

Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen

Bekanntmachung zur elektronischen Signatur nach dem Signaturgesetz und der Signaturverordnung

(Übersicht über geeignete Algorithmen)

Vom 18. 2. 2013

Die Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen als zuständige Behörde gemäß § 3 Signaturgesetz (SigG) vom 16. Mai 2001 (BGBl. I S. 876), zuletzt geändert durch Artikel 4 des Gesetzes vom 17. Juli 2009 (BGBl. I S. 2091), veröffentlicht gemäß Anlage 1 Abschnitt 1 Nr. 2 Signaturverordnung (SigV) vom 16. November 2001 (BGBl. I S. 3074), zuletzt geändert durch die Verordnung vom 15. November 2010 (BGBl. I S. 1542), 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 16. Mai 2001 in Verbindung mit Anlage 1 Abschnitt I Nr. 2 SigV vom 16. November 2001

Vorbemerkung: Wie in den Vorjahren werden im Folgenden geeignete Algorithmen und Schlüssellängen für den Zeitraum der kommenden sieben Jahre anstatt des in der SigV vorgesehenen Mindestzeitraums von sechs Jahren aufgeführt. Das heißt konkret, dass geeignete Algorithmen und Schlüssellängen bis Ende 2019 statt bis Ende 2018 aufgeführt sind. Im Allgemeinen sind solche längerfristigen Prognosen schwer möglich. Die vorliegende Übersicht über geeignete Algorithmen unterscheidet sich von der zuletzt veröffentlichten Übersicht vom 30. Dezember 2011 (BAnz Nr. 10 vom 18. Januar 2012, S. 243) im Wesentlichen durch die Einführung des in [2] definierten SHA-512/256 als einer weiteren für die Verwendung bei der Erstellung qualifizierter digitaler Signaturen geeigneten Hashfunktion im zweiten Kapitel und durch Anpassungen an verschiedenen Stellen im vierten Kapitel. Im neuen siebten Kapitel werden Punkte diskutiert, in denen für künftige Versionen der vorliegenden Bekanntmachung Änderungen erwogen werden. Dies betrifft vor allem ein mögliches künftiges Auslaufen der Eignung von Nyberg-Rueppel-Signaturen. Daneben wird im siebten Kapitel auch die geplante Weiterentwicklung der Anforderungen an die Zufallszahlenerzeugung im Kontext qualifizierter elektronischer Signaturen diskutiert. **Hinsichtlich des möglichen künftigen Auslaufens der Eignung von Nyberg-Rueppel-Signaturen bittet die Bundesnetzagentur um Rückmeldung von Nutzern dieses Verfahrens bis zum 30.6.2014.**

Die Sicherheit einer qualifizierten elektronischen Signatur hängt entscheidend von der Stärke der zugrunde liegenden Algorithmen ab. Im Folgenden werden Algorithmen genannt, die für

qualifizierte elektronische Signaturen mindestens für die kommenden sieben Jahre (d.h. bis Ende 2019) als geeignet anzusehen sind.

Darüber hinaus werden Empfehlungen aufgeführt, die dazu dienen, zukünftigen Entwicklungen im Bereich der kryptographischen Algorithmen und zugehörigen Parameter, die sich heute schon abzeichnen und in Zukunft an Bedeutung zunehmen könnten, zu begegnen. Diese als Empfehlung formulierten Angaben dienen dazu, dem "Interesse der Planungssicherheit der interessierten Hersteller, Dienstleister und Anwender" Rechnung zu tragen (vgl. Roßnagel/Pordes: Kommentierung des Signaturgesetzes [33]). Es besteht zum jetzigen Zeitpunkt jedoch keine Pflicht, diese Empfehlungen umzusetzen. Neben Empfehlungen beinhaltet der Algorithmenkatalog Bemerkungen, die seinem besseren Verständnis dienen und einen rein informativen Charakter haben.

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, Tagungsbände 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.

Inhalt

INHALT	3
1. KRYPTOGRAPHISCHE ANFORDERUNGEN	4
1.1. Hashfunktionen	4
1.2. Signaturverfahren	4
1.3. Schlüsselerzeugung	4
2. GEEIGNETE HASHFUNKTIONEN	5
3. GEEIGNETE SIGNATURVERFAHREN	6
3.1. RSA-Verfahren	7
3.2. DSA	8
4. ERZEUGUNG VON ZUFALLSZAHLEN	10
5. ZEITRAUM UND VERFAHREN ZUR LANGFRISTIGEN DATENSICHERUNG	13
6. NICHT MEHR GEEIGNETE KRYPTOGRAPHISCHE ALGORITHMEN	13
7. AUSBLICK AUF KÜNFTIGE ENTWICKLUNGEN	16
7.1. Langfristige Streichung wenig genutzter Algorithmen aus dem Algorithmenkatalog	16
7.2. Weitere Entwicklung der Anforderungen an Zufallsgeneratoren	16
8. OHNE SICHERHEITSGRÜNDE ABGEKÜNDIGTE ALGORITHMEN	17
LITERATUR	17

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 vorgegebener 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 Signaturprüf Schlüssel 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 folgenden Kriterien genügen:

- H muss *kollisionsresistent* sein; d.h., es ist praktisch unmöglich, Kollisionen zu finden. (Zwei unterschiedliche digitale Dokumente, die durch H auf denselben Hashwert abgebildet werden, bilden eine Kollision).
- 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. Bei der praktischen Anwendung kommt es jedoch nur darauf an, dass es, wie oben verlangt, praktisch 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, die bei einer Prüfung mit dem zugehörigen Signaturprüf Schlüssel als gültig bewertet werden. Insbesondere bedeutet dies, dass es praktisch unmöglich sein muss, den Signaturschlüssel aus dem (öffentlichen) Signaturprüf Schlüssel zu berechnen. Allgemeiner darf es praktisch nicht möglich sein, mit Kenntnis des Signaturprüf Schlüssels und Beispielen von Signaturen gültige Signaturen zu neuen Dokumenten zu erzeugen, ohne den Signaturschlüssel zu nutzen.

1.3. Schlüsselerzeugung

Die verschiedenen Signaturverfahren benötigen Schlüssel mit gewissen Eigenschaften, die sich aus dem jeweiligen konkreten Verfahren ergeben. Im Folgenden werden weitere einschränkende Bedingungen festgelegt, deren Nichtbeachtung zu Schwächen führen könnte. Zusätzlich wird generell verlangt, dass Schlüssel nach den unter „4. Erzeugung von Zufallszahlen“ genannten Maßnahmen zufällig erzeugt werden.

2. Geeignete Hashfunktionen

Die beiden Hashfunktionen SHA-1 und RIPEMD-160 sind bis Ende 2015 nur noch für die Prüfung qualifizierter Zertifikate geeignet.

Die folgenden Hashfunktionen der SHA-2-Familie sind geeignet, ein langfristiges Sicherheitsniveau zu gewährleisten:

- SHA-256, SHA-512/256, SHA-384, SHA-512 [2].

Dabei sind SHA-256 und SHA-512/256 Hashfunktionen mit einer Hashwertlänge von 256 Bit, während SHA-384 und SHA-512 jeweils 384 respektive 512 Bit lange Hashwerte erzeugen. SHA-512/256 entspricht SHA-512 mit einem auf 256 Bit abgeschnittenen Hashwert und einem anders als bei SHA-512 definierten Initialisierungsvektor. Insgesamt sind SHA-512/256, SHA-384 und SHA-512 hinsichtlich ihrer Implementierung und damit auch hinsichtlich aller Implementierungsaspekte (z.B. Performanz auf verschiedenen Plattformen) fast identisch.

Für SHA-512/256 wird eine gleiche Widerstandsfähigkeit gegen klassische generische Angriffe auf Kollisionsresistenz und Einwegenschaften erwartet wie für SHA-256. Aufgrund des größeren inneren Zustandes und der erhöhten Rundenanzahl von SHA-512/256 verglichen mit SHA-256 ist ein etwas verbesserter Sicherheitsspielraum gegen künftige kryptoanalytische Fortschritte zu erwarten. Ein weiterer theoretischer Vorteil ist eine gegenüber SHA-256 verbesserte Widerstandsfähigkeit gegen Multikollisions-Angriffe wie in [36].

Diese vier Hashfunktionen sind (mindestens) in den **kommenden sieben Jahren, d.h. bis Ende 2019**, für die Anwendung bei qualifizierten elektronischen Signaturen geeignet. Die Hashfunktion SHA-224 [2] ist bis **Ende 2015** für die Anwendung bei qualifizierten elektronischen Signaturen geeignet.

Die folgende Tabelle fasst die Eignung der Hashfunktionen zusammen.

Tabelle 1: Geeignete Hashfunktionen

geeignet bis Ende 2015	geeignet bis Ende 2019
SHA-224, (SHA-1, RIPEMD-160)*	SHA-256, SHA-384, SHA-512, SHA-512/256

* ausschließlich zur Prüfung qualifizierter Zertifikate, aber nicht zu deren Erstellung oder zur Erzeugung und Prüfung anderer qualifiziert signierter Daten.

Die Hashfunktion SHA-1 war bis Ende 2010 zur Erzeugung qualifizierter Zertifikate zugelassen, sofern in die Erzeugung der Seriennummer Zufall mit mindestens 20 Bit Entropie eingeflossen ist. Auch wenn bei der SHA-2-Familie nach gegenwärtigem Kenntnisstand hierfür keine Notwendigkeit besteht, wird dennoch empfohlen, dies auch dort als eine zusätzliche Sicherheitsmaßnahme zu verwenden.

Bemerkung:

- Ob in die Erzeugung eines qualifizierten Zertifikats tatsächlich mindestens 20 Bit Entropie eingeflossen sind, kann im Rahmen der Prüfung des qualifizierten Zertifikats mittels einer Signaturanwendungskomponente gemäß § 2 Nr. 11 b) SigG nicht festge-

stellt werden. Die Anforderung ist vielmehr vom Zertifizierungsdiensteanbieter in seinem Betrieb zu erfüllen.

3. Geeignete Signaturverfahren

Im Jahr 1977 haben Rivest, Shamir und Adleman das nach ihnen benannte RSA-Verfahren [9] zum Erzeugen und Verifizieren digitaler Signaturen explizit beschrieben. Im Jahr 1984 hat ElGamal [8] ein weiteres Signaturverfahren vorgeschlagen. Eine Variante dieses ElGamal-Verfahrens ist der 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 entweder der Restklassenkörper modulo einer Primzahl p ist oder ein endlicher Körper der Charakteristik 2.

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

1. RSA-Verfahren [21],
2. DSA [1], [4],
3. DSA-Varianten basierend auf elliptischen Kurven:
 - EC-DSA [1], [4], [5], [10],
 - EC-KCDSA, EC-GDSA [4],
 - Nyberg-Rueppel-Signaturen [6].

Für weitere (nicht normative) Informationen zu ECDSA und ECGDSA siehe auch die Abschnitte 4.2.1 und 4.2.2 von [37].

Die Sicherheit der oben genannten Verfahren beruht dabei entsprechend auf:

1. dem Faktorisierungsproblem für ganze Zahlen,
2. dem Problem der Berechnung diskreter Logarithmen in der multiplikativen Gruppe von F_p oder
3. dem Diskreten-Logarithmus-Problem in einer elliptischen Kurve über einem Restklassenkörper modulo einer Primzahl p oder einem Körper der Charakteristik 2.

Um festzulegen, wie groß die Systemparameter bei diesen Verfahren zu wählen sind, 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 Rechner-technik berücksichtigt werden. Um eine Aussage über die Sicherheit für einen bestimmten zukünftigen Zeitraum zu machen, muss außerdem eine Prognose für die künftige Entwicklung der beiden genannten Aspekte zugrunde gelegt werden, vgl. [12], [26], [35]. Solche Prognosen sind nur für relativ kurze Zeiträume sinnvoll (und können sich natürlich jederzeit aufgrund unvorhersehbarer Entwicklungen als falsch erweisen).

Im Folgenden bezeichnen wir mit der Bitlänge r einer Zahl $x > 0$ diejenige ganze Zahl r mit der Eigenschaft $2^{r-1} \leq x < 2^r$.

Die Sicherheit der einzelnen Verfahren ist (mindestens) für die **kommenden sieben Jahre**, d.h. bis **Ende 2019**, bei der im Folgenden festgelegten Wahl der Parameter gewährleistet.

3.1. RSA-Verfahren

Der Parameter n muss eine Länge von mindestens 1976 Bit haben. Empfohlen werden 2048 Bit.

Die folgende Tabelle fasst die minimalen Bitlängen zusammen.

Tabelle 2: Geeignete Schlüssellängen für RSA-Verfahren

Parameter \ Zeitraum	bis Ende 2019
n	1976 (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 $\varepsilon_1 \approx 0,1$ 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 unter der Nebenbedingung $\text{ggT}(e, (p-1)(q-1)) = 1$ unabhängig von n gewählt. Der zugehörige geheime Exponent d wird dann in Abhängigkeit von dem vorher festgelegten e berechnet, so dass $ed \equiv 1 \pmod{\text{kgV}(p-1, q-1)}$ gilt. Es wird sehr empfohlen, $e \geq 2^{16} + 1$ zu wählen.

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 besten heute bekannten 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. [18].
- In [3], Table 3-2 werden für 2048-Bit RSA eine Unter- und eine Obergrenze für e spezifiziert. ($2^{16} + 1 \leq e < 2^{256}$).

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 [13]. Bis 2019 geeignete Verfahren sind:

- RSA: „Signature Schemes with Appendix“ PSS aus [14] Abschn. 8.1 und 9.1,

- „DSI according to ISO/IEC 9796-2 with random number“ [15],
- „digital signature scheme 2“ und „digital signature scheme 3“ aus [19].

Das Formatierungsverfahren RSA: „Signature Schemes with Appendix“ PKCS#1-v1_5 aus [14] Abschn. 8.2 und 9.2 ist noch bis Ende 2015 geeignet. Für Zertifikatssignaturen ist das PKCS#1-v1_5-Format darüber hinaus bis Ende 2017 geeignet. Es wird aber empfohlen, dieses Verfahren nicht über Ende 2013 hinaus zu verwenden. Der Beweiswert der erstellten Signaturen ist bis Ende 2019 gegeben.

Bemerkung:

- Die Realisierung eines Formatierungsverfahrens – z.B. die Form der Arbeitsteilung zwischen einer Chipkarte, auf der die Potenzierung 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 untersucht werden.

Zur Erzeugung der Primfaktoren siehe z.B. [1] und [5]. Insbesondere muss bei Nutzung eines probabilistischen Primzahltests mit hinreichender Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen sein, dass p oder q in Wirklichkeit zusammengesetzte Zahlen sind. Als obere Schranke für diese Wahrscheinlichkeit wird der Wert 2^{-100} (siehe [1]; vergleiche aber auch [5] und [16]) empfohlen.

3.2. DSA

Die Bitlänge von p beträgt mindestens 2048 Bit. Bis **Ende 2015** muss die Bitlänge des Parameters q mindestens 224 Bit betragen. **Ab Anfang 2016** sind für q mindestens 256 Bit notwendig. Die folgende Tabelle fasst die Bitlängen für den DSA zusammen.

Tabelle 3: Geeignete Schlüssellängen für DSA

Parameter \ Zeitraum	bis Ende 2015	bis Ende 2019
p	2048	2048
q	224	256

Bemerkungen:

- Zur Erzeugung von p und der weiteren Parameter siehe [1]; die Wahrscheinlichkeit, dass p oder q zusammengesetzt sind, soll kleiner als 2^{-100} sein.
- In FIPS-186 [1] werden konkrete Werte für die Bitlängen von p und q vorgegeben.
- Relativ kurze Bitlängen des Parameters q erlauben die Konstruktion von „Kollisionen“ im Sinne von Vaudenay [11] bei der Parametergenerierung. Diese Kollisionen haben jedoch in der Praxis der qualifizierten Signaturen keine Bedeutung. Soll dessen ungeachtet die Möglichkeit, diese Kollisionen konstruieren zu können, grundsätzlich ausgeschlossen werden, muss q größer als der maximal mögliche Hashwert sein.

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:

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

Für den Parameter p gibt es keine Einschränkungen. Die Länge von q muss mindestens 224 Bit betragen, und **ab Anfang 2016** sind für q mindestens 250 Bit erforderlich.

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

Tabelle 4: Geeignete Schlüssellängen für DSA-Varianten in $E(F_p)$

Parameter \ Zeitraum	bis Ende 2015	bis Ende 2019
p	keine Einschränkung	keine Einschränkung
q	224	250

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. Für weitere Erläuterungen zu den Bedingungen und Beispielkurven siehe [20] und [23].
- Die Hashwerte müssen, falls ihre Bitlänge die von q übersteigt, auf die Bitlänge von q gekürzt werden. Dazu wird [10] eine geeignete Anzahl niederwertiger Bits abgeschnitten. Vergleiche auch die entsprechende Bemerkung im nächsten Abschnitt. Im Hinblick auf „Kollisionen“ im Sinne von [11] gelten die in Abschnitt 3.2 für DSA formulierten Bemerkungen hier ebenso.

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).
- Es ist $\text{ord}(P) = q$ mit q prim.

- Für $r_0 := \min(r : q \text{ teilt } 2^{mr} - 1)$ gilt $r_0 > 10^4$.
- Die Klassenzahl der Hauptordnung, die zum Endomorphismenring von E gehört, ist mindestens 200.

An den Parameter m werden keine Bedingungen gestellt. **Ab Anfang 2016** sind für q mindestens 250 Bit erforderlich.

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

Tabelle 5: Geeignete Schlüssellängen für DSA-Varianten in elliptischen Kurven über Körpern der Charakteristik 2

Parameter \ Zeitraum	bis Ende 2015	bis Ende 2019
m	keine Einschränkung	keine Einschränkung
q	224	250

Bemerkungen:

- In Bezug auf die oben erwähnten 'Kollisionen' im Sinne von [11] gilt für die auf elliptischen Kurven basierenden Verfahren dasselbe wie für DSA.
- Ist bei der Berechnung der zweiten Signaturkomponente s die Bitlänge des Hashwerts größer als die Bitlänge des Moduls q , werden in [10] die überzähligen niederwertigen (rechten) Bits des Hashwerts abgeschnitten. Dies betrifft DSA und DSA-Varianten, die auf Gruppen $E(F_p)$ oder $E(F_{2^m})$ basieren.
- Bei 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], [10], [20] und [23] zu finden.
- Der Leitfaden [28] (Anlage zu [29]) definiert Minimalanforderungen zur Resistenz von Implementierungen elliptischer Kurven über F_p gegenüber Seitenkanalangriffen.

4. Erzeugung von Zufallszahlen

Zur Erzeugung von Systemparametern für Signaturverfahren und zur Schlüsselgenerierung werden Zufallszahlen benötigt. Bei DSA-ähnlichen Signaturverfahren wird bei der Generierung jeder Signatur eine neue Zufallszahl benötigt. Für diese Zwecke müssen geeignete Zufallszahlengeneratoren eingesetzt werden.

Die ehemaligen mathematisch-technischen Anlagen [30] und [31] zur AIS 20 [7] bzw. AIS 31 [17] wurden im September 2011 durch die mathematisch-technische Anlage [32] ersetzt. Die für den Algorithmenkatalog relevanten Funktionalitätsklassen wurden (unter neuem Namen)

im Wesentlichen beibehalten, und es sind neue Funktionalitätsklassen hinzugekommen, u.a. hybride deterministische Zufallszahlengeneratoren (Funktionalitätsklasse DRG.4) und hybride physikalische Zufallszahlengeneratoren (Funktionalitätsklasse PTG.3).

Neben Zufallszahlengeneratoren, die nach den neuen Evaluierungskriterien [32] evaluiert werden, können auch weiterhin Zufallszahlengeneratoren eingesetzt werden, die nach den alten Evaluierungskriterien evaluiert wurden. Soweit für den Algorithmenkatalog relevant, stellt die nachfolgende Tabelle den neuen Funktionalitätsklassen die entsprechenden alten Funktionalitätsklassen gegenüber. Dies sind keine exakten 1-1-Beziehungen, da die Anforderungen der Funktionalitätsklassen zwar sehr ähnlich, aber nicht identisch sind. Die Anforderungen an die neuen Funktionalitätsklassen sind in einzelnen Aspekten weitergehend.

Tabelle 6: Gegenüberstellung der alten und neuen Funktionalitätsklassen für Zufallsgeneratoren nach AIS20/31

neue Funktionalitätsklasse [32]	alte Funktionalitätsklasse [30] bzw. [31]
PTG.2	P2
PTG.3	kein Pendant
DRG.2	K3
DRG.3	K4
DRG.4	kein Pendant

Bemerkungen:

- Hybride Zufallszahlengeneratoren vereinen Sicherheitseigenschaften von deterministischen und physikalischen Zufallszahlengeneratoren.
- Die Sicherheit eines hybriden deterministischen Zufallszahlengenerators der Klasse DRG.4 beruht in erster Linie auf der Komplexität des deterministischen Anteils, welcher der Klasse DRG.3 angehört. Während der Nutzung des Zufallszahlengenerators wird zusätzlich immer wieder neuer Zufall hinzugefügt. Dies kann (z.B.) in regelmäßigen Abständen oder auf die Anforderung einer Applikation hin erfolgen.
- Hybride physikalische Zufallszahlengeneratoren der Klasse PTG.3 besitzen neben einer starken Rauschquelle eine starke kryptographische Nachbearbeitung mit Gedächtnis.
- PTG.3 stellt die stärkste Funktionalitätsklasse in [32] dar.
- Die Konformität zur Funktionalitätsklasse PTG.3 kann mit einem PTG.2-konformen Zufallsgenerator mit geeigneter kryptographischer Nachbearbeitung mit Gedächtnis erreicht werden (vgl. [32], Abschnitt 4.5, Paragraph 304 und Punkt PTG 3.6 in FCS_RNG 1.1, Paragraph 305).

Grundsätzlich werden physikalische Zufallszahlengeneratoren als geeignet angesehen, die einer der folgenden Klassen angehören:

- Physikalische Zufallszahlengeneratoren
 - neu: PTG.2, PTG.3

- alt: P2 hoch
- Deterministische Zufallszahlengeneratoren
 - neu: DRG.3, DRG.4 mit mindestens 100 Bit Seed-Entropie (siehe [32], Absatz 248 und auch [32], Absatz 332, insbesondere die letzte Zeile von Tabelle 12)
 - alt: K4 hoch mit 100 Bit Seed-Entropie

Zur Erzeugung von Ephemeralschlüsseln (DSA, ECDSA, ECGDSA, ECKDSA) wird darüber hinaus empfohlen, einen Zufallszahlengenerator zu wählen, der einer der folgenden Klassen angehört: PTG.3, DRG.3, DRG.4 oder K4 hoch mit 100 Bit Seed-Entropie (vgl. auch [28]). Hintergrund ist, dass Zufallszahlen, die von PTG.2- oder P2-konformen Zufallszahlengeneratoren erzeugt wurden, z.B. gewisse Schiefen aufweisen können. Es sind gegenwärtig keine Angriffe bekannt, die dies ausnutzen könnten. Vielmehr ist dies eine grundsätzliche Sicherheitsmaßnahme.

Zertifizierungsdiensteanbietern wird empfohlen, einen Zufallszahlengenerator der Klasse PTG.3 zu verwenden.

Zur Erzeugung qualifizierter elektronischer Signaturen (keine Zertifikatssignaturen) kann ein deterministischer Zufallszahlengenerator der Klasse DRG.2 oder K3 hoch verwendet werden, sofern der Antragssteller nachvollziehbar begründen kann, dass das Fehlen der DRG.3-spezifischen bzw. der K4-spezifischen Eigenschaft (enhanced backward secrecy) in den vorgesehenen Einsatzszenarien keine zusätzlichen Sicherheitsrisiken impliziert. Auch in diesem Fall ist eine Seed-Entropie von mindestens 100 Bit sicherzustellen (siehe [32], Absatz 248 und 332 wie oben).

Sind die Anforderungen an die Zufallszahlengeneratoren nicht erfüllt, muss das entsprechende Verfahren zur qualifizierten elektronischen Signatur als potenziell unsicher angesehen 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.

Zusammenfassend ist für alle deterministischen Zufallsgeneratoren eine Seed-Entropie von mindestens 100 Bit verpflichtend. Empfohlen werden für alle deterministischen Zufallsgeneratoren 120 Bit Seed-Entropie.

Bemerkungen:

- Die Ableitung von Signaturschlüsseln, Ephemeralschlüsseln und Primzahlen (für RSA) aus den erzeugten Zufallszahlen soll mit geeigneten Algorithmen erfolgen (zu elliptischen Kurven vgl. [28], Abschnitte 5.2 und 5.5.1). Vereinfacht gesagt, sollte einem potentiellen Angreifer so wenig Information über die abgeleiteten (geheim zu haltenden) Werte zur Verfügung stehen wie möglich. Im Idealfall treten alle Werte innerhalb des jeweilig zulässigen Wertebereichs mit derselben Wahrscheinlichkeit auf, und verschiedene Zufallszahlen sollten zumindest keine praktisch ausnutzbaren Zusammenhänge aufweisen.

- Ebenso wie die Signaturalgorithmen kann auch die Erzeugung geheim zu haltender Signaturschlüssel, Ephemeralschlüssel und Primzahlen Ziel von Seitenkanalangriffen werden ([27], [28] etc.). Dieser Aspekt wird in [32] explizit angesprochen.
- Auch im Hinblick auf Implementierungsangriffe vereinen hybride Zufallszahlengeneratoren Sicherheitseigenschaften von deterministischen und physikalischen Zufallszahlengeneratoren.

5. Zeitraum und Verfahren zur langfristigen Datensicherung

Damit eine qualifizierte elektronische Signatur auch nach Überschreiten der Eignungsfrist eines Algorithmus, auf dessen Sicherheit die Signatur beruht, ihren Beweiswert erhält und sicher verifiziert werden kann, müssen vor Überschreiten dieser Frist geeignete Maßnahmen nach § 17 SigV getroffen werden. Dazu gehören qualifizierte Zeitstempel, die rechtzeitig vor Überschreiten der Frist erzeugt werden und deren Sicherheit auf längerfristig geeigneten Algorithmen beruht. Vor Überschreiten der Eignungsfrist eines Algorithmus, auf dessen Sicherheit ein solcher qualifizierter Zeitstempel beruht, muss dann dieser wiederum mit einem qualifizierten Zeitstempel längerfristiger Sicherheit versehen werden und so weiter. Die Technische Richtlinie [34] befasst sich mit der langfristigen Beweiswerterhaltung kryptographisch signierter Dokumente.

Statt für jedes einzelne qualifiziert signierte elektronische Datum einen Zeitstempel zu erzeugen, bietet es sich aus Effizienzgründen an, einen einzigen qualifizierten Zeitstempel jeweils für mehrere qualifiziert signierte elektronische Daten zugleich zu erzeugen. Ein geeignetes Verfahren dieser Art ist die Erzeugung so genannter Evidence Records für die qualifizierten elektronischen Signaturen gemäß [22]. Bei der Erzeugung eines solchen Evidence Records wird unter anderem ein Hashbaum erstellt. Für die dafür verwendete Hashfunktion wird hier sowohl die Kollisionsresistenz als auch die Einwegeigenschaft verlangt. Es sind dieselben Algorithmen hierfür geeignet wie für die Erzeugung qualifizierter elektronischer Signaturen. Auch die Eignungsfristen sind identisch.

6. Nicht mehr geeignete kryptographische Algorithmen

In diesem Abschnitt sind alle kryptographischen Algorithmen mit Schlüssellängen und Parametergrößen aufgeführt, die jemals zur Erstellung von qualifizierten elektronischen Signaturen und qualifizierten Zertifikaten geeignet waren und diese Eignung inzwischen aber verloren haben. Diese Algorithmen werden auch weiterhin zur Prüfung von Signaturen oder Zertifikaten benötigt. Dazu müssen diese Algorithmen von den Signaturanwendungskomponenten unterstützt werden.

Die nachfolgenden Tabellen enthalten den letzten Zeitpunkt, an dem der jeweilige Algorithmus mit der angegebenen Schlüssellänge bzw. Parametergröße zur *Erzeugung* qualifizierter elektronischer Signaturen und qualifizierter Zertifikate geeignet war bzw. eine Übergangsfrist endete. (Bei RSA 1024 und SHA-1 wurden Übergangsfristen von 3 bzw. 6 Monaten eingeräumt.) Bei den Hashfunktionen werden zusätzlich die Zeitpunkte angegeben, an denen die Eignung zur *Prüfung* qualifizierter elektronischer Zertifikate erlischt, d.h., bis kurz vor diesem Zeitpunkt ist zur Erhaltung des Beweiswertes für qualifizierte Zertifikate keine Maßnahme nach Kap. 5 notwendig. Andere Daten besitzen dagegen keine gültige qualifizierte elektronische Signatur mehr, falls nicht vor Ablauf der angegebenen Eignungsfristen geeignete Maßnahmen zur Erhaltung des Beweiswertes der Signaturen ergriffen wurden.

Hashfunktionen

Tabelle 7: Nicht mehr geeignete Hashfunktionen

Hashfunktion	geeignet bis
SHA-1	Ende Juni 2008* Ende 2010** Ende 2015***
RIPED-160	Ende 2010 Ende 2015***

* Januar – Juni 2008: Übergangsfrist

** nur noch zur Erzeugung qualifizierter Zertifikate (im Jahr 2010 zusätzlich unter der Auflage von einer Entropie ≥ 20 Bit in der Seriennummer)

*** nur noch zur *Prüfung* qualifizierter Zertifikate

RSA

Tabelle 8: Nicht mehr geeignete RSA-Schlüssellängen

Modullänge n	geeignet bis
756	Ende 2000
1024	Ende März 2008*
1280	Ende 2008
1536	Ende 2009
1728	Ende 2010

* Januar – März 2008: Übergangsfrist

DSA

Tabelle 9: Nicht mehr geeignete DSA-Parameter

Parameter p	Parameter q	geeignet bis
1024	160	Ende 2007
1280	160	Ende 2008
1536	160	Ende 2009
2048	160	Ende 2009

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

Tabelle 10: Nicht mehr geeignete EC-Parameter über F_p

Parameter p	Parameter q	geeignet bis
keine Einschränkung	160	Ende 2006
192	180	Ende 2009

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

Tabelle 11: Nicht mehr geeignete EC-Parameter über binären Körpern

Parameter m	Parameter q	geeignet bis
Keine Einschränkung	160	Ende 2006
191	180	Ende 2009

7. Ausblick auf künftige Entwicklungen

In diesem Kapitel soll kurz eingegangen werden auf die künftige Weiterentwicklung der vorliegenden Bekanntmachung. Ziel dieses Abschnittes ist es damit einerseits, die Planungssicherheit für Anwender, Zertifizierungsdiensteanbieter und Hersteller von Hard- und Software für die Erstellung und Prüfung qualifizierter elektronischer Signaturen zu erhöhen, und andererseits, den genannten Gruppen eine frühzeitige Rückmeldung zu geplanten Änderungen in der vorliegenden Bekanntmachung zu ermöglichen.

7.1. Langfristige Streichung wenig genutzter Algorithmen aus dem Algorithmenkatalog

Es ist vorgesehen, künftig Algorithmen die Eignung zur Erstellung qualifizierter elektronischer Signaturen auch ohne Vorliegen bekannter Sicherheitsschwächen zu entziehen, wenn davon ausgegangen wird, dass die Verfahren keine oder fast keine praktische Bedeutung haben. Dieser Schritt beruht auf der allgemeinen Überlegung, dass diese Algorithmen im Allgemeinen wesentlich weniger intensiv kryptoanalytisch untersucht wurden bzw. werden, als es für Algorithmen der Fall ist, die tatsächlich breite Anwendung finden.

Dieses Verfahren wird in keinem Fall zu einer Streichung eines Algorithmus vor Ablauf der in dieser Bekanntmachung angegebenen Eignungsfristen führen. Außerdem wird die Streichung eines Algorithmus aus solchen Gründen an dieser Stelle mit einem Vorlauf von etwa 18 Monaten angekündigt werden, um der Öffentlichkeit Gelegenheit zur Kommentierung zu geben. Algorithmen, deren Abkündigung auf diesem Wege beschlossen wurde, werden zukünftig in Abschnitt 8 dieser Bekanntmachung aufgelistet.

Zurzeit wird erwogen, folgendes Verfahren auf diese Weise auslaufen zu lassen:

- Nyberg-Rueppel-Signaturen [6], [19].

Ehemalige, gegenwärtige und (potentielle) zukünftige Anwender von Nyberg-Rueppel-Signaturen werden bis zum 30.6.2014 um Rückmeldung hierzu an die Bundesnetzagentur und an das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik gebeten, genauer an die folgenden beiden Adressen:

Bundesnetzagentur Referat IS 15 Postfach 8001 D-55003 Mainz E-Mail: qes@bnetza.de	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik Referat K22 Postfach 200363 D-53133 Bonn E-Mail: algokat@bsi.bund.de
--	---

7.2. Weitere Entwicklung der Anforderungen an Zufallsgeneratoren

Hinsichtlich der Anforderungen an Zufallsgeneratoren sind die folgenden weiteren Entwicklungen geplant:

- Mittelfristig wird eine Migration auf die Funktionalitätsklassen PTG.3 und DRG.4 angestrebt.
- Es ist vorgesehen, ab dem nächsten Algorithmenkatalog nur noch Zufallszahlengeneratoren über das Jahr 2019 hinaus als geeignet anzusehen, die zu den neuen Funktionalitätsklassen der AIS 20 bzw. AIS 31 konform sind. Für bereits im Feld befindliche Systeme sind Ausnahmegestimmungen möglich. Entsprechende Ausnahmeregelungen werden vor allem für Systeme in Betracht kommen, in denen eine hohe Anzahl von Signaturkarten mit einer vorgesehenen Lebensdauer über das Jahr 2019 hinaus schon im Umlauf ist und die Ausnahmeregelungen werden dann vor 2014 an den Endnutzer ausgegebene Karten betreffen.
- Sofern geeignete Produkte zur Verfügung stehen, ist ab dem nächsten Algorithmenkatalog vorgesehen,
 - für Zertifizierungsdiensteanbieter die Funktionalitätsklasse PTG.3 oder zumindest DRG.4 im Grundsatz für die Erzeugung von Ephemeralschlüsseln und für die Erzeugung von Langzeitschlüsseln des Anbieters verpflichtend zu machen. Die geplante Regelung soll die Restlaufzeiten bereits bestehender Systeme beim Zertifizierungsdiensteanbieter nicht berühren, aber auf neu zu zertifizierende Systeme unmittelbar Anwendung finden. Es ist vorgesehen, für alle Zertifizierungsdiensteanbieter die Eignung von Lösungen basierend auf Zufallsgeneratoren anderer Klassen als PTG.3 oder DRG.4 nicht über das Jahr 2019 hinaus zu verlängern.
 - allgemein zumindest für die Erzeugung von Ephemeralschlüsseln die Funktionalitätsklassen P2 hoch (alt) und PTG.2 über 2019 hinaus nicht weiter zu verlängern. Abweichungen hiervon werden nur in begründeten Ausnahmefällen gestattet. Diese Ausnahmeregelungen können sich beispielsweise aus Bestandsschutzregelungen für bereits im Einsatz befindliche Systeme ergeben. Der Inhalt solcher Ausnahmeregelungen wird vom betrachteten Anwendungsfall abhängig sein.

8. Ohne Sicherheitsgründe abgekündigte Algorithmen

Zurzeit gibt es keine vormaligen zur Erstellung oder Prüfung digitaler elektronischer Signaturen geeigneten Verfahren, die ohne negative Erkenntnisse zur Sicherheit aus der Liste der geeigneten Verfahren entfernt worden sind oder deren Streichung aus der Liste der geeigneten Verfahren beschlossen wurde.

Literatur

- [1] NIST: *FIPS Publication 186-3: Digital Signature Standard (DSS)*, Juni 2009
- [2] NIST: *FIPS Publication 180-4: Secure Hash Standard (SHS)*, März 2012
- [3] NIST: W. Polk, D. Dodson, W. Burr, H. Ferraiolo, D. Cooper, *Special Publication 800-78-2: Cryptographic Algorithms and Key Sizes for Personal Identity Verification*, Dezember 2010
- [4] ISO/IEC 14888-3:2006 *Information technology – Security techniques – Digital signatures with appendix – Part 3: Discrete logarithm based mechanisms*, 2006 (ersetzt

entsprechende Inhalte von ISO/IEC-14888-3:1998)

- [5] IEEE P1363: *Standard specification for public key cryptography*, 2000
- [6] ISO/IEC 9796-3:2006 *Information technology – Security techniques – Digital Signature schemes giving message recovery – Part 3: Discrete logarithm based mechanisms*, 2006 (ersetzt ISO/IEC 9796-3:2000)
- [7] AIS 20: *Funktionalitätsklassen und Evaluationsmethodologie für deterministische Zufallszahlengeneratoren*, Version 2.0, 19.09.2011, https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Zertifizierung/Interpretationen/ais20_pdf.pdf
- [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 X9.62:2005 *Public Key Cryptography for the Financial Services Industry: The Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA)*, 2005. (ersetzt ANSI X9.62-1998)
- [11] S. Vaudenay: *Hidden collisions in DSS*, Crypto'96, LNCS 1109, S. 83-88, 1996
- [12] A.K. Lenstra, E.R. Verheul: *Selecting Cryptographic Key Sizes*, J. Cryptology 39, 2001
- [13] J. S. Coron, D. Naccache, J. Stern: *On the Security of RSA padding*. Crypto 99, LNCS 1666, 1999
- [14] PKCS #1 v2.1: *RSA Cryptographic Standard*, 14.6.2002
- [15] DIN V66291: *Spezifikation der Schnittstelle zu Chipkarten mit Digitaler Signatur-Anwendung/Funktion nach SigG und SigV*, Annex A, 2.1.1, 2002
- [16] ANSI X9.31:1998 *Digital signatures using reversible public key cryptography for the financial services industry (rDSA)*, 1998
- [17] AIS 31: *Funktionalitätsklassen und Evaluationsmethodologie für physikalische Zufallszahlengeneratoren*, Version 2.0, 19.09.2011, https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Zertifizierung/Interpretationen/ais31_pdf.pdf
- [18] D. Boneh, G. Durfee: *Cryptanalysis of RSA with private key d less than $N^{0.292}$* . Eurocrypt '99, LNCS 1592, 1999
- [19] ISO/IEC 9796-2:2010 *Information technology – Security techniques – Digital Signature schemes giving message recovery – Part 2: Integer Factorization based mechanisms*, 2010
- [20] ECC Brainpool (M. Lochter Hrsg.): *ECC Brainpool Standard Curves and Curve Generation*, v. 1.0 (19.10.05), <http://www.ecc-brainpool.org/download/BP-Kurven-aktuell.pdf>; Kurvenparameter als Binärdateien unter <http://www.ecc-brainpool.org/ecc-standard.htm>
- [21] ISO/IEC 14888-2:2008 *Information technology – Security techniques – Digital signatures with appendix – Part 2: Integer factorization based mechanisms*, 2008 (ersetzt entsprechende Inhalte von ISO/IEC-14888-3-1998)

- [22] IETF: RFC 4998, *Evidence Record Syntax (ERS) Standards Track*, August 2007, <http://www.ietf.org/rfc/rfc4998.txt>
- [23] IETF: RFC 5639, *Elliptic Curve Cryptography (ECC) Brainpool Standard Curves and Curve Generation*, March 2010, <http://www.ietf.org/rfc/rfc5639.txt>
- [24] Gesetz über Rahmenbedingungen für elektronische Signaturen (Signaturgesetz – SigG), Signaturgesetz vom 16. Mai 2001 (BGBl. I S. 876), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 17. Juli 2009 (BGBl. I S. 2091) geändert worden ist. Siehe auch <http://www.nrca-ds.de>
- [25] Verordnung zur elektronischen Signatur (Signaturverordnung – SigV), Signaturverordnung vom 16. November 2001 (BGBl. I S. 3074), die zuletzt durch die Verordnung vom 15. November 2010 (BGBl. I S. 1542) geändert worden ist. Siehe auch <http://www.nrca-ds.de>
- [26] J. W. Bos, M. E. Kaihara, T. Kleinjung, A. K. Lenstra, P.L. Montgomery: *On the Security of 1024-bit RSA and 160-bit Elliptic Curve Cryptography* (version 2.1, 01.09.2009), <http://eprint.iacr.org/2009/389>
- [27] T. Finke, M. Gebhardt, W. Schindler: *A New Side-Channel Attack on RSA Prime Generation*. CHES 2009, LNCS 5747, 2009
- [28] W. Killmann, T. Lange, M. Lochter, W. Thumser, G. Wicke: *Minimal Requirements for Evaluating Side-Channel-Attack Resistance of Elliptic Curve Implementations*. Leitfaden, https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Zertifierung/Interpretation/ECCGuide.pdf?__blob=publicationFile
- [29] AIS 46: *Informationen zur Evaluierung von kryptographischen Algorithmen und ergänzende Hinweise für die Evaluierung von Zufallszahlengeneratoren*. Version 1 (22.10.2010), https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Zertifizierung/Interpretationen/AIS_46_1_pdf.pdf
- [30] W. Schindler: *Functionality Classes and Evaluation Methodology for Deterministic Random Number Generators*. Version 2.0, 02.12.1999, ehemalige mathematisch-technische Anlage zur AIS20, https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Zertifierung/Interpretation/AIS20_Functionality_Classes_Evaluation_Methodology_DRNG.pdf
- [31] W. Killmann, W. Schindler: *A proposal for: Functionality classes and evaluation methodology for true (physical) random number generators*. Version 3.1, 25.09.2001, ehemalige mathematisch-technische Anlage zur AIS 31, https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Zertifierung/Interpretation/AIS31_Functionality_classes_evaluation_methodology_for_true_RNG.pdf
- [32] W. Killmann, W. Schindler: *A proposal for: Functionality classes for random number generators*. Version 2.0, 18.09.2011, mathematisch-technische Anlage zur AIS 20 und AIS 31, https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Zertifierung/Interpretation/AIS20_Functionality_classes_for_random_number_generators.pdf und <https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Zertifierung/Interpretation/AIS>

[S31 Functionality classes for random number generators.pdf](#)

- [33] A. Roßnagel (Hrsg.): *Recht der Multimedia-Dienste*, Kommentar zum Informations- und Kommunikationsdienste-Gesetz und Mediendienste-Staatsvertrag, Beck Verlag, München 1999
- [34] BSI Technische Richtlinie 03125: *TR-ESOR – Beweiswerterhaltung kryptographisch signierter Dokumente*, Version 1.1, 18.02.2011,
https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/DE/BSI/Publicationen/TechnischeRichtlinien/TR03125/BSI_TR_03125_V1.1.pdf
- [35] A. K. Lenstra: *Key Lengths*, in: H. Bigdoli (Hrsg.): *Handbook of Information Security*, John Wiley & Sons, 2006
- [36] A. Joux: *Multicollisions in Iterated Hash Functions. Application to Cascaded Constructions*, Crypto 2004, LNCS 3152, S. 306-316
- [37] BSI, Technical Guideline TR 03111: *Elliptic Curve Cryptography*, Version 2.0, 28.6.2012,
https://www.bsi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/BSI/Publications/TechGuidelines/TR03111/BSI-TR-03111_pdf.pdf

Mainz, den 18.2.2013

IS 15

Bundesnetzagentur
für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen
Im Auftrag
Schwemmer