(19) Deutsches Patent- und Markenamt

(10) **DE 10 2018 129 189 A1** 2020.05.20

(12) # Offenlegungsschrift

(21) Aktenzeichen: **10 2018 129 189.2**
(22) Anmeldetag: **20.11.2018**
(43) Offenlegungstag: **20.05.2020**

(51) Int Cl.: ***H04L 7/08*** (2006.01)

(71) Anmelder:
Beckhoff Automation GmbH, 33415 Verl, DE

(74) Vertreter:
Wilhelm & Beck, 80639 München, DE

(72) Erfinder:
Vonnahme, Erik, 33154 Salzkotten, DE

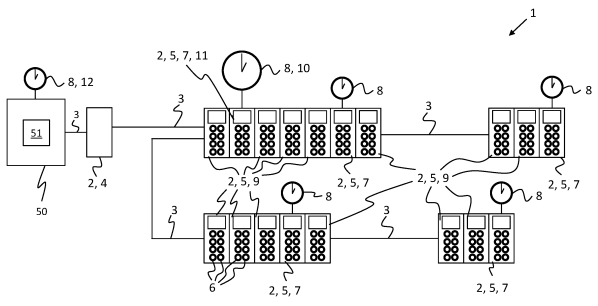
(56) Ermittelter Stand der Technik:
EP 0 367 378 B1

Prüfungsantrag gemäß § 44 PatG ist gestellt.

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen.

(54) Bezeichnung: **VERFAHREN ZUM BETREIBEN EINES NETZWERKTEILNEHMERS IN EINEM AUTOMATISIERUNGSKOMMUNIKATIONSNETZWERK**

(57) Zusammenfassung: Ein Netzwerkteilnehmer (7) eines Automatisierungskommunikationsnetzwerks (1) ist dazu vorgesehen, Daten mit weiteren Netzwerkteilnehmern (2) im Automatisierungskommunikationsnetzwerk (1) mit einer festgelegten Taktfrequenz auszutauschen. Der Netzwerkteilnehmer (7) weist eine interne Uhr (8) zum Synchronisieren des Datenaustauschs mit zumindest einem weiteren Netzwerkteilnehmer (7) auf. Die interne Uhr (8) ist dazu vorgesehen, eine Zeit als ganzzahligen Zählwert bereitzustellen. Die Taktfrequenz ist derart festgelegt, dass eine Periodendauer pro Takt von der internen Uhr (8) nicht durch einen ganzzahligen Zählwert darstellbar ist. Ein Verfahren zum Betreiben des Netzwerkteilnehmers (7) im Automatisierungskommunikationsnetzwerk (1) umfasst folgenden Verfahrensschritt: Die interne Uhr (8) wird mittels einer festgelegten Sequenz von ganzzahligen Inkrementen inkrementiert. Die Sequenz der ganzzahligen Inkremente ist derart festgelegt, dass eine Summe der ganzzahligen Inkremente einem ganzzahligen Vielfachen der Periodendauer entspricht.



Beschreibung

[0001] Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben eines Netzwerkteilnehmers in einem Automatisierungskommunikationsnetzwerk.

[0002] Aus dem Stand der Technik ist es bekannt, einen Datenaustausch zwischen Netzwerkteilnehmern in einem Automatisierungskommunikationsnetzwerk mittels im Automatisierungskommunikationsnetzwerk verteilter Uhren zu synchronisieren. Beispielhaft offenbart die EP2544389B1 ein Verfahren zur Arbeitstakt- und Zeittaktsynchronisation einer untergeordneten Domain eines Automatisierungsnetzwerks.

[0003] Zum Synchronisieren eines Datenaustauschs in einem Automatisierungskommunikationsnetzwerk werden typischerweise Uhren verwendet, die dazu ausgebildet sind, Zeiten als ganzzahlige Zählwerte bereitzustellen. Der Datenaustausch im Automatisierungskommunikationsnetzwerk erfolgt mit einer festgelegten Taktfrequenz. Die Taktfrequenz kann derart festgelegt sein, dass eine Periodendauer pro Takt von den Uhren nicht als ganzzahliger Zählwert darstellbar ist. Werden die Uhren mit der Taktfrequenz inkrementiert, so ergeben sich Abweichungen der Zählwerte der Uhren von Vielfachen der Periodendauer. Abweichungen der Zählwerte der Uhren von einem Vielfachen der Periodendauer können einen synchronen Datenaustausch negativ beeinflussen.

[0004] Eine Lösung für dieses Problem besteht darin, die Uhren mit einer Frequenz zu inkrementieren, die von der Taktfrequenz abweicht und eine Taktdomäne der Uhren in eine Taktdomäne des Datenaustauschs zu transformieren. Eine solche Transformation ist allerdings nicht verzögerungsfrei. Diese Verzögerung verursacht Abweichung der von den Uhren bereitgestellten Zeiten von einer Referenzzeit. Eine solche Abweichung wird auch als Jitter bezeichnet. Ein Jitter kann beispielsweise dazu führen, dass ein im Rahmen des Datenaustauschs ausgetauschtes Datagramm mit einem inkorrekten Zeitstempel versehen wird.

[0005] Die Aufgabe der vorliegenden Erfindung ist es, ein verbessertes Verfahren zum Betreiben eines Netzwerkteilnehmers in einem Automatisierungskommunikationsnetzwerk anzugeben, einen Netzwerkteilnehmer, der dazu ausgebildet ist, das Verfahren durchzuführen, und ein Automatisierungskommunikationsnetzwerk mit zumindest zwei Netzwerkteilnehmern, die dazu ausgebildet sind das Verfahren durchzuführen, bereitzustellen.

[0006] Diese Aufgaben werden durch ein Verfahren zum Betreiben eines Netzwerkteilnehmers in einem Automatisierungskommunikationsnetzwerk mit den Merkmalen des unabhängigen Anspruchs 1, durch einen Netzwerkteilnehmer mit den Merkmalen des unabhängigen Anspruchs 6 und durch ein Automatisierungskommunikationsnetzwerk mit den Merkmalen des unabhängigen Anspruchs 7 gelöst. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in abhängigen Ansprüchen angegeben.

[0007] Ein Netzwerkteilnehmer eines Automatisierungskommunikationsnetzwerks ist dazu vorgesehen, Daten mit weiteren Netzwerkteilnehmern im Automatisierungskommunikationsnetzwerk mit einer festgelegten Taktfrequenz auszutauschen. Der Netzwerkteilnehmer weist eine interne Uhr zum Synchronisieren des Datenaustauschs mit zumindest einem weiteren Netzwerkteilnehmer auf. Die interne Uhr ist dazu vorgesehen, eine Zeit als ganzzahligen Zählwert bereitzustellen. Die Taktfrequenz ist derart festgelegt, dass eine Periodendauer pro Takt von der internen Uhr nicht durch einen ganzzahligen Zählwert darstellbar ist. Ein Verfahren zum Betreiben des Netzwerkteilnehmers im Automatisierungskommunikationsnetzwerk umfasst folgenden Verfahrensschritt: Die interne Uhr wird mittels einer festgelegten Sequenz von ganzzahligen Inkrementen inkrementiert. Die Sequenz der ganzzahligen Inkremente ist derart festgelegt, dass eine Summe der ganzzahligen Inkremente einem ganzzahligen Vielfachen der Periodendauer entspricht.

[0008] Vorteilhafterweise entspricht ein Zählwert der internen Uhr nach dem Inkrementieren der internen Uhr mittels der Sequenz von Inkrementen einem idealen Zählwert der internen Uhr. Der ideale Zählwert entspricht einem Vielfachen der Periodendauer, die von der internen Uhr nicht als ganzzahliger Zählwert darstellbar ist. Nach dem Inkrementieren der internen Uhr mittels der Sequenz von Inkrementen entspricht der ideale Zählwert dem ganzzahligen Vielfachen der Periodendauer. Dadurch ist die interne Uhr zumindest nach dem Inkrementieren mittels der Sequenz von Inkrementen an die Taktfrequenz des Datenaustauschs angepasst. Abweichungen von Zählwerten der internen Uhr von idealen Zählwerten nach einzelnen Inkrementierungsschritten, d.h. bevor das Inkrementieren der internen Uhr mittels der Sequenz von Inkrementen vollständig erfolgt ist, können auf Rundungsfehler reduziert sein. Dadurch kann ein synchroner Datenaustausch des Netzwerkteilnehmers mit anderen Netzwerkteilnehmern im Automatisierungskommunikationsnetzwerk ermöglicht werden.

[0009] Das Generieren der Zeit der internen Uhr beruht auf der Taktfrequenz des Datenaustauschs im Automatisierungskommunikationsnetzwerk. Vorteilhafterweise muss die generierte Zeit der internen Uhr dadurch nicht in eine Taktdomäne des Datenaustauschs transformiert werden. Eine solche Transformation ist nicht verzögerungsfrei, und die Verzö-

gerung ist insbesondere nicht konstant, so dass sie nicht statisch eingerechnet werden kann. Eine beim Datenaustausch durch die Verzögerung verursachte Abweichung der von der internen Uhr bereitgestellten Zeit von einer Systemzeit einer Referenzuhr wird auch als Jitter bezeichnet. Ein Jitter kann dazu führen, dass ein im Rahmen des Datenaustauschs ausgetauschtes Datagramm mit einem inkorrekten Zeitstempel versehen wird. Die Verzögerung durch die Transformation von einer Taktdomäne der internen Uhr in die Taktdomäne des Datenaustauschs im Automatisierungskommunikationsnetzwerk entfällt vorteilhafterweise beim Verfahren.

[0010] Dadurch können im Automatisierungskommunikationsnetzwerk ausgetauschten Datagrammen akkurate Zeitstempel zugeordnet werden.

[0011] In einer Ausführungsform ist die Sequenz von ganzzahligen Inkrementen eine alternierende Sequenz eines ersten Inkrements und eines zweiten Inkrements. Das erste Inkrement ist die größte ganze Zahl, die kleiner als die Periodendauer ist. Das zweite Inkrement ist die kleinste ganze Zahl, die größer als die Periodendauer ist. Vorteilhafterweise sind Abweichungen des Zählwerts der internen Uhr, wobei der Zählwert als ganze Zahl dargestellt wird, von einem idealen Zählwert für die alternierende Sequenz nach jedem Inkrementierungsschritt bzw. nach jedem Takt auf Rundungsfehler beschränkt.

[0012] In einer Ausführungsform des Verfahrens ist eine Reihenfolge der Inkremente derart festgelegt, dass nach jedem Takt eine Abweichung einer Summe von Inkrementen von bereits erfolgten Takten von einem Vielfachen der Periodendauer minimal ist. Abweichungen des Zählwerts der internen Uhr von einem Vielfachen der Periodendauer können den Datenaustausch im Automatisierungskommunikationsnetzwerk beeinflussen. Beispielsweise werden Empfangszeiten von Datagrammen mit Zeiten von internen Uhren versehen. Auch müssen verschiedene Netzwerkteilnehmer Signale zu festgelegten Zeiten ausgeben. Eine Abweichung des Zählwerts der internen Uhr von einem Vielfachen der Periodendauer kann aus diesen Gründen einen synchronen Datenaustausch im Automatisierungskommunikationsnetzwerk negativ beeinflussen. Vorteilhafterweise kann ein solcher Einfluss durch eine festgelegte Reihenfolge der Inkremente der Sequenz von Inkrementen minimiert werden.

[0013] In einer Ausführungsform wird eine Drift der internen Uhr des Netzwerkteilnehmers im Vergleich zu einer Referenzuhr des Automatisierungskommunikationsnetzwerks durch Anpassen zumindest eines Inkrements der Sequenz der Inkremente berücksichtigt. Vorteilhafterweise wird ein synchroner Datenaustausch gewahrt, wenn eine Drift der internen Uhr berücksichtigt und kompensiert wird.

[0014] In einer Ausführungsform wird das Inkrementieren der internen Uhr mittels der Sequenz der ganzzahligen Inkremente wiederholt. Dadurch bleibt die Synchronität des Datenaustauschs vorteilhafterweise erhalten.

[0015] Ein Netzwerkteilnehmer ist dazu vorgesehen, Daten mit weiteren Netzwerkteilnehmern in einem Automatisierungskommunikationsnetzwerk mit einer festgelegten Taktfrequenz auszutauschen. Der Netzwerkteilnehmer weist eine interne Uhr zum Synchronisieren des Datenaustauschs mit zumindest einem weiteren Netzwerkteilnehmer auf. Die interne Uhr ist dazu vorgesehen, eine Zeit in als ganzzahligen Zählwert bereitzustellen. Die Taktfrequenz ist derart festgelegt, dass eine Periodendauer pro Takt von der internen Uhr nicht durch einen ganzzahligen Zählwert darstellbar ist. Der Netzwerkteilnehmer weist eine interne Steuereinheit auf. Die interne Steuereinheit ist dazu ausgebildet, die interne Uhr mittels einer festgelegten Sequenz von ganzzahligen Inkrementen zu inkrementieren. Die Sequenz der ganzzahligen Inkremente ist derart festgelegt, dass eine Summe der ganzzahligen Inkremente einem ganzzahligen Vielfachen der Periodendauer entspricht.

[0016] Ein Automatisierungskommunikationsnetzwerk weist zumindest zwei Netzwerkteilnehmer auf. Die Netzwerkteilnehmer sind zum Austauschen von Daten über einen Feldbus miteinander verbunden. Zusätzlich weist das Automatisierungskommunikationsnetzwerk eine mit den Netzwerkteilnehmern verbundene Steuereinheit des Automatisierungskommunikationsnetzwerks auf.

[0017] Die oben beschriebenen Eigenschaften, Merkmale und Vorteile dieser Erfindung sowie die Art und Weise, wie diese erreicht werden, sind klarer und deutlicher verständlich im Zusammenhang mit der folgenden Beschreibung der Ausführungsbeispiele, die im Zusammenhang mit den Zeichnungen näher erläutert werden. Dabei zeigen in jeweils schematischer Darstellung:

Fig. 1 ein beispielhaftes Automatisierungskommunikationsnetzwerk;

Fig. 2 ein Regelungsprinzip zum Regeln einer internen Uhr eines zu synchronisierenden Netzwerkteilnehmers im Automatisierungskommunikationsnetzwerk; und

Fig. 3 eine Tabelle, die unterschiedliche Möglichkeiten eine interne Uhr eines Netzwerkteilnehmers mittels einer Sequenz von ganzzahligen Inkrementen zu inkrementieren zeigt.

[0018] **Fig. 1** zeigt schematisch ein Automatisierungskommunikationsnetzwerk **1**.

[0019] Das Automatisierungskommunikationsnetzwerk **1** weist eine Mehrzahl von Netzwerkteilneh-

mern **2** und eine Steuereinheit **50** auf. Beispielhaft weist das Automatisierungskommunikationsnetzwerk **1** neunzehn Netzwerkteilnehmer **2** auf. Das Automatisierungskommunikationsnetzwerk **1** kann jedoch eine andere Anzahl von Netzwerkteilnehmern **2** aufweisen. Eine Topologie des Automatisierungskommunikationsnetzwerks **1** kann von der in **Fig. 1** beispielhaft gezeigten Topologie abweichen. Die Steuereinheit **50** weist einen Master **51** auf, der beispielsweise als Software ausgebildet ist und zumindest eine Kommunikation, sprich einen Datenaustausch zwischen den Netzwerkteilnehmern **2** und der Steuereinheit **50** auf einem Feldbus **3** steuern kann. Das Automatisierungskommunikationsnetzwerk **1** weist einen übergeordneten Netzwerkteilnehmer **4** auf. Der übergeordnete Netzwerkteilnehmer **4** kann auch als Buskoppler bezeichnet werden. Ferner weist das Automatisierungskommunikationsnetzwerk **1** dem übergeordneten Netzwerkteilnehmer **4** untergeordnete Netzwerkteilnehmer **5** auf.

[0020] Die Steuereinheit **50** ist mit dem übergeordneten Netzwerkteilnehmer **4** über den Feldbus **3** verbunden. Die Netzwerkteilnehmer **2** sind ebenfalls über den Feldbus **3** miteinander verbunden. Über den Feldbus **3** können die Netzwerkteilnehmer **2** und die Steuereinheit **50** Daten miteinander austauschen. Beispielsweise können die Netzwerkteilnehmer **2** und die Steuereinheit **50** dazu ausgebildet sein, Daten auszutauschen, die auf dem EtherCAT Protokoll basieren. Entsprechend ist der Master **51** ausgebildet, Datagramme entsprechend des EtherCAT-Protokolls zu versenden bzw. zu empfangen. Die untergeordneten Netzwerkteilnehmer **5** weisen jeweils eine Anschalteinheit zum Verarbeiten von ausgetauschten Daten auf. Die Anschalteinheiten können auch als Slaves bezeichnet werden. Die Anschalteinheiten können beispielsweise als anwendungsspezifische integrierte Schaltungen (application-specific integrated circuit, ASIC) oder beispielsweise als im Feld programmierbare Gatter Anordnungen (Field Programmable Gate Array, FPGA) ausgebildet sein. Die Anschalteinheiten der untergeordneten Netzwerkteilnehmer **5** sind in **Fig. 1** nicht dargestellt.

[0021] Die untergeordneten Netzwerkteilnehmer **5** sind als Eingabe-/ Ausgabeeinheiten mit Anschlüssen **6** für Feldgeräte ausgebildet. Bei den Feldgeräten kann es sich beispielsweise um Sensoren und Aktoren handeln. Feldgeräte, die an das Automatisierungskommunikationsnetzwerk **1** angebunden sind, sind in **Fig. 1** nicht dargestellt.

[0022] Die untergeordneten Netzwerkteilnehmer **5** weisen ferner jeweils eine interne Steuereinheit auf. Die internen Steuereinheiten sind in **Fig. 1** nicht dargestellt. Die internen Steuereinheiten sind mit den Anschalteinheiten jeweils über eine Datenleitung verbunden. Die internen Steuereinheiten sind dazu ausgebildet, auf Grundlage von von den Anschalteinheiten verarbeiteten Daten die Feldgeräte anzusteuern.

[0023] Das Automatisierungskommunikationsnetzwerk **1** weist hinsichtlich des Datenaustauschs miteinander zu synchronisierende Netzwerkteilnehmer **7** auf. Beispielhaft weist das Automatisierungskommunikationsnetzwerk **1** der **Fig. 1** fünf miteinander zu synchronisierende Netzwerkteilnehmer **7** auf. Das Automatisierungskommunikationsnetzwerk **1** kann jedoch auch eine andere Anzahl von miteinander zu synchronisierenden Netzwerkteilnehmern **7** aufweisen. Das Automatisierungskommunikationsnetzwerk **1** weist zumindest zwei miteinander zu synchronisierende Netzwerkteilnehmer **7** auf. Zum Zweck des Synchronisierens des Datenaustauschs weisen die zu synchronisierenden Netzwerkteilnehmer **7** jeweils eine interne Uhr **8** auf. Nicht miteinander zu synchronisierende Netzwerkteilnehmer **9** weisen jeweils keine interne Uhr **8** auf. Eine Anordnung der zu synchronisierenden Netzwerkteilnehmer **7** und der nicht zu synchronisierenden Netzwerkteilnehmer **9** im Automatisierungskommunikationsnetzwerk **1** kann von der Darstellung der **Fig. 1** abweichen.

[0024] Die internen Uhren **8** der zu synchronisierenden Netzwerkteilnehmer **7** sind Bestandteil der Anschalteinheiten. Die internen Uhren **8** können beispielsweise als Schwingquarze ausgebildet sein. Die internen Uhren **8** sind jeweils als inkrementierende Zähler ausgebildet. Die internen Uhren **8** sind dazu vorgesehen, eine Zeit als ganzzahligen Zählwert bereitzustellen. Die internen Uhren **8** bilden ein System verteilter Uhren (distributed clocks) im Automatisierungskommunikationsnetzwerk **1**.

[0025] Als Referenzuhr **10** dient die interne Uhr **8** einer Anschalteinheit, die im Automatisierungskommunikationsnetzwerks **1** als erster Slave mit einer internen Uhr **8** nach dem Master **51** angeordnet ist. Dies ist in **Fig. 1** dadurch angedeutet, dass die interne Uhr **8** eines ersten untergeordneten Netzwerkteilnehmers **11** als größte Uhr dargestellt ist. Die Referenzuhr **10** kann beispielsweise an eine globale Uhr, beispielsweise an eine nach im IEEE **1588** Standard definierte Uhr (grandmaster clock), angepasst sein. Die Referenzuhr **10** ist dazu vorgesehen eine Systemzeit bereitzustellen. Die Referenzuhr **10** ist zur Synchronisation der Netzwerkteilnehmer **7** auf kurzen Zeitskalen, beispielsweise auf einer Sub-Millisekunden Zeitskala, vorgesehen. Dadurch betrifft die Synchronisation der Netzwerkteilnehmer **7** anhand der Referenzuhr **10** insbesondere eine Echtzeitsynchronisation.

[0026] Als eine absolute globale Zeitreferenz dient die interne Uhr **8** der Steuereinheit **50**, die Bestandteil des Masters **51** ist und als Masteruhr **12** bezeichnet werden soll. Die Masteruhr **12** kann beispielsweise auf einem globalen Zeitformat, beispielsweise

auf dem Zeitformat des Zeitzeichensenders DCF77, oder beispielsweise auf einer innerhalb des Automatisierungskommunikationsnetzwerks **1** geltenden Zeit, beispielsweise bereitgestellt von einer BIOS-Uhr, beruhen. Der Master **51** ist dazu ausgebildet, die Referenzuhr **10** zu initialisieren, die Systemzeit unter Verwendung der Masteruhr **12** bereitzustellen und den gesamten Datenaustausch im Automatisierungskommunikationsnetzwerk **1** zu synchronisieren. Da die sich nach der Referenzuhr **10** richtende Echtzeitsynchronisation der Netzwerkteilnehmer **7** und die sich nach der Masteruhr **12** richtende Synchronisation des gesamten Datenaustauschs des Automatisierungskommunikationsnetzwerks **1** auf verschiedenen Zeitskalen erfolgen, verletzt die Masteruhr **12** eine übergeordnete Stellung der Referenzuhr **10** des Automatisierungskommunikationsnetzwerks **1** nicht.

[0027] **Fig. 2** zeigt schematisch ein Regelungsprinzip **13** zum Regeln einer internen Uhr **8** eines zu synchronisierenden Netzwerkteilnehmers **7** im Automatisierungskommunikationsnetzwerk **1**. Die interne Uhr **8** ist als inkrementierender Zähler ausgebildet und dazu vorgesehen, eine lokale Zeit **14** des zu synchronisierenden Netzwerkteilnehmers **7** als ganzzahligen Zählwert bereitzustellen.

[0028] Die lokale Zeit **14** kann einem Synchronisationsmanager (Sync-Manager) **15** des Slaves bereitgestellt werden. Der Synchronisationsmanager **15** ist für einen konsistenten und sicheren Datenaustausch zwischen dem Master **51** und der mit dem Slave verbundenen internen Steuereinheit vorgesehen.

[0029] Der Master **51** kann ein Datagramm an die Slaves übermitteln. Der erste Slave des ersten untergeordneten Netzwerkteilnehmers **11** kann seine auf der Referenzuhr **10** beruhende Systemzeit im Datagramm hinterlegen. Dann kann das Datagramm vom ersten Slave an weitere Slaves im Automatisierungskommunikationsnetzwerk **1** weitergeleitet werden. Auf diese Weise können alle Slaves und der Master eine Kopie der Systemzeit erhalten.

[0030] Die internen Uhren **8** des Automatisierungskommunikationsnetzwerks **1** sind unabhängig voneinander ausgebildet. Dadurch, dass die internen Uhren **8** jeweils zu unterschiedlichen Zeiten aktiviert werden können, können die internen Uhren **8** jeweils untereinander einen zeitlichen Versatz aufweisen. Insbesondere können die internen Uhren **8** einen zeitlichen Versatz **16** im Vergleich zur Referenzuhr **10** aufweisen. Der zeitliche Versatz **16** zur Referenzuhr **10** kann für jede interne Uhr **8** lokal im jeweiligen Slave kompensiert werden. Um eine einheitliche Systemzeit im gesamten Automatisierungskommunikationsnetzwerk **1** bereitstellen zu können, kann der zeitliche Versatz **16** der internen Uhren **8** zur Systemzeit vom Master **51** für jede interne Uhr **8** ermittelt und jeweils in einem Register eines Slaves hinterlegt werden. Dadurch kann jedem Slave eine lokale Kopie **17** der Systemzeit bereitgestellt werden.

[0031] Die lokalen Kopien **17** der Systemzeit können für SyncSignale 18 oder für LatchSignale 19 verwendet werden. SyncSignale 18 und LatchSignale 19 sind Signale, die einer Synchronisation lokaler Anwendungen mit dem Datenaustausch des Automatisierungskommunikationsnetzwerk **1** dienen können. SyncSignale 18 werden von einem Slave ausgegeben. Ein SyncSignal 18 kann beispiesweise eine Unterbrechungsanforderung (interrupt) sein. LatchSignale 19 werden an einen Slave übermittelt. SyncSignale 18 können auf Basis der lokalen Kopien **17** der Systemzeit zu definierten Zeitpunkten von den Slaves ausgegeben werden. An die Slaves übermittelte LatchSignale 19 können mit definierten Zeitstempeln versehen werden (time stamping).

[0032] Da Datagramme, die vom Master **51** an die Slaves übermittelt werden, in den Slaves verarbeitet und an andere Slaves weitergeleitet werden müssen, kann es sein, dass eine Laufzeitverzögerung **20** beim Übermitteln eines Datagramms auftritt.

[0033] Dies kann auch durch endliche Kabellängen zwischen den Slaves hervorgerufen werden. Zum Synchronisieren der Netzwerkteilnehmer **7** muss die Laufzeitverzögerung zwischen der Referenzuhr **10** und einer internen Uhr **8** berücksichtigt werden. Um den Effekt der Laufzeitverzögerung zu kompensieren, kann der Master **51** ein Datagramm aussenden, dessen Empfangszeiten von jedem Slave auf Basis der jeweiligen lokalen Zeit **14** gespeichert werden. Diese lokalen Empfangszeiten **21** werden jeweils in einem Register **22** eines Slaves hinterlegt. Bei den lokalen Empfangszeiten **21** kann es sich beispielsweise um Zeiten handeln, zu denen ein Datenfeld des Datagramms an Anschlüssen der Slaves oder an Verarbeitungseinrichtungen der Slaves empfangen wird. Das Datenfeld kann beispielsweise ein sogenanntes Start-of-Frame Datenfeld sein, dass an eine Präambel des Datagramms anschließt. Der Master **51** kann auf die lokalen Empfangszeiten **21** zugreifen und daraus eine Laufzeitverzögerung **20** für jeden Slave ermitteln. Eine lokale Empfangszeit **21** kann also mittels der Laufzeitverzögerung **20** korrigiert werden. Unter zusätzlicher Berücksichtigung des zeitlichen Versatzes **16** resultiert eine verzögerungskorrigierte Empfangszeit **23** auf Basis der lokalen Kopie **17** der Systemzeit.

[0034] Ein weiterer Effekt, der zu Abweichungen zwischen einer internen Uhr **8** und der Referenzuhr **10** führen kann, ist eine Drift, die durch unterschiedliche Uhrengeschwindigkeiten hervorgerufen werden kann. Wenn eine interne Uhr **8**, die als inkrementierender Zähler die lokale Zeit **14** in einer Ganzzahldarstellung angibt, beispielsweise in einem Takt mit einer Periodendauer von 10ns ihren Zählwert der loka-

len Zeit **14** um den Wert „10“ erhöht, die Referenzuhr **10** jedoch pro Takt um 9ns fortschreitet, so ist die interne Uhr **8** schneller als die Referenzuhr **10**.

[0035] Um den Effekt der Drift zu kompensieren, kann der Master **51** Systemzeiten an die Slaves in periodischen Abständen übermitteln. Die übermittelten Systemzeiten **24**, bei denen auch eine Laufzeitverzögerung **20** berücksichtigt werden kann, und die verzögerungskorrigierte Empfangszeit **23** auf Basis der lokalen Kopie **17** der Systemzeit werden einer Vergleichseinrichtung **25** bereitgestellt. Die Vergleichseinrichtung **25** kann auch als Systemzeit-Differenzfilter bezeichnet werden. Die Vergleichseinrichtung **25** ist dazu ausgebildet, eine mittlere Systemzeitdifferenz **26** zwischen den periodisch übermittelten Systemzeiten **24** und der verzögerungskorrigierten Empfangszeit **23** auf Basis der lokalen Kopie **17** der Systemzeit zu ermitteln. Ist die mittlere Systemzeitdifferenz **26** positiv, ist die interne Uhr **8** schneller als die Referenzuhr **10**. Umgekehrt ist die interne Uhr **8** langsamer als die Referenzuhr **10**, wenn die mittlere Systemzeitdifferenz **26** negativ ist.

[0036] Auf Basis der mittleren Systemzeitdifferenz **26** wird anschließend eine Geschwindigkeitsdifferenz **29** zwischen der internen Uhr **8** und der Referenzuhr **10** ermittelt, geglättet und zum Kompensieren der Drift der internen Uhr **8** bereitgestellt.

[0037] Wenn eine interne Uhr **8** beispielsweise in einem Takt mit einer Periodendauer von 10ns ihren Zählwert der lokalen Zeit **14** um den Wert „10“ erhöht, eine Taktperiode der Referenzuhr **10** jedoch von der Periodendauer von 10ns abweicht, kann diese Abweichung über mehrere Takte hinweg zunehmen. Die Geschwindigkeitsdifferenz **29** wird einer Regelungseinrichtung **30** bereitgestellt. Die Regelungseinrichtung **30** kann die interne Uhr **8** auf Basis der Geschwindigkeitsdifferenz **29** an die Referenzuhr **10** anpassen. Das Anpassen kann dadurch erfolgen, dass der Zählwert der internen Uhr **8** gelegentlich um den Wert „9“ oder um den Wert „11“ erhöht wird.

[0038] In einem Betrieb des Automatisierungskommunikationsnetzwerks **1** tauschen alle Netzwerkteilnehmer **2** Daten mit einer festgelegten Taktfrequenz aus. Die Taktfrequenz kann beispielsweise 100MHz betragen. Das System der verteilten internen Uhren **8** des Automatisierungskommunikationsnetzwerks **1** kann ebenfalls mit einer 100MHz-Logik betrieben werden. Eine Periodendauer pro Takt beträgt bei 100 MHz 10ns. Es ist in diesem Fall zweckmäßig, dass eine interne Uhr **8** ihren Zählwert der lokalen Zeit **14** in einem Takt mit einer Periodendauer von 10ns um den Wert „10“ erhöht. Eine Zeitauflösung beträgt in diesem Fall 1ns. Unter diesen Bedingungen werden beispielsweise Datagramme mit einer Bitbreite von 1Bit mit einer Verarbeitungsrate von 100Mbit/s verarbeitet. Bei einer Kompensation der Drift kann der Zählwert der lokalen Zeit **14** im Takt mit der Periodendauer von 10ns statt um den Wert „10“ gelegentlich beispielsweise um dem Wert „9“ oder dem Wert „11“ erhöht werden.

[0039] Es kann festgelegt sein, dass die Verarbeitungsrate 1000Mbit/s betragen soll. In diesem Fall bietet es sich an, Datagramme mit einer Breite von 1Byte (8Bit) mit einer Taktfrequenz von 125MHz zu verarbeiten. Die Periodendauer pro Takt beträgt 8ns. Wenn das System der verteilten internen Uhren **8** an diesen Takt angepasst werden soll, so können die internen Uhren **8** ihre Zählwerte der lokalen Zeiten **14** in einem Takt mit einer Periodendauer von 8ns um den Wert „8“ erhöhen. Bei einer Kompensation der Drift kann der Zählwert der lokalen Zeit **14** im Takt mit der Periodendauer von 8ns statt um den Wert „8“ gelegentlich beispielsweise um den Wert „7“ oder um den Wert „9“ erhöht werden.

[0040] In der nachfolgenden Beschreibung wird ein Verfahren zum Betreiben eines zu synchronisierenden Netzwerkteilnehmers **7** im Automatisierungskommunikationsnetzwerk **1** beschrieben. Das Verfahren ist dazu vorgesehen, einen Datenaustausch des zu synchronisierenden Netzwerkteilnehmers **7** im Betrieb des Automatisierungskommunikationsnetzwerks **1** mit zumindest einem weiteren Netzwerkteilnehmer **7** zu synchronisieren. Alle Netzwerkteilnehmer **2** des Automatisierungskommunikationsnetzwerks **1** sollen Daten bei einer Taktfrequenz austauschen, die derart festgelegt ist, dass die Periodendauer pro Takt von der internen Uhr **8** nicht durch einen ganzzahligen Zählwert darstellbar ist.

[0041] Beispielsweise können für eine Verarbeitungsrate von 10.000Mbit/s beispielsweise 64Bit breite Datagramme bei einer Taktfrequenz von 156,25 MHz verarbeitet werden. Eine Periodendauer pro Takt beträgt in diesem Fall 6,4ns. Da die internen Uhren **8** dazu vorgesehen sind, lokale Zeiten **14** als ganzzahlige Zählwerte bereitzustellen, ist dies für die Periodendauer von 6,4ns nicht möglich. Das Register **22** eines Slaves, in dem beispielsweise lokale Empfangszeitenzeiten **21** hinterlegt werden, kann ebenfalls nur ganzzahlige Werte enthalten.

[0042] Grundsätzlich ist es zwar möglich, dass die lokalen Zeiten **14** mittels einer anderen Taktdomäne als einer Taktdomäne der Datenverarbeitung generiert werden. Allerdings ist das System der verteilten internen Uhren **8** an die Datenverarbeitung gekoppelt. Beispielsweise werden dem Datagramm beim Ermitteln der Laufzeitverzögerung **20** lokale Empfangszeitenzeiten **21** zugeordnet. Wenn Datagramme im Automatisierungskommunikationsnetzwerk **1** mit einer festgelegten Taktfrequenz verarbeitet werden, das System der verteilten internen Uhren **8** jedoch in einer anderen Taktdomäne betrieben wird, müssen die lokalen Zeiten **14** aus ihrer Takt-

domäne in die Taktdomäne der Datenverarbeitung transformiert werden. Diese Transformation ist allerdings nicht verzögerungsfrei und kann beim Datenaustausch zu zusätzlichen Abweichungen der lokalen Zeiten **14** von der Systemzeit führen. Dadurch kann es sein, dass im Rahmen der Transformation die Empfangszeit eines Datagramms einen erhöhten Fehler aufweist. Aus diesem Grund soll beim Verfahren zum Betreiben eines zu synchronisierenden Netzwerkteilnehmers **7** die lokale Zeit **14** des zu synchronisierenden Netzwerkteilnehmers **7** anhand der Taktfrequenz der Datenverarbeitung generiert werden.

[0043] Das Verfahren umfasst einen Verfahrensschritt, im Rahmen dessen die interne Uhr **8** des zu synchronisierenden Netzwerkteilnehmers **7** mittels einer festgelegten Sequenz von ganzzahligen Inkrementen inkrementiert wird. Die Sequenz der ganzzahligen Inkremente ist derart festgelegt, dass eine Summe der ganzzahligen Inkremente der Sequenz der Inkremente einem ganzzahligen Vielfachen der Periodendauer entspricht, wobei die Periodendauer pro Takt von der internen Uhr **8** nicht durch einen ganzzahligen Zählwert darstellbar ist. Das Verfahren beruht also darauf, dass die Sequenz der ganzzahligen Inkremente derart festgelegt ist, dass eine Abweichung des Zählwerts der internen Uhr **8** von einem idealen Zählwert der internen Uhr **8** nach dem Inkrementieren der internen Uhr **8** mittels der Sequenz der Inkremente ausgeglichen wird. Der ideale Zählwert entspricht einem Produkt aus einer Anzahl der Takte bzw. einer Anzahl der Inkremente der Sequenz von Inkrementen und der nicht durch einen ganzzahligen Zählwert darstellbaren Periodendauer, die als ideales Inkrement bezeichnet werden soll.

[0044] Für das Beispiel der 156,25MHz-Logik kann beispielsweise eine Sequenz der Inkremente „6“ und „7“ gewählt werden. Beispielsweise liefert die Sequenz der Inkremente (**6**, **6**, **6**, **7**, **7**) eine Summe der Inkremente mit einem Wert von „32“. Dies entspricht einem fünffachen des idealen Inkrements mit einem Wert von „6,4“. Nach dem Inkrementieren der internen Uhr **8** mittels der Sequenz (**6**, **6**, **6**, **7**, **7**) weist der Zählwert der internen Uhr **8** also keine Abweichung zum idealen Zählwert „32“ auf.

[0045] In **Fig. 3** ist eine Tabelle dargestellt, die unterschiedliche Möglichkeiten zeigt, eine interne Uhr **8** eines zu synchronisierenden Netzwerkteilnehmers **7** mittels einer Sequenz von ganzzahligen Inkrementen zu inkrementieren. Beispielhaft soll das ideale Inkrement pro Takt „6,4“ betragen.

[0046] Die Tabelle der **Fig. 3** zeigt eine Spalte **100**, in welcher Nummern der Takte bzw. Nummern der Inkremente der Sequenz von Inkrementen „k“ eingetragen sind. In einer ersten Spalte **101** ist eine erste Sequenz von Inkrementen „N_k“ eingetragen. In einer zweiten Spalte **102** ist eine zweite Sequenz von Inkrementen „N_k“ eingetragen. In einer dritten Spalte **103** ist eine dritte Sequenz von Inkrementen „N_k“ eingetragen. Die erste, die zweite und die dritte Sequenz von Inkrementen unterscheiden sich hinsichtlich einer Reihenfolge der ganzzahligen Inkremente „6“ und „7“. Die erste Sequenz von Inkrementen lautet (6, 7, 6, 7, 6). Die zweite Sequenz von Inkrementen lautet (7, 6, 6, 6, 7). Die dritte Sequenz von Inkrementen lautet (6, 6, 6, 7, 7).

[0047] In einer vierten Spalte **104** sind Summen „ΣN_k“ über die Inkremente der ersten Sequenz eingetragen. Beispielsweise ist nach dem dritten Takt (k= 3) $\Sigma N_k = N_1 + N_2 + N_3$. Nach dem fünften Takt (k= 5) ist $\Sigma N_k = N_1 + N_2 + N_3 + N_4 + N_5$. Analog sind in einer fünften Spalte **105** und in einer sechsten Spalte **106** jeweils Summen „ΣN_k“ über die Inkremente der zweiten Sequenz bzw. der dritten Sequenz eingetragen. Die Summen über die Inkremente der ganzzahligen Inkremente der jeweiligen Sequenz von Inkrementen betragen jeweils nach dem fünften Takt (k = 5) „32“. Die jeweiligen Summen der Inkremente sind identisch und entsprechen einem ganzzahligen Vielfachen des idealen Inkrements „6,4“.

[0048] In einer siebten Spalte **107** sind Abweichungen „(ΣN_k) - nT“ des Zählwerts einer internen Uhr **8** nach einem Takt vom idealen Zählwert für die erste Sequenz von Inkrementen eingetragen. „T“ entspricht dabei der Periodendauer bzw. dem idealen Inkrement. „n“ bezeichnet einen Endwert der Summen für den Takt „k“. Analog sind in einer achten Spalte **108** und in einer neunten Spalte **109** Abweichungen „(ΣN_k) - nT“ der Zählwerte von internen Uhren **8** nach einem Takt vom idealen Zählwert für die zweite bzw. die dritte Sequenz von Inkrementen eingetragen.

[0049] Anhand der Abweichungen „(ΣN_k) - nT“ ist zu erkennen, dass die Reihenfolge der Inkremente „6“ und „7“ einen Einfluss auf die Abweichungen hat. Beispielsweise weist die dritte Sequenz der Inkremente (**6**, **6**, **6**, **7**, **7**) eine maximale Abweichung von „-1,2“ nach dem dritten Takt auf. Bei der zweiten Sequenz der Inkremente (**7**, **6**, **6**, **6**, **7**) beträgt eine maximale Abweichung „+0,6“ nach dem ersten Takt bzw. „-0,6“ nach dem vierten Takt. Durch eine Verwendung der zweiten Sequenz von Inkrementen statt der dritten Sequenz von Inkrementen zum Inkrementieren einer internen Uhr **8**, d. h. durch Anpassen der Reihenfolge der Sequenz von Inkrementen, kann beim Verfahren zum Betreiben eines zu synchronisierenden Netzwerkteilnehmers **7** eine maximale Abweichung reduziert werden.

[0050] Die erste Sequenz von Inkrementen (**6**, **7**, **6**, **7**, **6**) ist eine alternierende Sequenz der Inkremente „6“ und „7“. Eine maximale Abweichung beträgt in diesem Fall „-0,4“ nach dem ersten Takt bzw. „+0,4“ nach dem vierten Takt. Durch eine Verwendung der

ersten Sequenz von Inkrementen statt der zweiten Sequenz von Inkrementen zum Inkrementieren einer internen Uhr **8** kann beim Verfahren zum Betreiben eines zu synchronisierenden Netzwerkteilnehmers **7** also eine maximale Abweichung weiter reduziert werden. Die erste Sequenz von Inkrementen stellt eine Sequenz dar, für die die maximale Abweichung minimiert worden ist.

[0051] Allgemein kann beim Verfahren also eine Sequenz von ganzzahligen Inkrementen gewählt werden, die eine alternierende Sequenz eines ersten Inkrements und eines zweiten Inkrements ist. Das erste Inkrement ist die größte ganze Zahl, die kleiner als die Periodendauer bzw. als das ideale Inkrement ist. Das zweite Inkrement ist die kleinste ganze Zahl, die größer als die Periodendauer bzw. als das ideale Inkrement ist.

[0052] Bei der ersten Sequenz von Inkrementen stellt das Inkrement „6“ das erste Inkrement dar. Das Inkrement „7“ stellt das zweite Inkrement dar. Ob die alternierende Sequenz mit dem ersten Inkrement oder mit dem zweiten Inkrement begonnen werden sollte, hängt vom idealen Inkrement ab. Bei einem idealen Inkrement von „6,4“ ist es zweckmäßig die alternierende Sequenz mit dem ersten Inkrement zu beginnen, da eine Abweichung des ersten Inkrements vom idealen Inkrement in diesem Fall kleiner ist, als eine Abweichung des zweiten Inkrements vom idealen Inkrement. Beträgt das ideale Inkrement beispielsweise „6,6“, ist es zweckmäßig, die alternierende Sequenz mit dem zweiten Inkrement zu beginnen.

[0053] Allgemein kann beim Verfahren also eine Sequenz von ganzzahligen Inkrementen gewählt werden, deren Reihenfolge derart festgelegt ist, dass nach jedem Takt eine Abweichung einer Summe von Inkrementen von bereits erfolgten Takten von einem Vielfachen der Periodendauer minimal ist. Dies ist beispielsweise für die erste Sequenz von Inkrementen der Fall.

[0054] Im Betrieb des Automatisierungskommunikationsnetzwerks **1** bei einer Taktfrequenz, die derart festgelegt ist, dass die Periodendauer pro Takt von einer internen Uhr **8** nicht durch einen ganzzahligen Zählwert darstellbar ist, kann das Verfahren wiederholt werden. Das Inkrementieren einer internen Uhr **8** mittels der Sequenz von ganzzahligen Inkrementen kann also wiederholt werden, um die Synchronität des Netzwerkteilnehmers **7** mit weiteren Netzwerkteilnehmern **7** zu wahren.

[0055] Beim Verfahren kann auch eine Drift der internen Uhr **8** des zu synchronisierenden Netzwerkteilnehmers **7** im Vergleich zur Referenzuhr **10** des Automatisierungskommunikationsnetzwerks **1** durch Anpassen zumindest eines Inkrements der Sequenz der Inkremente berücksichtigt werden. Dabei sollte die Kompensation der Drift möglichst zu einem Zeitpunkt erfolgen, an dem die Drift festgestellt wurde, da sich ansonsten die mit der Drift einhergehende Abweichung mit zunehmender Anzahl von Takten akkumuliert.

[0056] Auch das Inkrementieren der internen Uhr **8** mittels der angepassten Sequenz der ganzzahligen Inkremente kann wiederholt werden, um eine Synchronität des Netzwerkteilnehmers **7** mit weiteren Netzwerkteilnehmern **7** zu wahren.

ZITATE ENTHALTEN IN DER BESCHREIBUNG

Diese Liste der vom Anmelder aufgeführten Dokumente wurde automatisiert erzeugt und ist ausschließlich zur besseren Information des Lesers aufgenommen. Die Liste ist nicht Bestandteil der deutschen Patent- bzw. Gebrauchsmusteranmeldung. Das DPMA übernimmt keinerlei Haftung für etwaige Fehler oder Auslassungen.

Zitierte Patentliteratur

- EP 2544389 B1 [0002]

Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines Netzwerkteilnehmers (7) in einem Automatisierungskommunikationsnetzwerk (1),
wobei der Netzwerkteilnehmer (7) dazu vorgesehen ist, Daten mit weiteren Netzwerkteilnehmern (2) im Automatisierungskommunikationsnetzwerk (1) mit einer festgelegten Taktfrequenz auszutauschen,
wobei der Netzwerkteilnehmer (7) eine interne Uhr (8) zum Synchronisieren des Datenaustauschs mit zumindest einem weiteren Netzwerkteilnehmer (7) aufweist,
wobei die interne Uhr (8) dazu vorgesehen ist, eine Zeit als ganzzahligen Zählwert bereitzustellen,
wobei die Taktfrequenz derart festgelegt ist, dass eine Periodendauer pro Takt von der internen Uhr (8) nicht durch einen ganzzahligen Zählwert darstellbar ist,
wobei das Verfahren folgenden Verfahrensschritt umfasst:
- Inkrementieren der internen Uhr (8) mittels einer festgelegten Sequenz von ganzzahligen Inkrementen, wobei die Sequenz der ganzzahligen Inkremente derart festgelegt ist, dass eine Summe der ganzzahligen Inkremente einem ganzzahligen Vielfachen der Periodendauer entspricht.

2. Verfahren gemäß Anspruch 1,
wobei die Sequenz von ganzzahligen Inkrementen eine alternierende Sequenz eines ersten Inkrements und eines zweiten Inkrements ist,
wobei das erste Inkrement die größte ganze Zahl, die kleiner als die Periodendauer ist, ist,
wobei das zweite Inkrement die kleinste ganze Zahl, die größer als die Periodendauer ist, ist.

3. Verfahren gemäß Anspruch 1 oder 2,
wobei eine Reihenfolge der Inkremente derart festgelegt ist, dass nach jedem Takt eine Abweichung einer Summe von Inkrementen von bereits erfolgten Takten von einem Vielfachen der Periodendauer minimal ist.

4. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei eine Drift der internen Uhr (8) des Netzwerkteilnehmers (7) im Vergleich zu einer Referenzuhr (10) des Automatisierungskommunikationsnetzwerks (1) durch Anpassen zumindest eines Inkrements der Sequenz von Inkrementen berücksichtigt wird.

5. Verfahren gemäß einem der vorhergehenden Ansprüche, wobei das Inkrementieren der internen Uhr (8) mittels der Sequenz von ganzzahligen Inkrementen wiederholt wird.

6. Netzwerkteilnehmer (7),
der dazu vorgesehen ist, Daten mit weiteren Netzwerkteilnehmern (2) in einem Automatisierungskommunikationsnetzwerk (1) mit einer festgelegten Taktfrequenz auszutauschen,
wobei der Netzwerkteilnehmer (7) eine interne Uhr (8) zum Synchronisieren des Datenaustauschs mit zumindest einem weiteren Netzwerkteilnehmer (7) aufweist,
wobei die interne Uhr (8) dazu vorgesehen ist, eine Zeit als ganzzahligen Zählwert bereitzustellen,
wobei die Taktfrequenz derart festgelegt ist, dass eine Periodendauer pro Takt von der internen Uhr (8) nicht durch einen ganzzahligen Zählwert darstellbar ist,
wobei der Netzwerkteilnehmer (7) eine interne Steuereinheit aufweist,
wobei die interne Steuereinheit dazu ausgebildet ist, die interne Uhr (8) mittels einer festgelegten Sequenz von ganzzahligen Inkrementen zu inkrementieren,
wobei die Sequenz von ganzzahligen Inkrementen derart festgelegt ist, dass eine Summe der ganzzahligen Inkremente einem ganzzahligen Vielfachen der Periodendauer entspricht.

7. Automatisierungskommunikationsnetzwerk
mit zumindest zwei Netzwerkteilnehmern (7) gemäß Anspruch 6,
wobei die Netzwerkteilnehmer (7) zum Austauschen von Daten über einen Feldbus (3) miteinander verbunden sind, wobei die Netzwerkteilnehmer (7) mit einer Steuereinheit (50) des Automatisierungskommunikationsnetzwerks (1) verbunden sind.

Es folgen 3 Seiten Zeichnungen

Anhängende Zeichnungen

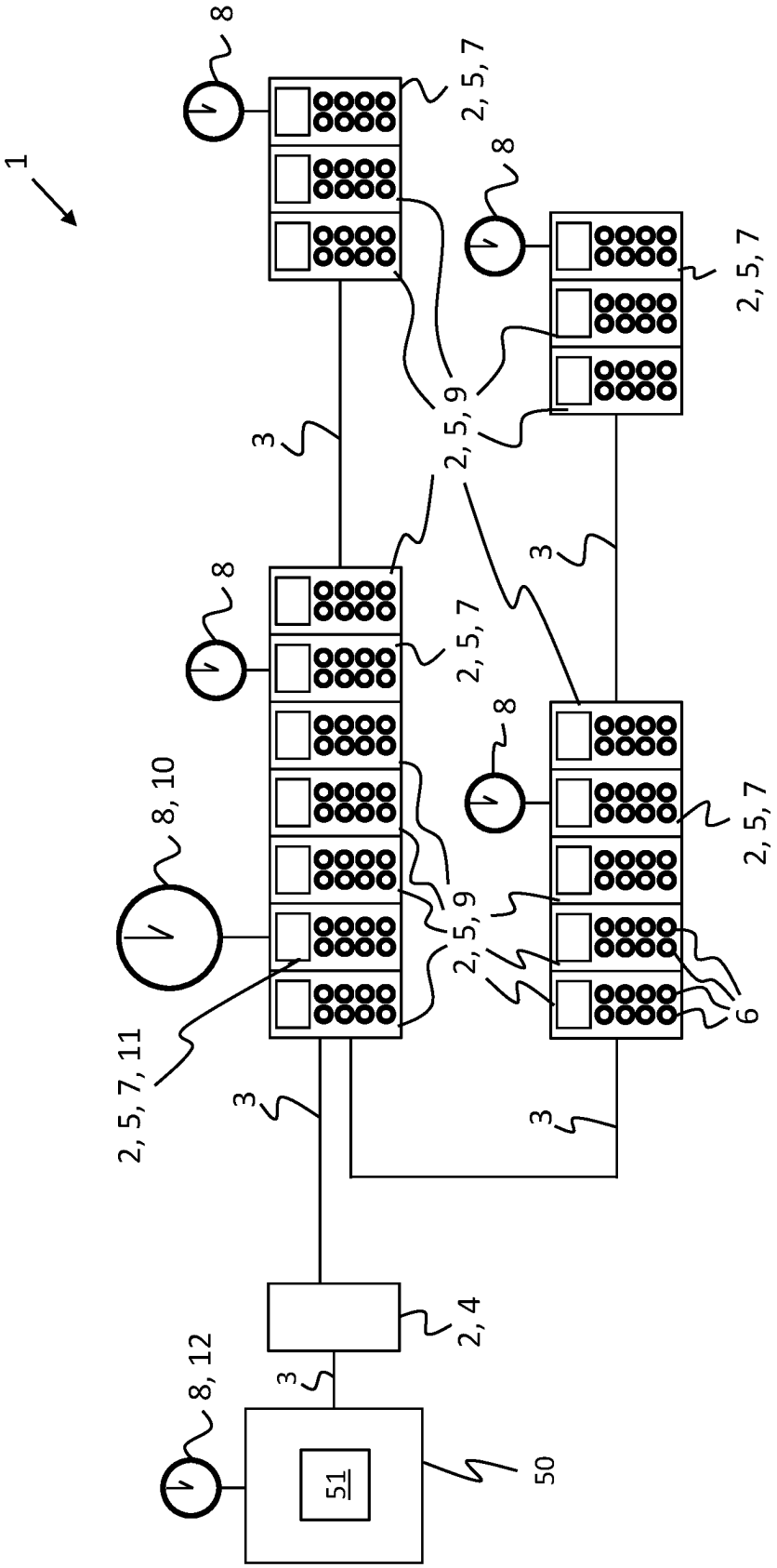


Fig. 1

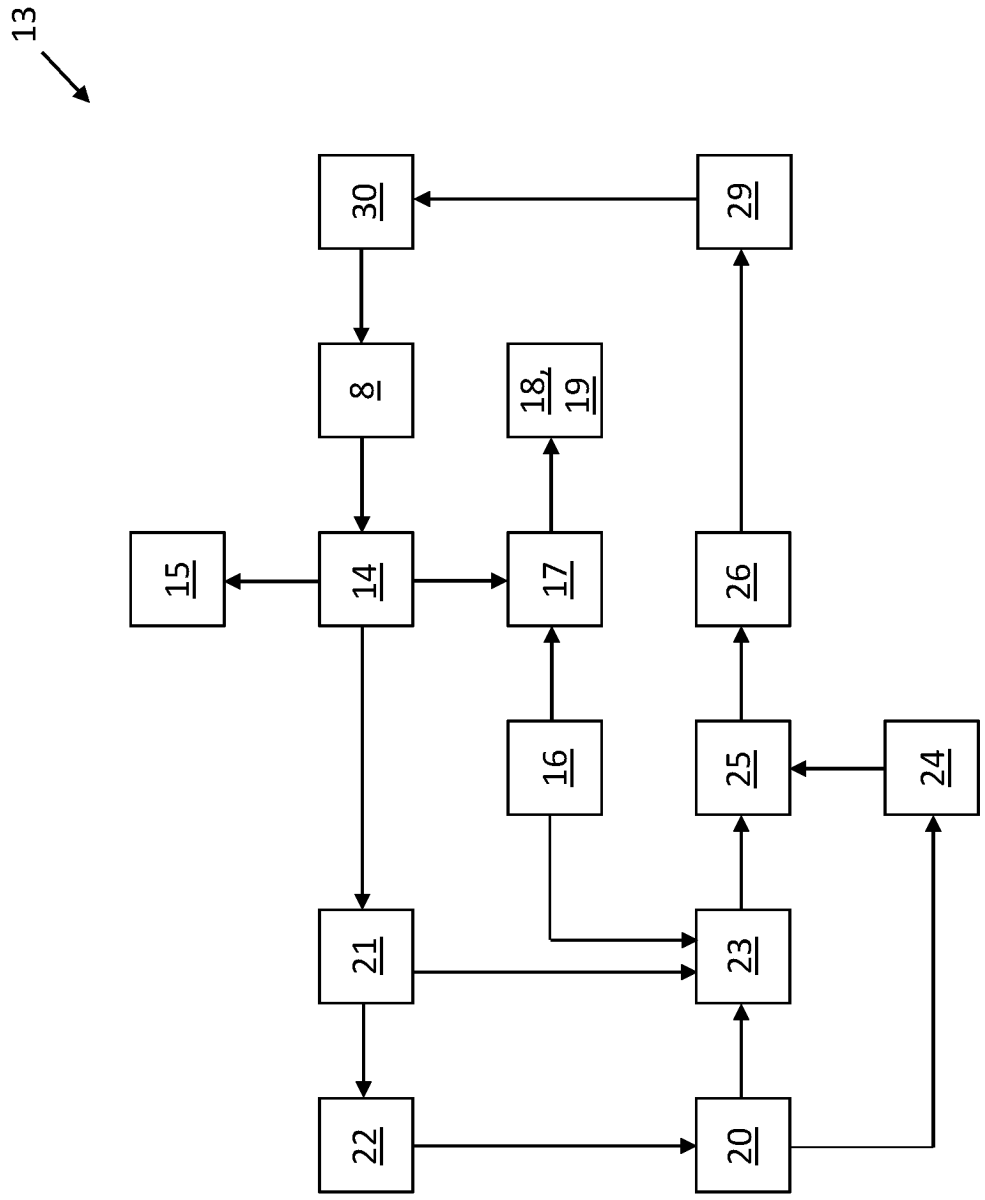


Fig. 2

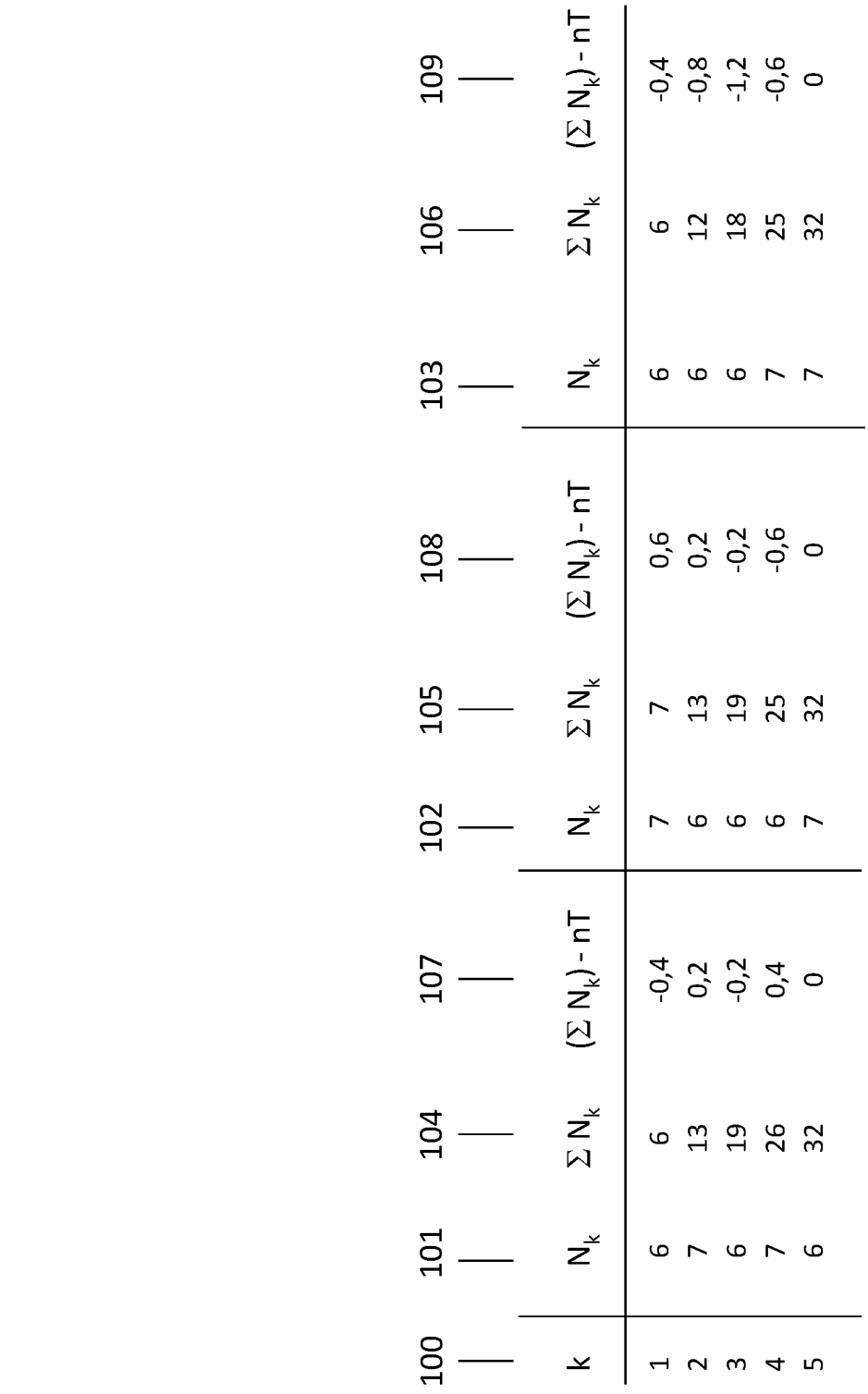


Fig. 3

 Das Dokument wurde durch die Firma Jouve erstellt.