

Verfahren und System zur Zeitsynchronisierung in einem ad-hoc-Netzwerk

Die Erfindung betrifft ein Verfahren und ein System zur
5 Zeitsynchronisierung in einem ad-hoc-Netzwerk.

In mobilen Netzwerken ohne Infrastruktur - so genannten
ad-hoc-Netzwerken - wird das Management, die Überwachung
und die Kontrolle des Datenverkehrs direkt zwischen den
10 einzelnen Netzteilnehmern - den so genannten Netzknoten
bzw. Knoten - abgewickelt.

Eine wesentliche Funktion ist hierbei die
Zeitsynchronisierung zwischen allen Knoten eines ad-hoc-
15 Netzwerkes. Eine identische Zeitbasis bei allen Knoten des
ad-hoc-Netzwerkes ist zwingende Voraussetzung für die
zeitkorrekte Synchronisierung aller Knoten des ad-hoc-
Netzwerkes auf die in einem bestimmten Zeitfenster
übertragenen Synchronisierbitmuster zur Synchronisierung
20 auf die korrekten Phase und Frequenz des
Übertragungssignals z. B. in einem bestimmten
Zeitabschnitt eines in einem ad-hoc-Netzwerk verwendeten
Frequenzsprungverfahrens.

25 Die US 2005/0169233 A1 beschreibt ein Verfahren zur
Zeitsynchronisierung von Netz-Knoten eines ad-hoc-Netzes.
Die Zeitinformation zur Zeitsynchronisierung wird hierbei
über Zeitstempel in einzelnen Datenpaketen übertragen.

30 Aus der WO 2011/154911 A1 ist eine Zeitsynchronisierung in
einem ad-hoc-Netzwerk bekannt. Hierbei werden zuerst
Cluster von jeweils regional benachbarten Knoten gebildet.
Innerhalb jedes einzelnen gebildeten Clusters erfolgt eine
Intra-Cluster-Zeitsynchronisierung, indem in einer

- festgelegten Reihenfolge einzelne Knoten des Clusters eine Nachricht zur Zeitsynchronisierung mit dem Sendezeitpunkt der Nachricht in der lokalen Zeit des sendenden Knotens versenden, mit dem die übrigen Knoten des Clusters ihre
- 5 lokale Zeit an die lokale Zeit des sendenden Knotens synchronisieren. Nachteilig an der Zeitsynchronisierung der WO 2011/154911 A1 ist einerseits der Zeitverzug in der Durchführung der Zeitsynchronisierung, der aus der für die Bildung des Clusters benötigten Zeit resultiert, und
- 10 andererseits der Aufwand für die Durchführung der Zeitsynchronisierung, der eine Festlegung der Reihenfolge für die Versendung von Nachrichten zur Zeitsynchronisierung beinhaltet.
- 15 Aus der US 2003/0117991 A1 geht eine Zeitsynchronisierung von Netzknoten in einem Mobilfunknetz hervor, bei der vorab die Hierarchie festgelegt wird, die für jeden Netzknoten Referenz-Netzknoten bestimmt, an die der jeweilige Netzknoten seine Zeit synchronisieren kann.
- 20 Nachteilig an diesem Synchronisierungsverfahren ist der Zeitverzug für die Bestimmung der Zeitreferenz-Hierarchie und für die Bekanntmachung dieser Hierarchie von Referenz-Netzknoten an jeden Netzknoten des ad-hoc-Netzwerkes.
- 25 Aus der US 2010/0238890 A1 ist eine Zeitsynchronisierung zwischen einzelnen Netzknoten eines ad-hoc-Netzwerkes bekannt, das nach dem Master-Slave-Prinzip funktioniert. Es wird ein Master-Netzknoten festgelegt, der die Zeitreferenz für insgesamt M Slave-Netzknoten zur
- 30 Verfügung stellt. Nachteilig an diesem Synchronisierungsverfahren ist ebenfalls der Zeitverzug für die Festlegung des Master-Netzknotens und für die Bekanntmachung des Master-Netz-Knotens bei allen M Slave-Netzknoten des ad-hoc-Netzes.

Aufgabe der Erfindung ist es deshalb, ein Verfahren und ein System zur Zeitsynchronisierung in einem ad-hoc-Netzwerk zu schaffen, das schnellstmöglich und
5 aufwandsminimiert eine Zeitsynchronisierung mit allen Knoten des ad-hoc-Netzwerkes ermöglicht.

Die Aufgabe wird durch ein erfindungsgemäßes Verfahren zur Zeitsynchronisierung in einem mobilen ad-hoc-Netzwerk mit
10 den Merkmalen des Patentanspruchs 1 und durch ein erfindungsgemäßes System zur Zeitsynchronisierung in einem mobilen ad-hoc-Netzwerk mit den Merkmalen des Patentanspruchs 17 gelöst. Vorteilhafte technische Weiterbildungen werden in den jeweils abhängigen
15 Patentansprüchen aufgezeigt.

Hierzu sendet jeder Knoten eines ad-hoc-Netzes jeweils eine Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit in jeweils einem bestimmten Zeitraster aus, die jeweils von
20 Netzknoten, die sich in Empfangsreichweite des sendenden Knotens befinden, durch Versenden einer Quittierungs-Nachricht quittiert werden. Ausgehend von zwei Knoten, die jeweils in Übertragungsbereichweite zueinander positioniert sind, wird aus den Nachrichten einer Quittierungs-
25 Nachricht durch den die Quittierungs-Nachricht empfangenden Knoten derjenige Knoten festgelegt, an dessen lokale Zeit der jeweils andere Knoten seine lokale Zeit synchronisiert. Derjenige Knoten, dessen lokale Zeit zur Synchronisierung der lokalen Zeit des jeweils anderen
30 Knoten dient, stellt somit in dem aus zwei Knoten sich bildenden ad-hoc-Netzwerk den lokale Zeit-Master des jeweils anderen Knotens dar.

Bei den beiden Knoten kann es sich um Knoten handeln, die jeweils noch nicht einem ad-hoc-Netzwerk angehören und somit über den Vorgang der Zeitsynchronisierung ein gemeinsames ad-hoc-Netzwerk gründen. Bei den beiden Knoten
5 kann es sich auch um Knoten handeln, die jeweils beide einem unterschiedlichen ad-hoc-Netzwerk angehören. In diesem Fall werden die zu jeweils einem der beiden Knoten gehörigen ad-hoc-Netzwerke zusammengefügt und die zu den beiden ad-hoc-Netzwerken gehörigen Knoten synchronisieren
10 jeweils ihre lokale Zeit an die lokale Zeit des festgelegten Knotens. Auch kann es sich bei den beiden Knoten jeweils um einen Knoten, der keinem ad-hoc-Netzwerk angehört, und um einen Knoten, der einem ad-hoc-Netzwerk angehört, handeln. In diesem Fall wird der Knoten ohne
15 Einbindung in ein ad-hoc-Netzwerk in das ad-hoc-Netzwerk des jeweils anderen Knoten integriert und die einzelnen Knoten des ursprünglichen ad-hoc-Netzwerkes synchronisieren ihre lokale Zeit auf die lokale Zeit des festgelegten Knotens.

20

In allen drei Fällen wird mit höchster Priorität derjenige Knoten von den beiden sich in Übertragungsbereich befindenden Knoten bevorzugt festgelegt, dessen lokale Zeit die jeweils höchste Zeitgenauigkeit aufweist oder der
25 an einem ad-hoc-Netzwerk an einem Knoten angebunden ist, dessen lokale Zeit die jeweils höchste Zeitgenauigkeit aufweist. Auf diese Weise ist gewährleistet, dass alle Knoten des sich nun bildenden ad-hoc-Netzwerkes mit der höchstmöglichen Zeitgenauigkeit zueinander
30 zeitsynchronisiert sind und somit eine bestmögliche Phasen- und Frequenzsynchronisierung aller Knoten des sich nun bildenden ad-hoc-Netzwerkes an die in einem Zeitabschnitt des Frequenzsprungverfahrens verwendete

Phase bzw. Frequenz des im ad-hoc-Netzwerk verwendeten Übertragungssignals ermöglicht wird.

- Wird ein einzig aus zwei Knoten bestehendes ad-hoc-Netzwerk gebildet, deren lokale Zeiten jeweils eine identische Zeitgenauigkeit aufweisen, so wird bevorzugt derjenige Knoten festgelegt, um seine lokale Zeit zur Synchronisierung der lokalen Zeit des jeweils anderen Knoten zur Verfügung zu stellen, der zuerst auf eine von einem der beiden Knoten gesendete Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit - typischerweise eine "Hallo-Nachricht" - eine Quittierungs-Nachricht verschickt. Somit bestimmt ein Knoten, der mit der Versendung einer Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit seine Anwesenheit einem potentiellen Nachbar-Knoten signalisiert und mit diesem potentiellen Nachbar-Knoten ein ad-hoc-Netzwerk gründen will, den antwortenden Nachbar-Knoten zu seinem lokalen Zeit-Master und synchronisiert seine lokale Zeit an die lokale Zeit des antwortenden Nachbar-Knotens. Auf diese Weise wird der Prozess zur Bestimmung, welcher der beiden Knoten zum lokalen Zeit-Master wird, vereinfacht und damit beschleunigt.
- Für den Fall, dass mindestens einer der beiden sich in Übertragungsbereichweite zueinander befindenden Knoten in einem ad-hoc-Netzwerk mit mindestens einem weiteren Knoten integriert ist und die lokalen Zeiten aller Knoten in dem sich nun bildenden ad-hoc-Netzwerk eine identische Zeitgenauigkeit aufweisen, wird in der nächst niedrigeren Priorität bevorzugt derjenige Knoten der beiden sich in Übertragungsbereichweite zueinander befindenden Knoten zum lokalen Zeit-Master festgelegt, der mit einer größeren Anzahl von Knoten in einem bisher bestehenden ad-hoc-

Netzwerk bereits verbunden ist. An seine lokale Zeit werden die lokalen Zeiten aller Knoten, die in dem sich nun bildenden ad-hoc-Netzwerk integriert werden, direkt oder indirekt synchronisiert. Eine derartige Festlegung
5 eines Knoten bedingt einen minimal erforderlichen Synchronisierungsaufwand zwischen den einzelnen Knoten des sich nun bildenden ad-hoc-Netzwerkes.

Für den Fall, dass die beiden sich in
10 Übertragungsreichweite zueinander befindenden Knoten und die mit diesen beiden Knoten bisher in einem ad-hoc-Netzwerk integrierten Knoten jeweils eine lokale Zeit mit einer identischen Zeitgenauigkeit aufweisen und die Anzahl der mit den beiden sich in Übertragungsreichweite
15 zueinander befindenden Knoten in einem ad-hoc-Netzwerk jeweils integrierten Knoten identisch ist, wird bevorzugt derjenige der beiden sich in Übertragungsreichweite zueinander befindenden Knoten in der niedrigsten Priorität festgelegt, um als lokaler Zeit-Master zu dienen, in
20 dessen angegliedertes ad-hoc-Netzwerk ein Knoten mit der niedrigsten Identitäts-Nummer integriert ist. Als Identitäts-Nummer wird bevorzugt die Medium-Access-Control(MAC)-Adresse - Medium-Zugriffs-Kontroll-Adresse - des jeweiligen Knoten gewählt.

25 Entfernt sich mindestens ein Knoten vollständig von einem bestehenden ad-hoc-Netzwerk, so wird, sofern der sich entfernende Knoten im bisherigen ad-hoc-Netzwerk ein lokaler Zeit-Master war, mit der höchsten Priorität
30 vorzugsweise derjenige Knoten des verbleibenden ad-hoc-Netzwerkes als lokaler Zeit-Master festgelegt, dessen lokale Zeit die höchste Zeitgenauigkeit unter den lokalen Zeiten aller im verbleibenden ad-hoc-Netzwerk befindlichen Knoten aufweist.

In der nächst niedrigeren Priorität, wenn alle Knoten des verbleibenden ad-hoc-Netzwerkes eine lokale Zeit mit einer identischen Zeitgenauigkeit aufweisen, wird vorzugsweise
5 derjenige Knoten des verbleibenden ad-hoc-Netzwerkes nach dem vollständigen Entfernen mindestens eines Knoten aus den bisherigen ad-hoc-Netzwerk festgelegt, um als lokaler Zeit-Master zu dienen, der die höchste Anzahl von jeweils direkt benachbarten Knoten aufweist.

10

Schließlich wird in der niedrigsten Priorität, wenn alle Knoten des verbleibenden ad-hoc-Netzwerkes eine lokale Zeit mit einer identischen Zeitgenauigkeit aufweisen und eine identische Anzahl von jeweils direkt benachbarten
15 Knoten aufweisen, bevorzugt derjenige Knoten des verbleibenden ad-hoc-Netzwerkes nach dem vollständigen Entfernen mindestens eines Knoten aus dem bisherigen ad-hoc-Netzwerk zum lokalen Zeit-Master festgelegt, der die niedrigste Identität-Nummer aufweist.

20

Das vollständige Entfernen eines Knotens aus einem bestehenden ad-hoc-Netzwerk wird von den Knoten des verbleibenden ad-hoc-Netzwerks vorzugsweise identifiziert, wenn innerhalb eines konstanten Zeitrasters, in denen
25 jeweils eine Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit übertragen wird, seit dem letzten Empfangszeitpunkt keine weitere Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit des sich entfernenden Knoten von mindestens einem Knoten des verbleibenden ad-
30 hoc-Netzwerkes empfangen wird.

Ein Knoten eines bisher bestehenden ad-hoc-Netzwerkes, aus dessen Übertragungsbereich sich ein Knoten entfernt, auf dessen lokale Zeit der Knoten seine lokale Zeit bisher

synchronisierte, wird im allgemeinen einen anderen in Übertragungsreichweite befindlichen Knoten des verbleibenden ad-hoc-Netzwerkes festlegen, um seine lokale Zeit an die lokale Zeit des als lokalen Zeit-Master festgelegten Knotens zu synchronisieren. Der sich aus der Übertragungsreichweite des Knotens entfernende Knoten kann sich dabei weiterhin in Übertragungsrate von mindestens einem weiteren Knoten des verbleibenden ad-hoc-Netzwerkes befinden.

10

Die Synchronisierung der lokalen Zeit eines Knoten an die lokale Zeit des von ihm als lokaler Zeit-Master festgelegten Knotens erfolgt vorzugsweise anhand des vom festgelegten Knoten in seiner Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit oder in seiner Quittierungs-Nachricht übertragenen Sendezeitzeitpunktes und des ebenfalls übertragenen Empfangszeitpunktes der zugehörigen Quittierungs-Nachricht bzw. Nachricht zur Aktualisierung einer Anwesenheit. Der die Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit oder die Quittierungs-Nachricht empfangene Knoten kann seine lokale Zeit an die lokale Zeit des als lokalen Zeit-Master festgelegten Knotens durch Vergleich des Empfangszeitpunktes der Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit bzw. der Quittierungs-Nachricht mit dem übertragenen Sendezeitpunkt der Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit bzw. der Quittierungs-Nachricht synchronisieren.

20

25

30

Eine Berücksichtigung der auftretenden Übertragungszeit zwischen dem als lokaler Zeit-Master festgelegten Knoten und dem die Zeitsynchronisierung durchführenden Knoten erfolgt vorzugsweise anhand des Vergleichs des Sendezeitpunktes mit dem übertragenen Empfangszeitpunkt der Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit bzw.

der Quittierungs-Nachricht. Diese Zeitsynchronisierung der lokalen Zeit des jeweiligen Knoten an die lokale Zeit des als lokalen Zeit-Master festgelegten Knotens erfolgt nicht nur im Erstkontakt zwischen diesen beiden Knoten, sondern
5 zyklisch in jedem Empfangszeitpunkt einer Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit bzw. einer Quittierungs-Nachricht.

Da in einem ad-hoc-Netzwerk, das sich nach den obig
10 genannten Mechanismen entwickelt, lediglich ein einziger Knoten als lokaler Zeit-Master für mindestens einen weiteren Knoten dient, der bzw. die wiederum als lokaler Zeit-Master für weitere Knoten des ad-hoc-Netzwerkes dienen, wird indirekt die lokale Zeit jedes Knoten des ad-
15 hoc-Netzwerkes sukzessive auf die lokale Zeit dieses einzigen Knoten ohne eigenen lokalen Zeit-Master synchronisiert.

Um eine Taktdrift einer lokalen Zeit eines Knotens
20 innerhalb des ad-hoc-Netzwerkes, die eine geringere Zeitgenauigkeit als die lokale Zeit des als lokalen Zeit-Master festgelegten Knoten aufweist, zu reduzieren, wird von synchronisierenden Knoten bevorzugt das konstante Zeitraster zur zyklischen Versendung von Nachrichten zur
25 Signalisierung einer Anwesenheit minimiert. Insbesondere wird vom synchronisierenden Knoten der Sendezeitpunkt einer Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit vorausberechnet, um den Einfluss der Taktdrift auf die Zeitgenauigkeit der lokalen Zeit des synchronisierenden
30 Knotens auf einen bestimmten Wert zu begrenzen.

Ausführungsbeispiele des erfindungsgemäßen Verfahrens und des erfindungsgemäßen Systems zur Zeitsynchronisierung in einem mobilen ad-hoc-Netzwerk werden im Folgenden anhand

der Zeichnung im Detail beispielhaft erläutert. Die Figuren der Zeichnung zeigen:

- Fig. 1 eine Darstellung eines Ausführungsbeispiels des
5 erfindungsgemäßen Systems zur Zeitsynchronisierung in einem mobilen ad-hoc-Netzwerk,
- Fig. 2 eine beispielhafte Darstellung eines ersten
10 Szenarios für ein ad-hoc-Netzwerk und eines Zeitdiagramms der zwischen den beteiligten Knoten verschickten Nachrichten,
- Fig. 3 eine beispielhafte Darstellung eines zweiten
15 Szenarios für ein ad-hoc-Netzwerk und eines Zeitdiagramms der zwischen den beteiligten Knoten verschickten Nachrichten,
- Fig. 4 eine beispielhafte Darstellung eines dritten
20 Szenarios für ein ad-hoc-Netzwerk und eines Zeitdiagramms der zwischen den beteiligten Knoten verschickten Nachrichten,
- Fig. 5 eine beispielhafte Darstellung eines vierten
25 Szenarios für ein ad-hoc-Netzwerk und eines Zeitdiagramms der zwischen den beteiligten Knoten verschickten Nachrichten,
- Fig. 6 eine beispielhafte Darstellung eines fünften
30 Szenarios für ein ad-hoc-Netzwerk und eines Zeitdiagramms der zwischen den beteiligten Knoten verschickten Nachrichten,

Fig. 7 eine beispielhafte Darstellung eines sechsten Szenarios für ein ad-hoc-Netzwerk und eines Zeitdiagramms der zwischen den beteiligten Knoten verschickten Nachrichten,

5

Fig. 8 eine beispielhafte Darstellung eines siebten Szenarios für ein ad-hoc-Netzwerk und eines Zeitdiagramms der zwischen den beteiligten Knoten verschickten Nachrichten,

10

Fig. 9 eine beispielhafte Darstellung eines Zeitdiagramms der in einzelnen Knoten eines ad-hoc-Netzwerkes jeweils auftretenden Zeitungenauigkeiten und

15

Fig. 10 ein Flussdiagramm eines Ausführungsbeispiels des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Zeitsynchronisierung in einem mobilen ad-hoc-Netzwerk.

20

Das erfindungsgemäße System zur Zeitsynchronisierung in einem mobilen ad-hoc-Netzwerk wird im Folgenden anhand der Darstellung gemäß Fig. 1 und das erfindungsgemäße Verfahren zur Zeitsynchronisierung in einem mobilen ad-hoc-Netzwerk wird anhand des Flussdiagramms gemäß Fig. 10 im Detail erläutert.

25

Im ersten Verfahrensschritt S10 des erfindungsgemäßen Verfahrens sendet jeder Knoten innerhalb oder außerhalb eines ad-hoc-Netzwerkes kontinuierlich in einem bestimmten konstanten Zeitraster eine Nachricht zur Signalisierung seiner Anwesenheit 1, insbesondere eine "Hallo-Nachricht" ("Hello Message"), um Nachbar-Knoten, die sich in seiner Übertragungsreichweite befinden, seine Anwesenheit zu

30

signalisieren. Dieses konstante Zeitraster der Versendung einer Nachricht zur Signalisierung seiner Anwesenheit ist bei jedem Knoten typischerweise nicht identisch, sondern weist bei jedem Knoten jeweils einen unterschiedlichen
5 Wert auf.

Die Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1 eines Knoten i beinhaltet typischerweise folgende Inhalte:

- 10 • eine Identitäts-Kennung des Knoten i , die typischerweise die Medium-Access-Control (MAC) -Adresse - Medium-Zugriffs-Kontroll-Adresse - des Knoten i ist,
- den Sendezeitpunkt TS_i des Knotens i in der lokalen Zeit des Knotens i ,
- 15 • die benachbarten Knoten $N(i_1, i_2, i_3, \dots)$ im Fall von identifizierte Knoten innerhalb der Übertragungsbereichweite des Knotens i ,
- die Empfangszeitpunkte $RxTS(i_1, i_2, i_3, \dots)$ von Nachrichten zur Signalisierung einer Anwesenheit, die sich
20 innerhalb der Übertragungsbereichweite des Knoten i befinden und
- die Zeitgenauigkeit der lokalen Zeit des Knoten i .

Der eine Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1
25 versendende Knoten wird im Folgenden sendender Knoten genannt.

Im nächsten Verfahrensschritt S20 wird die von einem Knoten i versendete Nachricht zur Signalisierung einer
30 Anwesenheit 1 von einem Knoten j , der sich in der Übertragungsbereichweite des Knotens i befindet und somit die Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1 des Knoten i empfängt, mit einer Quittierungs-Nachricht 2, insbesondere einer "I-Hallo-Nachricht" quittiert. Diese

- Quittierungs-Nachricht 2 wird unmittelbar nach dem Empfang der Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1 durch den Knoten j versendet. Um das gleichzeitige Versenden einer Quittierungs-Nachricht 2 durch mehrere Knoten, die
- 5 die Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1 des Knotens i mehr oder weniger gleichzeitig empfangen, und damit eine Blockierung des Übertragungskanal im ad-hoc-Netzwerk zu vermeiden, erfolgt die Versendung der Quittierungs-Nachricht 2 durch den einzelnen Knoten
- 10 jeweils um eine geringe und von Knoten zu Knoten jeweils verschiedene Verzögerungszeit verzögert gegenüber dem Empfangszeitpunkt der Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1.
- 15 Eine Quittierungs-Nachricht 2 enthält die gleichen Inhalte wie eine Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1. Der eine Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1 empfangende und eine Quittierungs-Nachricht 2 sendende Knoten wird im Folgenden empfangender Knoten genannt.
- 20 Neben den jeweils eine Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1 oder jeweils eine Quittierungs-Nachricht 2 sendenden Knoten, die bereits einem ad-hoc-Netzwerk angehören und somit mit allen Knoten des ad-hoc-Netzwerkes
- 25 zeitsynchronisiert sind, existieren auch Knoten, die jeweils eine Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1 oder jeweils eine Quittierungs-Nachricht 2 infolge einer empfangenen Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1 versenden und noch keinem ad-hoc-
- 30 Netzwerk angehören. Für derartige Knoten, die auf der Suche nach einem ad-hoc-Netzwerk sind, ergibt sich mit dem Empfang einer Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1 oder einer Quittierungs-Nachricht 2 eines anderen Knoten die Möglichkeit, mit diesem anderen Knoten

ein ad-hoc-Netzwerk zu bilden. Befindet sich der jeweils andere Knoten selbst noch nicht in einem ad-hoc-Netzwerk, so kommt es zu einer Neugründung eines ad-hoc-Netzwerkes zwischen diesen beiden Knoten. Ist der jeweils andere Knoten bereits in einem ad-hoc-Netzwerk integriert, so wird der Knoten, der ein ad-hoc-Netzwerk sucht, in das bestehende ad-hoc-Netzwerk des jeweils anderen Knoten aufgenommen. Schließlich können die beiden Knoten, die über die Versendung und den Empfang einer Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1 oder einer Quittierungs-Nachricht 2 miteinander in Kontakt treten, jeweils einem unterschiedlichen ad-hoc-Netzwerk angehören. Durch die Kontaktaufnahme zwischen diesen beiden Knoten kann eine Zusammenführung der beiden ad-hoc-Netzwerke zu einem einzigen Gesamt-ad-hoc-Netzwerk erzielt werden.

Um eine Zeitsynchronisierung zwischen den beiden Knoten im zu gründenden ad-hoc-Netzwerk bzw. eine Zeitsynchronisierung zwischen allen Knoten im erweiterten ad-hoc-Netzwerk zu verwirklichen, wird für jeden Knoten des zu gründenden bzw. des erweiterten ad-hoc-Netzwerkes ein in direkter Nachbarschaft befindlicher Knoten festgelegt, der für den jeweils anderen Knoten ein lokaler Zeit-Master darstellt und an dessen lokaler Zeit der jeweils andere Knoten seine lokale Zeit synchronisiert. Da jeder Knoten im nun entstehenden ad-hoc-Netzwerk seine lokale Zeit an die lokale Zeit des zugehörigen lokalen Zeit-Masters synchronisiert, sind alle Knoten des nun entstehenden ad-hoc-Netzwerkes zueinander zeitsynchronisiert. Aus Fig. 1, das das Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Systems zur Zeitsynchronisierung in einem mobilen ad-hoc-Netzwerk darstellt, sind einzelne Knoten 31, 32, 33, 34, 35, 36 und 37 ersichtlich, die jeweils in Übertragungsbereichweite

zueinander positioniert sind und somit ein ad-hoc-Netzwerk bilden. Der für jeden einzelnen dieser Knoten 31, 32, 33, 34, 35, 36 und 37 jeweils festgelegte lokale Zeit-Master geht hierbei aus der Pfeilrichtung der Verbindungsgerade
5 zwischen jeweils zwei benachbarten Knoten hervor.

Die Festlegung des zum jeweiligen Knoten gehörigen lokalen Zeit-Masters innerhalb des nun entstehenden ad-hoc-Netzwerkes erfolgt über eine Prioritäts-Hierarchie.

10

In der höchsten Priorität wird derjenige Knoten des entstehenden ad-hoc-Netzwerkes identifiziert, der die lokale Zeit mit der jeweils höchsten Zeitgenauigkeit aufweist und somit zum lokalen Zeit-Master festgelegt
15 wird. Gemäß dem nächsten Verfahrensschritt S30 wird ermittelt, ob die in der gesendeten Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1 oder in der gesendeten Quittierungs-Nachricht 2 enthaltene Zeitgenauigkeit der lokalen Zeit der beiden Knoten - sendender Knoten oder
20 empfangender Knoten - jeweils einen höheren Wert aufweist.

Weist der sendende Knoten oder der empfangende Knoten eine höhere Zeitgenauigkeit in seiner lokalen Zeit auf, so wird im nächsten Verfahrensschritt S40 derjenige Knoten, der
25 die höhere Zeitgenauigkeit in seiner lokalen Zeit aufweist, zum lokalen Zeit-Master des jeweils anderen Knoten. Aufgrund der Zeitreferenzierung jedes Knoten zu einem direkt benachbarten Knoten in einem ad-hoc-Netzwerk gemäß Fig. 1 werden alle Knoten, die in einem ad-hoc-
30 Netzwerk mit dem sendenden oder empfangenden Knoten bereits verbunden sind, der seine lokale Zeit auf die lokale Zeit des als lokalen Zeit-Master agierenden empfangenden oder sendenden Knoten referenziert, ihre lokale Zeit indirekt auf die lokale Zeit dieses lokalen

Zeit-Masters synchronisieren. Die Knoten, die mit dem als lokaler Zeit-Master agierenden Knoten in einem ad-hoc-Netzwerk bereits verbunden sind, bleiben in ihrer Zeitreferenzierung zu einem jeweils benachbarten und als
5 lokaler Zeit-Master agierenden Knoten unverändert.

Weisen die lokalen Zeiten des sendenden und empfangenden Knotens jeweils eine identische Zeitgenauigkeit auf, so wird in der nächst niedrigeren Priorität im darauf
10 folgenden Verfahrensschritt S50 ermittelt, ob die beiden miteinander in Kontakt tretenden Knoten - sendender Knoten und empfangender Knoten - jeweils Knoten ohne Einbindung in ein bestehendes ad-hoc-Netzwerk sind oder, ob einer der beiden Knoten oder beide Knoten jeweils in einem ad-hoc-
15 Netzwerk bereits integriert sind.

Ist sowohl der sendende Knoten als auch der empfangende Knoten jeweils in keinem ad-hoc-Netzwerk bisher eingebunden, so wird gemäß dem darauf folgenden
20 Verfahrensschritt S60 der eine Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1 empfangende Knoten zum lokalen Zeit-Master des eine Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1 sendenden Knotens festgelegt.

Für den Fall, dass mindestens ein Knoten bisher in einem ad-hoc-Netzwerk eingebunden ist, wird in einem darauf folgenden Verfahrensschritt S70 ermittelt, ob beide Knoten jeweils in einem ad-hoc-Netzwerk mit einer gleichen Anzahl von Knoten eingebunden ist. Ist dies der Fall, so wird im
30 nächsten Verfahrensschritt S80 derjenige Knoten der beiden zueinander in Kontakt tretenden Knoten zum lokalen Zeit-Master festgelegt, der bisher in einem ad-hoc-Netzwerk mit einem Knoten eingebunden ist, der die niedrigste Medium-Access-Control (MAC)-Adresse - Medium-Zugriffs-Kontroll-

- Adresse - aufweist. Dieser Knoten wird nicht nur für den jeweils anderen Knoten der beiden in Kontakt tretenden Knoten zum lokalen Zeit-Master, sondern dient aufgrund des sukzessiven Zeitreferenzierung zwischen jedem Knoten des
- 5 ad-hoc-Netzwerkes und seinem zugehörigen als lokalen Zeit-Master agierenden benachbarten Knoten indirekt als lokaler Zeit-Master für alle Knoten, die mit den jeweils anderen Knoten in einem ad-hoc-Netzwerk integriert sind.
- 10 Sind beide jeweils in einem Kontakt zueinander tretenden Knoten bisher in einem ad-hoc-Netzwerk mit einer jeweils unterschiedlichen Anzahl von Knoten eingebunden oder ist ein Knoten überhaupt nicht in einem ad-hoc-Netzwerk integriert, während der jeweils andere Knoten schon bisher
- 15 einem ad-hoc-Netzwerk angehört, so wird gemäß dem folgenden Verfahrensschritt S90 derjenige der beiden zueinander in Kontakt tretenden Knoten zum lokalen Zeit-Master des jeweils anderen Knoten, der in dem ad-hoc-Netzwerk mit der höchsten Anzahl von Knoten eingebunden
- 20 ist. Die Knoten, die sich mit dem nicht zum lokalen Zeit-Master festgelegten Knoten der beiden in einem Kontakt zueinander tretenden Knoten in einem ad-hoc-Netzwerk befinden, synchronisieren ihre lokale Zeit indirekt ebenfalls aufgrund des sukzessiven Zeitreferenzierung
- 25 zwischen jedem Knoten des ad-hoc-Netzwerkes und seinem zugehörigen als lokalen Zeit-Master dienenden benachbarten Knoten auf die lokale Zeit dieses als lokalen Zeit-Master festgelegten Knoten.
- 30 Jeder Knoten in einem derart entstehenden ad-hoc-Netzwerk synchronisiert im nächsten Verfahrensschritt S100 seine lokale Zeit auf die lokale Zeit seines zugehörigen lokalen Zeit-Masters. Hierzu verwendet der jeweilige Knoten die Zeitinformationen, die in einer aktuell vom zugehörigen

- als lokaler Zeit-Master agierenden Knoten empfangenen Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1 oder Quittierungs-Nachricht 2 enthalten sind. Hierbei handelt es sich einerseits um den in der lokalen Zeit des als
- 5 lokaler Zeit-Master agierenden Knoten ermittelten Sendezeitpunkt der jeweiligen Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1 oder der jeweiligen Quittierungs-Nachricht 2 und um den in der lokalen Zeit des als lokaler Zeit-Master agierenden Knoten ermittelten
- 10 Empfangszeitpunkt der zuletzt vom jeweiligen Knoten gesendeten Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1 oder Quittierungs-Nachricht 2 beim als lokaler Zeit-Master agierenden Knoten.
- 15 Der seine lokale Zeit an die lokale Zeit des jeweiligen lokalen Zeit-Masters synchronisierende Knoten synchronisiert seine lokale Zeit, indem er die Synchronisierung seiner lokalen Zeit an die lokale Zeit des als lokaler Zeit-Master agierenden Knoten wie auch die
- 20 Ermittlung der Übertragungszeit zwischen dem synchronisierenden Knoten und dem als lokalen Zeit-Master agierenden Knoten einerseits aus dem in der lokalen Zeit des synchronisierenden Knotens ermittelten Sendezeitpunkt und dem in der lokalen Zeit des als lokaler Zeit-Master
- 25 agierenden Knotens ermittelten Empfangszeitpunkt der jeweiligen Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1 oder der jeweiligen Quittierungs-Nachricht 2 und andererseits aus dem in der lokalen Zeit des synchronisierenden Knotens ermittelten Empfangszeitpunkt
- 30 und dem in der lokalen Zeit des als lokaler Zeit-Master agierenden Knotens ermittelten Sendezeitpunktes der darauf folgenden Quittierungs-Nachricht 2 oder der Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1 bestimmt.

Im darauffolgenden Verfahrensschritt S110 wird ein u.U. auftretendes Entfernen eines Knotens oder mehrerer Knoten aus dem bestehenden ad-hoc-Netzwerk identifiziert. Hierzu wird von jedem Knoten des ad-hoc-Netzwerkes überprüft, ob

5 von jedem in der Übertragungsbereichweite des jeweiligen Knotens positionierten Nachbar-Knoten jeweils innerhalb eines festgesetzten Zeitintervalls seit dem letzten Empfangszeitpunkt einer Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1 des jeweiligen Nachbar-Knoten eine weitere

10 Nachricht zu Signalisierung einer Anwesenheit 1 des jeweiligen Nachbar-Knoten empfangen wird. Trifft dies zu, so befindet sich der jeweilige Nachbar-Knoten noch innerhalb der Übertragungsbereichweite des überprüfenden Knoten. Empfängt der jeweilige Knoten aber keine weitere

15 Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 1 des jeweiligen Nachbar-Knoten innerhalb des festgelegten Zeitintervall, so hat sich der jeweilige Nachbar-Knoten zumindest aus der Übertragungsbereichweite des überprüfenden Knoten, u.U. sogar aus der Übertragungsbereichweite des

20 gesamten ad-hoc-Netzwerkes, entfernt. Ist der Knoten, der sich aus der Übertragungsbereichweite des überprüfenden Knoten entfernt hat, ein lokaler Zeit-Master für den überprüfenden Knoten, so muss der überprüfende Knoten einen neuen als lokaler Zeit-Master agierenden Knoten

25 suchen. U.U. befindet sich der überprüfende Knoten inzwischen aufgrund des Entfernens des als lokaler Zeit-Master agierenden Knoten aus der Übertragungsbereichweite des überprüfenden Knoten auch außerhalb des ad-hoc-Netzwerkes.

30 Der jeweilige Knoten ohne Zeitreferenz zu einem als lokaler Zeit-Master agierenden Knoten ist gezwungen, einen neuen als lokalen Zeit-Master dienenden Knoten zu suchen. Befindet sich der jeweilige Knoten ohne Zeitreferenz

weiterhin noch in Übertragungsbereichweite zu einem anderen Knoten und damit in einem ad-hoc-Netzwerk mit dem anderen Knoten, so kann er diesen anderen Knoten zu seinem lokalen Zeit-Master wählen. Befindet sich der jeweilige Knoten
5 ohne Zeitreferenz jedoch nicht mehr in Übertragungsbereichweite zu einem anderen Knoten und damit auch nicht mehr in einem ad-hoc-Netzwerk mit einem oder mehreren Knoten, so ist er gezwungen, nach den oben beschriebenen Verfahrensschritten S10 bis S90 Kontakt zu
10 einem anderen Knoten mit oder ohne angegliederten ad-hoc-Netzwerk aufzunehmen.

Im abschließenden Verfahrensschritt S120 erfolgt in Analogie zu Verfahrensschritt S100 eine Synchronisierung
15 der lokalen Zeit des Knoten, der Kontakt zu einem Knoten mit oder ohne angegliederten ad-hoc-Netzwerk aufgenommen hat und diesen Knoten zu seinem lokalen Zeit-Master festlegt, auf die lokale Zeit des als lokalen Zeit-Master festgelegten Knoten.

20

Im Folgenden wird das soeben beschriebene Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verfahrens zur Zeitsynchronisierung in einem mobilen ad-hoc-Netz anhand der in den Figuren 2 bis 8 jeweils dargestellten Szenarien
25 im Detail noch vertieft.

Im ersten Szenario in Fig. 2 werden zwei Knoten ohne ein angegliedertes ad-hoc-Netz betrachtet, die sich aufeinander zubewegen und ab einem bestimmten Zeitpunkt
30 innerhalb der Übertragungsbereichweite zueinander positioniert sind.

Zum Zeitpunkt (1), in dem der Knoten 3₁ eine Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit 2 versendet, kennen die

beiden Knoten 3_1 und 3_2 die Anwesenheit des jeweils anderen Knoten nicht. Der Knoten 3_1 versendet folglich eine "Hallo-Nachricht", die einzig die Identität des Knotens 3_1 , den Sendezeitpunkt TS_1 der vom Knoten 3_1 versendeten "Hallo-Nachricht" in der lokalen Zeit des Knoten 3_1 , die Zeitgenauigkeit der lokalen Zeit des Knoten 3_1 und die MAC-Adresse des Knoten 3_1 enthält.

Diese "Hallo-Nachricht" des Knotens 3_1 wird zum Zeitpunkt (2) vom Knoten 3_2 empfangen und unmittelbar mit einer Quittierungs-Nachricht 2 in Form einer "I-Hallo-Nachricht" quittiert, die neben der Identität des Knoten 3_2 , der Zeitgenauigkeit der lokalen Zeit Knoten 3_2 und der MAC-Adresse des Knotens 3_2 den Sendezeitpunkt TS_2 der "I-Hallo-Nachricht" des Knoten 3_2 in der lokalen Zeit des Knoten 3_2 , den identifizierten Nachbarknoten 3_1 und in Empfangszeitpunkt $RxTS(1)$ der "Hallo-Nachricht" des Knoten 3_1 enthält. Für Knoten 3_2 dient Knoten 3_1 zum Zeitpunkt (2) als lokaler Zeit-Master, da Knoten 3_2 seine lokale Zeit zumindest grob - ohne Berücksichtigung der Übertragungszeit der von Knoten 3_1 versendeten "Hallo-Nachricht" zwischen Knoten 3_1 und Knoten 3_2 - an die lokale Zeit Knoten 3_1 synchronisieren kann, indem er seine lokale Zeit um die Differenz zwischen dem in seiner lokalen Zeit ermittelten Empfangszeitpunkt der "Hallo-Nachricht" von Knoten 3_1 und dem in der lokalen Zeit des Knoten 3_1 ermittelten Sendezeitpunkt der "Hallo-Nachricht" von Knoten 3_1 an die lokale Zeit des als lokalen Zeit-Masters agierenden Knoten 3_1 anpasst. Zum Zeitpunkt (2) besteht lediglich für Knoten 3_2 die Erkenntnis, dass eine funktionierende Übertragungsverbindung von Knoten 3_1 zu Knoten 3_2 besteht. Somit liegt zum Zeitpunkt (2) lediglich eine asymmetrische Übertragungsverbindung zwischen Knoten 3_1 und Knoten 3_2 vor.

Zum Zeitpunkt (3) wird die "I-Hallo-Nachricht" des Knotens 3_2 vom Knoten 3_1 empfangen. Zum Zeitpunkt (3) besteht lediglich für Knoten 3_1 die Erkenntnis, dass eine

5 funktionierende Übertragungsverbindung von Knoten 3_1 zu Knoten 3_2 und von Knoten 3_2 zu Knoten 3_1 besteht. Somit liegt auch zum Zeitpunkt (2) lediglich eine asymmetrische Übertragungsverbindung zwischen Knoten 3_1 und Knoten 3_2 vor. Knoten 3_1 wird zum Zeitpunkt (3) Knoten 3_2 zu seinem

10 lokalen Zeit-Master festlegen, da die Zeitgenauigkeit des Knoten 3_2 der Zeitgenauigkeit von Knoten 3_1 entspricht und Knoten 3_1 über die "I-Hallo-Nachricht" von Knoten 3_2 erfährt, dass Knoten 3_2 keine Nachbar-Knoten in seiner Übertragungsreichweite besitzt und somit in keinem ad-hoc-

15 Netzwerk eingebunden ist. Da somit Knoten 3_1 und Knoten 3_2 eine gleiche Anzahl von jeweils benachbarten Knoten - nämlich genau einen einzigen Nachbar-Knoten - aufweisen, erkennt Knoten 3_1 , dass Knoten 3_2 sein lokaler Zeit-Master wird, da er derjenige Knoten war, der als erster Knoten

20 eine "Hallo-Nachricht" verschickt hat. Knoten 3_1 wird deshalb seine lokale Zeit auf die lokale Zeit seines als lokaler Zeit-Master agierenden Knoten 3_2 synchronisieren und dabei im Gegensatz zur groben Synchronisierung des Knoten 3_2 eine exakte Synchronisierung unter

25 Berücksichtigung der Übertragungszeit zwischen Knoten 3_1 und Knoten 3_2 erzielen.

Aus Fig. 2 ist ersichtlich, dass Knoten 3_2 in seinem konstanten zyklischen Zeitraster zum Zeitpunkt (4) eine

30 "Hallo-Nachricht" unmittelbar nach Versendung einer "I-Hallo-Nachricht" verschickt. Um die Übertragungskapazität des Übertragungskanal durch die Versendung von "Hallo-Nachrichten" und "I-Hallo-Nachrichten" nicht unnötig zu belasten, kann die Versendung einer "Hallo-Nachricht", die

innerhalb eines festgelegten Zeitintervalls nach Versendung einer "I-Hallo-Nachricht" üblicherweise erfolgt, unterdrückt werden.

- 5 Eine weitere im zyklischen Zeitraster ΔT_1 durch Knoten 3_1 versendete "Hallo-Nachricht", in der im Gegensatz zur ersten "Hallo-Nachricht" des Knotens 3_1 der als Nachbarknoten $N(2)$ identifizierte Knoten 3_2 und die Empfangszeit $RxTS(2)$ der vom identifizierten Nachbarknoten
- 10 3_2 versendeten "Hallo-Nachricht" in der lokalen Zeit des Knoten 3_1 übertragen werden, wird vom Knoten 3_2 zum Zeitpunkt (5) empfangen. Ab dem Zeitpunkt (5) liegt zwischen Knoten 3_1 und Knoten 3_2 eine symmetrische Übertragungsverbindung vor, da sowohl Knoten 3_1 als auch
- 15 Knoten 3_2 erkannt haben, dass eine funktionierende Übertragungsverbindung von Knoten 3_1 nach Knoten 3_2 und von Knoten 3_2 nach Knoten 3_1 besteht.

- Eine weitere im zyklischen Zeitraster ΔT_2 durch Knoten 3_2
- 20 versendete "Hallo-Nachricht" wird zum Zeitpunkt (6) von Knoten 3_1 empfangen. Zum Zeitpunkt (6) erfolgt durch Knoten 3_1 eine erneute zyklische Synchronisierung seiner lokalen Zeit an die lokale Zeit des als lokalen Zeit-Master für Knoten 3_1 agierenden Knoten 3_2 .

- 25 Im zweiten Szenario in Fig. 3 nähert sich ein Knoten 3_1 einem Knoten 3_2 , der in Übertragungsbereich zu einem Knoten 3_3 positioniert ist und somit mit diesem Knoten 3_3 bereits ein ad-hoc-Netzwerk bildet.

- 30 Zum Zeitpunkt (1) sendet der Knoten 3_1 , der mit keinem anderen Knoten ein ad-hoc-Netzwerk bildet, eine "Hallo-Nachricht". Diese "Hallo-Nachricht" wird zum Zeitpunkt (2) von dem in Übertragungsbereich zum Knoten 3_1

positionierten Knoten 3_2 empfangen. Während für Knoten 3_2 zum Zeitpunkt (2) zu Knoten 3_3 aufgrund des bereits seit längerem bestehenden gemeinsamen ad-hoc-Netzwerkes eine symmetrische Übertragungsverbindung besteht, besteht
5 zwischen Knoten 3_2 und Knoten 3_1 lediglich eine asymmetrische Übertragungsverbindung, da einzig Knoten 3_2 erkennt, dass eine korrekte Übertragung von Knoten 3_1 zu Knoten 3_2 realisiert ist. Zum Zeitpunkt (2) wird von Knoten 3_2 der im gemeinsamen ad-hoc-Netzwerk befindliche
10 Knoten 3_3 zu seinem lokalen Zeit-Master festgelegt.

Die von Knoten 3_2 zum Zeitpunkt (2) empfangene "Hallo-Nachricht" wird von Knoten 3_2 mit einer "I-Hallo-Nachricht" quittiert, die neben der Identität des Knoten
15 3_2 , der Zeitgenauigkeit der lokalen Zeit des Knotens 3_2 und der MAC-Adresse des Knotens 3_2 die dem Knoten 3_2 zum Zeitpunkt (2) bekannten Nachbarknoten 3_1 und 3_3 und die Empfangszeitpunkte $RxTS(1,3)$ der vom Knoten 3_1 soeben empfangenen "Hallo-Nachricht" und der letzten im
20 zyklischen Zeitraster ΔT_3 von Knoten 3_3 empfangenen "Hallo-Nachricht" enthält.

Zum Zeitpunkt (3) wird die "I-Hallo-Nachricht" des Knoten 3_2 von Knoten 3_1 und Knoten 3_3 empfangen. Knoten 3_1 erkennt
25 zum Zeitpunkt (3), dass Knoten 3_2 sein lokaler Zeit-Master wird, da Knoten 3_1 über die "I-Hallo-Nachricht" des Knoten 3_2 erfährt, dass Knoten 3_2 sich in einem ad-hoc-Netzwerk mit Knoten 3_3 befindet und somit Knoten 3_2 eine größere Anzahl von Nachbarknoten in einem ad-hoc-Netzwerk aufweist
30 als Knoten 3_1 . Die Übertragungsverbindung zwischen Knoten 3_1 und Knoten 3_2 ist zum Zeitpunkt (3) nach wie vor asymmetrisch, da einzig Knoten 3_1 erkennt, dass die Übertragung von Knoten 3_1 nach Knoten 3_2 und von Knoten 3_2 nach Knoten 3_1 korrekt funktioniert.

Zum Zeitpunkt (4) sendet Knoten 3_2 in seinem zyklischen Zeitraster ΔT_2 eine weitere "Hallo-Nachricht", die Knoten 3_1 zum Zeitpunkt (5) empfängt. Knoten 3_1 synchronisiert
5 zum Zeitpunkt (5) seine lokale Zeit an die lokale Zeit seines lokalen Zeit-Masters, des Knoten 3_2 , aus den Zeitinformationen, die in der "Hallo-Nachricht" des Knoten 3_2 enthalten sind.

10 Knoten 3_3 sendet in seinem zyklischen Zeitraster ΔT_3 zum Zeitpunkt (6) eine "Hallo-Nachricht", die von Knoten 3_2 zum Zeitpunkt (7) empfangen wird. Da Knoten 3_3 der lokale Zeit-Master des Knoten 3_2 darstellt, synchronisiert Knoten 3_2 seine lokale Zeit wiederholt zyklisch zum Zeitpunkt (7)
15 mit den in der "Hallo-Nachricht" des Knotens 3_3 übertragenen Zeitinformationen auf die lokale Zeit des Knoten 3_3 .

Eine von Knoten 3_1 zum Zeitpunkt (8) in ihrem zyklischen
20 Zeitraster ΔT_1 versendete "Hallo-Nachricht", in der die Information N(2) über den identifizierten Nachbar-Knoten 3_2 und die Empfangszeit RxTS(2) der von dem Knoten 3_2 verschickten "Hallo-Nachricht" enthalten ist, wird von Knoten 3_2 zum Zeitpunkt (9) empfangen. Ab dem Zeitpunkt
25 (9) liegt eine symmetrische Übertragungsverbindung zwischen Knoten 3_1 und Knoten 3_2 vor, da sowohl Knoten 3_1 als auch Knoten 3_2 die korrekte Übertragung von Knoten 3_1 nach Knoten 3_2 und von Knoten 3_2 nach Knoten 3_1 erkannt haben.

30

Im dritten Szenario in Fig. 4 nähert sich ebenfalls ein Knoten 3_1 einem Knoten 3_2 , der in Übertragungsbereichweite

zu einem Knoten 3_3 positioniert ist und somit mit Knoten 3_3 ein ad-hoc-Netzwerk bildet.

Zum Zeitpunkt (1) sendet Knoten 3_2 in seinem zyklischen
5 Zeitraster ΔT_2 eine "Hallo-Nachricht", die neben seiner
Identität, der Zeitgenauigkeit seiner lokalen Zeit und
seiner MAC-Adresse die Information $N(3)$ über den bekannten
Nachbarknoten 3_3 und die Empfangszeit $RxTS(3)$ der zuletzt
empfangenen "Hallo-Nachricht" des Nachbarknoten 3_3
10 enthält. Diese "Hallo-Nachricht" des Knotens 3_2 wird zum
Zeitpunkt (2) von Knoten 3_1 empfangen. Da Knoten 3_1 in
dieser "Hallo-Nachricht" des Knotens 3_2 erfährt, dass
Knoten 3_2 mit Knoten 3_3 ein ad-hoc-Netzwerk bildet, wird
Knoten 3_1 seinen Nachbarknoten 3_2 zu seinem lokalen Zeit-
15 Master festlegen. Eine Synchronisierung der lokalen Zeit
des Knotens 3_1 zum Zeitpunkt (2) auf die lokale Zeit des
Nachbarknotens 3_2 ist noch nicht möglich, da eine
Zeitinformation zur Bestimmung der Übertragungszeit
zwischen Knoten 3_1 und Knoten 3_2 noch nicht vorliegt.
20
Knoten 3_1 wird die "Hallo-Nachricht" des Knotens 3_2
unmittelbar nach deren Empfang mit einer "I-Hallo-
Nachricht" quittieren, in der er dem Knoten 3_2 seine
Identität, den Sendezeitpunkt TS_1 der "I-Hallo-Nachricht"
25 in der lokalen Zeit des Knoten 3_1 , die identifizierte
Identität $N(2)$ des Nachbarknotens 3_2 und den
Empfangszeitpunkt $RxTS(2)$ der "Hallo-Nachricht" des
Nachbarknoten 3_2 mitteilt. Diese "I-Hallo-Nachricht" des
Knoten 3_1 wird von Knoten 3_2 zum Zeitpunkt (3) empfangen.
30 Die Identifizierung des Nachbarknoten 3_1 beim Empfang der
"I-Hallo-Nachricht" durch Knoten 3_2 wird mit einer
weiteren "I-Hallo-Nachricht" des Knoten 3_2 quittiert, in
der neben anderen Informationen auch die identifizierte
Identität $N(1,3)$ der beiden Nachbarknoten 3_1 und 3_3 und

die Empfangszeitpunkte $RxTS(1,3)$ der von Knoten 3_1 empfangenen "I-Hallo-Nachricht" und der von Knoten 3_3 empfangenen "Hallo-Nachricht" enthalten sind.

- 5 Diese "I-Hallo-Nachricht" des Knotens 3_2 wird zum Zeitpunkt (4) von Knoten 3_1 empfangen, der aus den Zeitinformationen dieser "I-Hallo-Nachricht" seine lokale Zeit an die lokale Zeit des als lokalen Zeit-Master agierenden Knotens 3_2 synchronisiert. Ab dem Zeitpunkt (4)
- 10 besteht zwischen Knoten 3_1 und Knoten 3_2 eine symmetrische Übertragungsverbindung, da sowohl Knoten 3_1 als auch Knoten 3_2 die korrekte Übertragung von Knoten 3_1 nach Knoten 3_2 und von Knoten 3_2 nach Knoten 3_1 erkannt haben.
- 15 Eine von Knoten 3_3 zum Zeitpunkt (5) in seinem zyklischen Zeitraster ΔT_3 versendete "Hallo-Nachricht" wird von Knoten 3_2 zum Zeitpunkt (6) empfangen und dient zur Synchronisierung der lokalen Zeit des Knoten 3_2 an die lokale Zeit des als zugehörigen lokale Zeit-Master
- 20 agierenden Knoten 3_3 . Ab dem Zeitpunkt (7) sendet Knoten 3_1 in seinem zyklischen Zeitraster ΔT_1 jeweils eine "Hallo-Nachricht".

- Im vierten Szenario in Fig. 5 entfernt sich ein Knoten 3_1
- 25 aus einem ad-hoc-Netzwerk, das ursprünglich aus den Knoten 3_1 , 3_2 und 3_3 besteht.

- Zum Zeitpunkt (1) besteht sowohl zwischen dem Knoten 3_1 und dem Knoten 3_2 als auch zwischen dem Knoten 3_2 und dem
- 30 Knoten 3_3 wie auch zwischen dem Knoten 3_1 und dem Knoten 3_3 jeweils eine symmetrische Übertragungsverbindung, da jeder der Knoten 3_1 , 3_2 und 3_3 jeweils die Korrektheit einer bidirektionalen Übertragung zu jedem anderen der beiden Knoten erkannt hat. Knoten 3_1 stellt aufgrund seiner

niedrigsten MAC-Adresse den lokalen Zeit-Master für die beiden anderen Knoten 3_2 und 3_3 dar.

In den ersten beiden Zeitpunkten (1) und (4) des
5 zyklischen Zeitrasters ΔT_2 sendet Knoten 3_2 jeweils eine
"Hallo-Nachricht", die einzig von Knoten 3_3 empfangen
wird, da sich Knoten 3_1 aus der Übertragungsbereichweite von
Knoten 3_2 entfernt hat. Knoten 3_2 erkennt zu den beiden
Zeitpunkten (1) und (4) das Entfernen von Knoten 3_1 aus
10 dem gemeinsamen ad-hoc-Netzwerk noch nicht und überträgt
deshalb in seiner "Hallo-Nachricht" neben anderen
Informationen auch die identifizierte Identität $N(1,3)$ der
beiden Nachbarknoten 3_1 und 3_3 im gemeinsamen ad-hoc-
Netzwerk und die Empfangszeitpunkte $RxTS(1,3)$ der zuletzt
15 empfangenen "Hallo-Nachrichten" der beiden Nachbarknoten
 3_1 und 3_3 .

Auch Knoten 3_3 erkennt das Entfernen von Knoten 3_1 aus dem
gemeinsamen ad-hoc-Netzwerk zu den Sendezeitpunkten (3)
20 und (5) der im zyklischen Zeitraster ΔT_3 gesendeten
"Hallo-Nachricht" und überträgt deshalb in seiner "Hallo-
Nachricht" neben anderen Informationen auch die
identifizierte Identität $N(1,2)$ der beiden Nachbarknoten
 3_1 und 3_2 im gemeinsamen ad-hoc-Netzwerk und die
25 Empfangszeitpunkte $RxTS(1,2)$ der zuletzt empfangenen
"Hallo-Nachrichten" der beiden Nachbarknoten 3_1 und 3_2 .

Erst zum Sendezeitpunkt (6) erkennt Knoten 3_2 das
Entfernen von Knoten 3_1 aus seiner Übertragungsbereichweite
30 und überträgt deshalb in seiner "Hallo-Nachricht" neben
anderen Informationen nur noch die identifizierte
Identität $N(3)$ des Nachbarknotens 3_3 und den
Empfangszeitpunkt $RxTs(3)$ der von Knoten 3_3 zuletzt
empfangenen "Hallo-Nachricht". Die in der "Hallo-

Nachricht" von Knoten 3_2 enthaltene Mitteilung, dass sich Knoten 3_1 aus der Übertragungsreichweite von Knoten 3_2 entfernt hat, wird von Knoten 3_3 mit einer "I-Hallo-Nachricht" unmittelbar nach Empfang der "Hallo-Nachricht" von Knoten 3_2 quittiert.

Zum Empfangszeitpunkt (7) der von Knoten 3_3 verschickten "I-Hallo-Nachricht" bei Knoten 3_2 wird Knoten 3_3 zum neuen lokalen Zeit-Master von Knoten 3_2 . Knoten 3_2 synchronisiert zum Zeitpunkt (7) seine lokale Zeit mit den Zeitinformationen der "I-Hallo-Nachricht" des Knoten 3_3 auf die lokale Zeit des Knotens 3_3 .

Knoten 3_3 erkennt ab einen bestimmten Zeitpunkt (8), dass Knoten 3_1 sich auch aus seiner Übertragungsreichweite entfernt hat und folgert daraus, dass er selbst ab sofort zum lokalen Zeit-Master für Knoten 3_2 wird und somit seine eigene lokale Zeit nicht mehr an die lokale Zeit eines anderen Knoten des ad-hoc-Netzwerkes synchronisieren muss.

Im fünften Szenario in Fig. 6 entfernt sich ein Knoten 3_1 aus einem gemeinsamen ad-hoc-Netzwerk, das aus den Knoten 3_1 , 3_2 , 3_3 und 3_4 ursprünglich gebildet ist.

In der Konfiguration des fünften Szenarios besteht zum Zeitpunkt (1) eine symmetrische Übertragungsverbindung des Knoten 3_1 zu den beiden Knoten 3_2 und 3_3 , eine symmetrische Übertragungsverbindung des Knoten 3_2 zu den beiden Knoten 3_1 und 3_3 , eine symmetrische Übertragungsverbindung des Knotens 3_3 mit den Knoten 3_1 , 3_2 und 3_4 und eine symmetrische Übertragungsverbindung des Knotens 3_4 mit den beiden Knoten 3_1 und 3_2 . Knoten 3_3 agiert als lokaler Zeit-Master für die Knoten 3_1 , 3_2 und 3_4 , da er der einzige

Knoten in gemeinsamen ad-hoc-Netzwerk mit der meisten Anzahl von benachbarten Knoten darstellt.

Das Entfernen von Knoten 3_1 aus der Übertragungsreichweite
5 von Knoten 3_2 wird zu den Sendezeitpunkten (2) und (5) der
"Hallo-Nachricht" von Knoten 3_2 noch nicht erkannt, so
dass diese "Hallo-Nachricht" von Knoten 3_2 Informationen
zu allen Nachbarknoten 3_1 und 3_3 des Knotens 3_2 enthält.
Äquivalent wird das Entfernen von Knoten 3_1 aus der
10 Übertragungsreichweite von Knoten 3_3 zu den
Sendezeitpunkten (3) und (6) der "Hallo-Nachricht" von
Knoten 3_3 noch nicht erkannt, so dass die "Hallo-
Nachricht" von Knoten 3_3 die Informationen zu allen
Nachbarknoten 3_1 , 3_2 und 3_4 des Knotens 3_3 enthält.
15 Schließlich wird das Entfernen von Knoten 3_1 aus der
Übertragungsreichweite von Knoten 3_4 zu den
Sendezeitpunkten (4) und (7) der "Hallo-Nachricht" von
Knoten 3_4 noch nicht erkannt, so dass auch die "Hallo-
Nachricht" von Knoten 3_4 Information von zwei
20 Nachbarknoten 3_1 und 3_3 des Knotens 3_4 enthält.

Mehr oder weniger gleichzeitig zum Zeitpunkt (8) erkennen
die Knoten 3_2 , 3_3 und 3_4 aufgrund einer ausbleibenden
"Hallo-Nachricht" von Knoten 3_1 das Entfernen von Knoten
25 3_1 aus ihren jeweiligen Übertragungsreichweiten und somit
auch aus dem gesamten ad-hoc-Netzwerk.

Somit enthält die "Hallo-Nachricht" von Knoten 3_2 zum
Sendezeitpunkt (9) nur noch Informationen für den
30 verbleibenden Nachbarknoten 3_3 . Ebenso enthält die "Hallo-
Nachricht" von Knoten 3_3 zum Sendezeitpunkt (10) nur noch
Informationen für die verbleibenden Nachbarknoten 3_2 und
 3_4 . Schließlich enthält die "Hallo-Nachricht" von Knoten
 3_4 zum Sendezeitpunkt (13) nur noch Informationen für den

verbleibenden Nachbarknoten 3_3 . Eine Quittierung der in der "Hallo-Nachricht" von Knoten 3_2 enthaltenen Mitteilung, dass sich Knoten 3_1 aus der Übertragungsreichweite von Knoten 3_2 entfernt hat, durch
5 eine unmittelbar verschickte "I-Hallo-Nachricht" durch Knoten 3_3 unterbleibt, da Knoten 3_3 vergleichsweise zeitnah zum Sendezeitpunkt (10) eine "Hallo-Nachricht" verschickt, aus der hervorgeht, dass Knoten 3_1 sich auch aus der Übertragungsreichweite von Knoten 3_3 entfernt hat.
10 Aus demselben Grund verschickt Knoten 3_4 keine Quittierung der in der "Hallo-Nachricht" von Knoten 3_3 enthaltenen Mitteilung, dass sich Knoten 3_1 aus der Übertragungsreichweite von Knoten 3_3 entfernt hat, mittels einer "I-Hallo-Nachricht".

15 Knoten 3_3 wird zum lokalen Zeit-Master für die Knoten 3_2 und 3_4 des verbleibenden ad-hoc-Netzwerkes, da er der einzige Knoten im verbleibenden ad-hoc-Netzwerk mit der meisten Anzahl von benachbarten Knoten ist. Somit
20 synchronisiert Knoten 3_2 zum Empfangszeitpunkt (11) der "Hallo-Nachricht" des Knoten 3_3 seine lokale Zeit an die lokale Zeit des als lokalen Zeit-Master agierenden Knoten 3_3 , während Knoten 3_4 zum Empfangszeitpunktes (12) der "Hallo-Nachricht" des Knotens 3_3 seine lokale Zeit
25 äquivalent an die lokale Zeit des Knotens 3_3 synchronisiert.

Im sechsten Szenario in Fig. 7 entfernt sich Knoten 3_1 nicht gleichzeitig von allen übrigen Knoten 3_2 , 3_3 und 3_4
30 des verbleibenden ad-hoc-Netzwerks, sondern entfernt sich sukzessive aus der Übertragungsreichweite der einzelnen Knoten 3_4 , 3_3 und 3_2 .

Die Ursprungskonfiguration des sechsten Szenarios entspricht der Ursprungskonfiguration des fünften

Szenarios. Somit fungiert Knoten 3_3 als lokaler Zeit-Master für die Knoten 3_1 , 3_2 und 3_4 und die vorhandenen symmetrischen Übertragungsverbindungen zwischen den einzelnen Knoten entsprechen den symmetrischen

- 5 Übertragungsverbindungen im fünften Szenario. Zum Zeitpunkt (1) entfernt sich Knoten 3_1 aus der Übertragungsreichweite von Knoten 3_4 .

- 10 Das sukzessive Entfernen von Knoten 3_1 aus dem gemeinsamen ad-hoc-Netzwerk wird von den übrigen Knoten 3_2 , 3_3 und 3_4 in den ersten Sendezeitpunkten ihrer "Hallo-Nachrichten" nicht erkannt. Knoten 3_2 verschickt zu den Sendezeitpunkten (2), (8), (14), (22), (29), (35) und (41) jeweils eine "Hallo-Nachricht" mit Informationen über alle
15 seine Nachbarknoten 3_1 und 3_3 . Knoten 3_3 verschickt zu den Sendezeitpunkten (3), (9), (17) und (23) jeweils eine "Hallo-Nachricht" mit Informationen über alle seine Nachbarknoten 3_1 , 3_2 und 3_3 . Knoten 3_4 verschickt zum Sendezeitpunkt (7) und (13) eine "Hallo-Nachricht" mit
20 Informationen über alle seine Nachbarknoten 3_1 und 3_3 . Aufgrund des Entferns von Knoten 3_1 aus Übertragungsreichweite von Knoten 3_4 erreicht die von Knoten 3_1 und Knoten 3_4 jeweils verschickte "Hallo-Nachricht" den Knoten 3_4 bzw. 3_1 nicht.

- 25 Knoten 3_2 synchronisiert seine lokale Zeit an die lokale Zeit des Knotens 3_1 zu den Empfangszeitpunkten (5), (11), (20) und (26) der "Hallo-Nachricht" des Knoten 3_1 mit den in dieser "Hallo-Nachricht" enthaltenen Zeitinformationen.
30 Äquivalent synchronisiert Knoten 3_3 seine lokale Zeit an die lokale Zeit des Knoten 3_1 zum Empfangszeitpunkt (6) und (12) der "Hallo-Nachricht" des Knoten 3_1 mit den in dieser "Hallo-Nachricht" enthaltenen Zeitinformationen.

Zum Zeitpunkt (15) erkennt Knoten 3_4 das Entfernen von Knoten 3_1 aus seiner Übertragungsreichweite, da er jüngst innerhalb eines festgelegten Zeitintervalls keine "Hallo-Nachricht" des Knotens 3_1 empfangen hat und versendet zu
5 den nächsten Sendezeitpunkten (21), (27), (34), (40) und (45) eine "Hallo-Nachricht", die lediglich Informationen zu seinem verbleibenden Nachbarknoten 3_3 enthält. Für die Synchronisierung seiner lokalen Zeit wählt er den in seiner Übertragungsreichweite positionierten Knoten 3_3 zu
10 seinem lokalen Zeit-Master und synchronisiert seine lokale Zeit an die lokale Zeit des als lokalen Zeit-Master agierenden Knoten 3_3 zu den Empfangszeitpunkten (18), (24), (32), (39) und (44) einer "Hallo-Nachricht" des Knoten 3_3 . Zum Zeitpunkt (16) entfernt sich Knoten 3_1 auch
15 aus der Übertragungsreichweite von Knoten 3_3 .

Zum Sendezeitpunkt (19) einer zyklisch zu verschickenden "Hallo-Nachricht" erkennt Knoten 3_1 , dass er von Knoten 3_4 innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls seit dem letzten
20 Empfang einer "Hallo-Nachricht" keine "Hallo-Nachricht" von Knoten 3_4 empfangen hat und sich somit aus der Übertragungsreichweite von Knoten 3_4 entfernt hat. Somit verschickt Knoten 3_1 zum Sendezeitpunkt (19) eine "Hallo-Nachricht", die lediglich Informationen zu den noch
25 verbleibenden Nachbarknoten 3_2 und 3_3 enthält und lediglich den Knoten 3_2 erreicht.

Diese "Hallo-Nachricht" des Knotens 3_1 empfängt einzig Knoten 3_2 zum Empfangszeitpunkt (20) und erkennt anhand
30 dieser "Hallo-Nachricht", dass sich Knoten 3_1 aus der Übertragungsreichweite von Knoten 3_4 entfernt hat, synchronisiert aber zu diesem Zeitpunkt (20) seine lokale Zeit weiterhin auf die lokale Zeit seines als lokalen Zeit-Master agierenden Knotens 3_1 .

- Zum Zeitpunkt (28) erkennt Knoten 3_3 , dass Knoten 3_1 sich aus seiner Übertragungsreichweite entfernt hat, da er jüngst innerhalb eines festgelegten Zeitintervalls keine
- 5 "Hallo-Nachricht" des Knoten 3_1 empfangen hat (insbesondere die "Hallo-Nachrichten" des Knoten 3_1 , die Knoten 3_2 zum Empfangszeitpunkt (20) und (26) empfangen hat) und versendet zu den nächsten Sendezeitpunkten (31), (37) und (43) eine "Hallo-Nachricht", die lediglich
- 10 Informationen zu den noch verbleibenden Nachbarknoten 3_2 und 3_4 enthält. Knoten 3_3 legt zur Synchronisierung seiner lokalen Zeit Knoten 3_2 zu seinem lokalen Zeit-Master fest, da Knoten 3_2 die niedrigste MAC-Adresse von allen im verbleibenden ad-hoc-Netzwerk verbleibenden Knoten 3_2 , 3_3
- 15 und 3_4 aufweist. Zu den nächsten Empfangszeitpunkten (30), (36) und (42) einer "Hallo-Nachricht" des Knoten 3_2 synchronisiert somit Knoten 3_3 seine lokale Zeit an die lokale Zeit des als lokalen Zeit-Master agierenden Knotens 3_2 .
- 20
- Zum Zeitpunkt (33) entfernt sich Knoten 3_1 schließlich auch aus der Übertragungsreichweite des Knotens 3_2 . Das Entfernen von Knoten 3_1 aus der Übertragungsreichweite des Knotens 3_2 wird von Knoten 3_2 zum Zeitpunkt (46) erkannt.
- 25 Knoten 3_2 bleibt lokaler Zeit-Master des Knotens 3_3 und des Knotens 3_4 des verbleibenden ad-hoc-Netzwerkes und muss deshalb seine lokale Zeit nicht an die lokale Zeit eines anderen Knotens synchronisieren.
- 30 Im siebten Szenario der Fig. 8 vereinigen sich zwei Teil-ad-hoc-Netzwerke bestehend aus den Knoten 3_1 , 3_2 , 3_3 und 3_4 einerseits und den Knoten 3_5 , 3_6 , 3_7 und 3_8 andererseits zu einem einzigen Gesamt-ad-hoc-Netzwerk.

In der Ursprungsconfiguration bildet Knoten 3_1 mit Knoten 3_2 eine symmetrische Übertragungsverbindung, während Knoten 3_2 zusätzlich eine symmetrische Übertragungsverbindung mit Knoten 3_3 bildet, der wiederum
5 eine symmetrische Übertragungsverbindung mit Knoten 3_4 bildet. Knoten 3_1 dient als lokaler Zeit-Master für Knoten 3_2 , während Knoten 3_3 als lokaler Zeit-Master für Knoten 3_2 und Knoten 3_4 als lokaler Zeit-Master von Knoten 3_3 agiert. Äquivalent bildet Knoten 3_5 mit Knoten 3_6 eine
10 symmetrische Übertragungsverbindung, während Knoten 3_6 zusätzlich eine symmetrische Übertragungsverbindung mit Knoten 3_7 bildet, der wiederum eine symmetrische Übertragungsverbindung mit Knoten 3_8 bildet. Knoten 3_5 dient als lokaler Zeit-Master für Knoten 3_6 , während
15 Knoten 3_7 als lokaler Zeit-Master für Knoten 3_6 und Knoten 3_8 als lokaler Zeit-Master von Knoten 3_7 agiert.

Die einzelnen Knoten i senden innerhalb ihres jeweiligen zyklischen Zeitrasters ΔT_i jeweils eine "Hallo-Nachricht"
20 an ihre jeweiligen Nachbar-Knoten. Knoten 3_1 sendet zum Zeitpunkt (1) eine "Hallo-Nachricht" mit Informationen über seinen identifizierten Nachbarknoten 3_2 . Knoten 3_5 sendet zum Zeitpunkt (2) eine "Hallo-Nachricht" mit Informationen über seinen identifizierten Nachbarknoten
25 3_6 . Knoten 3_2 sendet zum Zeitpunkt (3) eine "Hallo-Nachricht" mit Informationen über seine identifizierten Nachbarknoten 3_1 und 3_3 . Knoten 3_6 sendet zum Zeitpunkt (4) eine "Hallo-Nachricht" mit Informationen über seine identifizierten Nachbarknoten 3_5 und 3_7 . Knoten 3_3 sendet
30 zum Zeitpunkt (5) eine "Hallo-Nachricht" mit Informationen über seine identifizierten Nachbarknoten 3_2 und 3_4 . Knoten 3_7 sendet zum Zeitpunkt (7) eine "Hallo-Nachricht" mit Informationen über seine identifizierten Nachbarknoten 3_6 und 3_8 . Knoten 3_4 sendet zum Zeitpunkt (4) eine "Hallo-

Nachricht" mit Informationen über seinem identifizierten Nachbarknoten 3_3 . Knoten 3_8 sendet zum Zeitpunkt (8) eine "Hallo-Nachricht" mit Informationen über seinen identifizierten Nachbarknoten 3_7 .

5

Zu einem späteren Zeitpunkt (9) sendet Knoten 3_4 wiederum eine "Hallo-Nachricht" mit Informationen $N(3)$ über seinen identifizierten Nachbarknoten 3_3 , die nicht nur vom Nachbarknoten 3_3 , sondern auch im Zeitpunkt (10) vom

10 Knoten 3_5 des jeweils anderen Teil-ad-hoc-Netzwerkes empfangen wird, der sich in Übertragungsbereich zum Knoten 3_4 befindet. Da Knoten 3_4 für Knoten 3_5 im ersten Moment ein fremder Knoten ist, quittierte er den Empfang der "Hallo-Nachricht" von Knoten 3_4 mit einer "I-Hallo-

15 Nachricht" zum Zeitpunkt (11) mit Informationen $(N4,6)$ über seine identifizierten Nachbarknoten 3_4 und 3_6 , die von Knoten 3_4 zum Zeitpunkt (12) empfangen wird. Da auch Knoten 3_5 für Knoten 3_4 im ersten Moment ein fremder Knoten ist, wird Knoten 3_4 unmittelbar nach Empfang der

20 "I-Hallo-Nachricht" des Knotens 3_5 zum Zeitpunkt (13) eine "I-Hallo-Nachricht" mit Informationen $N(3,5)$ über seine identifizierten Nachbarknoten 3_3 und 3_5 versenden.

Da einer der Knoten 3_1 , 3_2 , 3_3 und 3_4 des in Fig. 8

25 linksseitig dargestellten ad-hoc-Netzwerkes die niedrigste MAC-Adresse von allen zukünftig in einem einzigen ad-hoc-Netzwerk zu integrierenden Knoten 3_1 , 3_2 , 3_3 , 3_4 , 3_5 , 3_6 , 3_7 und 3_8 aufweist, wird Knoten 3_4 nicht nur von Knoten 3_3 des in Fig. 8 linksseitig dargestellten ad-hoc-Netzwerkes,

30 sondern auch von Knoten 3_5 des in Fig. 8 rechtsseitig dargestellten ad-hoc-Netzwerkes zum lokalen Zeit-Master festgelegt. Zum Empfangszeitpunkt (14) der "I-Hallo-Nachricht" des Knotens 3_4 beim Knoten 3_5 liegt eine symmetrische Übertragungsverbindung zwischen Knoten 3_4 und

Knoten 3_5 vor, da beide Knoten 3_4 und 3_5 jeweils zu diesem Zeitpunkt (14) erkannt haben, dass eine korrekte Übertragung von Knoten 3_4 nach Knoten 3_5 und von Knoten 3_5 nach Knoten 3_4 existiert. Zum Empfangszeitpunkt (14) der

5 "I-Hallo-Nachricht" des Knotens 3_4 beim Knoten 3_5 synchronisiert Knoten 3_5 seine lokale Zeit an die lokale Zeit des als lokaler Zeit-Master agierenden Knoten 3_4 aus den in der "I-Hallo-Nachricht" übertragenen Zeitinformationen.

10

Mit den Zeitinformationen der von Knoten 3_5 zum Zeitpunkt (15) gesendeten "Hallo-Nachricht", die Knoten 3_6 zum Zeitpunkt (16) empfängt, synchronisiert Knoten 3_6 seine lokale Zeit an die lokale Zeit seines als lokalen Zeit-

15 Master agierenden Knotens 3_5 . Äquivalent synchronisiert Knoten 3_7 seine lokale Zeit an die lokale Zeit seines als lokalen Zeit-Master agierenden Knoten 3_6 mit den Zeitinformationen der von Knoten 3_6 zum Zeitpunkt (17) gesendeten "Hallo-Nachricht", die Knoten 3_7 zum Zeitpunkt

20 (18) empfängt. Auch Knoten 3_8 synchronisiert seine lokale Zeit an die lokale Zeit seines als lokalen Zeit-Master agierenden Knotens 3_7 mit den Zeitinformationen der von Knoten 3_7 zum Zeitpunkt (19) gesendeten "Hallo-Nachricht", die Knoten 3_8 zum Zeitpunkt (20) empfängt.

25

Abschließend sei erwähnt, dass die lokale Zeit jedes Knotens innerhalb oder außerhalb eines ad-hoc-Netzwerkes aufgrund einer Taktdrift des in jedem Knoten für die Generierung der lokalen Zeit implementierten

30 Taktgenerators eine gewisse Zeitungenauigkeit aufweist. Der Verlauf der Zeitungenauigkeit der in einem Knoten realisierten lokalen Zeit ist aus Fig. 9 für jeweils vier Knoten zu erkennen. Diese vier Knoten synchronisieren jeweils ihre lokale Zeit seriell an einen als lokalen

- Zeit-Master agierenden Nachbarknoten. Knoten 2 synchronisiert seine lokale Zeit an die lokale Zeit von Knoten 1; Knoten 3 synchronisiert seine lokale Zeit an die lokale Zeit von Knoten 2 usw. Ab dem
- 5 Synchronisierungszeitpunkt, in dem die Zeitungenauigkeit der jeweiligen lokalen Zeit minimal ist, steigt die Zeitungenauigkeit der jeweiligen lokalen Zeit linear an, bis sie wieder synchronisiert wird.
- 10 Durch Reduzierung des Synchronisierungsintervalls mittels Reduzierung des zyklischen Zeitrasters, in dem vom jeweiligen als lokalen Zeit-Master agierenden Knoten jeweils eine "Hallo-Nachricht" gesendet wird, kann eine Minimierung der Zeitungenauigkeit einer in einem Knoten
- 15 realisierten lokalen Zeit verwirklicht werden, wie aus Fig. 9 hervorgeht. Bevorzugt wird vom jeweiligen lokalen Zeit-Master der Zeitpunkt vorab berechnet, in der eine "Hallo-Nachricht" zur Zeitsynchronisierung verschickt wird, um eine maximal erlaubte Zeitungenauigkeit beim zu
- 20 synchronisierenden Knoten einzuhalten.

- Die Erfindung ist nicht auf die dargestellte Ausführungsform und die dargestellten Szenarien beschränkt. Von der Erfindung sind sämtliche Kombinationen
- 25 aller in den Patentansprüchen beanspruchten Merkmale, aller in der Beschreibung offenbarten Merkmale und aller in den Figuren der Zeichnung dargestellten Merkmale abgedeckt.

Ansprüche

1. Verfahren zur Zeitsynchronisierung in einem mobilen
5 ad-hoc-Netzwerk mit folgenden Verfahrensschritten:
- Versenden einer Nachricht zur Signalisierung einer
Anwesenheit (1) durch jeden Knoten $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$
des mobilen ad-hoc-Netzwerkes in jeweils einem bestimmten
Zeitraster,
 - 10 • Quittieren der empfangenen Nachricht zur
Signalisierung einer Anwesenheit (1) durch jeden in
Übertragungsreichweite des versendenden Knoten
 $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ befindlichen Knoten
 $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ mit jeweils einer Quittierungs-
15 Nachricht (2),
 - Festlegen desjenigen Knotens $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$
aus zwei zueinander in Übertragungsreichweite befindlichen
Knoten $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$, an dessen lokaler Zeit der
jeweils andere Knoten $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ seine lokale
20 Zeit synchronisiert, anhand von Informationen einer
Quittierungs-Nachricht (2), die einer der beiden Knoten
 $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ empfängt, und
 - Synchronisieren der lokalen Zeit der Knoten
 $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ auf die lokale Zeit des jeweiligen
25 festgelegten Knotens $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$.
2. Verfahren nach Anspruch 1,
dadurch gekennzeichnet,
dass derjenige Knoten $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ der beiden
30 zueinander in Übertragungsreichweite befindlichen Knoten
 $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ festgelegt wird, dessen lokale
Zeit die höchste Zeitgenauigkeit aufweist oder der in
einem anderen ad-hoc-Netzwerk mit einem Knoten
 $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ eingebunden ist, dessen lokale
35 Zeit die höchste Zeitgenauigkeit aufweist.
3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2,
dadurch gekennzeichnet,

dass bei einem sich einzig aus zwei Knoten $(3_1, 3_2)$ bildenden ad-hoc-Netzwerk, deren lokale Zeiten eine identische Zeitgenauigkeit aufweisen, derjenige Knoten $(3_1, 3_2)$ festgelegt wird, der zuerst auf eine Nachricht zur
5 Signalisierung einer Anwesenheit (1) der beiden Knoten $(3_1, 3_2)$ eine Quittierungs-Nachricht (2) sendet.

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3,
dadurch gekennzeichnet,
10 dass bei einer identischen Zeitgenauigkeit aller in das zu bildende ad-hoc-Netzwerk eingebundenen Knoten $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ derjenige Knoten der beiden zueinander in Übertragungsreichweite befindlichen Knoten $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ festgelegt wird, der mit einer größeren Anzahl
15 von Knoten $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ bisher ein ad-hoc-Netzwerk bildet.

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4,
dadurch gekennzeichnet,
20 dass bei einer identischen Zeitgenauigkeit aller in das zu bildende ad-hoc-Netzwerk eingebundenen Knoten $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ und bei einer identischen Anzahl von Knoten $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$, mit denen die beiden zueinander in Übertragungsreichweite befindlichen Knoten jeweils ein
25 ad-hoc-Netzwerk bilden, derjenige Knoten $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ festgelegt wird, dessen ad-hoc-Netzwerk eine niedrigere Identitäts-Kennung aufweist.

6. Verfahren nach Anspruch 5,
30 **dadurch gekennzeichnet,**
dass die Identitäts-Kennung des ad-hoc-Netzwerkes die Medium-Zugriffs-Kontroll-Adresse des ad-hoc-Netzwerkes ist.

35 7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6,
dadurch gekennzeichnet,
dass bei einem ad-hoc-Netzwerk, aus dem sich mindestens ein Knoten (3_1) entfernt, derjenige Knoten $(3_2, 3_3, 3_4)$ des

übrigen ad-hoc-Netzwerkes festgelegt wird, an dessen lokaler Zeit die übrigen Knoten $(3_2, 3_3, 3_4)$ des ad-hoc-Netzwerke jeweils ihre lokale Zeit synchronisieren, der die lokale Zeit mit der höchsten Zeitgenauigkeit aufweist.

5

8. Verfahren zur Zeitsynchronisierung nach Anspruch 7, **dadurch gekennzeichnet,**

dass bei einem ad-hoc-Netzwerk, aus dem sich mindestens ein Knoten (3_1) entfernt, und bei identischer

10 Zeitgenauigkeit der lokalen Zeiten der Knoten $(3_2, 3_3, 3_4)$ des übrigen ad-hoc-Netzwerkes derjenige Knoten $(3_2, 3_3, 3_4)$ des übrigen ad-hoc-Netzwerkes festgelegt wird, der die höchste Anzahl von direkt benachbarten Knoten $(3_2, 3_3, 3_4)$ aufweist.

15

9. Verfahren nach Anspruch 7 oder 8,

dadurch gekennzeichnet,

dass bei einem ad-hoc-Netzwerk, aus dem sich mindestens ein Knoten (3_1) entfernt, und bei identischer

20 Zeitgenauigkeit der lokalen Zeiten der Knoten $(3_2, 3_3, 3_4)$ des übrigen ad-hoc-Netzwerkes und bei einer identischen Anzahl von jeweils direkt benachbarten Knoten $(3_2, 3_3, 3_4)$ bei jedem Knoten $(3_2, 3_3, 3_4)$ des übrigen ad-hoc-Netzwerkes derjenige Knoten $(3_2, 3_3, 3_4)$ des übrigen ad-hoc-Netzwerkes
25 festgelegt wird, der die niedrigste Identität-Kennung aufweist.

10. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6,

dadurch gekennzeichnet,

30 dass ein Knoten $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ eines ad-hoc-Netzwerkes, von dem sich ein Knoten $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ entfernt, an dessen lokaler Zeit der Knoten $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ des ad-hoc-Netzwerkes bisher seine lokale Zeit synchronisierte, einen anderen in seiner
35 Übertragungsreichweite befindlichen Knoten $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ des übrigen ad-hoc-Netzwerkes festlegt, an dessen lokaler Zeit er seine lokale Zeit synchronisiert.

11. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 10,
dadurch gekennzeichnet,
dass das Synchronisieren der lokalen Zeit der Knoten
($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8$), die jeweils mit einem der beiden
5 zueinander in Übertragungsreichweite befindlichen Knoten
($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8$) ein ad-hoc-Netzwerk bilden, an die
lokale Zeit des festgelegten Knotens ($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6,$
 $3_7, 3_8$) dadurch realisiert wird, dass jeder Knoten ($3_1, 3_2,$
 $3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8$) des jeweiligen ad-hoc-Netzwerkes einen
10 direkt benachbarten Knoten ($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8$) des ad-
hoc-Netzwerkes als Knoten ($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8$)
festlegt, an dessen lokaler Zeit er seine lokale Zeit
synchronisiert.
- 15 12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 11,
dadurch gekennzeichnet,
dass das Synchronisieren der lokalen Zeit eines Knoten
($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8$) an die lokale Zeit des
festgelegten Knoten ($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8$) dadurch
20 erfolgt, dass der festgelegte Knoten ($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6,$
 $3_7, 3_8$) dem Knoten den Empfangszeitpunkt der vom Knoten
($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8$) gesendeten Nachricht zur
Aktualisierung einer Anwesenheit (1) oder Quittierungs-
Nachricht (2) in der lokalen Zeit des festgelegten Knotens
25 ($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8$) und den Sendzeitpunkt einer an
den Knoten ($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8$) gesendeten Nachricht
zur Signalisierung einer Anwesenheit (1) oder
Quittierungs-Nachricht (2) mitteilt.
- 30 13. Verfahren nach Anspruch 12,
dadurch gekennzeichnet,
dass das Synchronisieren der lokalen Zeit eines Knoten
($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8$) an die lokale Zeit des
festgelegten Knoten ($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8$) bei jedem
35 Empfang einer Nachricht zur Signalisierung einer
Anwesenheit (1) oder einer Quittierungs-Nachricht (2) des
festgelegten Knotens ($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8$) erfolgt.

14. Verfahren nach einem der Ansprüche 7 bis 9,
dadurch gekennzeichnet,
dass das Entfernen eines Knotens $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$
aus einem ad-hoc-Netzwerk erkannt wird, falls seit dem
5 letzten Empfangszeitpunkt einer Nachricht zur
Signalisierung einer Anwesenheit (1) des sich entfernenden
Knotens $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ innerhalb eines konstanten
Zeitrasters, in denen jeweils eine Nachricht zur
Signalisierung einer Anwesenheit (1) übertragen wird,
10 keine weitere Nachricht zur Signalisierung einer
Anwesenheit (1) des sich entfernenden Knotens $(3_1, 3_2, 3_3,$
 $3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ von allen übrigen Knoten $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5,$
 $3_6, 3_7, 3_8)$ des verbleibenden ad-hoc-Netzwerkes empfangen
wird.
- 15
15. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 14,
dadurch gekennzeichnet,
dass zur Reduzierung des Einflusses einer Taktdrift auf
die Zeitgenauigkeit der lokalen Zeit eines Knotens
20 $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ ein konstantes Zeitraster, in dem
der Knoten $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ eine Nachricht zur
Aktualisierung einer Anwesenheit (1) sendet, minimiert
wird.
- 25 16. Verfahren nach Anspruch 15,
dadurch gekennzeichnet,
dass der Knoten $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ den Sendezeitpunkt
der Nachricht zur Aktualisierung einer Anwesenheit (1)
vorausberechnet, um den Einfluss der Taktdrift auf die
30 Zeitgenauigkeit der lokalen Zeit des Knotens $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4,$
 $3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$ zu begrenzen.
17. System zur Zeitsynchronisierung in einem mobilen ad-
hoc-Netzwerk bestehend aus mehreren, jeweils eine
35 Nachricht zur Signalisierung einer Anwesenheit (1) in
jeweils einem bestimmten Zeitraster versendenden Knoten
 $(3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8)$, wobei durch jeden in
Übertragungsreichweite des eine Nachricht zur

Signalisierung einer Anwesenheit (1) versendenden Knotens
($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8$) befindlichen Knoten
($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8$) eine Quittierung der Nachricht zur
Signalisierung einer Anwesenheit (1) mittels einer
5 Quittierungs-Nachricht (2) erfolgt, wobei von jeweils zwei
zueinander in Übertragungsbereichweite befindlichen Knoten
($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8$) ein Knoten ($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8$)
festgelegt ist, an dessen lokaler Zeit die lokale Zeit des
jeweils anderen Knoten ($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8$)
10 synchronisiert ist, wobei die Festlegung des Knotens
($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8$) anhand von Informationen der von
einem der beiden zueinander in Übertragungsbereichweite
befindlichen Knoten ($3_1, 3_2, 3_3, 3_4, 3_5, 3_6, 3_7, 3_8$) empfangenen
Quittierungs-Nachricht (2) erfolgt.

15