



wolfgang ERTEL  
ekkehard LÖHMANN

6., aktualisierte Auflage

# ANGE- WANDTE KRYPTO- GRAPHIE

HANSER



### **Blieben Sie auf dem Laufenden!**

Unser **Computerbuch-Newsletter** informiert Sie monatlich über neue Bücher und Termine. Profitieren Sie auch von Gewinnspielen und exklusiven Leseproben. Gleich anmelden unter:

**[www.hanser-fachbuch.de/newsletter](http://www.hanser-fachbuch.de/newsletter)**





Wolfgang Ertel

Ekkehard Löhmann

# Angewandte Kryptographie

6., aktualisierte Auflage

Mit 54 Bilder, 55 Aufgaben und 21 Tabellen

HANSER

## Autoren:

Prof. Dr. rer. nat. Wolfgang Ertel  
Hochschule Ravensburg

Prof. Dipl.-Math. Ekkehard Löhmann  
Hochschule Ravensburg



Alle in diesem Buch enthaltenen Informationen wurden nach bestem Wissen zusammengestellt und mit Sorgfalt geprüft und getestet. Dennoch sind Fehler nicht ganz auszuschließen. Aus diesem Grund sind die im vorliegenden Buch enthaltenen Informationen mit keiner Verpflichtung oder Garantie irgendeiner Art verbunden. Autor(en, Herausgeber) und Verlag übernehmen infolgedessen keine Verantwortung und werden keine daraus folgende oder sonstige Haftung übernehmen, die auf irgendeine Weise aus der Benutzung dieser Informationen – oder Teilen davon – entsteht.

Ebenso wenig übernehmen Autor(en, Herausgeber) und Verlag die Gewähr dafür, dass die beschriebenen Verfahren usw. frei von Schutzrechten Dritter sind. Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.

Alle Rechte, auch die der Übersetzung, des Nachdruckes und der Vervielfältigung des Buches, oder Teilen daraus, vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) – auch nicht für Zwecke der Unterrichtsgestaltung – reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

© 2020 Carl Hanser Verlag München

Internet: [www.hanser-fachbuch.de](http://www.hanser-fachbuch.de)

Lektorat: Dipl.-Ing. Natalia Silakova-Herzberg

Herstellung: Anne Kurth

Satz: le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Covergestaltung: Max Kostopoulos

Coverkonzept: Marc Müller-Bremer, [www.rebranding.de](http://www.rebranding.de), München

Druck und Bindung: Hubert & Co. GmbH & Co. KG BuchPartner, Göttingen

Printed in Germany

Print-ISBN 978-3-446-46313-4

E-Book-ISBN 978-3-446-46353-0

# Vorwort

## Ziele

Das Verschlüsseln von Nachrichten oder geheimen Schriftstücken übt auch heute noch eine große Faszination auf Menschen aller Bevölkerungsschichten aus. Die verschiedensten Fachleute aus Mathematik, Informatik und Linguistik beschäftigen sich mit dieser alten Wissenschaft, die bis zur Mitte des zwanzigsten Jahrhunderts hauptsächlich militärisch angewendet wurde.

Dieses Bild hat sich in den letzten dreißig Jahren gewandelt. Im Zeitalter der Globalisierung und des E-Business ist die Welt vernetzt. Heute werden Pläne, Patente, Verträge und andere vertrauliche Daten auf Rechnern gespeichert und über das Internet ausgetauscht. Der rege Datenaustausch weckt großes Interesse bei Geheimdiensten, bei Firmen, die Informationen über ihre Kunden sammeln, sowie bei Firmen, die die Geheimnisse der Konkurrenz ausspionieren wollen. Allein in Deutschland entstehen der Industrie pro Jahr geschätzte Verluste im Bereich zehn bis hundert Milliarden Euro durch Lauschangriffe.

Diese Angriffe geschehen im Stillen und werden in den meisten Fällen der Presse nicht mitgeteilt. Teilweise sind sie sogar der geschädigten Firma nicht bekannt. Oft wird daher die Sicherheit von Firmennetzen gegenüber Angriffen von außen immer noch sträflich vernachlässigt, obwohl Wissen und solide Technik der Datensicherheit heute für jeden Fachmann zugänglich sind. Das wichtigste Ziel des Buches ist es deshalb, dem Informatiker das benötigte Wissen auf einer soliden Basis zu vermitteln. Damit wird er in der Lage sein, zum Beispiel ein Sicherheitskonzept für eine Firma zu erarbeiten oder eine Public-Key-Infrastruktur aufzubauen und zu pflegen.

Es gibt aber auch Beispiele von erfolgreichen Firmen, die plötzlich vor dem Bankrott stehen, nur weil jemand eine gefälschte E-Mail im Namen der Firmenleitung an die Presse schickt, mit der Folge eines dramatischen Absturzes des Aktienkurses. Das Stichwort zur Vermeidung derartiger Fälle heißt digitale Signatur. Die digitale Signatur wird in den nächsten Jahren das Medium E-Mail zu einem seriösen Werkzeug machen, mit dem Verträge, Angebote, Rechnungen etc. schnell, kostengünstig und sicher abgewickelt werden können. Seit Ende 2010 gibt es in Deutschland den neuen Personalausweis mit Chipkarte, der auch für die digitale Signatur benutzt werden kann. Möglich wäre auch die Verwendung des Personalausweises als Schlüssel zu Wohnung, Firma, Rechner und Auto.

Offene Systeme und weltweite Vernetzung führen auch zu Ängsten und zum Wunsch nach Sicherheit, Vertraulichkeit und einem besseren Schutz der Privatsphäre. Sicher ist es kein Zufall, dass gerade zum jetzigen Zeitpunkt mit der vor gut zwanzig Jahren erfundenen

Public-Key-Kryptographie und den modernen Blockchiffren starke und mittlerweile bewährte Werkzeuge zur Sicherung der Privatsphäre und Vertraulichkeit zum Einsatz in der Praxis bereitstehen. Ziel dieses Buches ist es, den Leser mit diesen Methoden vertraut zu machen und zwar ausgehend von den teilweise genial einfachen und eleganten Ideen über die Mathematik endlicher Körper bis hin zu den Anwendungen in Form von allgemein verfügbarer Software.

Die Aussage „mein Computer ist sicher“ ist eine All-Aussage, denn etwas genauer formuliert heißt sie „die Erfolgswahrscheinlichkeit für einen der vielen möglichen Angriffe ist verschwindend gering“. Um solch eine Aussage auch nur annähernd machen zu können, muss jede Schwachstelle beseitigt werden, denn ein kluger Angreifer nutzt die schwächste Stelle – und die Tücken liegen im Detail. Nur durch den praktischen Umgang mit der Materie ist es möglich, aufbauend auf den theoretischen Grundlagen, die benötigte umfassende Vorgehensweise zur Aufdeckung und Beseitigung von Sicherheitslücken zu erlernen. Das Wissen über die Algorithmen und die Mathematik von Kryptosystemen ist notwendig, aber bei weitem nicht hinreichend, um sichere Systeme zu bauen. Daher möchte ich den motivierten Neuling in diesem Gebiet insbesondere auffordern, die Übungsaufgaben zu bearbeiten.

### **Aufbau und Leserkreis**

Das Buch ist entstanden aus einem Vorlesungsskript zur Datensicherheit im Informatikstudium an der Fachhochschule Ravensburg-Weingarten. Es ist ein Lehrbuch zur Einführung in das Gebiet und richtet sich primär an Studenten der Fachhochschulen, aber auch an Universitätsstudenten, die sich ohne viel Theorie in das Gebiet einarbeiten wollen. Wie man schon am Titel erkennt, habe ich versucht, die Theorie auf ein Minimum zu beschränken. Das Buch wendet sich deshalb an alle, die in kompakter Form die moderne Kryptographie verstehen wollen. Dem berufstätigen Informatiker bietet es die Möglichkeit, sich im Selbststudium in ein aktuelles Gebiet einzuarbeiten.

Vorausgesetzt werden Mathematikkenntnisse der Oberstufe. Darüber hinaus benötigte Mathematik wird im Anhang A bereitgestellt. Das Buch beginnt mit einer elementaren Einführung in die Protokolle für elektronisches Bargeld als Beispiel einer Anwendung für viele im Buch beschriebene Algorithmen und Protokolle. Nach den Grundlagen in Kapitel 2 werden im Kapitel 3 an Hand einiger klassischer Chiffren wichtige Techniken und Begriffe eingeführt.

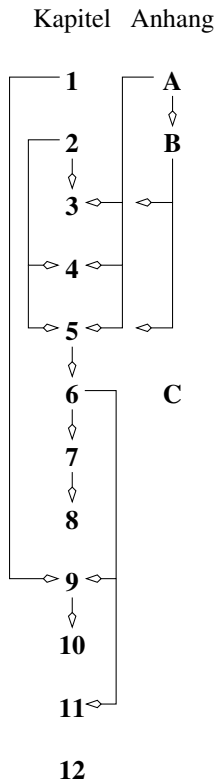
Bei den modernen Blockchiffren in Kapitel 4 werden DES, die weltweit meist benutzte Chiffre, und AES als neuer Standard vorgestellt. Die Public-Key-Kryptographie ist in den Kapiteln 5, 7 und 8 behandelt und es wird neben den Algorithmen ausführlich auf die Public-Key-Infrastruktur sowie auf die wichtigsten Software-Produkte eingegangen. Aufbauend auf den Public-Key-Algorithmen werden in Kapitel 6 neben klassischen Authentifikationsverfahren die digitale Signatur sowie Zero-Knowledge-Protokolle behandelt.

Nachdem alle Techniken eingeführt sind, schließt sich der Kreis und die Protokolle für elektronisches Bargeld aus Kapitel 1 werden in Kapitel 9 verfeinert und exakt beschrieben. Kapitel 10 schließlich stellt verschiedene existierende und neue elektronische Zahlungsmittel vor und vergleicht sie.

In Kapitel 12 wird das deutsche Signaturgesetz vorgestellt sowie das politische und gesellschaftliche Umfeld der modernen Kryptographie beleuchtet. Als Abschluss folgt in Kapi-

tel 13 eine Checkliste für die praktische Arbeit in der Kryptographie. Die benötigte Zahlentheorie, ein Kapitel über die Erzeugung von Zufallszahlen für kryptographische Algorithmen und die Lösungen zu den Übungsaufgaben sind im Anhang zu finden.

Die Abhängigkeit der Kapitel untereinander ist in Bild 1 dargestellt. Ein Pfeil von 2 nach 3 zum Beispiel bedeutet, dass Kapitel 2 für das Verständnis von Kapitel 3 vorausgesetzt wird.



**BILD 1** Kapitelstruktur

Es gibt, insbesondere in der englischsprachigen Literatur, eine Reihe guter Lehrbücher zur Kryptographie. Der Leser, der ein gutes Nachschlagewerk sucht, findet dieses in Form des umfassenden und sehr gut lesbaren Standardwerkes von Bruce Schneier [Sch05, Sch96]. Empfehlenswerte Lehrbücher sind [Sti05, Kob94, Sta98, Wob01, Beu09, Bau00].

## Dank

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Evelyn, die mir im letzten Jahr den Rücken frei hielt für das Schreiben. Vielen Dank auch an Ekkehard Löhmann für wertvolle inhaltliche Tipps und an Erhard Schreck für die schöne Zeit im Silicon Valley, in der das Kapitel über Zufallszahlen entstanden ist. Mein Dank richtet sich auch an Max Kliche für das Bereitstellen der Übungsaufgaben im Web und an Thomas Degen und Ulrich Hauser, die mich

Ich möchte den Leser bitten, Anregungen, Kritik und Hinweise auf Fehler per E-Mail direkt an [ertel@hs-weingarten.de](mailto:ertel@hs-weingarten.de) zu schicken. Eine regelmäßig aktualisierte Liste der Fehler ist auf der Webseite zum Buch zu finden.

## Online-Quellen und Literatur

Die Web-Seite zum Buch hat die URL

[www.hs-weingarten.de/~ertel/kryptobuch.html](http://www.hs-weingarten.de/~ertel/kryptobuch.html)

Das im Buch abgedruckte Literaturverzeichnis ist dort mit anklickbaren Links versehen, so dass der Leser auf alle im Internet verfügbaren Quellen einfach zugreifen kann. Außerdem gibt es dort eine regelmäßig aktualisierte und nach Themen geordnete Sammlung von Links zur Kryptographie. Ergänzt wird die Sammlung durch Präsentationsfolien für Dozenten.

Neben diesen Quellen möchte ich den interessierten Leser verweisen auf die Newsgroup `sci.crypt`. In diesem stark frequentierten Forum werden die verschiedensten mehr oder weniger aktuellen Themen diskutiert. Sehr informativ sind auch der monatlich erscheinende kostenlose Newsletter „crypto-gram“ von Bruce Schneier [Sch01a], sein neues Buch [Sch00a], sowie die umfangreiche Sammlung von Wissen, Literatur und Links zur Kryptographie von Terry Ritter [Rit00]. Zum praktischen Üben ist das frei verfügbare Demonstrationsprogramm `CrypTool` [Ess02] sehr zu empfehlen.

Es gibt, insbesondere in der englischsprachigen Literatur, eine Reihe guter Lehrbücher zur Kryptographie. Der Leser,



regelmäßig mit aktuellen Schlagzeilen aus den Online-Medien versorgen. Für das Korrekturlesen möchte ich mich bedanken bei Daniel Hirscher, Markus König, Michael König, Norbert Perk und Harald Steinhilber. Meinem Kollegen Martin Hulin danke ich dafür, dass ich mich in den Semesterferien, frei von administrativen Nebenjobs, auf das Schreiben konzentrieren konnte. Bei meiner Lektorin Erika Hotho bedanke ich mich herzlich für die sehr gute Zusammenarbeit.

Ravensburg, den 28. März 2001

Wolfgang Ertel

### **Vorwort zur fünften Auflage**

Neben einigen korrigierten Fehlern wurde ein neues Kapitel über die derzeit viel diskutierte Blockchaintechnologie in das Buch integriert. Dieses wurde verfasst von Ekkehard Löhm, Informatikprofessor an der Hochschule Ravensburg-Weingarten mit langer Berufs- und Lehrerfahrung in der Kryptographie. Die Blockchaintechnologie kommt nicht nur bei der Kryptowährung Bitcoin zum Einsatz, sondern könnte in der Zukunft auch interessant werden zum Erstellen und elektronischen Verwalten von Verträgen.

Ravensburg, den 09. Juli 2018

Wolfgang Ertel

# Inhalt

<b>1</b>	<b>Elektronisches Bargeld, ein erstes Beispiel .....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen .....</b>	<b>21</b>
2.1	Terminologie .....	21
2.2	Kryptographische Algorithmen .....	22
2.3	Kryptographische Protokolle .....	24
2.4	Public-Key-Algorithmen .....	24
2.5	Kryptanalyse .....	26
2.6	Sicherheit von Schlüsseln .....	27
<b>3</b>	<b>Klassische Chiffren .....</b>	<b>31</b>
3.1	Verschiebechiffren .....	32
3.2	Multiplikative Chiffren .....	33
3.3	Tauschchiffren (Affine Chiffren) .....	35
3.4	Kryptanalyse monoalphabetischer Chiffren .....	36
3.5	Polyalphabetische Chiffren .....	37
3.5.1	Homophone Chiffren .....	37
3.6	Die Vigenère-Chiffre .....	38
3.6.1	Der Algorithmus .....	38
3.6.2	Kryptanalyse .....	40
3.6.3	Der Kasiski-Test .....	40
3.6.4	Der Friedman-Test .....	43
3.7	Die Enigma .....	45
3.7.1	Kryptanalyse .....	48
3.8	Das One-Time-Pad, die perfekte Chiffre .....	52
3.9	One-Time-Pad fast ohne Schlüsseltausch .....	55
3.10	Zusammenfassung .....	57

<b>4</b>	<b>Moderne Blockchiffren</b> .....	<b>59</b>
4.1	Data-Encryption-Standard DES .....	59
4.1.1	Übersicht .....	61
4.1.2	Eine Runde .....	63
4.1.3	Die 16 Teilschlüssel .....	64
4.1.4	Die Dechiffrierfunktion .....	64
4.1.5	Sicherheit und Nichtlinearität .....	66
4.1.6	Sicherheit und Geschwindigkeit .....	68
4.1.7	Triple-DES .....	68
4.2	Advanced-Encryption-Standard AES .....	68
4.2.1	Die Blockchiffre Rijndael .....	69
4.2.2	Die ByteSub-Transformation .....	70
4.2.3	Die ShiftRow-Transformation .....	71
4.2.4	Die MixColumn-Transformation .....	72
4.2.5	Die Schlüsselexpansion .....	72
4.2.6	Die inverse Chiffre .....	73
4.2.7	Geschwindigkeit .....	73
4.2.8	Sicherheit .....	73
4.2.9	Andere Funktionalitäten .....	74
4.3	Betriebsmodi von Blockchiffren .....	74
4.4	Andere Blockchiffren .....	75
<b>5</b>	<b>Public-Key-Kryptographie</b> .....	<b>77</b>
5.1	Merkles Rätsel .....	78
5.2	Der RSA-Algorithmus .....	79
5.2.1	Der Algorithmus .....	80
5.2.2	Sicherheit von RSA .....	82
5.2.3	Effiziente Primzahltests .....	83
5.2.4	Effizienz und Implementierung von RSA .....	84
5.2.5	Schnellere Implementierung von RSA .....	85
5.2.6	Angriffe gegen RSA .....	86
5.3	Angriffe gegen Public-Key-Verfahren .....	87
5.3.1	Chosen-Ciphertext-Angriff mit Social Engineering .....	87
5.3.2	Angriffe aufgrund von Seiteneffekten .....	87
5.3.3	Angriffe mit Spezialhardware .....	89
5.4	Schlüsseltausch .....	89
5.4.1	Schlüsseltausch mit symmetrischen Verfahren .....	89
5.4.2	Man-in-the-Middle-Angriff .....	90

5.4.3	Das Interlock-Protokoll .....	90
5.4.4	Schlüsseltausch mit Quantenkryptographie .....	91
5.5	Der Diffie-Hellman-Algorithmus .....	91
5.6	Der ElGamal-Algorithmus .....	93
5.7	Algorithmen mit Elliptischen Kurven .....	93
<b>6</b>	<b>Authentifikation und digitale Signatur .....</b>	<b>97</b>
6.1	Einwegfunktionen und Einweg-Hash-Funktionen .....	98
6.1.1	Passwortverschlüsselung .....	100
6.1.2	Der Geburtstagsangriff .....	100
6.2	Zero-Knowledge-Protokolle .....	102
6.2.1	Challenge-and-Response .....	102
6.2.2	Die Idee der Zero-Knowledge-Protokolle .....	103
6.2.3	Das Fiat-Shamir-Protokoll .....	104
6.3	Digitale Signaturen .....	105
6.3.1	Digital Signature Algorithm (DSA) .....	106
6.3.2	Blinde Signaturen .....	107
6.4	Digitale Signatur in der Praxis .....	108
6.4.1	Speichern des geheimen Schlüssels .....	108
6.4.2	Vertrauen in die Software .....	109
6.4.3	Zusammenfassung .....	110
6.5	Das Signaturgesetz .....	111
6.6	Authentifikation mit digitaler Signatur .....	112
6.7	Message-Authentication-Code (MAC) .....	113
6.8	Biometrische Verfahren .....	114
<b>7</b>	<b>Public-Key-Infrastruktur .....</b>	<b>117</b>
7.1	Persönliche Prüfung öffentlicher Schlüssel .....	117
7.2	Trustcenter .....	118
7.3	Zertifikathierarchie .....	119
7.4	Web-of-Trust .....	120
7.5	Zukunft .....	121
<b>8</b>	<b>Public-Key-Systeme .....</b>	<b>123</b>
8.1	PGP .....	123
8.1.1	Schlüsseltausch mit PGP .....	126
8.1.2	Die Big-Brother-Funktion .....	126
8.1.3	GnuPG .....	127
8.1.4	Angriffe gegen PGP .....	128

8.2	S/MIME und das X.509-Protokoll.....	130
8.3	OpenPGP versus S/MIME .....	131
8.4	Secure shell (SSH).....	131
8.5	Secure socket layer (SSL).....	132
8.6	Virtual Private Networking und IP Security .....	133
8.7	Der neue Personalausweis.....	134
8.7.1	Hoheitliche Funktionen .....	134
8.7.2	Andere Funktionen .....	135
8.7.3	Digitale Signatur.....	135
8.7.4	Sicherheit des neuen Personalausweises .....	136
<b>9</b>	<b>Elektronisches Bargeld .....</b>	<b>139</b>
9.1	Secret-Splitting .....	139
9.2	Bit-Commitment-Protokolle .....	140
9.3	Protokolle für elektronisches Bargeld .....	141
<b>10</b>	<b>Elektronische Zahlungssysteme.....</b>	<b>145</b>
10.1	Die Geldkarte .....	146
10.2	Mondex.....	147
10.3	Ecash .....	148
10.4	Zahlung per Kreditkarte.....	148
10.4.1	Secure Electronic Transactions (SET) .....	148
10.4.2	PayPal .....	149
10.4.3	Andere Systeme.....	150
10.5	Zusammenfassung .....	150
<b>11</b>	<b>Blockchain-Technologie und Bitcoin.....</b>	<b>151</b>
11.1	Ein einführendes Beispiel.....	151
11.2	Vom virtuellen verteilten Kassenbuch zu Bitcoin .....	153
11.3	Authentizität der Nachricht .....	153
11.4	Berechnung des Kontostandes.....	154
11.5	Bestätigung der Zahlung durch die Mehrheit der Teilnehmer.....	154
11.6	Worin besteht das mathematische Rätsel? .....	155
11.7	Was sind die Eingabedaten in die Hash-Funktion? .....	156
11.8	Die Blockchain .....	156
11.9	Wie sieht ein Block bei Bitcoin aus? .....	158
11.10	Der Blockheader .....	158
11.11	Wie wird die Gültigkeit eines Blocks überprüft? .....	159
11.12	Die Arbeit eines Miners: Proof of Work (PoW) .....	159

11.13	Steuerung der Höhe des Schwellwertes .....	160
11.14	Das Rennen um die längste Kette.....	161
11.15	Die Geschichte von Bitcoin.....	161
11.16	Gibt es bei der Kryptowährung Bitcoin eine Inflation? .....	162
11.17	Ökologische Aspekte des Bitcoin-Systems (Stromverbrauch) .....	162
11.18	Public-Key-Infrastruktur versus Blockchain .....	164
<b>12</b>	<b>Politische Randbedingungen .....</b>	<b>167</b>
12.1	Starke Kryptographie und der Lauschangriff .....	167
12.2	US-Exportgesetze .....	169
<b>13</b>	<b>Sicherheitslücken in der Praxis .....</b>	<b>171</b>
	<b>Anhang .....</b>	<b>175</b>
<b>A</b>	<b>Arithmetik auf endlichen Mengen .....</b>	<b>175</b>
A.1	Modulare Arithmetik .....	175
A.2	Invertierbarkeit in $\mathbb{Z}_n$ .....	178
A.3	Der Euklidische Algorithmus.....	180
A.4	Die Eulersche $\varphi$ -Funktion .....	183
A.5	Primzahlen.....	185
	A.5.1 Primzahltests .....	186
A.6	Der endliche Körper $GF(2^8)$ .....	190
	A.6.1 Addition .....	190
	A.6.2 Multiplikation.....	190
	A.6.3 Polynome mit Koeffizienten in $GF(2^8)$ .....	191
<b>B</b>	<b>Erzeugen von Zufallszahlen .....</b>	<b>195</b>
B.1	Pseudozufallszahlengeneratoren .....	197
	B.1.1 Lineare Schieberegister mit Rückkopplung .....	198
	B.1.2 Stromchiffren .....	200
B.2	Echte Zufallszahlen.....	201
	B.2.1 Der Neumann-Filter .....	201
B.3	Zusammenfassung .....	203
<b>C</b>	<b>Lösungen zu den Übungen .....</b>	<b>205</b>
	<b>Literatur .....</b>	<b>227</b>
	<b>Index.....</b>	<b>235</b>



# 1

## Elektronisches Bargeld, ein erstes Beispiel

Auch im Zeitalter des bargeldlosen Bezahls besitzt das klassische Bargeld durchaus noch seine Berechtigung. Es ermöglicht eine einfache, schnelle, unverbindliche und kostengünstige Abwicklung des Bezahlvorgangs. Bei hohen Beträgen wird Bargeld wegen des Verlust- und Diebstahlrisikos selten verwendet. Hier bietet der bargeldlose Zahlungsverkehr klare Vorteile. Wegen der Abwicklung über eine Bank oder ein Kreditkarteninstitut und der damit verbundenen Dokumentation kann ein derartiger Bezahlvorgang später geprüft und rekonstruiert werden, z. B. anhand eines Kontoauszuges.

Eine neue Problemstellung ergibt sich im Electronic Commerce, das heißt beim Bezahlen von Waren, Dienstleistungen oder Informationen, die im Internet angeboten werden. Die Kosten für viele dieser Dienste bewegen sich im Bereich von wenigen Cent (Micro-Payment). Daher ist eine bargeldlose Transaktion wie zum Beispiel eine Überweisung oder die Belastung einer Kreditkarte unrentabel. Auch möchte der Kunde für die einmalige oder seltene Nutzung eines Dienstes eventuell keine persönlichen Daten oder Kontodaten angeben. Hierzu bietet sich das Bezahlen mit elektronischen Münzen an. Der Bezahlvorgang besteht nur aus dem Übertragen von einigen elektronischen Münzen, das heißt Bitfolgen zwischen Kunde und Händler. Wie beim klassischen Bargeld werden zwischen den beiden Partnern Objekte – nämlich elektronische Münzen – ausgetauscht. Gegebenenfalls wird auch Wechselgeld zurückgegeben, allerdings werden Kunde und Händler damit nicht belastet. Wie beim klassischen Bargeld sollte das Bezahlen anonym erfolgen, gleichzeitig aber sicher gegen Betrug sein.

Das Bezahlen mit elektronischen Münzen effizient und sicher zu gestalten, ist eine Aufgabe der modernen Kryptographie. Anhand einiger einfacher Ideen soll nun exemplarisch gezeigt werden, wie die im Buch beschriebenen kryptographischen Protokolle und Algorithmen hierzu verwendet werden. Die technischen Details folgen dann in Kapitel 9, wenn die Voraussetzungen dafür geschaffen sind. Bevor wir uns jedoch auf den faszinierenden, nicht immer ganz einfachen Weg zum Verständnis dieser Techniken machen, wollen wir am Beispiel des elektronischen Bargeldes ohne Theorie einen ersten Eindruck von den teilweise genialen Protokollen und der Mächtigkeit der modernen Kryptographie vermitteln.

Wir werden schrittweise ein Protokoll mit interessanten Eigenschaften vorstellen. Es wurde von David Chaum, dem Gründer der holländischen Firma Digicash entwickelt [Cha85, Cha92] und patentiert.

Die an dem Verfahren beteiligte Bank nennen wir E-Bank und als Zahlungsmittel werden E-Münzen benutzt. Eine solche E-Münze besteht letztlich aus einer (endlichen) Folge von



Bytes, analog zu einem Geldschein, der ein spezielles Stück bedrucktes Papier darstellt. Wir versuchen's zuerst mal ganz naiv:

### Protokoll Nr. 1

Die E-Bank erzeugt auf ihrem PC eine Datei mit dem Inhalt: „E-Münze, Wert: 5 €“, wie in Bild 1.1 dargestellt. Dies führt natürlich sofort zur Inflation, wenn die Kunden den Betrag ihrer E-Münzen beliebig ändern.

### Protokoll Nr. 2

Wenn die E-Bank jedoch die E-Münze mit einer Unterschrift versieht, die nur sie und kein anderer erstellen kann, so kann der Kunde, der die Münze auf seinem Rechner speichert, den Betrag nicht mehr abändern. Falls er das versucht, wird die digitale Signatur der Bank ungültig.<sup>1</sup> Er kann jedoch immer noch betrügen, indem er einfach beliebig viele Kopien der E-Münze erzeugt (Bild 1.1). Dies wird verhindert durch Protokoll Nr. 3.

### Protokoll Nr. 3

Wie in Bild 1.1 dargestellt, vergibt die Bank nun für jede Münze eine eindeutige Seriennummer und signiert den gesamten Text bestehend aus Betrag und Seriennummer<sup>2</sup>. Versucht nun jemand, Kopien einer derartigen Münze herzustellen, so wird der Betrug erkannt. Die E-Bank protokolliert nämlich in einer zentralen Datenbank alle eingegangenen Seriennummern und sobald mindestens zwei Münzen mit der gleichen Seriennummer zur E-Bank zurückkommen werden Hausdetektiv und Staatsanwalt benachrichtigt.

Dieses Protokoll ist sicher, denn jeder Betrug wird erkannt. Es hat aber noch eine Schwäche. Die Anonymität ist nicht gewährleistet, denn die Bank kann aufgrund der Seriennummern ein perfektes Profil jedes Kunden erstellen (siehe Bild 1.2). Das Problem wird offensichtlich durch die Seriennummern verursacht, auf die wir jedoch aus Sicherheitsgründen nicht verzichten können.

### Protokoll Nr. 4

Den Ausweg aus dem Dilemma lieferte David Chaum [Cha85] mit den von ihm erfundenen *blinden Signaturen*. Wie in Bild 1.1 dargestellt, erzeugt nun der Kunde seine E-Münzen selbst. Um eine gültige 5-€-E-Münze zu erhalten, generiert sein PC hundert Dateien, in die jeweils der Text „5 €“ sowie eine große zufällig erzeugte Seriennummer geschrieben werden. Die Seriennummer muss so groß sein, dass die Wahrscheinlichkeit für das zufällige Erzeugen von zwei gleichen Nummern (weltweit) sehr klein ist. Nun bittet er die Bank, eine dieser hundert Münzen blind, das heißt ohne Erkennen von Betrag und Seriennummer, zu signieren. Die Bank wird natürlich nur dann blind signieren, wenn sie sicher ist, dass der Betrag auf der Münze wirklich 5 € ist. Daher wählt sie zufällig 99 der 100 Münzen,

<sup>1</sup> Dies ist ganz analog zu einem unterschriebenen Vertrag, der nicht mehr abgeändert werden darf. Bei digitalen Unterschriften ist das Ändern jedoch nicht mehr möglich.

<sup>2</sup> In realen Implementierungen wird die Bank weitere Informationen, wie z. B. den Namen der Bank und das Datum, auf der E-Münze speichern. Wir beschränken uns hier jedoch auf die zum Verständnis wesentlichen Daten.

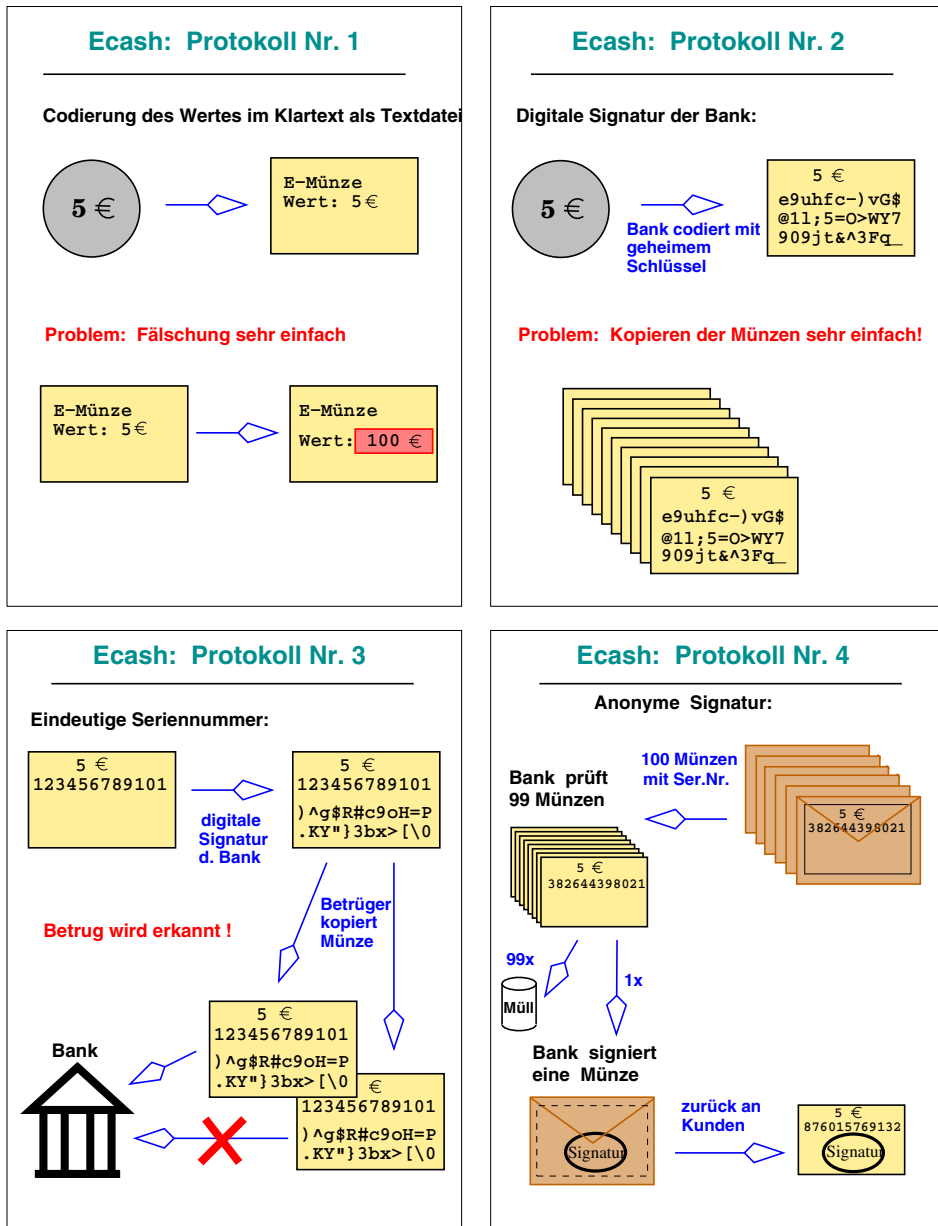


BILD 1.1 Protokolle zum Erzeugen einer E-Münze

die der Kunde auspacken und offenlegen muss. Falls der Betrag 99 mal stimmt, signiert die Bank die letzte Münze blind. Das hierzu benutzte Verfahren verwendet zahlentheoretische Eigenschaften von asymmetrischer Verschlüsselung, die in Kapitel 9 beschrieben werden. Daher beschreiben wir hier das Verfahren nur grob in Analogie zu Geldscheinen aus bedrucktem Papier.

Seriennummer	Ausgabe	Kunde	Kto.-Nr.	Händler	Rücklauf	Betrag
123456789101	12.2.2001	Maier	7654321	Otto Versand	14.2.2001	50 €
123456789102	12.2.2001	Maier	7654321	Otto Versand	14.2.2001	20 €
123456789103	12.2.2001	Maier	7654321	Otto Versand	14.2.2001	8 €
123456789104	12.2.2001	Maier	7654321	Otto Versand	14.2.2001	0.90 €
123456789105	12.2.2001	Maier	7654321	amazon.de	17.2.2001	20 €
123456789106	12.2.2001	Maier	7654321	amazon.de	17.2.2001	2 €
123456789107	15.2.2001	Huber	0054322	Frisör Kurz	15.2.2001	20 €
123456789108	15.2.2001	Huber	0054322	Frisör Kurz	15.2.2001	20 €
123456789109	15.2.2001	Huber	0054322	Frisör Kurz	15.2.2001	5 €
123456789110	15.2.2001	Huber	0054322	Frisör Kurz	15.2.2001	1 €
123456789111	15.2.2001	Huber	0054322	Tankst. Sprit	16.2.2001	100 €
123456789112	15.2.2001	Huber	0054322	Tankst. Sprit	16.2.2001	2 €
123456789113	15.2.2001	Huber	0054322	Tankst. Sprit	16.2.2001	2 €
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

**BILD 1.2** Beispiel einer möglichen Datenbank von Transaktionen der Kunden der E-Bank

Der Kunde erstellt also 100 Fünfeuroscheine mit Betrag und Seriennummer, packt jeden in einen eigenen Umschlag und legt in den Umschlag über den Geldschein ein Kohlepapier. Die Bank signiert nun den von ihr ausgewählten Geldschein blind, indem sie ihren Stempel aus dem Tresor holt und den Geldschein durch den Umschlag stempelt. Das Kohlepapier hinterlässt auf dem Schein dann den Stempelabdruck. Der Kunde erhält den signierten (gestempelten) Geldschein zurück, packt ihn aus und kann nun damit einkaufen gehen, ohne dass die Bank eine Chance hat, seine Einkäufe zu überwachen. Der Kunde oder auch der Händler kann versuchen, die gültige Münze zu kopieren. Die Bank wird jedoch den Betrug erkennen, weil sie die Seriennummern aller eingehenden Münzen mit den schon eingegangenen in ihrer Datenbank vergleicht. Das Protokoll ist nun also anonym und sicher zugleich.

Ein kleines Problem bleibt jedoch noch zu lösen. Versucht nämlich der Kunde oder der Händler Betrug durch Kopieren der E-Münze, so weiß die Bank zwar, dass der Betrug versucht wurde. Sie weiß jedoch nicht, wer der Betrüger war. David Chaum hat aber auch dieses Problem durch eine elegante Verfeinerung des Protokolls gelöst, die jedoch erst in Kapitel 9 beschrieben werden kann. Hier sei nur so viel verraten: Kopiert der Kunde den Geldschein, so legt die Bank beide eingegangenen Geldscheine übereinander, hält sie gegen das Licht und kann nun den Namen des Betrügers lesen. Ein Geldschein alleine verrät jedoch nichts über die Identität seines Erzeugers.



## Übungen

### Aufgabe 1.1

- a) Ein Betrüger möchte eine Bank, die Protokoll Nr. 4 benutzt, dazu bringen, blind eine 100-€-Münze zu signieren, seinem Konto aber nur einen Euro zu belasten.

Dazu erzeugt er 99 Münzen vom Wert 1 € und eine 100-€-Münze. Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die Bank blind die 100-€-Münze signiert?

b) Wie kann die Bank verhindern, dass der Kunde einen Betrugsversuch unternimmt?

### **Aufgabe 1.2**

Wie viele Bit muss die zufällig generierte Seriennummer einer E-Münze lang sein, damit die Wahrscheinlichkeit für eine zufällige Übereinstimmung von zwei Nummern kleiner ist als die Wahrscheinlichkeit, bei zwei aufeinander folgenden Ziehungen im Lotto (6 aus 49) sechs Richtige zu tippen? Tipp: Berechnen Sie zuerst die Wahrscheinlichkeit, mit einer zufällig erzeugten Seriennummer eine vorgegebene Zahl fester Länge zu treffen. Bestimmen Sie dann deren Länge  $n$ . In Abschnitt 6.1.2 wird gezeigt, dass die Seriennummer doppelt so lang (d. h.  $2n$ ) sein muss, um eine gleich geringe Wahrscheinlichkeit für eine zufällige Übereinstimmung von zwei beliebigen Nummern zu erreichen. ■



# 2

## Grundlagen

### ■ 2.1 Terminologie

Wie jede Wissenschaft besitzt auch die Kryptographie eine eigene Sprache, deren wichtigste Vokabeln hier kurz vorgestellt werden. Die Begriffe Kryptographie und Kryptologie werden in der Literatur unterschiedlich definiert. Am gebräuchlichsten ist folgende Einteilung: **Kryptographie** wird verstanden als die Lehre der Absicherung von Nachrichten durch Verschlüsseln. **Kryptanalyse** ist die Kunst, Chiffretext aufzubrechen, d. h. den Klartext zu reproduzieren, ohne Kenntnis des Schlüssels. **Kryptologie** vereint Kryptographie und Kryptanalyse.

Bei der **Steganographie** werden geheime Nachrichten nicht verschlüsselt, sondern versteckt. Historisches Beispiel hierfür sind unsichtbare Geheimtinten, die später durch Erwärmen sichtbar gemacht werden können. Heute werden digitale Daten in den niederwertigen Bits der Farbinformation von digitalen Bildern versteckt. Auch Audiodateien eignen sich aufgrund ihres Rauschens für die Steganographie. Wegen der geringen praktischen Bedeutung wird hier nicht auf die verwendeten Techniken eingegangen.

Ein **Alphabet**  $A$  ist eine endliche Menge von Zeichen.  $n = |A|$  ist die Mächtigkeit des Alphabets. Der lesbare Text einer Nachricht (message) wird **Klartext** (plaintext) genannt und mit  $M$  bezeichnet. Er wird als Zeichenkette über dem Alphabet  $A$  gebildet. Zum Beispiel sind  $aaa$  und  $abcabbb$  Klartexte über  $\{a, b, c\}$ . **Geheimtexte** oder **Chiffretexte** sind Zeichenketten über dem gleichen Alphabet  $A$  oder einem anderen Alphabet. Auch die **Schlüssel** sind Zeichenketten.

**Verschlüsselung** oder Chiffrierung bezeichnet das Verfahren, um eine Nachricht unverständlich zu machen. Die **Chiffre**  $E$  (encryption) ist eine invertierbare, d. h. eine umkehrbare Abbildung, welche aus dem Klartext  $M$  und einem Schlüssel  $K$  den Geheimtext  $C$  (ciphertext) erzeugt. Voraussetzung für die Umkehrbarkeit einer Abbildung ist die Injektivität<sup>1</sup>. Die Umkehrung von  $E$  zur Wiederherstellung des Klartextes wird **Entschlüsselung** genannt und mit  $D$  (decryption) bezeichnet.

Entsprechend dieser Definitionen gilt  $E(M) = C$  und  $D(C) = M$ , woraus

$$D(E(M)) = M$$

folgt, denn nach dem Entschlüsseln eines Chiffretextes sollte der Klartext zum Vorschein kommen. Praktisch alle kryptographischen Verfahren haben die Aufgabe, eine der folgenden vier Eigenschaften von Nachrichten zu gewährleisten.

<sup>1</sup> Eine Abbildung  $f: D \rightarrow B$  heißt injektiv, wenn für jedes Paar  $x_1, x_2 \in D$  gilt:  $x_1 \neq x_2 \Rightarrow f(x_1) \neq f(x_2)$ , d. h. zwei verschiedene Zahlen werden durch  $f$  nie auf den gleichen Wert abgebildet.

**Geheimhaltung:** Ziel der Geheimhaltung ist es, das Lesen einer Nachricht für Unbefugte unmöglich bzw. schwierig zu machen.

**Authentifizierung** oder Authentifikation: Identitätsbeweis des Senders einer Nachricht gegenüber dem Empfänger, d. h. der Empfänger kann sicher sein, dass die Nachricht nicht von einem anderen (unbefugten) Absender stammt.

**Integrität:** Die Nachricht darf während der Übermittlung nicht (von Unbefugten) verändert werden. Sie bewahrt ihre Integrität, das heißt ihre Unverletztheit.

**Verbindlichkeit:** Der Sender kann später nicht leugnen, eine Nachricht abgeschickt zu haben.

## ■ 2.2 Kryptographische Algorithmen

**Kryptographische Algorithmen** sind Berechnungsvorschriften, d. h. mathematische Funktionen zur Ver- und Entschlüsselung. Bei **symmetrischen Algorithmen** wird zum Chiffrieren und zum Dechiffrieren immer der gleiche Schlüssel  $K$  benutzt und es gilt

$$E_K(M) = C$$

$$D_K(C) = M$$

$$D_K(E_K(M)) = M.$$

Bei **asymmetrischen Algorithmen** wird zum Chiffrieren ein Schlüssel  $K_1$  und zum Dechiffrieren ein anderer Schlüssel  $K_2$  benutzt und es gilt:

$$E_{K_1}(M) = C$$

$$D_{K_2}(C) = M$$

$$D_{K_2}(E_{K_1}(M)) = M.$$

Man unterscheidet bei kryptographischen Algorithmen zwischen **Stromchiffren** und **Blockchiffren**. Bei Stromchiffren wird ein Zeichen nach dem anderen verschlüsselt. Bei Blockchiffren wird die Nachricht in Blöcke (z. B. der Länge 64 Bit) zerteilt und dann ein Block nach dem anderen verschlüsselt. Die Vereinigung von Algorithmus, zugehörigen Schlüsseln und den verschlüsselten Nachrichten wird **Kryptosystem** genannt.

Früher wurden so genannte **ingeschränkte Algorithmen** benutzt. Bei diesen hängt die Sicherheit davon ab, ob die Arbeitsweise des Algorithmus geheim ist. Die Geheimhaltung eines Algorithmus hat folgende schwerwiegenden Nachteile beim praktischen Einsatz:

- Verlässt eine Person eine Benutzergruppe (z. B. eine Firma), dann muss der Algorithmus geändert werden.
- Auch wenn der Quellcode der Programme nicht öffentlich bekannt ist, kann ein Angreifer aus den Maschinenprogrammen die Algorithmen rekonstruieren. Ingeschränkte Algorithmen können daher nicht an Dritte weitergegeben werden. Sie wären dann wertlos.
- Qualitätskontrolle von eingeschränkten Algorithmen findet in den meisten Fällen nicht in ausreichendem Maße statt, da die entwickelte Software nicht der Kritik und den Angriffen der Öffentlichkeit standhalten muss.

Heute werden Algorithmen mit **Schlüssel** benutzt. Der Schlüssel ist meist eine natürliche Zahl, dargestellt im Binärsystem, d. h. als Folge von Bits. Der Algorithmus ist idealerweise allgemein bekannt und nur der zugehörige Schlüssel muss geheim gehalten werden. Dieses Vorgehen wurde schon im 19. Jahrhundert von A. Kerkhoffs [Kah67] gefordert:

Die Sicherheit eines Verschlüsselungsverfahrens darf nur von der Geheimhaltung des Schlüssels abhängen, nicht jedoch von der Geheimhaltung des Algorithmus.

Kerkhoffs forderte damit, dass die Sicherheit eines Algorithmus nicht darunter leiden darf, dass er veröffentlicht wird. Die aktuelle Praxis in der Kryptographie zeigt deutlich, dass durch möglichst frühzeitige Offenlegung der Algorithmen die Sicherheit eines Kryptosystems erheblich größer wird. Denn sobald ein Algorithmus publiziert ist, muss er den Attacken der Experten standhalten, d. h. er muss sich bewähren. Sind über einen langen Zeitraum alle Attacken erfolglos, so stärkt dies das Vertrauen der Benutzer in die Sicherheit des Algorithmus. Diese Methodik der Entwicklung moderner Algorithmen ist ein wichtiger Bestandteil der so genannten **starken Kryptographie**.

In der Geschichte der Kryptographie gibt es viele Beispiele für die Verletzung von Kerkhoffs' Prinzip, was zu teilweise dramatischen Sicherheitslücken führte. Zwei Beispiele aus dem Jahr 1999 zeigen, dass selbst namhafte Firmen das Kerkhoffs-Prinzip nicht beachten. Im Online-Magazin der Zeitschrift c't vom 7.12.99<sup>2</sup> war folgender Text zu lesen:

#### **Handy-Verschlüsselung angeblich geknackt**

Die beiden israelischen Kryptologen Alex Biryukov und Adi Shamir haben Medienberichten zufolge den Verschlüsselungsalgorithmus geknackt, der GSM-Handy-Telefonate auf der Funkstrecke zur Mobiltelefon-Basisstation schützt. ...

Eines zeigen die Vorfälle um die GSM-Verschlüsselungsalgorithmen A5/1 und A5/2 aber schon jetzt deutlich: *Der Versuch, Krypto-Verfahren geheim zu halten, dient nicht der Sicherheit*. Das hat anscheinend auch die GSM-Association gelernt: Ihr Sicherheitsdirektor James Moran äusserte dem Online-Magazin Wired gegenüber, dass man künftige Algorithmen von vornherein offenlegen will, um der Fachwelt eine Prüfung zu ermöglichen. (nl/c't)

Eine Woche später, nämlich am 15.12.99<sup>3</sup> erschien an gleicher Stelle die nächste Meldung zu diesem Thema:

#### **Netscape verschlüsselt Passwörter unzureichend**

Der Netscape Navigator legt Passwörter für den Zugriff auf E-Mail-Server nur unzureichend verschlüsselt ab. Zwei Mitarbeiter des US-Softwarehauses Reliable Software Technologies (RST) brauchten lediglich acht Stunden, um den Algorithmus zu knacken. ...

Der Algorithmus zerhacke die Passwörter zwar, es handle sich jedoch um *keine starke Verschlüsselung*, so Gary McGraw von RST. Durch die Eingabe einfacher Passwörter wie „a“, „b“ und so weiter sei man relativ schnell dahinter gekommen.

...

Der US-Sicherheitsexperte Bruce Schneier wertet die Entdeckung als weiteres Beispiel dafür, *wie schädlich proprietäre Verschlüsselungsverfahren sein können*. (ad[2]/c't)

<sup>2</sup> Siehe <http://www.heise.de/newsticker/data/nl-07.12.99-000/>

<sup>3</sup> Siehe <http://www.heise.de/newsticker/data/ad-15.12.99-001/>



Ein weiteres aktuelles Beispiel betrifft das Verschlüsselungsprotokoll WEP (Wired Equivalent Privacy), das bei Funk-Netzwerken nach dem Standard IEEE802.11 verwendet wird. Die Autoren von [BGW01] schreiben

#### Conclusions

Wired Equivalent Privacy (WEP) isn't. The protocol's problems is a result of misunderstanding of some cryptographic primitives and therefore combining them in insecure ways. These attacks point to *the importance of inviting public review* from people with expertise in cryptographic protocol design; had this been done, the problems stated here would have surely been avoided.

Diese drei Meldungen sprechen für sich und bedürfen keines weiteren Kommentars.

## ■ 2.3 Kryptographische Protokolle

Ein kryptographischer Algorithmus zum Verschlüsseln kann auf vielfältige Art und Weise in unterschiedlichen Anwendungen eingesetzt werden. Damit eine Anwendung immer in der gleichen und korrekten Art abläuft, werden kryptographische Protokolle definiert.

Im Gegensatz zu den kryptographischen Algorithmen handelt es sich bei den Protokollen um Verfahren zur Steuerung des Ablaufs von Transaktionen für bestimmte Anwendungen, wie zum Beispiel das in Kapitel 1 vorgestellte Protokoll für elektronisches Bargeld.

## ■ 2.4 Public-Key-Algorithmen

Wollen zwei Parteien über einen unsicheren Kanal mit einem symmetrischen Algorithmus geheime Nachrichten austauschen, so müssen sie einen geheimen Schlüssel vereinbaren. Wenn sie nur über einen unsicheren Kanal verfügen, sind sie mit dem Schlüsseltauschproblem (Kapitel 5) konfrontiert.

Erst Mitte der 70er Jahre wurde mit der Erfindung der Public-Key-Kryptographie eine befriedigende Lösung gefunden. Sie kam genau zum richtigen Zeitpunkt, um für eine sichere Kommunikation im Internet den Grundstein zu legen. Systeme wie zum Beispiel PGP [Zim95a] (Kapitel 8.1) zum Verschlüsseln von E-Mails wären undenkbar ohne Public-Key-Algorithmen.

Vor der Erfindung der Public-Key-Algorithmen beschränkte sich das Verschlüsseln von Nachrichten auf spezielle, zum Beispiel militärische Anwendungen, bei denen der hohe Aufwand für den Schlüsseltausch gerechtfertigt war. Mit Hilfe der Public-Key-Kryptographie kann nun jedermann mit beliebigen Partnern geheime Nachrichten austauschen, Dokumente signieren und viele andere kryptographische Anwendungen wie zum Beispiel elektronisches Bargeld nutzen.

Algorithmen mit öffentlichem Schlüssel sind asymmetrische Algorithmen, die einen geheimen Schlüssel  $S$  (secret key) sowie einen öffentlichen Schlüssel  $P$  (public key) benutzen, deren Arbeitsweise und Sicherheit in Kapitel 5 ausführlich untersucht wird.