

Albrecht Beutelspacher
Jörg Schwenk
Klaus-Dieter Wolfenstetter

**Moderne Verfahren der
Kryptographie**

Aus dem Programm
Mathematik

Diskrete Mathematik

von M. Aigner

Diskrete Mathematik für Einsteiger

von A. Beutelspacher und M.-A. Zschiegner

Lineare Algebra

von A. Beutelspacher

Lineare Algebra Interaktiv (CD-ROM)

von A. Beutelspacher und M.-A. Zschiegner

Kryptologie

von A. Beutelspacher

Sicherheit und Kryptographie im Internet

von J. Schwenk

Verschlüsselungsalgorithmen

von G. Brands

Codierungstheorie

von R.-H. Schulz

Algebraische Grundlagen der Informatik

Zahlen – Strukturen – Codierung – Verschlüsselung

von K.-U. Witt

Mathematik für Informatiker

von P. Hartmann

vieweg

Albrecht Beutelspacher
Jörg Schwenk
Klaus-Dieter Wolfenstetter

Moderne Verfahren der Kryptographie

Von RSA zu Zero-Knowledge

5., verbesserte Auflage



Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <<http://dnb.ddb.de>> abrufbar.

Prof. Dr. *Albrecht Beutelspacher*
Justus-Liebig-Universität Gießen
Mathematisches Institut
Arndtstraße 2
D-35392 Gießen
E-Mail: albrecht.beutelspacher@math.uni-giessen.de

Prof. Dr. *Jörg Schwenk*
Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Netz- und Datensicherheit
Universitätsstraße 150
D-44801 Bochum
E-Mail: joerg.schwenk@ruhr-uni-bochum.de

Klaus-Dieter Wolfenstetter
Technologiezentrum in der T-Nova/T-Systems
Am Kavalleriesand 3
D-64295 Darmstadt
E-Mail: klaus-dieter.wolfenstetter@t-systems.de

1. Auflage 1995
- 2., verbesserte Auflage 1998
- 3., verbesserte Auflage 1999
- 4., verbesserte Auflage Juni 2001
- 5., verbesserte Auflage Januar 2004

Alle Rechte vorbehalten
© Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden 2004

Der Verlag Vieweg ist ein Unternehmen von Springer Science+Business Media.
www.vieweg.de



Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung des Verlags unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

Umschlaggestaltung: Ulrike Weigel, www.CorporateDesignGroup.de

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

ISBN 978-3-528-46590-2 ISBN 978-3-322-92848-1 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-322-92848-1

Vorwort

Es gibt zwei Welten der Kryptographie.

Der *einen* Welt scheint, von außen betrachtet, ein Hauch von Abenteuer und Romantik anzuhaften. Man denkt an Sherlock Holmes und James Bond, sieht Massen von Menschen mit Codebüchern operieren und lange Buchstabenkolonnen statistisch untersuchen; es ist die Welt der ENIGMA und anderer Chiffriermaschinen, bei deren Anblick das Herz jedes Antiquitätensammlers höher schlägt. Dies ist die Welt der „klassischen“ Kryptographie.

Demgegenüber ist die *andere* Welt, die der modernen Kryptographie, bestimmt durch Stichworte wie e-Commerce, Public-Key-Infrastruktur, digitale Signatur oder Chipkarte. Die Menschen, die man hier trifft, sind Medienexperten, Banker, Mathematiker und Informatiker.

Dieses Buch handelt von der modernen Kryptographie.

Die Unterscheidung in zwei Welten ist nicht nur äußerlich, sondern auch entscheidend durch die innere Entwicklung der Kryptologie geprägt. Für die moderne Kryptographie sind die Jahreszahlen 1976 und 1985 wichtig.

Im Jahre 1976 veröffentlichten Whitfield Diffie und Martin Hellman das Prinzip der Public-Key-Kryptographie. Mit ihrer bahnbrechenden Arbeit (und dem zwei Jahre später veröffentlichten RSA-Algorithmus) wurde ein jahrtausendealtes „unlösbares“ Problem denkbar elegant gelöst: Während in der Welt der alten Kryptologie je zwei Teilnehmer, die geheim miteinander kommunizieren wollten, schon *vorher* ein gemeinsames Geheimnis haben mussten (ihren „geheimen Schlüssel“), ist dies in der Public-Key-Kryptographie nicht mehr der Fall: Jeder, auch jemand, der mit mir noch nie Kontakt hatte, kann mir eine verschlüsselte Nachricht schicken, die nur ich entschlüsseln kann.

Das zweite wichtige Datum ist die Entdeckung der Zero-Knowledge-Protokolle durch Shafi Goldwasser, Silvio Micali und Charles Rackoff im Jahre 1985 (und die sich daran anschließende Veröffentlichung des Fiat-Shamir-Algorithmus). Diese Protokolle lösen ein noch paradoxer erscheinendes Problem: Ich kann jedermann von der Existenz eines Geheimnisses überzeugen, ohne ihm das Geringste zu verraten. Anders gesagt: Ein Zero-Knowledge-Protokoll ist eine Unterhaltung, an deren Ende mein Gegenüber davon überzeugt ist, dass ich ein Geheimnis kenne, sonst aber nichts erfahren hat; insbesondere weiß er nichts, aber auch gar nichts über das Geheimnis.

Zero-Knowledge-Verfahren benutzen Basistechniken der Public-Key-Kryptographie; zum Beispiel ist die verwendete Mathematik die gleiche. Entscheidend kommt aber jetzt der Protokollaspekt hinzu: In einem Zero-Knowledge-Protokoll müssen die Partner nicht nur etwas berechnen, sondern sie müssen sich gemäß genau festgelegter, ausge-

klügelter Regeln unterhalten. Das Ziel wird nur durch diese Kombination erreicht: Die Mechanismen der Public-Key-Kryptographie sind die Bausteine, die Protokolle sind die Bauregeln für komplexe Verfahren.

Kurz gesagt: Moderne Kryptologie ist „Public-Key, Zero-Knowledge und die Folgen“. Davon handelt dieses Buch.

Unser Ziel ist es, entscheidende Entwicklungen der letzten Jahre konzentriert und verständlich darzustellen. Im Einzelnen geht es um folgende Themen:

Kapitel 1 und 2 können als schnelle Einführung in die Kryptologie betrachtet werden. Die dort vorgestellten Begriffe und Ergebnisse sind für das ganze Buch wichtig.

Im dritten Kapitel werden die grundlegenden („klassischen“) Protokolle der modernen Kryptographie dargestellt: Challenge-and-Response, Diffie-Hellman-Schlüsselvereinbarung und blinde Signaturen.

Kapitel 4 ist zentral, denn dort werden nicht nur die berühmten Zero-Knowledge-Protokolle vorgestellt, sondern auch die darauf aufbauenden Entwicklungen der letzten Jahre, wie etwa Witness-Hiding und nichtinteraktive Zero-Knowledge-Protokolle, präsentiert.

Im fünften Kapitel geht es um Verfahren, wie zwei oder mehr Parteien etwas gemeinsam berechnen können, und zwar so, dass dabei niemand betrügen kann. Zum Beispiel wird das Problem, mit verschlüsselten Daten zu rechnen, gelöst. Besonders spektakulär ist die Frage, ob es bei elektronischer Kommunikation auch möglich ist, Skat zu spielen, das bedeutet die Karten so zu verteilen, dass sich anschließend niemand beschweren kann.

Das sechste Kapitel behandelt Fragen der Anonymität. Kann man über Computer anonym kommunizieren oder ist der Computer notwendigerweise der „Big Brother“, der alles beobachtet?

Schließlich werden in Kapitel 7 noch einige wichtige Fragen studiert, nämlich Schlüsselmanagement und „oblivious transfer“. Nicht zuletzt findet sich hier auch eine Einführung in das faszinierende Gebiet der Quantenkryptographie.

Im letzten Kapitel wird die benötigte Mathematik zusammengestellt und Bezeichnungsweisen festgelegt; in diesem Kapitel können Sie auch eventuell unklare mathematische Begriffe nachlesen.

Wie ist das Buch geschrieben?

Obwohl wir versuchen, den wissenschaftlichen Fortschritt der letzten Jahre vorzustellen, ist das Buch leicht und weitgehend ohne spezielle Voraussetzungen lesbar. Dazu dienen vor allem drei Mittel.

- Zunächst werden alle benötigten Ergebnisse über Mathematik und Kryptologie innerhalb des Buches bereitgestellt.
- Des Weiteren haben wir einen modularen Aufbau gewählt. Das bedeutet, dass die einzelnen Kapitel weitgehend unabhängig voneinander gelesen werden können. Es ist sogar möglich, einzelne Abschnitte herauszugreifen. Dadurch können Sie sich schnell über ein bestimmtes Stichwort informieren.

- Schließlich haben wir die Themen auf verschiedenen Ebenen dargestellt, die jeweils mit Gewinn gelesen werden können. Jedes Thema wird zunächst möglichst anschaulich erklärt. Dazu gehören in der Regel ein nichtmathematisches Beispiel, und häufig ein Bild. Die zweite Ebene ist die mathematisch präzise Darstellung, wobei wir auch hierbei keinem übertriebenen Formalismus frönen. Insbesondere formulieren wir die Ergebnisse nicht auf der sprachlichen Ebene der Turingmaschinen. Schließlich erfolgt in vielen Fällen eine Analyse, die Stärken und Schwächen des behandelten Protokolls aufzeigt.

Für wen ist dieses Buch?

Aus der obigen Beschreibung wird deutlich, dass sich das Buch für eine große Leserschaft mit unterschiedlichen Ansprüchen, Zielen und Voraussetzungen eignet.

- Auf dem Weg in die Informationsgesellschaft sind vielfältige Sicherheitsprobleme zu lösen. In diesem Buch finden Techniker, Manager, Anwender und andere technisch und organisatorisch Verantwortliche aufbereitete Informationen über die wichtigsten Entwicklungen der letzten zehn Jahre.
- Für Studierende der Mathematik, Informatik und Elektrotechnik ist das Buch eine ideale Ergänzung zum Standardlehrstoff; es zeigt deutlich, dass zur Lösung praktischer Probleme Mathematik und theoretische Informatik mit Erfolg eingesetzt werden können.
- Schließlich wendet sich das Buch an all diejenigen, die sich über eine der faszinierendsten Entwicklungen der Mathematik und Informatik der letzten Jahre kundig machen wollen.

Einige Bemerkungen zum Text.

Sie werden relativ häufig englische Ausdrücke finden: Zero-Knowledge, oblivious transfer, challenge and response, ... Das liegt einfach daran, dass sich diese Ausdrücke eingebürgert haben, so dass sich jeder Versuch einer Übersetzung lächerlich anhört. Wir bitten alle Sprachpuristen um Nachsicht.

Um Nachsicht bitten wir auch in einer anderen Sache. Man kann sich stundenlang und erbittert streiten über mögliche Unterschiede der Begriffe „Kryptographie“ und „Kryptologie“ sowie „Authentikation“, „Authentifikation“, „Authentisierung“ usw. Wir machen diesen Streit nicht mit. In diesem Buch verwenden wir die Kr-Begriffe und die Au-Begriffe synonym. Dies wird nicht zu sachlichen Schwierigkeiten führen.

Protokolle sind geregelte Unterhaltungen zwischen Personen oder Instanzen. In vielen Fällen geht es um zwei Parteien, die sich manchmal vor einer gefährlichen dritten Partei schützen wollen. In der englischsprachigen Literatur werden die zwei oft mit Alice und Bob bezeichnet; dabei ist Alice diejenige, die etwas sendet und Bob ist der Empfänger. Auch bei uns treten diese Personen auf. Manchmal heißen sie nur A und B; aber auch dann ist A weiblich und B männlich. Die böse dritte Partei ist meist männlich, manchmal aber auch (Gnade!) weiblich.

Dieses Buch wäre ohne die tatkräftige Unterstützung zahlreicher Kolleginnen und Kollegen nicht, oder jedenfalls nicht so, zustande gekommen. Wir danken ganz besonders Klaus-Clemens Becker, Jörg Eisfeld, Klaus Huber, Annette Kersten, Ute Rosenbaum, Frank Schaefer-Lorinser, Alfred Scheerhorn, Beate Schwenk, Friedrich Tönsing und Andreas Riedenauer für ihre aufmunternden, bössartigen, charmanten, detaillierten, emotionalen, fehlenden, globalen, hämischen, indiskutablen, jammervollen, kryptischen, langweiligen, mathematischen, nichts sagenden, offenen, positiven, quälenden, ratlosen, soliden, treffenden, unsachlichen, vernichtenden, witzigen und zynischen Bemerkungen.

Inhaltsverzeichnis

1 Ziele der Kryptographie	1
1.1 Geheimhaltung	1
1.2 Authentikation	2
1.3 Anonymität	3
1.4 Protokolle	4
2 Kryptologische Grundlagen	6
2.1 Verschlüsselung	6
2.2 Asymmetrische Verschlüsselung	10
2.3 Einwegfunktionen	12
2.4 Kryptographische Hashfunktionen	13
2.5 Trapdoor-Einwegfunktionen	14
2.6 Commitment und Bit-Commitment	15
2.7 Digitale Signatur	16
2.8 Der RSA-Algorithmus	19
3 Grundlegende Protokolle	23
3.1 Passwortverfahren (Festcodes)	23
3.2 Wechselcodeverfahren	25
3.3 Challenge-and-Response	26
3.4 Diffie-Hellman-Schlüsselvereinbarung	28
3.5 Das ElGamal-Verschlüsselungsverfahren	30
3.6 Das ElGamal-Signaturverfahren	31
3.7 Shamirs No-Key-Protokoll	32
3.8 Knobeln übers Telefon	34
3.9 Blinde Signaturen	36
4 Zero-Knowledge-Verfahren	39
4.1 Interaktive Beweise	39
4.2 Zero-Knowledge-Verfahren	43
4.3 Alle Probleme in NP besitzen einen Zero-Knowledge-Beweis	51
4.4 Es ist besser, zwei Verdächtige zu verhören	55
4.5 Witness Hiding	58
4.6 Nichtinteraktive Zero-Knowledge-Beweise	62
5 Multiparty Computations	68
5.1 Secret Sharing Schemes	68
5.2 Wer verdient mehr?	71
5.3 Skatspielen übers Telefon	74
5.4 Secure Circuit Evaluation	76
5.5 Wie kann man sich vor einem allwissenden Orakel schützen?	80

6 Anonymität	82
6.1 Das Dining-Cryptographers-Protokoll	82
6.2 MIXe	84
6.3 Elektronische Münzen	86
6.4 Elektronische Wahlen	88
7 Vermischtes	92
7.1 Schlüsselmanagement durch Trusted Third Parties	92
7.2 Angriffe auf Protokolle	98
7.3 Oblivious Transfer	104
7.4 Quantenkryptographie	112
8 Mathematische Grundlagen	115
8.1 Natürliche Zahlen	115
8.2 Modulare Arithmetik	118
8.3 Quadratische Reste	122
8.4 Der diskrete Logarithmus	124
8.5 Isomorphie von Graphen	128
8.6 Der Zufall in der Kryptographie	129
8.7 Komplexitätstheorie	131
8.8 Große Zahlen	133
Literaturverzeichnis	135
Stichwortverzeichnis	141