

Peter Tabery

**Mobilitätsunterstützung mit
Programmierbaren Netzen**

Herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Jörg Eberspächer
Lehrstuhl für Kommunikationsnetze
Technische Universität München

in der Reihe

Kommunikationstechnik



Herbert Utz Verlag · München

Kommunikationstechnik

Band 20

Zugl.: Diss., München, Techn. Univ., 2006

Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek:
Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation
in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt.
Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die
der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von
Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem
oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Daten-
verarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugs-
weiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH · 2007

ISBN 978-3-8316-0685-6

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München
089-277791-00 · www.utz.de

Vorwort

Diese Arbeit entstand im Rahmen meiner Forschungstätigkeit am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der Technischen Universität München.

Besonderer Dank gebührt meinem Doktorvater Prof. Jörg Eberspächer dafür, daß er mir die Möglichkeit gegeben hat an seinem Lehrstuhl zu forschen. Nicht zuletzt war es seine wissenschaftliche Begleitung, die diese Dissertation ermöglicht hat. Bedanken möchte ich mich auch bei Prof. Adam Wolisz für die Übernahme des Zweitgutachtens.

Stellvertretend für alle Kollegen am Lehrstuhl sei namentlich Dr. Christian Hartmann und Dr. Christian Bachmeir gedankt. Der wissenschaftliche Diskurs mit ihnen stellte eine große Bereicherung meiner Arbeit dar und half die Untiefen erfolgreich zu umschiffen. Mein Dank gilt auch Dr. Martin Maier, der stets ein offenes Ohr für meine Hard- und Software Sorgen hatte.

Herzlichen Dank verdient nicht zuletzt auch meine Lebensgefährtin Birgit Reinisch, die mich während der Entstehung dieser Arbeit liebevoll unterstützt hat und viel Geduld für mich aufbrachte.

München, im Dezember 2006

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	vii
1 Einführung	1
1.1 Problemstellung und Lösungsansatz der Arbeit	2
1.2 Struktur und Gliederung	4
2 Mobilitätsunterstützung im Internet	7
2.1 Klassifizierung der Mobilitätsunterstützung	9
2.1.1 Terminalmobilität im Schichtenmodell	9
2.1.2 Mikro- und Makro-Mobilität	10
2.1.3 Overlaynetze: Horizontale und vertikale IP-Netzwechsel	11
2.1.4 Mobile Drahtlose Ad Hoc-Netze	13
2.2 Mobile IP	14
2.2.1 Handover und Netzwechsel	16
2.2.2 Erkennung von IP-Netzwechseln	17
2.2.3 Hierarchisches Mobile IP	19
2.2.4 Routenoptimierung für Mobile IP	20
2.2.5 Pre- und Post-Registrierung	21
2.2.6 Proxy Mobile IP	22
2.3 Zwischenschicht zur Mobilitätsunterstützung	23
2.3.1 Mobilität mit dem Host Identity Protocol (HIP)	23
2.3.2 Internet Indirection Infrastructure (i3)	24
2.4 Mobilitätsunterstützung auf der Transportschicht	24
2.4.1 TCP-Mobilität	24

2.4.2	Mobile SCTP	25
2.4.3	MSOCKS	26
2.5	Mobilitätsunterstützung in höheren Schichten	26
2.5.1	Mobile SIP	26
2.5.2	Resilient Mobile Socket (RMS)	28
2.5.3	Mobile People Architecture	28
2.6	Mikro-Mobilitätsunterstützung	28
2.6.1	Cellular IP	29
2.6.2	Handoff-Aware Wireless Access Internet Infrastructure (Hawaii)	30
2.6.3	Mobility Support – A Multicast-Based Approach (Mombasa)	30
2.7	Vergleich und Bewertung	32
2.7.1	Verfahren zur Makro-Mobilitätsunterstützung und deren Einsetzbarkeit	32
2.7.2	Mikro-Mobilitätsunterstützung und deren Kompatibilität	35
2.7.3	Vergleich der Handoverperformanz	35
2.8	Zusammenfassung	37
3	Die Handover-Hysterese bei Wireless LAN	39
3.1	Handover bei Wireless LAN	39
3.1.1	Kanäle des Wireless LAN	40
3.1.2	Verbinden mit einer neuen Basisstation	40
3.2	Annahmen für die analytische Modellierung	43
3.2.1	Funkwellenausbreitung	43
3.2.2	Modellannahmen bezüglich der Topologie	44
3.2.3	Berechnung des äquivalenten inneren Radius	46
3.2.4	Wegstrecke zwischen zwei Handovern	47
3.3	Handoverzeiten	49
3.3.1	Allgemeine Zwischenhandoverzeit	49
3.3.2	Verzerrte Verteilung der Zwischenhandoverzeit	50
3.4	Evaluierung	53
3.4.1	Zwischenhandoverzeit und Zellaufenthaltsdauer	53
3.4.2	Abgebrochene Handover	53
3.5	Zusammenfassung	55

4	Aktive und Programmierbare Netze	57
4.1	Netzseitiger Code, seine Verteilung und Sicherheit	59
4.1.1	Kapsel-basierter offener Ansatz	59
4.1.2	Spezialisierte Programmiersprache für aktiven Code	60
4.1.3	Dynamisch geladener verifizierter Code	61
4.1.4	Vergleich und Bewertung der Systeme	61
4.2	Architekturen aktiver und programmierbarer Systeme	62
4.3	Dienste in Aktiven und Programmierbaren Netzen	65
4.3.1	Designkriterien für Dienste	65
4.3.2	Nomenklatur der Dienste	66
4.3.3	Leistungsmerkmale (Features) auf IP-Ebene	68
4.3.4	Explizit und implizit initiierte Netzdienste	69
4.3.5	Lokalisieren von Ressourcen und Diensten (Service Discovery)	70
4.4	Beispiele von Diensten	71
4.4.1	Active Reliable Multicast	71
4.4.2	Netzseitige Ratenadaptierung für Multimedialströme	72
4.4.3	Fehlertolerante Overlaynetze	73
4.4.4	Programmierbarkeit auf der Anwendungsschicht	74
4.4.5	Dynamischer Einsatz von Transportprotokollen	74
4.4.6	Remote Socket Architecture (ReSoA)	75
4.5	Konfigurieren und Steuern programmierbarer Dienste	76
4.5.1	Feature Interaction	76
4.5.2	Abschätzung der Zahl der Interdependenzen bei Diensten	77
4.6	Flexible Signalisierungsprotokolle für prog. Dienste	79
4.6.1	Web Services	79
4.6.2	Common Object Request Broker Architecture (CORBA)	79
4.7	Abstrahiertes Modell einer programmierbaren Plattform	80
4.8	Zusammenfassung	82

- 5 Flexible Architektur für mobile programmierbare Dienste 83**
- 5.1 Dienste und Mobilität 83
 - 5.1.1 Kontexttransfer 84
 - 5.1.2 Kollokation von prog. Plattform und Foreign Agent 86
 - 5.1.3 Abgrenzung von Terminal- und Dienstmobilität 87
 - 5.1.4 Anforderungen an eine Architektur für Dienstmobilität 87
- 5.2 Modularisierte Mobilitätsunterstützung für Netzdienste 88
 - 5.2.1 Erweiterung des Kontexttransfers zum Dienstransfer 90
 - 5.2.2 Bereitstellung immobiler Dienste durch Datentunnelung 91
- 5.3 Dienstransfer oder Datentunnelung? 95
 - 5.3.1 Normierte Kostenmetrik 95
 - 5.3.2 Einheitsstrategie für die Dienstmobilität 96
 - 5.3.3 Theoretisches Kostenoptimum der Dienstmobilität 98
 - 5.3.4 Suboptimum durch die Ungenauigkeit der Bewegungsschätzung 99
- 5.4 Transversale Dienstmobilität 102
- 5.5 Zusammenfassung 103

- 6 Realisierung eines transparenten Programmierbaren Proxy 105**
- 6.1 Einsatzszenario 105
- 6.2 Konzept des Programmierbaren Proxy 106
 - 6.2.1 Selektiver Transparenter Proxy 107
 - 6.2.2 Unterstützung von Netzwechseln 109
 - 6.2.3 Handover-Triggered TCP (hot-TCP) 110
- 6.3 Prototypische Implementierung 111
 - 6.3.1 Struktur des Prototyps 111
 - 6.3.2 Benachrichtigung des vorherigen Foreign Agent (PFAN) 112
 - 6.3.3 R-UDP und Handover-getriggerte Flußkontrolle 113
- 6.4 Evaluierung des Programmierbaren Proxy 116
 - 6.4.1 Konzeption des Meßaufbaus und Meßmethodik 116
 - 6.4.2 Analyse des Verhaltens von TCP mit Mobile IP 117
 - 6.4.3 Analyse des Verhaltens des Programmierbaren Proxy mit R-UDP 119
 - 6.4.4 Simulative Untersuchung der Fairneß von hot-TCP 120
- 6.5 Fazit 122

7 Zusammenfassung und Ausblick	123
7.1 Überblick über die Ergebnisse	124
7.2 Ausblick	125
A Ergänzende statistische Betrachtungen	127
A.1 Wegstrecke eines neuen Terminals	127
A.2 Allgemeine Handoverzeit neuer Terminals	130
Abkürzungsverzeichnis	131
Abbildungsverzeichnis	137
Tabellenverzeichnis	141
Stichwortverzeichnis	143
Literaturverzeichnis	145

Kapitel 1

Einführung

Die Signale über das erste transatlantische Telegraphenkabel im Jahre 1857 [Web99] markieren den Aufbruch in das Zeitalter der globalen Telekommunikation. Von den ersten Telegrammen war es jedoch noch ein weiter Weg bis zur paketorientierten Datenvermittlung, die im Jahr 1969 im damaligen *Arpanet*, dem Vorläufer des heutigen Internet, ihren Anfang fand [LCC⁺03]. Die zweite Säule der modernen Kommunikationstechnik, die drahtlose Nachrichtenübertragung, begann mit dem experimentellen Nachweis der elektromagnetischen Wellen durch *Heinrich Hertz* im Jahre 1888 [Her88]. Neben den leistungsstarken Sendern, die Nachrichten weltumspannend verbreiten können, entstand später das Konzept des *zellularen Mobilfunks* mit geringen Sendeleistungen und kleinen Reichweiten. Hierbei stellt das Funkmedium nicht direkt die Verbindung vom Sender zum Empfänger her, sondern dient als Zugang zu vermittelnden Festnetzen.

Die heute überwiegend genutzten Funkzugangsnetze lassen sich kategorisieren in Mobilfunknetze mit besonderer Unterstützung für die Sprachübertragung und bloße Datenzugänge. Zu ersteren zählen das *Global System for Mobile Communications* (GSM) [BVE99] und das *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) [KAL⁺01], die beide lizenzierte Frequenzbänder nutzen und volle Mobilitätsunterstützung bieten. Die Datenfunksysteme, wie insbesondere das *Wireless LAN* nach dem Standard IEEE 802.11, waren zunächst lediglich als drahtlose Erweiterung der lokalen Datennetze und im unlizenzierten *Industrial, Scientific, and Medical* (ISM) Frequenzband konzipiert. Abzugrenzen davon sind Systeme, die in erster Linie nicht für Infrastrukturzwecke, sondern zur *Ad Hoc*-Kommunikation verschiedener Mobilgeräte gedacht sind, wie beispielsweise IEEE 802.15.1/Bluetooth.

Im Zuge der aktuellen Weiterentwicklung verschwinden die Unterschiede zwischen den Systemen allerdings zunehmend. Einerseits werden bei UMTS die verfügbaren Datenraten erhöht wie mit dem zur Zeit eingeführten *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) [3GP04]. Andererseits wird mit IEEE 802.11f das *Wireless LAN* um gewisse Funktionen zur Mikro-Mobilitätsunterstützung erweitert. Mit dem derzeit standardisierten IEEE 802.16/WiMAX entsteht dagegen ein hochbitratiges Funksystem für lizenzierte Funkbänder, welches optional auch Mobilitätsunterstützung bietet. Da im Zuge der *Konvergenz der Dienste* auch über ein Datennetz

vollwertige Sprachdienste mitsamt vielfältiger Leistungsmerkmale – einschließlich *Roaming*- und Handoverunterstützung – angeboten werden können, entwickeln sich die ursprünglich für die Datenübertragung vorgesehenen Systeme zu einer ernsthaften Konkurrenz für die etablierten Mobilfunksysteme und können daher als *disruptive Technologien* im Sinne von [Chr03] bezeichnet werden.

Neben diesen Entwicklungen im Bereich des Funkzuganges erfolgt jedoch auch eine Evolution der dahinterliegenden Netz- und Dienstinfrastruktur. Nach der in der Vergangenheit von statten gegangenen Umstellung der öffentlichen Fernsprechnetze auf das *Intelligente Netz* (IN) erleben wir aktuell mit der Migration zur paketorientierten *Voice over IP*-basierten Sprachübertragung den nächsten großen Umbruch in der Welt der Telekommunikation. Damit einher geht auch eine Umstellung der Dienststeuerung von den Zeichengabesystemen der ITU (SS7 [Int93c], ISUP [Int99], etc.) auf das von der IETF spezifizierte *Session Initiation Protocol* (SIP) [RSC⁺02]. Das Konzept des *Softswitch* [OJ03, Ebe06] führt dabei aufgrund der Trennung von Dienstlogik und Vermittlungsvorgang zu einer weiteren Vereinfachung der Entwicklung neuer Telekommunikationsdienste.

Neben der Kostenersparnis ist auch die zusätzliche *Flexibilität* bei der Bereitstellung innovativer Leistungsmerkmale und Kommunikationsdienste ein wesentlicher Faktor bei der Umstellung der Systeme. Mit dem drastischen Rückgang der Preise für Kommunikationsdienstleistungen in den vergangenen Jahren [Lin06] sind die Betreiber gezwungen, ihre Netze noch kosteneffizienter zu betreiben und rasch von den Kunden gewünschte neuartige Dienste anzubieten, um sich von ihren Konkurrenten abheben zu können.

Einen neuartigen Ansatz zur dynamischen Erweiterung der Funktionalität von Netzknoten stellen die *Aktiven und Programmierbaren Netze* [CDK⁺99] dar. Diese gestatten es, strukturiert das Ausführen von Programmfunktionen auf dedizierten Netzknoten von der Ferne aus zu veranlassen, wobei das Ziel die Bearbeitung von Datenströmen eines Teilnehmers ist. Die Funktionen gehen typischerweise über das reguläre Routing von Datagrammen hinaus und können Elemente verschiedener Protokollfunktionen umfassen.

1.1 Problemstellung und Lösungsansatz der Arbeit

In der vorliegenden Arbeit wird ein *Wireless LAN*-Netz mit mehreren *Access Points* angenommen, durch das sich ein mobiles Terminal frei bewegt. Im besten Falle kann das Terminal mit mehreren Basisstationen gleichzeitig kommunizieren und so stets eine funktionierende Verbindung mit dem Internet haben, selbst wenn der Funkkontakt zu einer Basisstation plötzlich abbrechen sollte. Typischerweise sind heutige *Wireless LAN*-Adapter aber nur in der Lage, sich mit einer einzigen Basisstation gleichzeitig zu assoziieren. Daher verursacht ein Wechsel der Basisstation immer auch eine Unterbrechung der Konnektivität. Dies ist immer mit Paketverlusten verbunden, gegen die *Wireless LAN* nicht in der Lage ist, Vorkehrungen zu treffen.

Ferner wird davon ausgegangen, daß der Teilnehmer für seine Kommunikation mit entfernten Teilnehmern auch auf *netzseitige Dienste* zurückgreift. Diese werden auf dedizierten Knoten im

Zugangsnetz ausgeführt und unterstützen die Anwendungen des Teilnehmers in spezifischer Art und Weise. Da diesen Anwendungen verschiedenste Protokolle zugrunde liegen und der Dienst womöglich für verschiedene Terminals in unterschiedlicher Weise erbracht werden soll, bietet es sich an, sich der Flexibilität der programmierbaren Dienste zu bedienen. Diese ermöglichen es, flexibel eine Vielzahl von Diensten ohne vorherige explizite Installation zur Verfügung zu stellen. Dies ist insbesondere beim *Roaming* der Terminals von Vorteil, da diese sich dabei mit fremden Zugangsnetzen verbinden, in denen der erforderliche Dienst nicht notwendigerweise vorab vorhanden ist. Daher stellt es eine pragmatische Lösung dar, standardisierte Softwarekomponenten bei Bedarf aus einem zentralen Speicher zu laden und dynamisch zu den gewünschten Diensten zu kombinieren.

Die Mobilität des Teilnehmers bedingt jedoch auch, daß die Dienste nach einem *Handover* des Teilnehmers am neuen Aufenthaltsort zügig bereitgestellt werden. Dabei sollte der Transfer des Dienstes die durch den Handover verursachte Unterbrechung der Datenübermittlung nicht wesentlich verlängern. Gleichzeitig ist jedoch darauf zu achten, daß jeder Diensttransfer Netzressourcen beansprucht, wodurch möglicherweise die Dienste anderer Teilnehmer beeinträchtigt werden.

In dieser Arbeit wird eine Architektur entworfen, welche die Bereitstellung eines mobilen programmierbaren Dienstes sowohl durch *Diensttransfer* als auch durch *Datentunnelung* ermöglicht. Diese macht sich die Möglichkeiten der programmierbaren Netze zu nutze, indem auch die Steuerungsfunktionen als programmierbare Dienste realisierbar sind. Die Architektur unterscheidet dabei drei Ebenen, nämlich das Management zur Koordinierung aller Dienste eines Teilnehmers, die Dienststeuerung für die Elemente eines Dienstes und schließlich die darunterliegende ausführende Ebene. Dabei wird der mobilitätsspezifische Teil vom Management abgespalten, um eine schnellere Reaktion auf Handover zu ermöglichen. Der modulare Aufbau gestattet eine einfache Anpassung an die spezifischen Gegebenheiten. Dies wird exemplarisch anhand der Implementierung des *Programmierbaren Proxy* als programmierbarer Dienst gezeigt.

Die darunterliegende programmierbare Plattform wird dabei weitestgehend abstrahiert betrachtet. Es wird lediglich gefordert, daß diese die Ausführung transparenter Dienste – also ohne Zutun der Anwendungsprogramme des Teilnehmers – gestattet. Dies bedeutet, daß die Dienstsignalisierung vom Anwendungsdatenstrom abgekoppelt wird.

Da die entsprechenden Managementfunktionen mit den passenden Schnittstellen *dynamisch* geladen werden können, ist die Architektur unabhängig von den verwandten Verfahren zur Mobilitätsunterstützung. Wird beispielsweise das *Mobile IP* zur Makro-Mobilitätsunterstützung verwendet, kann die Mobilitätsmanagementeinheit auf die dort vorhandene Erkennung des Teilnehmers in einem neuen Netz zurückgreifen. Sie muß jedoch selbst eine Signalisierung in das zuvor genutzte Zugangsnetz zu den dort genutzten Diensten durchführen, da dies regulär nicht durch Mobile IP erfolgt. Die Dienststeuerung jedes Dienstes wird dann entweder einen Transfer desselben durchführen oder eine Tunnelung des betreffenden Anwendungsdatenstromes einleiten.

Für die Entscheidung, ob ein Diensttransfer oder eine Datentunnelung den geringeren Aufwand erwarten läßt, wird ein einfacher *Algorithmus* entworfen, der keine Angaben über die Mobilität des einzelnen Teilnehmers verwendet. Dieser trifft seine Entscheidung auf Grundlage mehrerer

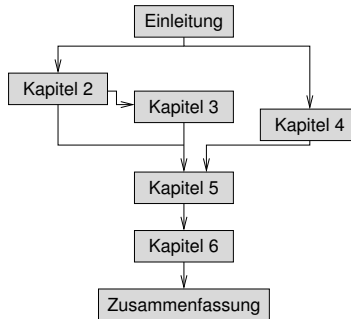


Abbildung 1.1: Logischer Fluß der Gliederung dieser Arbeit.

Kriterien. Erstens ist dies der Aufwand für den Transfer der einzelnen Dienstinstanz, zweitens die Datenrate der diesen Dienst nutzenden Anwendung. Schließlich wird anhand der zu erwartenden Dauer bis zum nächsten Handover die Kostenmetrik für den Dienstransfer sowie die Datentunnelung berechnet.

Die Zwischenhandoverzeit läßt sich für den Einzelfall nie genau vorhersagen. Es ist jedoch möglich, auf der Grundlage einer analytischen Modellierung der Eigenschaften des Wireless LAN mittels statistischer Berechnungen eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion aufzustellen. Die für herkömmliche Zellulernetze verwendeten Methoden beinhalten jedoch nicht die Eigenschaften der Kanalwahl beim Wireless LAN. In dem hier vorgestellten genaueren Berechnungsverfahren wird der bei Wireless LAN entstehende *Hysteresis-Effekt* beim Handover mitberücksichtigt, der nicht nur durch die Eigenschaften der Schwellwerte, sondern auch durch geometrische Gegebenheiten bedingt ist.

1.2 Struktur und Gliederung

Die beiden Fundamente dieser Arbeit sind die Mobilität und die Technologie der Programmierbaren Netze. Beide erfahren eine ausführliche Würdigung in einem eigenen Kapitel. Erst in Kapitel 5 findet mit der dort vorgestellten Architektur eine Verknüpfung dieser beiden Aspekte statt. Der daraus resultierende logische Fluß ist in Abb. 1.1 schematisch dargestellt.

In Kapitel 2 werden die Ansätze zur *Mobilitätsunterstützung* für den Bereich der Mobilität im Internet vorgestellt sowie Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu den zellularen Mobilfunknetzen aufgezeigt. Dabei wird jeweils dargelegt, wie Mobilität in den verschiedenen Schichten unterstützt werden kann und wodurch sich die einzelnen Lösungen hinsichtlich Funktionsweise und Wirkung unterscheiden.

Kapitel 3 widmet sich den Eigenschaften von Wireless LAN und dessen Kanalselektionsalgorithmus aus Systemsicht. Daraus wird dann die für die Performanz des Mobilitätsmanagements

wichtige Verteilung der Zwischenhandoverzeit für eine idealisierte Topologie abgeleitet. Im Gegensatz zur bislang üblichen Modellierung der bloßen Zellaufenthaltsdauer berücksichtigt die *Zwischenhandoverzeit* auch die auftretende Hysterese.

In Kapitel 4 wird zunächst ein Überblick über Telekommunikationsdienste gegeben und der Begriff des transparenten programmierbaren Netzdienstes konkretisiert. Anschließend wird auf Dienste in *Aktiven und Programmierbaren Netzen* eingegangen. Nach einem vergleichenden Überblick über die verschiedenen Knotenarchitekturen werden einige Dienste exemplarisch dargestellt. Schließlich wird ein abstrahiertes Modell einer programmierbaren Plattform vorgestellt.

In Kapitel 5 werden die Eigenschaften und Anforderungen *transparenter programmierbarer Netzdienste* im mobilen Umfeld analysiert. Daraus wird dann eine flexible, programmierbare Architektur entwickelt, bei der programmierbare Plattform und Mobile IP Foreign Agent gekoppelt werden. Anschließend wird aufgezeigt, wie diese Architektur die Bereitstellung mobiler Dienste unterstützt und ein *Algorithmus zur Handoveroptimierung* mobiler Dienste vorgestellt und evaluiert.

In Kapitel 6 wird der *Programmierbare Proxy* als Beispiel eines programmierbaren Dienstes vorgestellt und anhand einer prototypischen Implementierung evaluiert. Dabei werden die für diesen Anwendungsfall wesentlichen Aspekte der entworfenen Architektur aufgegriffen.

Die Nomenklatur dieser Arbeit orientiert sich weitgehend an der *Internet Engineering Task Force* (IETF), die deutschen Begriffe entsprechen den Empfehlungen des VDE [EFH⁺96a, EFH⁺96b]. Die Begriffe “mobiler Teilnehmer”, “mobiles Terminal” und “mobiles Endgerät” werden in der vorliegenden Arbeit wie Synonyme verwandt, ebenfalls “Basisstation”, “Access Point” und “Netzzugangspunkt”.

