



(12) **Offenlegungsschrift**

(21) Aktenzeichen: **10 2011 087 804.1**

(22) Anmeldetag: **06.12.2011**

(43) Offenlegungstag: **06.06.2013**

(51) Int Cl.: **H04L 9/30 (2012.01)**

(71) Anmelder:
Siemens Aktiengesellschaft, 80333, München, DE

(72) Erfinder:
**Meyer, Bernd, 81739, München, DE; Schafheutle,
Marcus, 81539, München, DE**

(56) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht
gezogene Druckschriften:

DE 101 20 288 A1

**Menezes, A., et al.: Handbook of Applied
Cryptography, CRC Press, 1997, Kapitel 8
"Public-Key Encryption", Seiten 283-319.**

**Ostrovsky, R., et al.: Private Searching On
Streaming Data. Journal of Cryptology, Band 20:
4, Oktober 2007, Seiten 397-430.**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

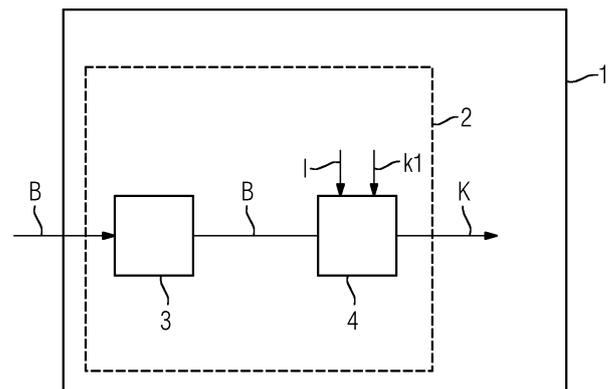
Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

(54) Bezeichnung: **Vorrichtung und Verfahren zum Entschlüsseln von Daten**

(57) Zusammenfassung: Es wird eine Vorrichtung (1) zum Entschlüsseln von Daten vorgeschlagen, welche eine Anzahl von durch zumindest eine Sicherungseinrichtung (2) gesicherten Mitteln (3-5) aufweist. Die gesicherten Mitteln (3-5) umfassen ein Empfangsmittel (3) zum Empfangen von mittels einer homomorphen Verschlüsselungsfunktion (f) verschlüsselten Berechnungsdaten (B), und ein Entschlüsselungsmittel (4) zum Entschlüsseln der verschlüsselten Berechnungsdaten (B) durch Ausführung der Inversen (I) der homomorphen Verschlüsselungsfunktion (f) auf die verschlüsselten Berechnungsdaten unter Verwendung eines der homomorphen Verschlüsselungsfunktion (f) zugeordneten privaten Schlüssels (k1).

Hierdurch wird eine sichere Berechnungsumgebung mit hoher Sicherheit aus verfügbaren Standardkomponenten kostengünstig realisiert.

Ferner werden ein Verfahren sowie ein Computerprogrammprodukt zum Entschlüsseln von Daten vorgeschlagen.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft die Entschlüsselung von Daten durch eine kryptographisch und/oder physikalisch gesicherte Vorrichtung.

[0002] In der theoretischen Kryptographie wird die Sicherheit eines kryptographischen Verfahrens herkömmlicherweise an Hand des Ein- und Ausgabeverhaltens bewertet. Dabei bekommt ein Angreifer oder Hacker lediglich die Eingabe und/oder die Ausgabe der kryptographisch bearbeiteten Daten zu sehen und hat dann unter Kenntnis des eingesetzten Verfahrens Rückschlüsse auf den verwendeten kryptographischen Schlüssel ziehen.

[0003] Insbesondere laufen die Rechenschritte des kryptographischen Verfahrens in einer geschützten Umgebung ab, auf die der Angreifer keinen Zugriff hat. In der Praxis kann eine solche gesicherte Rechenumgebung mit einem Security-Token, beispielsweise mit einer Chipkarte oder einem Dongle, nachgebildet werden. Das Security-Token weist vielfältige Schutzmaßnahmen in Hard- und Software auf, welche es ermöglichen, einerseits als vertraulichen und manipulationsgeschützten Speicher für geheime Daten, wie beispielsweise Schlüsselmaterial, zu dienen und andererseits Teile der zu schützenden Anwendung des Zielsystems direkt in der geschützten Umgebung des Tokens auszuführen. Allerdings sind alle in der Praxis gebräuchlichen Security-Token bezüglich Speichergröße an Daten- und Programmspeicher als auch Leistung und Performance der zur Verfügung stehenden Rechenkapazität stark eingeschränkt. Daher werden häufig nur die kryptographischen Kernfunktionen in einem Security-Token umgesetzt. Der größte Teil der Applikation oder des Programms läuft dann auf einem Computer-System mit keinem oder deutlich geringerem Schutzniveau.

[0004] Es existieren auch Ansätze, die es ermöglichen, leistungsfähigere Computer-Systeme physikalisch zu schützen. Allerdings sind der Aufwand für diese Maßnahmen und die zusätzlichen Kosten bei der technischen Umsetzung in Relation zu den erreichbaren Schutzniveaus und den geplanten Anwendungen derart hoch, dass solche Verfahren nur für Anwendungen mit militärischer Sicherheit eingesetzt werden.

[0005] Wenn ein kryptographischer Algorithmus, der eine geheime Information benötigt, auf einem System ausgeführt werden muss, welches es dem Angreifer erlaubt, den Ablauf des Algorithmus zu verfolgen, sind weitere Schutzmechanismen nötig, um gegen bestimmte Klassen von Angriffen geschützt zu sein. Ist es dem Angreifer beispielsweise möglich, physikalische Eigenschaften der Rechenumgebung, wie beispielsweise Laufzeit, dynamische Stromaufnahme oder elektromagnetische Abstrahlung wäh-

rend des Rechenvorgangs zu messen, so sind Maßnahmen zur Abwehr so genannter Seitenkanalangriffe wichtig.

[0006] Besteht die Rechenumgebung für das kryptographische Verfahren aus einem Computer-System, das keinen physikalischen Schutz bietet, dann hat der Angreifer vollständige Kontrolle über die ausgeführten Rechenschritte und die verarbeiteten Daten. In diesem Fall muss der Algorithmus so implementiert werden, dass es dem Angreifer, obwohl er die Ausführung des Algorithmus bis in das letzte Detail nachvollziehen kann, nicht möglich ist, diesen zu verstehen oder das verarbeitete Geheimnis zu extrahieren. Eine derartige Implementierung eines Algorithmus nennt man obfusziert.

[0007] Verfahren zur Bereitstellung einer sicheren Berechnungsumgebung reichen von reinen Software-Lösungen bis zu speziell gefertigter Hardware oder Kombinationen aus Soft- und Hardware. Dabei wird zur Realisierung der sicheren Berechnungsumgebung zumindest eine Sicherheitseinrichtung eingesetzt, welche physikalischen und/oder kryptographischen Schutz bietet.

[0008] Reine Software-Lösungen werden eingesetzt, wenn keine weiteren Schutzfunktionen durch die Hardware des Computersystems zur Verfügung stehen oder dieses aus Kostengründen nicht gewünscht ist. Das Programm, welches auf dem Computer-System ausgeführt werden soll, kann durch geeignete Code-Transformationen, so genannte Code-Obfuskation, so verändert werden, dass das Reverse-Engineering durch einen Angreifer erschwert beziehungsweise bestenfalls verhindert wird. Spezielle Techniken, so genannte White-Box-Kryptographie, können zum Schutz von geheimem Schlüsselmaterial in der Software verwendet werden. Das erzielbare Sicherheitsniveau ist im Vergleich zu Techniken mit Hardware-Schutzmaßnahmen gering und die Transformation des Codes ist normalerweise mit erheblichen Performance-Einbußen und einem deutlich größeren Programm- und Speicherplatzbedarf verbunden.

[0009] Bei den Lösungsansätzen mit Hardware-Unterstützung wird in den meisten Anwendungsfällen zur Bereitstellung eines sicheren Computer-Systems ein Security-Token eingesetzt. Ein solches Security-Token enthält spezielle Schutzmechanismen in Hardware, wie beispielsweise Sensoren für Temperatur, Betriebsspannung, Angriffe mittels Laser-Blitzen, verschlüsselte Busse und Speicher, Rauschgeneratoren, Random-Wait-State Generatoren, Schilde zum Schutz gegen Probing mittels Nadeln, spezielle Chip-Entwurfstile usw. Security-Token sind einfache Computer-Systeme, bestehend aus RAM, einem nichtflüchtigen Speicher (üblicherweise Flash oder EEPROM), einer CPU und IO-Interfaces (UART,

SPI, USB usw.) und bieten ein vergleichsweise hohes Sicherheitsniveau gegen Angriffe. Häufig enthalten die Sicherheits-Token zusätzliche Hardware zur effizienten Berechnung kryptographischer Verfahren (DES-, AES-Beschleuniger, Langzahlrechenwerke). Die Leistungsfähigkeit der Security-Token ist normalerweise sehr eingeschränkt bezüglich Speichergröße, CPU-Geschwindigkeit und Datendurchsatz der Schnittstellen, so dass nur kleine, sicherheitsrelevante Teile einer Applikation innerhalb des Tokens ausgeführt werden können.

[0010] Alternativ sind auch speziell für Sicherheitsanwendungen hergestellte Single-Chip-Controller am Markt verfügbar, welche beispielsweise in Embedded-Anwendungen eingesetzt werden können. Diese Computer-Systeme sind üblicherweise etwas leistungsfähiger als Security-Token, verteuern aber das Design eines Produktes erheblich.

[0011] Möglich ist auch, das ganze Gerät durch spezielle Maßnahmen zum Design des Gehäuses zu schützen. Solche Maßnahmen reichen von einfachen Schaltern zum Erkennen des Öffnens eines Gehäuses, Spezialgehäusen, Bohrschutzfolien, speziellen Leiterplatten bis hin zu Fertigungstechniken wie Vergießen oder Versiegeln. Die Geräte können eine aktive Sensorik besitzen, um Manipulationsversuche erkennen und darauf reagieren zu können und benötigen dazu eine unterbrechungsfreie Stromversorgung mittels einer Batterie. Innerhalb eines solchen Gerätes kann ein leistungsfähiges Computer-System bestehend aus Standardkomponenten verwendet werden. Die entsprechenden Entwicklungs- und Fertigungsaufwände solcher Systeme sind jedoch hoch, so dass solche Schutzmaßnahmen üblicherweise nur bei militärischen Anwendungen vorkommen. Zusätzlich sind organisatorische Maßnahmen zum regelmäßigen Tausch der Batterie notwendig, um die Verfügbarkeit der Geräte sicherstellen zu können.

[0012] Homomorphe Verschlüsselungsfunktionen waren bis vor wenigen Jahren ein lediglich in der theoretischen Kryptographie diskutiertes Konzept, welches es ermöglichen soll, alleine durch Rechenoperationen auf verschlüsselten Daten eine sichere Berechnungsumgebung für Programme auf ungeschützten Computer-Systemen zu realisieren.

[0013] Im Jahr 2009 hat Craig Gentry in seiner Doktorarbeit erstmals unter bestimmten kryptographischen Komplexitätsannahmen eine Methode zur Realisierung von homomorphen Verschlüsselungsfunktion mit allen zur Durchführung beliebiger Berechnungen notwendigen Eigenschaften beschrieben (siehe [1]). Die beschriebenen Techniken wurden zwischenzeitlich unter anderem von Shai Halevi und Nigel Smart weiterentwickelt, und ihre Performance wurde verbessert (siehe [2] bis [4]).

[0014] Es ist daher eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, eine sichere Berechnungsumgebung mit hoher Sicherheit aus verfügbaren Standardkomponenten kostengünstig zu realisieren.

[0015] Demgemäß wird eine Vorrichtung zum Entschlüsseln von Daten vorgeschlagen, welche eine Anzahl von durch zumindest eine Sicherungseinrichtung gesicherten Mitteln mit zumindest einem Empfangsmittel und einem Entschlüsselungsmittel umfasst. Das Empfangsmittel ist zum Empfangen von mittels einer homomorphen Verschlüsselungsfunktion verschlüsselten Berechnungsdaten eingerichtet. Das Entschlüsselungsmittel ist zum Entschlüsseln der verschlüsselten Berechnungsdaten durch Ausführung der Inversen der homomorphen Verschlüsselungsfunktion auf die verschlüsselten Berechnungsdaten unter Verwendung eines der homomorphen Verschlüsselungsfunktion zugeordneten privaten Schlüssels eingerichtet.

[0016] Die Sicherheitseinrichtung dient zur Realisierung einer sicheren Berechnungsumgebung. Dabei bietet die Sicherungseinrichtung insbesondere physikalischen und/oder kryptographischen Schutz. Die Sicherungseinrichtung kann als reine Software-Lösung, als eine speziell gefertigte Hardware oder als eine Kombination aus Software und Hardware gefertigt sein. Dabei schützt die Sicherungseinrichtung insbesondere gegen Seitenkanalangriffe.

[0017] Bei den mittels der homomorphen Verschlüsselungsfunktion verschlüsselten Berechnungsdaten kann es sich um Ergebnisse von Berechnungen eines mittels einer homomorphen Verschlüsselungsfunktion transformierten Programms handeln.

[0018] Durch die Verwendung der homomorphen Verschlüsselungsfunktion für die Berechnung der verschlüsselten Berechnungsdaten ist es möglich, die Berechnung auf einem ungeschützten Computersystem zu realisieren.

[0019] Die verschlüsselten Berechnungsdaten werden von einer Einrichtung, beispielsweise einem ungeschützten Computer aus Standardkomponenten, berechnet. Dabei wendet der ungeschützte Computer das mittels der homomorphen Verschlüsselungsfunktion transformierte Programm auf Eingangsdaten zur Bereitstellung der verschlüsselten Berechnungsdaten an. Die verschlüsselten Berechnungsdaten sind dann mittels der homomorphen Verschlüsselungsfunktion verschlüsselt. Vorteilhafterweise ist es durch die Eigenschaften der homomorphen Verschlüsselungsfunktion möglich, den rechenintensiven Teil des Programms auf dem ungeschützten Computer oder Computersystem aus Standardkomponenten auszuführen. Damit muss dieser rechenintensive Teil der Ausführung des Programms nicht auf der Entschlüsselungsvorrichtung mit der zur Ent-

schlüsselung eingerichteten sicheren Berechnungs-umgebung ausgeführt werden. Die Sicherheit des Programms oder der Anwendung wird durch die kryptographischen Eigenschaften der homomorphen Verschlüsselungsfunktion garantiert und benötigt keine speziellen Hardware-Schutzmaßnahmen durch das Computersystem. Insbesondere bestehen nicht die für die Entschlüsselungsvorrichtung, beispielsweise einen Security-Token, üblichen Leistungseinschränkungen durch Speicher- und Programmgröße oder Leistungsfähigkeit der CPU der Entschlüsselungsvorrichtung. Das transformierte Programm führt alle Berechnungen verschlüsselt durch. Die verschlüsselten Berechnungsdaten werden der Entschlüsselungsvorrichtung übergeben und dabei von dem Empfangsmittel der Entschlüsselungsvorrichtung empfangen. Die abschließende Entschlüsselung wird auf der geschützten Entschlüsselungsvorrichtung durchgeführt, weil die ungeschützte Einrichtung, hier beispielsweise das ungeschützte Computersystem, keine ausreichenden Maßnahmen zum Schutz des geheimen Schlüssels der homomorphen Verschlüsselungsfunktion, welcher zur Entschlüsselung benötigt wird, zur Verfügung stellen kann.

[0020] Die vorliegende Lösung ist sehr kostengünstig, da für die sichere Berechnungs-umgebung, hier die Entschlüsselungsvorrichtung, nur geringere Ressourcen, insbesondere Rechenleistung und Speicherkapazität notwendig sind als für die Einrichtung zur Anwendung des transformierten Programms. Dabei werden die rechenintensiven Aufgaben der Anwendung des transformierten Programms durch die ungesicherte oder wenig gesicherte Einrichtung durchgeführt, die mit größeren Ressourcen ausgestattet ist, aber mit weniger kostenintensiven Sicherheitsmaßnahmen. Demgegenüber hat die Entschlüsselungsvorrichtung ein höheres Sicherheitsniveau, braucht aber für den verbleibenden Schritt der Entschlüsselung deutlich weniger Ressourcen als die Einrichtung zur Anwendung des transformierten Programms.

[0021] Eine solche homomorphe Verschlüsselungsfunktion ermöglicht es, verschlüsselt vorliegende Werte einer geeigneten mathematischen Struktur zu addieren, subtrahieren und zu multiplizieren, so dass das Ergebnis der Berechnungen wiederum verschlüsselt vorliegt. Bei der Berechnung liegen zu keinem Zeitpunkt Zwischenergebnisse oder andere Informationen über die verknüpften Werte unverschlüsselt für einen Angreifer zugänglich vor und die Durchführung dieser Rechenschritte erfordert auch nicht die Kenntnis von geheimem Schlüsselmaterial. Das heißt, dass die Berechnungen auf einem ungesicherten Computer-System durchgeführt werden können, ohne die verarbeiteten Daten zu gefährden bzw. offen zu legen.

[0022] Mit Hilfe der mathematischen Operationen Addition, Subtraktion und Multiplikation ist es möglich, auf sichere und geheime Weise Polynomfunktionen von verschlüsselten Werten zu berechnen. Durch die Polynomfunktionen können dann wiederum beliebige Berechnungen von Computer-Systemen beschrieben werden. Wenn das Ergebnis der Berechnung letztendlich als verschlüsselter Wert vorliegt, ist nur der legitime Empfänger, welcher den privaten Schlüssel der homomorphen Verschlüsselungsfunktion besitzt, in der Lage, die berechneten Werte zu entschlüsseln.

[0023] Bei einer Ausführungsform umfassen die mittels der zumindest einen Sicherungseinrichtung gesicherten Mittel ein Speichermittel. Das Speichermittel ist dazu eingerichtet, ein Programm zu Berechnung der Inversen der homomorphen Verschlüsselungsfunktion zu speichern und das gespeicherte Programm der Inversen der homomorphen Verschlüsselungsfunktion dem Entschlüsselungsmittel bereitzustellen. Das Speichermittel ist beispielsweise ein Flash-Speicher oder ein RAM-Speicher.

[0024] Bei einer weiteren Ausführungsform ist das Speichermittel weiter dazu eingerichtet, den der homomorphen Verschlüsselungsfunktion zugeordneten privaten Schlüssel zu speichern und den gespeicherten privaten Schlüssel dem Entschlüsselungsmittel bereitzustellen.

[0025] Bei einer weiteren Ausführungsform ist das Entschlüsselungsmittel fest verdrahtet ausgebildet. Beispielsweise ist das Entschlüsselungsmittel als ein integrierter Schaltkreis (IC oder ASIC) oder als ein Field-Programmable-Gate-Array (FPGA) ausgebildet.

[0026] Bei einer weiteren Ausführungsform ist die Vorrichtung ein Sicherheits-Token, ein USB-Token, eine Smart-Card, ein geschützter Server oder ein geschützter Rechner.

[0027] Des Weiteren wird ein System mit einer Einrichtung, welche ein Anwendungsmittel zum Anwenden des mittels der homomorphen Verschlüsselungsfunktion transformierten Programms auf Eingangsdaten zur Bereitstellung der verschlüsselten Berechnungsdaten und ein Übertragungsmittel zum Übertragen der verschlüsselten Berechnungsdaten aufweist, und mit einer wie oben erläuterten Vorrichtung zum Entschlüsseln der übertragenen, verschlüsselten Berechnungsdaten vorgeschlagen.

[0028] Bei einer Ausführungsform des Systems ist die Einrichtung ein ungeschützter Rechner oder ein ungeschützter Server.

[0029] Bei einer weiteren Ausführungsform sind das Übertragungsmittel der Einrichtung und das Emp-

fangsmittel der Vorrichtung dazu eingerichtet, ein vorbestimmtes Schnittstellenprotokoll zur Übertragung der verschlüsselten Berechnungsdaten auszuführen.

[0030] Durch das vorbestimmte Schnittstellenprotokoll können die verschlüsselten Berechnungsdaten gezielt und in vorbestimmter Weise von der Einrichtung an die Entschlüsselungsvorrichtung übertragen werden.

[0031] Bei einer weiteren Ausführungsform ist die Einrichtung derart mit Ressourcen ausgestattet, um das transformierte Programm innerhalb einer vorbestimmten Zeitdauer vollständig auszuführen, in welcher die Vorrichtung das transformierte Programm nicht vollständig ausführen kann.

[0032] Die Ressourcen umfassen dabei insbesondere die bereitgestellte Rechenleistung der CPU sowie die Speicherkapazität des Speichers oder der Speicher der Einrichtung.

[0033] Bei einer weiteren Ausführungsform weist die Einrichtung ein Schutzmittel auf, welches dazu eingerichtet ist, das transformierte Programm vor Manipulation zu schützen. Das Schutzmittel kann eine manipulationsfreie Ausführung des transformierten Programms garantieren.

[0034] Bei einer weiteren Ausführungsform ist das Schutzmittel dazu eingerichtet, einen Nachweis über die korrekte Ausführung des transformierten Programms durch das Anwendungsmittel, insbesondere mittels Probabilistically-Checkable-Proofs (PCP), zu erstellen (siehe [5] bis [7]).

[0035] Bei dieser Ausführungsform kann der Schutzzumfang des Programms auf der leistungsfähigen Einrichtung, welche die homomorph verschlüsselten Berechnungen ausführt, dahingehend erweitert werden, dass das Programm vor Manipulationen geschützt wird. Dazu kann das Programm auf der leistungsfähigen, aber ansonsten ungeschützten Einrichtung, beispielsweise dem ungeschützten Computersystem, insbesondere so erweitert werden, dass bei der Anwendung des Programms gleichzeitig Nachweise über die korrekte Durchführung der Berechnung erstellt werden. Dazu werden insbesondere Probabilistically-Checkable-Proofs (PCP) eingesetzt. PCP-Beweise haben die Eigenschaft, dass sie sehr effizient überprüft werden können. Die Überprüfung des Nachweises über die korrekt ausgeführte Berechnung auf der Einrichtung kann dann wiederum in der Entschlüsselungsvorrichtung erfolgen. Vorzugsweise nur wenn der Nachweis über die Berechnung als gültig akzeptiert wird, wird die Entschlüsselungsvorrichtung die homomorph verschlüsselten Berechnungsdaten entschlüsseln.

[0036] Das jeweilige Mittel, beispielsweise das Empfangsmittel, das Entschlüsselungsmittel oder das Schutzmittel, kann hardwaretechnisch oder auch softwaretechnisch implementiert sein. Bei einer hardwaretechnischen Implementierung kann das jeweilige Mittel als Vorrichtung oder als Teil einer Vorrichtung, zum Beispiel als Computer oder als Mikroprozessor oder als IC, ASIC oder FPGA ausgebildet sein. Bei einer softwaretechnischen Implementierung kann das jeweilige Mittel als Computerprogrammprodukt, als eine Funktion, als eine Routine, als Teil eines Programmcodes oder als ausführbares Objekt ausgebildet sein.

[0037] Ferner wird ein Verfahren zum Entschlüsseln von Daten mittels einer durch zumindest eine Sicherheitseinrichtung gesicherten Vorrichtung vorgeschlagen, welches die folgenden Schritte aufweist:

- Empfangen von mittels einer homomorphen Verschlüsselungsfunktion verschlüsselten Berechnungsdaten, und
- Entschlüsseln der verschlüsselten Berechnungsdaten durch Ausführung der Inversen der homomorphen Verschlüsselungsfunktion auf die verschlüsselten Berechnungsdaten unter Verwendung eines der homomorphen Verschlüsselungsfunktion zugeordneten privaten Schlüssels.

[0038] Weiterhin wird ein Computerprogrammprodukt vorgeschlagen, welches auf einer programmgesteuerten Einrichtung die Durchführung des wie oben erläuterten Verfahrens zum Entschlüsseln von Daten mittels einer durch zumindest eine Sicherheitseinrichtung gesicherten Vorrichtung veranlasst. Die programmgesteuerte Einrichtung ist insbesondere eine Entschlüsselungsvorrichtung, wie ein Sicherheits-Token.

[0039] Ein Computerprogramm-Produkt wie ein Computerprogramm-Mittel kann beispielsweise als Speichermedium, wie Speicherkarte, USB-Stick, CD-ROM, DVD oder auch in Form einer herunterladbaren Datei von einem Server in einem Netzwerk bereitgestellt oder geliefert werden. Dies kann zum Beispiel in einem drahtlosen Kommunikationsnetzwerk durch die Übertragung einer entsprechenden Datei mit dem Computerprogramm-Produkt oder dem Computerprogramm-Mittel erfolgen.

[0040] Die oben beschriebenen Eigenschaften, Merkmale und Vorteile dieser Erfindung sowie die Art und Weise, wie diese erreicht werden, werden klarer und deutlicher verständlich im Zusammenhang mit der folgenden Beschreibung der Ausführungsbeispiele, die im Zusammenhang mit den Zeichnungen näher erläutert werden.

[0041] Dabei zeigen:

[0042] [Fig. 1](#) ein Blockschaltbild eines ersten Ausführungsbeispiels einer Entschlüsselungsvorrichtung;

[0043] [Fig. 2](#) ein Blockschaltbild eines zweiten Ausführungsbeispiels einer Entschlüsselungsvorrichtung;

[0044] [Fig. 3](#) ein Blockschaltbild eines ersten Ausführungsbeispiels eines Systems mit einer Berechnungseinrichtung und einer Entschlüsselungsvorrichtung;

[0045] [Fig. 4](#) ein Blockschaltbild eines zweiten Ausführungsbeispiels eines Systems mit einer Berechnungseinrichtung und einer Entschlüsselungsvorrichtung;

[0046] [Fig. 5](#) ein Blockschaltbild eines dritten Ausführungsbeispiels eines Systems mit einer Berechnungseinrichtung und einer Entschlüsselungsvorrichtung;

[0047] [Fig. 6](#) ein Ablaufdiagramm eines ersten Ausführungsbeispiels eines Verfahrens zum Entschlüsseln von Daten; und

[0048] [Fig. 7](#) ein Ablaufdiagramm eines zweiten Ausführungsbeispiels eines Verfahrens zum Entschlüsseln von Daten.

[0049] In den Figuren sind gleiche oder funktionsgleiche Elemente mit denselben Bezugszeichen versehen worden, sofern nichts anderes angegeben ist.

[0050] In der [Fig. 1](#) ist ein Blockschaltbild eines ersten Ausführungsbeispiels einer kryptographisch und/oder physikalisch geschützten Entschlüsselungsvorrichtung **1** dargestellt.

[0051] Die Entschlüsselungsvorrichtung **1** ist beispielsweise ein Sicherheits-Token, ein USB-Token, eine Smart-Card, ein geschützter Server oder ein geschützter Rechner.

[0052] Die Mittel **3**, **4** der Vorrichtung **1** sind durch zumindest eine Sicherungseinrichtung **2** gegen Manipulation, Ausspähen und/oder Hacker-Angriffe geschützt.

[0053] Die Entschlüsselungsvorrichtung **1** hat ein Empfangsmittel **3** und ein Entschlüsselungsmittel **4**. Das Empfangsmittel **3** ist dazu geeignet, verschlüsselte Berechnungsdaten **B** zu empfangen, die mittels einer homomorphen Verschlüsselungsfunktion f verschlüsselt sind.

[0054] Bei den mittels der homomorphen Verschlüsselungsfunktion f verschlüsselten Berechnungsdaten **B** kann es sich um Ergebnisse von Berechnungen ei-

nes mittels der homomorphen Verschlüsselungsfunktion f transformierten Programms **P** handeln.

[0055] Mit anderen Worten kann ein Programm **S** unter Verwendung der homomorphen Verschlüsselungsfunktion f in ein transformiertes Programm **P** transformiert werden. Die durch das transformierte Programm **P** berechneten Berechnungsdaten **B** sind verschlüsselt und zwar durch die homomorphe Verschlüsselungsfunktion f .

[0056] Das Entschlüsselungsmittel **4** ist dazu geeignet, die empfangenen verschlüsselten Berechnungsdaten **B** durch Ausführung der Inversen I der homomorphen Verschlüsselungsfunktion f auf die verschlüsselten Berechnungsdaten **B** unter Verwendung eines der homomorphen Verschlüsselungsfunktion f zugeordneten privaten Schlüssels k_1 zu entschlüsseln.

[0057] Insgesamt ist der homomorphen Verschlüsselungsfunktion f ein Schlüsselpaar aus dem privaten Schlüssel k_1 und einem öffentlichen Schlüssel k_2 zugeordnet. Der öffentliche Schlüssel k_2 wird beispielsweise zur Transformation eines Programms **S** eingesetzt (siehe dazu [Fig. 5](#)). Das Entschlüsselungsmittel **4** gibt ausgangsseitig die entschlüsselten Berechnungsdaten **K** als Klartext aus. Die entschlüsselten Berechnungsdaten **K** können beispielsweise auf einer Anzeigevorrichtung (nicht gezeigt) angezeigt werden oder für ein weiteres Programm oder eine Applikation verwendet werden.

[0058] Alternativ hierzu kann das Entschlüsselungsmittel **4** auch fest verdrahtet ausgebildet sein.

[0059] [Fig. 2](#) zeigt ein Blockschaltbild eines zweiten Ausführungsbeispiels einer Entschlüsselungsvorrichtung **1**. Die Entschlüsselungsvorrichtung **1** der [Fig. 2](#) basiert auf der Entschlüsselungsvorrichtung **1** der [Fig. 1](#) und weist sämtliche Merkmale der [Fig. 1](#) auf. Darüber hinaus hat die Entschlüsselungsvorrichtung **1** der [Fig. 2](#) ein Speichermittel **5**, welches dazu eingerichtet ist, ein Programm zu Berechnung der Inversen I der homomorphen Verschlüsselungsfunktion f zu speichern und dieses dem Entschlüsselungsmittel **4** bereitzustellen. Ferner speichert das Speichermittel **5** den der homomorphen Verschlüsselungsfunktion f zugeordneten privaten Schlüssel k_1 und stellt diesen dem Entschlüsselungsmittel **4** bereit.

[0060] In [Fig. 3](#) ist ein Blockschaltbild eines ersten Ausführungsbeispiels eines Systems **6** mit einer Berechnungseinrichtung **7** und einer Entschlüsselungsvorrichtung **1** dargestellt. Beispielsweise ist die Berechnungseinrichtung **7** ein ungeschütztes Computer-System, wohingegen die Entschlüsselungsvorrichtung **1** ein kryptographisch und/oder physikalisch geschützter Sicherheits-Token ist.

[0061] Die Berechnungseinrichtung 7 hat ein Anwendungsmittel 8, welches dazu eingerichtet ist, das transformierte Programm P auf Eingangsdaten A zur Bereitstellung der verschlüsselten Berechnungsdaten B anzuwenden. Das Anwendungsmittel 8 stellt die berechneten Berechnungsdaten B einem Übertragungsmittel 9 der Berechnungseinrichtung 7 bereit. Das Übertragungsmittel 9 ist dazu eingerichtet, die verschlüsselten Berechnungsdaten B der Entschlüsselungsvorrichtung 1 bereitzustellen. Das Übertragungsmittel 9 der Einrichtung 7 und das Empfangsmittel 3 der Vorrichtung 1 sind dazu eingerichtet, ein vorbestimmtes Schnittstellenprotokoll zur Übertragung der verschlüsselten Berechnungsdaten B auszuführen.

[0062] Die Entschlüsselungsvorrichtung 1 entspricht der Vorrichtung 1 der Fig. 2. Demnach empfängt das Empfangsmittel 8 die übertragenen verschlüsselten Berechnungsdaten B und stellt diese dem Entschlüsselungsmittel 4 bereit.

[0063] Die Berechnungseinrichtung 7 ist im Gegensatz zur Entschlüsselungsvorrichtung 1 dazu geeignet, das transformierte Programm P innerhalb einer vorbestimmten Zeitdauer vollständig auszuführen. Die Berechnungseinrichtung 7 hat eine deutlich höhere Rechenleistung sowie eine deutlich höhere Speicherkapazität als die Entschlüsselungsvorrichtung 1. Folglich wird bei dem System 6 die Rechenleistung der Berechnungseinrichtung 7 zur Anwendung des transformierten Programms P genutzt, wohingegen hinsichtlich der Sicherheit die Entschlüsselungsvorrichtung 1 verwendet wird.

[0064] In Fig. 4 ist ein Blockschaltbild eines zweiten Ausführungsbeispiels eines Systems 6 mit einer Berechnungseinrichtung 7 und einer Entschlüsselungsvorrichtung 1 dargestellt. Das zweite Ausführungsbeispiel der Fig. 4 basiert auf dem ersten Ausführungsbeispiel der Fig. 3 und weist sämtliche Merkmale des ersten Ausführungsbeispiels der Fig. 3 auf. Darüber hinaus hat die Berechnungseinrichtung 7 der Fig. 4 ein Schutzmittel 10. Das Schutzmittel 10 ist dazu eingerichtet, das transformierte Programm P vor Manipulationen zu schützen. Dabei kann das Schutzmittel 10 insbesondere einen Nachweis über die korrekte Ausführung des transformierten Programms P durch das Anwendungsmittel 8 erstellen. Hierbei werden vorzugsweise Probabilistically-Checkable-Proofs (PCP) eingesetzt.

[0065] Fig. 5 zeigt ein Blockschaltbild eines dritten Ausführungsbeispiels eines Systems 6 mit einer Berechnungseinrichtung 7 und einer Entschlüsselungsvorrichtung 1. Das dritte Ausführungsbeispiel der Fig. 5 basiert auf dem zweiten Ausführungsbeispiel der Fig. 4 und weist sämtliche Merkmale des zweiten Ausführungsbeispiels der Fig. 4 auf. Darüber hinaus hat das System 6 der Fig. 5 ein Transforma-

tionsmittel 11. Das Transformationsmittel 11 ist dazu eingerichtet, ein Programm S zur Berechnung der Berechnungsdaten in das transformierte Programm P zu transformieren, welches von dem Anwendungsmittel 8 eingesetzt wird. Zu dieser Transformation verwendet das Transformationsmittel 11 die homomorphe Verschlüsselungsfunktion f unter Verwendung des öffentlichen Schlüssels k_2 .

[0066] Fig. 6 illustriert ein Ablaufdiagramm eines ersten Ausführungsbeispiels eines Verfahrens zum Entschlüsseln von Daten mittels einer gesicherten Vorrichtung 1, die auch als Entschlüsselungsvorrichtung 1 bezeichnet werden kann. Die Entschlüsselungsvorrichtung 1 ist beispielsweise gemäß der Fig. 1 oder Fig. 2 ausgebildet.

[0067] In Schritt 601 werden verschlüsselte Berechnungsdaten B von der Entschlüsselungsvorrichtung 1 empfangen. Die verschlüsselten Berechnungsdaten B sind durch eine homomorphe Verschlüsselungsfunktion f verschlüsselt.

[0068] In Schritt 602 werden die verschlüsselten Berechnungsdaten B durch Ausführung der Inversen I der homomorphen Verschlüsselungsfunktion f auf die verschlüsselten Berechnungsdaten B unter Verwendung eines der homomorphen Verschlüsselungsfunktion f zugeordneten privaten Schlüssels k_1 entschlüsselt.

[0069] In Fig. 7 ist ein Ablaufdiagramm eines zweiten Ausführungsbeispiels eines Verfahrens zum Entschlüsseln von Daten durch eine gesicherte Entschlüsselungsvorrichtung 1 dargestellt.

[0070] In Schritt 701 wird ein Programm S zur Berechnung der Berechnungsdaten mittels einer homomorphen Verschlüsselungsfunktion f unter Verwendung eines der homomorphen Verschlüsselungsfunktion f zugeordneten öffentlichen Schlüssels k_2 in ein transformiertes Programm P transformiert.

[0071] In Schritt 702 wird das transformierte Programm P auf Eingangsdaten A zur Bereitstellung verschlüsselter Berechnungsdaten B angewendet.

[0072] In Schritt 703 werden die verschlüsselten Berechnungsdaten B an die Entschlüsselungsvorrichtung 1 übertragen.

[0073] In Schritt 704 werden die verschlüsselten Berechnungsdaten B mittels der Entschlüsselungsvorrichtung 1 entschlüsselt. Dazu wird die Inverse I der homomorphen Verschlüsselungsfunktion f auf die verschlüsselten Berechnungsdaten B unter Verwendung des der homomorphen Verschlüsselungsfunktion f zugeordneten privaten Schlüssels k_1 angewendet. Die entschlüsselten Berechnungsdaten B liegen

dann als entschlüsselte Berechnungsdaten K im Klartext vor.

[0074] Obwohl die Erfindung im Detail durch das bevorzugte Ausführungsbeispiel näher illustriert und beschrieben wurde, so ist die Erfindung nicht durch die offenbarten Beispiele eingeschränkt und andere Variationen können vom Fachmann hieraus abgeleitet werden, ohne den Schutzzumfang der Erfindung zu verlassen.

Literaturverzeichnis

- [1] Craig Gentry: A Fully Homomorphic Encryption Scheme, Dissertation, Stanford University, September 2009
- [2] Nigel P. Smart, Frederik Vercauteren: Fully Homomorphic Encryption with Relatively Small Key and Ciphertext Sizes, Public Key Cryptography 2010, Lecture Notes in Computer Science 6056, p. 420–443, Springer 2010
- [3] Marten van Dijk, Craig Gentry, Shai Halevi, Vinod Vaikuntanathan: Fully Homomorphic Encryption over the Integers, Advances in Cryptography, EUROCRYPT 2010, Lecture Notes in Computer Science 6110, p. 24–43, Springer 2010
- [4] Craig Gentry, Shai Halevi: Fully Homomorphic Encryption without Squashing Using Depth-3 Arithmetic Circuits, FOCS 2011
- [5] Sanjeev Arora, Shmuel Safra: Probabilistic Checking of Proofs: A New Characterization of NP, Journal of the ACM, 45(1):70–122, 1998
- [6] Ingrid Biehl, Bernd Meyer, Susanne Wetzel: Ensuring the Integrity of Agent-Based Computation by Short Proofs, Mobile Agents 1998, Lecture Notes in Computer Science 1477, p. 183–194, Springer 1999
- [7] William Aiello, Sandeep N. Bhatt, Rafail Ostrovsky, Sivaramakrishnan Rajagopalan: Fast Verification of Any Remote Procedure Call: Short Witness-Indistinguishable One-Round Proofs for NP, Automata, Languages and Programming, International Colloquium ICALP 2000, Lecture Notes in Computer Science 1853, p. 463–474, Springer 2000

Patentansprüche

1. Vorrichtung (1) zum Entschlüsseln von Daten, mit: einer Anzahl von durch zumindest eine Sicherungseinrichtung (2) gesicherten Mitteln (3–5), welche ein Empfangsmittel (3) und ein Entschlüsselungsmittel (4) umfassen, wobei das Empfangsmittel (3) zum Empfangen von mittels einer homomorphen Verschlüsselungsfunktion (f) verschlüsselten Berechnungsdaten (B) eingerichtet ist, und wobei das Entschlüsselungsmittel (4) zum Entschlüsseln der verschlüsselten Berechnungsdaten (B) durch Ausführung der Inversen (I) der homomor-

phen Verschlüsselungsfunktion (f) auf die verschlüsselten Berechnungsdaten (B) unter Verwendung eines der homomorphen Verschlüsselungsfunktion (f) zugeordneten privaten Schlüssels (k1) eingerichtet ist.

2. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die mittels der zumindest einen Sicherungseinrichtung (2) gesicherten Mittel (3–5) ein Speichermittel (5) umfassen, welches dazu eingerichtet ist, ein Programm zu Berechnung der Inversen (I) der homomorphen Verschlüsselungsfunktion (f) zu speichern und dieses dem Entschlüsselungsmittel (4) bereitzustellen.

3. Vorrichtung nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass das Speichermittel (5) dazu eingerichtet ist, den der homomorphen Verschlüsselungsfunktion (f) zugeordneten privaten Schlüssel (k1) zu speichern und den gespeicherten privaten Schlüssel (k1) dem Entschlüsselungsmittel (4) bereitzustellen.

4. Vorrichtung nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass das Entschlüsselungsmittel (4) fest verdrahtet ausgebildet ist.

5. Vorrichtung nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung (1) ein Sicherheits-Token, ein USB-Token, eine Smart-Card, ein geschützter Server oder ein geschützter Rechner ist.

6. System (6), mit:
einer Einrichtung (7), welche ein Anwendungsmittel (8) zum Anwenden eines mittels der homomorphen Verschlüsselungsfunktion (f) transformierten Programms (P) auf Eingangsdaten (A) zur Bereitstellung der verschlüsselten Berechnungsdaten (B) und ein Übertragungsmittel (9) zum Übertragen der verschlüsselten Berechnungsdaten (B) aufweist, und einer Vorrichtung (1) zum Entschlüsseln der übertragenen, verschlüsselten Berechnungsdaten (B) nach einem der Ansprüche 1 bis 5.

7. System nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung (7) ein ungeschützter Rechner oder ein ungeschützter Server ist.

8. System nach Anspruch 6 oder 7, dadurch gekennzeichnet, dass das Übertragungsmittel (9) der Einrichtung (7) und das Empfangsmittel (3) der Vorrichtung (1) dazu eingerichtet sind, ein vorbestimmtes Schnittstellenprotokoll zur Übertragung der verschlüsselten Berechnungsdaten (B) auszuführen.

9. System nach einem der Ansprüche 6 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung (7) derart mit Ressourcen ausgestattet ist, um das transformierte Programm (P) innerhalb einer vorbestimmten Zeitdauer vollständig auszuführen, in welcher die Vor-

richtung (1) das transformierte Programm (P) nicht vollständig ausführen kann.

10. System nach einem der Ansprüche 6 bis 9, dadurch gekennzeichnet, dass die Einrichtung (7) ein Schutzmittel (10) aufweist, welches dazu eingerichtet ist, das transformierte Programm (P) vor Manipulation zu schützen.

11. System nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass das Schutzmittel (10) dazu eingerichtet ist, einen Nachweis über die korrekte Ausführung des transformierten Programms (P) durch das Anwendungsmittel (8), insbesondere mittels Probabilistically-Checkable-Proofs (PCP), zu erstellen.

12. System nach einem der Ansprüche 6 bis 11, dadurch gekennzeichnet, dass ein Transformationsmittel (11) zur Transformation eines Programms (S) zur Berechnung der Berechnungsdaten mittels der homomorphen Verschlüsselungsfunktion (f) unter Verwendung eines der homomorphen Verschlüsselungsfunktion (f) zugeordneten öffentlichen Schlüssels (k2) in das transformierte Programm (P) vorgesehen ist.

13. Verfahren zum Entschlüsseln von Daten mittels einer durch zumindest eine Sicherheitseinrichtung (2) gesicherten Vorrichtung (1), mit den Schritten:
Empfangen (601) von mittels einer homomorphen Verschlüsselungsfunktion (f) verschlüsselten Berechnungsdaten (B), und Entschlüsseln (602) der verschlüsselten Berechnungsdaten (B) durch Ausführung der Inversen (I) der homomorphen Verschlüsselungsfunktion (f) auf die verschlüsselten Berechnungsdaten (B) unter Verwendung eines der homomorphen Verschlüsselungsfunktion (f) zugeordneten privaten Schlüssels (k1).

14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, dass ein Programm (S) zur Berechnung der Berechnungsdaten mittels der homomorphen Verschlüsselungsfunktion (f) unter Verwendung eines der homomorphen Verschlüsselungsfunktion (f) zugeordneten öffentlichen Schlüssels (k2) in ein transformiertes Programm (P) transformiert wird.

15. Computerprogrammprodukt, welches auf einer programmgesteuerten Einrichtung die Durchführung eines Verfahrens nach Anspruch 13 oder 14 zum Entschlüsseln von Daten veranlasst.

Es folgen 4 Blatt Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

FIG 1

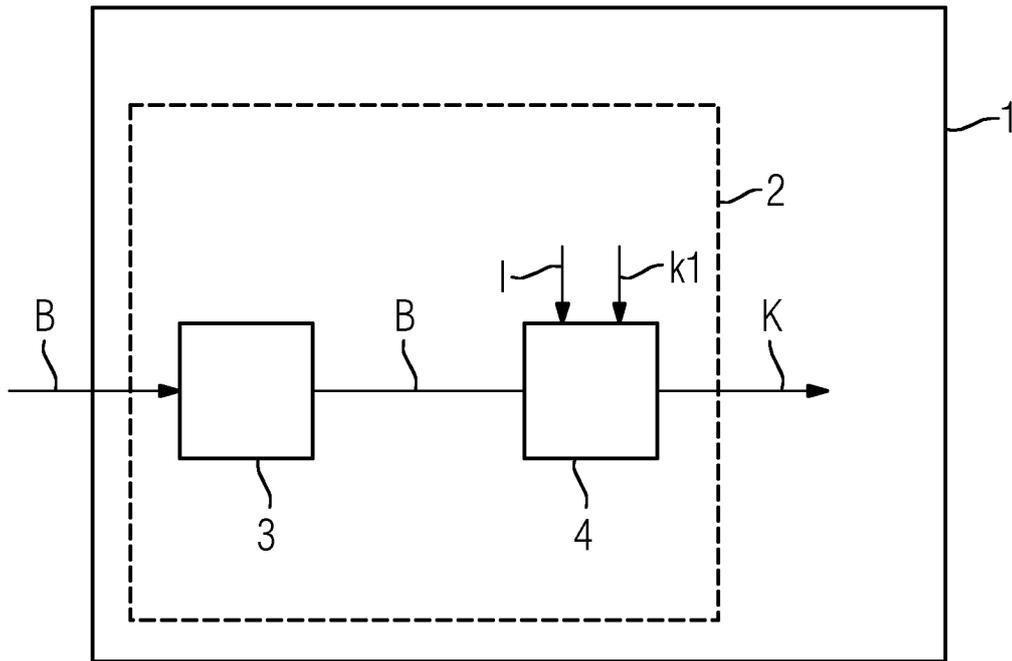


FIG 2

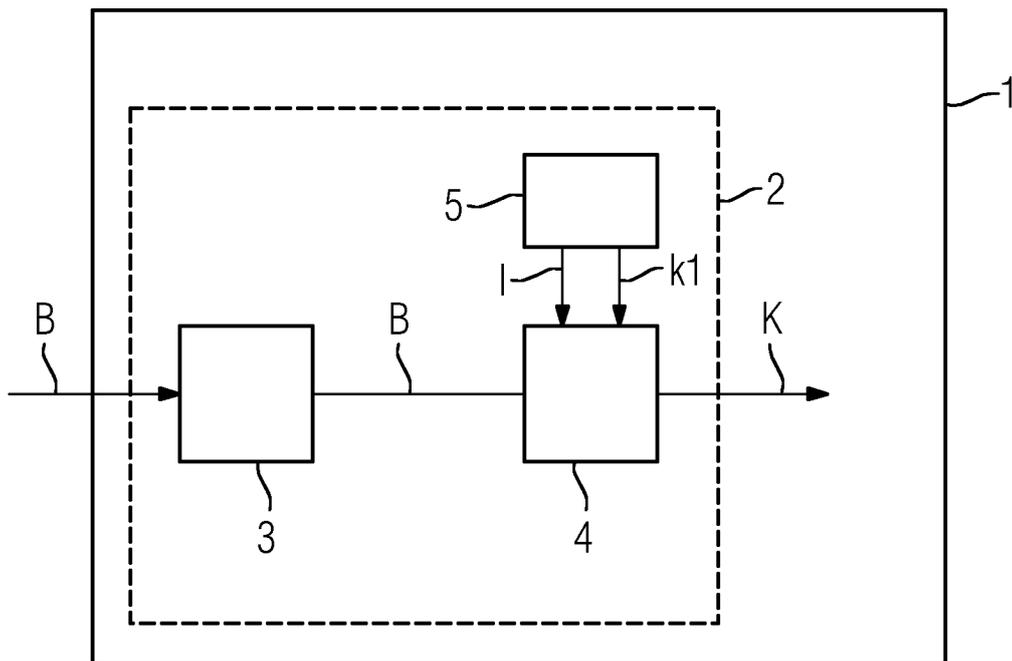


FIG 3

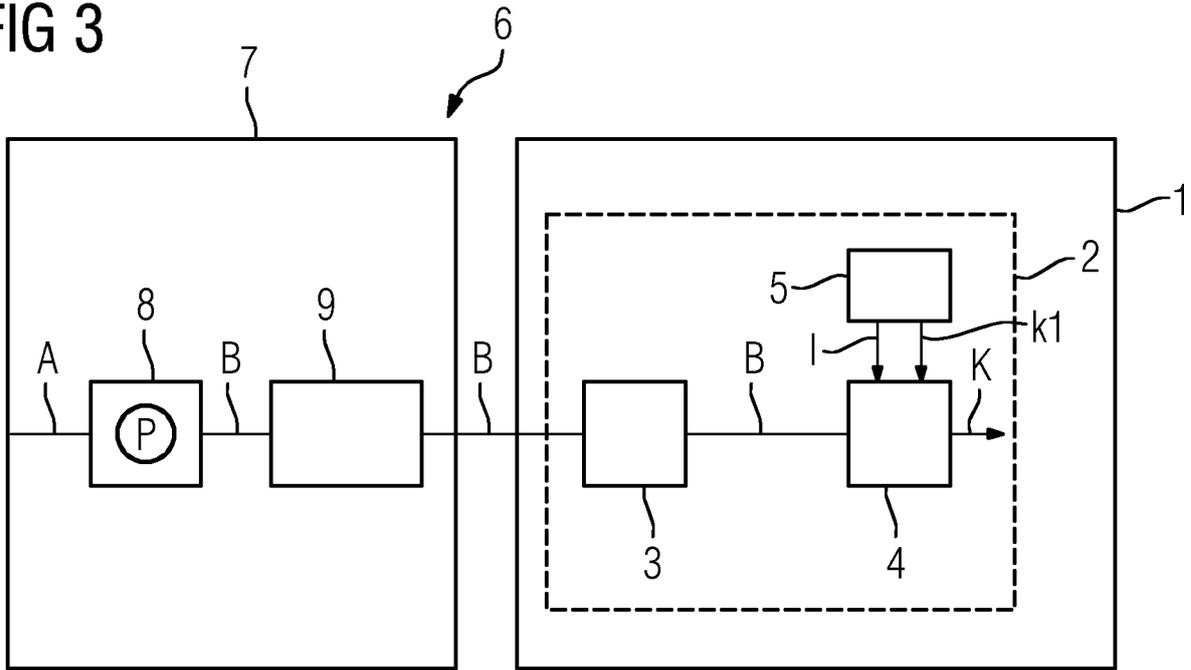


FIG 4

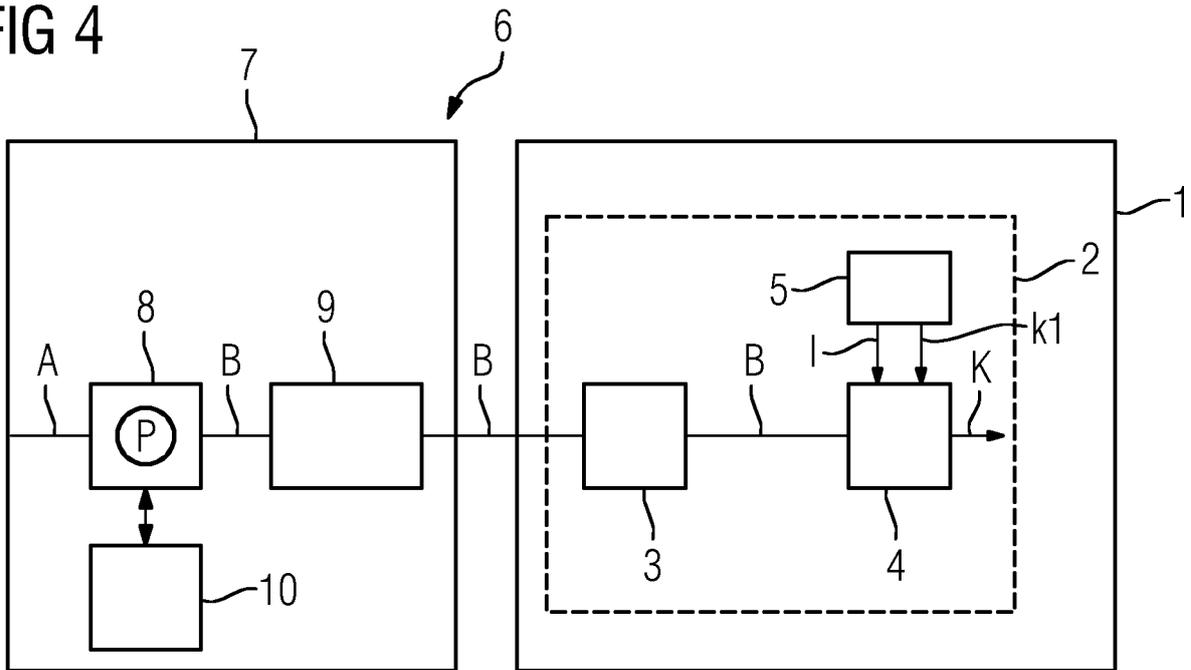


FIG 5

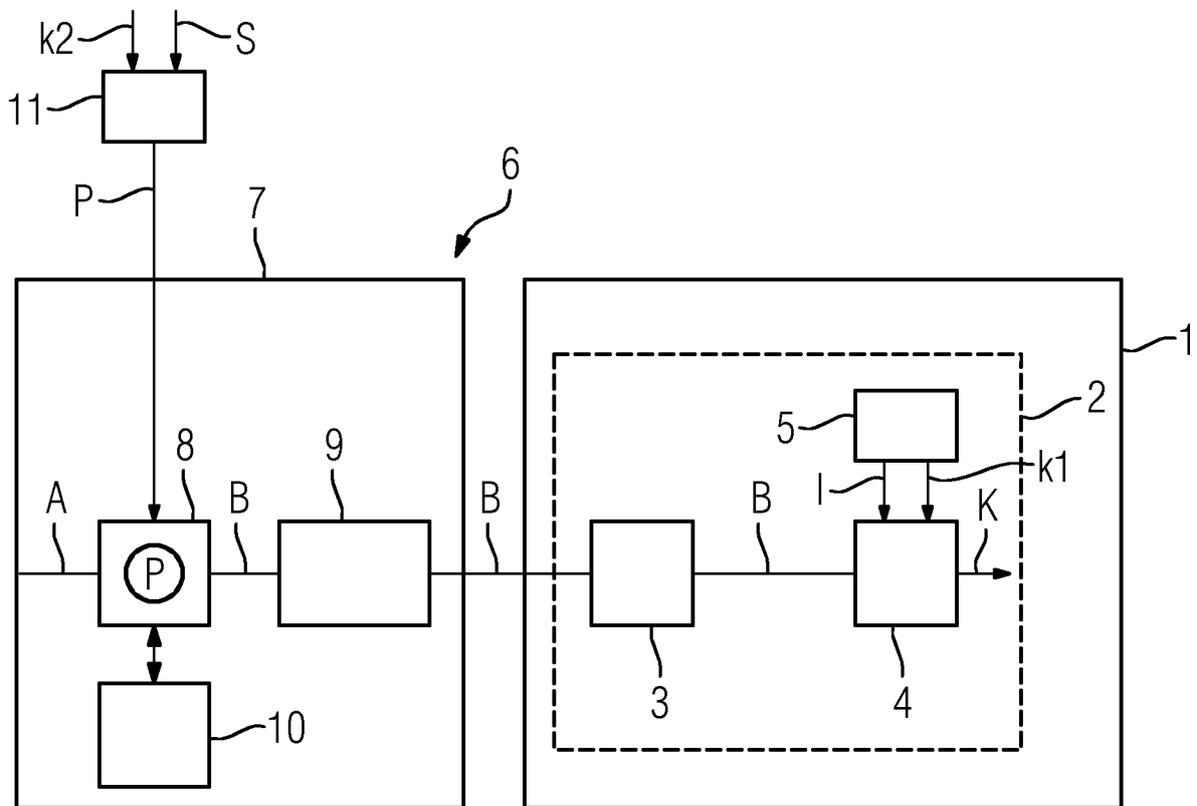


FIG 6

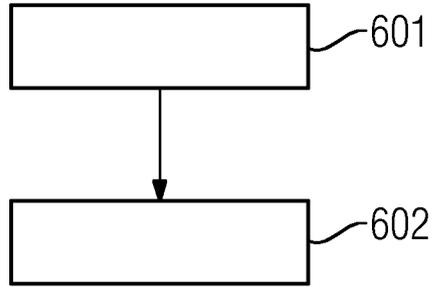


FIG 7

