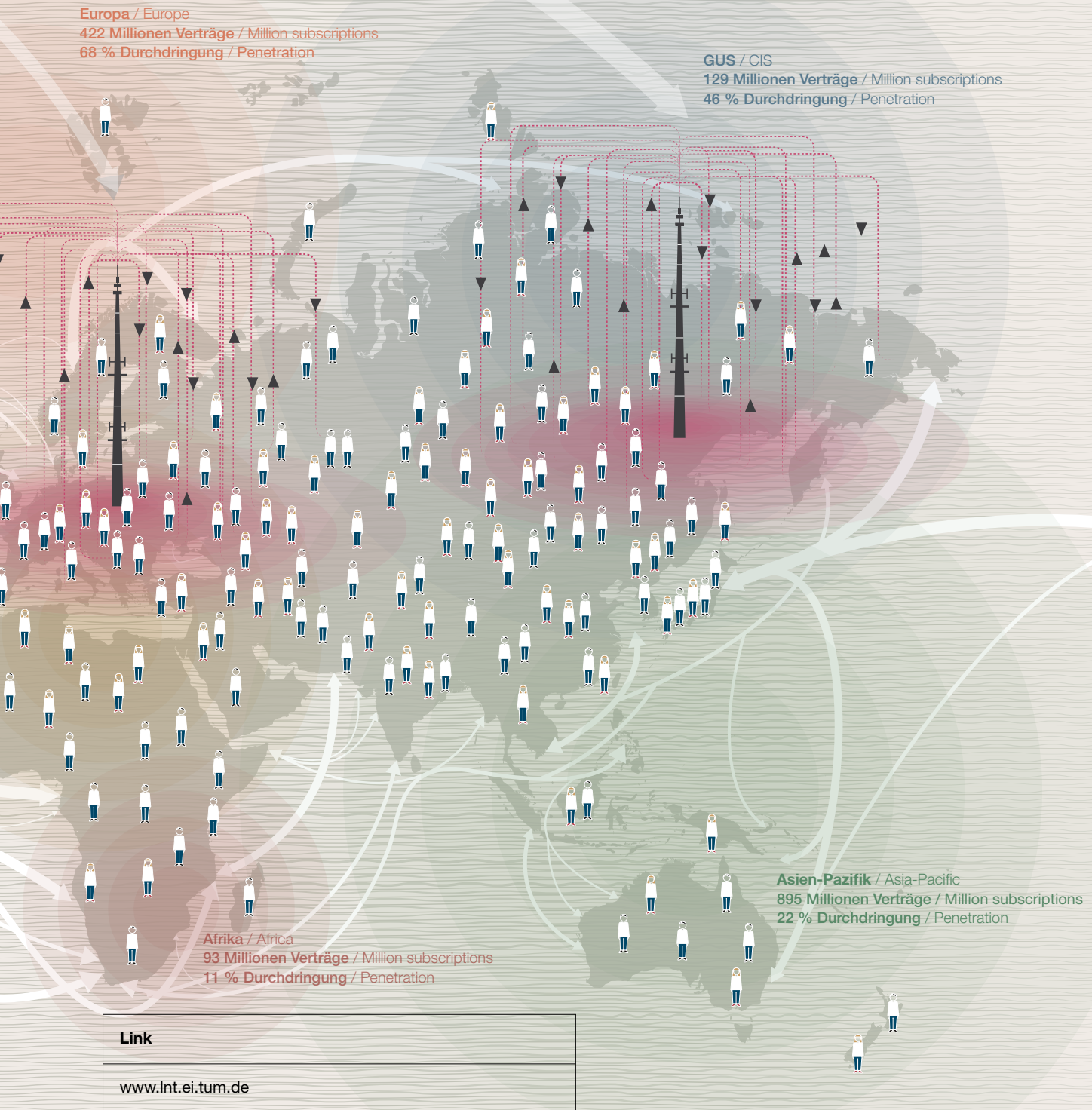


Amerika / America
460 Millionen Verträge / Million subscriptions
48 % Durchdringung / Penetration

Arabische Länder / Arab States
71 Millionen Verträge / Million subscriptions
19 % Durchdringung / Penetration

Einfache Formeln mit enormen Auswirkungen

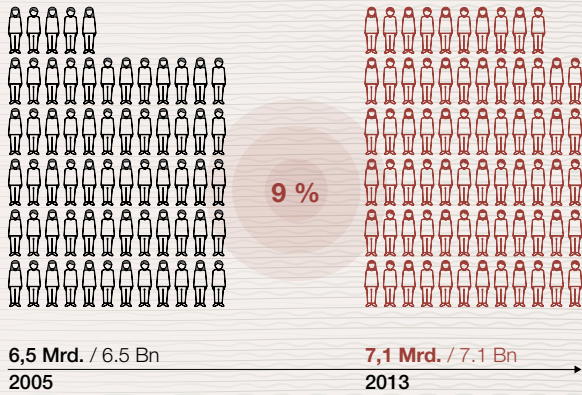
Wie lassen sich Nachrichten noch zuverlässiger übermitteln sowie Übertragungsmedien effizienter nutzen? Und wie können wir die Methoden zur Speicherung von Nachrichten und damit deren Sicherheit verbessern? Mit diesen Kernanliegen der modernen Informationsgesellschaft beschäftigt sich Prof. Gerhard Kramer, Leiter des Lehrstuhls für Nachrichtentechnik an der TU München **Simple formulas with a big impact**. In today's digital society, researchers are constantly looking for ways to transmit messages more reliably, to use transmission media more efficiently and to store information more securely. Professor Gerhard Kramer, Head of the Institute for Communications Engineering at TUM is an expert in this field



Das Datenaufkommen in Mobilfunknetzen steigt. Weltweit nutzen über zwei Milliarden Menschen mobile Breitbandangebote / Growing data traffic in mobile networks. Over two billion people worldwide subscribe to mobile broadband services

Trends globaler Kommunikation

Weltbevölkerung / World population



Oben: Die Zahl der Mobilfunknutzer hat sich seit 2005 fast verdreifacht. Heute gibt es weltweit 6,8 Milliarden Mobilfunkverträge – fast so viele wie Erdbewohner.

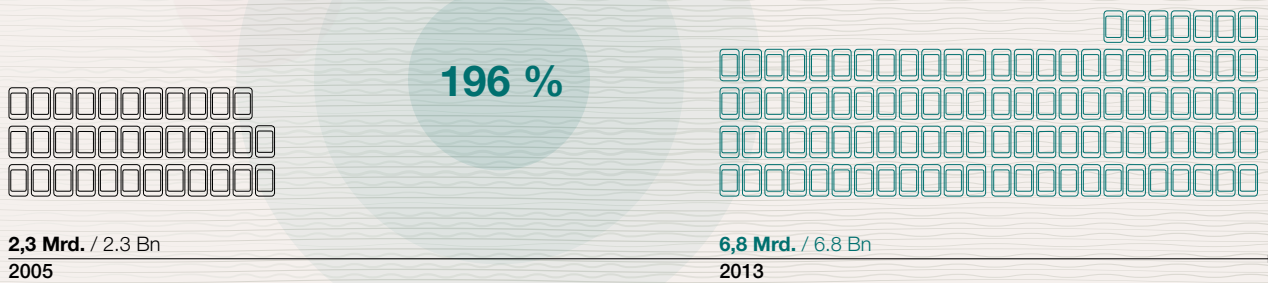
Unten: 2,7 Milliarden Menschen – fast 40 Prozent der Weltbevölkerung – sind online. Am höchsten ist die Internetnutzung in Europa, dicht gefolgt von Nord-, Mittel- und Südamerika. In Entwicklungsländern beträgt die Nutzungsrate 31 Prozent, verglichen mit 77 Prozent in den Industrienationen.

Global communication trends

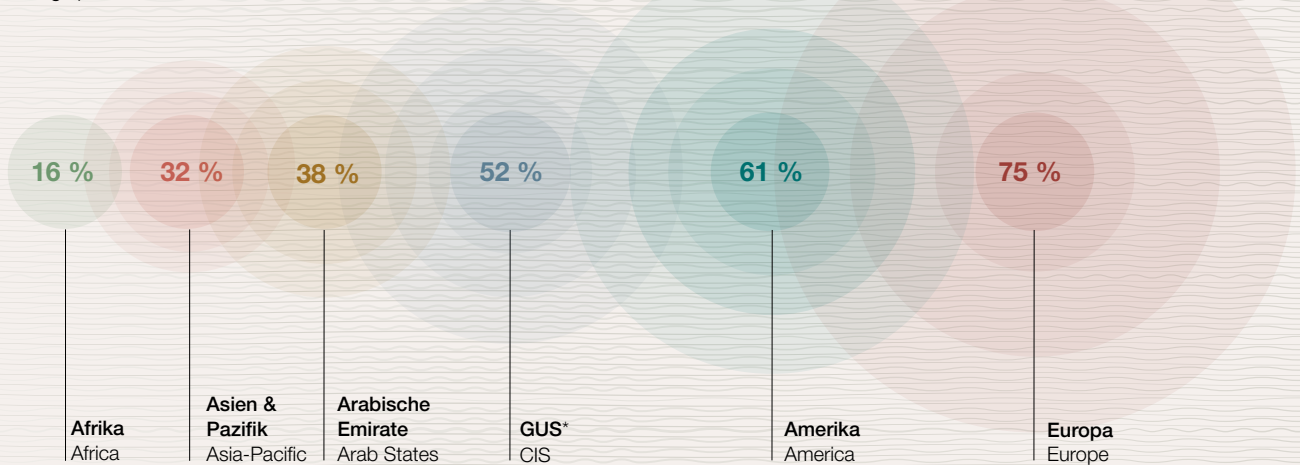
Above: the number of mobile subscribers has nearly tripled since 2005. Today's mobile subscriptions number 6.8 billion – almost as many as there are people on the planet.

Below: 2.7 billion people – almost 40 percent of the world's population – are online. Europe is the region with the highest Internet penetration rate, followed by the Americas. In the developing world, 31 percent of the population is online, compared with 77 percent in the developed world.

Mobilfunkverträge weltweit / Mobile subscriptions world wide



Weltweite Internetnutzung je 100 Einwohner / Global Internet usage per 100 inhabitants



*Gemeinschaft Unabhängiger Staaten / Commonwealth of Independent States

Die Formel für Entropie ist $H(X)$. Und damit sind wir mittendrin in der „Ästhetik der Informationstheorie“, wie es Prof. Gerhard Kramer ausdrückt. Denn zum einen ist $H(X)$ eine ganz einfache Formel, allerdings mit einer enormen Wirkung. Und zum anderen lässt sie trotz ihrer Klarheit Raum für Interpretation – wie ein Gemälde. Denn während ein Physiker unter Entropie ein Maß der Unordnung versteht, ist sie für Informationstheoretiker das Maß für den mittleren Informationsgehalt eines Zeichensystems. Dieses informationstheoretische Verständnis des Begriffes Entropie geht auf den amerikanischen Mathematiker und Elektrotechniker Claude Elwood Shannon zurück, der 1948 seine fundamentale Arbeit „A Mathematical Theory of Communication“ veröffentlichte und damit die moderne Informationstheorie prägte. Im Gespräch mit Kramer, das von der Netzwerkcodierung über die praktischen Anwendungsmöglichkeiten wieder zurück zur Theorie und zur Bedeutung der Forschung und Lehre findet, wird der Name Shannon oft fallen. Denn wer die Informationstheorie verstehen will, kommt an diesem Wissenschaftler nicht vorbei.

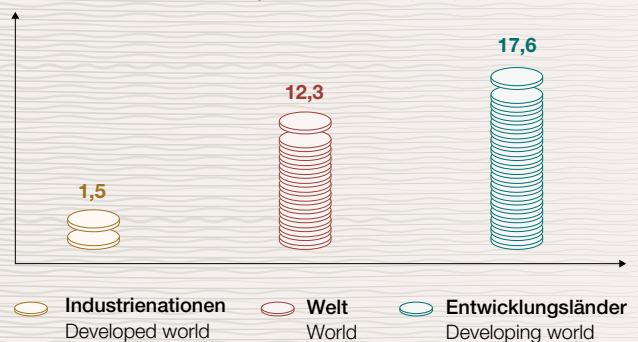
Shannon verwendete also den Begriff der Entropie, um den Informationsgehalt von Nachrichten zu charakterisieren. Warum? In der Informationstheorie geht es darum, wie sich eine Nachricht von einem Sender an einen Empfänger über teilweise sehr unsichere Kanäle mittels eines Codes möglichst unverfälscht übertragen lässt. Möglichst unverfälscht deswegen, weil Kommunikationskanäle immer durch Bitfehler erzeugende Interferenzen gestört werden. Mit mathematischen Methoden beschrieb Shannon, wie sich die theoretische Obergrenze – also die maximale Datenübertragungsrate oder einfach die Kanalkapazität – analytisch bestimmen lässt. Das Mittel der Wahl für diese Berechnung war die Codierungstheorie – die mathematische Theorie der Codes, die Fehler erkennen und korrigieren.

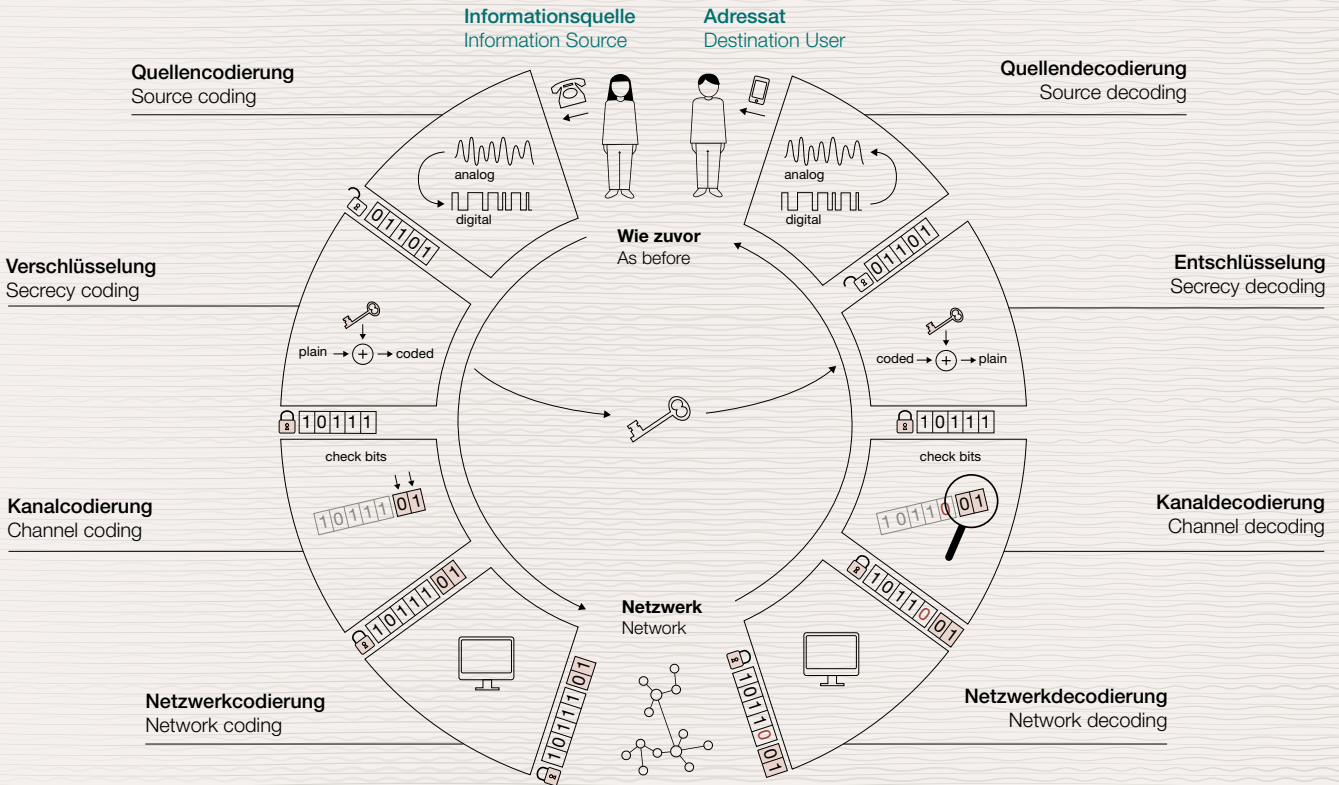
Über Jahrzehnte versuchten Ingenieure, sich der von Shannon definierten Obergrenze durch verschiedene Codierungsmethoden und immer kompliziertere Algorithmen anzunähern. Aber erst mit den von Claude Berrou und Alain Glavieux im Jahr 1993 entwickelten Turbo-Codes >

According to Prof. Gerhard Kramer, $H(X)$ – the formula for entropy – is a “prime example of the aesthetic quality of information theory.” $H(X)$ may be a simple formula but it has a big impact. It is unequivocal but also leaves room for interpretation, just like a painting. A physicist, for example, regards entropy as a way of measuring disorder. But for an information theorist, it is a means of measuring the average information content in a system of symbols. This information-theoretic understanding of entropy was developed by the American mathematician and engineer Claude Elwood Shannon back in 1948 when he published his landmark paper, “A Mathematical Theory of Communication”. His work laid the foundation for modern information theory. His is a name that comes up often in conversation with Kramer, even though we discuss everything from network coding and its practical applications to pure theory and the importance of research and teaching. It seems that to understand the world of information theory, you also must know about its founding father. Shannon used the term entropy to characterize the information content of messages. But why was this necessary? Information theory focuses on how messages can be encoded and transmitted reliably and efficiently from a sender to a receiver over what can be noisy channels. Integrity is an important factor here as communication channels are prone >

Bürger armer Länder zahlen mehr für mobiles Internet / Mobile Internet is more expensive in poor countries

Kosten für mobiles Breitband (in % des Bruttonationaleinkommens pro Einwohner)
Cost of mobile broadband (In % of gross national income per capita)





Digitale Kommunikationssysteme arbeiten mit einer Abfolge verschiedener Codierungen, um sicherzustellen, dass der Empfänger die für ihn bestimmte Nachricht korrekt erhält / Digital communications systems work with a sequence of various coding methods to ensure that the message is transmitted securely and without errors

wurde dank einer neuen Methode der Decodierung ein Durchbruch erzielt. Gleichzeitig stehen heute genügend hohe Rechenleistungen zur Verfügung, sodass die neuen Codiermethoden auf einem Computer implementiert und vergleichend untersucht werden können. „Mit den Turbo-Codes haben wir nun ein Verfahren, mit dem die real erreichbare Kanalausnutzung nahe der theoretisch möglichen Kanalkapazität liegt“, erklärt Kramer.

Von der Punkt-zu-Punkt-Verbindung zum Netzwerk

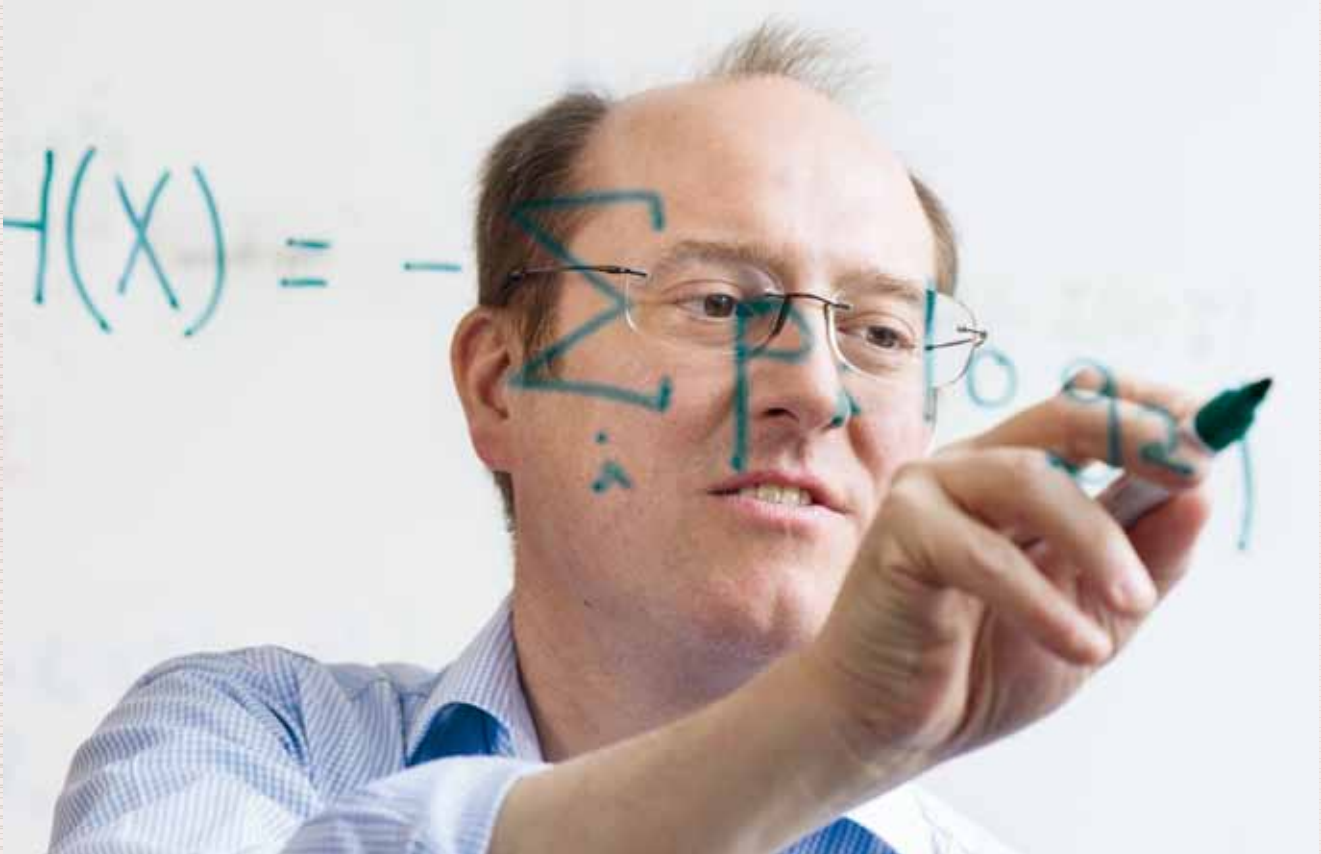
Damit wandten sich die Informationstheoretiker neuen Interessensgebieten zu. Während Shannon noch Punkt-zu-Punkt-Verbindungen erforschte, steht seit der Entdeckung der Turbo-Codes die Kommunikation im Netzwerk im Fokus. Hier haben sich zwei Forschungsgebiete herauskristallisiert: Kommunikation für kleinstmögliche Netzwerke – also mit drei Parteien – sowie für große Netzwerke wie beispielsweise flächendeckende Mobilfunknetze.

Wie die Kommunikation in großen Netzwerken abläuft, ist theoretisch noch nicht beantwortet, dennoch kann man für die Praxis effiziente Algorithmen entwickeln. „Kleine Netzwerke lassen sich dagegen relativ gut verstehen und dafür

entwickelte Modelle relativ gut in der Praxis anwenden“, so Kramer, dessen Forschungen sich hierauf konzentrieren.

Kooperative Netzwerke

Datenübertragung im Netzwerk bedeutet, dass zwischen Sender und Empfänger ein weiterer Knotenpunkt – ein sogenanntes Relais – geschaltet wird. Der Datenaustausch wird dadurch nicht zwingend komplizierter. Im Gegenteil: Der Austausch lässt sich sogar verbessern, da sich die Parteien gegenseitig helfen und damit gleichzeitig Energie sparen. Man nennt das kooperative Kommunikation. Das Modell der kooperativen Kommunikation setzten die TUM Wissenschaftler erfolgreich in einem Projekt mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) um. Ziel dieses Projekts war es, die Sendeleistung eines Satelliten zu verbessern. Denn je geringer die Sendeleistung, desto kleiner, leichter und damit auch kostengünstiger lässt sich der Satellit bauen. Um dieses Ziel zu erreichen, entwickelten die Forscher drei neue Verfahren, die in einigen Jahren mit einem GEO-Satelliten erprobt werden sollen. Das erste Verfahren eignet sich insbesondere für Kommunikation zwischen zwei Bodenstationen. Mit einer speziellen ▶



Die Alexander-von-Humboldt-Professur an der TUM gibt dem Nachrichtentechniker Gerhard Kramer Spielraum für Grundlagenforschung. Weil sein Forschungsgebiet sehr abstrakt ist, legt er großen Wert auf eine enge Betreuung der Studenten / An Alexander-von-Humboldt Professorship at TUM gives Gerhard Kramer additional freedom to carry out basic research. Since his research subject is quite abstract, he puts special attention to closely advising his students

to bit errors resulting from interference. Shannon used mathematical formulas to describe how the theoretical upper limit or rate for a communication channel – also known as the maximum data bandwidth or simply channel capacity – could be defined analytically. Shannon turned to coding theory for these calculations, i.e. the mathematical theory of codes that identify and correct errors.

Over the years, engineers have tried to close in on Shannon's upper limit using various coding methods and increasingly complex algorithms. A breakthrough did not come until 1993, however, when Claude Berrou and Alain Glavieux developed turbo codes based on a new decoding method. At the same time, we now have high-performance computing which allows engineers to implement, compare and analyze new coding methods on a computer. "Turbo codes increase efficiency, bringing us close to the theoretical channel capacity".

From point-to-point links to network communication

These developments enabled information theorists to focus on new areas of interest. Back in his day, Shannon researched point-to-point links. Since the discovery of turbo

codes, our focus has shifted onto network communication. Two major areas of research have emerged as a result of this shift: communication in small networks (three parties) and in large networks (such as nationwide cell phone networks).

A communication theory for large networks has not yet been established. However, efficient algorithms can be developed for real-world applications. "In contrast, small networks are relatively easy to understand and the models developed for this scale can be applied relatively easily in real life," explains Kramer – and he should know, as that is his specialist area.

Cooperative networks

In networks, data is transmitted from a sender to a receiver via a special node called a relay. This does not necessarily make for more complicated data transmission. In fact, it can improve communication as the send and receive nodes are able to cooperate and thus save energy. This process is known as cooperative communications.

TUM scientists successfully designed a cooperative communication model in collaboration with the German Aerospace Center (DLR). The aim of this project is to improve the transmission performance of a satellite. After all, by ▶

Vorteile der Netzwerkcodierung: A und B kommunizieren über ein Relais, das die einzelnen Datenpakete (A_1, B_1, \dots) codiert. Der Empfänger berechnet aus der Differenz zwischen den von ihm gesendeten und empfangenen Daten die für ihn bestimmte Nachricht. Ohne Netzwerkcodierung verschickt das Relais pro Zeitschlitz genau ein Datenpaket. Mit Netzwerkcodierung 1 verarbeitet es beide Datenpakete gleichzeitig und kann in der gesparten Zeit andere Informationen schicken. Fall 2 benötigt nur die halbe Bandbreite. Variante 3 nutzt die volle Zeit und Bandbreite, verwendet aber dank Netzwerkcodierung einen Kanalcode mit besseren Korrektoreigenschaften und reduziert so die Sendeleistung / Advantages of network coding: A and B communicate via a relay, which encodes individual data packets (A_1, B_1, \dots). The receiver determines the message dedicated to it by subtracting the transmitted data from the received data. Without network coding, the relay sends one data packet per time slot. With network coding 1 it processes two data packets in the same slot and can send additional information in the remaining time. The second scenario requires only half the bandwidth. The third scenario uses the full bandwidth and time and, thanks to network coding, the relay employs a channel code with better corrective properties to reduce transmission power

Netzcodierung werden die Datenströme an Bord des sendenden Satelliten so kombiniert, dass jeder Empfänger sie unter Verwendung seiner eigenen Sendedaten rekonstruieren kann. Dadurch muss der Satellit weniger Sendeleistung aufwenden. Mit dem zweiten Verfahren lassen sich Dateien an eine Vielzahl von Empfängern sicher verteilen, und zwar auch bei schwachen Empfangssignalen, was die Übertragungsdauer reduziert. Das dritte Übertragungsverfahren ist eine Innovation in der sogenannten Mehrteilnehmer-Detektion. Die Herausforderung besteht hier darin, dass die Signale von zwei oder mehreren Sendeterminals stammen und sich überlagern. Mit dem neuen Verfahren lassen sich diese Signale in Echtzeit detektieren und anschließend decodieren, sodass der Satellit gleichzeitig Nachrichten von verschiedenen Sendern annehmen kann.

Theorie und Praxis im Zusammenspiel

Überhaupt ist die Zusammenarbeit mit der Industrie für Kramer ein wichtiges Anliegen: „Die Theorie ist für uns Wissenschaftler natürlich der Fokus – wir sollten aber immer die Praxis im Blick haben.“ Diese Einstellung hat nicht zuletzt seine Arbeit in den Bell Labs von Alcatel-Lucent in Murray Hill in den USA geprägt. In dieser weltweit bedeutenden Forschungseinrichtung, an der übrigens auch Shannon arbeitete, war Kramer acht Jahre lang tätig. „Wir hatten unglaublich große Freiheiten für die Forschung, aber natürlich musste dort, da es sich um ein Unternehmen und keine Universität handelte, auch Geld verdient werden“, sagt Kramer. Ein gutes Beispiel für die Fruchtbarkeit der Symbiose zwischen Theorie und Praxis: Letztes Jahr erhielt Kramer gemeinsam mit einem ehemaligen Kollegen von den Bell Labs den Thomas Edison Patent Award in der Kategorie Telekommunikation für eine mathematische Methode, mit der sich Signalstörungen bei DSL-Leitungen entfernen und somit hohe Datenraten von bis zu 100 Megabit pro Sekunde erreichen lassen. Damit die Erfindung in alle standardkonformen Geräte implementierbar ist, wurde sogar der weltweite DSL-Standard G. vector angepasst. Auf einen weiteren Vorteil setzt Alcatel-Lucent: DSL-Geräte schalten sich bei Nichtnutzung automatisch ab, um Energie zu ►

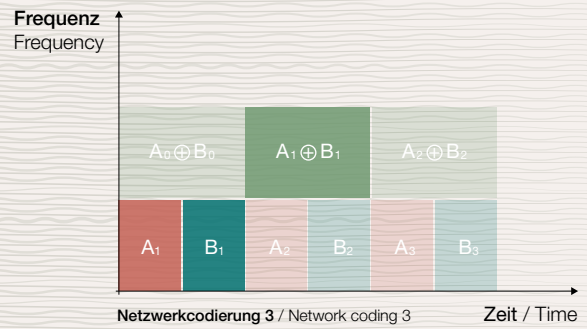
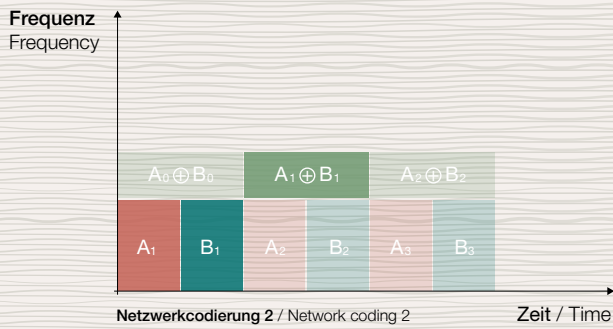
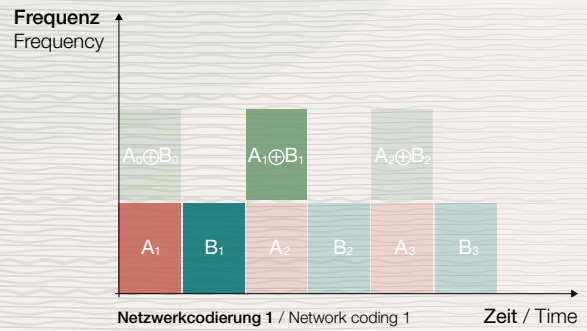
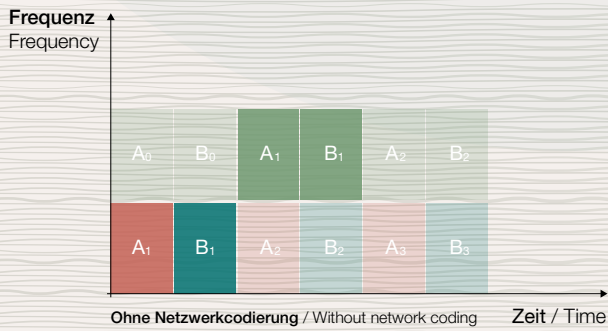
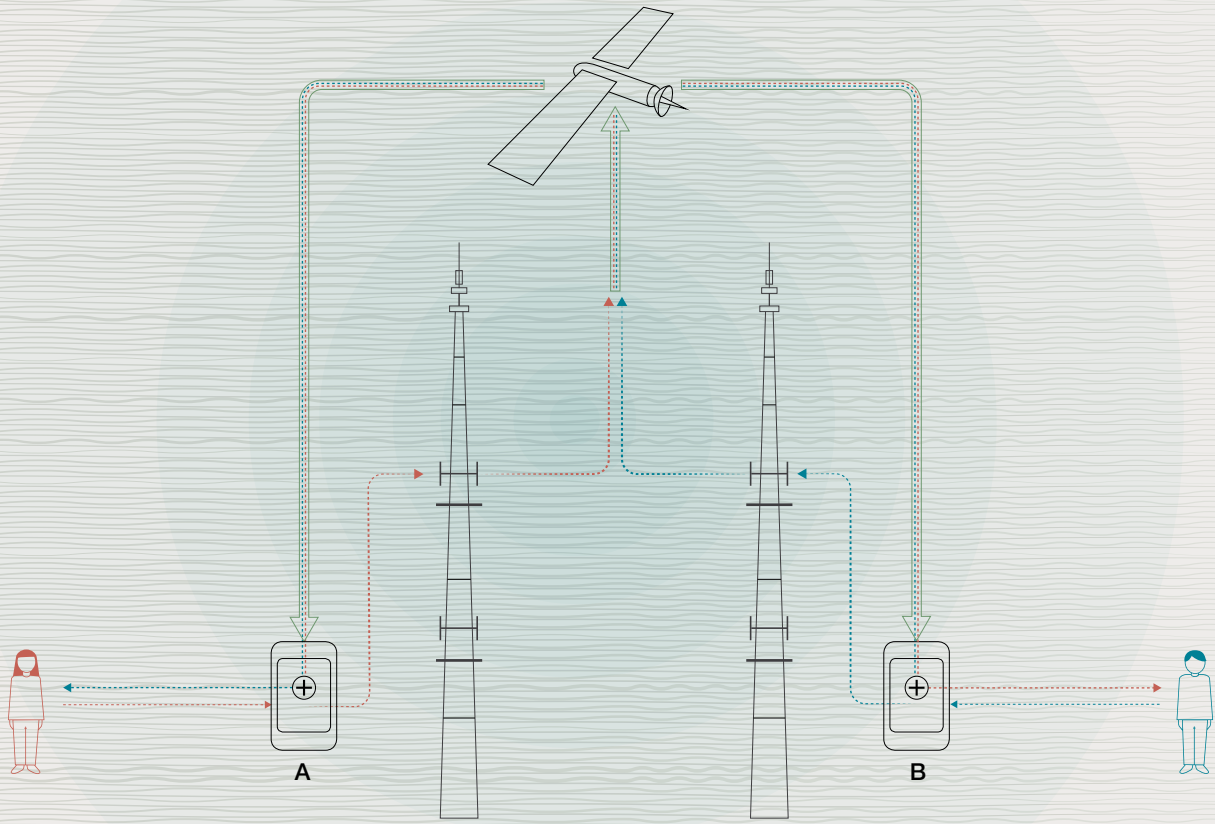
decreasing the transmission power, designers are able to build smaller, lighter and cheaper satellites. To achieve this aim, the researchers developed three new processes which will be tested in a few years using a GEO satellite.

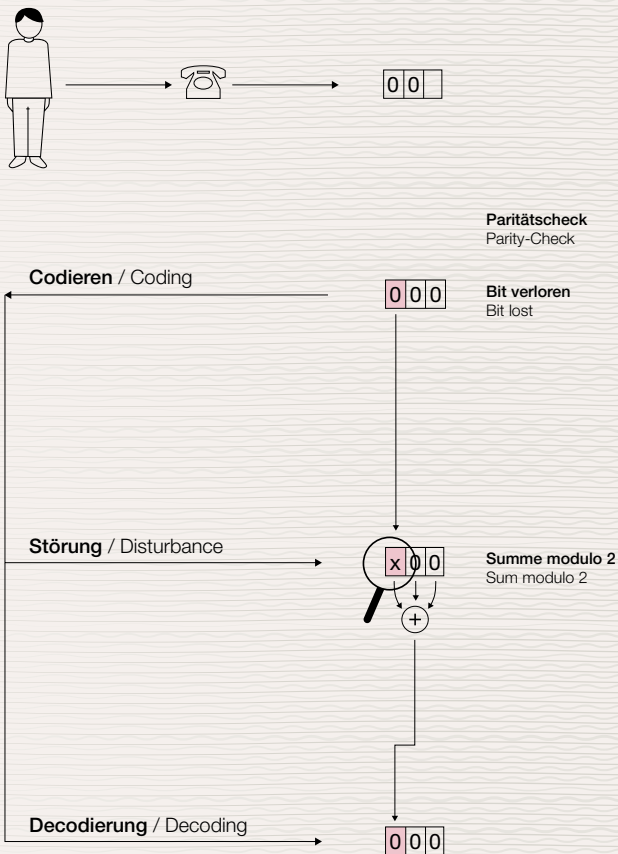
The first process is particularly suited to communication between two ground stations. The special network coding method enables the satellite transmitting the messages to combine the data streams in such a way that each receiver is able to reconstruct the message intended for it using its own transmission data. This approach means that the satellite uses less transmission power. The second process speeds up transmission time by reliably distributing files between a number of recipients, even when reception signals are weak. The third transmission process is an innovation in multi-user detection. The challenge here is to overcome the problem of overlapping signals from two or more transmitting stations. The new process enables a satellite to detect these signals in real time and decode them so that it can accept messages from different transmitters at the same time.

Putting theory into practice

Collaboration with industry is very important for Kramer. “For scientists like us, theory is the driving force. But we also need to keep our sights set on the practical side of things.” His eight years at Alcatel-Lucent’s Bell Labs in Murray Hill (USA) – one of the world’s foremost research institutes and former employer of Claude Shannon – helped strengthen his commitment to real-world challenges. “We had a huge amount of freedom in our research, but at the end of the day it was a company, not a university, and so we also had to make money,” explains Kramer.

In a prime example of how theory and practice are able to complement each other, Kramer and a former colleague from Bell Labs were awarded the Thomas Edison Patent Award in the telecommunications category last year for a mathematical method that eliminates signal interference on DSL lines, thus enabling high transmission rates of up to 100 megabits per second. In the wake of this development, the global DSL standard G. vector was adapted to ensure that the innovation could be implemented in all standard devices. The new ►





Fehlerresistente Übertragung durch Kanalcodierung: An die Nachricht 00 wird eine 0 (der sogenannte Paritätscheck) angehängt. Geht durch eine Störung das erste Bit verloren, kann es anhand der Summe der zweiten Nachricht und des Paritätscheck-Bits wiederhergestellt werden / Error-free transmission by means of coding: The message 00 is extended by one 0 (the so-called parity check). In case the first bit is lost in a disturbance, it can be restored using the sum of the second message bit and the parity check bit

sparen; wenn sie „aufwachen“, müssen ihre Kanäle möglichst schnell geschätzt werden, um sicherzustellen, dass ihre Signale keine anderen Geräte stören. Dank der von Kramer und seinem ehemaligen Kollegen entwickelten Methode lassen sich diese Initialisierungszeiten der DSL-Geräte erheblich minimieren.

In der Praxis bieten Kramers Forschungsergebnisse die Grundlage, um die Übertragungsraten in Kommunikationsnetzen deutlich zu erhöhen – und sie somit in Zukunft noch leistungsfähiger zu machen. Insbesondere seine Publikation “Cooperative Strategies and Capacity Theorems for Relay Networks” liefert bahnbrechende Erkenntnisse für die Weiterentwicklung der Netzwerkinformationstheorie. Die zukünftigen Entwicklungen sind nicht vorhersehbar – „deswegen sind die Grundlagen so wichtig“, weiß Kramer. Spielraum für Grundlagenforschung hat der Wissenschaftler auch dank seiner Alexander-von-Humboldt-Professur, mit der er im Oktober 2010 an die TUM berufen wurde.

Sicherheit und Wertschätzung in der Lehre

Und damit sind wir zurück bei der Theorie – und der Lehre. Die praktische Anwendung ist Kramer wichtig, als Professor ist sein vorrangiges Anliegen aber die Lehre. In seinem Fachgebiet ist eine enge Betreuung der Studierenden und Doktoranden wesentlich, da die Informationstheorie so abstrakt ist. „Die Studenten und Doktoranden brauchen Wertschätzung und die Sicherheit, dass sie auf dem richtigen Weg sind. Ich möchte ihnen Vertrauen in die eigenen Ansätze vermitteln“, so Kramer. Derzeit betreut er 15 wissenschaftliche Mitarbeiter – aus aller Herren Länder. Die Internationalität in der Forschung ist für den gebürtigen Kanadier, der wegen seiner deutschen Wurzeln fließend Deutsch spricht, einer der schönsten Aspekte der Wissenschaft. Auf die letzte Frage in diesem Gespräch, welches seine Ziele für den Lehrstuhl in den nächsten Jahren seien, antwortet er: „Auf eine einfache Formel gebracht: Ich möchte mein Forschungsdenken weitergeben, den Doktoranden zum Erfolg verhelfen und eine erfolgreiche Gruppe von Wissenschaftlern aufbauen, die die Forschungen in Theorie und Praxis ein gutes Stück voranbringen.“ *Autorin: Gitta Rohling*

method also provides Alcatel-Lucent with another benefit: To save energy, DSL devices automatically switch themselves off when they are not in use. When they “wake up”, they have to assess their channels as quickly as possible to make sure that their signals do not interfere with other devices. The new method developed by Gerhard Kramer and his former colleague significantly speeds up this initialization process for DSL devices.

Kramer’s research findings provide the foundation to significantly increase transmission rates in communication networks. This in turn will lead to more powerful networks in the future. His publication entitled “Cooperative Strategies and Capacity Theorems for Relay Networks” provides groundbreaking results that will help further the development of network information theory. Future developments are unpredictable which is why Kramer believes that “foundational theoretical knowledge is so important”. His Alexander-von-Humboldt professorship, which he was awarded in 2010, gives him additional freedom to carry out basic research.

Supporting students

All of which brings us back to theory, and teaching. Practical applications are important to Kramer. As a professor, however, teaching is his top priority. Due to the abstract nature of information theory, it is especially important that undergraduates and Ph.D. students are advised closely. “Undergraduates and Ph.D. students need feedback and encouragement to be sure that they are on the right track. I want them to learn to trust their own approaches,” explains Kramer. He is currently supervising fifteen research associates from across the globe. The broad mix of nationalities is one of the aspects he loves most about research. Kramer was born in Canada but thanks to his German roots, he also speaks fluent German. For my last question, I ask him about his goals for the Institute for Communications Engineering in the coming years. “In a nutshell, I want to pass on my passion for research, help my Ph.D. students achieve their goals and establish a group of scientists capable of taking research to the next level on both a theoretical and practical plane.”

Author: Gitta Rohling

Der Begründer der Informationstheorie

Der amerikanische Mathematiker und Ingenieur Claude Elwood Shannon (1916 – 2001) arbeitete von 1941 bis 1972 an den Bell Labs und war Professor am Massachusetts Institute of Technology (MIT). 1948 erschien seine Arbeit “A Mathematical Theory of Communication”, die als Grundsteinlegung der Informationstheorie gilt. Hier definierte Shannon erstmals das Bit – die binäre Stelle 0 oder 1 – als kleinste Einheit für Information. Shannons Arbeit behandelt zum einen die effizienteste Methode, eine Nachricht in einer störungsfreien Umgebung zu codieren, und zum anderen die Frage, welche zusätzlichen Maßnahmen bei vorhandenen Störungen nötig sind. Dazu führt er unter anderem das Konzept der Entropie ein, das Nachrichtentechniker bis heute nutzen.

The founder of information theory The American mathematician and engineer Claude Elwood Shannon (1916 – 2001) worked at Bell Labs between 1941 and 1972 and was Professor at the Massachusetts Institute of Technology (MIT). In 1948 he published “A Mathematical Theory of Communication”, in which he laid the foundation of information theory. Here, Shannon also defines for the first time the bit – the single binary digit 0 or 1 – as the smallest unit of information. Shannon’s work concentrates on two key questions: To determine the most efficient encoding of a message in a noiseless environment and to understand what additional steps need to be taken in the presence of noise. For this he introduced the concept of entropy, which communications engineers still use today.

