

Inhaltsübersicht

Teil 1 Wozu Kryptografie?

1	Einleitung	3
2	Was ist Kryptografie und warum ist sie so wichtig?	9
3	Wie Daten abgehört werden können	17
4	Symmetrische Verschlüsselung	41
5	Die Enigma und andere Verschlüsselungsmaschinen	59

Teil 2 Moderne Kryptografie

6	Der Data Encryption Standard	81
7	Weitere symmetrische Verschlüsselungsverfahren	93
8	Der Advanced Encryption Standard (AES)	127
9	Noch weitere symmetrische Verschlüsselungsverfahren	139
10	Asymmetrische Verschlüsselung	159
11	Digitale Signaturen	183
12	Weitere asymmetrische Krypto-Verfahren	193
13	Kryptografische Hashfunktionen	207
14	Kryptografische Zufallsgeneratoren	245
15	Stromchiffren	263

Teil 3 Implementierung von Kryptografie

16	Real-World-Attacken	301
17	Standardisierung in der Kryptografie	329
18	Betriebsarten und Datenformatierung	343

19	Kryptografische Protokolle	359
20	Authentifizierung	379
21	Verteilte Authentifizierung	401
22	Krypto-Hardware und Krypto-Software	415
23	Weitere kryptografische Werkzeuge	443
24	Evaluierung und Zertifizierung	467

Teil 4 Public-Key-Infrastrukturen

25	Public-Key-Infrastrukturen	491
26	Digitale Zertifikate	521
27	PKI-Prozesse im Detail	537
28	Spezielle Fragen beim Betrieb einer PKI	561
29	Beispiel-PKIs	579

Teil 5 Kryptografische Netzwerkprotokolle

30	Kryptografie im OSI-Modell	597
31	Krypto-Standards für OSI-Schicht 1	607
32	Krypto-Standards für OSI-Schicht 2	617
33	IPsec (Schicht 3)	637
34	SSL und TLS (Schicht 4)	647
35	Verschlüsselte und signierte E-Mails (Schicht 7)	657
36	Weitere Krypto-Protokolle der Anwendungsschicht	669
37	Noch mehr Kryptografie in der Anwendungsschicht	693

Teil 6 Mehr über Kryptografie

38	Krypto-Wettbewerbe	715
39	Wer in der Kryptografie eine Rolle spielt	727
40	Wo Sie mehr zum Thema erfahren	747
41	Das letzte Kapitel	765

Anhang

Bildnachweis	787
Literatur	789
Index	811

Inhaltsverzeichnis

Teil 1 Wozu Kryptografie?

1	Einleitung	3
1.1	Kryptografie heute	4
1.2	Die vierte Auflage	5
1.3	Mein Bedauern, meine Bitten und mein Dank	6
2	Was ist Kryptografie und warum ist sie so wichtig?	9
2.1	The Name of the Game	9
2.1.1	Die kurze Antwort	9
2.1.2	Die lange Antwort	9
2.2	Die Kryptografie – ein wichtiges Teilgebiet	11
2.3	Warum ist die Kryptografie so wichtig?	13
2.3.1	Wirtschaftsspionage	13
2.3.2	Kommerz im Netz	14
2.3.3	Die Privatsphäre	14
2.4	Anwendungen der Kryptografie	15
2.5	Und wer zum Teufel ist Alice?	15
3	Wie Daten abgehört werden können	17
3.1	Mallory am Übertragungsmedium	18
3.1.1	Kupferkabel	18
3.1.2	Koaxialkabel	18
3.1.3	Glasfaser	18
3.1.4	Drahtlose Datenübertragung	19
3.1.5	Satellit	19

3.2	Mallory in Computernetzen	20
3.2.1	Mitlesen und Verändern von Dateien	20
3.2.2	Abhören analoger Telefonleitungen	20
3.2.3	Abhören im LAN	21
3.2.4	ISDN-Sicherheitsprobleme	22
3.2.5	DSL	23
3.2.6	Mobilfunk	24
3.2.7	WLANs	24
3.3	Mallory im Internet	25
3.3.1	ARP-Spoofing	25
3.3.2	Abhörangriffe auf Router und Gateways	26
3.3.3	IP-Spoofing	26
3.3.4	DNS-Spoofing	26
3.3.5	Mitlesen von E-Mails	28
3.3.6	URL-Spoofing	29
3.3.7	Abhören von Internettelefonie	29
3.4	Ein paar Fälle aus der Praxis	29
3.4.1	Passwort-Schnüffeleien	30
3.4.2	Abgehörte E-Mails	30
3.4.3	Echelon	31
3.4.4	Weitere Fälle	32
3.5	Ist Kryptografie gefährlich?	34
3.5.1	Nachteile einer Krypto-Beschränkung	36
3.5.2	Vorteile einer Krypto-Beschränkung	37
3.5.3	Fazit	39
4	Symmetrische Verschlüsselung	41
4.1	Symmetrische Verschlüsselung	42
4.1.1	Kryptografische Fachbegriffe	43
4.1.2	Angriffe auf Verschlüsselungsverfahren	43
4.2	Monoalphabetische Substitutionschiffren	45
4.2.1	Cäsar-Chiffre	45
4.2.2	Weitere Substitutionschiffren	46
4.2.3	Homophone Chiffre	47
4.3	Polyalphabetische Substitutionschiffren	49
4.3.1	Vigenère-Chiffre	50
4.3.2	Vernam-Chiffre	51
4.3.3	One-Time-Pad	51
4.4	Permutationschiffren	53

4.5	Ungelöste Verschlüsselungen	55
4.5.1	Das Voynich-Manuskript	55
4.5.2	Rohonczi-Kodex	57
4.5.3	Dorabella-Chiffre	58
5	Die Enigma und andere Verschlüsselungsmaschinen	59
5.1	Rotorchiffren	60
5.1.1	Heberns Rotormaschine	60
5.1.2	Die Enigma	62
5.1.3	Weitere Rotor-Chiffriermaschinen	66
5.2	Andere Verschlüsselungsmaschinen	67
5.2.1	Die Kryha-Maschine	68
5.2.2	Hagelin-Maschinen	69
5.2.3	Die Purple	71
5.2.4	Der Geheimschreiber	73
5.2.5	Lorenz-Maschine	75
5.2.6	Schlüsselgerät 41 (Hitler-Mühle)	76

Teil 2

Moderne Kryptografie

6	Der Data Encryption Standard	81
6.1	DES-Grundlagen	82
6.2	Funktionsweise des DES	84
6.2.1	Die Rundenfunktion F	85
6.2.2	Die Schlüsselaufbereitung des DES	86
6.2.3	Entschlüsseln mit dem DES	87
6.3	Sicherheit des DES	87
6.3.1	Vollständige Schlüsselsuche bis 1997	87
6.3.2	Die DES-Challenge	88
6.3.3	Differenzielle Kryptoanalyse	89
6.3.4	Lineare Kryptoanalyse	89
6.3.5	Schwache Schlüssel	89
6.3.6	Wie sicher ist der DES heute?	90
6.4	DES-Fazit	91
7	Weitere symmetrische Verschlüsselungsverfahren	93
7.1	Chiffren-Design	94
7.1.1	Anforderungen an die Sicherheit	94
7.1.2	Die ideale Schlüssellänge	98
7.1.3	Aufbau symmetrischer Verschlüsselungsverfahren	100

7.2	Triple-DES	106
7.2.1	Doppel-DES	106
7.2.2	Triple-DES	107
7.3	SAFER	108
7.3.1	Funktionsweise von SAFER+	109
7.3.2	Bewertung von SAFER+	111
7.4	RC2, RC5 und RC6	112
7.4.1	RC2	112
7.4.2	RC5	115
7.4.3	RC6	117
7.5	Blowfish und Twofish	120
7.5.1	Blowfish	120
7.5.2	Twofish	123
8	Der Advanced Encryption Standard (AES)	127
8.1	Funktionsweise des AES	128
8.1.1	Rundenaufbau	129
8.1.2	Entschlüsselung mit dem AES	132
8.1.3	Schlüsselaufbereitung	132
8.1.4	Mathematische Betrachtung des AES	134
8.2	Bewertung des AES	135
8.2.1	AES als algebraische Formel	136
8.2.2	Quadratische Kryptoanalyse	137
9	Noch weitere symmetrische Verschlüsselungsverfahren	139
9.1	MISTY1, KASUMI und Camellia	139
9.1.1	MISTY1	140
9.1.2	KASUMI	140
9.1.3	Camellia	142
9.2	Serpent	142
9.2.1	Funktionsweise von Serpent	143
9.2.2	S-Box-Design	145
9.2.3	Schlüsselaufbereitung von Serpent	146
9.2.4	Bewertung von Serpent	146
9.3	AES-Kandidaten	147
9.3.1	Die besten drei	147
9.3.2	Die weiteren zwei Finalisten	147
9.3.3	Wegen geringer Performanz ausgeschieden	148
9.3.4	Die Unsicheren	148
9.3.5	Einige AES-Kandidaten im Detail	149
9.3.6	Fazit	154

9.4	Weitere Verfahren	154
9.4.1	Chiasmus und Libelle	154
9.4.2	IDEA und IDEA NXT	154
9.4.3	Skipjack	156
9.4.4	TEA	157
9.4.5	Weitere Verfahren	158
10	Asymmetrische Verschlüsselung	159
10.1	Ein bisschen Mathematik	162
10.1.1	Modulo-Rechnen	162
10.1.2	Einwegfunktionen und Falltürfunktionen	168
10.2	Der Diffie-Hellman-Schlüsselaustausch	169
10.2.1	Funktionsweise von Diffie-Hellman	170
10.2.2	MQV	171
10.3	RSA	174
10.3.1	Funktionsweise des RSA-Verfahrens	174
10.3.2	Ein Beispiel	175
10.3.3	Sicherheit des RSA-Verfahrens	176
10.4	Symmetrisch und asymmetrisch im Zusammenspiel	180
10.4.1	Unterschiede zwischen symmetrisch und asymmetrisch	180
10.4.2	Hybridverfahren	181
11	Digitale Signaturen	183
11.1	Was ist eine digitale Signatur?	184
11.2	RSA als Signaturverfahren	185
11.2.1	Funktionsweise	185
11.2.2	Sicherheit von RSA-Signaturen	185
11.3	Signaturen auf Basis des diskreten Logarithmus	186
11.3.1	ElGamal-Verfahren	187
11.3.2	DSA	188
11.4	Unterschiede zwischen DLSSs und RSA	191
12	Weitere asymmetrische Krypto-Verfahren	193
12.1	Krypto-Systeme auf Basis elliptischer Kurven	194
12.1.1	Mathematische Grundlagen	194
12.1.2	ECC-Verfahren	196
12.1.3	Die wichtigsten ECC-Verfahren	198

12.2	Weitere asymmetrische Verfahren	199
12.2.1	NTRU	199
12.2.2	XTR	202
12.2.3	Krypto-Systeme auf Basis hyperelliptischer Kurven	202
12.2.4	HFE	203
12.2.5	Weitere asymmetrische Verfahren	205
13	Kryptografische Hashfunktionen	207
13.1	Was ist eine kryptografische Hashfunktion?	208
13.1.1	Nichtkryptografische Hashfunktionen	208
13.1.2	Kryptografische Hashfunktionen	209
13.1.3	Angriffe auf kryptografische Hashfunktionen	210
13.2	Die wichtigsten kryptografischen Hashfunktionen	218
13.2.1	SHA-1	218
13.2.2	Neue SHA-Varianten	222
13.2.3	MD4	223
13.2.4	MD5	223
13.2.5	RIPEMD-160	224
13.2.6	Tiger	228
13.2.7	WHIRLPOOL	231
13.2.8	RadioGatún	233
13.2.9	Weitere kryptografische Hashfunktionen	235
13.2.10	Hashfunktionen aus Verschlüsselungsverfahren	236
13.2.11	SHA-3	238
13.3	Schlüsselabhängige Hashfunktionen	239
13.3.1	Anwendungsbereiche	240
13.3.2	Die wichtigsten schlüsselabhängigen Hashfunktionen	240
13.4	Weitere Anwendungen kryptografischer Hashfunktionen	243
13.4.1	Hashbäume	243
13.4.2	Weitere Anwendungen	244
14	Kryptografische Zufallsgeneratoren	245
14.1	Zufallszahlen in der Kryptografie	246
14.1.1	Anforderungen der Kryptografie	247
14.1.2	Echte Zufallsgeneratoren	247
14.1.3	Pseudozufallsgeneratoren	248
14.1.4	Die Grauzone zwischen echt und pseudo	250
14.1.5	Mischen von Zufallsquellen	250

14.2	Die wichtigsten Pseudozufallsgeneratoren	251
14.2.1	Kryptografische Hashfunktionen als Fortschaltfunktion	252
14.2.2	Schlüsselabhängige Hashfunktionen als Fortschaltfunktion.	255
14.2.3	Blockchiffren als Fortschaltfunktion	256
14.2.4	Linear rückgekoppelte Schieberegister.	257
14.2.5	Nichtlinear rückgekoppelte Schieberegister	259
14.2.6	Zahlentheoretische Pseudozufallsgeneratoren	259
14.3	Primzahlgeneratoren	260
15	Stromchiffren	263
15.1	Aufbau und Eigenschaften von Stromchiffren	264
15.1.1	Wie eine Stromchiffre funktioniert	264
15.1.2	Angriffe auf Stromchiffren	266
15.1.3	Stromchiffren und Blockchiffren im Vergleich.	267
15.2	RC4.	268
15.2.1	Funktionsweise von RC4.	268
15.2.2	Bewertung von RC4	269
15.3	A5	271
15.3.1	Funktionsweise von A5	272
15.3.2	Bewertung von A5.	272
15.4	E0	273
15.4.1	Funktionsweise von E_0	273
15.4.2	Schlüsselaufbereitung von E_0	275
15.4.3	Bewertung von E_0	276
15.5	Crypto1.	277
15.5.1	Funktionsweise von Crypto1.	278
15.5.2	Bewertung von Crypto1	278
15.6	Die Verfahren des eSTREAM-Wettbewerbs	279
15.6.1	HC-128.	280
15.6.2	Rabbit.	282
15.6.3	Salsa20	286
15.6.4	Sosemanuk	288
15.6.5	Trivium.	290
15.6.6	Grain.	291
15.6.7	MICKEY.	293
15.6.8	Erkenntnisse aus dem eSTREAM-Wettbewerb	295
15.7	Welche Stromchiffre ist die beste?	296
15.7.1	Weitere Stromchiffren	296
15.7.2	Welche Stromchiffren sind empfehlenswert?	297

Teil 3

Implementierung von Kryptografie

16	Real-World-Attacken	301
16.1	Seitenkanalangriffe	301
16.1.1	Zeitangriffe	302
16.1.2	Stromangriffe	304
16.1.3	Fehlerangriffe	306
16.1.4	Weitere Seitenkanalangriffe	307
16.2	Malware-Angriffe	307
16.2.1	Malware und digitale Signaturen	308
16.2.2	Vom Entwickler eingebaute Hintertüren	310
16.2.3	Gegenmaßnahmen	311
16.3	Physikalische Angriffe	311
16.3.1	Die wichtigsten physikalischen Angriffe	312
16.3.2	Gegenmaßnahmen	312
16.4	Schwachstellen durch Implementierungsfehler	315
16.4.1	Implementierungsfehler in der Praxis	315
16.4.2	Implementierungsfehler in vielen Variationen	316
16.4.3	Gegenmaßnahmen	318
16.5	Insiderangriffe	320
16.5.1	Unterschätzte Insider	320
16.5.2	Gegenmaßnahmen	320
16.6	Der Anwender als Schwachstelle	322
16.6.1	Schwachstellen durch Anwenderfehler	322
16.6.2	Gegenmaßnahmen	325
16.7	Fazit	328
17	Standardisierung in der Kryptografie	329
17.1	Standards	329
17.1.1	Standardisierungsgremien	330
17.1.2	Standardisierung im Internet	331
17.2	Wissenswertes zum Thema Standards	332
17.2.1	Standards und die Realität	332
17.2.2	OIDs	332
17.3	Wichtige Krypto-Standards	333
17.3.1	PKCS	333
17.3.2	IEEE P1363	334
17.3.3	ANSI X.9	335
17.3.4	NSA Suite B	336

17.4	Standards für verschlüsselte und signierte Daten	337
17.4.1	PKCS#7	337
17.4.2	XML Signature und XML Encryption	338
17.4.3	Weitere Formate	341
18	Betriebsarten und Datenformatierung	343
18.1	Betriebsarten von Blockchiffren	344
18.1.1	Electronic-Codebook-Modus	344
18.1.2	Cipher-Block-Chaining-Modus	345
18.1.3	Output-Feedback-Modus	346
18.1.4	Cipher-Feedback-Modus	348
18.1.5	Counter-Modus	349
18.1.6	Fazit	350
18.2	Datenformatierung für das RSA-Verfahren	352
18.2.1	Der PKCS#1-Standard	352
18.2.2	Datenformatierung für die RSA-Verschlüsselung	353
18.2.3	Datenformatierung für RSA-Signaturen	356
18.3	Datenformatierung für DLSSs	357
19	Kryptografische Protokolle	359
19.1	Protokolle	360
19.1.1	Konzeptprotokolle	360
19.1.2	Netzwerkprotokolle	361
19.1.3	Eigenschaften von Netzwerkprotokollen	362
19.2	Protokolle in der Kryptografie	364
19.2.1	Eigenschaften kryptografischer Netzwerkprotokolle	364
19.3	Angriffe auf kryptografische Protokolle	366
19.3.1	Replay-Attacke	366
19.3.2	Spoofing-Attacke	367
19.3.3	Man-in-the-Middle-Attacke	368
19.3.4	Hijacking-Attacke	369
19.3.5	Known-Key-Attacken	369
19.3.6	Verkehrsflussanalyse	373
19.3.7	Denial-of-Service-Attacke	374
19.3.8	Sonstige Angriffe	375
19.4	Beispielprotokolle	375
19.4.1	Beispielprotokoll: Messgerät sendet an PC	375
19.4.2	Weitere Beispielprotokolle	378

20	Authentifizierung	379
20.1	Authentifizierung im Überblick	379
20.1.1	Etwas, was man weiß	381
20.1.2	Was man hat	383
20.1.3	Was man ist	383
20.2	Biometrische Authentifizierung	383
20.2.1	Grundsätzliches zur biometrischen Authentifizierung	384
20.2.2	Biometrische Merkmale	386
20.2.3	Fazit	391
20.3	Authentifizierung in Computernetzen	392
20.3.1	Passwörter im Internet	392
20.3.2	Authentifizierung mit asymmetrischen Verfahren	397
20.3.3	Biometrie im Internet	400
21	Verteilte Authentifizierung	401
21.1	Single Sign-On	401
21.1.1	Credential-Synchronisation	403
21.1.2	Lokales SSO	404
21.1.3	Ticket-SSO	404
21.1.4	Web-SSO	405
21.2	Kerberos	405
21.2.1	Vereinfachtes Kerberos-Protokoll	406
21.2.2	Vollständiges Kerberos-Protokoll	407
21.2.3	Vor- und Nachteile von Kerberos	409
21.3	RADIUS und andere Triple-A-Server	409
21.3.1	Triple-A-Server	410
21.3.2	Beispiele für Triple-A-Server	411
21.4	SAML	412
21.4.1	Funktionsweise von SAML	413
21.4.2	SAML in der Praxis	414
22	Krypto-Hardware und Krypto-Software	415
22.1	Krypto-Hardware oder Krypto-Software?	415
22.1.1	Pro Software	416
22.1.2	Pro Hardware	417
22.1.3	Ist Hardware oder Software besser?	418
22.2	Smartcards	418
22.2.1	Smartcards und andere Chipkarten	418
22.2.2	Smartcard-Formfaktoren	420
22.2.3	Smartcards und Kryptografie	421

22.3	Kryptografie und elektronische Ausweise	424
22.3.1	Elektronische Reisepässe	426
22.3.2	Elektronische Personalausweise	426
22.3.3	Elektronische Gesundheitskarten	427
22.3.4	Weitere elektronische Ausweise	428
22.4	Hardware-Security-Module	429
22.5	Kryptografie in eingebetteten Systemen	429
22.5.1	Eingebettete Systeme und Kryptografie	430
22.5.2	Kryptografische Herausforderungen in eingebetteten Systemen	431
22.6	RFID und Kryptografie	433
22.6.1	Sicherheitsprobleme beim Einsatz von EPC-Chips	434
22.6.2	RFID und Kryptografie	435
23	Weitere kryptografische Werkzeuge	443
23.1	Management geheimer Schlüssel	443
23.1.1	Schlüsselgenerierung	444
23.1.2	Schlüsselspeicherung	446
23.1.3	Schlüsselauthentifizierung	447
23.1.4	Schlüsseltransport und Schlüssel-Backup	447
23.1.5	Schlüsselaufteilung	448
23.1.6	Schlüsselwechsel	449
23.1.7	Löschen eines Schlüssels	450
23.1.8	Key Recovery	450
23.2	Trusted Computing und Kryptografie	451
23.2.1	Trusted Computing und Kryptografie	452
23.2.2	Das Trusted Platform Module	453
23.2.3	Funktionen und Anwendungen des TPM	455
23.2.4	Fazit	456
23.3	Krypto-APIs	457
23.3.1	PKCS#11	457
23.3.2	MS-CAPI	460
23.3.3	Cryptography API Next Generation (CNG)	462
23.3.4	ISO/IEC 24727	463
23.3.5	Universelle Krypto-APIs	464
24	Evaluierung und Zertifizierung	467
24.1	ITSEC	469
24.2	Common Criteria	471

24.3	FIPS 140	476
24.3.1	Die vier Stufen von FIPS 140	477
24.3.2	Die Sicherheitsbereiche von FIPS 140	478
24.3.3	Bewertung von FIPS-140	485
24.4	Fazit und Alternativen	486
24.4.1	Open Source als Alternative	486
24.4.2	Theorie und Praxis	488

Teil 4

Public-Key-Infrastrukturen

25	Public-Key-Infrastrukturen	491
25.1	Digitale Zertifikate	492
25.1.1	Probleme asymmetrischer Verfahren	492
25.1.2	Digitale Zertifikate	493
25.2	Vertrauensmodelle	495
25.2.1	Direct Trust	496
25.2.2	Web of Trust	496
25.2.3	Hierarchical Trust	498
25.2.4	PKI-Varianten	499
25.3	PKI-Standards	503
25.3.1	X.509	503
25.3.2	PKIX	503
25.3.3	ISIS-MTT	504
25.3.4	OpenPGP	504
25.4	Aufbau und Funktionsweise einer PKI	505
25.4.1	Komponenten einer PKI	505
25.4.2	Rollen in einer PKI	512
25.4.3	Prozesse in einer PKI	513
25.5	Identitätsbasierte Krypto-Systeme	517
25.5.1	Funktionsweise	517
25.5.2	Das Boneh-Franklin-Verfahren	518
26	Digitale Zertifikate	521
26.1	X.509v1- und X.509v2-Zertifikate	522
26.1.1	Das Format	522
26.1.2	Nachteile von X.509v1 und v2	523
26.2	X.509v3-Zertifikate	524
26.2.1	Die X.509v3-Standarderweiterungen	524

26.3	Weitere X.509-Profile	527
26.3.1	Die PKIX-Erweiterungen	528
26.3.2	Die ISIS-MTT-Erweiterungen	529
26.3.3	X.509-Attribut-Zertifikate	529
26.3.4	X.509-Fazit	531
26.4	OpenPGP-Zertifikate	532
26.4.1	OpenPGP-Pakete	532
26.4.2	OpenPGP-Zertifikatsformat	534
26.4.3	Unterschiede zu X.509	535
26.5	CV-Zertifikate	536
27	PKI-Prozesse im Detail	537
27.1	Anwender-Enrollment	537
27.1.1	Schritt 1: Registrierung	538
27.1.2	Schritt 2: Zertifikate-Generierung	539
27.1.3	Schritt 3: PSE-Übergabe	540
27.1.4	Enrollment-Beispiele	541
27.1.5	Zertifizierungsanträge	544
27.2	Recovery	546
27.2.1	Schlüsselverlust-Problem	547
27.2.2	Chef-Sekretärin-Problem	548
27.2.3	Urlauber-Vertreter-Problem	549
27.2.4	Virenschanner-Problem	550
27.3	Abruf von Sperrinformationen	551
27.3.1	Sperrlisten	552
27.3.2	Online-Sperrprüfung	556
27.3.3	Weitere Formen des Abrufs von Sperrinformationen	557
28	Spezielle Fragen beim Betrieb einer PKI	561
28.1	Outsourcing oder Eigenbetrieb?	561
28.2	Gültigkeitsmodelle	563
28.2.1	Schalenmodell	564
28.2.2	Kettenmodell	565
28.3	Certificate Policy und CPS	566
28.3.1	Was steht in einem CPS und einer Certification Policy?	567
28.3.2	Nachteile von RFC 3647	571
28.4	Policy-Hierarchien	575
28.4.1	Hierarchietiefe	575
28.4.2	Policy Mapping	575
28.4.3	Policy-Hierarchien in der Praxis	577

29	Beispiel-PKIs	579
29.1	Signaturgesetze und dazugehörende PKIs	580
29.1.1	EU-Signaturrichtlinie	580
29.1.2	Deutsches Signaturgesetz	581
29.1.3	Österreichisches Signaturgesetz	584
29.1.4	Schweizer ZertES	585
29.1.5	Fazit	585
29.2	Die PKIs elektronischer Ausweise	586
29.2.1	Die PKI des elektronischen Reisepasses	586
29.2.2	PKIs elektronischer Personalausweise	587
29.2.3	PKIs elektronischer Krankenversichertenkarten	587
29.3	Weitere PKIs	588
29.3.1	Organisationsinterne PKIs	588
29.3.2	Kommerzielle Trust Center	589
29.4	Übergreifende PKIs	591
29.4.1	Verwaltungs-PKI	591
29.4.2	European Bridge-CA	592
29.4.3	DFN-PCA	592
29.4.4	Wurzel-CAs	593

Teil 5

Kryptografische Netzwerkprotokolle

30	Kryptografie im OSI-Modell	597
30.1	Das OSI-Modell	598
30.1.1	Die Schichten des OSI-Modells	598
30.1.2	Die wichtigsten Netzwerkprotokolle im OSI-Modell	599
30.2	In welcher Schicht wird verschlüsselt?	601
30.2.1	Kryptografie in Schicht 7 (Anwendungsschicht)	601
30.2.2	Kryptografie in Schicht 4 (Transportschicht)	602
30.2.3	Schicht 3 (Vermittlungsschicht)	603
30.2.4	Schicht 2 (Sicherungsschicht)	604
30.2.5	Schicht 1 (Bit-Übertragungsschicht)	604
30.2.6	Fazit	605
31	Krypto-Standards für OSI-Schicht 1	607
31.1	Krypto-Erweiterungen für ISDN	607
31.2	Kryptografie im GSM-Standard	609
31.2.1	Wie GSM Kryptografie einsetzt	610
31.2.2	Sicherheit von GSM	611

31.3	Kryptografie im UMTS-Standard	612
31.3.1	Von UMTS verwendete Krypto-Verfahren	612
31.3.2	UMTS-Krypto-Protokolle	613
32	Krypto-Standards für OSI-Schicht 2	617
32.1	Krypto-Erweiterungen für PPP	618
32.1.1	CHAP und MS-CHAP	619
32.1.2	EAP	619
32.1.3	ECP und MPPE	620
32.1.4	Virtuelle Private Netze in Schicht 2	620
32.2	Kryptografie für WLANs	623
32.2.1	WEP	623
32.2.2	WPA	626
32.2.3	WPA2	628
32.3	Kryptografie für Bluetooth	628
32.3.1	Grundlagen der Bluetooth-Kryptografie	629
32.3.2	Bluetooth-Authentifizierung und -Verschlüsselung	633
32.3.3	Angriffe auf die Bluetooth-Sicherheitsarchitektur	634
33	IPsec (Schicht 3)	637
33.1	Bestandteile von IPsec	638
33.1.1	ESP	638
33.1.2	AH	639
33.2	IKE	640
33.2.1	ISAKMP	641
33.2.2	Wie IKE ISAKMP nutzt	642
33.3	Kritik an IPsec	644
33.4	Virtuelle Private Netze mit IPsec	645
34	SSL und TLS (Schicht 4)	647
34.1	Funktionsweise von SSL	648
34.1.1	Protokolleigenschaften	649
34.1.2	SSL-Teilprotokolle	649
34.2	SSL-Protokollablauf	650
34.2.1	Das Handshake-Protokoll	650
34.2.2	Das ChangeCipherSpec-Protokoll	651
34.2.3	Das Alert-Protokoll	651
34.2.4	Das ApplicationData-Protokoll	652
34.3	SSL in der Praxis	652
34.3.1	Vergleich zwischen IPsec und SSL	653
34.3.2	VPNs mit SSL	655

35	Verschlüsselte und signierte E-Mails (Schicht 7)	657
35.1	E-Mail und Kryptografie	658
35.1.1	Kryptografie für E-Mails	658
35.2	S/MIME	661
35.2.1	S/MIME-Format	662
35.2.2	S/MIME-Profil von ISIS-MTT	663
35.2.3	Bewertung von S/MIME	663
35.3	OpenPGP	664
35.3.1	OpenPGP	664
35.3.2	Bewertung von OpenPGP	664
35.4	Abholen von E-Mails: POP und IMAP	665
35.4.1	Gefahren beim Abholen von E-Mails	666
35.4.2	Krypto-Zusätze für IMAP	667
35.4.3	Krypto-Zusätze für POP	668
36	Weitere Krypto-Protokolle der Anwendungsschicht	669
36.1	Kryptografie im World Wide Web	669
36.1.1	Basic Authentication	670
36.1.2	Digest Access Authentication	671
36.1.3	NTLM	671
36.1.4	HTTP über SSL (HTTPS)	671
36.1.5	Was es sonst noch gibt	672
36.2	Kryptografie für Echtzeitdaten im Internet (RTP)	673
36.2.1	SRTP	673
36.2.2	SRTP-Schlüsselaustausch	674
36.2.3	Bewertung von SRTP	676
36.3	Secure Shell (SSH)	676
36.3.1	Entstehungsgeschichte der Secure Shell	677
36.3.2	Funktionsweise der Secure Shell	678
36.3.3	Bewertung der Secure Shell	681
36.4	Online-Banking mit HBCI	682
36.4.1	Der Standard	682
36.4.2	Bewertung von HBCI und FinTS	684
36.5	Weitere Krypto-Protokolle in Schicht 7	685
36.5.1	Krypto-Erweiterungen für SNMP	685
36.5.2	DNSSEC und TSIG	686
36.5.3	Kryptografie für SAP R/3	689
36.5.4	SASL	690
36.5.5	Sicheres NTP und sicheres SNTP	691

37	Noch mehr Kryptografie in der Anwendungsschicht	693
37.1	Dateiverschlüsselung	693
37.1.1	Manuelle Dateiverschlüsselung	694
37.1.2	Transparente Dateiverschlüsselung	695
37.2	Code Signing	696
37.3	Online-Bezahlsysteme	697
37.3.1	Kreditkartensysteme	698
37.3.2	Kontensysteme	699
37.3.3	Bargeldsysteme	700
37.3.4	Einige aktuelle Online-Bezahlsysteme	702
37.4	Digital Rights Management	705
37.4.1	DRM und Kryptografie	706
37.4.2	Beispiele für DRM-Systeme	708

Teil 6

Mehr über Kryptografie

38	Krypto-Wettbewerbe	715
38.1	Kryptoanalyse-Wettbewerbe	715
38.2	Algorithmen-Wettbewerbe	721
39	Wer in der Kryptografie eine Rolle spielt	727
39.1	Die zehn wichtigsten Personen	727
39.2	Die zehn wichtigsten Unternehmen	737
39.3	Die fünf wichtigsten Non-Profit-Organisationen	742
40	Wo Sie mehr zum Thema erfahren	747
40.1	Die wichtigsten Informationsquellen	748
40.2	Die zehn wichtigsten Bücher	754
40.3	Die zehn wichtigsten Webseiten	761
41	Das letzte Kapitel	765
41.1	Die zehn größten Krypto-Flops	765
41.2	Schlangenöl	771
41.3	Zehn populäre Krypto-Irrtümer	780
41.4	Murphys zehn Gesetze der Kryptografie	783

Anhang

Bildnachweis	787
Literatur	789
Index	811