

Bekanntmachung zur elektronischen Signatur nach dem Signaturgesetz und der Signaturverordnung

Die Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post (Reg TP) als zuständige Behörde gemäß § 3 Signaturgesetz (SigG) vom 22. Mai 2001 veröffentlicht gemäß Anlage 1 Abschnitt 1 Nr. 2 Signaturverordnung (SigV) vom 22. November 2001 im Bundesanzeiger eine Übersicht über die Algorithmen und zugehörigen Parameter, die zur Erzeugung von Signaturschlüsseln, zum Hashen zu signierender Daten oder zur Erzeugung und Prüfung qualifizierter elektronischer Signaturen als geeignet anzusehen sind, sowie den Zeitpunkt, bis zu dem die Eignung jeweils gilt.

Geeignete Algorithmen zur Erfüllung der Anforderungen nach §17 Abs. 1 bis 3 SigG vom 22. Mai 2001 in Verbindung mit Anlage 1 Abschnitt I Nr. 2 SigV vom 22. November 2001

Mainz, 2.1.2003

Die Sicherheit einer qualifizierten elektronischen Signatur hängt primär von der Stärke der zugrunde liegenden Algorithmen ab. Im Folgenden werden Algorithmen genannt, die für qualifizierte elektronische Signaturen mindestens für die **kommenden sechs Jahre** (d.h. bis Ende 2008) als geeignet anzusehen sind. Die bitgenauen Spezifikationen findet man in den entsprechenden Standards verschiedener Organisationen (ISO/IEC, NIST, IEEE usw.). Ebenso wie patentrechtliche Fragen und Definitionen der mathematischen Begriffe sind diese Spezifikationen nicht Gegenstand der vorliegenden Veröffentlichung. Informationen hierzu findet man in der einschlägigen Literatur (Lehrbücher, Proceedings von Konferenzen etc.) und im Internet.

In dieser Veröffentlichung werden die wichtigsten, praxisrelevanten Algorithmen betrachtet, deren kryptographische Eigenschaften aufgrund der heute vorliegenden Ergebnisse langjähriger Diskussionen und Analysen am besten eingeschätzt werden können. Die Liste dieser Algorithmen wird gemäß der weiteren Entwicklung der kryptologischen Forschung und den Erfahrungen mit praktischen Realisierungen von Signaturverfahren aktualisiert und bei Bedarf ergänzt werden.

Auf die Sicherheit einer konkreten Implementierung in Hard- und Software wird hier nicht eingegangen. Diese wird im Rahmen der Untersuchung nach §15 Abs. 7 und §17 Abs. 4 SigG festgestellt.

Wie bereits in der vorletztjährigen Fassung angekündigt, wurde für den Zeitraum ab Anfang 2008 die Mindest-Parameterlänge für das RSA-Verfahren erhöht. Um eine ausreichende Planungssicherheit zu gewährleisten, wird hier aufgrund neuer Tendenzen in der Forschung und in der Hardware-Entwicklung, vgl. z.B. [23], eine Erhöhung auf 1280 Bit festgelegt.

1. Kryptographische Anforderungen

Nach Anlage 1 Abschnitt I Nr. 2 SigV sind folgende Algorithmen festzulegen:

- Ein Algorithmus zum Hashen von Daten (eine Hashfunktion), der die zu signierenden Daten auf einen Hashwert, d.h. eine Bitfolge fester kurzer Länge, reduziert. Signiert werden dann nicht die Daten selbst, sondern stattdessen jeweils ihr Hashwert.

- Ein asymmetrisches Signaturverfahren, das aus einem Signieralgorithmus und einem Verifizieralgorithmus besteht. Das Signaturverfahren hängt ab von einem Schlüsselpaar, bestehend aus einem privaten (d.h. geheimen) Schlüssel zum Signieren (gemäß §2 Nr. 4 SigG als Signaturschlüssel zum Erzeugen einer Signatur bezeichnet) und dem dazugehörigen öffentlichen Schlüssel zum Verifizieren der Signatur (gemäß §2 Nr. 5 SigG als Signaturprüfschlüssel zur Überprüfung einer Signatur bezeichnet).
- Ein Verfahren zur Erzeugung von Schlüsselpaaren für Signaturverfahren.

1.1. Hashfunktionen

Beim Signieren und Verifizieren wird der Hashwert der zu signierenden Daten gewissermaßen wie ein 'digitaler Fingerabdruck' benutzt. Damit hierbei keine Sicherheitslücke entsteht, muss die Hashfunktion H folgendem Kriterium genügen:

- H muss *kollisionsresistent* sein; d.h., es ist praktisch unmöglich, Kollisionen zu finden. (Zwei unterschiedliche digitale Dokumente, die auf denselben Hashwert abgebildet werden, bilden eine Kollision).

Aus der Kollisionsresistenz von H folgt:

- H muss eine *Einwegfunktion* sein; d.h., es ist praktisch unmöglich, zu einem gegebenen Bitstring aus dem Wertebereich ein Urbild bzgl. H zu finden.

Die Existenz von Kollisionen ist unvermeidbar. Dies ist aber nur eine theoretische Aussage. Bei der praktischen Anwendung kommt es nur darauf an, dass es, wie oben verlangt, unmöglich ist, Kollisionen (bzw. Urbilder) zu *finden*.

1.2. Signaturverfahren

Niemand anders als der Besitzer des Signaturschlüssels darf in der Lage sein, Signaturen zu erzeugen. Insbesondere bedeutet dies, dass es praktisch unmöglich ist, den Signaturschlüssel aus dem (öffentlichen) Signaturprüfschlüssel zu berechnen.

1.3 Schlüsselerzeugung

Die verschiedenen Signaturverfahren benötigen Schlüssel, die bestimmte Bedingungen erfüllen. In einigen Fällen kommen weitere Bedingungen hinzu, deren Nichtbeachtung zu Schwächen des jeweiligen Verfahrens führen könnte. Im Rahmen dieser Anforderungen müssen die Schlüssel zufällig erzeugt werden.

2. Geeignete Hashfunktionen

Nach heutigem Kenntnisstand der Analyse von Hashfunktionen kann von der langfristigen Sicherheit folgender beider 160-Bit Hashfunktionen ausgegangen werden:

- RIPEMD-160 ([3]),
- SHA-1 ([2], [3]).

Diese beiden Hashfunktionen sind (mindestens) in den **kommenden sechs Jahren**, d.h. bis Ende 2008, für die Anwendung bei qualifizierten elektronischen Signaturen geeignet.

3. Geeignete Signaturverfahren

Im Jahr 1977 haben Rivest, Shamir und Adleman als Erste ein Verfahren zum Erzeugen und Verifizieren digitaler Signaturen explizit beschrieben. Es handelt sich um das nach seinen Erfindern benannte RSA-Verfahren [9]. Im Jahr 1984 hat ElGamal [8] ein weiteres Signaturverfahren vorgeschlagen. Eine Variante dieses ElGamal-Verfahrens ist der 1991 vom National Institute of Standards and Technology (NIST) publizierte Digital Signature Standard (DSS) [1], der den Digital Signature Algorithm (DSA) spezifiziert. Daneben gibt es Varianten des DSA, die auf Punktgruppen $E(K)$ elliptischer Kurven über endlichen Körpern K basieren, wobei $K = F_p$ ein endlicher Primkörper bzw. $K = F_{2^m}$ ein endlicher Körper der Charakteristik 2 ist.

Folgende Signaturverfahren sind zur Erfüllung der Anforderungen nach §17 Abs. 1 bis 3 SigG geeignet:

1. RSA-Verfahren [4]
2. DSA [1], [4]
3. DSA-Varianten, basierend auf elliptischen Kurven. Insbesondere die Verfahren:
 - EC-DSA [1], [5], [10], [11]
 - EC-KDSA, EC-GDSA [11]
 - Nyberg-Rueppel-Signaturen [19], [22]

Die Sicherheit der oben genannten Verfahren beruht dabei entsprechend auf:

1. dem Faktorisierungsproblem für ganze Zahlen,
2. dem Diskreten-Logarithmus-Problem in der multiplikativen Gruppe eines Primkörpers F_p ,
3. dem Diskreten-Logarithmus-Problem in den Gruppen $E(F_p)$ bzw. $E(F_{2^m})$.

Um festzulegen, wie groß die Systemparameter bei diesen Verfahren gewählt werden müssen, um deren Sicherheit zu gewährleisten, müssen zum Einen die besten heute bekannten Algorithmen zum Faktorisieren ganzer Zahlen bzw. zum Berechnen diskreter Logarithmen (in den oben genannten Gruppen) betrachtet und zum Anderen die Leistungsfähigkeit der heutigen Rechnertechnik berücksichtigt werden. Um eine Aussage über die Sicherheit für einen bestimmten zukünftigen Zeitraum zu machen, muss außerdem eine Prognose für die beiden genannten Aspekte zugrunde gelegt werden, vgl. [13]. Solche Prognosen sind nur für relativ kurze Zeiträume sinnvoll (und können sich natürlich jederzeit aufgrund unvorhersehbarer dramatischer Entwicklungen als falsch erweisen).

Im Folgenden bezeichnen wir mit der Bitlänge r einer Zahl $x \geq 0$ diejenige ganze Zahl r mit der Eigenschaft $2^{r-1} \leq x < 2^r$, wobei für $x = 0$ gilt $r := 1$.

Die Sicherheit der einzelnen Verfahren ist (mindestens) für die **kommenden sechs Jahre**, d.h. bis Ende 2008, bei der im Folgenden festgelegten Wahl der Parameter gewährleistet.

3.1 RSA-Verfahren

Die Länge des zugrunde liegenden Modulus $n = p \cdot q$ (p und q Primzahlen) wird **bis Ende 2007** mit 1024 Bit als weiterhin ausreichend sicher angesehen. Ab Anfang 2008 sollte der Modulus n eine Bitlänge von mindestens 1280 haben. Für die Gewährleistung eines langfristigen Sicherheitsniveaus wird die Erhöhung der Länge auf 2048 Bit empfohlen.

Die folgende Tabelle fasst die Werte der Bitlängen für das RSA-Verfahren zusammen.

Parameter \ Zeitraum	bis Ende 2007	bis Ende 2008
n	1024 (Mindestwert) 2048 (Empfehlung)	1280 (Mindestwert) 2048 (Empfehlung)

Die Primfaktoren p und q von n sollten die gleiche Größenordnung haben, aber nicht zu dicht beieinander liegen:

$$\varepsilon_1 < |\log_2(p) - \log_2(q)| < \varepsilon_2.$$

Als Anhaltspunkte für die Werte ε_1 und ε_2 werden hier $\varepsilon_1 \approx 0,5$ und $\varepsilon_2 \approx 30$ vorgeschlagen. Die Primfaktoren p und q müssen unter Beachtung der genannten Nebenbedingungen zufällig und unabhängig voneinander erzeugt werden.

Der öffentliche Exponent e wird unabhängig von n unter der Nebenbedingung $ggT(e, (p-1)(q-1)) = 1$ gewählt. Der zugehörige geheime Exponent d wird dann in Abhängigkeit von dem vorher festgelegten e berechnet, so dass $ed \equiv 1 \pmod{kgV(p-1, q-1)}$ gilt.

Bemerkungen:

- Die Forderung, dass p und q *starke* Primzahlen sein müssen (d. h. $p-1$ und $q-1$ haben große Primfaktoren etc.), erscheint im Hinblick auf die heute bekannten besten Faktorisierungsalgorithmen nicht mehr ausreichend begründet und daher verzichtbar.
- Der öffentliche Exponent e kann zufällig gewählt werden. Auf der anderen Seite haben kleine öffentliche Exponenten den Vorteil, dass die Verifikation einer Signatur sehr schnell durchgeführt werden kann. Das hier verlangte Verfahren (zuerst Wahl von e , danach Wahl von d) soll gewährleisten, dass kleine geheime Exponenten ausgeschlossen werden können, siehe z.B. [20].
- Der Hashwert muss vor der Anwendung des geheimen Exponenten d auf die Bitlänge des Moduls formatiert werden. Das Formatierungsverfahren ist dabei sorgfältig zu wählen, siehe [14]. Geeignete Verfahren sind zum Beispiel:
 - RSA: „Signature Schemes with Appendix“ aus [15],
 - „DSI according to ISO/IEC 9796-2 with random number“ [16],
 - „Digital signature scheme 2“ und „digital signature scheme 3“ aus [21].

Die Realisierung eines Formatierungsverfahrens – z. B. die Form der Arbeitsteilung zwischen einer Chipkarte, auf der die Exponentiation mit dem geheimen Schlüssel durchgeführt wird, und dem Hintergrundsystem – ist für die Sicherheit durchaus relevant und muss im Rahmen der Prüfung technischer Komponenten nach §15 Abs. 7 und §17 Abs. 4 SigG vom 22. Mai 2001 untersucht werden.

- Zur Erzeugung der Primfaktoren siehe [5] und [17]. Insbesondere muss bei Nutzung eines probabilistischen Primzahltests mit hinreichender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen sein, dass p oder q in Wirklichkeit zusammengesetzte Zahlen sind. Als Anhaltspunkt für eine obere Schranke für diese Wahrscheinlichkeit wird hier der Wert 2^{-80} (siehe [1]; vergleiche aber auch [5] und [17]) vorgeschlagen.

3.2 DSA

In FIPS-186 [1] wird für den Parameter p (p Primzahl) eine Bitlänge von genau 1024 verlangt. Gleichzeitig wird dort die Bitlänge des Parameters q auf 160 festgelegt.

Abweichend von FIPS-186 wird hier verlangt, dass für den Zeitraum **bis Ende 2008** die Bitlänge des Parameters p mindestens 1280 betragen muss. Für den Zeitraum bis Ende 2007 reicht eine Minimallänge des Parameters p von 1024 Bit aus. Für die Gewährleistung eines langfristigen Sicherheitsniveaus wird die Erhöhung auf 2048 Bit ab dem Jahre 2007 empfohlen. Die Bitlänge des Parameters q soll weiterhin mindestens 160 betragen.

Die folgende Tabelle fasst die Bitlängen für den DSA zusammen.

Parameter \ Zeitraum	bis Ende 2007	bis Ende 2008
p	1024 (Mindestwert)	1280 (Mindestwert)
	2048 (Empfehlung)	2048 (Empfehlung)
q	160	160

Bemerkungen:

- Zur Erzeugung von p und der weiteren Parameter siehe [1]. Dabei ist zu beachten, dass der Standard FIPS-186 in 2001 geändert wurde, um eine Schwäche des in der alten Version beschriebenen Zufallszahlengenerators zu beheben.
- In FIPS-186 wird die Bitlänge des Parameters q auf genau 160 festgelegt. Dies erlaubt die Konstruktion von 'Kollisionen' im Sinne von [12] bei der Parametergenerierung. Diese Kollisionen haben jedoch in der Praxis keine Bedeutung. Soll dessen ungeachtet die Möglichkeit, diese Kollisionen konstruieren zu können, ausgeschlossen werden, sind Bitlängen > 160 zu wählen.

3.2 a) DSA-Varianten basierend auf Gruppen $E(F_p)$

Um die Systemparameter festzulegen, werden eine elliptische Kurve E und ein Punkt P auf $E(F_p)$ erzeugt, so dass folgende Bedingungen gelten:

- $\#E(F_p) = a \cdot q$ mit einer von p verschiedenen Primzahl q .
- $ord(P) = q$.
- $r_0 := \min(r : q \text{ teilt } p^r - 1)$ ist groß, konkret $r_0 > 10^4$.
- Die Klassenzahl der Hauptordnung, die zum Endomorphismenring von E gehört, ist mindestens 200.

Für den Zeitraum bis Ende 2008 muss die Bitlänge von p mindestens 192 betragen. Dabei sollte q sich nur um einen kleinen Faktor von p unterscheiden. Auf jeden Fall ist sicherzustellen, dass die Bitlänge von q mindestens 180 Bit beträgt. Für den Zeitraum **bis Ende 2006** reicht – ohne weitere Bedingung an die Bitlänge von p – eine Minimallänge des Parameters q von 160 Bit aus.

Die folgende Tabelle fasst die Bitlängen für DSA-Varianten basierend auf Gruppen $E(F_p)$ zusammen.

Parameter \ Zeitraum	bis Ende 2006	bis Ende 2008
p		192
q	160	180

Bemerkung: Die untere Abschätzung für r_0 hat den Sinn, Attacken auszuschließen, die auf einer Einbettung der von P erzeugten Untergruppe in die multiplikative Gruppe eines Körpers F_{p^r} beruhen. In der Regel (bei zufälliger Wahl der elliptischen Kurve) ist diese Abschätzung erfüllt, denn r_0 ist die Ordnung von $p \pmod{q}$ in F_q^* und hat deshalb im Allgemeinen sogar dieselbe Größenordnung wie q . Im Idealfall sollte r_0 explizit bestimmt werden, was allerdings die etwas aufwändige Faktorisierung von $q-1$ voraussetzt. Demgegenüber ist $r_0 > 10^4$ wesentlich schneller zu verifizieren und wird in diesem Zusammenhang als ausreichend angesehen.

3.2 b) DSA-Varianten basierend auf Gruppen $E(F_{2^m})$

Um die Systemparameter festzulegen, werden eine elliptische Kurve E und ein Punkt P auf $E(F_{2^m})$ erzeugt, so dass folgende Bedingungen gelten.

- m ist prim.
- $E(F_{2^m})$ ist nicht über F_2 definierbar (d.h. die j -Invariante der Kurve liegt nicht in F_2)
- $\#E(F_{2^m}) = a \cdot q$ mit q prim.
- $\text{ord}(P) = q$.
- $r_0 := \min(r : q \text{ teilt } 2^{mr} - 1)$ ist groß, konkret etwa $r_0 > 10^4$.
- Die Klassenzahl der Hauptordnung, die zum Endomorphismenring von E gehört, ist mindestens 200.

Für den Zeitraum bis Ende 2008 muss m mindestens 191 betragen. Dabei sollte q sich nur um einen kleinen Faktor von 2^m unterscheiden. Auf jeden Fall ist sicherzustellen, dass die Bitlänge von q mindestens 180 Bit beträgt. Für den Zeitraum **bis Ende 2006** reicht – ohne weitere Bedingung an m – eine Minimallänge des Parameters q von 160 Bit aus.

Die folgende Tabelle fasst die Bitlängen für DSA-Varianten basierend auf Gruppen $E(F_{2^m})$ zusammen.

Parameter \ Zeitraum	bis Ende 2006	bis Ende 2008
m		191
q	160	180

Bemerkungen:

- Die Bedingung, dass m prim ist, war in der Fassung dieses Papiers von 1999 nicht gefordert. Hintergrund für diese Bedingung sind die Überlegungen in [6].
- In Bezug auf die oben erwähnten 'Kollisionen' im Sinne von Vaudenay [12] gilt für die auf elliptischen Kurven basierenden Verfahren dasselbe wie für DSA.
- Beim DSA und bei elliptischen Kurven könnte die Wahl bestimmter, ganz spezieller Parameter möglicherweise dazu führen, dass das Verfahren schwächer ist als bei einer zufälligen Wahl der Parameter. Unabhängig davon, wie gravierend man diese Bedrohung einschätzt, kann man dem „Unterschieben“ schwacher Parameter vorbeugend dadurch begegnen, dass bei der Konstruktion der Parameter eine geeignete Einwegfunktion, d.h. eine der oben genannten Hashfunktionen, angewandt wird und die Parameter zusammen mit einer nachvollziehbaren entsprechenden Berechnung übergeben werden. Konkrete Vorschläge sind in [1] und [10] zu finden.

4. Erzeugung von Zufallszahlen

Bei der Erzeugung von Systemparametern für Signaturverfahren und für die Schlüsselgenerierung werden Zufallszahlen gebraucht. Bei DSA-ähnlichen Signaturverfahren wird bei jeder Generierung einer Signatur eine neue Zufallszahl benötigt.

Für diese Zwecke bieten sich als Zufallszahlengeneratoren solche Systeme an, die

- eine physikalische Rauschquelle, die beispielsweise auf elektromagnetischen, elektro-mechanischen oder quantenmechanischen Effekten beruht, und
- ggf. eine algorithmische Nachbehandlung der digitalisierten Rauschsignale

besitzen. Die Eigenschaften der digitalisierten Rauschsignalfolge sollten sich hinreichend gut durch ein stochastisches Modell beschreiben lassen. Der physikalische Zufallszahlengenerator sollte ein P2-Generator (Stärke der Mechanismen bzw. Funktionen: hoch) im Sinne der AIS 31 [18] sein. Qualitativ bedeutet dies: Der durchschnittliche Entropiezuwachs pro Zufallsbit liegt oberhalb einer Mindestschranke. Die digitalisierten Rauschsignale müssen im laufenden Betrieb des Zufallszahlengenerators permanent oder zumindest in regelmäßigen Abständen statistischen Tests unterzogen werden („Onlinetests“). Im Idealfall sollte der Onlinetest dem mathematischen Modell der Rauschquelle angepasst sein. In jedem Fall müssen der Onlinetest selbst und das Aufrufschema geeignet sein, nicht akzeptable statistische Defekte oder Verschlechterungen der statistischen Eigenschaften der digitalisierten Rauschsignalfolge in angemessener Zeit zu erkennen. Auf einen Rauschalarm muss angemessen reagiert werden (z.B. weitere Tests, Stilllegen der Rauschquelle). Insbesondere muss ein etwaiger Totalausfall der Rauschquelle umgehend erkannt werden.

Eine aussagekräftige Bewertung eines Zufallszahlengenerators setzt umfassende Erfahrungen voraus. Das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) verfügt über solche Erfahrungen. Bei Bedarf kann in diesem Zusammenhang auf das Know-how des BSI zurückgegriffen werden.

Es wird dringend empfohlen, zur Schlüsselerzeugung einen physikalischen Zufallszahlengeneratoren zu verwenden.

Wenn für die Erzeugung von Schlüsseln oder anderer zufälliger Werte, die zur Erzeugung von elektronischen Signaturen benötigt werden (z.B. beim Signieren mit einer DSA-Variante), kein physikalischer Zufallszahlengenerator zur Verfügung steht, kommt als Alternative ein Pseudozufallszahlengenerator in Frage. Der innere Zustand des Pseudozufallszahlengenerators wird durch den so genannten Seed initialisiert. In jedem Schritt wird der innere Zustand

erneuert und hieraus eine Zufallszahl abgeleitet. Der innere Zustand des Pseudozufallszahlengenerators muss gegen Auslesen (physikalisch, über Schnittstelle etc.) ebenso sicher geschützt sein wie die geheimen Signaturschlüssel. Denn mit Kenntnis des inneren Zustands könnte ein potentieller Angreifer zumindest alle zukünftig erzeugten Zufallszahlen mühelos bestimmen.

Jeder Pseudozufallszahlengenerator, der im Zusammenhang mit digitalen Signaturen genutzt wird, muss mindestens ein K3-DRNG mit Stärke der Mechanismen bzw. Funktionen „Hoch“ im Sinne der AIS 20 [7] sein. Qualitativ bedeutet dies:

- Es ist einem Angreifer nicht praktisch möglich, zu einer ihm bekannten Zufallszahlenteilfolge Vorgänger oder Nachfolger dieser Teilfolge oder gar einen inneren Zustand zu errechnen, oder diese mit einer Wahrscheinlichkeit zu erraten, die nichtvernachlässigbar über der Ratewahrscheinlichkeit ohne Kenntnis der Teilfolge liegt.
- Die Entropie des Seed beträgt mindestens 80 Bit.

Anderenfalls muss das entsprechende Verfahren zur digitalen Signatur als potentiell unsicher angesehen werden.

Darüber hinaus sollte der Pseudozufallszahlengenerator ein K4-DRNG mit Stärke der Mechanismen bzw. Funktionen „Hoch“ im Sinne der AIS 20 [7] sein. Qualitativ bedeutet dies, dass zusätzlich folgende Bedingung erfüllt ist:

- Es ist einem Angreifer nicht praktisch möglich, aus Kenntnis eines inneren Zustands Vorgängerezufallszahlen oder innere Vorgängerezustände zu errechnen, oder diese mit einer Wahrscheinlichkeit zu erraten, die nichtvernachlässigbar über der Ratewahrscheinlichkeit ohne Kenntnis des inneren Zustands liegt.

Literatur

- [1] NIST: *FIPS Publication 186-2: Digital Signature Standard (DSS)*, Januar 2000 und *Change Notice 1*, Oktober 2001.
- [2] NIST: *FIPS Publication 180-1: Secure Hash Standard (SHS-1)*, Mai 1995.
- [3] ISO/IEC 10118-3: *Information technology – Security techniques – Hash functions – Part 3: Dedicated hash functions*, 1998.
- [4] ISO/IEC 14888-3: *Information technology – Security techniques – Digital signatures with appendix – Part 3: Certificate-based mechanisms*, 1999.
- [5] IEEE P1363: *Standard specification for public key cryptography*.
- [6] S.D. Galbraith, N.P. Smart: *A Cryptographic Application of Weil Descent*, Cryptography and Coding, LNCS 1746, 1999.
- [7] AIS 20: *Funktionalitätsklassen und Evaluationsmethodologie für deterministische Zufallszahlengeneratoren*, Version 1, 2.12.99, samt mathematisch-technischem Anhang (Version 2.0, 2.12.99), <http://www.bsi.bund.de/zertifiz/zert/interpr/aisitsec.htm>
- [8] T. ElGamal: *A public key cryptosystem and a signature scheme based on discrete logarithms*, Crypto '84, LNCS 196, S. 10 – 18, 1985.
- [9] R. Rivest, A. Shamir, L. Adleman: *A method for obtaining digital signatures and public key cryptosystems*, Communications of the ACM, vol. 21 no. 2, 1978.
- [10] ANSI X9.62-1998: *Public Key Cryptography for the Financial Service Industry: The Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA)*, 1998

Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA), 1998.

- [11] ISO/IEC 15946-2: *Information technology – Security techniques – Cryptographic techniques based on elliptic curves – Part 2: Digital signatures*, 2002. (Publikation in Kürze vorgesehen)
- [12] S. Vaudenay: *Hidden collisions in DSS*, Crypto'96, LNCS 1109, S. 83 – 88, 1996.
- [13] A.K. Lenstra, E.R. Verheul: *Selecting Cryptographic Key Sizes*, J. Cryptology 39, 2001.
- [14] J.-S. Coron, D. Naccache, J. Stern: *On the Security of RSA padding*. Crypto '99, LNCS 1666, 1999.
- [15] PKCS #1 v2.1: RSA Cryptographic Standard, 14.6.2002.
- [16] DIN V66291: *Spezifikation der Schnittstelle zu Chipkarten mit Digitaler Signatur-Anwendung/Funktion nach SigG und SigV, Annex A, 2.1.1*, 1999.
- [17] ANSI X9.31-1998: *Digital signatures using reversible public key cryptography for the financial services industry (rDSA)*, 1998.
- [18] AIS 31: *Funktionalitätsklassen und Evaluationsmethodologie für physikalische Zufallszahlengeneratoren*, Version 1, 25.9.2001, samt mathematisch-technischem Anhang, (Version 3.1, 25.09.2001,) <http://www.bsi.bund.de/zertifiz/zert/interpr/aisitsec.htm>
- [19] ISO/IEC 15946-4 (CD): *Information technology – Security techniques – Cryptographic techniques based on elliptic curves – Part 4: Digital signatures giving message recovery*, 2001.
- [20] D. Boneh, G. Durfee: *Cryptanalysis of RSA with private key d less than $N^{0.292}$* . Eurocrypt '99, LNCS 1592, 1999.
- [21] ISO/IEC 9796-2: *Information technology – Security techniques – Digital Signature schemes giving message recovery – Part 2: Integer Factorization based mechanisms*, 2002. (Publikation in Kürze vorgesehen.)
- [22] ISO/IEC 9796-3 : *Information technology – Security techniques – Digital Signature schemes giving message recovery – Part 3: Discrete logarithm based mechanisms*, 2000.
- [23] A.K. Lenstra, A. Shamir, J. Tomlinson, E. Tromer: *Analysis of Bernstein's Factorization Circuit*, www.cryptosavvy.com.

Mainz, den 2. Januar 2003

IS 15

Regulierungsbehörde für Telekommunikation und Post

Im Auftrag

S c h w e m m e r