



(12) **Veröffentlichung**

der internationalen Anmeldung mit der
(87) Veröffentlichungs-Nr.: **WO 2020/188380**
in der deutschen Übersetzung (Art. III § 8 Abs. 2
IntPatÜG)
(21) Deutsches Aktenzeichen: **11 2020 001 369.3**
(86) PCT-Aktenzeichen: **PCT/IB2020/051669**
(86) PCT-Anmeldetag: **27.02.2020**
(87) PCT-Veröffentlichungstag: **24.09.2020**
(43) Veröffentlichungstag der PCT Anmeldung
in deutscher Übersetzung: **09.12.2021**

(51) Int Cl.: **G06N 3/06 (2006.01)**

(30) Unionspriorität:
16/360,158 21.03.2019 US

(72) Erfinder:
**Pantazi, Angeliki, Rüsçhlikon, CH; Wozniak,
Stanislaw, Rüsçhlikon, CH; Abel, Stefan,
Rüsçhlikon, CH; Fompeyrine, Jean, Rüsçhlikon,
CH**

(71) Anmelder:
**International Business Machines Corporation,
Armonk, NY, US**

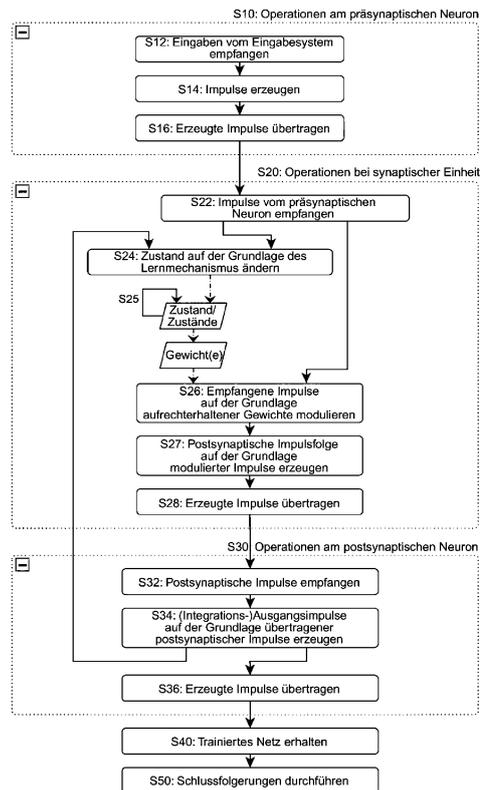
(74) Vertreter:
**LifeTech IP Spies & Behrndt Patentanwälte PartG
mbB, 80687 München, DE**

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **GEPULSTE SYNAPTISCHE ELEMENTE FÜR GEPULSTE NEURONALE NETZE**

(57) Zusammenfassung: Ausführungsformen der Erfindung sind auf das Übertragen von Signalen zwischen Neuronen eines mittels Hardware realisierten gepulsten neuronalen Netzes (bzw. SNN) gerichtet. Das Netz weist neuronale Verbindungen auf, die jeweils eine synaptische Einheit aufweisen, die ein präsynaptisches Neuron mit einem postsynaptischen Neuron verbindet. Vom präsynaptischen Neuron jeder neuronalen Verbindung werden zunächst auf der Grundlage eines in jeder synaptischen Einheit gespeicherten synaptischen Gewichts frequenzmoduliert, um postsynaptische Impulse zu erzeugen, sodass eine erste Anzahl vom präsynaptischen Neuron empfangener Impulse eine zweite Anzahl postsynaptischer Impulse umgesetzt wird. Mindestens einige der vom präsynaptischen Neuron empfangenen Impulse können jeweils in eine Folge aus zwei oder mehr postsynaptischen Impulsen umgesetzt werden. Die erzeugten postsynaptischen Impulse werden anschließend zum postsynaptischen Neuron jeder neuronalen Verbindung übertragen. Der neuartige Einsatz macht es möglich, beim Synapsenausgang einen höheren Dynamikbereich zu erhalten.



Beschreibung

HINTERGRUND

[0001] Die Erfindung betrifft allgemein Techniken zum Übertragen von Signalen zwischen Neuronen eines mittels Hardware realisierten gepulsten neuronalen Netzes. Insbesondere ist sie auf Verfahren zum Übertragen von Signalen zwischen Neuronen eines gepulsten neuronalen Netzes gerichtet, wobei von präsynaptischen Neuronen empfangene Impulse frequenzmoduliert werden (und nicht in Ströme mit sich verändernden Amplituden umgewandelt werden), um postsynaptische Impulsfolgen zu erzeugen, bevor Letztgenannte zu postsynaptischen Neuronen übertragen werden.

[0002] Maschinelles Lernen beruht oftmals auf künstlichen neuronalen Netzen (KNNs), bei denen es sich um Datenverarbeitungsmodelle handelt, die durch biologische neuronale Netze im Gehirn von Menschen oder Tieren inspiriert sind. Derartige Systeme erlernen schrittweise und selbstständig Aufgaben anhand von Beispielen, auf die sie erfolgreich angewendet wurden, z.B. Spracherkennung, Textverarbeitung und Computer Vision.

[0003] Ein KNN weist einen Satz verbundener Einheiten oder Knoten auf, die mit biologischen Neuronen in Tiergehirnen vergleichbar sind und daher als „künstliche Neuronen“ bezeichnet werden. Signale werden entlang von Verbindungen (die auch als „Kanten“ bezeichnet werden) ähnlich wie bei Synapsen zwischen künstlichen Neuronen übertragen. Das heißt, ein künstliches Neuron, das ein Signal empfängt, verarbeitet es und signalisiert es danach angeschlossenen Neuronen. In der Regel handelt es sich bei den entlang derartiger Verbindungen übermittelten Signalen um analoge reelle Zahlen, und Ausgangssignale der künstlichen Neuronen werden dank einer nichtlinearen Funktion der Summe seiner Eingangssignale berechnet.

[0004] Verbindungsgewichte (die auch als „synaptische Gewichte“ bezeichnet werden) sind den Verbindungen und Knoten zugehörig; derartige Gewichte passen sich mit dem Fortschreiten des Lernens an. Jedes Neuron kann mehrere Eingänge haben, und ein Verbindungsgewicht ist jedem Eingang zugeordnet (das Gewicht dieser bestimmten Verbindung). Derartige Verbindungsgewichte werden während einer Trainingsphase erlernt und dadurch aktualisiert. Der Lernprozess erfolgt iterativ: Datenfälle werden dem Netz unterbreitet, in der Regel jeweils einer, und die den Eingangswerten zugehörigen Gewichte werden in jedem Zeitschritt angepasst.

[0005] Es sind viele Arten neuronaler Netze bekannt, angefangen bei vorwärtsgerichteten neuronalen Netzen wie beispielsweise mehrschichtigen Perzeptro-

nen über tiefe neuronale Netze bis hin zu faltenden neuronalen Netzen. Zudem entstehen neue Arten neuronaler Netze wie beispielsweise gepulste neuronale Netze. Ein gepulstes neuronales Netz (Spiking Neural Network, SNN) unterscheidet sich von üblichen neuronalen Netzen insofern, als SNNs unter Verwendung von Impulsen arbeiten, bei denen es sich um diskrete binäre Ereignisse handelt, die zu einem beliebigen Zeitpunkt asynchron auftreten können, und nicht um Analogwerte, die in regelmäßigen Zeitschritten berechnet werden. Das heißt, SNNs berücksichtigen außer dem neuronalen und synaptischen Zustand auch das Konzept der Zeit. Das heißt, Neuronen feuern anstelle des Feuerns bei jedem Ausbreitungszyklus wie z.B. bei mehrschichtigen Perzeptronnetzen nur, wenn ein Membranpotenzial einen bestimmten Wert erreicht. Feuern bedeutet im Kontext von SNNs, dass ein Neuron ein Signal erzeugt, das andere Neuronen erreicht, die wiederum ihre Potenziale entsprechend den Signalen erhöhen oder verringern, die sie von anderen Neuronen empfangen.

[0006] Neuronale Netze sind in der Regel in Software realisiert. Ein neuronales Netz kann jedoch auch in Hardware realisiert sein, z.B. als resistive Verarbeitungseinheit oder als optisches neuromorphes System. Das heißt, bei einem mittels Hardware realisierten KNN handelt es sich um eine physische Maschine, die sich deutlich von einem klassischen Computer (Universal- oder Spezialcomputer) in der Weise unterscheidet, dass sie hauptsächlich und speziell so ausgelegt ist, dass sie ein KNN realisiert (zu Trainings- und/oder Schlussfolgerungszwecken). Ein mittels Hardware realisiertes KNN könnte im besten Fall mit einem klassischen Computer emuliert werden (obwohl nicht mit demselben Wirkungsgrad), während es nicht mehrere Datenverarbeitungsaufgaben wie ein klassischer Computer ausführen kann.

KURZDARSTELLUNG

[0007] Gemäß seinem ersten Aspekt ist die vorliegende Erfindung als Verfahren zum Übertragen von Signalen zwischen Neuronen eines mittels Hardware realisierten gepulsten neuronalen Netzes (bzw. SNN) verkörpert. Das Netz weist neuronale Verbindungen auf, die jeweils eine synaptische Einheit aufweisen, die ein präsynaptisches Neuron mit einem postsynaptischen Neuron verbindet. Im Grunde genommen beruht das Verfahren auf einem digitalen Modulationsprozess, der für jede neuronale Verbindung der neuronalen Verbindungen und an jeder synaptischen Einheit davon realisiert ist. Das heißt, von dem präsynaptischen Neuron jeder neuronalen Verbindung empfangene Impulse werden auf der Grundlage eines synaptischen Gewichts, das in jeder synaptischen Einheit gespeichert ist, zuerst frequenzmoduliert, um postsynaptische Impulse zu erzeugen. Auf

diese Weise wird eine erste Anzahl von Impulsen, die vom präsynaptischen Neuron empfangen wurden, in eine zweite Anzahl postsynaptischer Impulse umgesetzt. Die erzeugten postsynaptischen Impulse werden anschließend zum postsynaptischen Neuron jeder neuronalen Verbindung übertragen. Alle erzeugten postsynaptischen Impulse können unter Umständen die gleiche Signalamplitude haben.

[0008] Der vorliegende Ansatz macht es möglich, beim Synapsenausgang einen höheren Dynamikbereich dank der Tatsache zu erhalten, dass die in der synaptischen Einheit erzeugten diskreten Ereignisse im Vergleich zu Analogsignalen, die bei Lösungen nach dem Stand der Technik verwendet werden, bei denen Eingangsimpulse aus einem präsynaptischen Neuron am Synapsenausgang in Analogströme umgesetzt werden, besser wahrnehmbar gelesen und in jedes Ausgangsneuron integriert werden können.

[0009] Der vorstehend genannte Prozess berücksichtigt Operationen, die bei der synaptischen Einheit durchgeführt werden, in Übereinstimmung mit einem weiteren Aspekt der Erfindung, der eine Schaltung einer synaptischen Einheit betrifft. Bei Ausführungsformen wird der vorstehend genannte Prozess jedoch durch zusätzliche Schritte ergänzt, die beispielsweise durch die prä- und postsynaptischen Neuronen ausgeführt werden. Insbesondere führt dieser Prozess beim postsynaptischen Neuron jeder neuronalen Verbindung zum Erzeugen von Ausgangsimpulsen auf der Grundlage der übertragenen postsynaptischen Impulse. Ausgangsimpulse können erzeugt werden, indem beim postsynaptischen Neuron empfangene postsynaptische Impulse auf der Grundlage einer Anzahl davon integriert werden.

[0010] Bei Ausführungsformen der Erfindung weist das Verfahren ferner ein Aufrechterhalten (bei jeder synaptischen Einheit) eines Zustands auf, der das synaptische Gewicht bestimmt, wobei der Zustand gemäß einem kognitiven Lernmechanismus geändert werden kann. Insbesondere kann das Verfahren ferner ein Ändern (um noch einmal darauf hinzuweisen, bei jeder synaptischen Einheit) des Zustands gemäß dem kognitiven Lernmechanismus einerseits auf der Grundlage vom präsynaptischen Neuron empfangener Impulse und andererseits auf der Grundlage von Ausgangsimpulsen aufweisen, die bei einem oder mehreren postsynaptischen Neuronen des SNN erzeugt wurden.

[0011] Die synaptische Einheit kann so konfiguriert sein, dass ein Mechanismus einer von Impulsen und zeitlicher Steuerung abhängigen Plastizität (STDP-Mechanismus) (STDP = spike-timing-dependent plasticity) realisiert wird, der auf vom präsynaptischen Neuron empfangenen Impulsen und auf Ausgangsimpulsen beruht, die bei dem postsynaptischen Neu-

ron erzeugt wurden. Das heißt, der Zustand wird auf der Grundlage eines STDP-Mechanismus geändert.

[0012] Vom präsynaptischen Neuron empfangene Impulse können insbesondere bei jeder synaptischen Einheit moduliert werden, indem zunächst die empfangenen Impulse in ein oder mehrere elektrische Signale (gemäß einem synaptischem Gewicht, das durch den Zustand bestimmt wird) umgewandelt werden und dann auf der Grundlage der elektrischen Signale eine Frequenz der zu erzeugenden postsynaptischen Impulse festgelegt wird.

[0013] Bei Ausführungsformen umfassen die vorliegenden Verfahren zwei Zustände, d.h. außer dem vorstehend genannten Zustand (dem primären Zustand) einen sekundären Zustand. Das heißt, der Impulsmodulationsprozess weist ferner ein Aufrechterhalten eines sekundären Zustands auf, der ein kurzzeitiges synaptisches Gewicht bestimmt. Dieser sekundäre Zustand hängt von Impulsen ab, die vom präsynaptischen Neuron empfangen wurden. Das Modulationsschema weist ferner ein Vergleichen eines durch den primären Zustand bestimmten aktuellen synaptischen Gewichts mit einem Schwellenwert auf. Letztgenanntes hängt vom kurzzeitigen synaptischen Gewicht (das aus dem sekundären Zustand bestimmt wurde) ab, wodurch die postsynaptischen Impulse nur erzeugt werden, wenn das aktuelle synaptische Gewicht größer als der oder gleich dem Schwellenwert ist.

[0014] Bei einer bestimmten Klasse von Ausführungsformen ist dieser Schwellenwert gleich dem kurzzeitigen synaptischen Gewicht, wodurch das aktuelle synaptische Gewicht mit dem kurzzeitigen synaptischen Gewicht verglichen wird, während postsynaptische Impulse nur erzeugt werden, wenn das aktuelle synaptische Gewicht größer als das oder gleich dem kurzzeitigen synaptischen Gewicht ist. Die Modulation greift ferner auf ein Vergleichen des kurzzeitigen synaptischen Gewichts mit einem für den Schwellenwert zulässigen Maximalwert zurück, und wenn dementsprechend festgestellt wird, dass der Wert größer als der oder gleich dem Maximalwert ist, auf ein Zurücksetzen des kurzzeitigen synaptischen Gewichts.

[0015] Bei einer weiteren Klasse von Ausführungsformen wird der Schwellenwert zum Zweck des Vergleichens des aktuellen synaptischen Gewichts mit dem Schwellenwert als Differenz zwischen einem Maximalwert und dem kurzzeitigen synaptischen Gewicht genommen. Bei diesem Maximalwert handelt es sich um einen Maximalwert, der für die Summe aus dem aktuellen synaptischen Gewicht und dem kurzzeitigen synaptischen Gewicht zulässig ist. Das heißt, postsynaptische Impulse werden nur erzeugt, wenn das aktuelle synaptische Gewicht größer als die oder gleich der Differenz ist. Hierbei führt der Modula-

tionsprozess jedes Mal zum Zurücksetzen des kurzzeitigen synaptischen Gewichts, wenn ein postsynaptischer Impuls zur Übertragung zum postsynaptischen Neuron erzeugt wird (und nachdem dieser Impuls erzeugt wurde).

[0016] Gemäß einem weiteren Aspekt ist die Erfindung als Schaltung einer synaptischen Einheit zum Übertragen von Signalen zwischen Neuronen eines mittels hardwarerealiserten SNN verkörpert. Diese Schaltung ist so gestaltet, dass ein präsynaptisches Neuron mit einem postsynaptischen Neuron des Netzes verbunden wird, um dadurch eine neuronale Verbindung zu bilden. In Übereinstimmung mit den vorliegenden Verfahren ist die Schaltung bei Verbindung mit einem präsynaptischen Neuron und einem postsynaptischen Neuron zum Frequenzmodulieren von Impulsen gestaltet, die vom präsynaptischen Neuron empfangen wurden, und zum Übertragen der erzeugten postsynaptischen Impulse zum postsynaptischen Neuron. Vom präsynaptischen Neuron empfangene Impulse werden auf der Grundlage eines in der Schaltung gespeicherten synaptischen Gewichts moduliert, um postsynaptische Impulse zu erzeugen, wodurch während des Betriebs eine erste Anzahl vom präsynaptischen Neuron empfangener Impulse in eine zweite Anzahl postsynaptischer Impulse umgesetzt wird. Wie zuvor ausgeführt, kann die Schaltung so konfiguriert sein, dass sie postsynaptische Impulse erzeugt, die alle eine gleiche Amplitude haben.

[0017] Bei Ausführungsformen ist die Schaltung so konfiguriert, dass sie, wenn sie mit dem präsynaptischen Neuron und dem postsynaptischen Neuron verbunden ist, einen Zustand aufrechterhält, der das synaptische Gewicht bestimmt, und den Zustand einerseits auf der Grundlage von Impulsen, die vom präsynaptischen Neuron empfangen wurden, und andererseits auf der Grundlage von Impulsen ändert, die durch das postsynaptische Neuron abgegeben wurden.

[0018] Die Schaltung kann eine Impulserzeugungseinheit aufweisen, die so ausgelegt ist, dass sie während des Betriebs die postsynaptischen Impulse erzeugt und Letztgenannte zum postsynaptischen Neuron überträgt. Die Schaltung weist ferner eine memristive Einheit und eine Aktualisierungseinheit auf, die mit jedem des präsynaptischen Neurons und des postsynaptischen Neurons verbindbar und so konfiguriert sind, dass sie während des Betriebs den Zustand ändert. Die memristive Einheit ist einerseits mit der Impulserzeugungseinheit verbunden und anderenfalls mit dem präsynaptischen Neuron verbindbar. Die memristive Einheit ist anderenfalls so konfiguriert, dass sie den Zustand speichert, sodass die Impulserzeugungseinheit Impulse, die durch die memristive Einheit vom präsynaptischen Neuron empfangen wurden, auf der Grundlage eines aus dem Zu-

stand bestimmten synaptischen Gewichts modulieren und während des Betriebs die postsynaptischen Impulse erzeugen kann. Andererseits ist die memristive Einheit mit der Aktualisierungseinheit verbunden, wodurch ein durch die Aktualisierungseinheit geänderter beliebiger Zustand das synaptische Gewicht bestimmt, das während des Betriebs zum Modulieren der Impulse verwendet wird.

[0019] Bei Ausführungsformen ist die Aktualisierungseinheit so konfiguriert, dass sie einen STDP-Mechanismus auf der Grundlage von Impulsen, die vom präsynaptischen Neuron empfangen wurden, und von Ausgangsimpulsen realisiert, die beim postsynaptischen Neuron erzeugt wurden, wodurch während des Betriebs der Zustand auf der Grundlage dieses STDP-Mechanismus geändert wird.

[0020] Die memristive Einheit kann ferner so konfiguriert sein, dass sie vom präsynaptischen Neuron empfangene Impulse in ein oder mehrere elektrische Signale (z.B. Strom oder Spannung) gemäß einem synaptischen Gewicht umwandelt, das durch den in der memristiven Einheit gespeicherten Zustand bestimmt wird, und die Impulserzeugungseinheit ist ferner so ausgelegt, dass sie während des Betriebs auf der Grundlage der elektrischen Signale eine Frequenz der zu erzeugenden postsynaptischen Impulse festlegt.

[0021] Bei Ausführungsformen ist der Zustand ein primärer Zustand, und die memristive Einheit ist eine erste memristive Einheit, die so konfiguriert ist, dass sie den primären Zustand speichert. Die Schaltung der synaptischen Einheit weist ferner eine zweite memristive Einheit auf, die mit dem präsynaptischen Neuron verbindbar und so ausgelegt ist, dass sie einen sekundären Zustand speichert, der ein kurzzeitiges synaptisches Gewicht bestimmt, wobei der sekundäre Zustand während des Betriebs von den Impulsen abhängt, die durch die zweite memristive Einheit vom präsynaptischen Neuron empfangen werden.

[0022] Die Schaltung der synaptischen Einheit kann ferner einen Komparator aufweisen, wobei Letztgenanntes mit jeder der ersten memristiven Einheit und der zweiten memristiven Einheit verbunden ist, um ein aus dem primären Zustand bestimmtes aktuelles synaptisches Gewicht mit einem Schwellenwert zu vergleichen, wobei Letztgenanntes von dem aus dem sekundären Zustand bestimmten kurzzeitigen synaptischen Gewicht abhängt. Postsynaptische Impulse werden durch die Impulserzeugungseinheit nur erzeugt, wenn während des Betriebs das aktuelle synaptische Gewicht größer als der oder gleich dem Schwellenwert ist.

[0023] Bei Ausführungsformen ist der Komparator ein erster Komparator, der so ausgelegt ist, dass er

das kurzzeitige synaptische Gewicht als Schwellenwert verwendet, wodurch die postsynaptischen Impulse durch die Impulserzeugungseinheit nur erzeugt werden, wenn das aktuelle synaptische Gewicht größer als das oder gleich dem kurzzeitigen synaptischen Gewicht ist. In diesem Fall weist die Schaltung ferner einen zweiten Komparator auf, der so konfiguriert ist, dass er das kurzzeitige synaptische Gewicht mit einem für den Schwellenwert zulässigen Maximalwert vergleicht, wobei die Schaltung anderenfalls so konfiguriert ist, dass sie das kurzzeitige synaptische Gewicht zurücksetzt, wenn festgestellt wird, dass Letztgenanntes größer als der oder gleich dem Maximalwert ist.

[0024] Der Komparator ist so ausgelegt, dass er zum Vergleichen des aktuellen synaptischen Gewichts mit dem Schwellenwert auf eine Differenz zwischen einem Maximalwert und dem kurzzeitigen synaptischen Gewicht als Schwellenwert zurückgreift. Bei diesem Maximalwert handelt es sich um einen Maximalwert, der für die Summe aus dem aktuellen synaptischen Gewicht und dem kurzzeitigen synaptischen Gewicht zulässig ist, wodurch die postsynaptischen Impulse durch die Impulserzeugungseinheit nur erzeugt werden, wenn während des Betriebs das aktuelle synaptische Gewicht größer als die oder gleich der Differenz ist. Außerdem ist die Schaltung ferner so konfiguriert, dass sie das kurzzeitige synaptische Gewicht jedes Mal zurücksetzt, wenn ein postsynaptischer Impuls zur Übertragung zum postsynaptischen Neuron erzeugt wird (und nachdem dieser Impuls erzeugt wurde).

[0025] Gemäß einem letzten Aspekt ist die Erfindung als Hardwarevorrichtung verkörpert, die ein SNN realisiert, wobei das Netz eine Anzahl neuronaler Verbindungen aufweist, die jeweils ein präsynaptisches Neuron; ein postsynaptisches Neuron; und eine wie beispielsweise vorstehend beschriebene Schaltung einer synaptischen Einheit aufweisen. Die Schaltung verbindet das präsynaptische Neuron mit dem postsynaptischen Neuron.

[0026] Ein postsynaptisches Neuron kann durch eine Mehrzahl derartiger Schaltungen verbunden sein. Insbesondere kann jedes postsynaptische Neuron der neuronalen Verbindungen insbesondere durch eine Mehrzahl von Schaltungen synaptischer Einheiten des Netzes verbunden und so konfiguriert sein, dass es Ausgangsimpulse erzeugt, die auf den postsynaptischen Impulsen beruhen, die durch alle Schaltungen synaptischer Einheiten übertragen werden, die mit diesen verbunden sind.

[0027] Bei Ausführungsformen der Erfindung ist jedes postsynaptische Neuron ferner so konfiguriert, dass es die Ausgangsimpulse erzeugt, indem die durch die jeweiligen Schaltungen synaptischer Ein-

heiten übertragenen postsynaptischen Impulse auf der Grundlage einer Anzahl davon integriert werden.

[0028] Einheiten, Vorrichtungen und Verfahren, die die vorliegende Erfindung verkörpern, werden nun anhand nicht einschränkender Beispiele und unter Bezugnahme auf die beigefügten Zeichnungen beschrieben.

Figurenliste

[0029] Die beigefügten Figuren, bei denen gleiche Bezugsnummern in den einzelnen Ansichten identische oder funktional ähnliche Elemente bezeichnen und die zusammen mit der folgenden ausführlichen Beschreibung in die vorliegende Spezifikation einbezogen sind und einen Teil der vorliegenden Spezifikation bilden, dienen zur weiteren Veranschaulichung verschiedener Ausführungsformen und zur Erläuterung verschiedener Grundgedanken und Vorteile gemäß der vorliegenden Offenbarung, wobei:

die **Fig. 1A** und **Fig. 1B** Darstellungen sind, die die Funktion ausgewählter Komponenten eines mittels Hardware realisierten gepulsten neuronalen Netzes (SNN) schematisch veranschaulichen, wobei wie bei Lösungen nach dem Stand der Technik Eingangsimpulse in postsynaptische Ströme mit variierenden Amplituden umgewandelt werden;

die **Fig. 2** bis **Fig. 7** Darstellungen sind, die die Funktion ausgewählter Komponenten eines mittels Hardware realisierten SNN schematisch veranschaulichen, die zum Übertragen von Signalen zwischen Neuronen davon ausgelegt sind, wobei von präsynaptischen Neuronen empfangene Impulse frequenzmoduliert (und nicht amplitudenmoduliert) werden, um postsynaptische Impulse zu erzeugen, bevor Letztgenannte wie bei Ausführungsformen zu postsynaptischen Neuronen übertragen werden. Zu beachten ist, dass die **Fig. 2** und **Fig. 7** allgemein Grundgedanken veranschaulichen, die dem vorliegenden Ansatz zugrunde liegen, während die **Fig. 3** bis **Fig. 6** bestimmte Klassen von Ausführungsformen betreffen; und

Fig. 8 ein Flussdiagramm ist, das auf einer höheren Ebene angesiedelte Schritte eines Verfahrens zum Übertragen von Signalen zwischen Neuronen und einem mittels Hardware realisierten SNN gemäß Ausführungsformen veranschaulicht.

[0030] Die beigefügten Zeichnungen zeigen vereinfachte Darstellungen von Einheiten und Komponenten oder Teilen davon, die in Ausführungsformen enthalten sind. Ähnlichen oder funktionstechnisch ähnlichen Elementen in den Figuren wurden die gleichen Bezugsziffern zugeordnet, sofern nichts anderes angegeben ist.

AUSFÜHRLICHE BESCHREIBUNG

[0031] Eine zuverlässige und effiziente Hardware-Realisierung eines gepulsten Netzes (SNN) ist ein Problem, da kontinuierliche Signale (Werte) in der Regel durch Synapsen (an Ausgängen davon) zu postsynaptischen Neuronen übertragen werden. Wie unter Umständen vorstellbar ist, wirkt sich dies auf den Dynamikbereich von Signalen aus, die durch einen Synapsenausgang ausgegeben werden. Diese Beobachtung sowie andere Nachteile üblicher mittels Hardware realisierter SNNs hat die Erfinder der vorliegenden Erfindung veranlasst, neue Techniken zum Übertragen von Signalen zwischen Neuronen eines SNN zu entwickeln, wobei von präsynaptischen Neuronen empfangene Impulse frequenzmoduliert werden, um eine eindeutige Anzahl postsynaptischer Impulse zu erzeugen (und nicht in Ströme mit sich ändernden Amplituden umzuwandeln).

[0032] Unter Bezugnahme auf die **Fig. 2** und **Fig. 8** wird ein erster Aspekt der Erfindung beschrieben, der ein Verfahren zum Übertragen von Signalen zwischen Neuronen **11**, **14** eines mittels Hardware realisierten gepulsten neuronalen Netzes **1**, **1a** bis **1c** (im Folgenden „SNN“) betrifft. Dieses Verfahren und dessen Varianten werden zusammen als „die vorliegenden Verfahren“ bezeichnet. Bei dem SNN wird angenommen, dass es mehrere neuronale Verbindungen aufweist, die jeweils eine synaptische Einheit **20**, **20a** bis **20c** aufweisen, die ein präsynaptisches Neuron **11** mit einem postsynaptischen Neuron **14** verbindet. Diese synaptische Einheit kann insbesondere als Schaltung realisiert sein, wie später beispielsweise unter Bezugnahme auf einen weiteren Aspekt der Erfindung beschrieben wird. Das SNN kann als Ganzes als Hardwarevorrichtung realisiert sein, die ebenfalls später unter Bezugnahme auf einen letzten Aspekt der Erfindung beschrieben wird.

[0033] Das Verfahren beruht im Wesentlichen auf einem Modulationsprozess, der bei jeder synaptischen Einheit des SNN realisiert ist, d.h. für jede der neuronalen Verbindungen des Netzes. Gemäß diesem Prozess werden von einem präsynaptischen Neuron **11** empfangene **S22** Impulse **31** frequenzmoduliert **S26**, wie im Flussdiagramm von **Fig. 8** wiedergegeben. Im Hinblick auf das Erzeugen **S27** postsynaptischer Impulse **32** wird die Modulation auf der Grundlage des synaptischen Gewichts w durchgeführt, das in jeder synaptischen Einheit **20**, **20a** bis **20c** gespeichert ist. Aufgrund der Frequenzmodulation wird die Anzahl vom präsynaptischen Neuron empfangener Impulse in der Regel in eine eindeutige Anzahl postsynaptischer Impulse umgesetzt. Zum Beispiel können mindestens einige der vom präsynaptischen Neuron **11** empfangenen Impulse **31** jeweils in eine Folge aus zwei oder mehr postsynaptischen Impulsen **32** umgesetzt werden, wie in den **Fig. 7B** und **Fig. 7C** veranschaulicht. Die erzeugten

postsynaptischen Impulse **32** werden anschließend zum postsynaptischen Neuron **14** übertragen **S28**, das über die synaptische Einheit mit dem präsynaptischen Neuron **11** verbunden ist. Derselbe Prozess wird entlang jeder neuronalen Verbindung des SNN durchgeführt.

[0034] Bei Impulsen handelt es sich um durch biologische Neuronen erzeugte Impulssignale, die Aktionspotenziale hervorrufen. In ähnlicher Weise handelt es sich bei einer Impulsfolge **32** um eine zeitliche Abfolge von Impulsen, die mit Abfolgen von Aktionspotenzialen verglichen werden können, die durch biologische Neuronen erzeugt wurden.

[0035] Gemäß dem vorliegenden Ansatz wird eine erste Anzahl von Eingangsimpulsen, die vom präsynaptischen Neuron **11** empfangen wurden, am Ausgang der synaptischen Einheit **20** in eine zweite Anzahl von Impulsen **32** umgesetzt. Die postsynaptischen Impulse **32** sollen in der Regel alle eine gleiche Amplitude haben (und sei es nur, um den Erzeugungsprozess zu vereinfachen), obwohl dies keine strikte Anforderung ist. Bei Varianten können die ausgegebenen postsynaptischen Impulse **32** eindeutige Amplituden haben. Des Weiteren können die ausgegebenen Impulse **32** unter Umständen die gleiche Amplitude wie die Eingangsimpulse haben, obwohl dies keine strikte Anforderung ist.

[0036] Die Anzahl von Impulsen, die durch die synaptische Einheit ausgegeben werden, hängt von dem darin gespeicherten synaptischen Gewicht w ab. Mit anderen Worten, hierbei bestimmt anstelle einer Amplitude von Strömen, die durch die synaptische Einheit ausgegeben werden, das synaptische Gewicht die Anzahl erzeugter **S27** und ausgegebener **S28** Impulse (vergleiche die **Fig. 1** und **Fig. 2**). Interessanterweise sind die vorliegenden Methoden nichtsdestoweniger mit einem Mechanismus einer von Impulsen und zeitlicher Steuerung abhängigen Plastizität (STDP-Mechanismus) kompatibel. Allgemeiner ausgedrückt, derartige Verfahren können verschiedene Lernmechanismen umfassen. Alle derartigen Mechanismen führen mit fortschreitendem Lernen zu einem Ändern der Gewichte der neuronalen Verbindungen. Sobald das SNN ordnungsgemäß trainiert wurde **S40**, kann es zu Schlussfolgerungszwecken verwendet werden **S50**. Nach wie vor können die vorliegenden Netze **1**, **1a** bis **1c** unter Umständen nur für Schlussfolgerungszwecke verwendet werden, wodurch die Gewichte jeweils auf einen beliebigen geeigneten Wert festgelegt (d.h. programmiert) werden können, der aus einer vorhergehenden Lernphase erlernt wurde, und daher unverändert bleiben. Das heißt, die synaptischen Gewichte könnten dank einer eigenständigen Hardwarevorrichtung erlernt worden sein.

[0037] Da sich die Anzahl durch die synaptische Einheit ausgegebener **S28** Impulse aus einer Modulation ergibt, die von den in der synaptischen Einheit **20**, **20a** bis **20c** gespeicherten Gewichten abhängt, kann unter Umständen nicht jeder empfangene **S22** Impuls **31** bewirken, dass Impulse **32** erzeugt **S27** und zu einem postsynaptischen Neuron **14** übertragen **S28** werden, wie in **Fig. 7A** veranschaulicht. Vielmehr können unter Umständen tatsächlich nur einige der empfangenen Impulse **31** in eine größere (oder kleinere) Anzahl von Impulsen **32** umzuwandeln (zu modulieren) sein, siehe die **Fig. 7B** und **Fig. 7C**. Die dementsprechend erzeugte Abfolge aufeinanderfolgender Impulse kann Impulsfolgen bilden, wie am besten in **Fig. 7C** zu erkennen ist. Da die Modulation im Frequenzbereich erfolgt, werden die empfangenen **S22** Impulse **31** meistens in eine eindeutige Anzahl von Impulsen umgewandelt. Ob diese Umwandlung zu einer größeren oder kleineren Anzahl führt, hängt sowohl von den Gewichtswerten als auch vom tatsächlichen Schema ab. Zum Beispiel kann eine Impulsfolge aus einer größeren Anzahl von Impulsen erhalten werden, wie bei den in den **Fig. 3** und **Fig. 7A** bis **Fig. 7C** veranschaulichten Ausführungsformen, oder es können umgekehrt vom präsynaptischen Neuron **11** empfangene Impulse in eine größere Anzahl von Impulsen umgewandelt werden (wie bei den in den **Fig. 4** bis **Fig. 6** und **Fig. 7D** veranschaulichten Ausführungsformen). Aber da die Umwandlung außerdem von den Gewichtswerten abhängt, können bei Schritt **S22** empfangene Impulse gelegentlich zur Ausgabe **S28** eines einzigen postsynaptischen Impulses **31** oder überhaupt keines Impulses führen. Bei einigen Konfigurationen müssen unter Umständen mehr als ein Impuls **31** bei der synaptischen Einheit empfangen **S22** werden, um die Erzeugung **S27** eines postsynaptischen Impulses **32** auszulösen. In derartigen Fällen können Eingangsimpulse **31** je nach dem synaptischen Gewicht nicht direkt in einen oder mehrere postsynaptische Impulse **32** umgewandelt werden.

[0038] Der vorliegende Ansatz ermöglicht eine effiziente und zuverlässige Realisierung neuronaler Netze, die die Übertragung diskreter Ereignisse anstelle kontinuierlicher Signalwerte umfasst (vergleiche die **Fig. 2B** und **Fig. 1B**). Per Definition ist der vorliegende Ansatz mit digitaler Technologie kompatibel. Es ist anderenfalls mit einer Realisierungsform von Synapsen unter Verwendung memristiver Einheiten kompatibel, wie bei den Ausführungsformen der Erfindung, die später unter Bezugnahme auf einen weiteren Aspekt der Erfindung erörtert werden.

[0039] Der vorgeschlagene Ansatz macht es möglich, beim Synapsenausgang einen höheren Dynamikbereich dank der Tatsache zu erhalten, dass die bei der synaptischen Einheit erzeugten **S27** diskreten Ereignisse im Vergleich zu Analogsignalen **34** (siehe **Fig. 1**) besser wahrnehmbar gelesen und in jedes

Ausgangsneuron **14** integriert werden können. Tatsächlich müssen bei Ansätzen nach dem Stand der Technik, die auf analoge postsynaptische Signale zurückgreifen, die Amplituden derartiger Signale in ausreichender Weise unterschieden werden, um eine zufriedenstellende Unterscheidung zwischen Werten zu ermöglichen, die aus derartigen Amplituden gelesen werden. Dies begrenzt jedoch den Dynamikbereich, der bei Signalen am Synapsenausgang erhalten werden kann. Im Gegensatz hierzu greift der vorliegende Ansatz auf zeitliche Auflösung zurück, um die postsynaptischen Ereignisse **32** auseinanderzuhalten. Unter der Annahme eines ausreichend schnellen Erkennungsmechanismus bei den Ausgangsneuronen **14** wird verständlich, dass am Synapsenausgang ein größerer Dynamikbereich erhalten werden kann. Eine einschränkende Bedingung besteht darin, dass den erzeugten Impulsen **32** zugewiesene Zeitfenster in der Regel zu größeren Zeitrahmen führen. Letzgenanntes kann jedoch mit einer ausreichenden zeitlichen Auflösung beim Lesen kompensiert werden. Darüber hinaus kann der postsynaptische Strom **32** in kleineren Zeitschritten integriert werden, als bei Analogsignalen **34** am Membranpotenzial im empfangenden Neuron **14** verwendet werden, wobei alles Übrige ansonsten gleich ist. Zu beachten ist, dass die benötigte zeitliche Auflösung und der damit erreichbare Dynamikbereich von der Zielanwendung und der dafür gewählten Realisierungsform abhängen. Unter der beispielhaften Annahme, dass das System im Mikrosekundenbereich läuft und dass die gepulsten Synapsen unter Verwendung von Nanosekundenimpulsen getaktet werden, übertrifft der erzielte Bereich bereits eine (analoge) Standard-Synapsenkonfiguration mit einem 8-Bit-Dynamikbereich.

[0040] Das vorliegende Schema hat weitere Vorteile. Zum Beispiel ermöglicht es eine effizientere Auswahl eines Gewinnerneurons in einem „Alles oder nichts“-Netz. Das heißt, bei Verfahren nach dem Stand der Technik wird oftmals die Differenz zwischen einem Membranpotenzial und dem Schwellenwert für das Feuern verwendet, um den Gewinner zu schätzen, bei dem es sich um das erste Neuron handelt, das den Schwellenwert überschreitet. Im Gegensatz hierzu kann das Gewinnerneuron bei hierin betrachteten Ausführungsformen über ein Schwellenwertverfahren direkt bestimmt werden, ohne dass zusätzliche Berechnungen notwendig sind.

[0041] Zwar ist eine ideale analoge Synapse in der Praxis schwer zu realisieren, die vorliegenden Verfahren stellen jedoch Lösungen bereit, um die Gewichte in einer anderen Weise darzustellen. Derartige Verfahren können auf native neuromorphe Hardwaretechnologie angewendet werden und tragen daher bei kognitiven Aufgaben zu einem massiven Leistungs- und Effizienzgewinn bei. Hardwarebeschleuniger machen es möglich, derartige Aufgaben zu beschleunigen, insbesondere bei resistiven Verarbei-

tungseinheiten (resistive processing units, RPU), die aus einem Crossbar-Array aus Memristoren bestehen.

[0042] All dies wird nun unter Bezugnahme auf bestimmte Ausführungsformen der Erfindung beschrieben. Zu Beginn ist zu beachten, dass der vorstehend erwähnte Prozess Operationen berücksichtigt, die speziell bei der synaptischen Einheit **20**, **20a** bis **20c** durchgeführt werden, sei es zu Schlussfolgerungs- oder Trainingszwecken. Auf der Ebene der Vorrichtung **1**, **1a** bis **1c** werden zusätzliche Operationen gleichzeitig durchgeführt, insbesondere bei den Schaltungen, die die Neuronen **11**, **14** realisieren. Derartige Operationen sind im Flussdiagramm von **Fig. 8** enthalten, wodurch ein externes System zum Beispiel mit dem SNN verbunden werden und dadurch Signale zu diesem übertragen kann. Derartige Signale werden an jedem empfangenden Neuron als Eingänge gelesen **S12**, siehe die Phase **S10**. Dies wiederum bewirkt, dass bei den präsynaptischen Neuronen **11** Impulse erzeugt werden **S14**, wobei die Impulse anschließend zu den synaptischen Einheiten **20**, **20a** bis **20c** übertragen werden **S16**, sodass diese einen Prozess **S20** wie beispielsweise den vorstehend beschriebenen realisieren. Durch die synaptische Einheit anschließend übertragene Impulse werden an jeweiligen postsynaptischen Neuronen **14** empfangen **S32** und bewirken, dass Ausgangsimpulse erzeugt werden **S34**, und übertragen **S36** Letzgenannte zu anderen präsynaptischen Neuronen anderer Ebenen des Netzes und so weiter.

[0043] Somit können die vorliegenden Verfahren bei Ausführungsformen insbesondere Schritte aufweisen, die bei postsynaptischen Neuronen **14** realisiert werden, wodurch Ausgangsimpulse **33** auf der Grundlage **S32** übertragener postsynaptischer Impulse **32** erzeugt werden **S34**, wie in **Fig. 8** veranschaulicht. Wenn mehrere Eingangsneuronen **11** mit einem gleichen Ausgangsneuron **14** (siehe **Fig. 2B**) verbunden sind, werden aus allen benachbarten Synapsen **20** ausgegebene Neuronen letztendlich addiert **141**, um am empfangenden Neuron **14** das gesamte postsynaptische Signal (z.B. Strom) zu bilden. Das gesamte postsynaptische Signal wird am empfangenden Neuron **14** integriert **142**, um Ausgangsimpulse **33** zu erzeugen **S34**.

[0044] Der vorstehend erwähnte Prozess **S10** bis **S30** kann insbesondere zu Trainingszwecken durchgeführt werden, wie im Flussdiagramm von **Fig. 8** angenommen. Nach dem Beenden **S40** werden endgültige Gewichte erhalten, die anschließend zu Schlussfolgerungszwecken **S50** verwendet werden können. Das heißt, die endgültigen Gewichte können im selben Netz unverändert aufrechterhalten oder an ein weiteres Netz übermittelt werden, um damit Schlussfolgerungen zu ziehen. Zu beachten ist, dass die vorstehend beschriebenen Schritte **S26** bis **S28** glei-

chermaßen zu Schlussfolgerungszwecken durchgeführt werden können. Auch in diesem Fall werden von präsynaptischen Neuronen **11** empfangene Eingänge moduliert **S26**, wodurch Impulse erzeugt werden, die zu postsynaptischen Neuronen **14** übertragen werden, sodass das SNN Signale ausgibt, die als Ergebnisse (Schlussfolgerungen) interpretiert werden.

[0045] Während einer Trainingsphase können die synaptischen Gewichte aufgrund von Zuständen bestimmt werden, die bei den synaptischen Einheiten aufrechterhalten werden. Wie in **Fig. 8** zu erkennen ist, hält somit jede synaptische Einheit **20**, **20a** bis **20c** einen Zustand aufrecht **S25**, der das synaptische Gewicht w bestimmt, das wiederum verwendet wird, um Eingangsimpulse **31** zu modulieren **S26**. Dieser Zustand kann gemäß einem kognitiven Lernmechanismus geändert werden, um die Gewichte in geeigneter Weise anzupassen. Wie zuvor ausgeführt, kann es sich bei dem kognitiven Mechanismus zum Beispiel um einen STDP-Mechanismus handeln. Bei Varianten kann dieser Lernmechanismus ein beliebiges geeignetes (z.B. globales) Lernschema wie beispielsweise ein Rückwärtsausbreitungsmechanismus sein. Bei anderen Varianten kann das SNN jedoch einfach so gestaltet sein, dass ein Schlussfolgerungsmodul realisiert wird, wie zuvor angemerkt. Das heißt, die Gewichte können auf der Grundlage an anderer Stelle erlernter Gewichte festgelegt (d.h. programmiert) werden.

[0046] Derartige Zustände können insbesondere durch Widerstandszustände von Einheitenelementen erfasst werden, die einen Teil der synaptischen Einheit **20**, **20a** bis **20c** bilden. Zum Beispiel können insbesondere memristive Einheiten **21**, **21a** bis **21c** verwendet werden, siehe die **Fig. 3** bis **Fig. 6**. Derartige Einheiten können als elektrische Widerstandsschalter betrachtet werden, die in der Lage sind, auf der Grundlage des Verlaufs von angelegter Spannung und zugeführtem Strom einen Zustand des Innenwiderstands zu speichern. Das heißt, eine memristive Einheit ist in der Lage, einen Zustand des Innenwiderstands auf der Grundlage zuvor angelegter Spannungen und zugeführter Ströme (d.h. des Verlaufs der Spannungen und Ströme) zu speichern. Eine derartige Einheit kann dementsprechend verwendet werden, um Informationen zu speichern und zu verarbeiten. Im vorliegenden Kontext können die Leistungseigenschaften memristiver Einheiten im Vergleich zu herkömmlichen integrierten Schaltungen besser sein.

[0047] Lernmechanismen bewirken, dass auf der Grundlage von Impulsen **31**, die von präsynaptischen Neuronen **11** empfangen wurden **S22**, sowie von Ausgangsimpulsen **33**, die bei postsynaptischen Neuronen **14** des SNN **1**, **1a** bis **1c** erzeugt wurden **S34**, Zustände geändert werden **S24**, die bei den synaptischen Einheiten **20**, **20a** bis **20c** aufrechterhalten werden. Zu beachten ist, dass ein lokaler Lern-

mechanismus außer auf Impulse, die vom präsynaptischen Neuron **11** empfangen wurden, allein auf Impulse zurückgreift, die durch das postsynaptische Neuron **14** lokal ausgegeben wurden, wie in **Fig. 2** angenommen. Das heißt, jede synaptische Verbindung erlernt ihr jeweiliges Gewicht auf der Grundlage von Impulsen **31**, die vom jeweiligen präsynaptischen Neuron **11** empfangen wurden, und von Ausgangsimpulsen **33**, die am jeweiligen postsynaptischen Neuron **14** erzeugt wurden. Zum Beispiel können die synaptischen Einheiten **20**, **20a** bis **20c** einen STDP-Mechanismus oder einen STDP-ähnlichen Mechanismus realisieren, wie in den beigefügten Zeichnungen angenommen. Ein derartiger Mechanismus bewirkt, dass jede synaptische Einheit Zustände, die sie aufrechterhält, einerseits auf der Grundlage von Impulsen **31**, die vom jeweiligen präsynaptischen Neuron **11** empfangen wurden **S22**, und andererseits auf der Grundlage von Ausgangsimpulsen **33** ändert **S24**, die am entsprechenden postsynaptischen Neuron **14** erzeugt **S34** wurden. Bei Varianten kann ein globales Lernschema verwendet werden, das auch Ausgangsimpulse berücksichtigt, die durch andere Neuronen ausgegeben wurden.

[0048] Wie in **Fig. 2B** veranschaulicht, können Ausgangsimpulse **33** erzeugt werden **S34**, indem bei postsynaptischen Neuronen **14** empfangene postsynaptische Impulse **32** auf der Grundlage einer Anzahl davon integriert werden. Zum Beispiel können bei einem postsynaptischen Element **20** Eingangsimpulse **31**, die vom präsynaptischen Neuron **11** empfangen wurden, in Folgen von Impulsen umgesetzt werden, die alle die gleiche Amplitude haben, wobei die Anzahl von Impulsen vom synaptischen Gewicht abhängt. Wie in **Fig. 2B** zu erkennen ist, wird bei einer Synapse j ein Eingangsimpuls **31** lokal in eine Impulsfolge umgesetzt, die im Falle eines Integrieren-und-Feuern-Neurons (IF-Neurons) zum folgenden Beitrag zu dessen neuronalem Membranpotenzial führt:

$$\Delta V_j (\Delta t_{sp}) = \sum_{t \in \Delta t_{sp}} q_j (t) = w_j b.$$

[0049] In der vorstehend aufgeführten Gleichung steht Δt_{sp} für das Zeitintervall für jeden Eingangsimpuls, und $q_j (t)$ bezeichnet eine Impulsausgabe bei Synapse j . Alle derartigen Ausgaben haben eine gleiche Amplitude, sodass ihre Summe proportional zum synaptischen Gewicht w_j (bis zu einem Faktor b) ist.

[0050] Der STDP-Mechanismus ist ansonsten unverändert. Impulse von allen Synapsen j , die ein gleiches Ausgangsneuron **14** erreichen, werden addiert, um bei diesem empfangenden Neuron **14** den gesamten postsynaptischen Strom zu bilden, und der gesamte postsynaptische Strom wird beim empfangenden Neuron **14** in das Membranpotenzial integriert, um die Ausgangsimpulse **33** zu erzeugen. Somit kann der Gesamtbeitrag des postsynaptischen

Stroms geschrieben werden, der über einen von t_0 bis t_1 reichenden Zeitraum in das Membranpotenzial V integriert wird:

$$\Delta V (t_0 t_1) = \sum_{t=t_0}^{t_1} \sum_{j=1}^n x_j (t) w_j b,$$

wobei $x_j (t)$ das Auftreten eines Eingangsimpulses bei der Synapse j zum Zeitpunkt t bezeichnet (es liegen n Verbindungen vor, die in diesem Fall zum interessierenden Ausgangsneuron führen), w_j das synaptische Gewicht ist und b eine Konstante ist.

[0051] Im Gegensatz hierzu wird bei Lösungen nach dem Stand der Technik (siehe die **Fig. 1A** und **Fig. 1B**) jeder Eingangsimpuls **31** von einem präsynaptischen Neuron **11** in einen Analogstrom **34** am Synapsenausgang (postsynaptischer Strom) umgesetzt, wobei die Amplitude des Stroms vom synaptischen Gewicht abhängt. Wie in **Fig. 1B** zu erkennen ist, wird ein Eingangsimpuls **31** lokal in den folgenden Beitrag zum Membranpotenzial umgesetzt:

$$\Delta V_j (\Delta t_{sp}) = w_j \alpha,$$

wobei Δt_{sp} für ein Zeitintervall für jeden Eingangsimpuls steht, w_j das synaptische Gewicht ist und α eine Konstante ist. Das synaptische Gewicht variiert gemäß der Aktivität der prä- und postsynaptischen Neuronen (z.B. gemäß einem STDP-Mechanismus). Die Ströme von allen Synapsen werden addiert, um beim empfangenden Neuron den gesamten postsynaptischen Strom zu bilden, und der gesamte postsynaptische Strom wird beim empfangenden Neuron in das Membranpotenzial integriert, um Ausgangsimpulse zu erzeugen. Somit kann in diesem Fall der Gesamtbeitrag des postsynaptischen Stroms geschrieben werden, der über einen von t_0 bis t_1 reichenden Zeitraum integriert wird:

$$\Delta V (t_0, t_1) = \sum_{t=t_0}^{t_1} \sum_{j=1}^n x_j (t) w_j \alpha.$$

[0052] Eine erste Klasse von Ausführungsformen wird nun unter Bezugnahme auf **Fig. 3** beschrieben. Bei diesem Beispiel werden vom präsynaptischen Neuron **11** empfangene **S22** Impulse **31** moduliert **S26** (bei jeder synaptischen Einheit **20**), indem infolge einer memristiven Einheit **21** zunächst die empfangenen Impulse **31** in elektrischen Strom umgewandelt werden **S262**. Zu beachten ist, dass allgemeiner ausgedrückt derartige Impulse zunächst in elektrische Signale umgewandelt werden können (auf Spannungssignale zurückgegriffen werden kann). In allen Fällen hängt die Modulation vom aktuellen synaptischen Gewicht w ab, das selbst durch den aktuellen Zustand der Synapse **20** bestimmt wird. Danach wird infolge einer Impulserzeugungseinheit **22**

die Frequenz der zu erzeugenden postsynaptischen Impulse **32** auf der Grundlage der elektrischen Signale und vor dem Erzeugen der Impulse **32** festgelegt **S264**.

[0053] Bei dem konkreten Beispiel von **Fig. 3** bildet die dargestellte Einheit Teil einer Hardwarevorrichtung **1** und weist eine memristive Einheit **21** auf, die das synaptische Gewicht w speichert, einen Schaltungsblock **15**, der die gewünschte Lernregel realisiert, sowie einen Impulserzeugungsblock **22**, der Impulse (in vordefinierten Intervallen) mit einer Impulsfrequenz erzeugt, die vom aktuellen synaptischen Gewicht w abhängt. Die Impulserzeugungseinheit **22** kann zum Beispiel aus Realisierungsformen neuronaler Schaltungen angepasst sein, wie beispielsweise in den im Abschnitt „Hintergrund“ zitierten Referenzen beschrieben. Die Funktion des in **Fig. 3** beschriebenen synaptischen Elements ist wie folgt. Die vom präsynaptischen Neuron **11** empfangenen Eingangsimpulse **31** erzeugen am memristiven Element **21** Leseereignisse. Der entstehende Lesestrom legt die Frequenz postsynaptischer Impulse beim Impulserzeugungsblock **22** auf der Grundlage dessen fest, welche postsynaptischen Impulse erzeugt werden **S27**. Damit einhergehend wird das synaptische Gewicht w unter Verwendung einer vorgegebenen Lernregel aktualisiert, z.B. auf der Grundlage der STDP.

[0054] Ein ähnlicher Prozess ist in den **Fig. 4** und **Fig. 5** beteiligt, mit den folgenden Bedingungen. Die **Fig. 4** und **Fig. 5** geben zwei weitere Klassen von Ausführungsformen wieder, die erfordern, dass die synaptischen Einheiten jeweils einen weiteren Zustand (der als „sekundärer Zustand“ bezeichnet werden kann) aufrechterhalten **S25**. Das heißt, der primäre Zustand bestimmt das Gewicht w , während der bei einer Synapse aufrechterhaltene **S25** sekundäre Zustand ein kurzzeitiges synaptisches Gewicht w_s bestimmt. Wie in den **Fig. 4** und **Fig. 5** zu erkennen ist, hängt Letztgenanntes außerdem von Impulsen **31** ab, die vom präsynaptischen Neuron **11** empfangen wurden. Ausführlicher ausgedrückt, von präsynaptischen Neuron **11** empfangene **S22** Impulse **31** werden jetzt durch Vergleichen **23a**, **23b** des aktuellen synaptischen Gewichts w mit einem Schwellenwert moduliert **S26**. Letztgenanntes hängt vom kurzzeitigen synaptischen Gewicht w_s ab. Die postsynaptischen Impulse **32** werden nur erzeugt **S27**, wenn das aktuelle synaptische Gewicht w größer als der oder gleich dem Schwellenwert ist.

[0055] Zu diesem Zweck kommen die Komparatoren **23a**, **23b** zum Einsatz. Der vorstehend erwähnte Vergleich läuft auf ein Auswerten eines Bedingungs-konstrukts für ein aktuelles synaptisches Gewicht w in Bezug auf den Schwellenwert hinaus. Dieser Wert kann auf unterschiedliche Weise definiert werden. Insbesondere kann der Schwellenwert als gleich ei-

nem kurzzeitigen synaptischen Gewicht w_s oder als Differenz $w_{\max} - w_s$ genommen werden, wobei w_{\max} ein für die Summe $w + w_s$ zulässiger Maximalwert ist.

[0056] Ausführlicher erläutert, bei Ausführungsformen wie beispielsweise der in **Fig. 4** dargestellten wird der Schwellenwert als gleich dem kurzzeitigen synaptischen Gewicht w_s genommen, sodass das aktuelle synaptische Gewicht w mit w_s verglichen **23a** wird und postsynaptische Impulse **32** nur erzeugt werden **S27**, wenn das aktuelle synaptische Gewicht w zufällig größer als oder gleich w_s ist. Der Modulations- und Erzeugungsprozess **S26** bis **S27** beinhaltet einen Vergleich **24a** zwischen w_s und dem für w_s zulässigen Maximalwert w_{\max} . Wenn festgestellt wird, dass w_s größer als der oder gleich dem Maximalwert ist, wird als Nächstes das kurzzeitige Gewicht w_s , d.h. ein Parameter, der möglicherweise auf einen beliebigen Wert zwischen 0 und w_{\max} eingestellt werden kann, auf seinen Anfangswert zurückgesetzt.

[0057] Bei dem konkreten Beispiel von **Fig. 4** bildet die dargestellte Einheit Teil einer Hardwarevorrichtung **1a**, die eine memristive Einheit **21a** aufweist, die das synaptische Gewicht w speichert, eine memristive Kurzzeitspeichereinheit **25a**, die die Anzahl postsynaptischer Impulse bei Modulation bestimmt, sowie zwei Komparatorblöcke **23a**, **24a**. Wie in **Fig. 3** realisiert der Schaltungsblock **15** die Lernregel. Jetzt erzeugt der Impulserzeugungsblock **22a** jedoch Impulse, die von der Ausgabe des Komparatorblocks **23a** abhängen. Die Funktion des synaptischen Elements ist wie folgt. Eingänge der Kurzzeitspeichereinheit **25a** (die w_s speichert) werden unter Verwendung eines Schreibimpulses für jeden eingehenden Impuls akkumuliert. Eingehende Impulse erzeugen Leseereignisse für beide memristive Elemente **21a**, **25a**. Ein Ausgangsimpuls wird nur erzeugt, wenn $w \geq w_s$, während die memristive Kurzzeitspeichereinheit **25a** zurückgesetzt wird, wenn $w_s \geq w_{\max}$. In der Zwischenzeit wird das synaptische Gewicht w unter Verwendung einer vorgegebenen Lernregel aktualisiert. Bei einem geringen synaptischen Gewicht w ist somit nach wenigen eingehenden Ereignissen die Bedingung $w \geq w_s$ nicht mehr gültig, und die Synapse **20a** beendet das Feuern. Im Gegensatz hierzu bleibt die Bedingung $w \geq w_s$ bei einem hohen synaptischen Gewicht w während mehrerer eingehender Ereignisse gültig.

[0058] Bei Ausführungsformen wie beispielsweise der in **Fig. 5** veranschaulichten wird der Schwellenwert als Differenz $w_{\max} - w_s$ zwischen einem Maximalwert w_{\max} und dem kurzzeitigen synaptischen Gewicht w_s genommen. Zu beachten ist, dass es sich bei dem Maximalwert jetzt um einen für die Summe $w + w_s$ zulässigen Maximalwert handelt. Somit wird das aktuelle Gewicht w jetzt mit der Differenz $w_{\max} - w_s$ verglichen **23b**, und die postsynaptischen Impulse **32** werden nur erzeugt **S27**, wenn das aktuelle

synaptische Gewicht w größer als diese oder gleich dieser Differenz ist. Das kurzzeitige synaptische Gewicht w_s wird hierbei jedes Mal zurückgesetzt **22b**, wenn ein postsynaptischer Impuls **32** zur Übertragung zum postsynaptischen Neuron **14** erzeugt **S27** wird, d.h. nachdem dieser Impuls erzeugt wurde **S27**.

[0059] Bei dem konkreten Beispiel von **Fig. 5** bildet die Einheit Teil einer Hardwarevorrichtung **1b** und weist Komponenten **15**, **21b**, **22b** und **25b** auf, die den Komponenten **15**, **21a**, **22a** und **25a** von **Fig. 4** ähneln. Dieses Element beinhaltet jedoch keinen zweiten Komparator. Stattdessen addiert ein Addiererblock **26** von den memristiven Elementen **21b**, **25b** erhaltene Signale, und der Impulserzeugungsblock erzeugt Impulse, die von der Ausgabe des Komparatorblocks **23b** abhängen. Dieses Element wird wie folgt betrieben. Eingaben werden unter Verwendung eines Schreibimpulses für jeden eingehenden Impuls **31** in der Kurzzeitspeichereinheit **25b** akkumuliert. Nach wie vor erzeugen eingehende Impulse **31** Leseereignisse bei beiden Elementen **21b**, **25b**. Ein Ausgangsimpuls wird erzeugt, wenn $w + w_s \geq w_{\max}$. Bei Varianten kann die Synapse **20b** mehrere Impulse (in einem vordefinierten Intervall) mit einer Impulsfrequenz erzeugen, die vom synaptischen Gewicht abhängt. Die Kurzzeitspeichereinheit **25b** wird in diesem Fall nach jedem Ereignis des Ausgangsfeuerns zurückgesetzt. Das synaptische Gewicht w wird gleichzeitig durch den Schaltungsblock **15** zurückgesetzt. Bei einem niedrigen synaptischen Gewicht w werden mehrere eingehende Ereignisse (die ebenfalls das Gewicht w_s erhöhen) benötigt, damit die Summe $w + w_s$ den Wert w_{\max} erreicht. Im Gegensatz hierzu kann die Summe $w + w_s$ bei einem bereits hohen synaptischen Gewicht w infolge eines einzigen eingehenden Ereignisses w_{\max} möglicherweise leichter erreichen.

[0060] **Fig. 6** gibt eine weitere Klasse von Ausführungsformen wieder, bei der Eingangsimpulse über einen spannungsgesteuerten Oszillator **28** Schwingungen auslösen. Hierbei wird die Frequenz oder die Dämpfung der Oszillatorschaltung durch das Gewicht w gesteuert, das in der Memristoreinheit **21c** gespeichert ist. Ein großer Gewichtswert führt zu einer hohen Frequenz oder einer niedrigen Dämpfung, während ein kleiner Gewichtswert zu einer niedrigen Frequenz oder einer hohen Dämpfung führt. Das heißt, das Gewicht der Memristoreinheit **21c** wird verwendet, um für die Einheit **29c** einen Schwellenwert für das Pulsen zu bestimmen. Wenn die Spannung einen Schwellenwert V_{th} überschreitet, wird ein einzelner Impuls erzeugt.

[0061] Unter Bezugnahme auf die **Fig. 2A**, **Fig. 3** bis **Fig. 6** wird nun ein weiterer Aspekt der Erfindung ausführlich beschrieben, der Schaltungen **20**, **20a** bis **20c** synaptischer Einheiten zum Übertragen von Signalen zwischen Neuronen **11**, **14** eines mittels

Hardware realisierten SNN **1**, **1a** bis **1c** betrifft. Die Komponenten und die Funktion derartiger Schaltungen wurden bereits unter Bezugnahme auf die vorliegenden Verfahren beschrieben. Die Haupteigenschaften dieser Schaltungen werden daher im Folgenden nur kurz beschrieben. Eine derartige synaptische Schaltung ist allgemein so gestaltet, dass ein präsynaptisches Neuron **11** mit einem postsynaptischen Neuron **14** des Netzes verbunden wird, um so eine neuronale Verbindung zu bilden. Wenn sie in geeigneter Weise mit einem präsynaptischen Neuron **11** und einem postsynaptischen Neuron **14** verbunden ist, ermöglicht diese Schaltung, dass vom präsynaptischen Neuron **11** empfangene Impulse **31** auf der Grundlage des darin gespeicherten synaptischen Gewichts w frequenzmoduliert werden, sodass ein postsynaptischer Impuls **32** erzeugt wird. Das heißt, vom präsynaptischen Neuron **11** empfangene Impulse **31** können in eine eindeutige Anzahl postsynaptischer Impulse **32** umgesetzt werden, bevor die erzeugten postsynaptischen Impulse **32** während des Betriebs zum postsynaptischen Neuron **14** übertragen werden.

[0062] Wie ausgeführt kann eine derartige Schaltung so konfiguriert sein, dass postsynaptische Impulse **32** erzeugt werden, die alle eine gleiche Amplitude haben. Darüber hinaus kann die Schaltung zum Beispiel einen Zustand aufrechterhalten, der das synaptische Gewicht w bestimmt, und den Zustand einerseits auf der Grundlage von Impulsen **31**, die vom präsynaptischen Neuron **11** empfangen wurden, und andererseits von Impulsen **33** ändern, die während des Betriebs durch das postsynaptische Neuron **14** ausgegeben wurden, mit dem sie verbunden ist.

[0063] Wie in den **Fig. 3** bis **Fig. 5** zu erkennen ist, kann die Schaltung eine Erzeugungseinheit **22**, **22a** bis **22c** aufweisen, wobei diese Einheit so ausgelegt ist, dass postsynaptische Impulse **32** erzeugt werden und die dementsprechend erzeugten postsynaptischen Impulse **32** während des Betriebs zu einem postsynaptischen Neuron **14** übertragen werden. In der Regel bildet eine Aktualisierungseinheit **15** einen Teil der Schaltung. Die Einheit **15** ist so angeordnet, dass sie mit dem Neuronenpaar **11**, **14** verbindbar ist. Die Einheit **15** dient zum Ändern des Zustands der Schaltung (z.B. auf der Grundlage eines STDP-Mechanismus), um während des Betriebs zu ermöglichen, dass das Gewicht erlernt wird. Darüber hinaus kann die Schaltung eine memristive Einheit **21**, **21a** bis **21c** aufweisen, wobei Letztgenanntes mit jeder der Impulserzeugungseinheit und der Aktualisierungseinheit **15** verbunden ist. Die memristive Einheit ist mit der Impulserzeugungseinheit **22**, **22a** bis **22c** verbunden; Anderenfalls ist sie mit einem präsynaptischen Neuron **11** verbunden. Wie zuvor erläutert ist die memristive Einheit **21**, **21a** bis **21c** so ausgelegt, dass sie einen Widerstandszustand speichert, sodass die Impulserzeugungseinheit **22**, **22a** bis **22c**

Impulse **31**, die durch die memristive Einheit vom präsynaptischen Neuron **11** empfangen wurden, auf der Grundlage eines aus diesem Zustand bestimmten synaptischen Gewichts w modulieren und während des Betriebs postsynaptische Impulse **32** erzeugen kann. Die memristive Einheit ist des Weiteren mit der Aktualisierungseinheit **15** verbunden: ein beliebiger (durch die Aktualisierungseinheit **15** geänderter) Zustand der memristiven Einheit bestimmt das synaptische Gewicht w (bzw. dessen Änderung), das während des Betriebs selbst die Modulation der Impulse **31** bestimmt.

[0064] Wie in **Fig. 3** veranschaulicht, kann die memristive Einheit **21**, **21a**, **21b** insbesondere so konfiguriert sein, dass sie Impulse **31** in einem Ausmaß in elektrischen Strom umwandelt, das durch das synaptische Gewicht w bestimmt wird, das selbst durch den Zustand bestimmt wird, der durch die memristive Einheit gespeichert wird. Ergänzend kann die Impulserzeugungseinheit **22**, **22a** bis **22c** so gestaltet sein, dass sie die Frequenz der postsynaptischen Impulse **32** auf der Grundlage eines derartigen Stroms festlegt, um während des Betriebs Impulse **31** zu modulieren, die vom präsynaptischen Neuron **11** empfangen wurden.

[0065] Die Erfinder der vorliegenden Erfindung haben eine Anzahl von Versuchen durchgeführt, um die Gültigkeit des vorliegenden Ansatzes zu prüfen. Insbesondere haben sie die Möglichkeit zum Erkennen von Korrelationen mit einem Neuron getestet und bestätigt, das durch mehrere Eingangsströme verbunden ist, wobei dieses Neuron wie oben beschrieben anderenfalls mit einer Schaltung einer synaptischen Einheit verbunden ist. Wie sie schlussfolgerten, macht es ein gepulstes synaptisches Element zweifelsfrei möglich zu ermitteln, ob einige der Eingangsdatenströme statistisch korreliert sind.

[0066] Unter Bezugnahme auf die **Fig. 4**, **Fig. 5** kann eine derartige Schaltung einer synaptischen Einheit **20a**, **20b** ferner so konfiguriert sein, dass sie eindeutige Zustände speichert, d.h. einen primären Zustand und einen sekundären Zustand. Der primäre Zustand wird durch die erste memristive Einheit **21a**, **21b** gespeichert, während eine zweite memristive Einheit **25a**, **25b** bereitgestellt ist (die, um noch einmal darauf hinzuweisen, mit einem präsynaptischen Neuron **11** verbindbar ist), um den sekundären Zustand zu speichern. Letztgenanntes bestimmt das kurzzeitige synaptische Gewicht w_s . Wie zuvor beschrieben hängt der sekundäre Zustand von Impulsen **31** ab, die durch die zweite memristive Einheit während des Betriebs vom präsynaptischen Neuron **11** empfangen wurden.

[0067] Wie ferner in den **Fig. 4**, **Fig. 5** zu erkennen ist, kann die Schaltung der synaptischen Einheit **20a**, **20b** ferner einen Komparator **23a**, **23b** aufweisen.

Letztgenannter ist mit jeder der ersten memristiven Einheit **21a**, **21b** und der zweiten memristiven Einheit **25a**, **25b** verbunden, um ein aktuelles synaptisches Gewicht w mit einem Schwellenwert vergleichen zu können. Wie zuvor erläutert, kann der Schwellenwert auf verschiedene Weise definiert werden. In allen Fällen hängt der Schwellenwert vom kurzzeitigen synaptischen Gewicht w_s ab, das selbst aus dem zweiten Zustand ermittelt wird. Die postsynaptischen Impulse **32** werden durch die Impulserzeugungseinheit **22a**, **22b** nur erzeugt, wenn während des Betriebs das aktuelle synaptische Gewicht w größer als der oder gleich dem Schwellenwert ist.

[0068] Wie zuvor beschrieben, kann der Schwellenwert einfach gleich dem kurzzeitigen synaptischen Gewicht w_s festgelegt werden (siehe **Fig. 4**), wobei in diesem Fall ein zweiter Komparator **24a** enthalten ist, um das kurzzeitige synaptische Gewicht w_s mit dem für den Schwellenwert zulässigen Maximalwert w_{\max} zu vergleichen. Die Schaltung ist anderenfalls so konfiguriert, dass sie das kurzzeitige synaptische Gewicht w_s zurücksetzt, wenn infolge des zweiten Komparators **24a** festgestellt wird, dass Letztgenanntes größer als der oder gleich dem Maximalwert ist.

[0069] Bei Varianten, die in **Fig. 5** veranschaulicht sind, wird auf einen einzigen Komparator **23b** zurückgegriffen, der so gestaltet ist, dass die Differenz $w_{\max} - w_s$ als Schwellenwert für Vergleichszwecke verwendet wird. Hierbei werden postsynaptische Impulse **32** durch die Impulserzeugungseinheit nur erzeugt, wenn während des Betriebs festgestellt wird, dass das aktuelle synaptische Gewicht w größer als die oder gleich der vorstehend erwähnten $w_{\max} - w_s$ ist. Die Schaltung setzt das kurzzeitige synaptische Gewicht w_s jedes Mal zurück, wenn ein postsynaptischer Impuls **32** zur Übertragung zum postsynaptischen Neuron **14** erzeugt wird (nachdem dieser Impuls erzeugt wurde).

[0070] Als Nächstes kann die Erfindung gemäß einem letzten Aspekt als Hardwarevorrichtung **1**, **1a** bis **1c** verkörpert sein. Diese Vorrichtung realisiert ein SNN und weist eine Anzahl neuronaler Verbindungen auf. Jede dieser Verbindungen beinhaltet ein präsynaptisches Neuron **11**, ein postsynaptisches Neuron **14** und eine Schaltung einer synaptischen Einheit **20**, **20a** bis **20c**, wie beispielsweise zuvor beschrieben. Jede Schaltung einer synaptischen Einheit verbindet jeweils ein präsynaptisches Neuron **11** mit einem postsynaptischen Neuron **14**. Jedes postsynaptische Neuron kann insbesondere durch eine Mehrzahl von Schaltungen synaptischer Einheiten des Netzes verbunden sein, wie in **Fig. 2B** gezeigt. Jedes postsynaptische Neuron **14** kann somit so konfiguriert sein, dass es auf der Grundlage postsynaptischer Impulse **32**, die durch jede der jeweiligen Schaltungen synaptischer Einheiten **20**, **20a** bis **20c** übertragen wurden,

Ausgangsimpulse **33** erzeugt. Wie zuvor ausführlich erläutert kann jedes postsynaptische Neuron **14** ferner so konfiguriert sein, dass es Ausgangsimpulse **33** erzeugt, indem durch die jeweiligen Schaltungen **20**, **20a** bis **20c** übertragene postsynaptische Impulse **32** auf der Grundlage einer Anzahl der übertragenen Impulse **32** integriert werden.

[0071] Zwar wurde die vorliegende Erfindung unter Bezugnahme auf eine begrenzte Anzahl von Ausführungsformen, Varianten und die beigelegten Zeichnungen beschrieben, dem Fachmann wird jedoch klar sein, dass verschiedene Änderungen vorgenommen werden können und Elemente der Erfindung durch Äquivalente ersetzt werden können, ohne vom Schutzbereich der vorliegenden Erfindung abzuweichen. Insbesondere kann eine Funktion (einheitenähnlich oder verfahrensähnlich), die in einer bestimmten Ausführungsform oder Variante aufgeführt oder in einer Zeichnung dargestellt ist, mit einer anderen Funktion in einer anderen Ausführungsform, Variante oder Zeichnung kombiniert oder durch diese ersetzt werden, ohne vom Schutzbereich der vorliegenden Erfindung abzuweichen. Verschiedene Kombinationen der in Bezug auf beliebige der oben aufgeführten Ausführungsformen oder Varianten beschriebenen Funktionen können dementsprechend vorgesehen werden, die in den Schutzbereich der beigelegten Ansprüche fallen. Darüber hinaus können viele Änderungen vorgenommen werden, um eine bestimmte Situation oder ein bestimmtes Material an die Lehren der vorliegenden Erfindung anzupassen, ohne von deren Schutzbereich abzuweichen. Daher soll die vorliegende Erfindung nicht auf die jeweiligen offenbarten Ausführungsformen beschränkt sein, sondern die vorliegende Erfindung schließt alle Ausführungsformen ein, die in den Schutzbereich der beigelegten Ansprüche fallen. Darüber hinaus können viele andere Varianten als die oben ausdrücklich erwähnten vorgesehen werden.

Patentansprüche

1. Verfahren zum Übertragen von Signalen zwischen Neuronen eines mittels Hardware realisierten gepulsten neuronalen Netzes, wobei Letztgenanntes neuronale Verbindungen aufweist, die jeweils eine synaptische Einheit aufweist, die ein präsynaptisches Neuron mit einem postsynaptischen Neuron verbindet, wobei das Verfahren für jede neuronale Verbindung der neuronalen Verbindungen und bei jeder synaptischen Einheit davon aufweist:
Frequenzmodulieren von Impulsen, die vom präsynaptischen Neuron jeder neuronalen Verbindung empfangen wurden, auf Grundlage eines synaptischen Gewichts, das in jeder synaptischen Einheit gespeichert ist, um postsynaptische Impulse zu erzeugen, wodurch eine erste Anzahl vom präsynaptischen Neuron empfangener Impulse in eine zweite Anzahl postsynaptischer Impulse umgesetzt wird; und

Übertragen der erzeugten postsynaptischen Impulse zum postsynaptischen Neuron jeder neuronalen Verbindung.

2. Verfahren nach Anspruch 1, wobei das Verfahren ferner aufweist:

beim postsynaptischen Neuron jeder neuronalen Verbindung Erzeugen von Ausgangsimpulsen auf Grundlage der übertragenen postsynaptischen Impulse.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, wobei das Verfahren ferner aufweist:

bei jeder synaptischen Einheit Aufrechterhalten eines Zustands, der das synaptische Gewicht bestimmt, wobei der Zustand gemäß einem kognitiven Lernmechanismus geändert werden kann.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, wobei das Verfahren ferner aufweist:

Ändern, bei jeder synaptischen Einheit, des Zustands gemäß dem kognitiven Lernmechanismus einerseits auf Grundlage vom präsynaptischen Neuron empfangener Impulse und andererseits auf Grundlage von Ausgangsimpulsen, die bei einem oder mehreren postsynaptischen Neuronen des gepulsten neuronalen Netzes erzeugt wurden.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, wobei:

die synaptische Einheit so konfiguriert ist, dass sie einen Mechanismus einer von Impulsen und zeitlicher Steuerung abhängigen Plastizität auf Grundlage von Impulsen, die vom präsynaptischen Neuron empfangen wurden, und von Ausgangsimpulsen realisiert, die beim postsynaptischen Neuron erzeugt wurden, wodurch der Zustand auf Grundlage dieses Mechanismus einer von Impulsen und zeitlicher Steuerung abhängigen Plastizität geändert wird.

6. Verfahren nach Anspruch 2, wobei:

die Ausgangsimpulse erzeugt werden, indem beim postsynaptischen Neuron empfangene postsynaptische Impulse auf Grundlage einer Anzahl davon integriert werden.

7. Verfahren nach Anspruch 2 oder 7, wobei:

die vom präsynaptischen Neuron empfangenen Impulse bei jeder synaptischen Einheit moduliert werden, indem zunächst die empfangenen Impulse in ein oder mehrere elektrische Signale gemäß einem synaptischem Gewicht, das durch den Zustand bestimmt wird, umgewandelt werden und dann auf Grundlage der elektrischen Signale eine Frequenz der zu erzeugenden postsynaptischen Impulse festgelegt wird.

8. Verfahren nach einem der Ansprüche 2, 7 oder 8, wobei:

der Zustand ein primärer Zustand ist; und

das Modulieren vom präsynaptischen Neuron empfangener Impulse aufweist:

Aufrechterhalten eines sekundären Zustands, der auf Grundlage vom präsynaptischen Neuron empfangener Impulse ein kurzzeitiges synaptisches Gewicht bestimmt; und

Vergleichen eines durch den primären Zustand bestimmten aktuellen synaptischen Gewichts mit einem Schwellenwert, der von dem kurzzeitigen synaptischen Gewicht abhängt, das aus dem sekundären Zustand bestimmt wurde, wodurch die postsynaptischen Impulse nur erzeugt werden, wenn das aktuelle synaptische Gewicht größer als der oder gleich dem Schwellenwert ist.

9. Verfahren nach Anspruch 8, wobei:

der Schwellenwert gleich dem kurzzeitigen synaptischen Gewicht ist, wodurch das aktuelle synaptische Gewicht mit dem kurzzeitigen synaptischen Gewicht verglichen wird und postsynaptische Impulse nur erzeugt werden, wenn das aktuelle synaptische Gewicht größer als das oder gleich dem kurzzeitigen synaptischen Gewicht ist; und

das Modulieren vom präsynaptischen Neuron empfangener Impulse ferner ein Vergleichen des kurzzeitigen synaptischen Gewichts mit einem für den Schwellenwert maximal zulässigen Wert aufweist, und wenn dementsprechend festgestellt wird, dass Wert größer als der oder gleich dem Maximalwert ist, ein Zurücksetzen des kurzzeitigen synaptischen Gewichts.

10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, wobei:

der Schwellenwert gleich einer Differenz zwischen einem Maximalwert und dem kurzzeitigen synaptischen Gewicht ist, wodurch das aktuelle synaptische Gewicht mit der Differenz verglichen wird, wobei es sich bei dem Maximalwert um einen für die Summe aus dem aktuellen synaptischen Gewicht und dem kurzzeitigen synaptischen Gewicht zulässigen Maximalwert handelt, sodass die postsynaptischen Impulse nur erzeugt werden, wenn das aktuelle synaptische Gewicht größer als die oder gleich der Differenz ist; und

das Modulieren vom präsynaptischen Neuron empfangener Impulse ferner jedes Mal das Zurücksetzen des kurzzeitigen synaptischen Gewichts aufweist, wenn ein postsynaptischer Impuls zur Übertragung zum postsynaptischen Neuron erzeugt wird, nachdem dieser Impuls erzeugt wurde.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10, wobei:

alle erzeugten postsynaptischen Impulse eine gleiche Signalamplitude haben.

12. Schaltung einer synaptischen Einheit zum Übertragen von Signalen zwischen Neuronen eines mittels Hardware realisierten gepulsten neuronalen Netzes, wobei:

die Schaltung so gestaltet ist, dass ein präsynaptisches Neuron mit einem postsynaptischen Neuron des Netzes verbunden wird, um so eine neuronale Verbindung zu bilden; und

die Schaltung so konfiguriert ist, dass sie, wenn sie mit dem präsynaptischen Neuron und dem postsynaptischen Neuron verbunden ist:

vom präsynaptischen Neuron empfangene Impulse auf Grundlage eines in der Schaltung gespeicherten synaptischen Gewichts frequenzmoduliert, um postsynaptische Impulse zu erzeugen, wodurch während des Betriebs eine erste Anzahl vom präsynaptischen Neuron empfangener Impulse in eine zweite Anzahl postsynaptischer Impulse umgesetzt wird; und Übertragen der erzeugten postsynaptischen Impulse zum postsynaptischen Neuron.

13. Schaltung der synaptischen Einheit nach Anspruch 12, wobei:

die Schaltung ferner so konfiguriert ist, dass sie, wenn sie mit dem präsynaptischen Neuron und dem postsynaptischen Neuron verbunden ist, postsynaptische Impulse erzeugt, die alle eine gleiche Amplitude haben.

14. Schaltung der synaptischen Einheit nach Anspruch 12 oder 13, wobei:

die Schaltung ferner so konfiguriert ist, dass sie, wenn sie mit dem präsynaptischen Neuron und dem postsynaptischen Neuron verbunden ist, einen Zustand aufrechterhält, der das synaptische Gewicht bestimmt, und den Zustand einerseits auf Grundlage von Impulsen, die vom präsynaptischen Neuron empfangen wurden, und andererseits auf Grundlage von Impulsen ändert, die durch das postsynaptische Neuron abgegeben wurden.

15. Schaltung der synaptischen Einheit nach einem der Ansprüche 12 bis 14, wobei die Schaltung aufweist:

eine Impulserzeugungseinheit, die so ausgelegt ist, dass sie während des Betriebs die postsynaptischen Impulse erzeugt und die postsynaptischen Impulse zum postsynaptischen Neuron überträgt;

eine Aktualisierungseinheit, die mit jedem des präsynaptischen Neurons und des postsynaptischen Neurons verbindbar und so konfiguriert ist, dass sie während des Betriebs den Zustand ändert; und eine memristive Einheit, wobei Letztgenannte:

mit der Impulserzeugungseinheit verbunden ist und anderenfalls mit dem präsynaptischen Neuron verbindbar ist, wobei die memristive Einheit so konfiguriert ist, dass sie den Zustand speichert, sodass die Impulserzeugungseinheit Impulse, die durch die memristive Einheit vom präsynaptischen Neuron empfangen wurden, auf Grundlage eines aus dem Zustand bestimmten synaptischen Gewichts moduliert und während des Betriebs die postsynaptischen Impulse erzeugt; und

mit der Aktualisierungseinheit verbunden ist, wodurch ein durch die Aktualisierungseinheit geänderter beliebiger Zustand das synaptische Gewicht bestimmt, das während des Betriebs zum Modulieren der Impulse verwendet wird.

16. Schaltung der synaptischen Einheit nach Anspruch 15, wobei:

die Aktualisierungseinheit ferner so konfiguriert ist, dass sie einen Mechanismus einer von Impulsen und zeitlicher Steuerung abhängigen Plastizität auf Grundlage von Impulsen, die vom präsynaptischen Neuron empfangen wurden, und von Ausgangsimpulsen realisiert, die beim postsynaptischen Neuron erzeugt wurden, wodurch während des Betriebs der Zustand auf Grundlage dieses Mechanismus einer von Impulsen und zeitlicher Steuerung abhängigen Plastizität geändert wird.

17. Schaltung der synaptischen Einheit nach Anspruch 15 oder 16, wobei:

die memristive Einheit ferner so konfiguriert ist, dass sie vom präsynaptischen Neuron empfangene Impulse in ein oder mehrere elektrische Signale gemäß einem synaptischen Gewicht umwandelt, das durch den in der memristiven Einheit gespeicherten Zustand bestimmt wird; und
die Impulserzeugungseinheit ferner so konfiguriert ist, dass sie auf Grundlage der elektrische Signale eine Frequenz der zu erzeugenden postsynaptischen Impulse festlegt, um während des Betriebs vom präsynaptischen Neuron empfangene Impulse zu modulieren.

18. Schaltung der synaptischen Einheit nach einem der Ansprüche 15 bis 17, wobei:

der Zustand ein primärer Zustand ist und die memristive Einheit eine erste memristive Einheit ist, die so konfiguriert ist, dass sie den primären Zustand speichert; und
die synaptische Einheit ferner eine zweite memristive Einheit aufweist, die mit dem präsynaptischen Neuron verbindbar und so ausgelegt ist, dass sie einen sekundären Zustand speichert, der ein kurzzeitiges synaptisches Gewicht bestimmt, wobei der sekundäre Zustand während des Betriebs von den Impulsen abhängt, die durch die zweite memristive Einheit vom präsynaptischen Neuron empfangen werden.

19. Schaltung der synaptischen Einheit nach Anspruch 16, wobei:

die Schaltung der synaptischen Einheit ferner einen Komparator aufweist, wobei Letztgenanntes mit jeder der ersten memristiven Einheit und der zweiten memristiven Einheit verbunden ist, um ein aus dem primären Zustand bestimmtes aktuelles synaptisches Gewicht mit einem Schwellenwert zu vergleichen, wobei Letztgenanntes von dem aus dem sekundären Zustand bestimmten kurzzeitigen synaptischen Gewicht abhängt, wodurch während des Betriebs die postsyn-

aptischen Impulse durch die Impulserzeugungseinheit nur erzeugt werden, wenn das aktuelle synaptische Gewicht größer als der oder gleich dem Schwellenwert ist.

20. Schaltung der synaptischen Einheit nach Anspruch 19, wobei:

der Komparator ein erster Komparator ist, der so ausgelegt ist, dass er das kurzzeitige synaptische Gewicht als Schwellenwert zu verwendet, wodurch die postsynaptischen Impulse durch die Impulserzeugungseinheit nur erzeugt werden, wenn das aktuelle synaptische Gewicht größer als das oder gleich dem kurzzeitigen synaptischen Gewicht ist; und
die Schaltung ferner einen zweiten Komparator aufweist, der so konfiguriert ist, dass er das kurzzeitige synaptische Gewicht mit einem für den Schwellenwert zulässigen Maximalwert vergleicht, wobei die Schaltung anderenfalls so konfiguriert ist, dass sie das kurzzeitige synaptische Gewicht zurücksetzt, wenn festgestellt wird, dass Letztgenanntes größer als der oder gleich dem Maximalwert ist.

21. Schaltung der synaptischen Einheit nach Anspruch 19 oder 20, wobei:

der Komparator so ausgelegt ist, dass eine Differenz zwischen einem Maximalwert und dem kurzzeitigen synaptischen Gewicht als Schwellenwert zum Vergleichen des aktuellen synaptischen Gewichts mit dem Schwellenwert verwendet wird, wobei es sich bei dem Maximalwert um einen für die Summe aus dem aktuellen synaptischen Gewicht und dem kurzzeitigen synaptischen Gewicht zulässigen Maximalwert handelt, wodurch während des Betriebs die postsynaptischen Impulse durch die Impulserzeugungseinheit nur erzeugt werden, wenn das aktuelle synaptische Gewicht größer als die oder gleich der Differenz ist; und
die Schaltung ferner so konfiguriert ist, dass sie das kurzzeitige synaptische Gewicht jedes Mal zurücksetzt, wenn ein postsynaptischer Impuls zur Übertragung zum postsynaptischen Neuron erzeugt wird, nachdem dieser Impuls erzeugt wurde.

22. Hardwarevorrichtung, die ein gepulstes neuronales Netz realisiert, wobei:

das Netz eine Anzahl neuronaler Verbindungen aufweist, die jeweils aufweisen:
ein präsynaptisches Neuron;
ein postsynaptisches Neuron; und
eine Schaltung einer synaptischen Einheit, die jeweils das präsynaptische Neuron mit dem postsynaptischen Neuron verbindet;
die Schaltung der synaptischen Einheit zum Übertragen von Signalen zwischen Neuronen eines mittels Hardware realisierten gepulsten neuronalen Netzes konfiguriert ist, wobei:
die Schaltung so gestaltet ist, dass das präsynaptische Neuron mit dem postsynaptischen Neuron des

Netzes verbunden wird, um so die neuronale Verbindung zu bilden; und
die Schaltung so konfiguriert ist, dass sie, wenn sie mit dem präsynaptischen Neuron und dem postsynaptische Neuron verbunden ist:
vom präsynaptischen Neuron empfangene Impulse auf Grundlage eines in der Schaltung gespeicherten synaptischen Gewichts frequenzmoduliert, um postsynaptische Impulse zu erzeugen, wodurch während des Betriebs eine erste Anzahl vom präsynaptischen Neuron empfangener Impulse in eine zweite Anzahl postsynaptischer Impulse umgesetzt wird; und
Übertragen der erzeugten postsynaptischen Impulse zum postsynaptische Neuron.

23. Hardwarevorrichtung nach Anspruch 22, wobei:
jedes postsynaptische Neuron des neuronalen Netzes:
durch eine Mehrzahl von Schaltungen synaptischer Einheiten des Netzes verbunden ist; und
so konfiguriert ist, dass sie Ausgangsimpulse auf Grundlage postsynaptischer Impulse erzeugt, die durch eine oder mehrere jeweilige Schaltungen synaptischer Einheiten übertragen wurden.

24. Hardwarevorrichtung nach Anspruch 23, wobei:
jedes postsynaptische Neuron ferner so konfiguriert ist, dass es die Ausgangsimpulse erzeugt, indem die durch die jeweiligen Schaltungen synaptischer Einheiten übertragenen postsynaptischen Impulse auf Grundlage einer Anzahl davon integriert werden.

Es folgen 8 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

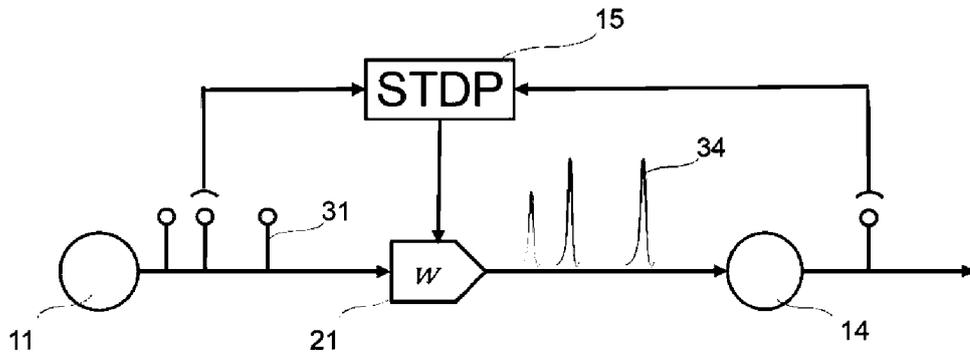


FIG. 1A

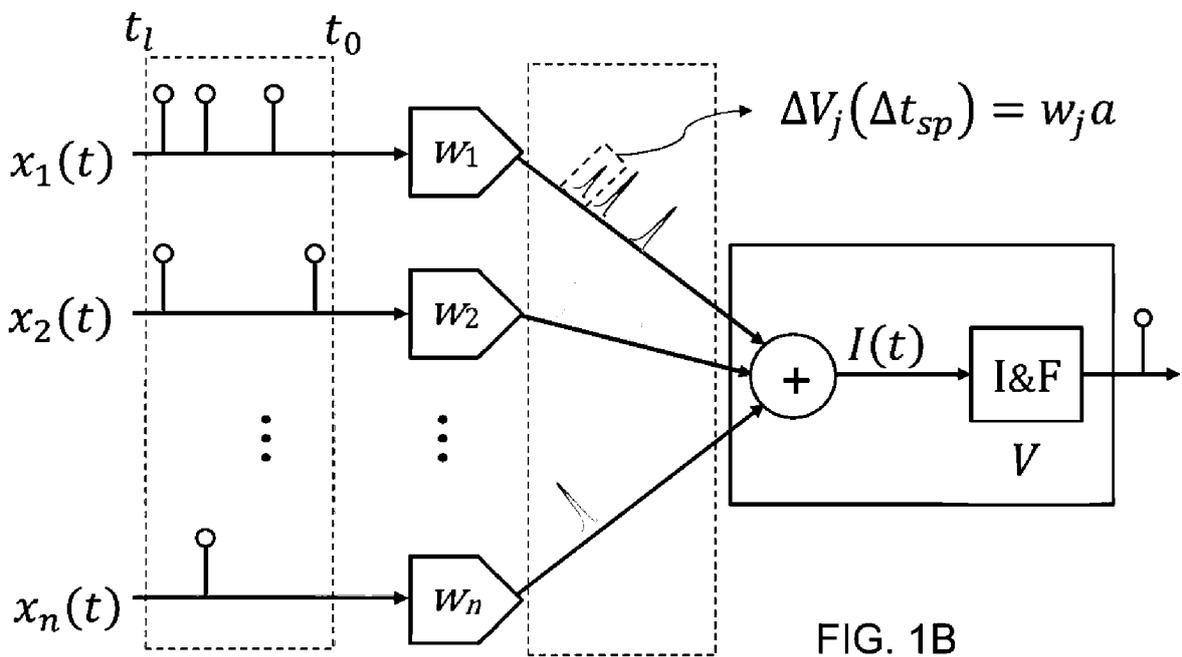


FIG. 1B

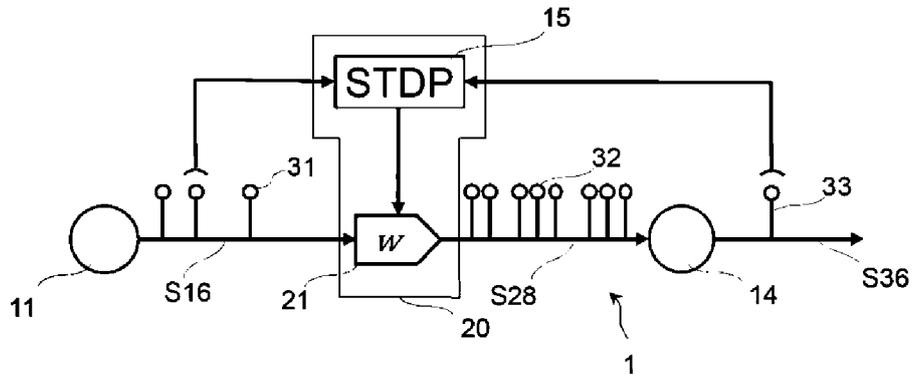


FIG. 2A

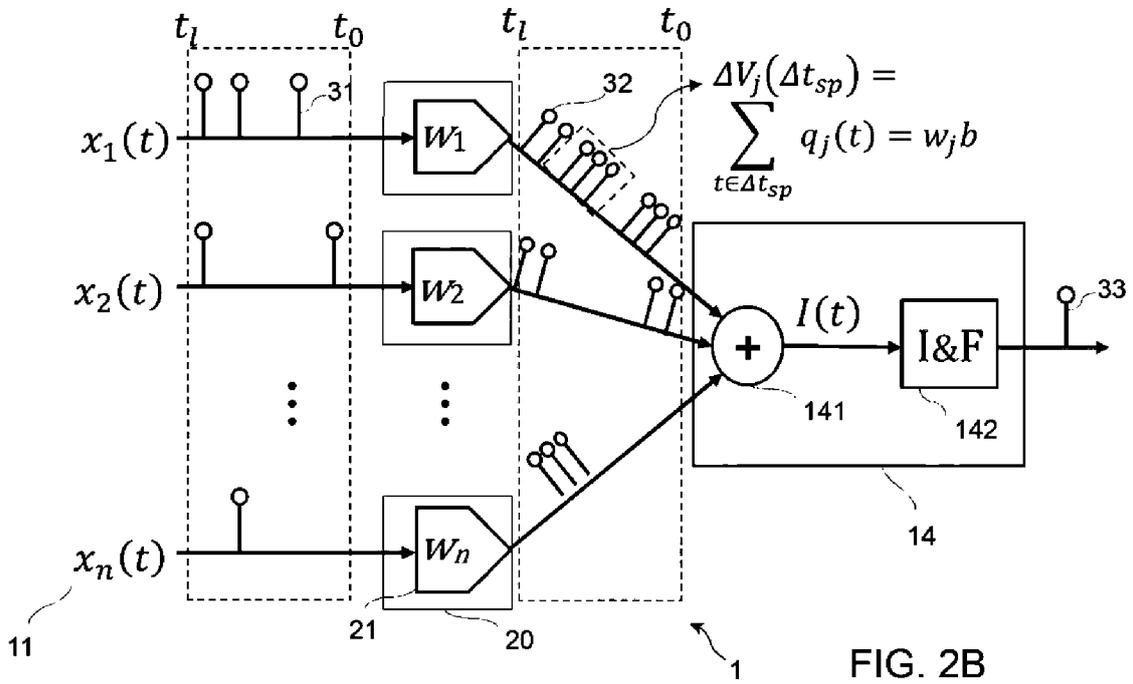


FIG. 2B

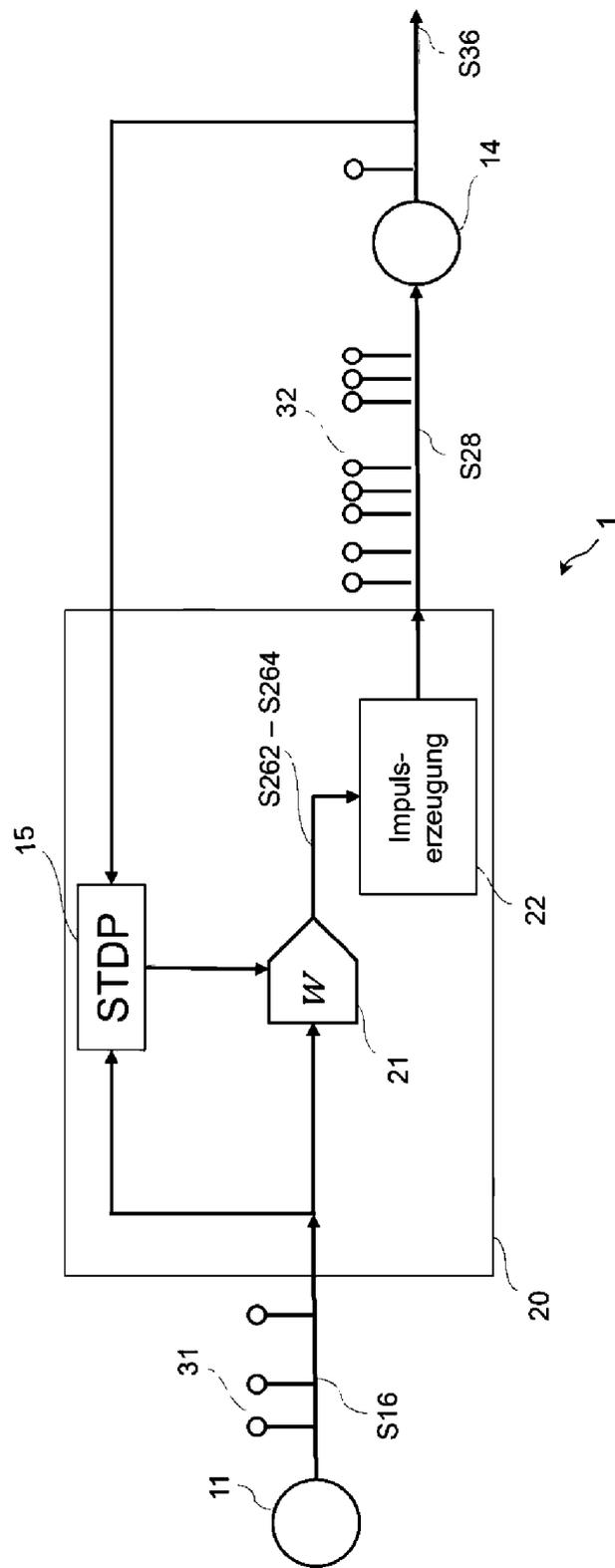


FIG. 3

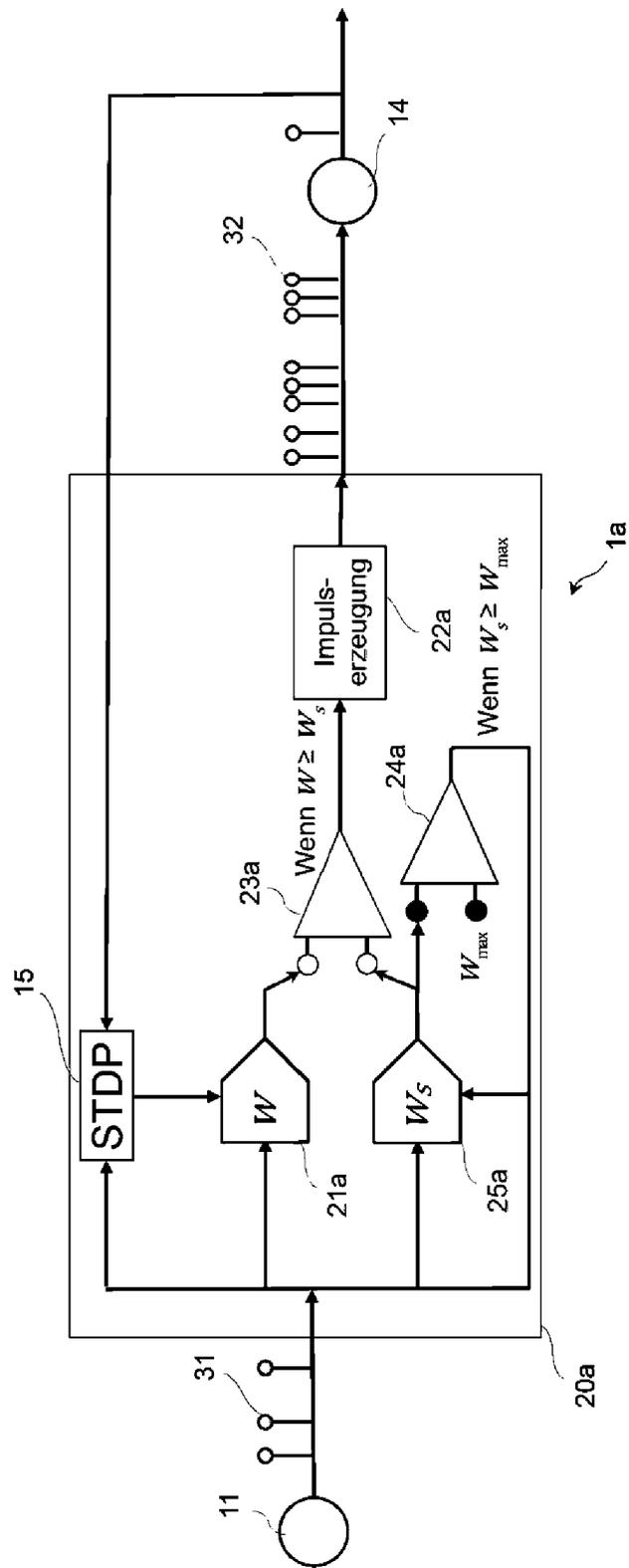


FIG. 4

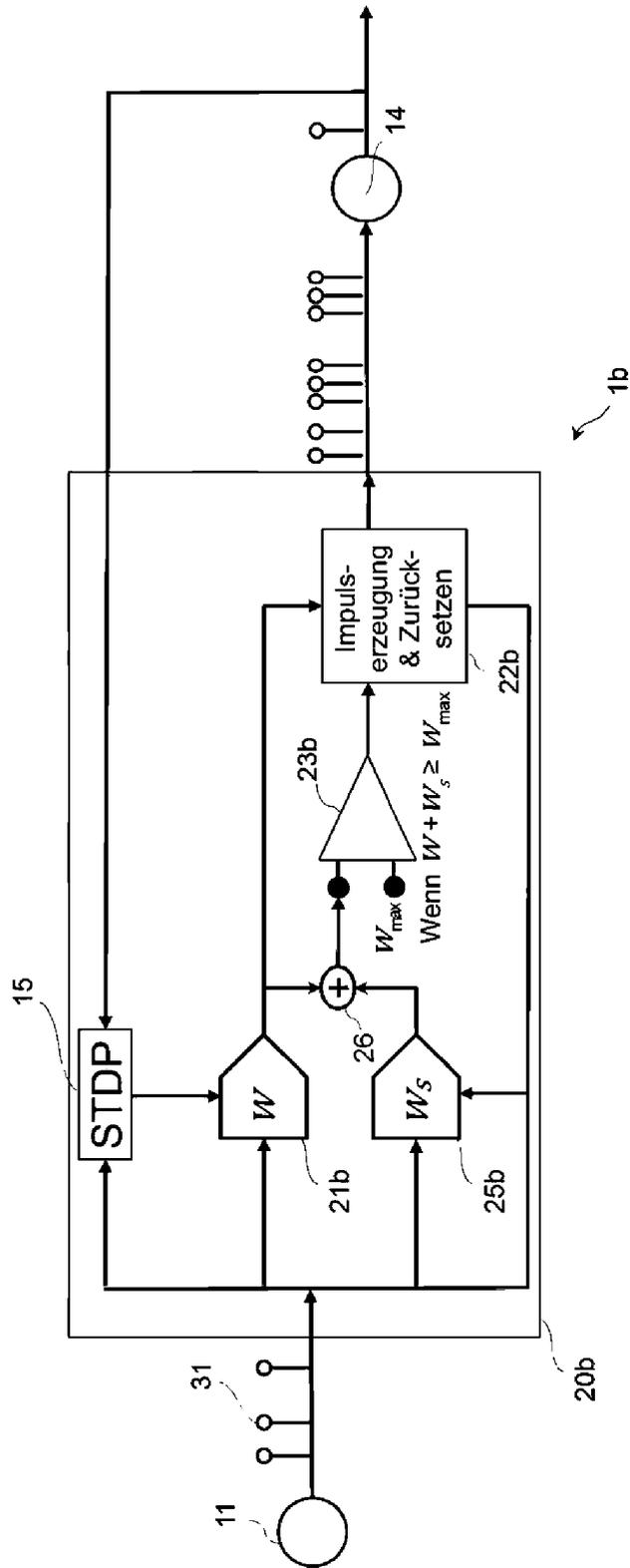


FIG. 5

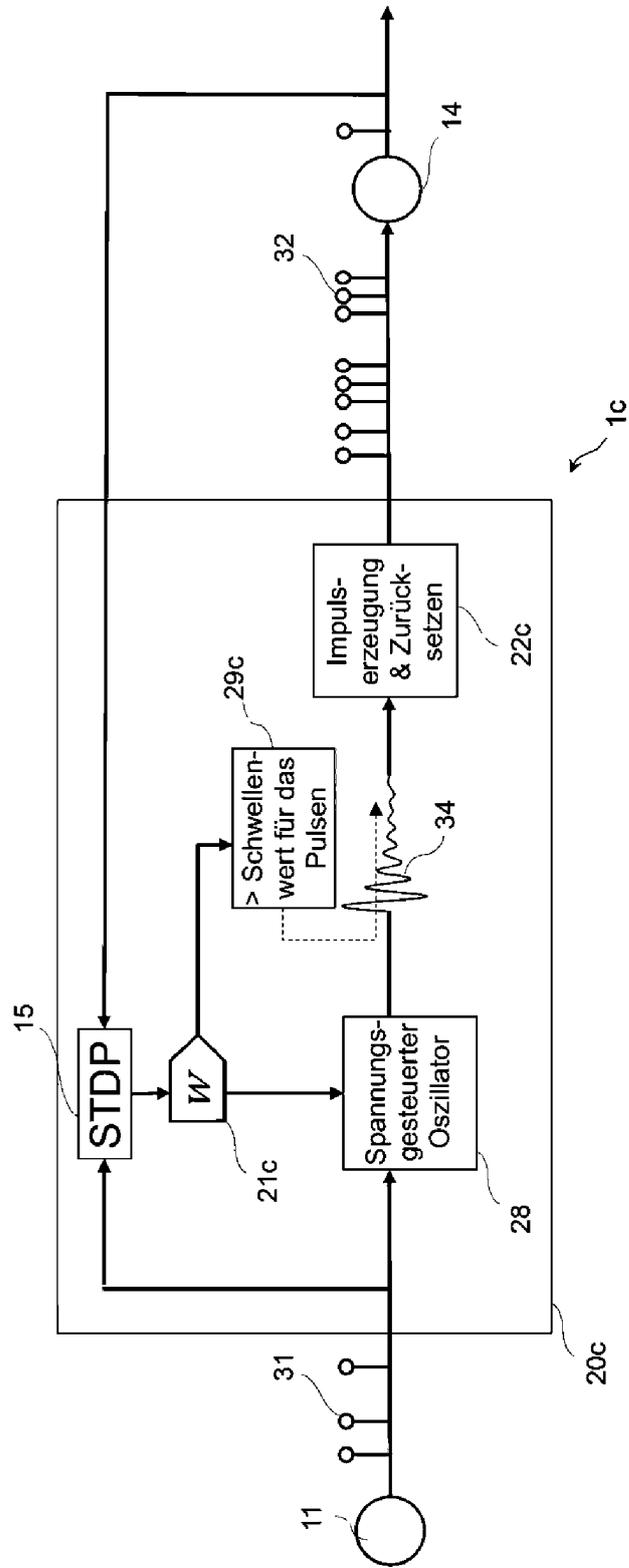
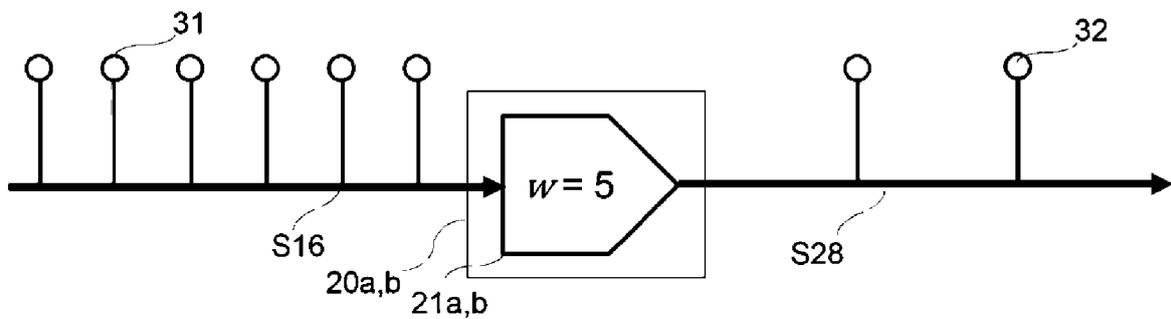
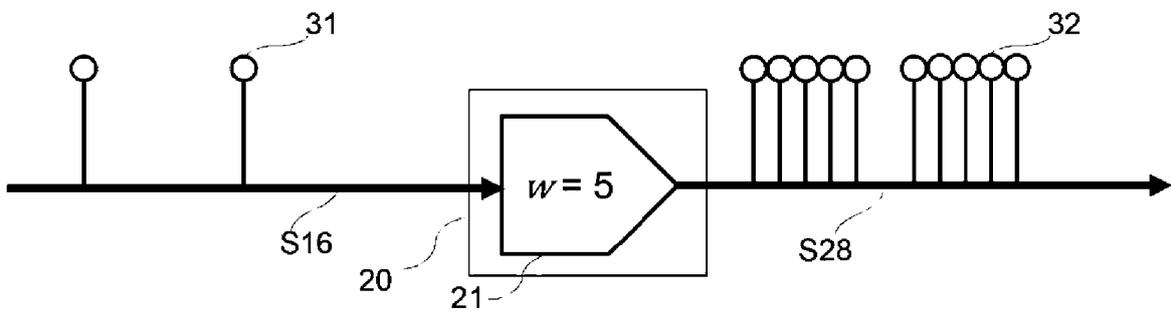
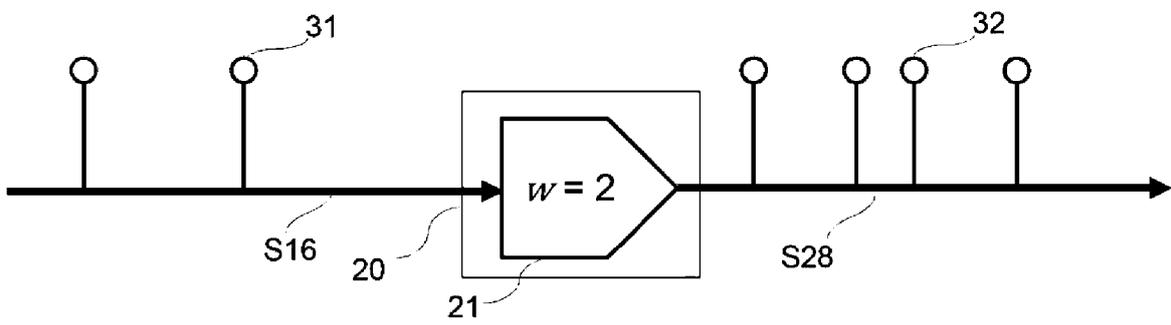
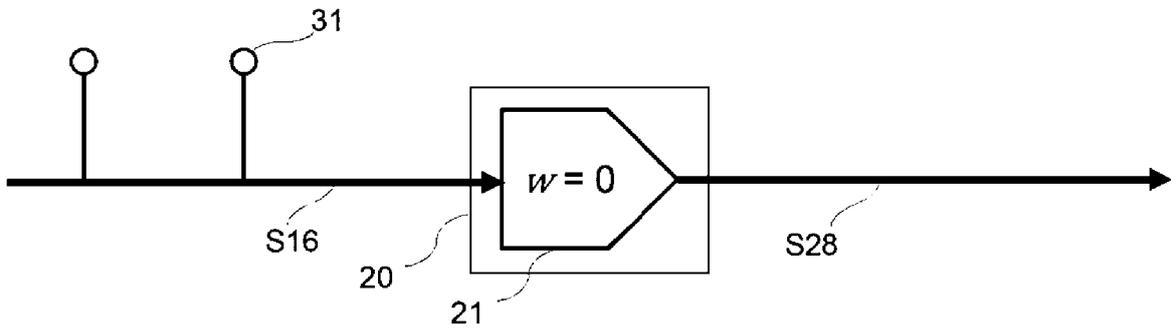


FIG. 6



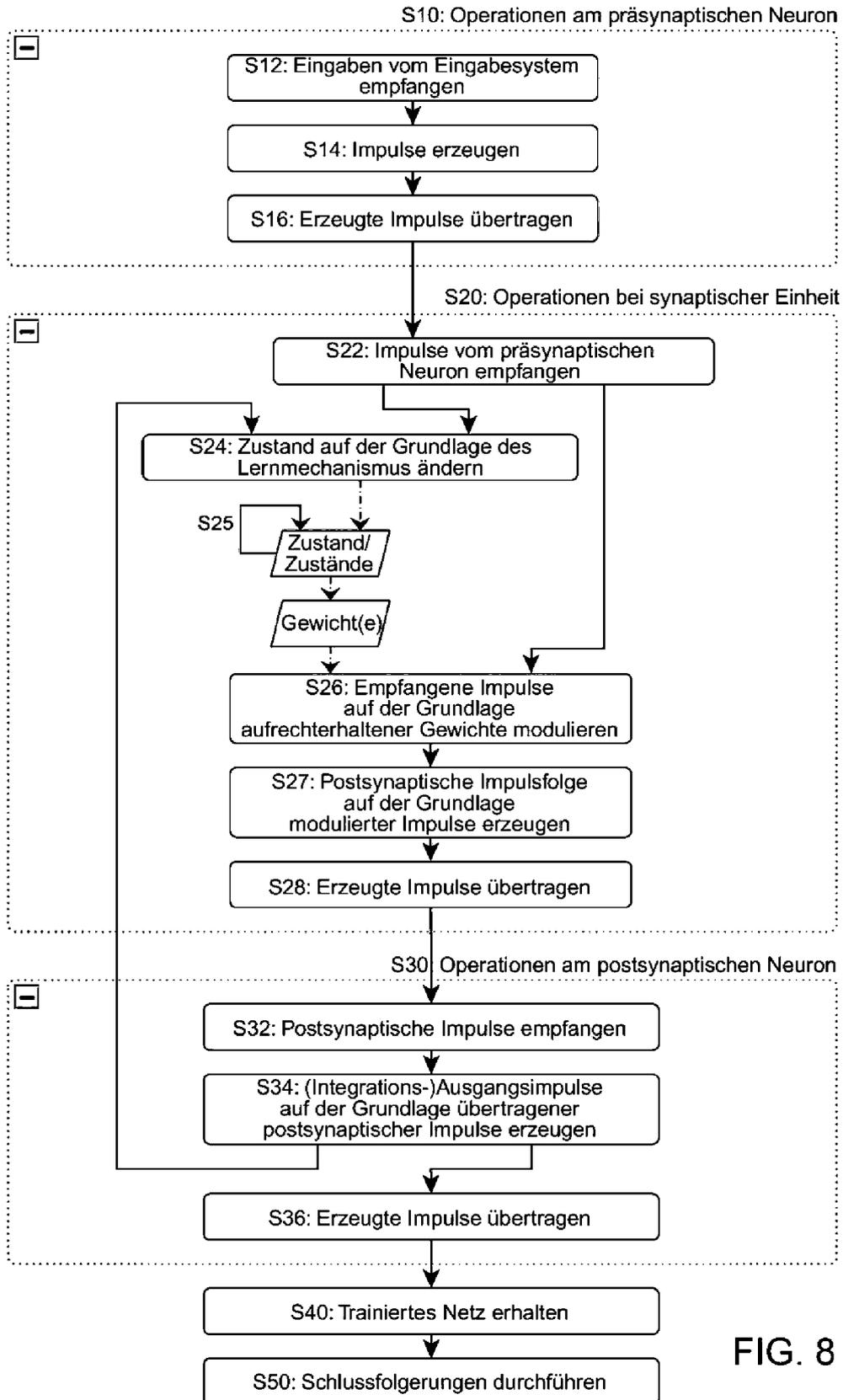


FIG. 8