranzwert ist. Das können leicht viele Hunderte Durchläufe sein.

Populär wurden der Backpropagation-Algorithmus und das Verfahren aber erst, als die Psychologen David Everett Rumelhart (1942–2011) und James Lloyd McClelland (* 1948) in den 1980er Jahren Computerprogramme zur Simulation von Objektwahrnehmungen in neuronalen Netzen schrieben. Mit ihrer Forschungsgruppe gaben sie das Buch *Parallel Distributed Processing* heraus, in dem sie den Beitrag *Learning internal representations by error propagation* publizierten. Im gleichen Jahr erschien auch ihr Artikel dazu in der Zeitschrift *Nature*.

Das Backpropagation-Verfahren öffnete die Tür für die erfolgreichen Entwicklungen, die mit den künstlichen neuronalen Netzen das heutige Forschungsfeld der Künstlichen Intelligenz dominieren.

Zum Weiterlesen

Rudolf Seising, *Es denkt nicht. Die vergessenen Geschichten der KI,* Frankfurt 2021 (Dieses Buch ist käuflich zu erwerben nur in den Buchhandlungen der Büchergilde Gutenberg siehe: www.buechergilde.de/buchhandlungen.html sowie für Mitglieder der Büchergilde auch über den Online-Shop).

Norbert Wiener, *Kybernetik. Regelung und Nachrichtenübertragung im Lebewesen und in der Maschine.* Mit Ergänzung von 1961 zu lernenden und sich selbst reproduzierenden Maschinen. Zweite, revidierte und ergänzte Auflage, Düsseldorf 1963.

Raul Rojas, *Theorie der neuronalen Netze,* Berlin/Heidelberg 1993.

Dr. Rudolf Seising
ist Wissenschaftshistoriker und -philosoph. Zurzeit leitet er im Forschungsinstitut des Deutschen Museums das BMBF-Projekt »IGGI: Ingenieur-Geist und Geistes-Ingenieure – eine Geschichte der Künstlichen Intelligenz in der Bundesrepublik Deutschland«.

Abbildungen: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Degussa
GOLD UND SILBER.

WO FINDE ICH DEN RICHTIGEN ANSPRECHPARTNER RUND UM DAS THEMA EDELMETALLE?

Kunden sollten sich nur an seriöse Goldhändler mit ausgewiesener Expertise und umfassenden Service wenden, wie z. B. die Degussa Goldhandel. Gerade im letzten Jahr haben viele Deutsche ihre Goldbestände aufgestockt. Goldbarren sind bei der Degussa in allen gängigen Gewichtsgrößen – von Ein-Gramm bis Ein-Kilogramm – im Sortiment vorhanden und besitzen durchweg die höchstmögliche Feinheit von 999,9/1000. Münzen werden bei der Degussa ebenfalls in verschiedenen Gewichtsgrößen angeboten. Diese reichen von Ein-Zehntel Unze bis Ein-Unze bei Anlagemünzen. Etablierte Gold- und Silbermünzen sind beispielsweise der südafrikanische Krügerrand oder der Australian Kangaroo.

ALTGOLDANKAUF BEI DEGUSSA – AUCH OHNE TERMIN MÖGLICH

Gleichzeitig haben aber auch bei den hohen Goldpreisen viele ihr Altgold verkauft. Zdenek Holly, Niederlassungsleiter in München der Degussa Goldhandel, Europas größtem bankenunabhängigen Edelmetallhändler, kann dies bestätigen. Zdenek Holly rät: „Nicht genutzter Schmuck, alte Barren, Münzen oder Dentalgold geraten Zuhause oft in Vergessenheit. Dabei können Besitzer ihre Stücke in unserer Niederlassung zu barem Geld machen oder direkt in hochwertige Anlagebarren oder Münzen aus Gold und Co. investieren.“

Beim Thema Altgoldankauf legt die Degussa besonders viel Wert auf Transparenz und exakte Preisbildung. Hier beraten und prüfen unsere Edelmetallexperten mit modernsten Prüfgeräten die Schätze ihrer Kunden. So kann der exakte Wert für den Kunden ermittelt werden, z. B. auch bei Edelmetalllegierungen, wie sie bei Schmuckstücken vorkommen. Die Preisberechnung erfolgt immer nach dem tagesaktuellen Kurs des jeweiligen Edelmetalls. Und das Beste: Für den An- und Verkauf von Edelmetallen benötigt man keinen Termin. Einfach vorbeischauen und von unseren Degussa Experten beraten lassen.

Zdenek Holly – Degussa Niederlassungsleiter München

SICHERE VERWAHRUNG FÜR IHRE WERTGEGENSTÄNDE

Degussa Goldhandel kümmert sich anschließend auch um die Sicherheit Ihrer Edelmetalle und bietet eine Schließfachlagerung als besonderen Service mit an. Bei der Degussa erfüllen die Tresorfächer höchste Sicherheitsstandards, der Inhalt ist versichert und die Versicherungssumme kann bequem an die individuellen Wünsche der Kunden angepasst werden. Selbstverständlich garantiert die Degussa Diskretion und Zugang zu den Schließfächern jederzeit zu den Öffnungszeiten der Niederlassung. „Damit können wir den Kunden ein stimmiges Komplett-Paket bieten und sie müssen sich um Ihre Goldstücke und andere Wertgegenstände keine Sorgen mehr machen“, so Holly.

Degussa
GOLD UND SILBER.

IHR PARTNER IN MÜNCHEN FÜR:

- Verkauf von Edelmetallen
- Ankauf von Schmuck und Edelmetallen
- Verwahrung von Wertgegenständen in Ihrem Schließfach
- Private Wealth

Die systematische Überwachung des Nachthimmels zur fotografischen Erfassung von Feuerkugeln und die Meteoritenortung haben in Deutschland eine lange Tradition. Das wissenschaftliche Projekt Feuerkugelnetz leistet seit über 55 Jahren einen wichtigen Beitrag zur astronomischen Grundlagenforschung.

Von Dieter Heinlein

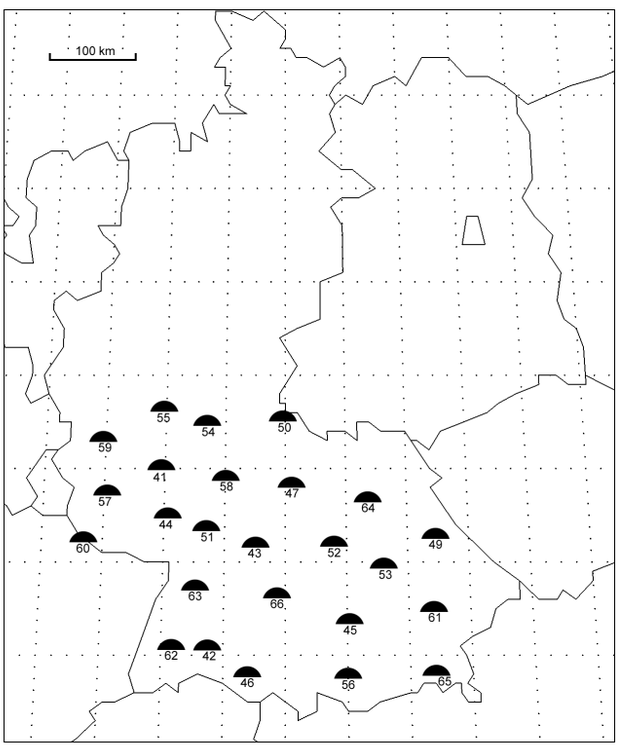
Meteore im Visier

Am 10. Juli 2018 ging im badenwürttembergischen Renchen ein kleiner Schauer von Steinen nieder. Sechs Fragmente mit einer Gesamtmasse von 1227 g wurden aufgefunden. Abgebildet ist das 955 g schwere Hauptstück in der original Fundposition (in situ) neben dem Einschlagsloch.

Egal ob man das Phänomen als Sternschnuppe, Meteor, Feuerkugel oder Bolide bezeichnet, im Prinzip beschreibt man damit immer eine Himmelserscheinung, die zu beobachten ist, wenn ein mehr oder weniger großes Stück interplanetare Materie, ein sogenannter Meteoroid, mit hoher Geschwindigkeit in die Erdatmosphäre eindringt und dort aufleuchtet (oder, korrekt gesagt, die umgebende Luft zum Leuchten anregt). Unsere Erde steht unter einem ständigen Beschuss durch Überreste von Kometen und Bruchstücken von Asteroiden, deren Größe von mikroskopischem Staub bis hin zu tonnenschweren Brocken reicht. Nahezu alle kosmischen Körper werden durch die irdische Lufthülle aufgerieben, nur äußerst selten gelangen Restmassen, die dann als Meteorite bezeichnet werden, bis zur Erdoberfläche.

Die Geschichte des Feuerkugelnetzes

Erklärtes Ziel des Feuerkugelnetzes ist es, die Häufigkeit und Beschaffenheit der auf die Erde einfallenden Meteoroide über einen langen Zeitraum hinweg zu untersuchen und genau zu dokumentieren. In enger Zusammenarbeit mit Fachforschen-



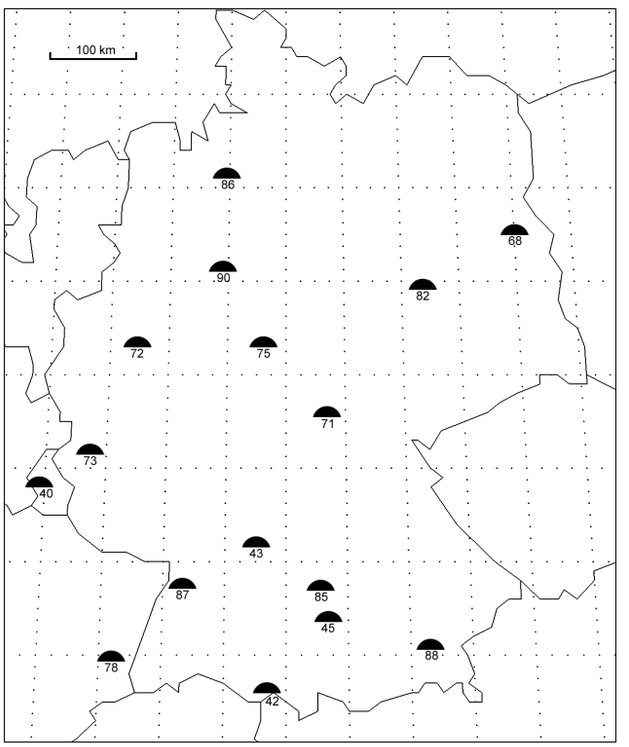


Bild links: Standorte der 25 Meteoritenortungsstationen, die vom Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg von 1966 bis 1968 installiert und bis 1988 betrieben wurden.

Bild rechts: Nach der Umstrukturierung betrieb das DLR-Institut für Planetenforschung, Berlin die All-Sky-Kameras des Feuerkugelnetzes. Im Jahr 2016 waren 16 Stationen aktiv.

den am tschechischen Observatorium Ondřejov werden Simultanaufnahmen interessanter Feuerkugeln präzise vermessen und ausgewertet, um die atmosphärischen und heliozentrischen Meteoroid-Bahnen (Trajektorien) sowie eventuelle Aufschlagstellen von Meteoriten auf der Erde zu berechnen.

Vom Sommer 1966 bis Ende 1968 installierte das Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK) in Heidelberg ein Netzwerk von 25 Kamerastationen zur Meteorfotografie im Süden der Bundesrepublik Deutschland an Standorten mit sehr guter Horizontsicht und möglichst wenig Streulicht. Das MPIK war damals führend in der Meteoritenforschung und besonders an der Analyse von frisch gefallenen Meteoriten mit präzisen Daten ihrer heliozentrischen Bahnen interessiert. Ab 1988 wurde das Netzwerk umstrukturiert und die vorhandenen Stationen auf ganz Deutschland und die Nachbarstaaten Österreich, Belgien, Schweiz, Kroatien, Luxemburg und Frankreich verteilt. In der Praxis hatte sich nämlich gezeigt, dass die Meteorkameras durchaus auch mit größeren Abständen sinnvoll betrieben werden können. Seit 1995 liegt die wissenschaftliche Leitung des Feuerkugelnetzes beim Institut für Planetenforschung des DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) und der Technischen Universität Berlin, mit finanzieller Unterstützung durch die Europäische Weltraumorganisation ESA.

Aufbau und Funktionsweise

Kernstück der halbautomatischen Überwachungsstationen ist ein Parabolspiegel mit 36 cm Basisdurchmesser und einer Scheitelpunkthöhe von 8 cm. Dieser Spiegelkörper ist mit einer hoch reflektierenden Metallschicht bedampft. Man verwendet dazu das Edelmetall Rhodium, welches besonders widerstandsfähig gegen Witterungseinflüsse ist. Dies ist sehr wichtig, da die Meteorkameras dauerhaft unter freiem Himmel stehen. Der Parabolspiegel wird temperiert, um Taubeschlag auf dem Spiegel zu vermeiden und Regentropfen rasch verdampfen zu lassen.

Über dem waagrecht nivellierten Parabolspiegel befindet sich ein kleiner Kasten mit einer 24x36 mm² Kleinbildkamera, welche über ein Leitz Summicron 1:2 / 50 mm Objektiv den Spiegel abfotografiert und somit den gesamten Himmel über dem Beobachtungsort auf einer einzigen Aufnahme abbildet. Diese All-Sky-Fotos werden durch eine rotierende Sektorblende unterbrochen, damit die Aufleuchtdauer und die Geschwindigkeit der Meteoroide präzise gemessen werden kann. Dazu benutzt man einen Synchronmotor, der mit 6,25 Umdrehungen pro Sekunde eine zweiflügelige Sektorblende bewegt. Dieser »shutter« deckt das Objektiv 12,5 mal pro Sekunde ab: Somit erscheinen die Spuren schnell bewegter Leuchtobjekte, wie Meteore, in kurze Segmente zerteilt, während sich Sterne und Planeten auf Grund ihrer sehr langsamen scheinbaren Bewegung am Himmel als kontinuierliche Strichspuren abzeichnen.

Nach einem vom Leiter des Feuerkugelnetzes vorgegebenen Einsatzplan programmiert der Stationsbetreuer tagsüber eine DCF77-synchronisierte Digitalschaltuhr. Durch diese wird das

Abbildungen: Ralph Sporn/Martin Neuhofer; Dieter Heinlein

Bild links: Auf einem Dreibeinstativ wurde im September 2008 die Meteorkamera 42 Neukirch-Oberlangensee aufgebaut.

Bild oben: Über einen mit dem Edelmetall Rhodium bedampften Parabolspiegel von 36 cm Durchmesser und 8 cm Scheitelhöhe wird der Sternenhimmel über dem Standort abgebildet.

nächtliche Belichtungsintervall ausgelöst. Am nächsten Morgen muss lediglich der Film in der Kamera manuell weitertransportiert werden. Am Ende des Monats werden die belichteten Filme aller Meteoritenortungsstationen an Mitarbeiter des Projekts gesandt, wo sie zentral entwickelt und die Aufnahmen wissenschaftlich ausgewertet werden.

Bereits seit 1966 und bis heute sind mechanische Leica MD Registrierkameras im Einsatz, die sich aufgrund ihrer Robustheit unter extremen Witterungsbedingungen und Zuverlässigkeit im Dauereinsatz als ideal erwiesen haben. An entlegenen Stellplätzen werden mechanische Winderkameras vom Typ Konica Hexar RF eingesetzt um den ehrenamtlichen Betreuern das tägliche Spannen des Films zu ersparen.

Belichtet werden panchromatische Negativfilme mittlerer Empfindlichkeit (Ilford FP4 Plus, ISO 125). Pro Nacht wird von jeder Station nur eine einzige Aufnahme (Dauerbelichtung!) gemacht. Die Schaltintervalle hängen wesentlich von Standort, Jahreszeit und Mondphase ab.

Schaltschema der Belichtungszeiten

Zur Berechnung der Belichtungszeiten der Meteoritenortungskameras gibt es eine präzise Vorschrift, um die Überbelichtung der nächtlichen Aufnahme zu vermeiden und ein wissenschaftlich verwertbares Foto zu gewährleisten: Für die geografischen Koordinaten jeder Station werden zunächst die präzisen Zeiten der nautischen Dämmerung (d. h. wenn sich die Sonne 12° unter dem Horizont befindet) bestimmt.

Wenn das Mondlicht zu stören droht, wird es so gut wie möglich »ausgeblendet«. Etwas darf der Mond aber schon noch über dem Horizont stehen: bei Vollmond 30 Minuten, ansonsten 90 Minuten. Während der Vollmondphase, falls der Mond nicht mehr ausgeblendet werden kann, findet standardmäßig eine dreistündige Belichtung am Abend statt. Denn abends ist ein Meteoritenfall wegen der geringeren Relativgeschwindigkeiten der die Erde überholenden Meteoroide wahrscheinlicher als morgens, wenn die Erde frontal getroffen wird.

Auswertung von Simultanaufnahmen

Wird eine Feuerkugel von mehreren Kamerastationen aufgezeichnet, dann kann man aus der Kombination der Aufnahmen von verschiedenen Standorten die exakte Meteorspur durch die Erdatmosphäre kalkulieren. Kennt man auch noch die Aufleuchtzeit der Feuerkugel (durch Radiometer bzw. aus Augenzeugenbeobachtungen), so lässt sich auch die heliozentrische Bahn berechnen, auf welcher der kosmische Körper um die Sonne zog, bevor er zufällig mit der Erde zusammenstieß. Entgegen der landläufigen Meinung werden die Meteoroide nämlich nicht von der Erde (wie von einem Staubsauger) angezogen, sondern es handelt sich um einen rein zufälligen Zusammenstoß, sozusagen um einen »planetaren Verkehrsunfall«.

Über die Leuchtkurve der Meteore und ihr Abbremsverhalten in verschiedenen Höhen können sogar die Masse und die Dichte der auf die Erde einstürzenden Materie ermittelt werden. Ein sehr interessantes Ergebnis der Langzeitstudie

All-Sky-Bild der Meteorkamera 43 Öhringen vom 23./24. November 1970. Während der Belichtung von 18:00 bis 06:00 MEZ ging im Südosten der Mond auf. Die 7,2 Sekunden lange Feuerkugel um 02:47 MEZ bewegte sich von Südost in Richtung Südsüdost.

Am 7./8. August 2016 registrierte das Ortungsgerät 73 Neroth im Intervall 21:45 bis 03:45 MEZ im Nordosten einen 3 Sekunden lang aufleuchtenden Meteor um 01:28:44 MEZ.

Feuerkugelnetz ist, dass nicht etwa ein kontinuierliches Spektrum von Materialien in die Erdatmosphäre gelangt, sondern nur ganz diskrete Gruppen. Einerseits gibt es eine Vielzahl von Meteoren, die von Kometenfragmenten erzeugt werden und eine stoffliche Dichte von 0,2 bis 0,6 g/cm³ aufweisen: Niemals erreichen Reste dieser Körper den Erdboden, selbst wenn die eintretenden Massen im Tonnenbereich liegen, da dieses höchst fragile Kometenmaterial vollständig in der Erdatmosphäre aufgerieben wird. Ganz anders verhält es sich mit Bruchstücken von Kleinplaneten (Asteroiden), die eine Dichte von mehreren g/cm³ aufweisen. Hier konnten drei Meteoroid-Gruppen nachgewiesen werden, die sehr gut mit den Meteoriten in Museen und Fachlabors übereinstimmen, nämlich den gewöhnlichen Stein- und Eisenmeteoriten (mit Dichten von 3,6 bzw. 7,8 g/cm³) und die kohligen Chondrite (Dichte 2,1 g/cm³). Solche kosmischen Geschosse aus Asteroidengestein haben genügend Materialstärke und Festigkeit, so dass es bereits ab Anfangsmassen im Zentnerbereich zu einem Meteoritenfall kommen kann.

Aufklärung ist dringend nötig

Die wissenschaftliche Beschäftigung mit dem Thema Feuerkugeln und die Erforschung der Physik von Meteoritenfällen sind überaus spannend und lehrreich. Dadurch können einige bei vielen Bürgern weit verbreitete Irrtümer und Fehleinschätzungen korrigiert werden, mit denen der Autor bei Vorträgen, Augenzeugenbefragungen sowie in Zeitungs- und Fernsehberichten immer wieder konfrontiert wurde.

Nahezu alle zufälligen Beobachter von Feuerkugeln erliegen der optischen Täuschung, ein Meteor habe sich »gleich hinter dem nächsten Haus oder Baum« befunden und sei auch in unmittelbarer Nähe zu Boden gestürzt. Die hohe Leuchtkraft und die immens große Geschwindigkeit suggerieren eben räumliche Nähe. Aber bereits mit einfachsten Mitteln der Trigonometrie lässt sich nachrechnen, dass Feuerkugeln in 100 bis 20 km Höhe aufleuchten und somit von den meisten Beobachtern bis zu mehreren hundert Kilometern entfernt sind.

Die Untersuchung des atmosphärischen Fluges von Meteoritenfällen mit Restmasse zeigte z. B., dass Meteoroide zwar einen Großteil ihrer Masse bei dem wenige Sekunden dauernden Leuchtflug verlieren, jedoch im Inneren kühl bleiben. Wenn sie dann nach etlichen Minuten Dunkelflug den Erdboden erreichen, sind die Körper bestenfalls warm. Es ist daher Unsinn, wenn in manchen Medien behauptet wird, dass niedergefallene Meteorite im Kilogrammbereich angeblich Brände verursachen könnten.

Empfindlichkeit und Ausbeute

Mit dem optischen System All-Sky-Spiegel (effektive Brennweite: 7 mm) und dem verwendeten Filmmaterial lassen sich Meteore erst ab etwa der Größenklasse bis -4 mag erfassen (»mag«, englisch »magnitude« gibt die scheinbare Helligkeit eines Himmelskörpers an). Das liegt vor allem daran, dass sich die Meteoroide in der Leuchtphase ihres Flugs mit extrem hoher Relativgeschwindigkeit zur Erde (größenordnungsmäßig ca. 20 bis 72 km/s, bzw. 72 000 bis 260 000 km/h) bewegen.

Die Konzentration auf diese helleren Meteore, die ab -4 mag Feuerkugeln genannt werden, ist aber durchaus erwünscht. Denn in diesem Projekt geht es ja vorwiegend um die Analyse von handfesten Meteoroiden im Bereich von einigen Kilogramm oder Tonnen und nicht um Sternschnuppen. In den letzten 32 Jahren (für die ein lückenloses Archiv von Feuerkugel-Negativen vorliegt) wurden von den DLR-Ortungskameras

Abbildungen: Dieter Heinlein; Deutsches Feuerkugelnetz

Die drei Fundstücke des Steinmeteoriten Neuschwanstein, die am 6. April 2002 über dem alpinen Grenzgebiet in Bayern (oben: 1750 g und 1625 g) und Tirol (unten: 2843 g) niedergingen.

pro Jahr durchschnittlich 40 helle Meteore auf jeweils 79 Aufnahmen aufgenommen. Aufgrund von Wettereinflüssen und dem Umstand, dass in manchen Jahren die Perioden von Meteorstrom-Maxima wegen Mondlichts ausgeblendet wurden, variierte die jährliche Ausbeute zwischen 17 und 82 Feuerkugeln (auf 36 bis 209 Aufnahmen).

Geduld und Ausdauer werden belohnt

Von den über 2000 Meteoroiden, die im Bereich des Deutschen Feuerkugelnetzes fotografisch erfasst wurden, sind die allermeisten in der Erdatmosphäre aufgerieben worden. Nur in etwa zwei Dutzend Fällen konnte der Niedergang einer Restmasse berechnet und ein Streufeld von Meteoriten vorhergesagt werden. Das tatsächliche Auffinden dieser gefallenen Meteorite glückte jedoch lange Zeit nicht. Zumeist weil die Restmasse zu gering oder das Suchgebiet ungünstig war. Erst im Jahr 2002 gelang dem DLR-Feuerkugelnetz der krönende, wahrhaft sensationelle Erfolg, nämlich der Meteoritenfall »Neuschwanstein«! Am 6. April 2002 um 22:20 MESZ wurde von zehn Kamerastationen des Netzwerks der Fall eines Meteoriten in den Füssener Alpen registriert. Durch Auswertung aller Aufnahmen (durch unseren tschechischen Kollegen Dr. Pavel Spurný) konnte das Aufschlagsgebiet genau ermittelt werden. Nach intensiver Suche wurde am 14. Juli 2002 im vorausberechneten Areal tatsächlich ein 1,75 kg schwerer Steinmeteorit gefunden, der den Namen Neuschwanstein trägt, da er in unmittelbarer Nähe des berühmten bayerischen Königsschlosses niederging. Im Sommer 2003 wurden zwei weitere Fragmente entdeckt. Insgesamt konnten 6,22 kg Material eines sehr seltenen und wissenschaftlich hoch interessanten Enstatit-Chondriten des Typs EL6 geborgen und analysiert werden.

In enger Kooperation mit Fachkollegen am Observatorium Ondrejov konnten auf deutschem Staatsgebiet zwei weitere Meteoritenfälle mit Funderfolg registriert werden. So wurden nach dem Fall von »Stubenberg« in Niederbayern am 6. März 2016, dank engagierter Sucher, sechs Steinmeteorite von insgesamt 1473 g des Chondriten-Typs LL6 lokalisiert. Den jüngsten Erfolg des Projekts stellt der Meteorit »Renchen« dar, der erste Meteoritenfall im Bundesland Baden-Württemberg überhaupt. Dort ging am 10. Juli 2018 ein kleiner Schauer von Steinmeteoriten nieder, von denen sechs Fragmente eines L5-6 Chondriten mit einer Gesamtmasse von 1227 g aufgefunden wurden.

Übergang zum Netzwerk mit digitalen Registriergeräten

Das Netzwerk der DLR–Spiegelkameras stellt im Sommer 2022 den koordinierten Betrieb ein. Nach 55 Jahren im Dauereinsatz haben die mit Analogfilm betriebenen Ortungsgeräte bis zuletzt zuverlässig funktioniert und gute Ergebnisse geliefert. Als Musterbeispiel deutscher Wissenschaftsgeschichte wird die Ortungskamera 43 Öhringen als Exponat in die Abteilung Astronomie des Deutschen Museum in München integriert. Die Betreiber der anderen derzeit aktiven Kameras haben sich bereit erklärt, ihre Stationen am Standort privat weiter zu nutzen.

Der Apollo-16-Astronaut Charles Duke freute sich, als er 2019 im Deutschen Museum die Hauptmasse des Stubenberg-Meteoriten von 1320 g in Händen halten konnte.

Erfreulicherweise gibt es inzwischen ein Folgeprojekt zur Registrierung von Meteoren mit Stationen in Deutschland und einigen angrenzenden Ländern in Form des digitalen Allsky7-Kameranetzwerks, welches ein gutes Potenzial besitzt, unser klassisches Feuerkugelnetz mit moderner Technik abzulösen. Dabei wird der gesamte Himmel mit sieben Videokameras abgedeckt, mit dem immensen Vorteil, dass diese Registriergeräte rund um die Uhr, in jeder Mondphase und sowohl bei Nacht als auch bei Tag im Einsatz sind.

Zum Weiterlesen

Beiträge von Dieter Heinlein

Die Feuerkugel vom 6. April 2002 und der sensationelle Meteoritenfall »Neuschwanstein«, 7. Auflage, 2013, S. 1–44.

Stubenberg, Der Meteoritenfall am 6. März 2016 in Niederbayern, 3. Auflage, 2019, S. 1–32.

Der Meteoritenfall Renchen, Baden-Württemberg am 10. Juli 2018, 2. Auflage, 2020, S. 1–44.

Weiterführende Links

www.dlr.de/feuerkugelnetz
www.allsky7.net

Dieter Heinlein
betreut das Deutsche Feuerkugelnetz und ist Meteoritenspezialist des DLR. Seit über vier Jahrzehnten ist er Mitglied der Forschervereinigung »Meteoritical Society«.

Abbildungen: Dieter Heinlein; Oliver Sachs

Anzeige

RADSPIELER

Seit 1841

Radspieler – damit Einrichten Freude macht!

F. Radspieler & Comp. Nachf.
Hackenstraße 7
80331 München
Telefon 089/235098-0
Fax 089/264217
www.radspieler.com

CQ de Delta Lima Null Delta Mike

Fast täglich starten ehrenamtliche Mitglieder der Amateurfunkgruppe des Deutschen Museums mit der Kennung »CQ de Delta ...« den »allgemeinen Anruf« und zeigen damit ihren Wunsch an, mit anderen Funkamateuren in Verbindung zu treten. In der Amateurfunk-Klubstation DLØDM des Deutschen Museums können Besucherinnen und Besucher die Kommunikation über unterschiedliche Funkkanäle und Betriebsarten live mitverfolgen. **Von Luise Allendorf-Hoefer**

Amateurfunk ist ein international anerkannter Funkdienst an dem weltweit etwa 2,5 Millionen Menschen teilnehmen. In Deutschland gibt es etwa 63 000 Funkamateure und Funkamateurinnen, etwa die Hälfte ist Mitglied im größten deutschen Amateurfunkverband, dem Deutschen Amateur-Radio-Club e.V. (DARC).

Das bereits vor etlichen Jahren aufgenommene Foto zeigt einen Funkamateur beim Funkbetrieb in der alten Klubstation des Deutschen Museums.

Der erste Amateurfunkbetrieb am Deutschen Museum fand bereits 1938 mit einem selbstgebauten 100 W-Sender in der damaligen Abteilung Physik statt. Nach dem Amateurfunkverbot während des Zweiten Weltkriegs war der Sender mit der Inventarnummer 68789 bis Ende der 1950er Jahre in Betrieb. Als Kurzwellensender war er das für das 80-m bis 10-m Band ausgelegt (entsprechend dem Frequenzbereich von 3,5 MHz bis 29,7 MHz) und wurde in der Betriebsart Morsetelegrafie (CW) verwendet.

Die ständige Ausstellung Amateurfunk sowie ein täglicher Sendebetrieb aus der Klubstation DLØDM besteht seit Dezember 1989. Der Förderverein Amateurfunkmuseum e.V. (AFM) und der Deutsche Amateur-Radio-Club e.V. (DARC) haben wesentlich zum Aufbau und zum ständigen Betrieb beigetragen. Heute und demnächst in der künftigen Dauerausstellung Elektronik, die im Sommer 2022 eröffnet wird, führen etwa 20 Funkamateure des Distrikts Oberbayern des Deutschen Amateur-Radio-Clubs e.V. (DARC) als Experten durch den Ausstellungsteil Amateurfunk. Als bedeutendes Vermittlungselement bietet dabei der Live-Funkbetrieb der Station unseren Besuchern einen spannenden Eindruck rund um Phänomene und Funktionen der Funktechnik. Via Morsetelegrafie oder Sprechfunk werden Funkverbindungen, sogenannte QSOs »gefahren«. Den Gepflogenheiten des Amateurfunks folgend versenden die FunkamateureQSL-(Post-)Karten, um dem Funkpartner eine getätigte Funkverbindung zu bestätigen. Für viele ein begehrtes Sammelobjekt.

Die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen und ihre Reflexion an der Ionosphäre macht weltweiten Funkverkehr im Kurzwellenbereich erst möglich. Zum Senden und Empfangen dieser Wellen sind Antennen notwendig, die die Sendeenergie – mit mehr oder weniger gutem Wirkungsgrad – in Strahlung und die Strahlung in Empfangsenergie umwandeln.

In der Klubstation DLØDM sind zwei Funkgeräte (Transceiver), jeweils für Kurzwellen (KW)- und für Ultrakurzwellen (UKW)-Bänder im Einsatz. Für den UKW-Funkbetrieb bedient man sich einer Vertikalantenne. Die Kurzwellenantenne ist horizontal in luftiger Höhe zwischen Museumsturm und Planetarium über eine Länge von etwa hundert Meter verspannt. Als Dipolantenne nach dem Windom-Prinzip arbeitet sie auf den Kurzwellenbändern 80 m bis 10 m.

Für die Funkausbreitung ist die Antenne ein ganz wesentliches Element, weswegen Funkamateure in der Lage sind, Antennen selbst zu konzipieren, im Eigenbau zu errichten, abzustimmen und zu vermessen. Dabei sind sie verpflichtet, die gesetzlichen EMV-Grenzwerte (elektromagnetische Verträglichkeit) zu berücksichtigen und sind insbesondere für die Einhaltung der maximal zulässigen Feldstärke hinsichtlich des Personenschutzes verantwortlich und dokumentationspflichtig. Für die Klubstation wird

ein entsprechender Standortnachweis gegenüber der Bundesnetzagentur als Aufsichtsbehörde geführt.

Elektromagnetische Wellen – vom Funken zum Funk

Aus der modernen Welt sind Anwendungen des Mobilfunks und diverser Funkdienste nicht mehr wegzudenken. Das Alltagsleben der Menschen wird heute nahezu flächendeckend von Anwendungen bestimmt, die auf diese Technologien zurückgreifen: Von der GPS-Navigation über die Mobiltelefonie bis hin zu den modernen Datendiensten, die in jüngerer Zeit durch Mobilfunknetze der vierten und fünften Generation (LTE und 5G) ermöglicht werden.

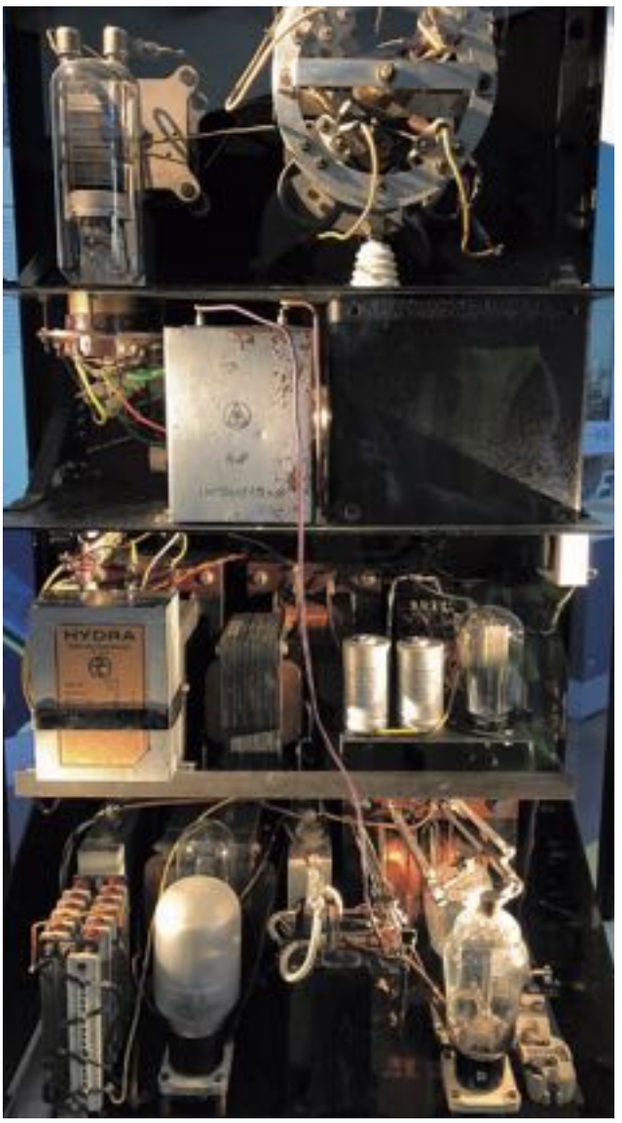
Alle diese Dienste, die rund um die Uhr milliardenfach verwendet werden und im Smartphone als modernem Universalwerkzeug gebündelt sind, basieren auf den Grundprinzipien der Funktechnik, die aus Heinrich Hertz' experimentellem Nachweis der elektromagnetischen Wellen und deren Beschreibung als »Strahlen elektrischer Kraft« in den 1880er Jahren hervorging. Er erzeugte elektromagnetische Wellen und wies deren Empfang mit Hilfe einer offenen Drahtschleife nach, zwischen deren Enden unter dem Einfluss wechselnder elektrischer Felder, Funken übersprangen. Dieses Phänomen gab dem ganzen Forschungsgebiet die Bezeichnung »Funkentelegrafie«, eine Bezeichnung, die später in »Funk« abgekürzt wurde und auch heute noch in den Worten »Rundfunk« und »Amateurfunk« weiterlebt.

Schon in der Anfangszeit der Funktechnik gab es naturwissenschaftlich interessierte Menschen, die sich mit der neuen Technik befassten, und ab etwa 1910 begannen Technikbegeisterte in den USA, in Kanada und England in größerer Zahl damit, Versuche mit der drahtlosen Nachrichtenübermittlung anzustellen. Durch den Wegfall der Drahtgebundenheit war die Funkübertragung weder an Staatsgrenzen noch an formale Infrastruktur wie Leitungswege gebunden und mit der Entwicklung von ungedämpften Sendern verbreitete sich die Funktelegrafie rasch auf der ganzen Welt. Die Notwendigkeit, Funkbereiche zu reglementieren und Sendelizenzen zu vergeben, ergab sich allein schon durch die Gefahr der gegenseitigen Störungen bei unkontrolliertem Funkverkehr, weswegen schon ab dem frühen 20. Jahrhundert national und international Betriebsvorschriften erlassen wurden. In den beiden Weltkriegen allerdings war jegliche private Funktätigkeit unter Strafe verboten.

Spielregeln für den Amateurfunk

Im Gegensatz zu den digitalen Netzen und Medien wie Internet, Mobilfunk und den Applikationen, die darüber meist verschlüsselt zur Verfügung gestellt werden, handelt es sich beim Amateurfunknetz um offene, unverschlüsselte Kommunikationskanäle. Dabei ist jeder Funkamateur beim Betrieb seiner Funkausrüstung selbst am dynamischen Aufbau und der Ausbreitung des Funknetzes beteiligt. Temporäre Kommunikationswege werden stets aufs Neue hergestellt ohne auf starre, vorgezeichnete Netzwerkstrukturen angewiesen zu sein. Somit liegt die »Netzhoheit« alleinig bei den Funkamateuren selbst.

Allerdings funktioniert dies nicht ohne Spielregeln, die international Gültigkeit besitzen und in den Radio Regulations (RR)



Innenleben des ersten Kurzwellen Amateurfunksenders am Deutschen Museum.

der Internationalen Fernmeldeunion (ITU), einer Unterorganisation der UN, verbindlich festgeschrieben sind. Per Definition dient der Amateurfunk einzig »der eigenen Ausbildung, für den Funkverkehr untereinander und [für] technische[n] Studien«. Auf internationaler Ebene ist die Begriffsbestimmung des Funkamateurs ganz ähnlich definiert: »Funkamateure sind ordnungsgemäß ermächtigte Personen, die sich mit der Funktechnik aus rein persönlicher Neigung und nicht aus geldlichem Interesse befassen.« Amateurfunk ist somit ein experimenteller Funkdienst, dem jegliche kommerzielle Nutzung untersagt ist.

Die Frequenznutzung, sozusagen die Einteilung des »Amateurfunk-Spielfelds«, wird auf internationaler Ebene verbindlich von der ITU in Zusammenarbeit mit der Internationalen Amateur Radio Union (IARU) als Dachverband festgelegt und nach geografischen und funktechnischen Gegebenheiten eingeteilt.

In Deutschland bilden das Amateurfunkgesetz (AFuG) nebst Verordnung (AFuV) die Rechtsgrundlage für den Amateurfunkdienst und regeln dabei die Voraussetzungen und die Teilnahmebedingungen. Sogenannte Bandpläne sind Bestandteil der

Abbildungen: Deutsches Museum

Die neue Klubstation DLØDM in der künftigen Ausstellung Elektronik ist ab Anfang Juli 2022 geöffnet.

AFuV aus denen die Nutzung bestimmter Frequenzbereiche für den Amateurfunk hervorgeht. Die »ordentliche Ermächtigung« zur Teilnahme am Amateurfunkdienst gemäß den Radio Regulations erteilt in Deutschland die Bundesnetzagentur. Für die Zulassung zum Amateurfunkdienst muss der angehende Funkamateur vor dem Prüfungsausschuss Sachkunde hinsichtlich der drei Schwerpunkte Funktechnik, Betriebstechnik und gesetzliche Vorschriften nachweisen. Nach bestandener Prüfung kann ein einmaliges persönliches Funkrufzeichen bei der Bundesnetzagentur beantragt werden. Damit erst erfolgt die eigentliche Zulassung zur Teilnahme am Amateurfunkdienst, sie wird auch als »Amateurfunklizenz« bezeichnet. Nur mit einer solchen Lizenz ist der Betrieb eines Senders bzw. einer Amateurfunkstelle unter Beachtung der rechtlichen Vorschriften gestattet. Damit ist auch die Genehmigung verbunden, selbstgebaute Sender oder auch modifizierte Seriengeräte betreiben zu dürfen – was per Zweckdefinition als experimenteller Funkdienst so angelegt ist und den besonderen Reiz für Technikinteressierte ausmacht. Für die Teilnahme am Amateurfunkdienst gibt es keine Altersbeschränkung. Der reine Empfang von Amateurfunksendungen und der Besitz von Amateurfunkgeräten ist in Deutschland allerdings jedermann gestattet.

»Ham Spirit« – der Ehrenkodex

Vor allem aber verstehen sich Funkamateure als Teil eines weltweiten Kontaktnetzwerks, das nach einem Ehrenkodex aus dem Jahr 1928, dem »Ham Spirit« aufrecht gehalten wird: »Funkamateure sollen sich auch international dem Geist der Weltoffenheit, Technikbegeisterung, Toleranz, Menschlichkeit und selbstlosen Hilfsbereitschaft widmen. Ziel und Zweck des Amateurfunkdienstes ist die Wissenschaft und Forschung, Bildung und Erziehung, Völkerverständigung, aber auch die Unterstützung der Behörden beim Aufbau von Nachrichtenverbindungen in Katastrophenfällen.«

Nach den Regeln des »Ham Spirit« agieren Funkamateure ungeachtet gesellschaftlicher Unterschiede wie Hautfarbe, Sprache, Religion oder politischer Gesinnung des Gesprächspartners. Es werden weder politische, religiöse, militärische noch kommerzielle Zwecke im Amateurfunkdienst verfolgt. Auf Höflichkeit im Umgang miteinander wird großen Wert gelegt. Der Begriff »Ham« steht im englischen Sprachgebrauch für den Funkamateur. Man vermutet, dass er auf die Initialen der Mitglieder der ersten drahtlosen Amateurradiostationen der Harvard University (USA) zurückgeht.

Technikpioniere und Experimentalfunk

Die spannendste Herausforderung im Amateurfunk liegt in der Auseinandersetzung mit der Funktechnik selbst. Technische Experimente sind die Domäne des Amateurfunks. Sendeanlagen für Kurzwelle (KW) und Ultrakurzwelle (UKW) dürfen selbst gebaut werden – ein Alleinstellungsmerkmal des Amateurfunks. Die zugewiesenen Frequenzbänder erstrecken sich im Kurzwellenbereich von 3,5 MHz bis 29,7 MHz und sind unterteilt in einzelne Segmente, in denen erlaubte Betriebsart, Sendeleistung oder auch Bandbreite festgelegt sind. Im Jargon der Funkamateure werden diese Segmente gemäß den ungefähren Wellenlängen dieser Frequenzen bezeichnet. Man spricht beispielsweise vom 80 m-Band was einer Frequenz von 3,75 MHz entspricht. Dies gilt sinngemäß auch für die höherfrequenten Bereiche. Auch der cm-Wellenbereich ab UHF (Ultra High Frequency) mit 430 MHz und der GHz-Bereich dürfen im Amateurfunk genutzt werden. Die technischen Anforderungen und Auslegungen der Sende- und Empfangstechnik hängen stark von den benutzten Frequenzen ab und bieten somit ein riesiges Betätigungsfeld, das es für den Funkamateur zu ergründen gilt. Der Bogen spannt sich auch über eine große Vielfalt an analogen und digitalen Übertragungsformaten und Modulationsverfahren bis hin zur Antennentechnik. Die Betriebsarten reichen von Morsetelegrafie, über Sprechfunk, Funkfernschreiben, Bild- und Videoübertragung, Software Defined Radio (SDR) und machen sich dabei auch Webanwendungen zu Nutze, die oft von Funkamateuren selbst programmiert werden.

Bieten die Ausbreitungsbedingungen der Kurzwelle die Möglichkeit, mit relativ einfacher Technik rund um die Welt zu funken, war und ist der Amateurfunk als experimenteller Funkdienst an so mancher Innovation beteiligt. Nachdem die NASA kurz zuvor die Zulassung erteilt hatte, eroberte der Amateurfunk 1983 während der Spacelab-1-Mission den Weltraum. Nur zwei Jahre später funkte der deutsche Astronaut Ernst Messerschmid während der ersten deutschen D1-Mission aus dem Space Shuttle. Gefolgt von

Ulrich Walter während der D2-Mission. Die Original-Funkgeräte dieser beiden Missionen sind in der neuen Amateurfunkausstellung zu sehen.

Viele prominente Astronauten sind auch Funkamateure. Von der ISS (Internationale Raumstation) grüßten in jüngster Zeit Alexander Gerst und Matthias Maurer, auf deren Einsatzplänen neben wissenschaftlichen Experimenten auch Amateurfunkverbindungen einen festen Platz einnahmen. Oft werden diese QSOs in Zusammenhang mit Schulprojekten gefahren. Dabei können Schüler und Schülerinnen binnen weniger Minuten – während des kurzen Überflugs mit »Sichtverbindung« zur ISS – mit den Astronauten sprechen. Mit Sicherheit sind dies ganz besonders eindrückliche Erfahrungen, die der Amateurfunk ermöglicht. Aber nicht nur der bemannte Weltraum wird für Amateurfunkverbindungen genutzt. Auch Amateurfunksatelliten werden als aktive Relaisstationen zur Reichweitenerhöhung eingesetzt. Selbst Erde–Mond–Erde (EME)-Verbindungen werden von erfahrenen Funkamateuren hergestellt, wobei der Mond als passiver Reflektor benutzt wird.

Mehr noch als die allgegenwärtigen Kommunikationsnetze ist der Kurzwellen-Amateurfunk stark von äußeren Einflüssen abhängig. Spielen doch geografische Lage, Wetter, Jahres- und Tageszeiten sowie Sonnenaktivität eine große Rolle bei der Ausbreitung von elektromagnetischen Funkwellen als Informationsträger zwischen Sende- und Empfangsstation. Der Funkamateur, der eine Fernverbindung (DX) aufbauen möchte, erkundigt sich daher nach dem Funkwetter aus dem sich Prognosen für die Qualität der Funkverbindung treffen lassen.

OM und YL

CQ, vy 73, OM, YL und viele andere Kürzel sind international schon seit den Anfängen des Amateurfunks in Morsetelegrafie gebräuchlich. Solche Abkürzungen dienen – wie bei anderen Funkdiensten auch – zur schnelleren Übertragung von Informationen und zur besseren Verständlichkeit. Sie sind nützlich sowohl bei schlechten Funkverbindungen als auch bei Fremdsprachenhindernissen. Die Abkürzungen OM und YL stehen als Anrede für den männlichen (OM: old man) und den weiblichen (YL: young lady) Funkamateur. Dagegen hat die gendergerechte Bezeichnung »Funkamateurin« in die Sprache des Amateurfunks keinen Einzug gehalten. Dafür identifizieren sich Funkamateure untereinander mit ihrem einmaligen persönlichen Rufzeichen, das stets mit dem Landeskenner-Buchstaben (D steht für Deutschland) beginnt. Der Beginn einer Funkverbindung mit dem Kürzel »CQ« ist auf die Englische Aussprache des »seek you = suche dich« zurückzuführen und das Kürzel »vy 73« wird als Grußformel verwendet.

Ein besonderer Dank gilt allen ehrenamtlich tätigen OMs und YLs des Fördervereins Amateurfunkmuseum und des Deutschen Amateur-Radio-Clubs. Durch ihr großartiges Engagement wird der tägliche Betrieb der Klubstation DLØDM gewährleistet, wodurch sie unseren Besuchern äußerst anschaulich die fundamentalen funktechnischen Prinzipien vermitteln, denen LTE, WLAN und Co. allesamt unterliegen.

Mit einem Ausbildungsrufzeichen kann Ada (11) – unter Aufsicht – über Funk mit Menschen aus der ganzen Welt in Kontakt treten. Demnächst wird sie ihre erste Prüfung zur Funkamateurin absolvieren. Dann bekommt sie ihr eigenes, auf der ganzen Welt einmaliges Rufzeichen und darf völlig eigenständig funken. Mehr Informationen über dieses spannende Hobby findest du auf den Seiten der Deutschen Funkamateure im Internet: **www.darc.de/einsteiger/jugendaktivitaeten**

Funktechnik für Kinder erklärt

Wer hat sich das ausgedacht?

Vor etwa dreißig Jahren stand in den meisten Haushalten noch ein Telefon, das über ein Kabel an ein Telefonnetz angeschlossen war. Heute surfen und telefonieren wir kabellos überall dort, wo ein Funknetz vorhanden ist. Dass dies möglich ist, verdanken wir schlauen Forschern, die sich um 1900 mit der Elektrizität beschäftigten. Heinrich Hertz war einer dieser Wissenschaftler. Bei seinen Experimenten stellte er fest, dass ein elektrischer Funke Signale erzeugt, die durch eine Antenne an einem anderen Ort empfangen werden können. Er erkannte, das sich elektrische Signale als unsichtbare Wellen im Raum ausbreiten können.

Wie funktioniert das?

Ein Funke ist ein kleiner Lichtblitz. Bei einem Lagerfeuer beispielsweise gibt es viele kleine Funken. Solche Funken entstehen auch bei einer elektrischen Entladung. Der Funke allein genügt allerdings nicht, um elektromagnetische Wellen zu erzeugen. Man benötigt dazu einen Schwingungserzeuger, einen »Oszillator«. Dadurch wird das elektromagnetische Feld des Funkens so in Bewegung gesetzt, dass es sich mit Lichtgeschwindigkeit im Raum ausbreitet. Solange, bis es auf eine Antenne trifft, die das Signal empfängt. (SL)

Mehr über Amateurfunk im Internet

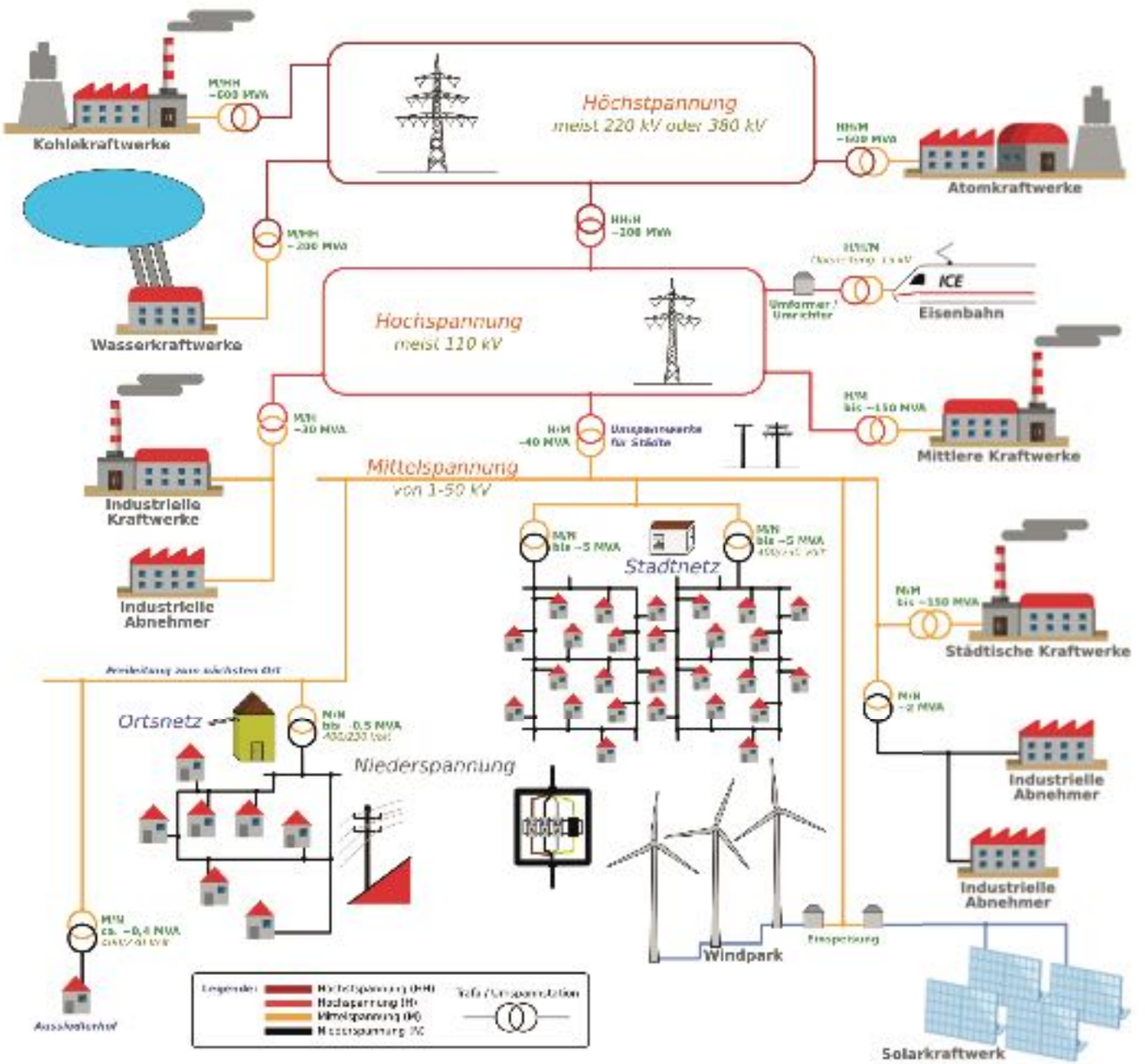
www.deutsches-museum.de/museumsinsel/ausstellung/amateurfunk
www.darc.de/home
www.amateurfunkmuseum.de/de
www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation Frequenzen/SpezielleAnwendungen/Amateurfunk/start.html

Luise Allendorf-Hoefer
Die Diplomingenieurin Elektrotechnik ist seit 2019 Kuratorin für Telekommunikation und Mikroelektronik im Deutschen Museum.

Abbildungen: Deutsches Museum; Bernhard Schneck, DM6BS

Der Traum vom Supergrid

Stromnetze sind auf den ersten Blick wenig geeignet, große Emotionen wecken, während Raketen, U-Boote oder Computer die Menschen zu allerlei Träumereien angeregt haben. Ein Blick in die Geschichte zeigt jedoch, dass die Verteilung von Energie durchaus kreative Ideen beflügelte. Zwei Utopien rund ums Stromnetz stellen wir Ihnen vor. **Von Sebastian Kasper und Frank Dittmann**



Die Grafik von Stefan Riepl zeigt die grobe Struktur des Stromnetzes.

Stromnetze zur Unterstützung der europäischen Einigung

Die 1920er Jahre waren von der Erinnerung an das Grauen des Ersten Weltkriegs und dem Erfolg nationalistischer und reaktionärer Bewegungen geprägt. Dies hatte zur Folge, dass immer wieder Konzepte entwickelt wurden, die eine friedens- und wohlfahrtsfördernde Kooperation der Staaten zum Ziel hatten. Die Ideen reichten von einer europäischen Zollunion bis zur Gründung der Vereinigten Staaten von Europa. Projekte zur Vernetzung der europäischen Elektrizitätswirtschaft ordnen sich in das politische Programm der Einigung Europas ein. So regte 1929 George Viel, Direktor der Compagnie électrique de la Loire et du Centre, die Schaffung eines europäischen Hochspannungsnetzes an.

Auf der Zweiten Weltkraftkonferenz 1930 in Berlin wiederum stellte der deutsche Ingenieur und Industrielle Oskar Oliven einen »Generalplan« für ein europäisches Höchstspannungsnetz von 400 kV vor. Nach dem Studium in Hannover und einer Ingenieurtätigkeit in Argentinien war er 1904 in den Vorstand der Ludw. Loewe & Co. AG und 1906 in den Vorstand der Gesellschaft für elektrische Unternehmungen (Gesfürel) berufen worden. Die Gesfürel entwickelte sich zur größten deutschen Holding im Bereich der Elektrizitätswirtschaft. Oliven saß auch in mehreren Aufsichtsräten, u. a. in dem der AEG und jenem der Dresdner Bank.

In seinem publizierten Vortrag *Europas Großkraftlinien. Vorschlag eines europäischen Höchstspannungsnetzes*, *Z. VDI 74* (1930, S. 875-879) forderte er »Höchstspannungslinien« zwischen Norwegen und Italien, dem Donezk-Becken und Portugal mit einer Gesamtlänge von 10 000 km. Dies sei von »höchster Bedeutung für ganz Europa […], um hierfür ein organisiertes Zusammenwirken der politischen und wirtschaftlichen Faktoren unseres Erdteils zu sichern«. Das könne nur gelingen, wenn alle Völker in Europa »über alle persönlichen, materiellen und politischen Schwierigkeiten hinweg der elektrischen Energie sichtbare und unsichtbare Grenzen« öffneten. Durch die Nutzung zeitlicher und regionaler Unterschiede in Erzeugung und Verbrauch könnte die Reservehaltung verringert werden. Weiterhin wäre es möglich, bisher nicht erschlossene Energiequellen einzubinden, um auch Gebiete in der Peripherie Europas mit billigem Strom zu versorgen. Nicht zuletzt würde dies Europa wirtschaftlich und politisch stärken und zu einem höheren Selbstbewusstsein führen, beweise es doch, »daß gerade unsere alte europäische Kultur den geeigneten Boden für eine Elektroverbundwirtschaft biete«. Der Oliven-Plan wurde besonders von Dannie Heinemann, Leiter des belgischen Energiekonzerns Sofina, unterstützt, der sich seinerseits stark in der Paneuropa-Bewegung engagierte.

Zeitgleich veröffentlichte der Schweizer Ernst Schönholz *Ein elektrowirtschaftliches Programm für Europa*, *Schweizerische Technische Zeitschrift* (1930, S. 385-397). Deutlich artikulierte er seine Sympathie mit der Paneuropa-Bewegung, indem er seinem Aufsatz einen Ausspruch von Coudenhove-Kalergi voranstellte und im Text auf Aristide Briand verwies. Richard Nikolaus Coudenhove-Kalergi war Sohn eines österreichischen Diplomaten. Die Schrecken des Ersten Weltkriegs führten ihn zu der Einsicht, dass nur die europäische Einigung einen erneuten Krieg verhindern

Advertorial

DAS BIOHOTEL AM STARNBERGER SEE
SCHLOSSGUT OBERAMBACH

Das Schlossgut Oberambach begeistert seine Gäste seit 2019 mit dem Food-Konzept „Farm to Table".

Mit Geschichte im Rücken und dem Starnberger See im Blick

Im Schlossgut Oberambach Bio-Kulinarik in exklusiver Lage genießen

Wer das oberbayerische Fünfseenland besucht, kommt um einen Kraftort in besonders exklusiver Lage nicht herum. Inmitten von 45 Hektar Wald und Wiesen befindet sich das Schlossgut Oberambach am Ostufer des Starnberger Sees. Egal ob bei einer Wanderung mit Einkehrschwung in Bio-Qualität, einem Tagesausflug oder dem ausgiebigen Wohlfühlurlaub im Grünen: Der unverbaute Blick aufs Wasser und die Alpen machen den herrschaftlichen Landsitz zum perfekten Ort der Erholung. Dank des Farm-to-Table-Konzepts wählen Gäste dabei stets aus saisonalen Gerichten, deren Zutaten vorwiegend aus eigenem Anbau stammen. Denn das nachhaltige Konzept zieht sich im Schlossgut Oberambach vom elektrosmogfreien Zimmer bis auf den Teller.

Kulinarische Wochen-Highlights

Jeden Donnerstag ist Barbecue-Zeit im Schlossgut Oberambach – und das ganzjährig. Tagsüber brutzeln Bio-Fleisch und -Fisch von regionalen Händlern stundenlang bis zur Perfektion über dem Holzfeuer im Smoker, zum abendlichen Schlemmen gibt's Live-Musik. Immer sonntags von 12 bis 20:30 Uhr werden Besucher der hauseigenen Picknickwiese mit kleinen „Bio to go"-Schmankerln verwöhnt.

Öffnungszeiten:

täglich warme Küche von 12 bis 14.30 Uhr,
Abendessen Di, Mi, Fr und Sa von 18 bis 20.30 Uhr
Do Hof-BBQ von 18 bis 21 Uhr

Schlossgut Oberambach · Biohotel & Vitalzentrum
Oberambach 1 · 82541 Münsing
Tel. 08177 9323 · www.schlossgut.de

Abbildungen: Stefan Riepl/wikimedia

Europäisches Verbundnetz nach dem Vorschlag von Oskar Oliven 1930.

könne. Mit seinem Buch *Paneuropa* von 1923 begründete er die paneuropäische Bewegung – ihr gehörten u. a. Albert Einstein, Thomas Mann und Franz Werfel an –, die sich dem wieder erstarkenden Nationalismus entgegenstellte.

1933 wurde die Paneuropa-Union in Deutschland verboten und nach dem Zweiten Weltkrieg wiedergegründet. Unterstützt wurde Coudenhove-Kalergi auch von Aristide Briand, einem französischen Spitzenpolitiker, der zwischen 1909 und 1932 elfmal Regierungschef und 23 Mal Minister in den wechselnden Kabinetten der Dritten Republik war. 1926 erhielt Briand gemeinsam mit Gustav Stresemann den Friedensnobelpreis für seine Mitarbeit an den Verträgen von Locarno, mit denen die europäischen Siegermächte des Ersten Weltkriegs versuchten, ihre Beziehungen zu Deutschland zu normalisieren. Briand vertrat die Vision einer europäischen Einigung, in der Deutschland und Frankreich ihre »Erbfeindschaft« überwinden sollten. Darauf bezog sich Schönholz, wenn er schrieb, dass zu Briands »sehr begrüssenswertem Plan der Vereinigung der Staaten von Europa […] auch ein elektrowirtschaftliches Programm« gehöre. Dieses umfasse »internationale Hochspannungsstrassen«, die »Symbol einer im Grunde doch bestehenden Kulturgemeinschaft« seien. Aktuell ist auch sein Plädoyer, »mit unserem ungeheuren Raubbau an hochwertiger Steinkohle für Kraftzwecke endlich Schluss (zu) machen und die reichen Wasserkräfte […] unseres Erdteils gemeinschaftlich aus(zu)nützen«. Schönholz schlug ein europäisches Stromnetz »mit zentralem 660 kV-Sammelviereck« zwischen London, Paris, Wien und Berlin vor. Technisch sei der Energietransport mit Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-Leitungen (HGÜ) realisierbar, die zum Anschluss von Großbritannien auf einem Damm über den Ärmelkanal geführt werden könnten.

Die Verknüpfung von Politik und Technologie zeigt sich auch andernorts. So wurde z. B. die CIGRE (Conférences Internationales des Grands Réseaux Électriques à Haute Tension) 1921 in Paris als internationale Nicht-Regierungsorganisation gegründet, um die Hochspannungsübertragungstechnik und den Verbundbetrieb zu fördern. Von Bedeutung waren auch die Weltkraftkonferenzen (WPC – World Power Conference, heute World Energy Council WEC). Nach den Vorstellungen des Gründers, des schottischen Ingenieurs und Anthroposophen Daniel N. Dunlop, sollte die WPC das Bindeglied zwischen den verschiedenen Zweigen der Energie- und Brennstoffwirtschaft sein und als Diskussionsplattform für Ingenieure, Wissenschaftler und Verwaltungsmitarbeiter dienen. An der ersten Konferenz 1924 in London nahmen 1700

Das Bild zeigt das Stufenmuster eines Kabels für eine Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ). Durch solche Kabel kann Elektroenergie ohne enorme Leitungsverluste auch über große Strecken übertragen werden.

Moderne HGÜ-Kabel bestehen aus einem leitenden Kern aus Kupfer oder Alumnium der von einem dreifachen Isolationssystem umgeben ist. HGÜ-Leitungen haben gegenüber den in der Bevölkerung oft umstrittenen Hochspannungsleitungen etliche Vorteile. Sie sind weniger störanfällig und frei von magnetischen Wechselfeldern. Allerdings ist ihr Bau sehr kostenintensiv.

Delegierte aus über 40 Ländern teil. Auf der zweiten Weltkraftkonferenz in Berlin 1930 stellte, wie erwähnt, Oliven seinen Plan vor. Der WPC-Ideengeber Dunlop arbeitete später im Committee on Electric Questions des Völkerbundes mit. Auch diese 1919 auf Initiative des amerikanischen Präsidenten Woodrow Wilson gegründete internationale Organisation, unterstützte die Verknüpfung von politischer Einigung Europas und technologischer Zusammenarbeit.

So intensiv die Schaffung eines politisch und durch ein Supernetz zudem technologisch geeinten Europas von den Befürwortern auch betrieben wurde, hatte dieses angesichts der allgemeinen politischen und wirtschaftspolitischen Abschottungs- und Nationalisierungstendenzen nach dem Ersten Weltkrieg und der Weltwirtschaftskrise, insbesondere aber aufgrund der Autarkiepolitik des nationalsozialistischen Deutschlands, nur geringe Realisierungschancen.

Die Vision von der Energie aus der Wüste

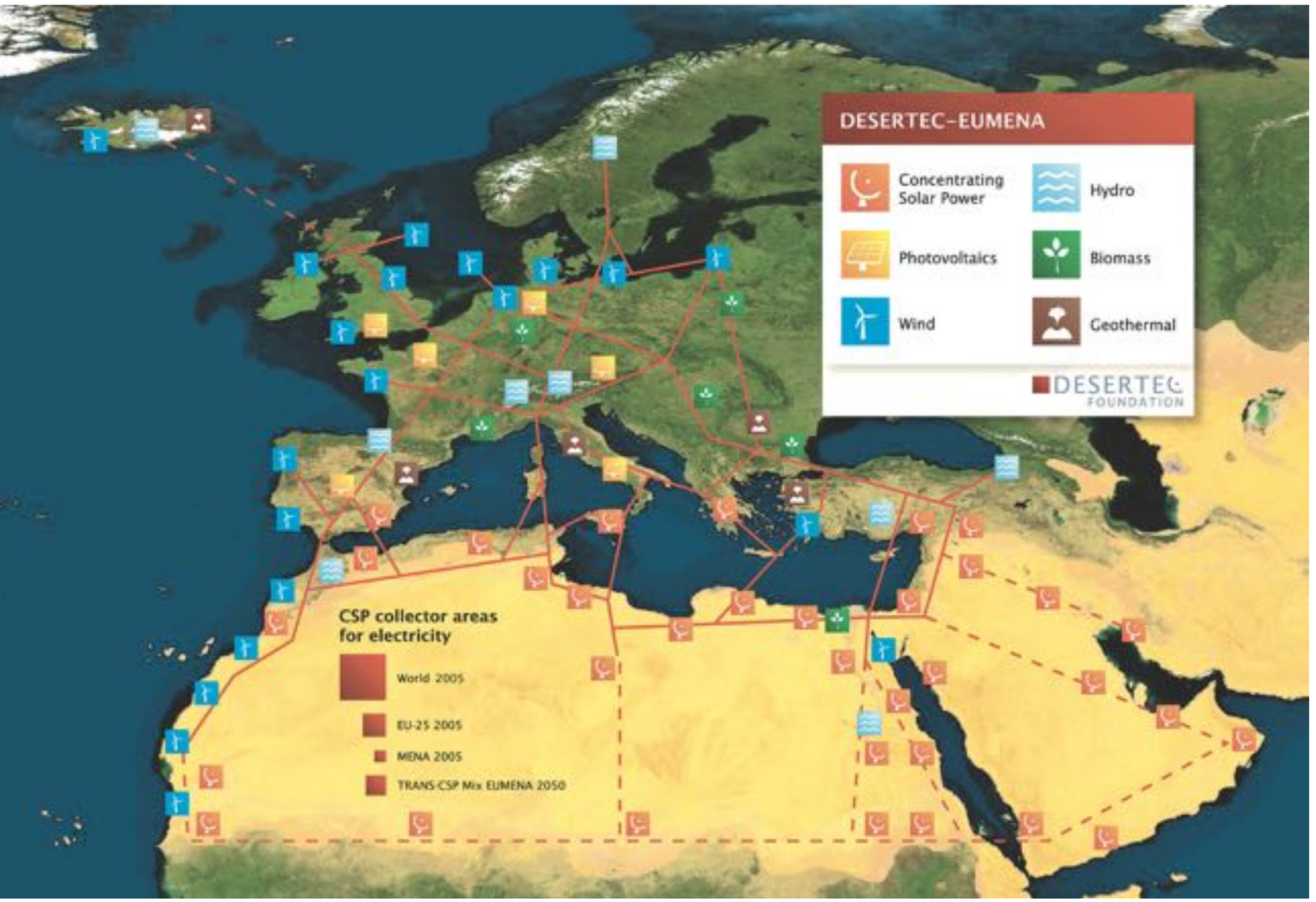
Ein Beispiel für eine neuere Netz-Utopie ist Desertec, an die sich sicherlich noch manche erinnern. Initiiert wurde das Projekt ab 2003 unter Mitwirkung des renommierten Club of Rome. Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) erstellte im Anschluss mehrere wissenschaftliche Studien zur Umsetzung der Idee. Den wirklichen Startpunkt aber bildete die Gründung der Desertec Industrial Initiative (DII) vor allem durch deutsche Unternehmen wie die Deutsche Bank, die Münchener Rück, RWE und Siemens, im Frühjahr 2009. Nun, da auch die Wirtschaft ihr Interesse zeigte und eine Verwirklichung des weitreichenden Projekts realistisch erschien, entfaltete Desertec eine enorme Faszination. Im *Spiegel* (16. 06. 2009) hieß es zum Beispiel euphorisch, Desertec sei »ein Projekt, das, sollte es Wirklichkeit werden, allein durch sein schieres Ausmaß zum Weltwunder werden« könne. Der damalige Vorstandsvorsitzende der Siemens AG, Peter Löscher, bezeichnete es gar als »Apollo-Projekt des 21. Jahrhunderts« (*Süddeutsche Zeitung*, 14. 10. 2014).

Die Idee war einfach: In den Ländern Nordafrikas sollten riesige solarthermische Kraftwerke gebaut werden. Die umgewandelte Sonnenenergie der Sahara sollte dann durch ein gigantisches Stromnetz aus Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungsleitungen nach Europa transportiert werden, um den dortigen Stromhunger zumindest zu einem Teil ökologisch verträglich zu decken. Die Pläne sahen eine Leistung von 100 000 Megawatt vor. Dazu hätten mehr als ein Dutzend neuer Leitungen Afrika mit Europa auf verschiedenen Routen durchs Mittelmeer, über Gibraltar, Sizilien, Sardinien und Istanbul verbinden sollen. Zusätzlich hätte auch in Europa das Stromnetz dementsprechend massiv ausgebaut werden müssen. Man ging von Kosten von etwa 400 Milliarden Euro für das Gesamtprojekt aus – insgesamt also ein gewaltiger Netzausbau. Besonders, wenn man bedenkt, welche Schwierigkeiten aktuell der Bau von ein paar wenigen Stromtrassen von Nord- nach West- und Süddeutschland bereitet und mit welchen Kosten dies verbunden ist.

Desertec war jedoch nicht nur eine technische Utopie, die auf die Stromversorgung Europas mit »Öko-Strom« abzielte, sondern umfasste auch eine Reihe von politischen Zielen. Das Stromnetz zwischen Nordafrika, Vorderasien und Europa sollte nicht nur energetisch verbinden, sondern diese Weltregion auch enger zusammenbinden. Im Konzeptpapier *Clean power from deserts* von 2008 heißt es in einer Aufzählung der Ziele des Projekts dementsprechend u. a.: »Solar power from deserts […] can provide sustainable power sufficient to meet the demand of fast growing MENA [Middle East and North Africa] population, […] can stimulate industrialization an economic development in MENA contries, […] can open a new rea of properity and peaceful neigbourhood for the people of EUMENA. (S. 56)«

Wie bei Projekten dieses Ausmaßes zu erwarten war, gab es auch viele KritikerInnen. Dies betraf bei einem so gigantischen Projekt zunächst die Wirtschaftlichkeit und die technische Umsetzbarkeit der Idee. Daneben gab es jedoch auch Stimmen in Europa, aber vor allem in Nordafrika, die dem Projekt vorwarfen, neokolonial zu agieren. Desertec sei nur ein weiterer Versuch der reichen Industrieländer, die natürlichen Ressourcen des Globalen Südens auszubeuten. Auch die ökologische Sinnhaftigkeit wurde in Frage gestellt. So argumentierte zum Beispiel der damalige Vorsitzende des Weltrats für erneuerbare Energien, Hermann Scheer – ein konsequenter Anhänger einer dezentralen Energieversorgung –, dass Desertec die Umstellung der Energiewirtschaft in Deutschlands auf erneuerbare Energien behindern würde, da bei-

Abbildungen: O. Oliven 1930; Deutsches Museum



Plan einer möglichen Infrastruktur für eine nachhaltige Stromversorgung in Europa, im Nahen Osten und in Nord-Afrika. Die durch die roten Quadrate markierten Flächen für Solarkollektoren würden genügen, um in solarthermischen Kraftwerken den Strombedarf der Welt bzw. der angegebenen Region zu erzeugen. Die gestrichelten Linien stellen eine zweite Ausbaustufe dar.

de Projekte gleichzeitig finanziell nicht zu stemmen seien. Mehr noch: Das eigentliche Ziel der beteiligten Unternehmen sei es, »die Strukturen der heutigen Energieversorgung in das Zeitalter der erneuerbaren Energien zu verlängern. Desertec bedeutet Strom von einem einzelnen Konsortium, das Produktionsanlagen wie Transportleitungen kontrolliert. Es ist ein Weg, auch Solarstrom unter Monopolbedingungen herzustellen.« (*Manager-Magazin*, 13. 07. 2009)

Die Skeptiker sollten Recht behalten. Nur fünf Jahre nach Gründung war die Desertec Industrial Initiative 2014 am Ende – übrig blieb letztlich nur ein wesentlich kleineres Beratungsunternehmen, das das erworbene Know-how erhalten sollte. Grund dafür waren die großen und kaum zu kalkulierenden finanziellen Risiken sowie interne Streitereien im Konsortium. Auch technische-wirtschaftliche Entwicklungen spielen eine Rolle, wie zum Beispiel die rasante Preisminderung für Photovoltaikanlagen, die die Wirtschaftlichkeit der geplanten solarthermischen Kraftwerke immer fraglicher erscheinen ließen. Neben diesen wirtschaftlichen Gründen hatten aber auch politische Entscheidungen und gesellschaftliche Ereignisse einen großen Anteil am Ende der Utopie. Nach anfänglich begeisterten Tönen aus der Politik, blieb die Unterstützung durch die deutsche Bundesregierung letztlich verhalten. Aber vor allem in Nordafrika ereignete sich in diesen Jahren ein rasanter gesellschaftlicher Umbruch. Ausgehend von Tunesien wurden große Teile dieser Region von Protesten und Aufständen gegen die dortigen autoritären Regime erfasst. Dieser sogenannte Arabische Frühling führte zwar einerseits zur Hoffnung, dass sich die Lage für die Bevölkerung in den betroffenen Ländern bessern würde, hatte aber auch zur Folge, dass Investoren noch vorsichtiger agierten.

Netze sind mehr als die Summe ihrer Teile

Bei Netzen sind es oft nicht einzelne technische Entwicklungen, die eine visionäre Kraft entfalten, sondern die Idee einer neuen

Anwendung und Kombination von zum Teil schon lang existierenden und erprobten Einzelelementen. So war zum Beispiel die technische Basis für das Desertec-Projekt, die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ), schon ein dreiviertel Jahrhundert bekannt und vielfach erprobt. Es sind also weniger sensationelle technische Innovationen, die hier die Fantasien sprießen lassen, sondern die enorme Bedeutung von Infrastrukturprojekten für die Gesellschaft. Sind Infrastrukturen einmal aufgebaut, sind sie extrem langlebig und einflussreich auf die weitere Entwicklung. Ein Wechsel zu einer anderen Struktur ist dann nur noch durch einen gewaltigen Aufwand möglich.

Diese Pfadabhängigkeit aufgrund vorhandener Infrastruktur zeigt ganz aktuell der Konflikt um den Bezug von russischem Gas, bei dem ein einfacher und schneller Wechsel schwer möglich ist. Während manchmal beeindruckende »Erfindungen« in der Öffentlichkeit intensiv wahrgenommen und diskutiert werden, wird die große Bedeutung von Infrastruktur oft nicht gewürdigt. Zu alltäglich und unspektakulär erscheinen die einzelnen Komponenten eines Netzes. Die beiden in diesem Aufsatz skizzierten Beispiele zeigen darüber hinaus auch, dass die Technik bei der Realisierung von Zukunftsvisionen zwar eine notwendige aber keine hinreichende Voraussetzung darstellt.

Die beide vorgestellten Utopien, das europäische Stromnetz nach dem Ersten Weltkrieg und das Desertec-Projekt, sind nicht daran gescheitert, dass sie technisch nicht umsetzbar gewesen wären. Ihnen fehlte letztlich die gesellschaftliche Akzeptanz. Dies zeigt auch, dass unsere Energiesysteme nicht überwiegend technisch determiniert, sondern vor allem Ergebnis gesellschaftlicher Aushandlungsprozesse sind. Deshalb gibt es in unterschiedlichen Ländern, auch wenn sie ähnliche Anforderungen und Voraussetzungen aufweisen, zum Teil sehr unterschiedliche Energiesysteme. Man denke hier nur an Frankreich, das beim Strom ganz anders als Deutschland seit Langem vor allem auf Kernenergie setzt.

Das Wissen um die große Bedeutung gesellschaftlicher Entscheidungen und Diskurse für technische Entwicklungen ist gerade für eine Institution wie das Deutsche Museum von großer Bedeutung. Deshalb ist es auch bei der Neugestaltung der Starkstromausstellung ein wichtiges Ziel, den BesucherInnen das notwendige Orientierungswissen an die Hand zu geben, um sich an den gesellschaftlichen Debatten um die Zukunft unseres Energiesystems beteiligen zu können.

Dr. Frank Dittmann
leitet die Abteilungen Energietechnik, Starkstromtechnik und Automation am Deutschen Museum.

Dr. Sebastian Kasper
ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Projekt elektrische Energietechnik am Deutschen Museum.

Transformatoren in einem Umspannwerk. Hier wird die Spannung des ankommenden Stroms verringert, um ihn anschließend in das Stromnetz vor Ort einspeisen zu können. Ohne Transformatoren könnte Strom nicht über weite Strecken transportiert werden.

Das Stromnetz für Kinder erklärt

Heute erscheint es uns selbstverständlich, dass der Strom überall zur Verfügung steht. Aber es ist gerade einmal 100 Jahre her, als man begann, Haushalte mit dieser bequemen Energieform zu versorgen. Zunächst einmal betrieb man damit vor allem Glühlampen, die praktischer und sicherer waren als die alten Gaslampen.

In mehr als 700 Kraftwerken wird heute in Deutschland Strom erzeugt. Über weit verzweigtes und gestaffeltes Netz wird dieser verteilt. Das funktioniert ähnlich wie das Straßennetz: So wie es Haupt- und Nebenstraßen gibt, so gibt es große und kleinere Stromnetze. Sie verlaufen oberirdisch über Freileitungen oder unterirdisch über Erdkabel.

Die sogenannten Höchstspannungsnetze sind die Autobahnen für Strom. Hier rast die elektrische Energie mit einer Spannung von mehreren hunderttausend Volt entlang. Zwischendrin gibt es immer wieder »Ausfahrten«, an denen Umspannwerke die Spannung heruntertransformieren – so dass am Ende der Strom mit 220 Volt aus der Steckdose kommt.

Ein Problem beschäftigt die Ingenieure jedoch bis heute: Es gibt nach wie vor keine gute Lösung, Strom über eine längere Zeit zu speichern. Sobald er erzeugt ist, muss er auch verbraucht werden. Auch das Netz kann Strom nicht speichern. Aus diesem Grund sind die Stromnetze heute europaweit miteinander verbunden.

Wenn zum Beispiel in irgendeinem Land in Europa ein Kraftwerk ausfällt, dann kann überschüssiger Strom aus einem anderen Kraftwerk in das betroffene Netz eingespeist werden. Die schlechte Speicherfähigkeit ist auch der Grund dafür, dass beispielsweise Windkraftwerke sich nicht immer drehen. Wenn zuviel Strom im Netz ist, werden sie nämlich abgeschaltet, so wie auch andere Kraftwerke heruntergefahren werden. (SL)

Abbildungen: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; Desertec foundation

Luftaufnahme des räumlichen Filters zur Unterdrückung des Windrauschens an einem der acht Elemente der Infraschall-Station bei Freyung. Öffnungen an den Enden der sternförmigen Arme lassen Luftdruck-Wellen ein, die an dem Mikrobarometer im Schacht in der Mitte, erkennbar an dem runden Deckel, zusammenkommen. In dem Schacht befindet neben dem Sensor auch die weitere Technik des Messelements.

Die Wächter

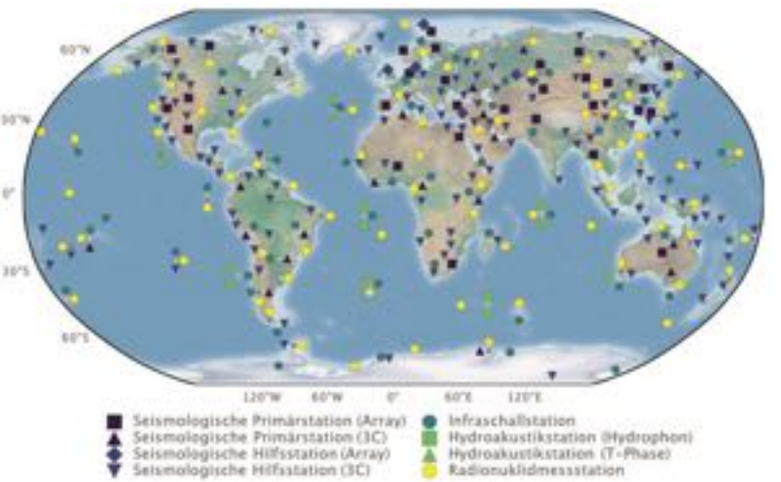
Weltweit gibt es derzeit 289 Messstationen, die Kernexplosionen aufspüren und dokumentieren. Sie dienen als internationales Überwachungssystem zur Kontrolle des – bislang allerdings noch nicht in Kraft getretenen – Atomwaffenteststoppvertrags von 1996.

Von Joachim Schulze, Matthias Zähringer, Thomas Hoffmann, Martin Kalinowski, Florian Haslinger, Lars Ceranna

Schon 1954 hatte der indische Premierminister Nehru in der UNO ein Ende jeglichen Testens von Kernwaffen gefordert. Es sollte noch 40 Jahre dauern, bis bei der Abrüstungskonferenz in Genf die Verhandlungen über einen Vertrag über das umfassende Verbot von Nuklearversuchen begannen. 1994 war die Zeit günstig: ein Jahr zuvor war das Chemiewaffen-Abkommen erfolgreich abgeschlossen worden und die Kernwaffenstaaten wollten im Vorfeld der Verhandlungen zur unbeschränkten Verlängerung des Nuklearen Nichtverbreitungsvertrags (Non-Proliferation Treaty) ein Signal der Bereitschaft in Richtung Abrüstung setzen. Nach den Abkommen zur teilweisen Beschränkung von Nukleartests 1963 (Partial Test Ban Treaty) und 1990 (Threshold Test Ban Treaty) sollte der Comprehensive Nuclear Test Ban Treaty (CTBT) nun jede Art von nuklearen Test-Explosionen an jedem Ort untersagen und dazu auch einen Mechanismus zur wirksamen Überwachung seiner Einhaltung einführen, das sogenannte Verifikationssystem.

Seit 1976 forschte eine internationale Gruppe von WissenschaftlerInnen, die Group of Scientific Experts (GSE), im Auftrag der Abrüstungskonferenz an technischen und wissenschaftlichen Aspekten der Überwachung von Nukleartests. Parallel zu den politischen Verhandlungen des CTBT – 1994 bis 1996 – erarbeitete die GSE detaillierte Vorschläge, wie mit den vier vereinbarten Überwachungstechnologien ein verlässliches Verifikationssystem aufgebaut werden könnte. Im September 1996 wurde der CTBT in Genf verabschiedet und bei den Vereinten Nationen in New York zur Zeichnung aufgelegt. Seitdem sind 185 Staaten dem Vertrag beigetreten, davon

haben 172 den Vertrag ratifiziert, Deutschland im August 1998. Ein Element des CTBT ist das Technische Sekretariat, das neben den politischen und administrativen Elementen auch die Verifikation organisiert. Sie besteht aus drei Säulen: dem Messnetz IMS (International Monitoring System), dem Datenzentrum IDC (International Data Centre) und der Vorbereitung von Vorort-Inspektionen (On-Site Inspection, OSI). Bis zum endgültigen Inkrafttreten des CTBT heißt es offiziell »Provisorisches Technisches Sekretariat« (PTS).



Die Weltkarte des International Monitoring System-Netzwerks.

Eine wissenschaftliche, technische und logistische Herausforderung

Eine Nuklearexplosion löst eine Druckwelle, eine Hitzewelle und radioaktive Strahlung aus. Das Verifikationssystem des CTBT soll solche Explosionen ab einer Sprengkraft von einer Kilotonne TNT-Äquivalent an jedem Ort der Erde, egal ob unterirdisch, unter Wasser oder in der Atmosphäre, verlässlich feststellen und den Ort der Explosion auf ein Gebiet von maximal 1000 Quadratkilometern eingrenzen können. Dieses Verdachtsgebiet kann dann auf Beschluss der Vertragsstaaten durch ein OSI-Inspektionsteam weiter untersucht werden, um eindeutige Evidenz für eine Nuklearexplosion zu finden. Die vier in den Vertragsverhandlungen festgelegten Überwachungstechnologien sind seismologische, Infraschall-, hydroakustische und Radionuklid-Messungen. Mit diesen Vorgaben wurde ein weltweites Netzwerk von möglichst gleichmäßig verteilten Messstationen dieser vier Technologien entworfen.

Seismologische Stationen zeichnen Erschütterungen des Untergrundes auf, die von sich im Gestein ausbreitenden Druckwellen erzeugt werden, Infraschallsensoren messen tieffrequente Druckwellen in der Atmosphäre und Hydroakustik-Stationen Druckwellen unter Wasser. Die aufgezeichneten Signale haben unterschiedlichste Ursachen, wie Erdbeben, Vulkanausbrüche, Meteoriten, oder eben Explosionen. Mit einer sorgfältigen Analyse der Daten kann in der Regel bestimmt werden, ob die Signale von einer Explosion herrühren. Um festzustellen, ob es sich dabei um eine Nuklearsprengung gehandelt haben könnte, messen die Radionuklid-Stationen das Vorkommen und die Häufigkeit von radioaktiven Spaltprodukten in der Atmosphäre.

Die gleichförmige weltweite Überwachung erfordert Stationen des IMS auch in sehr abgelegenen Gebieten und auf einsamen Inseln mit harschen klimatischen Bedingungen und kaum vorhandener Infrastruktur. Bau, Betrieb und Unterhalt der Stationen inklusive verlässlicher Stromversorgung und Kommunikationsanbindung sind entsprechend anspruchsvoll und kostenintensiv. Über ein globales Kommunikationssystem werden alle Messdaten an das Datenzentrum in Wien übertragen, wo sie auf Hinweise auf mögliche Nuklearexplosionen untersucht werden. Die Auswertung der Radionuklid-Daten wird zusätzlich unterstützt von 16 Laboratorien in 16 verschiedenen Ländern. Im Mai 2022 sind 289 der 321 Messstationen erstellt und 14 Laboratorien in Betrieb.

Deutschland stellt fünf Stationen des IMS: Im Bayerischen Wald bei Freyung liegen die seismologische Array-Station PS 19 und die Infraschall-Station IS 26, die von der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe BGR in Hannover betrieben werden. Eine weitere Infraschall-Station, IS 27, befindet sich an der Antarktis-Forschungsstation Georg von Neumayer des Alfred Wegener Instituts AWI in Bremerhaven und wird von BGR und AWI gemeinsam unterhalten. Ebenfalls in der Antarktis liegt an der südafrikanischen Forschungsstation SANAE IV die seismologische Station AS 35, eine Kollaboration der BGR und des südafrikanischen Council of Geosciences. Am Schauinsland im Schwarzwald steht die Radionuklid-Station RN 33, die vom Bundesamt für Strahlenschutz BfS in Freiburg betreut wird.

Die vier Technologien des IMS-Messnetzes im Überblick

Seismologie: Mehr als vier Jahrzehnte Erfahrung mit Atomtests und Erdbeben

Dass Kernexplosionen über große Entfernung auf seismologischen Messinstrumenten registriert werden können, die eigentlich für die Erfassung der durch Erdbeben ausgelösten Erschütterungen installiert wurden, hat sich schon bei Kernwaffentests in den 1950er Jahren gezeigt. Seismische Signale des ersten unterirdischen Tests, den die USA im Jahr 1957 in Nevada durchführten, wurden noch ca. 3000 km entfernt in Alaska aufgezeichnet.

Der politisch und militärisch begründete Wunsch, diese Tests möglichst gut zu erfassen, hat dann ab 1960 zum Aufbau der ersten weltumspannenden Netzwerke seismologischer Stationen geführt, zusammen mit einer rasanten Entwicklung der Sensoren und der Datenkommunikation. Diese – aus den jeweiligen Militärhaushalten der Grossmächte finanzierten – Anstrengungen sind der eigentliche Grundstein der modernen

Abbildungen: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe; CTBTO Preparatory Commission

Die IMS Radionuklid-Station RN 33 am Schauinsland im Schwarzwald. Hier sind ein Partikel- und ein Edelgas-Messsystem installiert.

wissenschaftlichen Seismologie und der seismologischen Erkundung der Struktur der Erde. Als dann die Verhandlungen des CTBT in den Endspurt gingen und die Frage der verlässlichen Überwachung des Vertrags in den Mittelpunkt rückte, war die Seismologie die am weitesten fortgeschrittene und anerkannte Methode um nukleare Explosionen weltweit erfassen zu können. Die entscheidende Frage war noch, wie viele seismologische Messstationen es dazu brauchen würde und an welchen Orten. Basierend auf der Arbeit der GSE wurde die seismologische Komponente des IMS dann festgelegt: 50 sogenannte Primär-Stationen liefern kontinuierlich Daten, auf denen die Explosionen erst einmal erkannt werden können, und von 120 »Auxiliär«-Stationen können zusätzlich Daten abgefragt werden, mit denen der Ort und der Charakter der Explosion genauer bestimmt werden kann.

Das Netz der Primär-Stationen umfasst nahezu alle der zu der Zeit bestehenden, hauptsächlich von militärischen Institutionen betriebenen, »Array-Stationen«. Diese Stationen sind selbst kleine Netzwerke von seismischen Sensoren, in speziellen geometrischen Anordnungen verteilt über relativ kleine Gebiete von bis zu einigen 10 km Durchmesser. Durch das entsprechende Zusammenführen der an den Einzelstationen aufgezeichneten Daten lassen sich noch sehr viel schwächere Signale erkennen, als es an Stationen mit nur einem Messinstrument möglich wäre. Der Aufbau und Unterhalt dieser Arrays ist allerdings um einiges kostspieliger als der von Einzelstationen. Die 120 Auxiliär-Stationen sind großteils Einzelstationen, auch »3-Komponenten Stationen« genannt, da die Sensoren die Bewegung der Erde in allen drei Raumrichtungen aufzeichnen. Darunter sind Installationen, die von Beginn an sowohl für seismologische Forschung und Erdbebenüberwachung als auch für die Beobachtung von Kernwaffentests geplant waren, und solche, die aus rein wissenschaftlichen Gründen installiert und betrieben werden. Mit den insgesamt 170 seismischen Stationen können unterirdische Explosionen weltweit verlässlich erfasst werden, wenn sie in etwa die Stärke eines Erdbebens mit Magnitude 3,5 oder mehr erreichen. Das liegt leicht unterhalb der geforderten Nachweisgrenze von einer Kilotonne Sprengkraft.

Infraschall: Von Einzelstationen zu globaler Abdeckung

Schallwellen mit Frequenzen unterhalb von 20 Hz, die der Mensch nicht hören kann, nennt man Infraschall. Derart tieffrequente Drucksignale wurden erstmals 1883 nach der Eruption des Krakatau in Indonesien beobachtet. Weil die Frequenzen so niedrig lagen und die Eruption so stark war, wanderten die Schallwellen bis zu sieben Mal um die Erde.

Die Fähigkeit, mit Hilfe von Infraschall-Messungen Explosionen aufzuspüren, hat sich in der Folgezeit deutlich weiterentwickelt. Neben dem technischen Fortschritt wuchs das gesellschaftliche Interesse vor allem während des Ersten Weltkriegs und später wieder in der Ära der atmosphärischen Kernwaffentests. Mit dem begrenzten Kernwaffenteststoppvertrag 1963, der jegliche Tests auf den Untergrund beschränkte, schwand allerdings das Interesse an Infraschall. Erst mit dem CTBT erlebte die Infraschall-Technologie als Teil des Verifikationssystems eine Renaissance.

Das IMS sieht 60 weltweit gleichmässig verteilte Infraschall-Messstationen vor. Jede Station besteht aus einer Anordnung von mindestens vier Messelementen auf einer Fläche von 1 bis 3 km Durchmesser. Ähnlich wie bei einer Funkantenne ermöglicht dies die Peilung kohärenter Signale. Gegenüber Einzelsensoren bietet sich darüber hinaus der Vorteil, dass kleinräumige Störungen wie Luftturbulenzen nicht fehlinterpretiert werden können. Im Wesentlichen ist es der Wind, der das Hintergrundrauschen bei der Messung beeinflusst, die Einzelelemente sind daher mit räumlichen Filtern ausgestattet um das Windrauschen zu reduzieren. Die deutsche Infraschall-Station IS 26 im Bayerischen Wald besteht aus acht Elementen. Sie ist seit 1999 in Betrieb und war die weltweit erste IMS Infraschallstation. IS 27 an der deutschen Neumayer-Forschungsstation in der Antarktis setzt sich aus neun Elementen zusammen. Während im Bayerischen Wald aufgrund der dichten Vegetation ideale Messbedingungen herrschen, sind bei IS 27 die räumlichen Filter im Eis vergraben. In beiden Fällen lässt sich das Hintergrundrauschen um etwa den Faktor 30 gegenüber einer Messung auf freiem Feld verringern.

Nicht nur bei den Aufzeichnungsbedingungen spielt Wind eine Schlüsselrolle. Auch die Ausbreitung von Infraschall in der Atmosphäre wird weitgehend vom Wind gesteuert. Zusammen mit der Temperatur bestimmt die Windgeschwindigkeit in der Ausbreitungsrichtung die sogenannte effektive Schallgeschwindigkeit. Weil die Temperatur in der Troposphäre mit der Höhe abnimmt, und damit die Schallgeschwindigkeit sinkt, breitet

sich der Schall tendenziell nach oben in die Atmosphäre aus. Er wird zur Erde zurückgebeugt, wenn die effektive Schallgeschwindigkeit in einer Luftschicht größer ist als darunter. Dies geschieht zum Beispiel durch den kombinierten Effekt eines Temperaturanstiegs wie in der Stratosphäre oder Thermosphäre zusammen mit einer Zunahme der Windgeschwindigkeit.

Zwei Regionen in der Atmosphäre sind bezüglich Windgeschwindigkeit und -richtung für die Infraschall-Ausbreitung besonders wichtig. Zum einen der Strahlstrom (Jetstream) unterhalb der Tropopause, der vom Temperaturunterschied zwischen Pol und Äquator in Verbindung mit der Corioliskraft hervorgerufen wird und sein Maximum im Winter der jeweiligen Halbkugel hat. Zum anderen die zonale stratosphärische Hauptzirkulation, die in der Sommerhemisphäre einen starken Luftstrom aus Osten erzeugt, und im Winter umgekehrt aus Westen. Die maximalen Windgeschwindigkeiten treten dabei in Höhen von etwa 60 km auf und sind im Winter mit mehr als 80 m/s am größten.

Eine weitere wichtige Größe ist die Absorption des Schalls in der Luft. Für diese Dämpfung sind im Wesentlichen zwei Mechanismen verantwortlich: Transportprozesse im Gas und ein Entspannungsprozess durch die Wellenausbreitung. Insgesamt nimmt die Absorption proportional zum Quadrat der Frequenz mit steigender Frequenz zu. Aus diesem Grund ist Infraschall noch in weitaus größeren Entfernungen messbar als der hörbare Schall. Vor allem der stratosphärisch geleitete Infraschall wird noch in großen Distanzen von mehreren tausend Kilometern registriert. So wurde beispielsweise die Explosion in Beirut vom 4. August 2020 noch an der Elfenbeinküste in mehr als 5500 km Entfernung deutlich gemessen; gleichzeitig jedoch an der lediglich 3000 km entfernten Station in Kasachstan nicht. Das Detektionsvermögen einer Infraschall-Station ist also nicht nur regional, sondern auch saisonal variabel. Durch die gleichmäßige weltweite Verteilung der Infraschallstationen schließen stets die nächstgelegenen Stationen die regionalen und saisonalen Lücken, so dass ein nahezu homogenes Detektionsvermögen – unabhängig von Ort und Jahreszeit – vorliegt.

Hydroakustik: Unter Wasser und an Land

Aufgrund der physikalischen Eigenschaften der Ozeane können sich Schall- und andere Druckwellen in Wassertiefen von ca. 800 bis 1000 m unter der Meeresoberfläche, dem sogenannten Sound Fixing and Ranging (SOFAR) Kanal, über sehr weite Entfernungen ohne große Energieverluste ausbreiten. Das macht man sich für die hydroakustischen Messungen des IMS zunutze. Mit nur sechs in den Weltmeeren geeignet verteilten Standorten, an denen empfindliche Unterwasser-Drucksensoren, sogenannte Hydrophone, innerhalb des SOFAR-Kanals platziert sind, lassen sich Explosionen fast überall in den Ozeanen erkennen und lokalisieren. Die Hydrophone sind jeweils in Dreier-Konfigurationen angeordnet, am Meeresboden verankert und mit bis zu 220 km langen Kabeln mit einer Landstation verbunden, über die Strom und Kommunikation bereitgestellt werden. In der Regel sind pro Station zwei dieser Sensor-Triplets auf gegenüberliegenden Seiten einer Insel oder Landspitze positioniert, um Signale aus möglichst allen Richtungen zu erfassen. Die technischen Herausforderungen dieser Ozean-Installationen machen die Hydroakustik-Stationen allerdings zu den mit Abstand teuersten Messstationen des IMS.

Unter anderem aus Kostengründen sind weitere fünf Stationen auf Inseln oder an Festlandküsten installiert, um dort die seismischen Signale aufzuzeichnen, die entstehen, wenn eine Druckwelle im Ozean auf Land trifft. Weil die Wellenausbreitung im Ozean langsamer ist als im Gestein, hat sich für diese vom Wasser ins Land übergehenden Wellen der Begriff »Tertiär-Wellen« etabliert (im Unterschied zu den seismischen Primär- und Sekundärwellen) und die Stationen werden auf Englisch »T-Phase-Stationen« genannt. Mit nur elf Messstationen können so Explosionen in den Meeren selbst mit Sprengkraft von nur einigen 10er Tonnen TNT-Äquivalent gut erkannt und lokalisiert werden. Die Hydrophone registrieren übrigens auch die Gesänge von Walen, hauptsächlich Blauwalen, die den SOFAR-Kanal nutzen um sich über tausende von Kilometern hinweg zu verständigen.

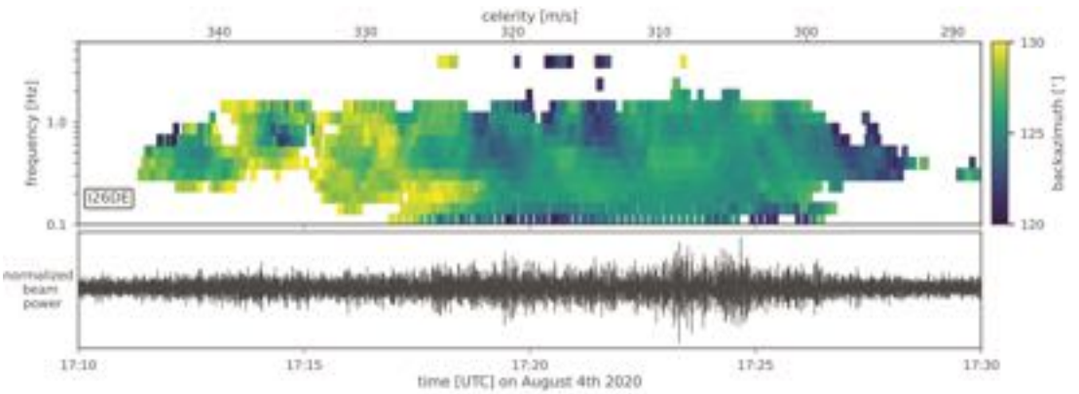
Radionuklide: Der eindeutige Nachweis und eine neue Technologie

Eine nukleare Explosion erzeugt große Mengen an radioaktiven Spaltprodukten. Der physikalische Prozess ist dabei ähnlich dem in Kernreaktoren. Plutonium-239 oder Uran-235 zerfallen in instabile Kerne wie z. B. Strontium-90 oder Barium-140. Hinzu kommen noch einige Aktivierungsprodukte, wenn die bei der Kernspaltung frei werdenden Neutronen weitere stabile Atomkerne in radioaktive Nuklide umwandeln. Die Zusammensetzung des Gemisches an Spaltprodukten ist bei nuklearen Explosionen sehr charakteristisch. Radionuklidstationen erfassen diese Spaltprodukte, indem sie Luft aus der Umgebung saugen und durch sehr feine Filter leiten, in denen kleinste Staubteilchen hängen bleiben, an denen die Spaltprodukte haften. Die Filter werden direkt an der Station mit hochauflösenden Radionuklid-Detektoren analysiert, und können für noch genauere Auswertungen an die IMS Radionuklid-Labore geschickt werden. Finden sich in einem Filter dann die entsprechenden Spaltprodukte, hat man in der Regel einen eindeutigen »Fingerabdruck«, die »Smoking Gun«. Wie und wo die Filter langfristig aufbewahrt werden sollen, ist bis heute Gegenstand intensiver politischer Verhandlungen.

Allerdings breitet sich radioaktives Material anders aus als die Druckwellen der Explosion. In erster Linie hängt das davon ab, in welchem Medium die Explosion stattfindet, oberirdisch, unter Wasser oder im Untergrund. Der erste Test »Trinity« am 16. Juli 1945 in der Wüste Nevadas und die darauf folgenden Tests der Atommächte USA, UdSSR und Großbritannien in den 1940er und 1950er Jahren wurden oberirdisch durchgeführt und führten zu besorgniserregendem radioaktivem Fallout, der praktisch in der gesamten Nordhemisphäre nachweisbar war.

Mit den heutigen analytischen Methoden der Staubprobensammlung und der Analyse der Filter mit hochauflösenden

Abbildungen: Bundesamt für Strahlenschutz



Am 4. August 2020 kam es gegen 17 Uhr in Beirut zu einer verheerenden Explosion. Die Schallwellen konnten sogar an der 5500 km weit enfernten Elfenbeinküste gemessen werden.

Detektoren sind oberirdische Tests problemlos nachweisbar, bereits nach zwei bis drei Wochen verteilen sich die Spaltproduktschwaden auf der gesamten Hemisphäre. Zum reinen Nachweis würden also jeweils eine Station auf der Nord- und Südhalbkugel genügen. Trotzdem sieht das IMS insgesamt 80 gleichmäßig über die Erde verteilte Stationen vor.

Ein Grund dafür ist der Wunsch, eine Explosion möglichst rasch nachweisen zu können. Viel wichtiger ist aber die Eingrenzung des Explosionsortes auf der Grundlage von atmosphärischen Rückwärtsrechnungen. Diese Simulationsrechnungen auf der Basis globaler Wetterdaten liefern ein Einzugsgebiet für die jeweilige Messstation. Dieses hängt auch von der Zeit ab, die zwischen Explosion und Messung verstrichen ist und die aus den Konzentrationsverhältnissen der an der Station gemessenen, unterschiedlich schnell zerfallenden Spaltprodukte bestimmt werden kann. Können Spaltprodukte an mehreren Stationen mit unterschiedlichen Einzugsgebieten nachgewiesen werden, dann grenzt deren Schnittmenge den Explosionsort räumlich und zeitlich ein. Im Vergleich zur Ortsbestimmung von Explosionen mit den anderen Technologien ist diese Methode ziemlich ungenau. Sie liefert aber zusätzliche unabhängige Informationen, hilft beim Ausschluss verdächtiger Ereignisse und liefert mit dem Nachweis von Spaltprodukten das eindeutige Indiz einer Nuklearexplosion.

Bedeutend schwieriger ist der Nachweis von Radionukliden bei unterirdischen Explosionen. Hier werden die erzeugten Spaltprodukte erst einmal in dem durch die Explosion erzeugten Hohlraum zurückgehalten. Ein kleiner Teil der Spaltprodukte sind allerdings die Edelgase Krypton und Xenon. Sie können durch kleinste Risse im Gestein oder andere geophysikalische Prozesse freigesetzt werden. Einmal in der Atmosphäre angelangt, werden sie ebenfalls verfrachtet und sind über tausende von Kilometern nachweisbar. Allerdings ist der Nachweis von radioaktiven Edelgasen nicht so einfach wie der von partikelgebundenem Material. Edelgase sind reaktionsträge und daher schwer aus der Luft zu absorbieren. Darüber hinaus bedarf es aufwändiger gaschromatografischer Verfahren der Aufkonzentration, bevor man Edelgase in einem Koinzidenzverfahren mit einem hochauflösenden Gammadetektor und einem Betadetektor messen kann. Solche Verfahren waren bei Zeichnung des CTBT nur in wenigen Laboren etabliert und es gab keine ausgereiften Systeme, die für den Einsatz in einem globalen Messnetz erprobt und geeignet waren.

Dieses Problem hatte zweierlei Konsequenzen. Zum einen lehnten einige Staaten diese Technologie ab und in einem politischen Kompromiss musste man sich darauf einigen, vorerst nur 40 der 80 Radionuklidstationen mit Nachweissystemen für Edelgase auszustatten. Zum anderen initiierte die CTBTO 1999 das »International Noble Gas Experiment« (INGE), um diese Technologielücke zu schließen und geeignete Edelgas-Messsysteme zu entwickeln. Inzwischen sind diese Systeme fester Bestandteil des IMS und trugen wesentlich zum Nachweis der nordkoreanischen Tests in den 2000er und 2010er Jahren bei.

Die Atomtests von Nordkorea – Feuertaufe für das Verifikationssystem

Die Demokratische Volksrepublik Korea (DPRK, Nordkorea) hat als einziger Staat seit der Jahrtausendwende Nukleartests durchgeführt: 2006, 2009, 2013, 2016 (2x) und letztmals 2017. Indien und Pakistan haben jeweils im Mai 1998 ihre letzten Kernwaffentests durchgeführt. Alle diese unterirdischen Explosionen konnten mit den IMS-Daten festgestellt und mit hoher Genauigkeit nahe der bekannten Testorte lokalisiert werden. Der erste Test der DPRK wurde auch durch Radioaktivität in der Atmosphäre nachgewiesen. Bei der Explosion freigesetztes radioaktives Xenon wurde nach fast zwei Wochen Transport durch die Atmosphäre an einer kanadischen IMS-Station gemessen. Durch Simulationen des atmosphärischen Transports konnte es eindeutig dem Test zugeordnet werden. Dies war ein wichtiger Beweis dafür, dass es sich bei der seismisch nachgewiesenen Explosion tatsächlich um eine Nuklearexplosion gehandelt hat, und nicht um eine chemische Explosion, was aufgrund der gemessenen Stärke möglich gewesen wäre.

Auch bei dem Kernwaffentest von 2013 wurde Radioxenon in die Atmosphäre freigesetzt. Allerdings geschah dies nicht prompt, sondern erst nach gut 50 Tagen, als offenbar Zugänge geöffnet wurden, wodurch die im Tunnel oder anderen Hohlräumen angesammelte Radioaktivität entweichen konnte. Aus den Aktivitätsverhältnissen zweier verschiedener Xenon-Isotope konnte das Alter der Spaltprodukte ermittelt werden. Es stimmte überein mit dem Zeitpunkt des Tests. Radioaktivität der anderen vier Tests wurde in den Auswertungen der CTBTO

nicht unmittelbar erkannt. Spätere wissenschaftliche Studien haben aber gezeigt, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit auch von anderen Tests der DPRK radioaktive Spaltprodukte an IMS Stationen erfasst wurden.

Die Studien zeigten, dass die operationelle Software für die Datenanalyse noch wesentlich verbessert werden kann, um die Spuren eines möglicherweise durchgeführten Kernwaffentests sofort zu erkennen.

Wissenschaftlicher und ziviler Nutzen des IMS

Die Daten des IMS sind in vieler Hinsicht einzigartig, zum einen aufgrund der gemessenen Parameter und deren Qualitätsanforderungen, zum anderen durch die gleichförmige weltweite Abdeckung des Messnetzes sowie dessen Ausfallsicherheit. Nur in der Seismologie sind die offen verfügbaren Daten der wissenschaftlich betriebenen Stationsnetze heute den IMS-Daten zum Teil überlegen. Die Anforderungen an die Datenqualität haben in der Hydroakustik, für Infraschall und speziell auch für die Radionuklid-Beobachtung zu messtechnischen Entwicklungen geführt, die auch der Wissenschaft nutzen.

Für die IMS-Daten gilt ein Vertraulichkeitsgebot, so dass die CTBTO die Daten nicht ohne weiteres offen zugänglich machen kann. Nur designierte nationale Datenzentren haben direkt Zugang zu den bei der CTBTO gespeicherten Daten und können diese Daten auch für eigene Forschungsarbeiten nutzen. WissenschaftlerInnen außerhalb der nationalen Datenzentren können aber Vereinbarungen mit der CTBTO treffen, um Daten für Forschungsprojekte zu erhalten. Die Daten einiger Stationen vor allem in der Seismologie (unter anderem fast alle Auxiliär-Stationen) werden allerdings von den Betreiber-Organisationen offen zugänglich gemacht.

Für einige Bereiche außerhalb der Verifikation ist der politische Konsens aber vorhanden, die Daten geeigneten Anwendern direkt zugänglich zu machen. Tsunamis sind auf den hydroakustischen und seismologischen IMS Stationen gut erkennbar. Ein Abkommen zwischen der CTBTO und der Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) der UNESCO macht es möglich, dass nationale und regionale Tsunami-Warnzentren die IMS Daten direkt in Echtzeit erhalten können. So trägt das IMS signifikant zur Verbesserung der Tsunami-Frühwarnung weltweit bei.

Mit den Infraschall-Daten des IMS lassen sich Vulkanausbrüche weltweit gut erkennen und beobachten. Das ist für die frühzeitige Erfassung von Ausbrüchen vor allem in abgelegenen und anderweitig nicht gut überwachten Regionen äußerst wertvoll. Diese Daten helfen auch, die durch den Ausbruch erzeugte Aschewolke abzuschätzen, und können damit die für den Flugverkehr wichtige Meldung solcher Aschewolken unterstützen. Die CTBTO stellt Daten zur Verfügung, mit denen einzelne Volcano Ash Advisory Centers der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation ICAO die Erstellung von Warnungen demonstrieren können.

Die CTBTO ist Mitglied des Inter-Agency Committee on Radiological and Nuclear Emergencies (IACRNE). Nach dem Unfall von Fukushima wurden die IMS-Radioaktivitätsmessungen zeitnah mit der IAEO und WMO geteilt und später für die Veröffentlichung durch UNSCEAR freigegeben. Diese Daten wurden seither in wissenschaftlichen Arbeiten verwendet, u.a. um zu ermitteln, welche Menge an Radioaktivität bei dem Reaktorunfall in die Atmosphäre gelangt ist.

Auf den Radionuklidstationen werden meistens nur natürlich vorkommende Radionuklide nachgewiesen. Mit diesen Daten können globale atmosphärische Zirkulationen beobachtet werden, mit denen das Einsetzen von Monsun vorhergesagt und Folgen des Klimawandels analysiert werden können. Auch andere IMS Daten sind für Klimafolgenforschung nützlich: Hydroakustische Daten eignen sich für indirekte Beobachtung der Temperatur in den Tiefen der Ozeane, Wanderungen von Walpopulationen oder das Schmelzen des Eisschelfs. Mit Infraschall werden Meteorite nachgewiesen und Eigenschaften der Atmosphäre unterhalb der Stratosphäre, die auf die langfristige Entwicklung des Wetters Einfluss haben.

Das globale IMS Messnetz hat eindrucksvoll demonstriert, dass überall auf der Welt Atomtests verlässlich erkannt werden können und seine Daten und technischen Errungenschaften von grossem Nutzen für die Gesellschaft sind. Der CTBT ist seit mehr als 25 Jahren ein unverzichtbares Element der internationalen Sicherheitspolitik, auch wenn er noch nicht offiziell in Kraft getreten ist.

(Anm.: Dieser Artikel gibt die Meinungen der Autoren wieder, die nicht notwendigerweise mit den Ansichten des CTBTO übereinstimmen.)

Dr. Joachim Schulze war wissenschaftlicher Berater der deutschen Delegation während der CTBT Verhandlungen von 1994 bis 1996, Mitarbeiter im PTS von 1997 bis 2002 und Vorsitzender der technischen Arbeitsgruppe WGB in der CTBTO von 2015 bis 2020.

Dr. Matthias Zähringer ist Physiker und war von 1995 bis Anfang 2022, zuletzt als Abteilungsleiter im Bundesamt für Strahlenschutz, mit Fragen des CTBT befasst. Von 2007 bis 2010 war er Mitarbeiter des PTS.

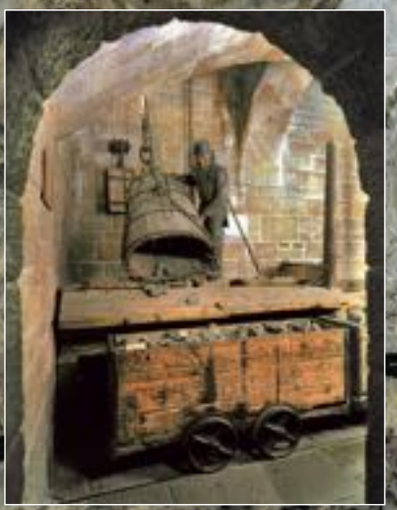
Dr. Thomas Hoffmann ist Akustiker und war von 2000 bis 2007 als Mitarbeiter des PTS am Aufbau der akustischen Komponente des Überwachungsnetzwerks beteiligt. Seit 2019 arbeitet er wieder bei der CTBTO als Chief of Operations, im internationalen Datenzentrum.

Dr. Martin Kalinowski war von 1998 bis 2006 Mitarbeiter des PTS und ist dies wieder seit 2012. In der Zwischenzeit hatte er eine Professur für Naturwissenschaft und Friedensforschung an der Universität Hamburg.

Dr. Florian Haslinger ist Seismologe und war von 2000 bis 2008 Mitarbeiter des PTS. Seitdem ist er am Schweizerischen Erdbebendienst an der ETH Zürich und aktuell einer der wissenschaftlichen Delegierten der Schweiz für die CTBTO.

Dr. Lars Ceranna ist Seismologe und arbeitet seit 2002 in der BGR in Hannover, die das Nationale Datenzentrum für die Verifikation des Kernwaffenteststoppvertrags beheimatet.

Abbildungen: BGR



Ein tränenreicher Abschied

Ein letzter Blick ins berühmte Bergwerk. Auf dem Bild links ist ein Knappe auf der Hängebank zu sehen. Hier wurden die gefällten Erzkübel abgesetzt und in Wagen gekippt.

Ende Juni durfte der Freundes- und Förderkreis Deutsches Museum ein letztes Mal das Bergwerk besuchen, ehe es – für die anstehenden Sanierungsarbeiten – komplett ausgebaut wird. **Von Monika Czernin**

»Glück auf, Glück auf, der Steiger kommt. Und er hat sein helles Licht bei der Nacht, und er hat sein helles Licht bei der Nacht schon angezündt, schon angezündt«, schmettert es in den engen Gängen des Bergwerks. Das berühmte Steigerlied der Bergleute, gesungen – mit Talent und noch mehr Begeisterung – vom Freundeskreis des Deutschen Museums. Es ist bis auf einige Grubenleuchten dunkel, doch als es Licht wird, sieht man tatsächlich bei dem einen oder anderen Mitglied feuchte Augen. Das Museum hat sie zu einem letzten Gang durch das legendäre Bergwerk eingeladen, das schon 1925 ersonnen und 11 Meter unter die Erde gebaut wurde. Seit damals gilt die erlebnisreiche Ausstellung – sie kann durchaus mit den frühen Geisterbahnen des Oktoberfestes verglichen werden – als populärste Abteilung des Museums, wenn nicht gar als Wahrzeichen Münchens und Bayerns. Und doch, die Sanierung des Museums, genauer der Beginn des zweiten Bauabschnittes verlangt, dass das ganze großartige über drei Sohlen (Etagen) reichende Erlebnis komplett ausgebaut wird.

»Wir haben schon begonnen mit feinen Sägen die Kulissen – denn daraus besteht im Wesentlichen das Bergwerk – aus den Wänden herauszuschneiden. Im Beisein des Denkmalamtes«, berichtet Generaldirektor Prof. Wolfgang M. Heckl. Denn das Bergwerk, man glaubt es kaum, wurde erst vor Kurzem unter Denkmalschutz gestellt. Das ist zwar einerseits eine Ehre, andererseits auch eine Last, denn nun kommen zu den Auflagen, unter welchen Umständen das Bergwerk oder Teile davon in der neuen Ausstellung wieder aufgestellt werden können, auch noch die Auflagen, wie die nunmehr wertvollen Kulissen bis dahin gelagert und konserviert zu werden haben. Damit gehört das Bergwerk zu den großen Sorgenkindern des Museumsdirektors Wolfgang M. Heckl.

Aber München ohne das Bergwerk des Deutschen Museums? Und das auch noch über mehrere Jahre? Das ist fast so schlimm, wie die beiden Corona bedingt oktoberfestlosen Jahre, die Gott sei Dank in diesem Herbst zu Ende gehen. Deshalb arbeitet man im Museum seit längerem an zwei Überbrückungsmaßnahmen für die bergwerkslose Zeit, die der Freundeskreis mit großer Überzeugung gefördert hat.

Zum ersten wird in Zusammenarbeit mit der Ruhrkohle AG (RAG) und den Werkstätten des Deutschen Museums eine kleine, drei mal sechs Meter große Szene einer Grubenrettung gebaut. Dazu reisen drei Bergleute aus Essen nach München, sie werden Ausrüstung und Knowhow mitbringen. Und sie sollen zum Thema Grubenrettung interviewt werden, denn das ist ein aussterbender Beruf, zumindest in Deutschland, und das Museum hält ihr Wissen im Sinne der oral history fest. Die inszenierte Grubenrettung soll dann in der bergwerkslosen Zeit in der neuen Eingangshalle

des Museums ausgestellt werden und einen Einblick in das echte Bergwerksleben geben. »Außerdem soll damit unter dem Motto ›Rettet das Bergwerk‹ Spenden in der Tradition Oskar von Millers für die neue Bergwerksausstellung gesammelt werden«, sagt der Kurator Andreas Gundlwein.

Zweitens hat Prof. Gerd Hirzinger, der in Sachen Digitalisierung des Museums schon Meilensteine gesetzt hat, begonnen, das Bergwerk mit der ARGE 3D zu scannen. Die ersten 30 Meter (Bayerischer Pechkohlebergbau) sogar nach allen Regeln dieser sich schnell entwickelnden Zunft mit einer (Multi-)Kamera Technik. Das heißt: So genau, dass man die historische Ausstellung im Prinzip später einmal mit Bausteinen aus dem 3D Printer wieder originalgetreu zusammensetzen könnte. Außerdem bieten die Daten von Prof. Hirzinger – vorausgesetzt es kommt auch noch genug Geld für die restlichen 300 Meter Bergwerksgänge zusammen – auch eine moderne Möglichkeit der Überbrückung der bergwerkslosen Zeit. Denn dann könnte das Bergwerk als 3D-Modellierung zu einer virtuellen Erlebniswelt geformt im Museum auf Tablets mit den dementsprechenden VR-Brillen erlebbar gemacht werden – ein wirklich sensationeller Trost. Und falls die alten Kulissen nicht mehr in die moderne Bergwerksausstellung passen, könnte man die historische Ausstellung ins Metaversum verlagern und dort allen Besuchern – bzw. allen Menschen dieser Welt von überall auf der Welt – zugänglich machen. Ein doppelter Coup, so könnte man im Museum ein museumdidaktisch auf den neuesten Stand gebrachtes Bergwerk in herkömmlicher Weise erlaufen und dann im Metaversum das altertümliche, durch seinen authentischen, fast geisterbahnartigen Charakter so populär gewordene Bergwerk wiederfinden.

Werden Sie Mitglied im Freundes- und Förderkreis des Deutschen Museums!

Jahresbeitrag:

- 500 Euro für persönliche Mitgliedschaften
- 250 Euro für Juniormitgliedschaften (bis 35 Jahre)
- 2500 Euro für Mitgliedschaften mittelständischer Unternehmen nach EU-Norm
- 5000 Euro für Mitgliedschaften großer Unternehmen

Kontakt:
Freundes- und Förderkreis Deutsches Museum e. V.
Museumsinsel 1 · 80538 München
www.ffk-deutsches-museum.de/de

Ihre Ansprechpartnerin:
Nicole Waldburger-Wickel
Tel. 089 / 28 74 84 21
nfo@ffk-deutsches-museum.de

DEUTSCHES MUSEUM-APP

Entdecken Sie das Deutsche Museum neu mit der App des Deutschen Museums. Kostenlos zum Herunterladen im App-Store oder bei Google-Play. Bitte laden Sie die App vollständig herunter, da der Empfang im Deutschen Museum schlecht ist.

Anzeige

Unsere Schule
ein unbequemer – fröhlicher Ort

- Weil wir uns verpflichten, einander zu respektieren.
- Weil gegenseitiges Vertrauen stark macht.
- Weil alle ermutigt werden, die Freiheit des Einzelnen in unserer Gemeinschaft zu schützen.
- Weil junge Menschen sich selbst entdecken, ihre Gaben und Fähigkeiten entfalten.
- Weil wir den Widerspruch erwarten.
- Weil alle ermutigt werden, Bindungen einzugehen und Verpflichtungen wahrzunehmen.
- Weil uns Fehler helfen, Stärken weiterzuentwickeln.
- Weil wir im Interesse unserer Schüler auch dem Missbrauch von Macht und Einfluss entgegentreten.
- Weil wir den Mut haben, miteinander fröhlich zu sein.

www.derksen-gym.de

unter den Top 201 Der Deutsche Schulpreis 2013

ELTERNINFORMATIONSABENDE für die 5. Klasse 2022/2023 am Montag, 15. November 2021, 19 Uhr und Dienstag, 25. Januar 2022, 19 Uhr. Intensive Beratung und Vorbereitung auf den Übertritt ins Gymnasium.

60 JAHRE SEIT 1959

KLEINES PRIVATES LEHRINSTITUT
DERKSEN
GYMNASIUM
SPRACHLICH • NATURWISS.–TECHNOLOG.
STAATL. ANERKANNT • GEMEINN. GMBH

Pfingstrosenstraße 73 • 81377 München
Telefon 089/780707-0 • Fax 089/780707-10

Abbildungen: Deutsches Museum; Heike Geigl

Die Welt der Technik in 100 Objekten

Sammlungsstücke aus dem Deutschen Museum.

Im Verlag C. H. Beck erscheint am 12. Mai ein neues Buch, das die Welt der Technik in 100 Objekten erklärt. Mit Sammlungsstücken aus dem Deutschen Museum wird darin gezeigt, wie Technik und Wissenschaft die Menschheitsgeschichte im vergangenen halben Jahrtausend geprägt haben. Von der spätmittelalterlichen Inkunabel bis zum modernen mRNA-Impfstoff reicht die Bandbreite der Objekte, die hier porträtiert sind. Sie stammen aus den Beständen der Bibliothek, des Archivs sowie der Ausstellungen und repräsentieren einen Querschnitt aus sämtlichen 54 Fachabteilungen, zu welchen im Deutschen Museum historisch Bedeutendes gesammelt wird.

Entstanden ist ein 686 Seiten starker Band mit 290 Abbildungen und interessanten und unterhaltsamen Geschichten von Dingen, die wiederum ein Stück der Geschichte der Menschheit erzählen. Technik, die die Welt verändert hat: Über die Bedeutung des ersten Autos, das mit Benzin betrieben wurde, oder die Entdeckung der Röntgenstrahlen gibt es da wohl kaum einen Zweifel. Aber eine Tasche aus Getränkeverpackungen? Ein Cembalo? Eine Schreibmaschine? In *Die Welt der Technik in 100 Objekten* steht das alles gleichberechtigt nebeneinander. Das Buch, das in Zusammenarbeit mit dem Verlag C. H. Beck erscheint, zeigt Technik und Wissenschaft in ihrem Zusammenspiel mit Mensch, Natur und Kultur anhand von ausgewählten Sammlungsstücken aus dem Deutschen Museum.

»Am schwierigsten war es natürlich, diese Auswahl zu treffen«, sagt Wolfgang M. Heckl, Generaldirektor des Deutschen

Museums und Herausgeber des neuen Buches. Das Deutsche Museum zählt mehr als 120 000 Objekte in seiner Sammlung (wovon nur etwa 25 000 ausgestellt sind). Dazu kommen knapp eine Million Bände in der Bibliothek und 4,7 Regalkilometer, die mit Archivmaterial gefüllt sind. »Aus diesem reichhaltigen, riesigen und wertvollen Fundus mussten wir 100 Dinge herausfiltern, die die Welt der Technik der letzten fünfhundert Jahre und zugleich die große Vielfalt unseres Hauses repräsentieren.« Dabei wurden immer wieder Objekte verworfen, neue aufgenommen und bis zuletzt wieder gestrichen. So ist ein reich bebilderter Band entstanden, der Originale, Nachbauten, Archivalien, Bücher, Modelle, Dioramen und Inszenierungen beinhaltet, die Historie der Instrumentalmusik des 16. Jahrhunderts genauso abbildet wie die Robotik des 21. Jahrhunderts, das Leeuwenhook'sche Mikroskop neben den Fischerdübel stellt.

»Glücklicherweise hatten wir einen sehr kompetenten Redaktionsbeirat, der die Auswahl inhaltlich begleitet hat«, sagt Herausgeber Heckl. Daneben möchte er sich aber auch ausdrücklich bei den knapp 70 beteiligten Autorinnen und Autoren bedanken: »Wie grundsätzlich im Deutschen Museum, machen auch hier die Beiträge von Kolleginnen und Kollegen aus wirklich allen Bereichen – von der Kuratorenschaft über den Ausstellungsdienst und die Werkstätten bis zum Forschungsinstitut – dieses Buch so einzigartig und abwechslungsreich.«

In chronologischer Reihenfolge – vom Poeticon Astronomicon aus dem Jahr 1482 bis zum COVID-19-Impfstoff von 2021 – stellen die Expertinnen und Experten jedes einzelne Objekt auf mehreren Ebenen vor: Was zu seiner Erfindung führte; für welche Zeit es geschaffen wurde; wie es die Beziehung des Menschen zur Wirklichkeit und nicht zuletzt diese Wirklichkeit selbst verändert hat; wie sein Lebenslauf aussah und schließlich auch, auf welchen Wegen es ins Deutsche Museum fand. Die Texte sind kein trockener Fachlesestoff, sondern schlüsseln die Relevanz der 100 Dinge für unser aller Leben mit zahlreichen unterhaltsamen Zitaten und Anekdoten auf. »Dabei wird so mancher falsche Mythos entlarvt genauso wie es faszinierende Neuigkeiten zu entdecken gibt«, verspricht Mitautor Wolfgang Heckl.

Abbildungen: Deutsches Museum

»Die Welt der Technik in 100 Objekten«
Herausgegeben von Wolfgang M. Heckl
Im Verlag C.H.Beck
686 Seiten mit
290 Abbildungen
Gebunden, Format 17 x 24 cm
ISBN 978-3-406-78314-2
39,95 EUR

Vom Cembalo (oben) bis zum COVID-19-Impfstoff reicht die Bandbreite der Objekte, die im neuen Buch vorgestellt werden.

Mitglieder sehen mehr

Das neue Museum
Exklusiv für unsere Mitglieder gibt es einen Mitgliedertag zur Eröffnung

Endlich ist es soweit. Anfang Juli wird die generalsanierte Hälfte des Museums wiedereröffnet.

Ein erstes Bild vom »neuen« Museum konnten Sie sich ja schon im letzten Heft machen. Jetzt bieten wir unseren Mitgliedern die Chance, die 20 neuen und erneuerten Ausstellungen vor allen anderen Besucherinnen und Besuchern live zu sehen und zu erleben.

Am 8. Juli 2022 von 12 bis 20 Uhr öffnet das neue Deutsche Museum exklusiv nur für Mitglieder.

Lassen Sie sich vom modernsten Deutschen Museum aller Zeiten überraschen! Es gibt viel Neues zu entdecken und ein Wiedersehen mit alten Lieblingen in neuem Glanz.

Die genauen Termine lagen zum Zeitpunkt des Redaktionsschlusses noch nicht verbindlich vor. Informieren Sie sich daher bitte aktuell auf unserer Homepage! Geplant ist eine Anmeldung über Online-Freitickets.

Eine Anmeldung ist erforderlich!

Nähere Informationen finden Sie ab Ende Juni im Online-Ticketshop des Museums: tickets.deutsches-museum.de

Natürlich wird es auch ein kleines Karten-Kontingent vor Ort geben – für Mitglieder ohne Internet-Anschluss.

www.deutsches-museum.de

Unser Tipp:
Melden Sie sich über den Mitgliederservice zum monatlichen Newsletter an, dann bleiben Sie immer auf dem Laufenden!

www.deutsches-museum.de/museum/engagement

Mit 0,0 km/h über die Autobahn

Bis 31. Oktober 2022: Sonderausstellung »Auto Land Scape« im Verkehrszentrum des Deutschen Museums mit Fotografien von Michael Tewes

A 6, Silberbach: Eine Komposition aus Linien und Flächen, das blaue Mobiliar auf einem Rastplatz.

Die Autobahn ist das größte zusammenhängende Bauwerk Deutschlands. Über knapp 13 200 km erstreckt sich das Netz in allen Richtungen über die Bundesrepublik. Der Fotograf Michael Tewes hat diese Verkehrsadern in einem sechsjährigen Projekt aus einer ungewohnten Perspektive ins Visier genommen. Das, was man normalerweise im schnellen Vorbeifahren kaum aus den Augenwinkeln wahrnimmt, rückt er mit seiner Serie »Auto Land Scape« in den Fokus – von der Kuhherde unter der Brücke über das Wäldchen zwischen den Trassen bis zu den Sportwagen auf dem Transporter. Die Bilder sind jetzt in der gleichnamigen Sonderausstellung im Verkehrszentrum des Deutschen Museums zu sehen.

Michael Tewes bezeichnet sich selbst als »Autobahn-Native«. Der Fotograf und Künstler lebt heute in Berlin, aufgewachsen ist er Anfang der 1970er-Jahre in Remscheid. »Die Stadt hatte eine Weile den Marketingclaim Remscheid – 1a an der A1!«, erzählt Tewes. Über sein Langzeitprojekt »Auto Land Scape«

Abbildungen: Michael Tewes; Deutsches Museum

Bild linke Seite: An den Lärm scheinen sie sich gewöhnt zu haben: Kühe unter einer Autobahnbrücke. Die Autobahn ist das größte zusammenhängende Bauwerk in Deutschland.

wollte sich der Künstler zum einen seiner Heimat nähern: »Es gibt niemanden, der in einem Autoland wohnt und nicht irgendeine persönliche Verbindung oder Erlebnisse mit diesem Bauwerk hat.« Zum anderen geht es ihm aber auch darum, »durch das Innehalten, der Autobahn etwas hinzuzufügen, das beim schnellen Fahren – wofür sie ja eigentlich gebaut ist – verloren geht«.

Bei 0 km/h werden plötzlich sonst unsichtbare Details sichtbar, bieten sich unerwartete Szenerien, An- und Einblicke. »Man kann beim Fahren auf der Autobahn ja eigentlich nichts spontan entdecken, weil man dann schon vorbeigefahren ist«, sagt der Fotograf. Und so ist er mit seinem VW-Bus immer wieder stehen geblieben, hat sich bewusst Orte ausgesucht, die Aufnahmen geplant und sorgfältig vorbereitet. Dabei sind in den Jahren von 2014 bis 2021 ungewöhnliche, weil ungewohnte Anblicke entstanden. Wie die Kuhherde, die unter der Autobahnbrücke Schutz gesucht hat. Die kleine Baumgruppe, die sich zwischen die zwei weit gespannten, kolossalen Betontrassen duckt. Oder die knallbunten Sportflitzer, die sich wie Spielzeuge auf einem Transporter vor einem tiefblauen Nachthimmel stapeln.

»Die Bilder regen dazu an, den Blick neu auszurichten«, sagt Lukas Breitwieser, Kurator im Verkehrszentrum. »Das ist auf eine gewisse Art so, wie mit den Ausstellungsstücken in unserem Museum: Dadurch, dass die Autos, die Loks, die Fahrräder hier stehen, sich nicht bewegen, kann man sie anders betrachten und wahrnehmen, als im Einsatz auf der Straße oder der Schiene.« Und mit den Fotografien von Michael Tewes erweitert das Verkehrszentrum den Blick auf die Mobilität. »Hier rückt jetzt das Bauwerk Autobahn in den Mittelpunkt«, sagt Kurator Lukas Breitwieser.

Das Cover des Bildbands *Auto Land Scape.*

»Auto Land Scape«
ist bis zum 31. Oktober 2022 im Verkehrszentrum des Deutschen Museums zu sehen. Parallel zur Sonderausstellung ist bei Hatje Cantz ein gleichnamiger Bildband erschienen.
ISBN 978-3-7757-5170-4

Museum to go

Das unterhaltsame Gedächtnisspiel für alle Museumsfreunde **Von Kathrin Mönch**

Vom berühmten Kernspaltungstisch bis zum Automatenmönch, von der Tante Ju bis zum Raketenschlitten – ein neues Memo-Spiel aus dem Deutschen Museum lädt dazu ein, die neuen Ausstellungen spielerisch zu erkunden.

»Museum to go« heißt das Spiel und fordert so auf, das Deutsche Museum mit nach Hause zu nehmen und mehr über die neuen Ausstellungen zu erfahren. Dafür sorgt nicht zuletzt ein Begleitheft, in dem jedes gezeigte Objekt beschrieben wird. Damit das Spiel etwas kniffliger ist, sind die Motive der Kartenpaare nicht identisch. Stattdessen ist jeweils auf der einen Karte das Objekt im Ganzen abgebildet und auf der zugehörigen zweiten Karte ein spannendes Detail des Objekts. Die Spieler müssen sich dadurch intensiver mit den Objekten, ihrer Materialität und ihren Besonderheiten auseinandersetzen.

Das kompakt gehaltene Spiel enthält 32 Bildpaare im Format 60 × 60 mm sowie ein Begleitheft mit interessanten Hintergrundinformationen zu den Motiven auf Deutsch und Englisch. Im Handel kostet das Spiel 12,50 Euro. Entstanden ist es mit freundlicher Unterstützung durch den Freundes- und Förderkreis Deutsches Museum e.V.

Eine gute Technik zu gewinnen ist übrigens, sich die umgedrehten Karten als Weltkarte vorzustellen, so dass jede Karte einem ganz bestimmten Land entspricht. Also, los geht's und viel Spaß beim Spielen!

Museum to go
Memo-Spiel mit 32 ungleichen Paaren
Deutsches Museum 2022
12,50 EUR
ISBN 978-3-948808-05-1

Deutsches Museum Bonn – 1. Teileröffnung:

Mission Künstliche Intelligenz

Der erste Teil der neuen interaktiven Ausstellungsräume im Deutschen Museum Bonn wurde Ende März 2022 eröffnet. Im Rahmen einer Feierstunde am 29. März begrüßte der Generaldirektor des Deutschen Museums, Prof. Dr. Wolfgang M. Heckl, die Ehrengäste: Prof. Dr. Andreas Pinkwart, Wirtschafts- und Innovationsminister des Landes Nordrhein-Westfalen, Melanie Grabowy, Bonns 1. Bürgermeisterin, Sebastian Schuster, Landrat des Rhein-Sieg-Kreises, Andreas Münch vom Förderverein WISSENschaf(f)t SPASS und Johannes Schlarb von der Deutsche Telekom Stiftung.

Wirtschafts- und Innovationsminister Andreas Pinkwart freute sich über die gelungene, vom Land NRW maßgeblich geförderte Neuausrichtung des Museums und zeigte sich beeindruckt, was das kleine, aber hochkreative Team von Museumsleiterin Dr. Andrea Niehaus unter den erschwerten Bedingungen der Coronapandemie auf die Beine gestellt hat. Er sagte: »Das Deutsche Museum Bonn ist auf dem Weg zum zentralen Forum für Künstliche Intelligenz ein großes Stück vorangekommen und zeigt eindrucksvoll, wie die so wichtige Schlüsseltechnologie leichtverständlich vermittelt werden kann. Für mich ist klar: Wir brauchen viel mehr solcher Begegnungsräume, um in den gesellschaftlichen Dialog über Chancen und Herausforderung von Künstlicher Intelligenz zu treten. Das Deutsche Museum Bonn leistet hier einen wichtigen Beitrag für den gesamten Innovationsstandort Nordrhein-Westfalen und zeigt, wie die Wissenschaftskommunikation von heute aussehen kann.«

Generaldirektor Heckl schaute positiv gestimmt auf die Haushaltsgespräche mit der Stadt Bonn, um auch hier gemeinsam die Weichen für die Zukunft zu stellen. »Wir begeistern seit jeher Menschen dafür, die Zukunft mitzugestalten. Die Bonner Mission KI geht deshalb genau den richtigen Weg: Wir zeigen Menschen die Technologien der Zukunft schon heute, fördern das Verstehen dieser Technologien und damit auch den gesellschaftlichen Dialog darüber. Was mit Künstlicher Intelligenz in Zukunft möglich wird, gehört für mich zu den spannendsten Themen überhaupt – und genau das vermittelt die neue Ausstellung im Deutschen Museum Bonn.«

In mehreren Projektetappen entsteht seit 2020 in den Museumsräumen an der Ahrstraße ein dynamischer, interaktiver Ort der Vermittlung rund um das Zukunftsthema Künstliche Intelligenz. Mit dem neuen »Erlebnisraum KNN« (Künstliche Neuronale Netze) und dem »KI:osk« für Kinder und Familien wurden nun zwei weitere Bereiche fertiggestellt, in denen Museumsgäste auf Tuchfühlung mit der Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts gehen können. Im bereits im Vorjahr eröffneten »Erlebnisraum KI« (Künstliche Intelligenz) können zudem neue Exponate bestaunt werden.

Diese jüngsten Meilensteine auf dem Weg zum zentralen Forum für Künstliche Intelligenz in Nordrhein-Westfalen feierte das Team von Museumsleiterin Dr. Andrea Niehaus am 29. März gemeinsam mit den namhaften Partnern und Unterstützern des ambitionierten Projekts. Das Digitalkonzept des Landes NRW, neue Wege in der Wissenschaftskommunikation und die Schlüsselrolle des Deutschen Museums Bonn bildeten die Themenschwerpunkte der interessanten Redebeiträge und Diskussionsrunden des von Prof. Dr. Jens Böcker (Hochschule

Der neue Erlebnis- und Erfahrungsraum »KI:osk« bietet vor allem Kindern und Familien einen spielerischen Einstieg in die Themen Digitalisierung und Künstliche Intelligenz.

Wie denkt ein Künstliches Neuronales Netzwerk? Im neuen »Erlebnisraum KNN« verdeutlicht eine Großinstallation auf unterhaltsame Weise, was sich hinter dem Begriff »Deep Learning« verbirgt.

Abbildungen: Lichtenscheidt/Deutsches Museum Bonn

Bonn/Rhein-Sieg) moderierten Festakts, der als hybride Veranstaltung zusätzlich live im YouTube-Kanal des Deutschen Museums übertragen wurde.

Bürgermeisterin Grabowy und Landrat Schuster betonten die Bedeutung des Deutschen Museums Bonn für die Bildungs- und Wissenschaftsregion Bonn/Rhein-Sieg. »Neuausrichtung und Ausweitung der Aktivitäten passen hervorragend zum regionalen Bedarf und stärken die Bedeutung der Einrichtung als Lernwerkstatt und Netzwerkpartner der Wissens- und Wirtschaftsregion«, sagte Melanie Grabowy.

»Das Deutsche Museum Bonn ist eine zukunftsorientierte Wissenswerkstatt mit überregionaler Strahlkraft«, hob Sebastian Schuster hervor. »Es begeistert alle Altersklassen, jedoch insbesondere junge Menschen, durch Erleben und Entdecken für MINT-Themen und weckt nachhaltiges Interesse bis hin zur Berufswahl.«

Vollumfänglich von Beginn an unterstützt hat der Förderverein WISSENschaf(t)t SPASS die Neuausrichtung. Andreas Münch aus dem Vorstandsteam brachte sich auch aktiv in den Abend ein, denn: »Als Schlüsseltechnologie der Digitalisierung wird das Thema KI unsere Gesellschaft vor noch nie dagewesene technologische und kulturelle Herausforderungen stellen. Die Menschen in unserer Region benötigen eine zentrale Anlaufstelle, in der diese Entwicklung mit ihren Chancen und Risiken publikumsattraktiv und verständlich vermittelt wird. Es ist auch wichtig, jungen Menschen eine berufliche Perspektive im Bereich KI aufzuzeigen um dem Fachkräftemangel entgegenzuwirken.«

Im gleichen Atemzug kündigte Münch die Gründung eines Experten-Kreises zum Thema Künstliche Intelligenz durch WISSENschaf(f)t SPASS an, der dem Team des Deutschen Museums Bonn zukünftig fachlich zur Seite stehen wird.

Diese Unterstützung freut Museumsleiterin Niehaus und ihr Team sehr, denn über die Beratung hinaus will der Expertenkreis die enge Vernetzung des Museums mit Partnern aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik mit Nachdruck unterstützen. »Der Expertenkreis wird ein wichtiger Baustein unseres Konzeptes sein und helfen, unserem Anspruch gerecht zu werden, ein lebendiges Forum für Künstliche Intelligenz zu sein.«

Das Konzept des Museums setzt vor allem auf die aktive Einbeziehung aller Beteiligten. So entwickeln sich auch die Ausstellungsräume unter Einbeziehung des Publikums und im Austausch und in Kooperation mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft stetig weiter. Statt einer statischen Dauerausstellung in Vitrinen erwartet die Besucherinnen und Besucher eine sich ständig verändernde Exponatauswahl, die die Dynamik des technologischen Fortschritts möglichst aktuell abbilden will. »Die Digitalisierung, speziell Künstliche Intelligenz, ist ja kein vorübergehender Trend«, so Museumsleiterin Andrea Niehaus. »Hier werden permanent neue Innovationen und Entwicklungen hervorgebracht, deren Chancen und Risiken jeden betreffen. Diese Veränderungen werden wir im Dialog mit der Öffentlichkeit begleiten.«

Besonders im Mittelpunkt stehen natürlich die Besucherinnen und Besucher. Speziell ausgebildete »Museotainerinnen« und »Museotainer« sowie neue Bildungsprogramme für Groß und Klein sorgen für ein handlungs- und dialogorientiertes Museumserlebnis, das die Museumsgäste aktiv in die Vermittlung und in die Diskussion rund um die Künstliche Intelligenz einbezieht.

Die Übertragung des Festakts zur Eröffnung des 1. Teilabschnitts der »Mission KI« ist online unter folgendem Link im Kanal des Deutschen Museums zu sehen: **youtu.be/3YN0Xz66v8Q**

Liebesbeweis

Von Daniel Schnorbusch, Illustration: Rosa Süß

Es hätte nicht viel gefehlt und ich wäre der Länge nach hingeschlagen. Ich bekam gerade noch die Stehlampe zu fassen, um mich festzuhalten. Die Lampe schwankte bedenklich. Ich zog an der Kordel des Zugschalters, das Licht flammte auf und ich sah die Bescherung. Meine Füße steckten in einem dichten Gewebe aus Wollfäden, Paketschnüren, Geschenkbändern, Bindfäden aller Art, die sich zwischen Stuhl- und Tischbeinen, Möbelfüßen, Lampen, Regalstützen und dem Papierkorb spannten. Ein dichtes, chaotisches Netz, ein Kreuz und Quer von Fallstricken, wenige Zentimeter über dem Boden.

»Mr. Fynch!!« Ich rief nach dem Kater.

»Fynch!!« Aber der Kater ließ sich nicht blicken.

»Mr. Fynch!!« – – –

»Ave Caesar! Increpitus te salutat!«, hörte ich es hinter mir. Fynch hockte im Türrahmen, leckte sich die Pfote und schaute amüsiert auf meine Lage.

»Fynch, was ist das hier? Was soll das? Ich hätte mir den Hals brechen können!«

»Man tappt ja auch als Mensch nicht einfach so in dunkle Räume! Immer schön das Licht vorher anmachen! Du bist ja keine Katze!«

»Das ist mein Arbeitszimmer!«, sagte ich, »darin finde ich mich auch noch im Stockfinstern mühelos zurecht.«

»Soso, aha. Dafür hast du dich allerdings ziemlich heftig verheddert.«

»Ja, wie das nur kommt?! Sabotage! Was hast du dir dabei gedacht?!«

»Nun, was Du hier siehst und worin du dich hier aufs Schönste verstrickt hast, das ist mein kleiner, bescheidener Beitrag für die diesjährige Biennale in Venedig. Besser gesagt: der erste Entwurf davon.«

»Biennale?? Bist du übergeschnappt? Seit wann stellen Katzen in Venedig Kunst aus?«

»Aber immer schon, du Ignorant! Seit jeher! Die ganze Stadt steht schließlich unter der Schirmherrschaft eines meiner Cousins!«

»Was denn für ein Cousin?? Du hast wahrscheinlich tausende Cousins!«

»Genau! Und einer von denen ist etwas größer und hat goldene Flügel!«

»Der Markuslöwe soll dein Cousin sein??«

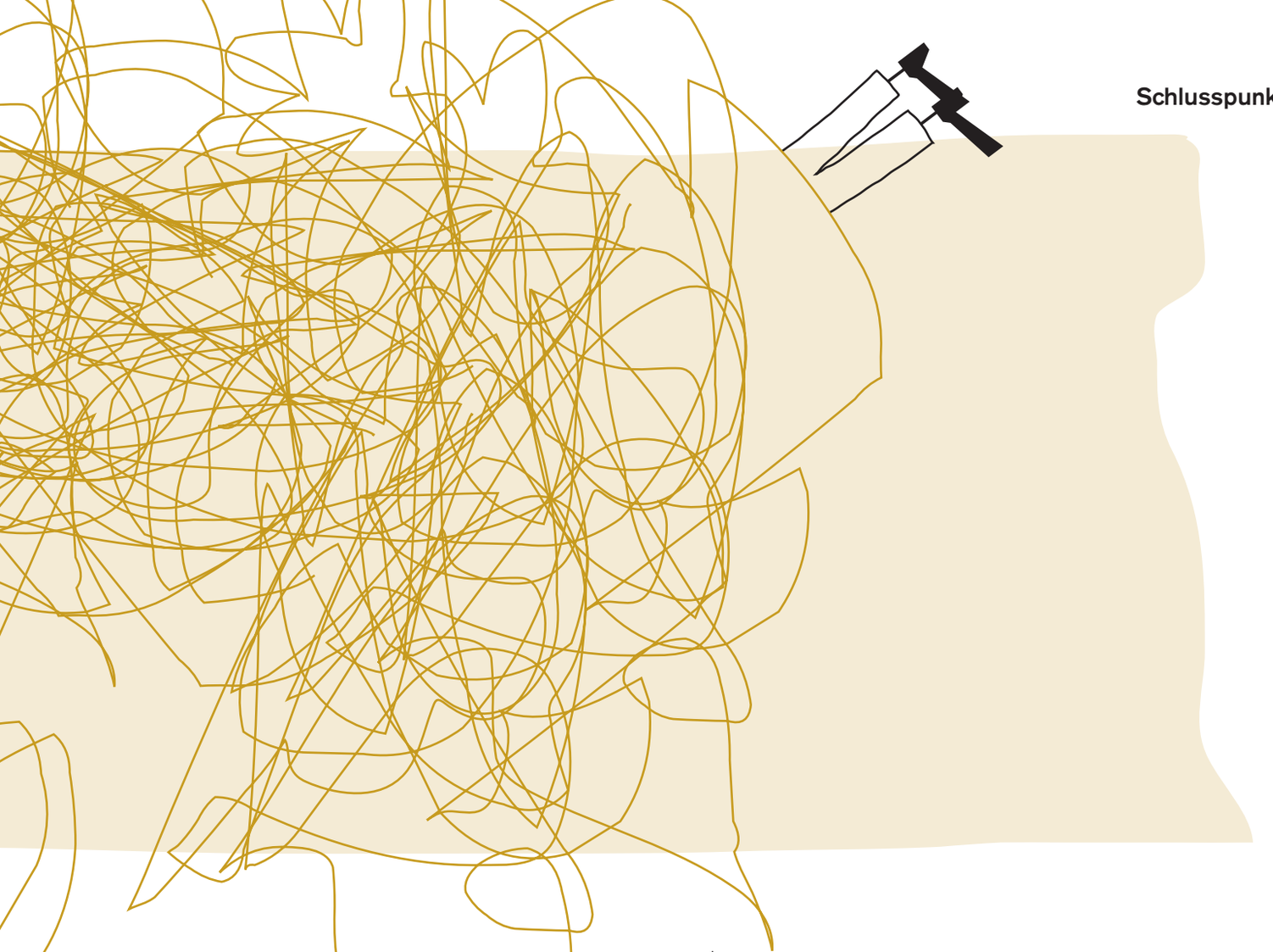
»Aber klar! – Wir Katzen sind letztlich eine einzige große Familie! Wir sind alle Cousins und Cousinen voneinander. Aber davon verstehst du nichts. Bei Euch endet Familie ja spätestens dort, wo die Erbansprüche beginnen.«

»Und wie kommst du auf diese Katzen-Biennale, wer hat dich dazu eingeladen?«

»Wieso eingeladen? Ich geh da einfach hin. Jeder ist willkommen! Wir Katzen sind Demokraten! Für euch gibt's ja immer nur diese paar elitären Pavillons. Aber für uns gibt es das ganze Venedig hinter den Fassaden, das unsichtbare Venedig, das Venedig der Keller und Katakomben, der Speicher und Remisen, der Abstellkammern und Zisternen, der Friedhöfe und Mausoleen. Meine Arbeit, auf der du da gerade herumtrampelst, trägt übrigens den Titel *Amicitia – Freundschaft*.«

»Aha. Freundschaft. Schöne Freundschaft das, – die mit einem Genickbruch enden kann.«

»Du übertreibst! Das war so nicht geplant. Das dichte Geflecht



aus Verbindungen zwischen den Knoten und Kreuzungspunkten symbolisiert die Zusammengehörigkeit, die Sympathie, das Aufeinander-angewiesen-sein, die Hilfe, die man sich unter Freunden selbstlos gewährt. Die Fäden aus unterschiedlichen Materialien sind zugleich Ausdruck für die unterschiedliche Festigkeit und Intensität der Verbindungen. Wolle beispielsweise ist ja ein eher schwaches Material, aber dieses Paketband zum Beispiel…« Mr. Fynchs Monolog nahm überhaupt kein Ende. Er redete sich in Fahrt, sprach von weltumspannenden Verbindungen zwischen den Individuen, davon, dass alles mit allem irgendwie zusammenhänge, dass allein schon der Gedanke individueller Autonomie eine einzige Chimäre sei. Das Individuum sei nichts, das Kollektiv alles! Ich sagte:

»Mein lieber Mr. Fynch, man kann das ganze Geflecht hier zwischen meinen Beinen auch ganz anders deuten. Als Symbol der Abhängigkeiten, der Verstrickungen, der Bedingtheiten. Als Symbol der Fesselung des Einzelnen, als Symbol der Ohnmacht und der Unterwerfung des Menschen unter undurchsichtige Mächte! Dieses Strickwerk kann eigentlich nur als Aufschrei gedeutet werden! Als Aufforderung, den gefesselten Menschen endlich wieder zu befreien!«

Fynch sah mich durchdringend an. Ich hatte ihn offenbar etwas aus der Fassung gebracht. Er dachte anscheinend intensiv nach, während mich sein Blick durchbohrte.

»Nein, nein«, widersprach er schließlich, »dieses Werk, ist allein ein Ausdruck der Freundschaft! Vor allem der Freundschaft zwischen mir und dir! Um nicht zu sagen, der Liebe zwischen dir und mir!«

»Liebe zwischen mir und dir?«

»Genau! Das trifft es am besten! Deiner Liebe zu mir! Ich weiß, du hast dir das bisher nicht eingestanden. Du bist schüchtern. Zurückhaltend. Auch ein bisschen verklemmt! Aber das kann man ändern! Du musst dich nur ein wenig öffnen! Loslassen! – Losfahren!«

»Ich soll mich öffnen? Loslassen? Losfahren? Wieso überhaupt losfahren?«

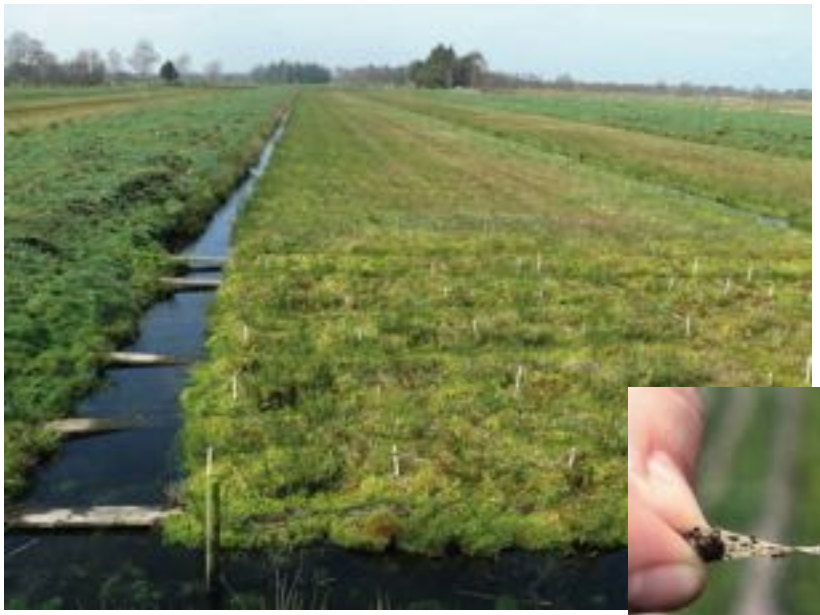
»Naja,« Mr. Fynch räusperte sich leise, »du sollst losfahren, um mir deine Liebe zu zeigen.«

»Ich soll losfahren, um dir meine Liebe zu zeigen?? Was ist das denn für eine Idee? Und wohin, bitte, soll ich da losfahren?«

»Da sind wir jetzt genau beim richtigen Punkt«, sagte Fynch und sprang mir mit einem Satz auf die Schulter. Er flüsterte nur noch. Seine Schnurrbarthaare kitzelten meine Wangen. »Venedig«, schnurrte er, »Venedig«. Seine Stimme war nur noch ein Hauchen. »Du musst nur mit mir und meinem Kunstwerk nach Venedig fahren. Das ist alles. Das wäre der ganz bescheidene Beweis deiner Liebe!« ▮▮

Dr. Daniel Schnorbusch
geboren 1961 in Bremen, aufgewachsen in Hamburg, Studium der Germanistischen und Theoretischen Linguistik, Literaturwissenschaft und Philosophie in München, ebendort aus familiären Gründen und nicht mal ungern hängengeblieben, arbeitet als Lehrer, Dozent und freier Autor.

Vorschau Ausgabe 3/2022 erscheint Anfang November 2022



Nur noch 5 Prozent der Moorlandschaften in Deutschland sind intakt. Das soll sich ändern. Ein Schritt könnte die Nutzung von Moosen statt Torf sein.

Aus russischem Löwenzahn kann man Kautschukersatz gewinnen.

Ersatzstoffe

Zement, fossile Rohstoffe, Plastik … das sind nur drei von zahlreichen Produkten, die einem einfallen, wenn es um das Thema »Ersatz« geht. Aufgrund politischer, wirtschaftlicher, sozialer oder ökologischer Notlagen mussten Gesellschaften im Laufe der Geschichte immer wieder nach Alternativen suchen. Ein relativ aktuelles und weltweit gelungenes Beispiel ist der Ersatz von Fluorkohlenwasserstoff in Kühlschränken.

Die Suche nach Ersatz für Stoffe, die aus unterschiedlichen Gründen als problematisch erkannt wurden oder die beispielsweise aufgrund einer Katastrophensituation nicht mehr verfügbar sind, hat Forschende immer schon inspiriert und beflügelt. Unsere AutorInnen nehmen Sie mit zu einem Ausflug in die Geschichte und berichten über spannende aktuelle Projekte.

Es grüßt Sie herzlich
Sabrina Landes

Impressum

Das Magazin
aus dem Deutschen Museum

46. Jahrgang

Herausgeber: Deutsches Museum München
Prof. Dr. Wolfgang M. Heckl
Museumsinsel 1, 80538 München
Postfach 80306 München
Telefon (089) 2179-1
www.deutsches-museum.de

Gesamtleitung: Dr. Kathrin Mönch (Deutsches Museum)
Dr. Stefan Bollmann (Verlag C.H.Beck, verantw.)

Redaktionsleitung: Sabrina Landes | publishNET, Redaktion: Hannah Schnorbusch, Grafik: Birgit Schwintek, Illustrationen: Rosa Süß,; redaktion@publishnet.org

Verlag: Verlag C.H.Beck oHG, Wilhelmstraße 9, 80801 München; Postfach 400340, 80703 München, Telefon (089) 381 89-0, Telefax (089) 381 89-398, www.chbeck.de

Redaktioneller Beirat: Dr. Frank Dittmann (Kurator Energietechnik, Starkstromtechnik, Automation), Gerrit Faust (Leiter Presse- und Öffentlichkeitsarbeit), Dr. Kathrin Mönch (Deutsches Museum Verlagsleitung), Dr. Christian Sicka (Kurator Astronomie, Planetarium, Atomphysik,Zeitmessung), Prof. Dr. Elisabeth Vaupel (Forschungsinstitut)

Herstellung: Bettina Seng, Verlag C.H.Beck oHG

Anzeigen: Bertram Mehling (verantw.), Verlag C.H.Beck oHG, Anzeigenabteilung, Wilhelmstr. 9, 80801 München; Postfach 400340, 80703 München; Disposition, Herstellung, Anzeigen, technische Daten: Telefon (089) 381 89-609, Telefax (089) 381 89-589. Zurzeit gilt Anzeigenpreisliste Nr. 38.

Repro: Rehmbrand Medienservice GmbH, Hauptstraße 1, 82008 Unterhaching

Druck, Bindung und Versand: Holzmann Druck GmbH & Co. KG, Gewerbestraße 2, 86825 Bad Wörishofen

Bezugspreis 2022: Jährlich 29,– Euro
Einzelheft 8,90 Euro, jeweils zuzüglich Versandkosten

Weitere Informationen: Deutsches Museum, Mitgliederservice, Museumsinsel 1, 80538 München, Telefon (089) 2179-310, mitgliederinfo@deutsches-museum.de, www.deutsches-museum.de/mitgliederservice

Für Mitglieder der Georg-Agricola-Gesellschaft zur Förderung der Geschichte der Naturwissenschaften und der Technik e.V. ist der Preis für den Bezug der Zeitschrift im Mitgliedsbeitrag enthalten. Weitere Informationen: Georg-Agricola-Gesellschaft, Institut für Wissenschafts- und Technikgeschichte, TU Bergakademie Freiberg, 09596 Freiberg, Telefon (03731) 393406

Bestellungen von Kultur & Technik über jede Buchhandlung und beim Verlag. Abbestellungen mindestens sechs Wochen vor Jahresende beim Verlag.

Abo-Service: Telefon (089) 381 89-679

*****

Die Zeitschrift erscheint drei Mal im Jahr. Sie und alle in ihr enthaltenen Beiträge und Abbildungen sind urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes bedarf der Zustimmung des Verlags. Der Verlag haftet nicht für unverlangt eingesandte Beiträge und Bilddokumente. Die Redaktion behält sich vor, eingereichte Manuskripte zu prüfen und ggf. abzulehnen. Ein Recht auf Abdruck besteht nicht. Namentlich gekennzeichnete Beiträge geben nicht die Meinung der Redaktion wieder.

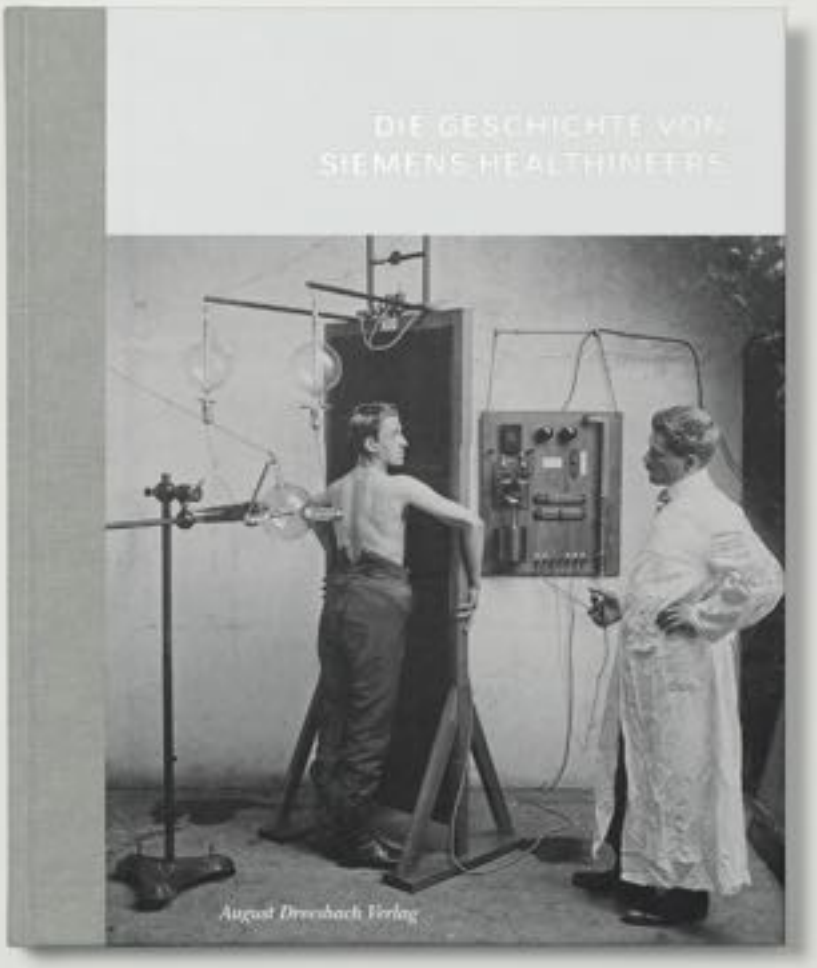
ISSN 0344-5690

myclimate klimaneutral produziert
www.chbeck.de/nachhaltig

Abbildungen: Deutschland, Land der Ideen/Presse; wikimedia

175 Jahre in Bildern

Ein Buch erzählt die Geschichte von Siemens Healthineers.



Das Unternehmen Siemens Healthineers blickt auf eine lange und erfolgreiche Geschichte zurück, deren Anfänge in der Mitte des 19. Jahrhunderts liegen. Auf knapp 230 Seiten entfaltet sich das Panorama der spannenden Historie der Siemens Medizintechnik

Das Buch ist im August Dreesbach Verlag in München erschienen und ist ab sofort auf Deutsch und Englisch in allen Buchläden und online bestellbar.

Siemens Healthineers ist Mitglied im Freundes- und Förderkreis Deutsches Museum e. V. und unterstützt die neugestaltete Dauerausstellung „Gesundheit“.

Die Geschichte von Siemens Healthineers ISBN:
978-3-96395-029-2

The History of Siemens Healthineers ISBN:
978-3-96395-030-8

SIEMENS Healthineers

STUDIO43

LEBENSRAUM KÜCHE

VOLLER IDEEN UND LEIDENSCHAFT FÜR IHREN TRAUM

STUDIO43 GmbH

089 / 890 577 45

info@kuechenstudio43.de

kuechenstudio43.de

Rempp KÜCHEN · DORNBRACHT · V-ZUG Schweizer Perfektion für zuhause · next125 · GAGGENAU · LACANCHE · Miele IMMER BESSER