(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro

(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
29. August 2002 (29.08.2002)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 02/067108 A2

(51) Internationale Patentklassifikation[7]: G06F 7/72

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP02/00719

(22) Internationales Anmeldedatum:
24. Januar 2002 (24.01.2002)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
101 07 376.3 16. Februar 2001 (16.02.2001) DE

(71) Anmelder *(für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme von US)*: **INFINEON TECHNOLOGIES AG** [DE/DE]; St.-Martin-Str. 53, 81669 München (DE).

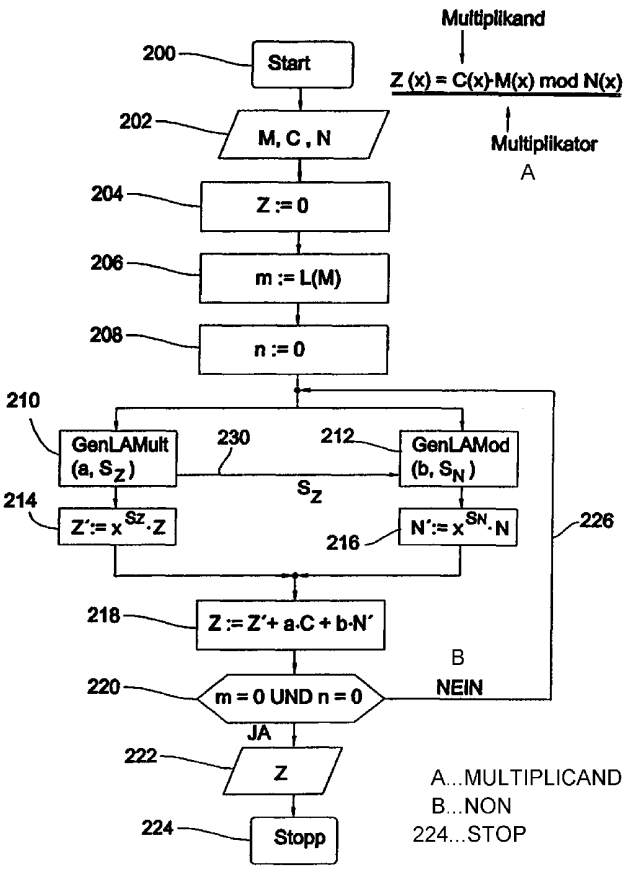
(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder *(nur für US)*: **ELBE, Astrid** [DE/DE]; Salzmesserstr. 41, 81829 Muenchen (DE). **SEDLAK, Holger** [DE/DE]; Neumuenster 10a, 85658 Egmating (DE). **JANSSEN, Norbert** [DE/DE]; Innere-Wiener-Str. 13a, 81667 Muenchen (DE). **SEIFERT, Jean-Pierre** [DE/DE]; Harsdoerfer Str. 1, 81669 Muenchen (DE).

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) **Title:** METHOD AND DEVICE FOR CONDUCTING MODULAR MULTIPLICATION AND ARITHMETIC-LOGIC UNIT FOR CONDUCTING MODULAR MULTIPLICATION

(54) **Bezeichnung:** VERFAHREN UND VORRICHTUNG ZUM MODULAREN MULTIPLIZIEREN UND RECHENWERK ZUM MODULAREN MULTIPLIZIEREN



(57) **Abstract:** According to a method for conducting modular multiplication of a multiplicand (C) with a multiplier (M) while using a module (N), whereby the multiplicand, the multiplier and the module are polynomials of a variable, a multiplication forecast method (210) is executed in order to obtain a multiplication shift value (s_Z). An intermediate result polynomial (Z) is shifted (214) leftward by the number of places of the multiplication shift value (s_Z) in order to obtain a shifted intermediate result polynomial (Z'). In addition, a reduction forecast method (212) is executed in order to obtain a reduction shift value (s_N), whereby the reduction shift value is equal to the difference of the degree of the shifted intermediate result polynomial (Z') and of the degree of the module polynomial (N). The module polynomial is shifted by a number of places equal to the reduction shift value (216) in order to obtain a shifted module polynomial. In a three-operand addition (218), the shifted intermediate result polynomial (Z') and the multiplicand (C) are added, and the shifted module polynomial (N') is subtracted in order to obtain an updated intermediate result polynomial (Z). By iteratively executing (226) the above-mentioned steps, the modular multiplication is gradually carried out until all the powers of the multiplier polynomial are processed. A transfer-interrupt function makes it possible to carry out both a Z/NZ arithmetic as well as a GF(2^n) arithmetic on a single long number arithmetic-logic unit.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 02/067108 A2

(74) **Anwälte:** **SCHOPPE, Fritz** usw.; Schoppe, Zimmermann, Stöckeler & Zinkler, Postfach 71 08 67, 81458 München (DE).

(81) **Bestimmungsstaaten** *(national)*: AE, AG, AL, AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NO, NZ, OM, PH, PL, PT, RO, RU, SD, SE, SG, SI, SK, SL, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

(84) **Bestimmungsstaaten** *(regional)*: ARIPO-Patent (GH, GM, KE, LS, MW, MZ, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches Patent (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches Patent (AT, BE, CH, CY, DE, DK, ES, FI, FR, GB, GR, IE, IT, LU, MC, NL, PT, SE, TR), OAPI-Patent (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Veröffentlicht:

— *ohne internationalen Recherchenbericht und erneut zu veröffentlichen nach Erhalt des Berichts*

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(57) Zusammenfassung: Verfahren und Vorrichtung zum modularen Multiplizieren und Rechenwerk zum modularen Multiplizieren Bei einem Verfahren zum modularen Multiplizieren eines Multi-plikanden (C) mit einem Multiplikator (M) unter Verwendung eines Moduls (N), wobei der Multiplikand, der Multiplikator und der Modul Polynome einer Variablen sind, wird ein Multi-plikations-Vorausschau-Verfahren (210), um einen Multiplika-tions-Verschiebungswert (sZ) zu erhalten, ausgeführt. Ein Zwischenergebnis-Polynom (Z) wird um die Anzahl von Stellen des Multiplikations-Verschiebungs-Werts (sZ) nach links ver-schoben (214), um ein verschobenes Zwischenergebnis-Polynom (Z') zu erhalten. Darüber hinaus wird ein Reduktions-Vorausschau-Verfahren (212), um einen Reduktions-Verschiebungswert (sN) zu erhalten, ausgeführt, wobei der Re-duktions-Verschiebungswert gleich der Differenz des Grads des verschobenen Zwischenergebnis-Polynoms (Z') und des Grads des Modul-Polynoms (N) ist. Hierauf wird das Modul-Polynom um ei-ne Anzahl von Stellen gleich dem Reduktions-Verschiebungswert verschoben (216), um ein verschobenes Modul-Polynom zu erhal-ten. In einer Drei-Operanden-Addition (218) werden das ver-schobene Zwischenergebnis-Polynom (Z') und der Multiplikand (C) summiert, und das verschobene Modul-Polynom (N') wird subtrahiert, um ein aktualisiertes Zwischenergebnis-Polynom (Z) zu erhalten. Durch iteratives Ausführen (226) der vorste-henden Schritte wird die modulare Multiplikation nach und nach abgearbeitet, bis sämtliche Potenzen des Multiplikator-Polynoms verarbeitet sind. Durch eine Übertrag-Abschalt-Funktion ist es möglich, sowohl eine Z/NZ-Arithmetik als auch eine GF(2n)-Arithmetik auf einem einzigen Langzahl-Rechenwerk auszuführen.

Beschreibung

Verfahren und Vorrichtung zum modularen Multiplizieren und Rechenwerk zum modularen Multiplizieren

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf Verfahren und Vorrichtungen zum Durchführen einer modularen Multiplikation und z. B. auf die modulare Multiplikation für elliptische Kurven über $GF(2^n)$.

Die Kryptographie ist eine der wesentlichen Anwendungen für die modulare Arithmetik. Abhängig von der Gestalt des Moduls N werden grundsätzlich zwei Kryptographiemethoden unterschieden. Ist der Modul eine Ganzzahl, so wird von einer **Z**/N**Z**-Arithmetik gesprochen. Der Parameter N steht für eine Primzahl oder für zusammengesetzte Primzahlen. Der Parameter **Z** steht für ganze Zahlen. Ein Beispiel für den Fall, bei dem der Modul aus zwei Primzahlen zusammengesetzt ist, ist die RSA-Gleichung:

$$C = M^E \bmod(N).$$

Hierbei ist, wie es bekannt ist, C eine verschlüsselte Nachricht, M ist eine nicht-verschlüsselte Nachricht, E ist der öffentliche Schlüssel, und N ist der Modul.

Im Gegensatz dazu ist die $GF(2^n)$-Arithmetik dadurch gekennzeichnet, daß der Modul N(x) ein Polynom einer Variablen x ist. Das Polynom umfaßt eine Summe von einzelnen Potenzen von x, wobei jeder Potenz von x ein Koeffizient zugeordnet ist. Der Exponent der höchsten Potenz von x wird als Grad des Polynoms bezeichnet. Wenn die Koeffizienten aus dem Körper GF(2) sind, so wir d von einem $GF(2^n)$-Modul bzw. allgemeiner von einer $GF(2^n)$-Arithmetik gesprochen. Die $GF(2^n)$-Arithmetik wird z. B. in der Elliptische-Kurven-Kryptographie verwendet.

Ein Polynom $f(x) \in GF(2)[x]$ des Grads n-1 wird durch die n Koeffizienten $a_{n-1}, \ldots, a_0$ gegeben, wobei die a_i aus der Menge GF(2) sein müssen, und wobei a_{n-1} per Definition gleich 1 ist:

$$f(x) = 1 * x^{n-1} + a_{n-2} * x^{n-2} + \ldots + a_1 * x^1 + a_0 * x^0$$

Der Körper $GF(2^n)$ wird durch ein irreduzibles Polynom vom Grad n und Polynome aus $GF(2^n)$ des Grads kleiner oder gleich n-1 gegeben.

Die Addition in $GF(2^n)$ von zwei Elementen, d. h. Polynomen, ist gegeben durch die XOR-Verknüpfung ihrer Koeffizientenvektoren der Länge n.

Die Multiplikation in $GF(2^n)$ von zwei Elementen, d. h. Polynomen, wird durch Multiplizieren der Polynome über $GF(2^n)$ und das anschließende Reduzieren des erhaltenen Produkts modulo dem irreduziblen Polynom N(x) des Grads n erreicht, welches den entsprechenden Körper definiert.

Somit muß das Produktpolynom, also das Polynom, das sich aus der Multiplikation eines ersten Polynoms f(x) mit einem zweiten Polynom g(x) ergibt, einer Polynomdivision mit dem Modul-Polynom N(x) als Teiler unterzogen werden, um die modulare Operation durchzuführen. Das Ergebnis von f(x) * g(x) mod N(x) ist dann das Restpolynom, das sich aus der Polynomdivision ergibt.

Bevor auf verschiedene Arten und Weisen zum effizienten Ausführen der modularen Multiplikation sowohl über **Z**/N**Z** als auch über $GF(2^n)$ eingegangen wird, sei darauf hingewiesen, daß die modulare Exponentiation sowohl bei **Z**/N**Z** als auch bei $GF(2^n)$ mittels des bekannten Square-and-Multiply-Algorithmus in eine Multiplikation zerlegt werden kann. Es sei folgende Gleichung zu lösen:

$C(x) = (M(x))^E \bmod N(x)$.

Der Square-and-Multiply-Algorithmus basiert darauf, daß der Exponent E in eine Summe von Zweierpotenzen zerlegt wird:

$$E = \sum_i E[i] * 2^i$$

Das folgende Beispiel soll dies veranschaulichen. In binärer Darstellung soll gelten:

$E = 1011$.

Damit gilt folgender Zusammenhang:

$C(x) = M(x)^{(1*2^3+0*2^2+1*2^1+1*2^0)} \bmod N(x)$.

Damit gilt:

$C(x) = (M(x))^8 * (M(x))^0 * (M(x))^2 * (M(x))^0 \bmod N(x)$.

Die oben beschriebenen Gleichungen lauten entsprechend für die **Z**/N**Z**-Arithmetik, jedoch mit dem Unterschied, daß statt M(x) M zu schreiben ist, und statt N(x) N zu schreiben ist.

Eine bekannte, effiziente und oft verwendete Möglichkeit, um die modulare Multiplikation zu berechnen, ist in der Technik als Montgomery-Multiplikation bekannt und z. B. im „Handbook of Applied Cryptography", Menezes, van Oorschot, Vanstone, CRC Press, Seiten 600-603, beschrieben. Die Montgomery-Reduktion ist eine Technik, die eine effiziente Implementation der modularen Multiplikation erlaubt, ohne daß der klassische modulare Reduktionsschritt explizit ausgeführt wird. Allgemein gesagt wird bei der Montogomery-Reduktion die Divisionsoperation durch einfache Verschiebungsoperationen ausgedrückt.

Mittlerweile ist auch eine Erweiterung der Montgomery-Multiplikationsoperation auf den endlichen Körper $GF(2^n)$ bekannt. Diese Erweiterung ist in „Montgomery Multiplication in $GF(2^k)$", Koc, Azar, Designs, Codes and Cryptography, Bd. 14, 1998, S. 57 - 69, beschrieben. Diese Erweiterung ist ferner in „A Scalable and Unified Multiplier Architecture for Finite Fields **Z**/N**Z** and $GF(2^n)$", Erkay Savas u. a., Cryptographic Hardware and Embedded Systems (CHESS 2000), S. 281 - 289, Springer Lecture Notes, beschrieben.

Nachteilig an der Montgomery-Multiplikation über **Z**/N**Z** oder $GF(2^n)$ ist die Tatsache, daß zwar die hardwaremäßig schlecht implementierbare Divisionsoperation zur modularen Reduktion durch Verschiebungsoperationen umgangen wird, aber keine Look-Ahead-Verfahren oder Vorausschau-Verfahren eingesetzt werden, um die modulare Multiplikationsoperation hardwaremäßig zu beschleunigen.

Die DE 3631992 C2 offenbart ein Verfahren, bei dem die modulare Multiplikation über **Z**/N**Z** unter Verwendung eines Multiplikations-Vorausschau-Verfahrens und unter Verwendung eines Reduktions-Vorausschau-Verfahrens beschleunigt werden kann. Das in der DE 3631992 C2 beschriebene Verfahren wird auch als ZDN-Verfahren bezeichnet und anhand von Fig. 9 näher beschrieben. Nach einem Startschritt 900 des Algorithmus werden die globalen Variablen M, C und N initialisiert. Ziel ist es, folgende modulare Multiplikation zu berechnen:

$$Z = M * C \bmod N.$$

M wird als der Multiplikator bezeichnet, während C als der Multiplikand bezeichnet wird. Z ist das Ergebnis der modularen Multiplikation, während N der Modul ist.

Hierauf werden verschiedene lokale Variablen initialisiert, auf die zunächst nicht näher eingegangen werden braucht. An-

schließend werden zwei Vorausschau-Verfahren angewandt. Im Multiplikations-Vorausschau-Verfahren GEN_MULT_LA wird unter Verwendung verschiedener Look-Ahead-Regeln ein Multiplikations-Verschiebungswert s_z sowie ein Multiplikations-Vorausschau-Parameter a berechnet (910). Hierauf wird der gegenwärtige Inhalt des Z-Registers einer Links-Verschiebungs-Operation um s_z-Stellen unterzogen (920).

Im wesentlichen parallel dazu wird ein Reduktions-Vorausschau-Verfahren GEN_Mod_LA (930) durchgeführt, um einen Reduktionsverschiebungswert s_N und einen Reduktions-Parameter b zu berechnen. In einem Schritt 940 wird dann der gegenwärtige Inhalt des Modul-Registers, also N, um s_N Stellen verschoben, um einen verschobenen Modulwert N´ zu erzeugen. Die zentrale Drei-Operanden-Operation des ZDN-Verfahrens findet in einem Schritt 950 statt. Hierbei wird das Zwischenergebnis Z´ nach dem Schritt 920 zu dem Multiplikanden C, der mit dem Multiplikations-Vorausschau-Parameter a multipliziert ist, und zu dem verschobenen Modul N´, der mit dem Reduktions-Vorausschau-Parameter b multipliziert ist, addiert. Je nach aktueller Situation können die Vorausschau-Parameter a und b einen Wert von +1, 0 oder -1 haben.

Ein Fall besteht darin, daß der Multiplikations-Vorausschau-Parameter a +1 beträgt, und daß der Reduktion-Vorausschau-Parameter b -1 beträgt, so daß zu einem verschobenen Zwischenergebnis Z´ der Multiplikand C hinzu addiert wird, und der verschobene Modul N´ davon subtrahiert wird. a wird u. a. einen Wert gleich 0 haben, wenn das Multiplikations-Vorausschau-Verfahren mehr als eine voreingestellte Anzahl von einzelnen Links-Verschiebungen zulassen würde, also wenn s_z größer als der maximal zulässige Wert von s_z ist, der auch als k bezeichnet wird. Für den Fall, daß a gleich 0 ist, und daß Z´ aufgrund der vorausgehenden modularen Reduktion, also der vorausgehenden Subtraktion des verschobenen Moduls noch ziemlich klein ist, und insbesondere kleiner als der versch-

bene Modul N´ ist, muß keine Reduktion stattfinden, so daß der Parameter b gleich 0 ist.

Die Schritte 910 bis 950 werden so lange durchgeführt, bis sämtliche Stellen des Multiplikanden abgearbeitet sind, also bis m gleich 0 ist, und bis auch ein Parameter n gleich 0 ist, welcher angibt, ob der verschobene Modul N´ noch größer als der ursprüngliche Modul N ist, oder ob trotz der Tatsache, daß bereits sämtliche Stellen des Multiplikanden abgearbeitet sind, noch weitere Reduktionsschritte durch Subtrahieren des Moduls von Z durchgeführt werden müssen.

Abschließend wird noch bestimmt, ob Z kleiner als 0 ist. Falls dies der Fall ist, muß, um eine abschließende Reduktion zu erreichen, der Modul N zu Z hinzuaddiert werden, damit schließlich ein positives Ergebnis Z der modularen Multiplikation erhalten wird. In einem Schritt 960 ist die modulare Multiplikation mittels des ZDN-Verfahrens beendet.

Der Multiplikations-Verschiebungswert s_Z sowie der Multiplikations-Parameter a, welche im Schritt 910 durch den Multiplikations-Vorausschau-Algorithmus berechnet werden, ergeben sich durch die Topologie des Multiplikators sowie durch die eingesetzten Vorausschau-Regeln, die in der DE 3631992 C2 beschrieben sind.

Der Reduktions-Verschiebungswert s_N und der Reduktions-Parameter b werden, wie es ebenfalls in der DE 3631992 C2 beschrieben ist, durch Vergleich des gegenwärtigen Inhalts des Z-Registers mit einem Wert 2/3 mal N bestimmt. Aufgrund dieses Vergleiches trägt das ZDN-Verfahren seinen Namen (ZDN = Zwei Drittel N).

Das ZDN-Verfahren, wie es in Fig. 9 dargestellt ist, führt die modulare Multiplikation auf eine Drei-Operanden-Addition (Block 950 in Fig. 9) zurück, wobei zur Steigerung der Rechenzeiteffizienz das Multiplikations-Vorausschau-Verfahren

und damit einhergehend das Reduktions-Vorausschau-Verfahren eingesetzt werden. Im Vergleich zur Montgomery-Reduktion für **Z/NZ** kann daher ein Rechenzeitvorteil um einen Faktor in der Größenordnung von 3 erreicht werden.

Wie es bereits ausgeführt worden ist, arbeitet das in der DE 3631992 C2 beschriebene ZDN-Verfahren lediglich für die **Z/NZ**-Arithmetik. Dasselbe ist nicht für die $GF(2^n)$-Arithmetik geeignet. Es besteht daher derzeit kein Verfahren, bei dem für die $GF(2^n)$-Arithmetik rechenzeiteffiziente Look-Ahead-Verfahren eingesetzt werden können, um die modulare Multiplikation über $GF(2^n)$ zu beschleunigen.

Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, ein Konzept zum schnellen Durchführen einer modularen Multiplikation über $GF(2^n)$ zu schaffen.

Diese Aufgabe wird durch ein Verfahren zum modularen Multiplizieren gemäß Patentanspruch 1, durch eine Vorrichtung zum modularen Multiplizieren gemäß Patentanspruch 7 oder durch ein Rechenwerk gemäß Patentanspruch 11 gelöst.

Der vorliegenden Erfindung liegt die Erkenntnis zugrunde, daß eine Beschleunigung der modularen Multiplikation über $GF(2^n)$ dadurch erreicht werden kann, daß sowohl ein Multiplikations-Vorausschau-Verfahren als auch ein Reduktions-Vorausschau-Verfahren eingesetzt werden. Im Multiplikations-Vorausschau-Verfahren wird ein Multiplikations-Verschiebungswert berechnet. Im Reduktions-Vorausschau-Verfahren, das vorzugsweise parallel zum Multiplikations-Vorausschau-Verfahren abläuft, wird ein Reduktions-Verschiebungswert berechnet, wobei der Reduktions-Verschiebungswert gleich der Differenz des Grads eines um den Multiplikations-Verschiebungswert verschobenen Zwischenergebnis-Polynoms und des Grads des aktuellen Modul-Polynoms ist. Während das Zwischenergebnis-Polynom mit der Variable, die mit dem Multiplikations-Verschiebungswert potenziert ist, multipliziert wird, wird das Modul-Polynom mit

der Variable, die mit dem Reduktions-Verschiebungswert potenziert ist, multipliziert. Damit läßt sich auch für die $GF(2^n)$-Arithmetik eine Drei-Operanden-Addition formulieren, so daß ein neues Zwischenergebnis-Polynom berechnet werden kann, indem das um den Multiplikations-Verschiebungswert verschobene letzte Zwischenergebnis-Polynom mit dem Multiplikanden summiert wird, und indem dann davon das um den Reduktions-Verschiebungswert verschobene Modul-Polynom subtrahiert wird, um ein aktualisiertes Zwischenergebnis-Polynom zu erhalten. Anschließend werden sämtlich Schritte wiederholt, jedoch nun mit dem aktualisierten Zwischenergebnis-Polynom und dem in dem letzten Schritt verschobenen Modul-Polynom, um nacheinander sämtliche Partialprodukte aufzusummieren, d. h. bis alle Potenzen des Multiplikators abgearbeitet sind.

Die Drei-Operanden-Addition vereinfacht sich für den Fall der $GF(2^n)$-Arithmetik insbesondere dadurch, daß die Koeffizienten der Potenzen der Variablen x entweder den Wert „0" oder „1" haben können. Damit wird sowohl die Addition als auch die Subtraktion zu einer einfachen XOR-Verknüpfung, so daß für ein Rechenwerk, das lediglich für die $GF(2^n)$-Addition ausgeführt ist, als arithmetische Einheit nicht einmal mehr ein Addierer benötigt wird, sondern lediglich eine bitweise XOR-Verknüpfung der drei Operanden.

Im Falle eines dualen Rechenwerks, also eines Rechenwerks, das sowohl eine modulare Multiplikation in **Z/NZ** als auch eine modulare Multiplikation in $GF(2^n)$ ausführen soll, kann der bereits für das ZDN-Verfahren vorhandene Drei-Operanden-Addierer einfach dadurch für $GF(2^n)$-Operationen modifiziert werden, daß der Übertrag für jedes Bit des Addierers ausgeschaltet wird, bzw. nicht berücksichtigt wird.

Es sei darauf hingewiesen, daß das erfindungsgemäße Verfahren zum Berechnen der modularen Multiplikation in $GF(2^n)$ eine Seriell-Parallel-Architektur hat. Die Drei-Operanden-Addition findet vorzugsweise immer parallel statt, d. h. für sämtliche

Bits der Summanden, welche typischerweise eine Breite zwischen 150 und 1100 Bits haben, wobei dann in einer nächsten, seriellen, Iteration des erfindungsgemäßen Verfahrens ein neues Partialprodukt berechnet wird und in einer folgenden parallelen Drei-Operanden-Addition zu dem bereits bestehenden Zwischenergebnis hinzuaddiert wird.

Das erfindungsgemäße Konzept zum Berechnen einer modularen Multiplikation ist dahingehend vorteilhaft, daß es auch für $GF(2^n)$ eine maximale Beschleunigung um einen Faktor in der Größenordnung von zwei im Vergleich zur Montgomery-Multiplikation liefert.

Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Konzepts besteht darin, daß nunmehr ein effizientes Verfahren zum Berechnen der modularen Multiplikation in $GF(2^n)$ angegeben ist, so daß beispielsweise der ECDSA-Algorithmus (ECDSA = Elliptic Curve Digital Signature Algorithm) über $GF(2^n)$ berechnet werden kann. Dieser Algorithmus ist in „Public Key Cryptography for the Financial Services Industry: The Elliptic Curve D.S.A.", ANSI X9.62 - 1998 beschrieben.

Es sei darauf hingewiesen, daß die Elliptische-Kurven-Kryptographie im Vergleich zur Kryptographie, die auf modularer Arithmetik bezüglich einer Ganzzahl basiert, dahingehend bevorzugt wird, daß mit wesentlich kleineren Zahlen ähnliche Sicherheitsstandards erreicht werden. Während für das RSA-Verfahren über **Z/NZ** mit 1024 Bits breiten Zahlen gute Sicherheitsstandards erreicht werden, genügen hierfür bereits Polynome über GF(2), deren Grad im Bereich von 150 bis 300 Potenzen der Variablen x liegt.

Ein weiterer Vorteil der vorliegenden Erfindung besteht darin, daß das erfindungsgemäße Konzept zum Berechnen der modularen Multiplikation ohne weiteres in bereits bestehende Rechenwerke für das ZDN-Verfahren integriert werden kann, da das eigentlichen Langzahlrechenwerk, nämlich der Drei-

Operanden-Addierer, einfach dadurch auf $GF(2^n)$ angepaßt werden kann, daß der bitweise Übertrag deaktiviert wird. Obgleich sich die arithmetischen Einheiten für den Reduktions-Vorausschau-Algorithmus und für den Multiplikations-Vorausschau-Algorithmus für $GF(2^n)$ von den entsprechenden Vorrichtungen für **Z/NZ** unterscheiden, ist dies für das Gesamtverhalten des Rechenwerks nicht maßgeblich, da hier Additionen, Verschiebungen oder Subtraktionen mit kleinen Zahlen, welche vielleicht nur 8 oder 16 Bit breit sind, so daß die Chipfläche für diese arithmetischen Einheiten, welche auch als Steuereinheiten bezeichnet werden, im Vergleich zum Langzahl-Rechenwerk, also dem Drei-Operanden-Addierer, welcher durchaus über 2048 Bits breit sein kann (in dualer Ausführung für **Z/NZ** und $GF(2^n)$), nicht wesentlich ins Gewicht fallen.

Ein weiterer Vorteil des erfindungsgemäßen Konzepts für eine modulare Multiplikation in $GF(2^n)$ besteht darin, daß viele Operationen im Vergleich zum ZDN-Verfahren, welches lediglich für die **Z/NZ**-Arithmetik funktioniert, vereinfacht werden können. So muß bei der erfindungsgemäßen $GF(2^n)$-Modulo-Multiplikation kein Vergleich mit dem 2/3-fachen des Moduls mehr durchgeführt werden. Dieser Vergleich kann in $GF(2^n)$ einfach durch den Vergleich des Grads des Zwischenergebnis-Polynoms mit dem Grad des Modul-Polynoms ersetzt werden. Nachdem der Erwartungswert für den Multiplikations-Verschiebungswert und der Erwartungswert für den Reduktions-Verschiebungswert identisch sind, sind die beiden Vorausschau-Verfahren voneinander entkoppelt, so daß das Potential besteht, daß die beiden Vorausschau-Verfahren unabhängig voneinander arbeiten, was wiederum Rechenzeitvorteile mit sich bringt.

Bevorzugte Ausführungsbeispiele der vorliegenden Erfindung werden nachfolgend bezugnehmend auf die beiliegenden Zeichnungen detailliert erläutert. Es zeigen:

Fig. 1 ein Flußdiagramm zur Veranschaulichung der modularen Exponentiation in $GF(2^n)$;

Fig. 2 ein Flußdiagramm auf hoher Ebene des erfindungsgemäßen Verfahrens;

Fig. 3 ein Flußdiagramm des Multiplikations-Vorausschau-Verfahrens, um den Multiplikations-Verschiebungswert zu berechnen;

Fig. 4 ein Flußdiagramm des Reduktions-Vorausschau-Verfahrens, um den Reduktions-Verschiebungswert zu berechnen;

Fig. 5 einen Ausschnitt eines Drei-Operanden-Addierwerks für die $GF(2^n)$-Arithmetik oder die **Z**/N**Z**-Arithmetik.

Fig. 6 eine detaillierte Darstellung der Carry-Abschalt-Funktion;

Fig. 7 ein Blockschaltbild eines **Z**/N**Z**-$GF(2^n)$-Rechenwerks;

Fig. 8a bis 8c eine schematische Darstellung zur Veranschaulichung der Berechnung des Reduktions-Verschiebungswerts;

Fig. 9 ein Übersichtdiagramm des ZDN-Verfahrens zum Durchführen einer modularen Multiplikation in **Z**/N**Z**.

Fig. 1 zeigt ein allgemeines Flußdiagramm zum Zerlegen einer modularen Exponentiation

$$C(x) = (M(x))^E \bmod N(x)$$

in eine Serie von Multiplikationen. M(x) und N(x) sind Polynome der Variablen x. E ist ein Exponent in binärer Darstellung, der eine Bitlänge L(E) aufweist.

Der Algorithmus besteht im wesentlichen darin, daß untersucht wird, ob ein Bit des Exponenten E, also E(e) gleich 1 ist. Falls dies der Fall ist, wird der gegenwärtige Inhalt des Ergebnis-Registers mit M(x) multipliziert, wobei unmittelbar anschließend die Modulo-Reduktion mit dem Modul-Polynom N(x) durchgeführt wird. Ist dagegen ein Bit des Exponenten gleich 0, so wird keine Multiplikation mit M(x) durchgeführt. In beiden Fällen wird der gegenwärtige Inhalt des Registers C(x) mit sich selbst multipliziert, also quadriert, woraufhin die Modulo-Reduktion stattfindet. Hierauf wird der Index für die Stelle des Exponenten, also e, um 1 inkrementiert, woraufhin die Schleife wieder durchlaufen wird. Dies wird so lange durchgeführt, bis alle Stellen des Exponenten E abgearbeitet sind, also bis e gleich L(E) ist. Dann ist der Algorithmus beendet und in dem Register für C(x) steht das Ergebnis der modularen Exponentiation. Die zentrale Operation der modularen Exponentiation ist somit die modulare Multiplikation eines Multiplikanden C(x) mit einem Multiplikator M(x).

Fig. 2 zeigt ein Blockdiagramm auf hoher Ebene des erfindungsgemäßen Verfahrens zum modularen Multiplizieren eines Multiplikanden mit einem Multiplikator. Das Verfahren beginnt mit einem Start-Block 200. In einem Block 202 werden die globalen Variablen M, C und N initialisiert, welche Polynome der Variablen x sind. In einem Block 204 wird dann das Zwischenergebnis-Polynom Z auf 0 initialisiert. In einem Block 206 wird die Laufvariable m auf L(M) initialisiert. L(M) gibt die Länge in Bit des Multiplikators M an. L(M) entspricht damit dem Grad des Multiplikator-Polynoms. In einem Block 208 wird ferner eine Laufvariable n auf 0 initialisiert. Auf die Bedeutung der Laufvariablen n wird später eingegangen. Anschließend werden vorzugsweise parallel ein Multiplikations-Vorausschau-Verfahren 210 und ein Reduktions-Vorausschau-Verfahren 212 ausgeführt. Das Multiplikations-Vorausschau-Verfahren dient dazu, einen Multiplikations-Verschiebungswert

s_Z sowie vorzugsweise einen Multiplikations-Vorausschau-Parameter a zu berechnen.

Das Reduktions-Vorausschau-Verfahren dient dazu, einen Reduktions-Verschiebungswert s_N und vorzugsweise auch einen Reduktions-Vorausschau-Parameter b zu berechnen.

In einem Block 214 wird ein verschobenes Zwischenergebnis-Polynom Z´ berechnet, indem das aktuelle Zwischenergebnis-Polynom Z mit der Variablen x, die mit dem Multiplikations-Verschiebungs-Wert s_Z potenziert ist, multipliziert wird.

Vorzugsweise parallel dazu wird in einem Block 216 ein verschobenes Modul-Polynom N´ berechnet, indem das aktuelle Modul-Polynom N mit der Variablen x, die mit dem Reduktions-Verschiebungs-Wert s_N potenziert ist, multipliziert wird.

In einem Block 218 wird dann die sogenannten Drei-Operanden-Addition ausgeführt, die die zentrale Operation des erfindungsgemäßen Multiplikationsverfahrens ist. In dem Block 218 wird ein aktualisiertes Zwischenergebnis-Polynom Z berechnet, welches durch Addition des Zwischenergebnis-Polynoms Z´ mit dem Multiplikanden C multipliziert mit dem Multiplikations-Vorausschau-Parameter a und dem verschobenen Modul-Polynom N´ multipliziert mit dem Reduktions-Vorausschau-Parameter b erhalten wird.

In einem Block 220 wird überprüft, ob die Laufvariable m gleich 0 ist, und ob gleichzeitig die Laufvariable n gleich 0 ist. Wenn die Laufvariable m gleich 0 ist, bedeutet dies, daß alle Bits des Multiplikators M(x) abgearbeitet sind. Wenn die Laufvariable n gleich 0 ist, bedeutet dies, daß das verschobene Modul-Polynom N´ wieder dem ursprünglichen Polynom N aus dem Block 202 entspricht.

Sind diese beiden Voraussetzungen erfüllt, wird der Block 220 also mit JA beantwortet, so kann das Ergebnis der modularen

Multiplikation, also Z(x), in einem Block 222 ausgegeben werden. Das Verfahren zur modularen Multiplikation ist dann mit einem Block 224 beendet.

Wird der Block 220 dagegen mit „NEIN" beantwortet, so bedeutet dies, daß entweder noch Bits des Multiplikators vorhanden sind, die nicht abgearbeitet worden sind, oder daß das Modul-polynom N´, das in dem Register für das Modul-Polynom gehalten wird, noch größer als das ursprüngliche in dem Block 202 definierte Modul-Polynom ist. In anderen Worten bedeutet dies, daß der Grad des aktuellen in dem Register für das Modul-Polynom gehaltenen Polynoms größer ist als der Grad des ursprünglichen Modul-Polynoms N, das im Block 202 definiert worden ist. Wenn dies der Fall ist, wird wieder zurückgesprungen, wie es durch eine Rückkopplung 226 in Fig. 2 gezeigt ist, um erneut sowohl das Multiplikations-Vorausschau-Verfahren als auch das Reduktions-Vorausschau-Verfahren auszuführen. Im Gegensatz zum ersten Schritt, bei dem das Z-Register aufgrund der Initialisierung im Block 204 auf 0 gesetzt war, steht nun im Z-Register das Ergebnis der Drei-Operanden-Operation 218 des vorausgehenden Schritts.

Genauso steht in dem Modul-Register N nun nicht mehr das ursprüngliche im Block 202 definierte Modul N, sondern das um den Reduktions-Verschiebungswert s_N verschobene Modul-Polynom N´. Der ursprüngliche Modul N(x), der in Block 202 definiert worden ist, wird somit nur während des ersten Iterationsschritts in dem N-Register stehen, wobei während der Iteration (Iterationsschleife 226) in dem Modul-Register immer das verschobene Modul-Polynom steht, also ein Modul-Polynom, das mit der Variablen x, die mit einem Reduktions-Verschiebungswert s_N potenziert ist, multipliziert worden ist.

Im nachfolgenden wird auf Fig. 3 eingegangen, welche eine detailliertere Darstellung des Multiplikations-Vorausschau-Verfahrens, also des Blocks 210 von Fig. 2, darstellt. Das

Multiplikations-Vorausschau-Verfahren startet in einem Block 300. Es erhält als globale Variablen den Parameter m aus Fig. 2, eine weitere Laufvariable cur_k, auf die später noch eingegangen wird, sowie den Multiplikator M. Dies ist durch einen Block 302 in Fig. 3 dargestellt. In einem Block 304 wird dann der Multiplikations-Verschiebungswert s_z auf 0 initialisiert. Darüber hinaus wird der Multiplikations-Vorausschau-Parameter a, auf den später noch eingegangen wird, auf einen Wert gleich 1 initialisiert (Block 306).

Hierauf wird in einem Block 308 untersucht, ob das gegenwärtig zur Debatte stehende Bit, bzw. der Koeffizient der aktuell verarbeiteten Potenz von x gleich 0 ist oder nicht. Wird in dem Block 308 bestimmt, daß das aktuell verarbeitete Bit des Multiplikators ungleich 0 ist, also wird die Entscheidung des Blocks 308 mit JA beantwortet, so wird die Laufvariable m in einem Block 310 um 1 inkrementiert. Darüber hinaus wird der Multiplikations-Verschiebungswert s_z ebenfalls in einem Block 312 um 1 inkrementiert. In einem Block 314 werden dann die Ergebnisparameter des Multiplikations-Vorausschau-Verfahrens, also der Multiplikations-Vorausschau-Parameter a und der Multiplikations-Verschiebungswert s_z, ausgegeben.

Wird die Frage im Block 308 mit NEIN beantwortet, so wird zu einem weiteren Entscheidungsblock 316 gesprungen. Hier wird bestimmt, ob die Laufvariable m noch kleiner als die Länge, also der Grad, des Multiplikators M ist. Darüber hinaus wird untersucht, ob der gegenwärtige Multiplikations-Verschiebungswert s_z kleiner bzw. ungleich dem Parameter cur_k ist. Werden beide Fragen mit JA beantwortet, so wird zu einem Block 318 gesprungen, um den Parameter m um 1 zu inkrementieren. Darüber hinaus wird in einem Block 320 auch der Multiplikations-Verschiebungs-Wert s_z um 1 inkrementiert. Daran anschließend wird das nächste Bit des Multiplikators M untersucht, was in Fig. 3 durch einen Rückkopplungszweig 322 dargestellt ist.

Wird dagegen in dem Block 316 bestimmt, daß eine der beiden Fragen im Block 316 mit NEIN beantwortet wird, so wird zu einem Block 324 gesprungen, in dem der Multiplikations-Vorausschau-Parameter a auf 0 gesetzt wird. Somit ist zu sehen, daß der Multiplikations-Vorausschau-Parameter a, der in dem Block 314 ausgegeben wird, entweder 0 oder 1 sein kann. Das Multiplikations-Vorausschau-Verfahren ist dann in einem Block 326 beendet.

Im nachfolgenden wird auf die Funktionsweise des Multiplikations-Vorausschau-Parameters eingegangen. Bei dem Multiplikations-Vorausschau-Verfahren, das erfindungsgemäß eingesetzt wird, handelt es sich um einen Look-Ahead-Algorithmus für die $GF(2^n)$-Multiplikation mit variablen Verschiebungen über Nullen, wobei die Anzahl der variablen Verschiebungen nicht beliebig groß werden kann, sondern höchstens gleich dem Wert CUR_k sein kann. „CUR_k" steht für „Current k", bedeutet also „aktueller Wert des Parameters k".

Im nachfolgenden wird beispielhaft ein Multiplikatorpolynom mit den Koeffizienten „10001" untersucht. Zunächst wird das höchstwertige Bit desselben untersucht. Dieses Bit hat den Wert „1", so daß der Block 308 mit JA beantwortet wird, was dazu führt, daß der Parameter m um 1 inkrementiert wird, und daß auch der Multiplikations-Verschiebungswert s_z ebenfalls um 1 erhöht wird. Der Multiplikations-Vorausschau-Algorithmus ist damit bereits beendet, da das untersuchte Bit des Multiplikators den Wert „1" hatte, derart, daß in der Drei-Operanden-Addition der Multiplikand C hinzuaddiert werden muß.

In einem nächsten Durchgang des Multiplikations-Vorausschau-Algorithmus wird nunmehr das zweite Bit untersucht. Dieses Bit hat einen Wert von 0, so daß der Block 308 mit NEIN beantwortet wird. Nachdem das untersuchte Bit gerade das zweite Bit des Multiplikands ist, und nachdem der Multiplikations-Verschiebungswert s_z aufgrund der Initialisierung im Block

304 nunmehr 0 ist, wird der Block 316 mit JA beantwortet, so daß die Laufvariable m um 1 inkrementiert wird (318), und ebenfalls der Multiplikations-Verschiebungswert um 1 inkrementiert wird (320). Dann wird wieder über den Zweig 322 in den Block 308 eingetreten. Da das nächste Bit ebenfalls den Wert „0" hat, wird dieser Block erneut mit NEIN beantwortet, und der Block 316 ist wieder aktuell. m ist immer noch kleiner als L(M), so daß diese Frage positiv beantwortet wird. s_z hat gerade den Wert 1. Wenn angenommen wird, daß CUR_k auf dem Wert 2 steht, so wird auch diese Frage positiv beantwortet, so daß erneut in den Blöcken 318 und 320 Inkrementierungen von m und s_z stattfinden. s_z hat nunmehr, nach dem Durchlauf des Blocks 320, den Wert 2. Nun wird über den Zweig 320 erneut zum Block 308 gesprungen, um festzustellen, ob das aktuelle nächste Bit eine 1 oder eine 0 ist. Erneut wird für das vorliegende Beispiel der Block 308 mit NEIN beantwortet, da hier das dritte Bit in der Folge von Nullen untersucht wird. Der Block 316 wird nunmehr jedoch mit NEIN beantwortet, da s_z 2 beträgt und die Variable CUR_k ebenfalls auf 2 steht. Dies bedeutet, daß das Multiplikations-Vorausschau-Verfahren nunmehr eigentlich abgebrochen wird, obwohl auch die dritte 0 dazu verwendet werden könnte, um eine erneute Verschiebung zu bewirken. s_z muß jedoch nach oben hin begrenzt werden, da sonst ein unendlich langes Z-Register vorgesehen werden müßte, um das verschobene Zwischenergebnis-Polynom Z', das im Schritt 214 von Fig. 2 berechnet wird, speichern zu können. CUR_k wird somit abhängig von der aktuellen Bewegung des Z-Registers eingestellt, um zwar einen möglichst großen Verschiebungswert s_z zuzulassen, welcher ja zum Geschwindigkeitsgewinn beiträgt, um jedoch gleichzeitig mit einer begrenzten Registerlänge für das verschobene Zwischenergebnis-Polynom Z' auszukommen. Die Drei-Operanden-Operation im Block 218 von Fig. 2 degeneriert somit zu einer Zwei-Operanden-Operation, da der Parameter a in dem Block 324 von Fig. 3 auf 0 gesetzt worden ist.

Wie es aus Fig. 3 zu sehen ist, fand in dem Zweig des Blocks 324 keine weitere Inkrementierung von m statt, so daß bei einem erneuten Durchlauf des Multiplikations-Vorausschau-Algorithmus nunmehr das dritte 0-Bit in der Folge im Block 308 untersucht wird. Da dieses Bit den Wert 0 hat, wird Block 308 wieder mit NEIN beantwortet, so daß der Multiplikations-Verschiebungswert s_Z um 1 inkrementiert wird, und daß auch die Laufvariable im Block 318 inkrementiert wird. Nunmehr wird das letzte Bit des Multiplikators, also die „1" untersucht. Da dieses Bit ungleich 0 ist, wird Block 308 mit JA beantwortet, die Laufvariable wird ein letztes Mal inkrementiert, und der Multiplikations-Verschiebungswert s_Z wird ebenfalls noch einmal inkrementiert, bis der Multiplikations-Vorausschau-Algorithmus für diese Iteration beendet ist (Block 326). Nunmehr sind alle Bits des Multiplikanden untersucht, so daß die Iterationsschleife 226 von Fig. 2 beendet wird, da im Block 220 untersucht wird, ob m gleich 0 ist, was für das vorliegende Beispiel nunmehr zutrifft.

Im nachfolgenden wird auf Fig. 4 eingegangen, um das Reduktions-Vorausschau-Verfahren zu beschreiben, das in Fig. 2 mit dem Bezugszeichen 212 bezeichnet ist. In einem Block 400 wird das Reduktions-Vorausschau-Verfahren begonnen. In einem Block 402 werden verschiedene globale Variablen definiert, von denen insbesondere N und Z hervorzuheben sind. N ist der Registerwert für das Modul-Polynom des vorausgehenden Schrittes, während Z das aktualisierte Zwischenergebnis-Polynom ebenfalls des vorausgehenden Schritts ist. k ist der maximale Verschiebungswert für Z, CUR_k ist der gegenwärtige Verschiebungswert für Z und MAX stellt die Länge, d. h. die Anzahl von Bits, eines Overflow-Buffers dar, welcher dazu da ist, die nach links verschobenen Polynome N und Z zu speichern. Wenn Block 216 von Fig. 2 betrachtet wird, so ist zu sehen, daß, wenn ein beliebig großer Reduktions-Verschiebungswert s_N vorgesehen wird, ebenfalls wie im analogen Fall des Multiplikations-Vorausschau-Verfahrens ein beliebig großes Register für N vorgesehen werden müßte. Dies ist jedoch aus Platz- und Effizienzgründen nicht wünschenswert, so daß durch

Effizienzgründen nicht wünschenswert, so daß durch den Parameter MAX auch berücksichtigt wird, daß das Modul-Polynom ebenfalls nur um eine bestimmte Anzahl von Bits nach links, also nach oben, verschoben werden darf.

In einem Block 404 wird dann ein Parameter s_i, auf den nachfolgend eingegangen wird, auf 0 initialisiert. Hierauf wird in einem Block 406 festgestellt, ob der Parameter n, welcher die Anzahl von Bits von N darstellt, die in dem Overflow-Puffer sind, gleich 0 ist, oder ob s_i gleich k ist. Wird Block 406 mit JA beantwortet, so wird zu einem Block 408 gesprungen, in dem der Reduktions-Vorausschau-Parameter b auf 0 gesetzt wird. Wird dagegen die Frage im Block 406 mit NEIN beantwortet, so wird der Parameter n um 1 inkrementiert (Block 410). Gleichzeitig wird der Parameter s_i um 1 inkrementiert, wie es durch einen Block 412 dargestellt ist. Anschließend findet in einem Block 414 der zentrale Vergleich statt, durch den bestimmt werden soll, um wieviel das Modul-Polynom verschoben werden muß, damit in der Drei-Operanden-Operation (Block 218 von Fig. 2) eine modulare Reduktion des Zwischenergebnis-Polynoms stattfindet. Hierzu wird der Hilfs-Reduktions-Verschiebungswert s_i so bestimmt, daß der Grad des Polynoms, der sich aus der Multiplikation von x, wobei x mit s_i potenziert ist, multipliziert mit dem aktualisierten Zwischenergebnis-Polynom des vorausgehenden Schritts ergibt, gleich dem Grad des aktuellen Modul-Polynoms ist. Dies wird schrittweise, wie es durch eine Iterationsschleife 416 angedeutet ist, so lange durchgeführt, bis entweder im Block 406 ein JA-Ergebnis erhalten wird, oder bis im Block 414 ein JA-Ergebnis erhalten wird. Wird der Block 414 mit JA beantwortet, so wird in einem Block 418 der Reduktions-Vorausschau-Parameter b zu 1 gesetzt. Dann wird in einem Block 420 ein neuer Parameter n aus der Differenz des Multiplikations-Verschiebungswerts s_z und dem aktuellen Wert n berechnet. Der eigentliche Reduktions-Verschiebungswert S_N wird dann in einem Block 422 berechnet, indem die Differenz zwischen dem

Multiplikations-Verschiebungswert s_Z und dem Hilfs-Reduktions-Verschiebungswert s_i gebildet wird.

Es sei darauf hingewiesen, daß der Multiplikations-Verschiebungswert s_Z durch den eigentlich parallel ablaufenden Multiplikations-Vorausschau-Algorithmus geliefert wird, wie es durch einen Pfeil 230 in Fig. 2 angedeutet wird. Ohne Einführung des Hilfs-Reduktions-Parameters s_i wäre eigentlich nur eine serielle Ausführung des Multiplikations-Vorausschau-Verfahrens und daran anschließend des Reduktions-Vorausschau-Verfahrens möglich, was aus Effizienzgründen nicht wünschenswert ist. Daher wird der Hilfs-Reduktions-Parameter s_i verwendet, durch den die eigentliche Berechnung des Reduktions-Verschiebungswerts s_N bereits so weit vorbereitet werden kann, daß die aufwendige Iterationsschleife (Zweig 416 in Fig. 4) tatsächlich parallel zum Multiplikations-Vorausschau-Algorithmus abgearbeitet werden kann, während die eigentliche Berechnung des Reduktions-Verschiebungswerts S_N durch eine schnelle Differenzbildung zwischen zwei Kurzzahlen s_Z und s_i durchgeführt werden kann. Der Ablauf stellt sich somit folgendermaßen dar. Parallel werden s_Z und s_i berechnet. Dann wird s_Z über den Zweig 230 von Fig. 2, welcher auch in Fig. 4 eingezeichnet ist, von dem Multiplikations-Vorausschau-Algorithmus zu dem Reduktions-Vorausschau-Algorithmus geliefert, so daß unmittelbar im nächsten Zyklus auch bereits der Reduktions-Verschiebungswert s_N zur Verfügung steht. Hierauf wird später bezugnehmend auf die Fig. 8a bis 8c näher eingegangen.

Nach dem Block 422 wird in einem Block 424 bestimmt, ob n größer als MAX minus k ist. Wird diese Frage mit JA beantwortet, so wird in einem Block 426 ein neues cur_k berechnet. Wird die Frage des Blocks 424 mit NEIN beantwortet, so wird in einem Block 428 cur_k gleich k gesetzt. In einem Block 430 werden dann die Ergebniswerte des Reduktions-Vorausschau-Verfahrens, also b und s_N ausgegeben, so daß das Reduktions-Vorausschau-Verfahren in einem Block 432 beendet ist.

Bezüglich einer detaillierten Erklärung des Multiplikations-Vorausschau-Parameters a und des Reduktions-Vorausschau-Parameters b sowie der Speicher-Management-Parameter n, MAX, k und cur_k wird auf die DE 3631992 C2 Bezug genommen. Im Unterschied zum ZDN-Verfahren für **Z**/N**Z**, bei dem die Parameter a und b Werte +1, 0 und -1 einnehmen konnten, können die entsprechenden Parameter a, b im erfindungsgemäßen Verfahren lediglich die Werte 0 und 1 einnehmen. Die Vorausschau-Parameter a und b werden für die modulare Multiplikation gemäß der vorliegenden Erfindung lediglich optional benötigt, nämlich dann, wenn nicht beliebig große Speicherplätze für N und Z zur Verfügung sind. Generell kann das erfindungsgemäße Verfahren jedoch unter der Voraussetzung, daß beliebig große Register zur Verfügung stehen, ohne weiteres ausgeführt werden, in diesem Fall wird das Multiplikations-Vorausschau-Verfahren niemals abgebrochen, sondern immer so lange durchgeführt, bis wieder eine „1" im Multiplikator gefunden wird. Bis dahin hat, wenn auf Block 214 von Fig. 2 Bezug genommen wird, s_Z einen bestimmten möglicherweise großen Wert, so daß das verschobene Zwischenergebnis-Polynom Z´ einen möglicherweise sehr großen Wert annehmen kann. Im Block 218 wird dann, aufgrund der Tatsache, daß eine 1 im Multiplikator gefunden wurde, der Multiplikand zu dem verschobenen Zwischenergebnis-Polynom Z´ hinzuaddiert.

Ein wesentliches Merkmal ist jedoch, daß gleichzeitig mit jedem Multiplikationsschritt auch eine modulare Reduktion stattfindet, damit insgesamt die Zahlenwerte in erträglichen Grenzen gehalten werden können.

Hierzu wird gemäß der vorliegenden Erfindung der Reduktions-Verschiebungs-Wert s_N so gewählt, daß der Grad des verschobenen Modul-Polynoms gleich dem Grad des aktuellen Zwischenergebnis-Polynoms ist. Wenn dann das verschobene Modul-Polynom von der Summe aus Z´(x) und C(x) subtrahiert wird, wird das aktualisierte Zwischenergebnis Z üblicherweise immer kleiner

als Z´ sein, so daß eine Reduktion erreicht worden ist. Daraus ist zu sehen, daß das aktualisierte Zwischenergebnis-Polynom Z, das durch den Schritt 218 von Fig. 2 berechnet wird, nicht zwingend bezüglich des ursprünglichen Modul-Polynoms aus dem Block 202 reduziert ist, sondern vielleicht während der gesamten Iteration nur bezüglich eines nach links verschobenen Modul-Polynoms, d. h. eines Modul-Poynoms mit einem höheren Grad, reduziert ist. Dies muß jedoch nicht zwingend so sein. Sollte dieser Fall jedoch auftreten, so wird durch den Schritt 220, in dem festgestellt wird, ob n gleich 0 ist, d. h. ob N Bits im Overflow-Puffer hat oder nicht, erreicht, daß weitere Subtraktionen des Moduls von dem aktualisierten Zwischenergebnis stattfinden, so daß dann Z nach und nach in die ursprüngliche Restklasse zurückgeführt wird. Wenn nämlich n gleich 0 ist, bedeutet dies, daß keine Bits von N mehr in dem Overflow-Puffer sind, was wiederum bedeutet, daß das letztendlich erhaltene verschobene Modul-Polynom gleich dem ursprünglichen Modul-Polynom aus Block 202 ist.

Daher ist zu sehen, daß das erfindungsgemäße Verfahren zum modularen Multiplizieren grundsätzlich auch ohne Vorausschau-Parameter a und b ausgeführt werden könnte, wobei in diesem Fall jedoch - beliebige Multiplikatoren vorausgesetzt - theoretisch unbegrenzte Register für Z und N erforderlich sein würden.

Falls für Z und N eine Speicherbegrenzung vorgesehen wird, also wenn die Vorausschau-Parameter a und b 0 sein können, so bedeutet ein Multiplikations-Vorausschau-Parameter a gleich 0, daß kein Multiplikand zum verschobenen Z´ hinzuaddiert wird. Analog dazu bedeutet ein Reduktions-Vorausschau-Parameter b gleich 0, daß das verschobene Modul-Polynom größer als das verschobene Zwischenergebnis-Polynom Z´ ist, weshalb keine Reduktion erforderlich ist, so daß die Modul-Subtraktion ebenfalls ausfallen kann. In einem solchen Fall würde die Drei-Operanden-Operation vollständig degenerieren.

An dieser Stelle sei auch darauf hingewiesen, daß im Fall eines begrenzten Buffers für die Register Z und N darauf zu achten ist, daß N mindestens k Bits von seinem Home-MSB weggehalten wird, so lange die Variable m noch nicht den Wert Null erreicht hat.

Es sei ferner darauf hingewiesen, daß im Falle einer $GF(2^n)$-Arithmetik, also wenn die Koeffizienten des Polynoms nur 0 oder 1 sein können, die Additionsoperation der Subtraktionsoperation entspricht und allgemein als XOR-Verknüpfung ausgeführt werden kann. Wenn jedoch Koeffizienten des Polynoms in einem anderen Zahlensystem zugelassen würden, beispielsweise in einem Oktal-System oder einem Dezimal-System, so wird die Subtraktion selbstverständlich nicht der Addition entsprechen.

In nachfolgenden wird auf die Fig. 8a bis 8c eingegangen, um die Berechnung des Reduktions-Verschiebungswerts s_Z unter Verwendung des Hilfs-Reduktions-Verschiebungswerts s_i darzustellen. In Fig. 8a sind ein Zwischenergebnis-Polynom Z und ein Modul-Polynom N dargestellt. Lediglich beispielhaft hat das Zwischenergebnis-Polynom den Grad 4, also vier Bits, während das Modul-Polynom den Grad 9, also neun Bits hat. Nunmehr sei angenommen, daß in dem Block 214 von Fig. 2 ein verschobenes Zwischenergebnis-Polynom Z´´ berechnet wird, was durch Multiplizieren der Variablen x, die mit s_Z potenziert ist, erreicht werden kann. So sei angenommen, daß im Multiplikator 8 Nullen waren, was dazu führt, daß der Multiplikations-Verschiebungswert s_Z gleich 8 war. Um eine modulare Reduktion zu erreichen, muß der Modul N in die Größenordnung des verschobenen Zwischenergebnis-Polynoms Z´ kommen. Erfindungsgemäß soll das Modul-Polynom N so weit verschoben werden, daß der Grad des verschobenen Zwischenergebnis-Polynoms Z´ und der Grad des verschobenen Modul-Polynoms N gleich sind. Wie es aus Fig. 8b zu sehen ist, ist hierzu ein Reduktions-Verschiebungswert von s_N gleich 3 erforderlich.

Aus Fig. 8b ist ebenfalls zu sehen, daß die Ermittlung von s_N eigentlich erst durchgeführt werden kann, wenn s_Z berechnet worden ist, d. h. daß eine parallele Ausführung der Blöcke 210 und 212 von Fig. 2, wie es für die vorliegende Erfindung bevorzugt wird, nicht möglich ist. Aus diesem Grund wird der Hilfs-Verschiebungs-Parameter s_i eingeführt. Wie es aus Fig. 8a zu sehen ist, ist der Hilfs-Verschiebungs-Parameter s_i gleich der Differenz des Grads des Zwischenergebnis-Polynoms Z und des Modul-Polynoms N. Vorteilhaft an s_i ist, daß dieser Wert berechnet werden kann, ohne das s_Z des aktuellen Schritts zu kennen.

Aus Fig. 8c ist zu sehen, daß s_Z immer gleich der Summe aus s_i und s_N ist. s_N hängt somit immer mit s_Z und s_i derart zusammen, daß folgende Gleichung gilt:

$$s_N = s_Z - s_i.$$

Das zeitaufwendige iterative Verfahren zum Bestimmen von s_N kann somit zerlegt werden in ein zeitaufwendiges iteratives Verfahren zum Bestimmen von s_i (Schleife 416) und eine schnelle Differenz-Operation (Block 422 von Fig. 4). Damit ist eine nahezu parallele Ausführung der beiden Vorausschau-Verfahren möglich, wobei die einzige serielle Komponente darin besteht, daß vor dem Berechnen des Blocks 422 (Fig. 4) der tatsächliche Wert von s_Z durch den Multiplikations-Vorausschau-Algorithmus bereits berechnet und geliefert worden ist (Pfeil 230 in Fig. 2).

Wie es bereits ausgeführt worden ist, besteht ein wesentlicher Vorteil des erfindungsgemäßen Konzepts zur Berechnung der modularen Multiplikation über $GF(2^n)$ darin, daß es in das bereits bestehende Langzahl-Rechenwerk für das ZDN-Verfahren integriert werden kann. Fig. 5 zeigt einen Ausschnitt eines erfindungsgemäß angepassten 3-Operanden-Rechenwerks zum Durchführen der Drei-Operanden-Addition mit Z, aC und bN.

In Fig. 5 sind drei untereinander verschaltete Bit-Slices [i], [i-1], [i-2] dargestellt. Jeder Bit-Slice umfasst einen Drei-Bit-Zähler 500 und einem Volladdierer 510, um ausgangsseitig ein Bit Z[i], Z[i-1] bzw. Z[i-2] des aktualisierten Zwischenergebnis-Polynoms zu erhalten. Der Volladdierer hat ferner einen Carry-Ausgang (Carry = Übertrag) für den Carry-Eingang des nächsthöheren Voll-Addierers. Werden beispielsweise Polynome mit dem Grad 200 verarbeitet, so müssen 200 Bit-Slice-Addierer von Fig. 5 parallel geschaltet werden.

Um eine Bit-Slice von Fig. 5 für $GF(2^n)$ zu modifizieren, muß, wie es in Fig. 5 gezeigt ist, ein UND-Gatter 520 zwischen den oberen Ausgang des 3-Bit-Zählers und den zweituntersten Eingang des Volladdierers der nächsthöheren Stufe eingefügt werden. Wird eine 0 in den Enable-Eingang 530 eingespeist, so wird der Wert x immer 0 sein. Dann degeneriert die Funktion des Volladdierers 510 immer zur Addition von y und 0. Im Falle von **Z/NZ** wird der Enable-Eingang des UND-Gatters dagegen mit einer „1" beaufschlagt, so daß das UND-Gatter ohne weitere Wirkung ist.

Bei $GF(2^n)$ ist der Ausgang des UND-Gatters somit gleich 0. Bei **Z/NZ** wird X dagegen benötigt, und der Ausgang des UND-Gatters kann ungleich 0 sein. Das Enable wird somit durch ein UND-Gatter realisiert. Die Addition im Volladdierer wird dagegen für den Fall von $GF(2^n)$, also eine 0 am Enable-Eingang 530, trivial.

Fig. 6 zeigt die Situation am UND-Gatter 520. Das Rechenwerk, das in Fig. 5 teilweise dargestellt ist, wirkt als normaler Addierer, wenn das Enable-Signal SC = 1 ist. Es wirkt dagegen als XOR-Schaltung, wenn das Enable-Signal SC = 0 ist.

Fig. 7 zeigt ein schematisches Blockschaltbild eines Rechenwerks für **Z/NZ** und $GF(2^n)$. Das Rechenwerk gruppiert sich um die Langzahl-Arithmetik-Einheit 700, welche die bereits be-

schriebene Drei-Operanden-Operation entweder für **Z/NZ** oder $GF(2^n)$ durchführt.

Das Rechenwerk umfaßt ferner eine **Z/NZ**-Steuereinheit 710 sowie eine $GF(2^n)$-Steuereinheit 720 sowie eine Modusauswahl-Einrichtung 730. Soll das Rechenwerk Operationen Modulo einer ganzen Zahl berechnen, so wird die Modus-Auswahl 730 die arithmetische Einheit 700 derart ansteuern, daß eine echte Additionsoperation durchgeführt wird, wobei die arithmetische Einheit mit der **Z/NZ**-Steuereinheit 710 eingangsseitig und ausgangsseitig verbunden ist. Soll das Rechenwerk dagegen eine $GF(2^n)$-Arithmetik betreiben, so wird die Modus-Auswahl 730 die arithmetische Einheit 700 so aktivieren, daß statt einer Addition eine XOR-Operation durchgeführt wird, und daß Eingang und Ausgang der arithmetischen Einheit mit der $GF(2^n)$-Steuereinheit verbunden sind.

Es sind somit keine getrennten arithmetischen Einheiten mehr erforderlich, um sowohl eine Ganzzahl-Modulo-Arithmetik als auch eine Polynom-Modulo-Arithmetik in einem Rechenwerk unterzubringen.

Es sei darauf hingewiesen, daß aufgrund der Tatsache, daß die Drei-Operanden-Operation für sämtliche Bits parallel durchgeführt wird, der meiste Chip-Platz für die arithmetische Einheit 700 verbraucht wird, während die weiteren kleineren Berechnungen, die in den Steuereinheiten 710 und 720 auszuführen sind, mit sehr sehr viel kürzeren Zahlen zu bewerkstelligen sind, so daß dieselben bitflächenmäßig nicht besonders ins Gewicht fallen.

Im Gegensatz zu einem Rechenwerk, das sowohl für die Ganzzahl-Arithmetik als auch die Polynom-Arithmetik ein eigenes Rechenwerk benötigte, erlaubt das erfindungsgemäße Konzept zum Berechnen der modularen Multiplikation daher eine Chipflächenreduktion von nahezu 50%. Insbesondere für Smart-Cards

führt diese deutliche Chipflächeneinsparung zu erheblichen Wettbewerbsvorteilen.

5

Bezugszeichenliste

200	Start des Verfahrens zur modularen Multiplikation
202	globale Variablen
204	Initialisieren des Zwischenergebnis-Polynoms
206	Initialisieren von m
208	Initialisieren von n
210	Multiplikations-Vorausschau-Verfahren
212	Reduktions-Vorausschau-Verfahren
214	Erzeugen des Zwischenergebnis-Polynoms
216	Erzeugen des verschobenen Modul-Polynoms
218	Drei-Operanden-Addition
220	Überprüfen, ob der Algorithmus beendet ist
222	Ausgeben von Z
224	Stopp des Verfahrens zum modularen Multiplizieren
226	Iterationsschleife
230	s_z-Übertragung
300	Start des Multiplikations-Vorausschau-Verfahrens
302	Globale Variablen
304	Initialisieren von s_z
306	Initialisieren von a
308	Feststellen, ob das verarbeitete Bit 0 oder 1 ist
310	Inkrementieren von m
312	Inkrementieren von s_z
314	Ausgeben von a und s_z
316	Feststellen, ob weiter verschoben werden kann
318	Inkrementieren von m
320	Inkrementieren von s_z
322	Iterationsschleife
324	Einstellen von a
326	Stopp des Multiplikations-Vorausschau-Verfahrens
400	Start des Reduktions-Vorausschau-Verfahrens
402	globale Variablen
404	Initialisieren von s_i
406	Feststellen, ob reduziert werden kann
408	Einstellen von b
410	Inkrementieren von n

412 Inkrementieren von s_i

414 Überprüfen des Grads des verschobenen Zwischenergebnis-Polynoms

416 Iterationsschleife

418 Einstellen von b

420 Einstellen von n

422 Berechnen von s_N

424 Überprüfen von n

426 Einstellen von cur_k

428 Einstellen von cur_k

430 Ausgeben von b, s_N

432 Ende des Reduktions-Vorausschau-Verfahrens

500 Drei-Bit-Zähler

510 Volladdierer

520 Schalter

530 Steuerung

700 Drei-Operanden-Rechenwerk

710 Z/NZ-Steuereinheit

720 $GF(2^n)$-Steuereinheit

730 Modus-Auswahl

900 Start des ZDN-Verfahrens

910 Multiplikations-Vorausschau-Verfahren für den ZDN-Algorithmus

920 Verschieben von Z nach links

930 Reduktions-Vorausschau-Verfahren für den ZDN-Algorithmus

940 Verschieben des Moduls nach links oder nach rechts

950 Drei-Operanden-Addition für den ZDN-Algorithmus

960 Ende des ZDN-Algorithmus

Patentansprüche

1. Verfahren zum modularen Multiplizieren eines Multiplikanden (C) mit einem Multiplikator (M) unter Verwendung eines Moduls (N), wobei der Multiplikand (C), der Multiplikator (M) und der Modul (N) Polynome einer Variablen (x) sind, mit folgenden Schritten:

(a) Durchführen (210) eines Multiplikations-Vorausschau-Verfahrens, um einen Multiplikations-Verschiebungswert (s_Z) zu erhalten, wobei bei einer Potenz des Multiplikators, die im Multiplikator-Polynom nicht vorhanden ist, der Multiplikations-Verschiebungswert s_Z inkrementiert wird;

(b) Multiplizieren (214) der Variable (x) potenziert mit dem Multiplikations-Verschiebungs-Wert (s_Z) mit einem Zwischenergebnis-Polynom (Z), um ein verschobenes Zwischenergebnis-Polynom (Z´) zu erhalten;

(c) Durchführen eines Reduktions-Vorausschau-Verfahrens (212), um einen Reduktions-Verschiebungswert (s_N) zu erhalten, wobei der Reduktions-Verschiebungswert (s_N) gleich der Differenz des Grads des verschobenen Zwischenergebnis-Polynoms (Z) und des Grads des Modul-Polynoms (N) ist;

(d) Multiplizieren (216) der Variable (x) potenziert mit dem Reduktions-Verschiebungswert (s_N) mit dem Modul-Polynom (N), um ein verschobenes Modul-Polynom (N´) zu erhalten;

(e) Summieren (218) des verschobenen Zwischenergebnis-Polynoms (Z´) und des Multiplikanden (C) und Subtrahieren des verschobenen Modul-Polynoms (N´), um ein aktualisiertes Zwischenergebnis-Polynom (Z) zu erhalten; und

(f) Wiederholen (226) der Schritte (a) bis (e), bis sämtliche Potenzen des Multiplikators (M) abgearbeitet sind, wobei bei der Wiederholung der Schritte (a) bis (e)

im Schritt (d) als Zwischenergebnis-Polynom (Z) das aktualisierte Zwischenergebnis-Polynom (Z) des vorausgehenden Schritts (e) verwendet wird, und

im Schritt (c) als Modul-Polynom (N) das verschobene Modul-Polynom des vorausgehenden Schritts (d) verwendet wird.

2. Verfahren nach Anspruch 1, bei dem das Multiplizieren (210) im Schritt (d) durch Verschieben der Zwischenergebnis-Polynoms (Z) um eine Anzahl von Stellen gleich dem Multiplikationsverschiebungswert (s_Z) ausgeführt wird, und

bei dem das Multiplizieren (216) im Schritt (d) durch Verschieben des Modul-Polynoms (M) um eine Anzahl von Stellen gleich dem Reduktions-Verschiebungs-Wert (s_N) ausgeführt wird.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, bei dem Koeffizienten der Polynome nur den Wert „0" oder „1" haben können, und

bei dem das Summieren und Subtrahieren (218) im Schritt (e) durch bitweises XOR-Verknüpfen des Zwischenergebnis-Polynoms (Z´), des Multiplikanden (C) und des verschobenen Modul-Polynoms (N´) ausgeführt wird.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem der Schritt des Reduktions-Vorausschau-Verfahrens (212), um einen Reduktions-Verschiebungs-Wert (s_N) zu erhalten, folgende Schritte aufweist:

Bestimmen (414) eines Hilfs-Verschiebungs-Werts (s_i) so, daß der Grad des Modulpolynoms (N) und der Grad des aktualisierten Zwischenergebnis-Polynoms (Z) des vorausgehenden Schritts (e) multipliziert mit der Variablen, die mit dem Hilfs-Verschiebungswert (s_i) potenziert ist, gleich sind, und

Bilden (422) der Differenz des Multiplikations-Verschiebungswerts (s_Z) und des Hilfs-Verschiebungswerts (s_i), um den Reduktions-Verschiebungswert (s_N) zu erhalten.

5. Verfahren nach Anspruch 4, bei dem der Schritt des Durchführens des Multiplikations-Vorausschau-Verfahrens (210) und der Schritt des Bestimmens (414) des Hilfs-Verschiebungs-Werts (s_i) parallel zueinander ausgeführt werden.

6. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche,

bei dem der Multiplikations-Verschiebungswert (s_Z) auf einen Maximal-Multiplikations-Verschiebungswert (k) begrenzt ist,

bei dem der Schritt des Durchführens (210) des Multiplikations-Verschiebungs-Verfahrens folgende Schritte aufweist:

falls der Multiplikations-Verschiebungs-Wert gleich dem Maximal-Multiplikations-Verschiebungswert (k) ist,

Gleichsetzen des Multiplikations-Verschiebungswerts (s_Z) mit dem Maximal-Verschiebungs-Wert (k);

Erzeugen (306, 324) eines Multiplikations-Vorausschau-Parameters (a) mit einem vorbestimmten Wert, und

bei dem der Schritt des Summierens folgenden Schritt aufweist:

falls der Multiplikations-Vorausschau-Parameter (a) den vorbestimmten Wert hat,

Summieren nur des vorbestimmten Zwischenergebnis-Polynoms (Z´) und des verschobenen Modul-Polynoms (N´).

7. Vorrichtung zum modularen Multiplizieren eines Multiplikanden (C) mit einem Multiplikator (M) unter Verwendung eines

Moduls (N), wobei der Multiplikand (C), der Multiplikator (M) und der Modul (N) Polynome einer Variablen (x) sind, mit folgenden Merkmalen:

(a) einer Einrichtung zum Durchführen (210) eines Multiplikations-Vorausschau-Verfahrens, um einen Multiplikations-Verschiebungswert (s_Z) zu erhalten, wobei bei einer Potenz des Multiplikators, die im Multiplikator-Polynom nicht vorhanden ist, der Multiplikations-Verschiebungswert s_Z inkrementiert wird;

(b) einer Einrichtung zum Multiplizieren (214) der Variable (x), die mit dem Multiplikations-Verschiebungs-Wert (s_Z) potenziert ist, mit einem Zwischenergebnis-Polynom (Z), um ein verschobenes Zwischenergebnis-Polynom (Z´) zu erhalten;

(c) einer Einrichtung zum Durchführen eines Reduktions-Vorausschau-Verfahrens (212), um einen Reduktions-Verschiebungswert (s_N) zu erhalten, wobei der Reduktions-Verschiebungswert (s_N) gleich der Differenz des Grads des verschobenen Zwischenergebnis-Polynoms (Z) und des Grads des Modul-Polynoms (N) ist;

(d) einer Einrichtung zum Multiplizieren (216) der Variable (x), die mit dem Reduktions-Verschiebungswert (s_N) potenziert ist, und des Modul-Polynoms (N), um ein verschobenes Modul-Polynom (N´) zu erhalten;

(e) einer Einrichtung zum Summieren (218) des verschobenen Zwischenergebnis-Polynoms (Z´) und des Multiplikanden (C) und Subtrahieren des verschobenen Modul-Polynoms (N´), um ein aktualisiertes Zwischenergebnis-Polynom (Z) zu erhalten; und

(f) einer Einrichtung zum wiederholten Ansteuern (226) der Einrichtungen (a) bis (e), bis sämtliche Potenzen des Multiplikators (M) abgearbeitet sind, wobei bei einer wiederholten Ansteuerung der Einrichtungen (a) bis (e)

die Einrichtung zum Multiplizieren (214), um ein verschobenes Zwischenergebnis-Polynom zu erhalten, angeordnet ist, um als Zwischenergebnis-Polynom (Z) das aktualisierte Zwischenergebnis-Polynom (Z) aus der vorausgehenden Ansteuerung der Einrichtung zum Summieren (218) zu verwenden, und

die Einrichtung zum Durchführen eines Reduktions-Vorausschau-Verfahrens (212) angeordnet ist, um bei einer wiederholten Ansteuerung als Modul-Polynom (N) das verschobene Modul-Polynom aus der vorausgehenden Ansteuerung der Einrichtung zum Multiplizieren (216), um ein verschobenes Modul-Polynom zu erhalten, zu verwenden.

8. Vorrichtung nach Anspruch 7, bei der die Einrichtung (214) zum Multiplizieren, um ein verschobenes Zwischenergebnis-Polynom (Z´) zu erhalten, und die Einrichtung (216) zum Multiplizieren, um ein verschobenes Modul-Polynom (N´) zu erhalten, als steuerbare Schieberegister ausgeführt sind, um abhängig vom Multiplikations-Verschiebungs-Wert (s_Z) oder vom Reduktions-Verschiebungs-Wert (s_N) eine Verschiebung des Registerinhalts um eine entsprechende Anzahl von Stellen durchzuführen.

9. Vorrichtung nach Anspruch 7 oder 8, bei der die Einrichtung (218) zum Summieren und zum Subtrahieren als bitweise XOR-Verknüpfung des Zwischenergebnis-Polynoms (Z´), des Multiplikanden (C) und des verschobenen Modul-Polynoms (N´) ausgeführt ist.

10. Vorrichtung nach Anspruch 7 oder 8, bei der die Einrichtung (218) zum Summieren und Subtrahieren folgende Merkmale aufweist:

einen Zähler (500) mit drei Eingangsleitungen und zwei Ausgangsleitungen, wobei an eine erste Eingangsleitung ein Bit

des Zwischenergebnis-Polynoms (Z) anlegbar ist, wobei an eine zweite Eingangsleitung ein Bit des Multiplikanden (C) anlegbar ist, und wobei an eine dritte Eingangsleitung ein Bit des verschobenen Modul-Polynoms (N´) anlegbar ist,

einen Volladdierer (510) mit drei Eingängen und einem Ausgang, wobei ein niederwertiger Ausgang des Zählers (500) mit einer höherwertigen Eingangsleitung des Volladdierers (510) verbunden ist;

einen Schalter (520), der zwischen einer höherwertigen Ausgangsleitung des Zählers (500) und einem mittleren Eingang eines Volladdierers (510) für ein höherwertiges Bit geschaltet ist; und

eine Steuereinrichtung (530) zum Öffnen des Schalters (520), wenn Polynome zu verarbeiten sind.

11. Rechenwerk zum Multiplizieren eines Multiplikanden-Polynoms mit einem Multiplikator-Polynom unter Verwendung eines Modul-Polynoms, wobei das Multiplikanden-Polynom, das Multiplikator-Polynom und das Modul-Polynom Polynome einer Variablen sind, oder, wahlweise, zum Multiplizieren einer Multiplikanden-Ganzzahl mit einer Multiplikator-Ganzzahl unter Verwendung einer Modul-Ganzzahl, mit folgenden Merkmalen:

(a) einer Einrichtung zum Durchführen (210) eines Multiplikations-Vorausschau-Verfahrens, um einen Multiplikations-Verschiebungswert (s_z) zu erhalten, wobei bei einer Potenz des Multiplikators, die im Multiplikator-Polynom nicht vorhanden ist, der Multiplikations-Verschiebungswert (s_z) inkrementiert wird;

(b) einer Einrichtung zum Multiplizieren (214) der Variable, die mit dem Multiplikations-Verschiebungs-Wert (s_z) potenziert ist, mit einem Zwischenergebnis-Polynom, um ein verschobenes Zwischenergebnis-Polynom zu erhalten;

(c) einer Einrichtung zum Durchführen eines Reduktions-Vorausschau-Verfahrens (212), um einen Reduktions-Verschiebungswert (s_N) zu erhalten, wobei der Reduktions-Verschiebungswert (s_N) gleich der Differenz des Grads des verschobenen Zwischenergebnis-Polynoms und des Grads des Modul-Polynoms ist;

(d) einer Einrichtung zum Multiplizieren (216) der Variable (x), die mit dem Reduktions-Verschiebungswert (s_N) potenziert ist, mit dem Modul-Polynom, um ein verschobenes Modul-Polynom zu erhalten;

(e) einer Einrichtung (710) zum Durchführen eines Multiplikations-Vorausschau-Verfahrens und eines Reduktions-Vorausschau-Verfahrens für Ganzzahl-Operanden, um ein Ganzzahl-Zwischenergebnis und einen verschobenen Ganzzahl-Modul zu erhalten;

(f) einem Drei-Operanden-Addierer (700) mit einer Übertrag-Abschalt-Einrichtung (730) zum Kombinieren entweder der Ganzzahl-Operanden oder des Polynom-Zwischenergebnisses, des verschobenen Modul-Polynoms und des Polynom-Multiplikanden;

(g) einer Steuereinrichtung (730) zum Steuern der Übertrag-Abschalt-Einrichtung, damit der Übertrag deaktiviert ist, wenn Polynom-Operanden verarbeitet werden, und damit der Übertrag aktiviert ist, wenn Ganzzahl-Operanden verarbeitet werden.

12. Rechenwerk nach Anspruch 11, bei dem der Drei-Operanden-Addierer mit einer Übertrag-Abschalt-Einrichtung folgende Merkmale aufweist:

einen Zähler (500) mit drei Eingangsleitungen und zwei Ausgangsleitungen, wobei an eine erste Eingangsleitung ein Bit des Zwischenergebnis-Polynoms anlegbar ist, wobei an eine

zweite Eingangsleitung ein Bit des Multiplikanden (C) anlegbar ist, und wobei an eine dritte Eingangsleitung ein Bit des verschobenen Modul-Polynoms anlegbar ist,

einen Volladdierer (510) mit drei Eingängen und einem Ausgang, wobei ein niederwertiger Ausgang des Zählers (500) mit einer höherwertigen Eingangsleitung des Volladdierers (510) verbunden ist;

einen Schalter (520), der zwischen einer höherwertigen Ausgangsleitung des Zählers (500) und einen mittleren Eingang eines Volladdierers (510) für ein nächsthöheres Bit geschaltet ist; und

eine Steuereinrichtung (530) zum Öffnen des Schalters (520), wenn Polynome zu verarbeiten sind.

13. Rechenwerk nach Anspruch 12, bei dem eine Mehrzahl von Drei-Operanden-Addierern vorhanden ist, wobei die Anzahl der vorhandenen Drei-Operanden-Addierer größer oder gleich der Anzahl von Stellen der Modul-Ganzzahl oder der Polynom-Ganzzahl ist.

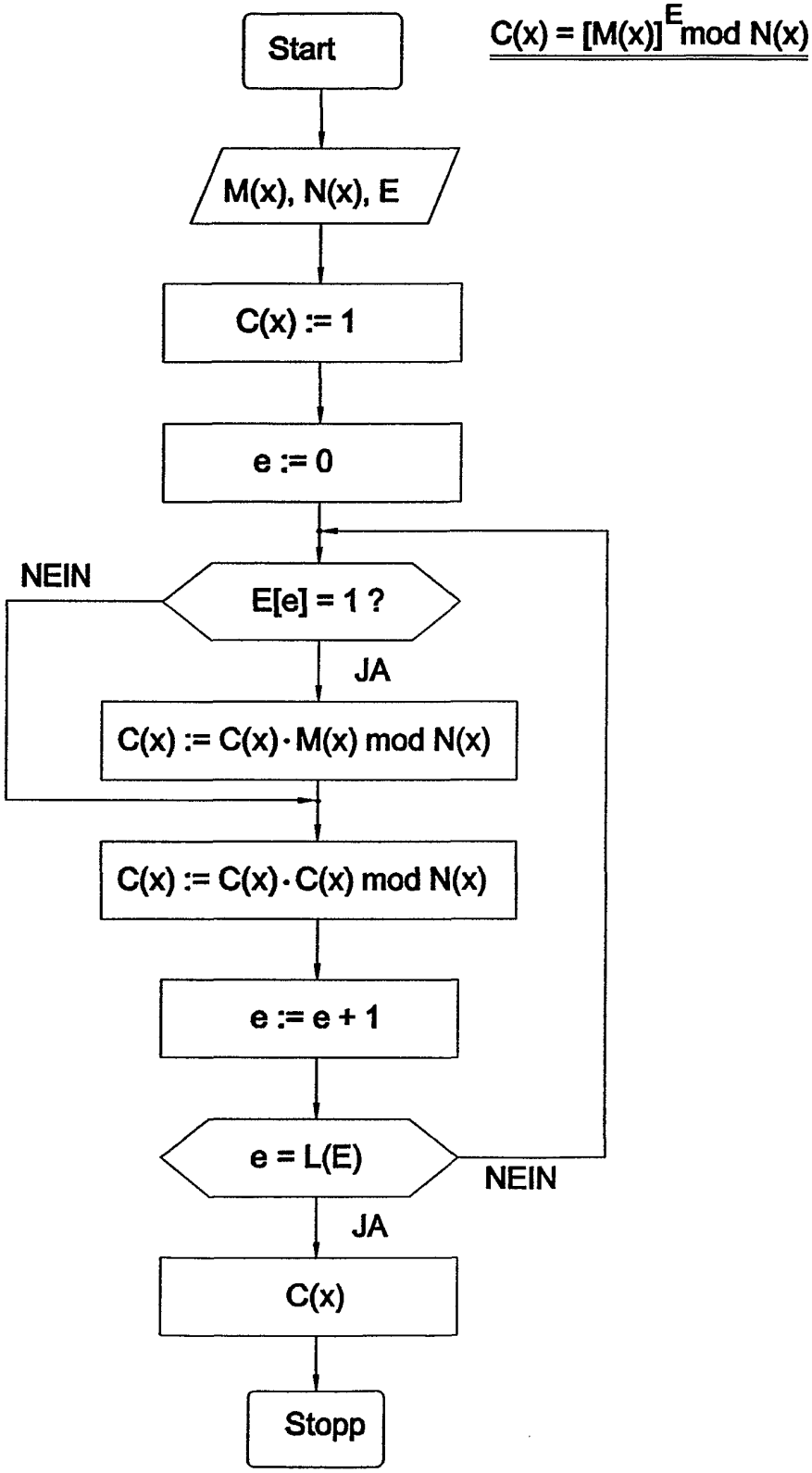

Start
C(x) = [M(x)]^E mod N(x)
M(x), N(x), E
C(x) := 1
e := 0
NEIN
E[e] = 1 ?
JA
C(x) := C(x) · M(x) mod N(x)
C(x) := C(x) · C(x) mod N(x)
e := e + 1
e = L(E)
NEIN
JA
C(x)
Stopp

FIG 1

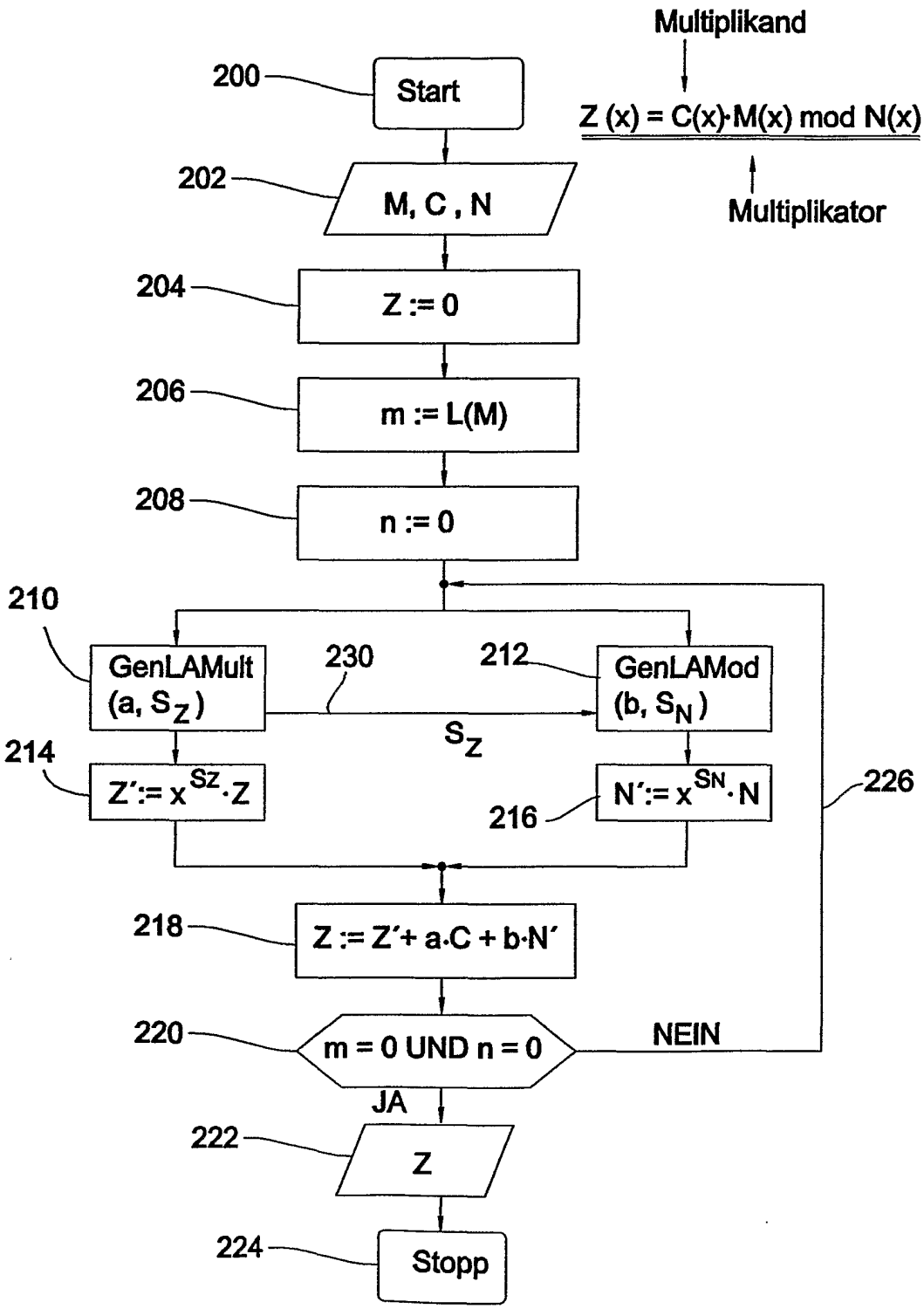

Multiplikand
Z (x) = C(x)·M(x) mod N(x)
Multiplikator
200
Start
202
M, C , N
204
Z := 0
206
m := L(M)
208
n := 0
210
GenLAMult
(a, S_Z)
230
S_Z
212
GenLAMod
(b, S_N)
214
Z':= x^Sz·Z
216
N':= x^SN·N
226
218
Z := Z'+ a·C + b·N'
220
m = 0 UND n = 0
NEIN
JA
222
Z
224
Stopp

FIG 2

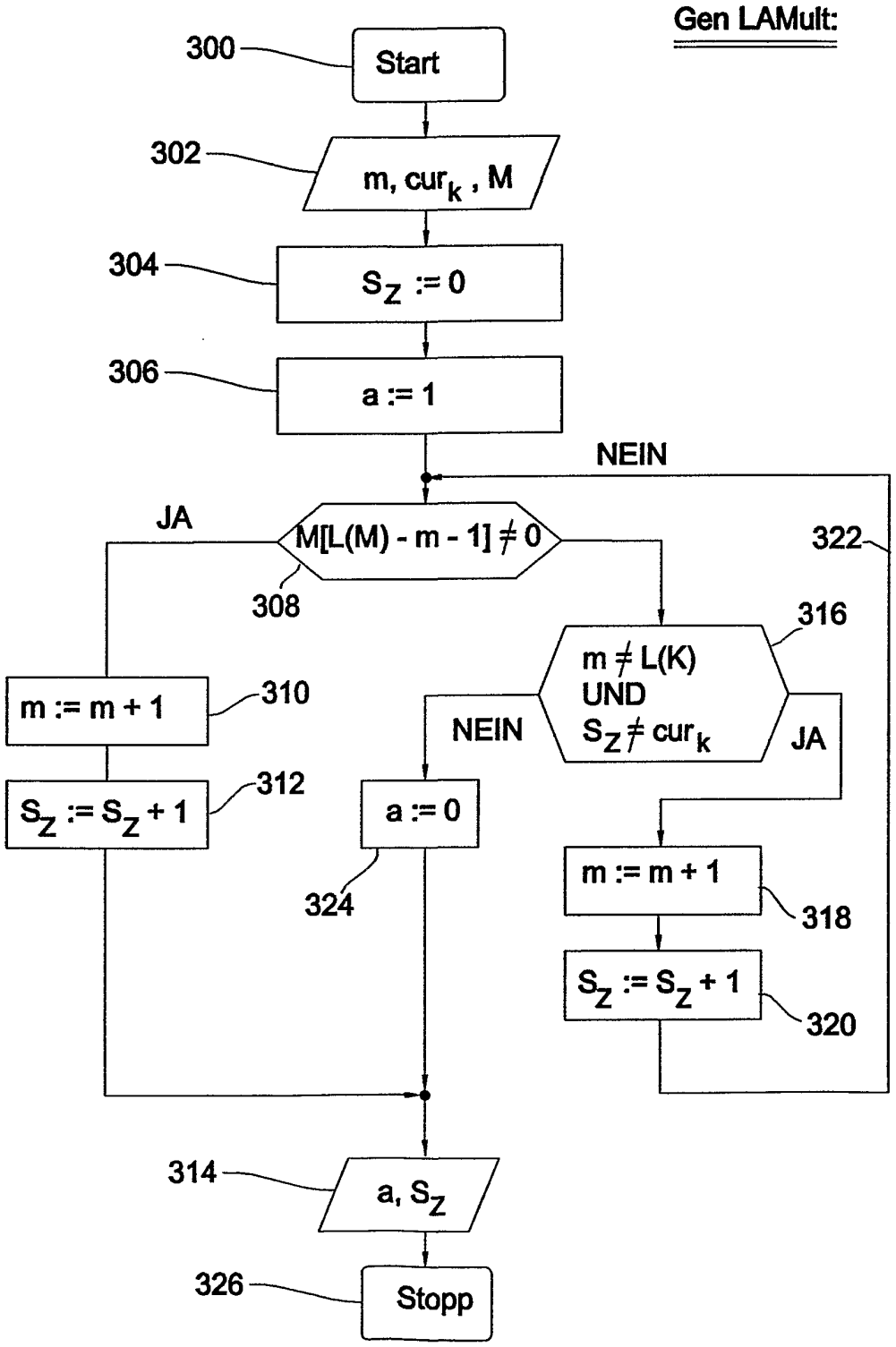

Gen LAMult:
300
Start
302
m, cur$_k$, M
304
$S_Z := 0$
306
a := 1
NEIN
JA
M[L(M) - m - 1] ≠ 0
308
322
316
m ≠ L(K)
UND
$S_Z \neq cur_k$
NEIN
JA
m := m + 1
310
$S_Z := S_Z + 1$
312
a := 0
324
m := m + 1
318
$S_Z := S_Z + 1$
320
314
a, S_Z
326
Stopp

FIG 3

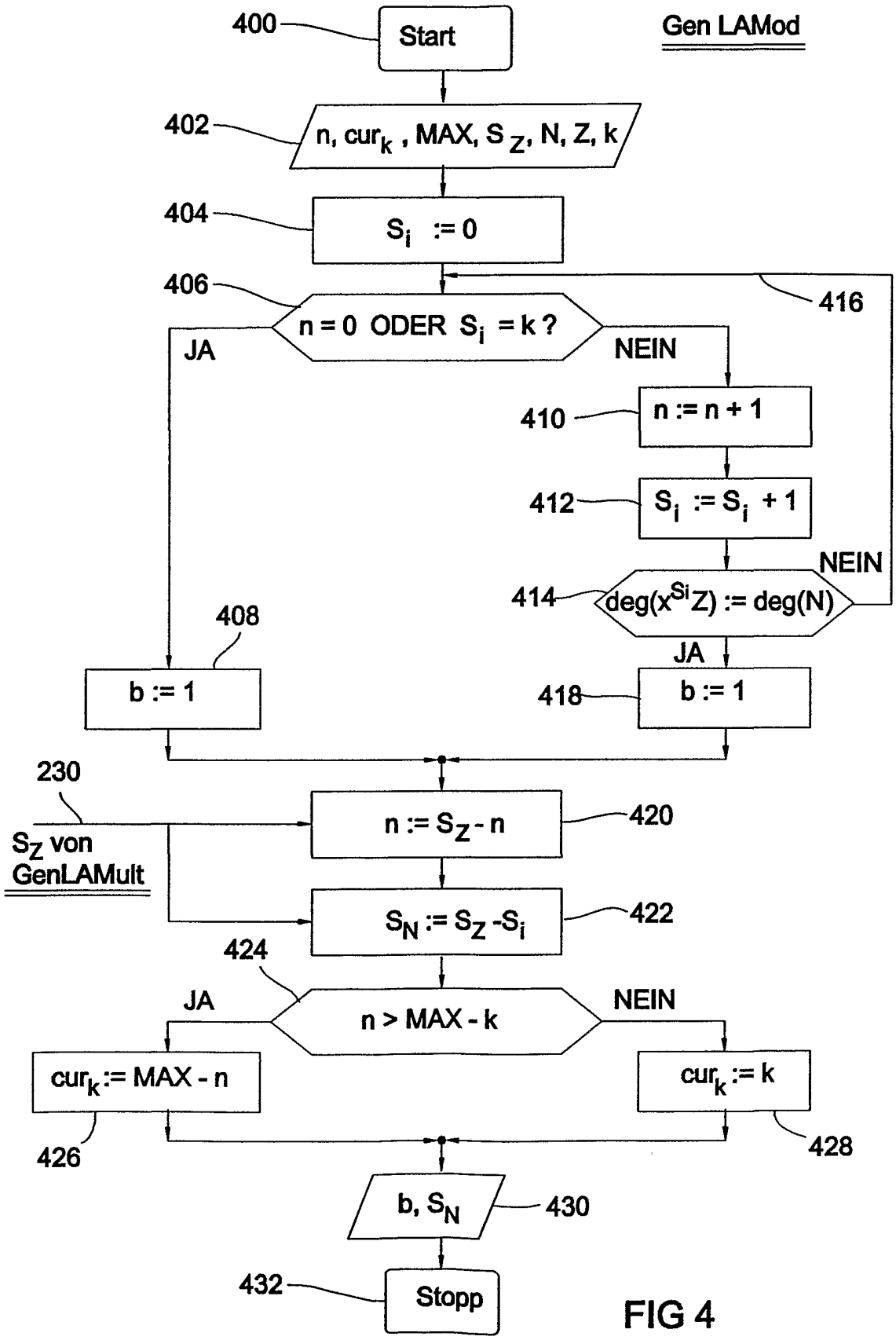

400
Start
Gen LAMod
402
n, cur$_k$, MAX, S$_Z$, N, Z, k
404
S$_i$:= 0
406
n = 0 ODER S$_i$ = k ?
416
JA
NEIN
410
n := n + 1
412
S$_i$:= S$_i$ + 1
NEIN
414
deg(x^{Si}Z) := deg(N)
JA
408
b := 1
418
b := 1
230
S$_Z$ von GenLAMult
n := S$_Z$ - n
420
S$_N$:= S$_Z$ -S$_i$
422
424
JA
n > MAX - k
NEIN
cur$_k$:= MAX - n
cur$_k$:= k
426
428
b, S$_N$
430
432
Stopp

FIG 4

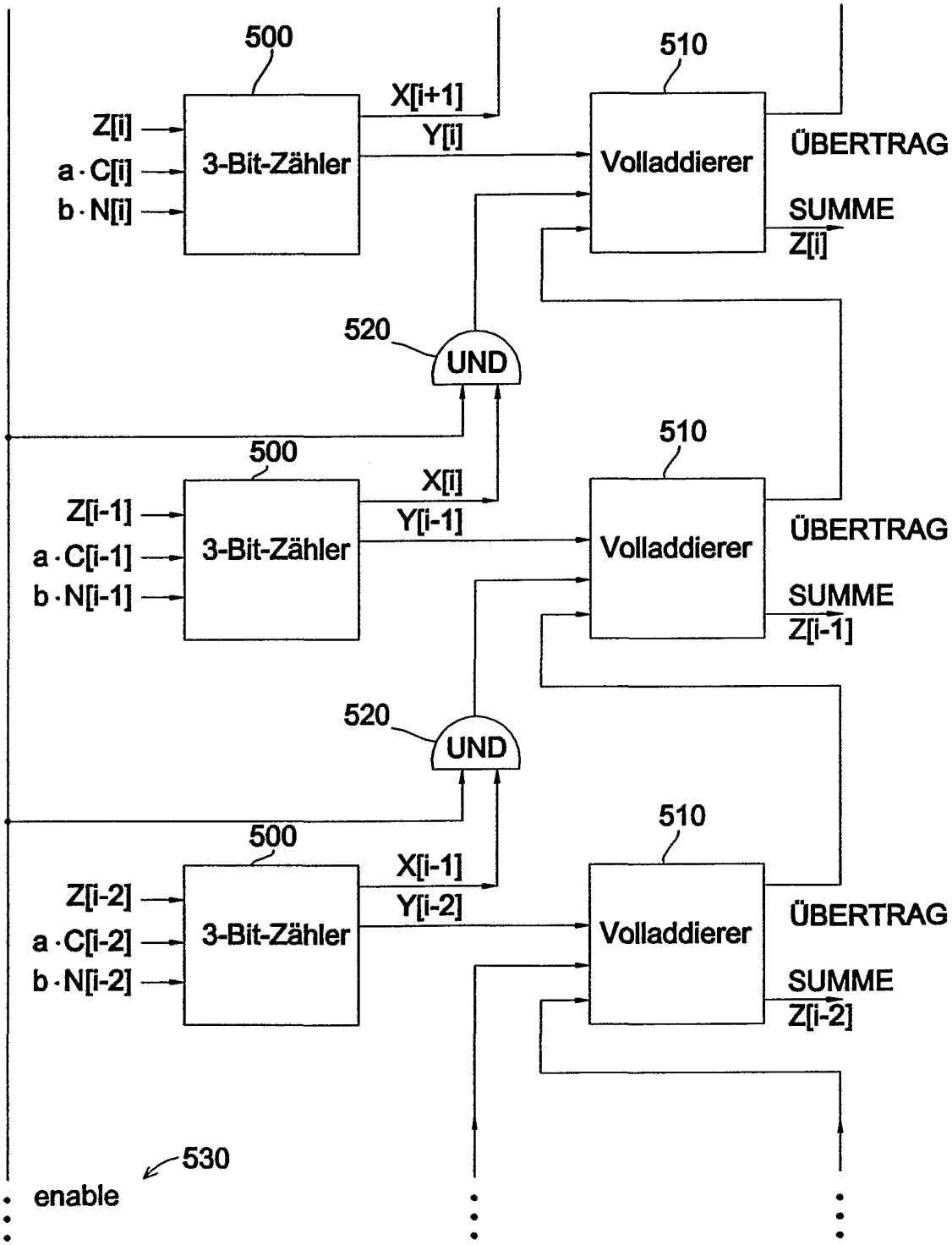
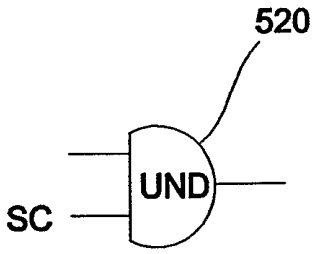

500
510
X[i+1]
Y[i]
Z[i]
a · C[i]
b · N[i]
3-Bit-Zähler
Volladdierer
ÜBERTRAG
SUMME
Z[i]
520
UND
500
510
X[i]
Y[i-1]
Z[i-1]
a · C[i-1]
b · N[i-1]
3-Bit-Zähler
Volladdierer
ÜBERTRAG
SUMME
Z[i-1]
520
UND
500
510
X[i-1]
Y[i-2]
Z[i-2]
a · C[i-2]
b · N[i-2]
3-Bit-Zähler
Volladdierer
ÜBERTRAG
SUMME
Z[i-2]
530
enable

FIG 5



SC = 1 für normale Addition
SC = 0 für XOR

FIG 6

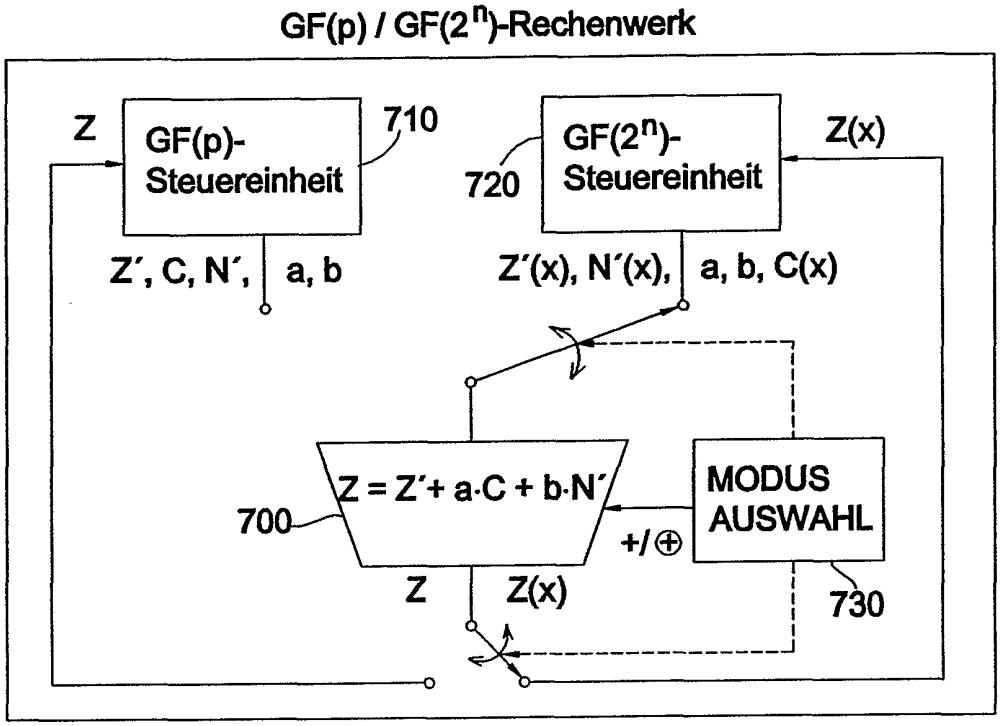

GF(p) / GF(2^n)-Rechenwerk
Z
GF(p)-Steuereinheit
710
GF(2^n)-Steuereinheit
720
Z(x)
Z', C, N',
a, b
Z'(x), N'(x),
a, b, C(x)
Z = Z'+ a·C + b·N'
700
MODUS AUSWAHL
+/⊕
Z
Z(x)
730

FIG 7

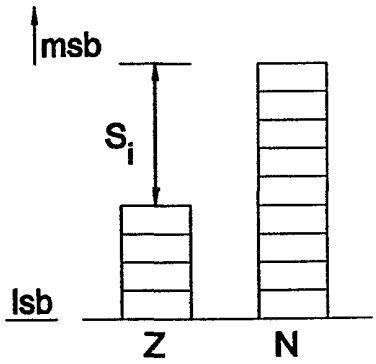


FIG 8A

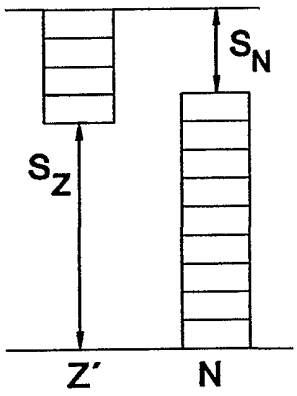


FIG 8B

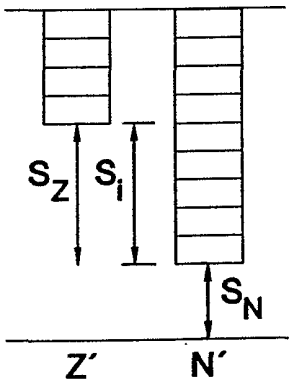


FIG 8C

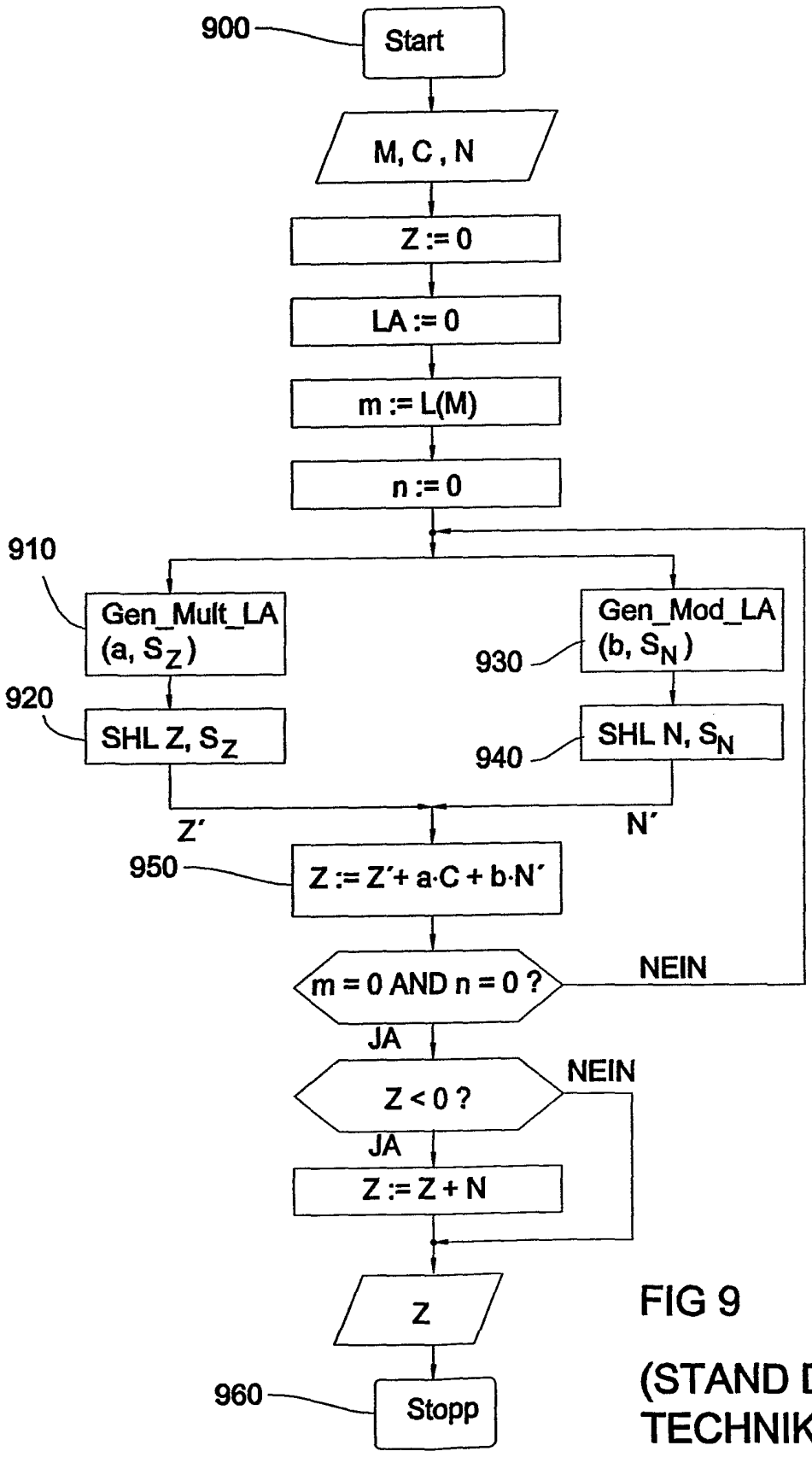


FIG 9

(STAND DER TECHNIK)