

Inhalt

Vorwort	xvii
Danksagungen	xxi
Über dieses Buch	xxii
Über den Autor	xxvii
Teil A Primitive: Die Elemente der Kryptografie	1
1 Einführung	3
1.1 Kryptografie sichert Protokolle	4
1.2 Symmetrische Kryptografie: Was ist symmetrische Verschlüsselung?	5
1.3 Kerckhoffs' Prinzip: Nur der Schlüssel wird geheim gehalten	8
1.4 Asymmetrische Kryptografie: Zwei Schlüssel sind besser als einer	10
1.4.1 Schlüsselaustausch oder wie man zu einem gemeinsamen Geheimnis kommt	11
1.4.2 Asymmetrische Verschlüsselung – anders als die symmetrische	14
1.4.3 Digitale Signaturen – wie Unterschrift mit Stift und Papier	16
1.5 Klassifizierende und abstrahierende Kryptografie	18
1.6 Theoretische Kryptografie vs. praktische Kryptografie	20
1.7 Von der Theorie zur Praxis: Wählen Sie Ihr eigenes Abenteuer	21
1.8 Ein Wort der Warnung	27
Zusammenfassung	27

2	Hashfunktionen	29
2.1	Was ist eine Hashfunktion?	29
2.2	Sicherheitseigenschaften einer Hashfunktion	32
2.3	Sicherheitsbetrachtungen für Hashfunktionen	34
2.4	Hashfunktionen in der Praxis	36
	2.4.1 Commitments	36
	2.4.2 Subressourcenintegrität	37
	2.4.3 BitTorrent	37
	2.4.4 Tor	38
2.5	Standardisierte Hashfunktionen	39
	2.5.1 Die Hashfunktion SHA-2	40
	2.5.2 Die Hashfunktion SHA-3	43
	2.5.3 SHAKE und cSHAKE: Zwei Funktionen mit erweiterbarer Ausgabe (XOF)	48
	2.5.4 Mehrdeutiges Hashing mit TupleHash vermeiden	49
2.6	Hashing von Kennwörtern	51
	Zusammenfassung	53
3	Message Authentication Codes (MACs)	55
3.1	Zustandslose Cookies, ein motivierendes Beispiel für MACs	55
3.2	Ein Beispiel in Code	59
3.3	Sicherheitseigenschaften eines MAC	60
	3.3.1 Fälschen eines Authentifizierungstags	60
	3.3.2 Längen des Authentifizierungstags	61
	3.3.3 Replay-Angriffe	62
	3.3.4 Authentifizierungstags in konstanter Zeit verifizieren	63
3.4	MAC im wahren Leben	65
	3.4.1 Authentifizierung von Nachrichten	65
	3.4.2 Schlüssel ableiten	65
	3.4.3 Integrität von Cookies	66
	3.4.4 Hashtabellen	66
3.5	MACs in der Praxis	67
	3.5.1 HMAC, ein Hash-basierter MAC	67
	3.5.2 KMAC – ein MAC, der auf cSHAKE basiert	68
3.6	SHA-2- und Length-Extension-Angriffe	69
	Zusammenfassung	72

4	Authentifizierte Verschlüsselung	73
4.1	Was ist eine Chiffre?	74
4.2	Die Blockchiffre AES (Advanced Encryption Standard)	76
4.2.1	Wie viel Sicherheit bietet AES?	76
4.2.2	Die Schnittstelle von AES	77
4.2.3	Die Interna von AES	78
4.3	Der verschlüsselte Pinguin und die Betriebsart CBC	80
4.4	Fehlende Authentizität, deshalb AES-CBC-HMAC	83
4.5	All-in-one-Konstruktionen: Authentifizierte Verschlüsselung	85
4.5.1	Was ist authentifizierte Verschlüsselung mit zugehörigen Daten (AEAD)?	85
4.5.2	Der AEAD-Modus AES-GCM	87
4.5.3	ChaCha20-Poly1305	92
4.6	Andere Arten der symmetrischen Verschlüsselung	96
4.6.1	Key-Wrapping	97
4.6.2	Authentifizierte Verschlüsselung, die gegen Nonce-Missbrauch resistent ist	97
4.6.3	Datenträgerverschlüsselung	97
4.6.4	Datenbankverschlüsselung	98
	Zusammenfassung	99
5	Schlüsselaustausch	101
5.1	Was sind Schlüsselvereinbarungen?	102
5.2	Der Diffie-Hellman-(DH-)Schlüsselaustausch	105
5.2.1	Gruppentheorie	105
5.2.2	Das Problem des diskreten Logarithmus: Die Basis von Diffie-Hellman	110
5.2.3	Die Diffie-Hellman-Standards	112
5.3	Der Elliptic Curve Diffie-Hellman-(ECDH-)Schlüsselaustausch ...	113
5.3.1	Was ist eine elliptische Kurve?	114
5.3.2	Wie funktioniert der Elliptic Curve Diffie-Hellman- (ECDH-)Schlüsselaustausch?	118
5.3.3	Die Standards für Elliptic Curve Diffie-Hellman	119
5.4	Angriffe auf kleine Untergruppen und andere Sicherheits- überlegungen	121
	Zusammenfassung	125

6	Asymmetrische und hybride Verschlüsselung	127
6.1	Was ist asymmetrische Verschlüsselung?	128
6.2	Asymmetrische Verschlüsselung in der Praxis und hybride Verschlüsselung	130
6.2.1	Schlüsselvereinbarungen und Schlüsselkapselung	130
6.2.2	Hybride Verschlüsselung	132
6.3	Asymmetrische Verschlüsselung mit RSA: Das Schlechte und das weniger Schlechte	136
6.3.1	RSA nach Lehrbuch	136
6.3.2	Warum man RSA PKCS#1 v1.5 nicht verwenden sollte ...	141
6.3.3	Asymmetrische Verschlüsselung mit RSA-OAEP	142
6.4	Hybride Verschlüsselung mit ECIES	146
	Zusammenfassung	148
7	Signaturen und Null-Wissen-Beweise	149
7.1	Was ist eine Signatur?	150
7.1.1	Signieren und Verifizieren in der Praxis	151
7.1.2	DER Anwendungsfall von Signaturen: Authentifizierter Schlüsselaustausch	152
7.1.3	Eine praktische Anwendung: Infrastrukturen für öffentliche Schlüssel	153
7.2	Null-Wissen-Beweise (ZKPs): Der Ursprung der Signaturen	155
7.2.1	Schnorr-Identifikationsprotokoll: Ein interaktiver Null-Wissen-Beweis	155
7.2.2	Signaturen als nicht interaktive Null-Wissen-Beweise ...	159
7.3	Die Signaturalgorithmen, die Sie verwenden sollten (oder nicht) ..	160
7.3.1	RSA PKCS#1 v1.5: Ein schlechter Standard	161
7.3.2	RSA-PSS: Ein besserer Standard	164
7.3.3	Der Elliptic Curve Digital Signature-Algorithmus (ECDSA)	166
7.3.4	Der Edwards-curve Digital Signature Algorithm (EdDSA)	168
7.4	Subtiles Verhalten von Signaturverfahren	172
7.4.1	Substitutionsangriffe auf Signaturen	172
7.4.2	Malleability von Signaturen	174
	Zusammenfassung	175
8	Zufälligkeit und Geheimnisse	177
8.1	Was ist Zufälligkeit?	178
8.2	Langsame Zufälligkeit? Verwenden Sie einen Pseudozufalls- zahlengenerator (PRNG)	180
8.3	Zufälligkeit in der Praxis erzeugen	184

8.4	Zufallszahlenerzeugung und Sicherheitsüberlegungen	186
8.5	Öffentliche Zufälligkeit	189
8.6	Schlüsselableitung mit HKDF	191
8.7	Schlüssel und Geheimnisse verwalten	195
8.8	Dezentralisiertes Vertrauen mit Schwellenwertkryptografie	197
	Zusammenfassung	200
Teil B Protokolle: Die Rezepte der Kryptografie		203
9	Sicherer Transport	205
9.1	Die Protokolle für sicheren Transport – SSL und TLS	205
	9.1.1 Von SSL zu TLS	206
	9.1.2 TLS in der Praxis verwenden	207
9.2	Wie funktioniert das TLS-Protokoll?	209
	9.2.1 Der TLS-Handshake	210
	9.2.2 Wie TLS 1.3 Anwendungsdaten verschlüsselt	224
9.3	Der Stand der Dinge im verschlüsselten Web heute	225
9.4	Andere sichere Transportprotokolle	228
9.5	Das Noise-Protokoll-Framework: Eine moderne Alternative zu TLS	229
	9.5.1 Die vielen Handshakes von Noise	229
	9.5.2 Ein Handshake mit Noise	230
	Zusammenfassung	232
10	Ende-zu-Ende-Verschlüsselung	233
10.1	Warum Ende-zu-Ende-Verschlüsselung?	234
10.2	Eine Vertrauensbasis, die nirgendwo zu finden ist	236
10.3	Das Scheitern der verschlüsselten E-Mail	237
	10.3.1 PGP oder GPG? Und wie funktionieren sie?	238
	10.3.2 Vertrauen zwischen Benutzern mit dem Netz des Vertrauens skalieren	241
	10.3.3 Schlüsselermittlung ist ein echtes Problem	242
	10.3.4 Wenn nicht PGP, was dann?	243
10.4	Sicheres Messaging: Ein moderner Blick auf die Ende-zu-Ende- Verschlüsselung mit Signal	245
	10.4.1 Benutzerfreundlicher als WOT: Vertrauen, aber verifizieren	246
	10.4.2 X3DH: Der Handshake des Signal-Protokolls	249
	10.4.3 Double Ratchet: Das Post-Handshake-Protokoll von Signal	252
10.5	Der Stand der Ende-zu-Ende-Verschlüsselung	257
	Zusammenfassung	259

11	Benutzerauthentifizierung	261
11.1	Authentifizierung – eine Wiederholung	262
11.2	Benutzerauthentifizierung – oder wie wird man Kennwörter los? . . .	264
11.2.1	Ein Kennwort für alles: Single Sign-on (SSO) und Kennwort-Manager	266
11.2.2	Kein Interesse an Ihren Kennwörtern? Verwenden Sie einen asymmetrischen kennwort- authentifizierten Schlüsselaustausch	268
11.2.3	Einmalkennwörter sind eigentlich keine Kennwörter: Mit symmetrischen Schlüsseln kennwortlos werden	272
11.2.4	Kennwörter durch asymmetrische Schlüssel ersetzen	276
11.3	Benutzergestützte Authentifizierung: Pairing von Geräten mit menschlicher Hilfe	279
11.3.1	Vorher vereinbarte Schlüssel (Pre-shared keys)	281
11.3.2	Symmetrischer kennwortauthentifizierter Schlüssel- austausch mit CPace	283
11.3.3	Gab es einen MITM-Angriff auf meinen Schlüssel- austausch? Prüfen Sie einfach einen kurzen authentifizierten String (SAS)	284
	Zusammenfassung	288
12	Krypto wie in Kryptowährung?	291
12.1	Eine kleine Einführung in byzantinische fehlertolerante (BFT) Konsensalgorithmen	292
12.1.1	Ein Problem der Stabilität: Verteilte Protokolle zur Rettung	292
12.1.2	Ein Problem des Vertrauens? Dezentralisierung hilft	294
12.1.3	Ein Problem der Größe: Erlaubnisfreie und zensur- resistente Netzwerke	295
12.2	Wie funktioniert Bitcoin?	297
12.2.1	Wie Bitcoin mit Kontoständen und Transaktionen umgeht	298
12.2.2	BTCs schürfen im digitalen Goldzeitalter	300
12.2.3	Verzweigungschaos – Konflikte beim Mining lösen	304
12.2.4	Die Blockgröße mit Merkle-Bäumen reduzieren	307
12.3	Ein Rundgang durch die Kryptowährungen	309
12.3.1	Volatilität	309
12.3.2	Latenz	309
12.3.3	Größe der Blockchain	310
12.3.4	Vertraulichkeit	310
12.3.5	Energieeffizienz	310

12.4	DiemBFT: Ein byzantinisch fehlertolerantes (BFT) Konsensprotokoll	311
12.4.1	Sicherheit und Lebendigkeit: Die beiden Eigenschaften eines BFT-Konsensprotokolls	311
12.4.2	Eine Runde im DiemBFT-Protokoll	312
12.4.3	Wie viel Unehrlichkeit kann das Protokoll tolerieren?	313
12.4.4	Die DiemBFT-Regeln für eine Abstimmung	314
12.4.5	Wann gelten Transaktionen als finalisiert?	315
12.4.6	Die Intuitionen hinter der Sicherheit von DiemBFT	316
	Zusammenfassung	318
13	Hardware-Kryptografie	321
13.1	Angreifermodell der modernen Kryptografie	321
13.2	Nicht vertrauenswürdige Umgebungen: Hardware als Rettung	323
13.2.1	White-Box-Kryptografie – eine schlechte Idee	324
13.2.2	In Ihrer Brieftasche: Smartcards und Secure Elements	325
13.2.3	Liebliche der Banken: Hardware-Sicherheitsmodule (HSMs)	328
13.2.4	Trusted Platform Modules (TPMs): Eine nützliche Standardisierung von Secure Elements	330
13.2.5	Vertrauliche Datenverarbeitung mit einer vertrauenswürdigen Ausführungsumgebung (TEE)	334
13.3	Welche Lösung ist für mich geeignet?	335
13.4	Leakage-resiliente Kryptografie oder wie man Seitenkanal- angriffe in Software entschärft	337
13.4.1	Programmierung in konstanter Zeit	340
13.4.2	Nicht das Geheimnis verwenden! Maskieren und Blinding	341
13.4.3	Was ist mit Fehlerangriffen?	342
	Zusammenfassung	343
14	Post-Quanten-Kryptografie	347
14.1	Was sind Quantencomputer und warum fürchten sich Kryptografen vor ihnen?	348
14.1.1	Quantenmechanik – das Studium des Kleinen	348
14.1.2	Von der Geburt des Quantencomputers zur Quanten- überlegenheit	351
14.1.3	Der Einfluss der Algorithmen von Grover und Shor auf die Kryptografie	353
14.1.4	Post-Quanten-Kryptografie – die Verteidigung gegen Quantencomputer	354

14.2	Hash-basierte Signaturen – eine Hashfunktion genügt	355
14.2.1	Lamport-Einmal-Signaturverfahren	355
14.2.2	Kleinere Schlüssel mit Winternitz-Einmal-Signaturen (WOTS)	357
14.2.3	Vielfache Signaturen mit XMSS und SPHINCS+	359
14.3	Kürzere Schlüssel und Signaturen mit gitterbasierter Kryptografie . .	362
14.3.1	Was ist ein Gitter?	362
14.3.2	Lernen mit Fehlern (LWE), eine Basis für die Kryptografie?	364
14.3.3	Kyber, ein gitterbasierter Schlüsselaustausch	366
14.3.4	Dilithium, ein gitterbasiertes Signaturverfahren	368
14.4	Muss ich in Panik geraten?	370
	Zusammenfassung	372
15	Ist es das? Die Kryptografie der nächsten Generation	375
15.1	Je mehr, desto besser: Sichere Mehrparteienberechnung (MPC) . . .	376
15.1.1	Private Mengenüberschneidung (PSI)	377
15.1.2	MPC für allgemeine Zwecke	378
15.1.3	Der Zustand von MPC	380
15.2	Vollständig homomorphe Verschlüsselung (FHE) und die Versprechen einer verschlüsselten Cloud	381
15.2.1	Ein Beispiel für homomorphe Verschlüsselung mit RSA-Verschlüsselung	381
15.2.2	Die verschiedenen Arten der homomorphen Verschlüsselung	382
15.2.3	Bootstrapping, der Schlüssel zur vollständig homomorphen Verschlüsselung	382
15.2.4	Ein FHE-Schema, das auf dem Problem Lernen mit Fehlern basiert	385
15.2.5	Wo wird es verwendet?	386
15.3	Allgemeine Null-Wissen-Beweise (ZKPs)	387
15.3.1	Wie zk-SNARKs funktionieren	390
15.3.2	Homomorphe Commitments, um Teile des Beweises zu verbergen	391
15.3.3	Bilineare Paarungen, um unsere homomorphen Commitments zu verbessern	392
15.3.4	Woher kommt die Prägnanz?	393
15.3.5	Von Programmen zu Polynomen	394
15.3.6	Programme sind für Computer; wir brauchen stattdessen arithmetische Schaltungen	394

15.3.7	Eine arithmetische Schaltung in ein Rang-1-Constraint-System (R1CS) konvertieren	395
15.3.8	Von R1CS zu einem Polynom	396
15.3.9	Es gehören zwei dazu, um ein im Exponenten verstecktes Polynom auszuwerten	397
	Zusammenfassung	399
16	Wann und wo Kryptografie scheitert	401
16.1	Die Suche nach dem richtigen kryptografischen Primitiv oder Protokoll ist eine langweilige Angelegenheit	402
16.2	Wie verwende ich ein kryptografisches Primitiv oder Protokoll? Höfliche Standards und formale Verifizierung	404
16.3	Wo sind die guten Bibliotheken?	407
16.4	Kryptografie missbrauchen: Entwickler sind der Feind	408
16.5	Sie machen es falsch: Brauchbare Sicherheit	410
16.6	Kryptografie ist keine Insel	411
16.7	Ihre Verantwortlichkeiten als Kryptografie-Praktiker – keine »selbst gedrehte« Krypto	412
	Zusammenfassung	414
A	Antworten zu den Übungen	417
A.1	Kapitel 2	417
A.2	Kapitel 3	418
A.3	Kapitel 6	418
A.4	Kapitel 7	419
A.5	Kapitel 8	419
A.6	Kapitel 9	419
A.7	Kapitel 10	420
A.8	Kapitel 11	420
	Index	423