Lokalisierung von Mobilstationen anhand ihrer Funkmeßdaten

Olrik Kennemann

AACHENER BEITRÄGE ZUR MOBIL- UND TELEKOMMUNIKATION

Herausgeber:

Universitätsprofessor Dr.-Ing. Bernhard Walke

Kennemann, Olrik:
Lokalisierung von Mobilstationen anhand ihrer Funkmeßdaten
1. Auflage Aachen:
Verlag der Augustinus Buchhandlung, 1997
(Aachener Beiträge zur Mobil- und Telekommunikation, Band 11)

ISBN 3-86073-620-5

© 1997 Olrik Kennemann

Verlag der Augustinus Buchhandlung
Pontstraße 66/68
52062 Aachen

Druck: Fotodruck Mainz, Aachen
Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

"D 82 (Diss. RWTH Aachen)"

KURZFASSUNG

Die aufwendigen Funktionen zur Mobilitätsverwaltung sind ein herausragendes Merkmal von Mobilfunksystemen der 2. Generation. Sie umfassen unter anderem die Weiterschaltung der Funkverbindung beim Verlassen einer Mobilfunkzelle (Handover), die Leistungssteuerung und die Auswahl der Zellgröße bei hierarchischen Zellstrukturen. Eine Optimierung der genannten Funktionen ist sowohl im Hinblick auf die subjektiv empfundene Dienstqualität als auch für eine effiziente Ausnutzung der Systemressourcen von Bedeutung und kann bei Kenntnis des Aufenthaltsortes der Mobilstation erreicht werden.

Die vorliegende Arbeit folgte der Zielsetzung, ausschließlich unter Verwendung der im GSM-Standard vorgesehenen Mobilfunkmeßwerte eine Lokalisierung in der erforderlichen Genauigkeit vorzunehmen.

Das hier vorgestellte Verfahren basiert auf der Tatsache, daß Bebauung, Bewuchs und Geländerelief zu Schwankungen der Feldstärke führen, die von einer in Bewegung befindlichen Mobilstation als für die Umgebung charakteristische Feldstärkemuster wahrgenommen werden. Die Schwankungen der Feldstärke spiegeln sich in den Mobilfunkmeßwerten wider, so daß durch Vergleich ausreichend langer Meßwertsequenzen mit Werten in einer Datenbank, die dort zusammen mit einer Ortsinformation hinterlegt sind, auf den Aufenthaltsort zurückgeschlossen werden kann.

Nach eingehender Analyse der Mobilfunkmeßdaten wird die Eignung von Hidden-Markov-Modellen als Basis für ein Erkennungsverfahren herausgearbeitet und ein geeignetes Verfahren schrittweise entwickelt. Zunächst werden isolierte Streckenabschnitte durch Modelle beschrieben, so daß eine Mobilstation beim Durchqueren eines solchen erfaßt werden kann. Dies ist für einige Problemstellungen bereits ausreichend. In einem ersten Verbesserungsschritt wird dieses Verfahren dann in Richtung einer kontinuierlichen Erfassung der Mobilstation erweitert. Die Besonderheiten, die sich durch stark variierende Geschwindigkeiten in der Nähe von Ampeln und Bahnübergängen ergeben, werden durch ein modifiziertes Verfahren berücksichtigt, das explizit den Vorgang des Beschleunigens und Verzögerns modelliert.

Ferner folgt eine Betrachtung des Falles einer expliziten Modellierung der Aufenthaltswahrscheinlichkeit in einem Modellzustand, die unter bestimmten Umständen erforderlich ist.
Schließlich werden die Grundlagen für eine automatische Aktualisierung und Erweiterung der Musterdatenbank bereitgestellt.
Einige theoretische Betrachtungen im Anhang schließen die Arbeit ab.

ABSTRACT

The advanced mobility management functions belong to the most remarkable features of mobile radio systems of the 2nd generation. Among those are the „handover" (by this term the process of switching the radio connection to the base station of an adjacent cell, when the mobile leaves the current cell, is denoted), as well as power control and selection of cell size in environments covered by hierarchical cell structures. Optimization of those functions can be achieved, if precise information is available about the location of the mobile.

The approach presented aims at supplying the required location data by exclusively evaluating the measurement reports standardised in GSM.

The fact is used that variations of the field strength caused by buildings, vegetation and terrain are perceived as patterns characteristic to the environment by a moving mobile. The characteristic variations of the field strength are reflected by the measurement data. Therefore by matching sequences of measurement data of sufficient length with reference data in a data base containing a discrete image of the field strength in the cell, the location of the mobile can be determined.

After a detailed analysis of the properties of the measurement data, a pattern recognition method based on Hidden-Markov-Modells is identified as suitable for the intended purpose. Such a method is then developed step by step.

In the first step isolated sections of roads and streets are described by models, thus enabling location of a mobile when passing through one of those sections. For some purposes, e.g. the handover, this is already sufficient.

The method is then extended to continuous location. For environments with strongly varying velocity like traffic lights and railroad crossings, a modified approach is presented in which accelerating and slowing down is taken into account by separate models.

Furthermore the case of explicitly modelling the state sejourn times is considered, which is required under certain circumstances.

Finally the fundamentals for automatic updating and enlarging the data base are given.

Some theroretical considerations are presented in the annex.

INHALTSVERZEICHNIS

Kurzfassung i

Abstract iii

Inhaltsverzeichnis v

1 Einleitung 1
1.1 Entwicklung der Mobilkommunikation 1
1.2 Einordnung und Merkmale des GSM-Systems 4

2 Mobilfunknetze 5
2.1 Zellulare Netze 5
2.2 GSM 8
2.2.1 Aufbau 8
2.2.2 GSM-Protokollarchitektur 15
2.3 Handover und Leistungssteuerung 19
2.3.1 Meßwerte 20
2.3.2 Handover nach GSM-Empfehlung 23

3 Funkwellenausbreitung 25
3.1 Langzeitschwund 28
3.2 Kurzzeitschwund 29
3.3 Einflüsse des Fadings auf die Systemfunktionen 32

4 Fahrzeuglokalisierung 35
4.1 Verkehrsleitsysteme 35
4.2 Mobilfunksysteme 35
4.3 Bekannte Methoden 36
4.4 Notwendigkeit eines neuen Lokalisierungsverfahrens 39

5 Lokalisierung auf der Basis von Feldstärkemustern 43
5.1 Ansatz für ein alternatives Verfahren 43
5.1.1 Praktische Umsetzung 45
5.2 Eigenschaften der Mobilfunkmeßdaten 47
5.2.1 Einflüsse der Meßwerterfassung 49

5.2.2 Einflüsse des Mobilitätsverhaltens 50
5.3 Auswahl eines Mustererkennungsverfahrens 51
5.3.1 Grundlagen der Mustererkennung 51
5.3.2 Verwandtschaft zur Spracherkennung 53

6 Hidden-Markov-Modelle (HMM) 55
6.1 Grundlagen 55
6.1.1 Markov-Prozeß 55
6.1.2 Hidden-Markov-Prozeß 57
6.2 Mögliche Strukturen 58
6.3 Hidden-Markov-Modelle zur Mustererkennung 60

7 Fahrzeuglokalisierung mit Hidden-Markov-Modellen 63
7.1 Verfahren 63
7.2 Auswertung 65
7.3 Bestimmung der Parameter 67
7.3.1 Länge der Beobachtungssequenz 68
7.3.2 Länge des Hidden-Markov-Modells 68
7.3.3 Räumliche Diskretisierung 69
7.3.4 Normierung der Leistungswerte 69
7.3.5 Übergangswahrscheinlichkeiten 71
7.3.6 Ausprägungswahrscheinlichkeiten 73
7.3.7 Anfangszustandswahrscheinlichkeiten 73
7.4 Lokalisierung als Schwellwertentscheidung 76
7.4.1 Erwartungswerte 77
7.4.2 Streuung der logarithmischen Verteilung 79
7.5 Fehlerbetrachtung 81
7.5.1 Fehler 1. Art 82
7.5.2 Fehler 2. Art 82
7.6 Ergebnisse 85
7.6.1 Simulation der Funkwellenausbreitung 85
7.6.2 Simulation der Lokalisierung 88

8 Kontinuierliche Erkennung 91
8.1 Verfahren 91
8.2 Schrittweise Auswertung der Modelle 91
8.3 Berechnung der Wahrscheinlichkeiten 92
8.4 Kontinuierliche Verfolgung eines Mobilfunkteilnehmers 94
8.5 Anwendung und Ergebnisse 95

9 Nichtkontinuierliche Bewegung der Mobilstation 97
9.1 Wiedergabe des Mobilitätsverhaltens im Modell 97
9.2 Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten 100
9.3 Simulationsergebnisse 103

10 Ein zustandsreduziertes Modell 105
10.1 Definition eines charakteristischen Musters 105
10.2 Aufenthalts- und Übergangswahrscheinlichkeiten 107
10.2.1 Explizite Modellierung der Aufenthaltsdauer 107
10.2.2 Wahrscheinlichkeitsfunktion der Aufenthaltsdauer . . 108
10.2.3 Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten . . . 111
10.2.4 Berechnung der Beobachtungswahrscheinlichkeit . . . 115
10.3 Vergleich konventionelles Modell – VHMM 117
10.3.1 Erkennungs- und Fehlerwahrscheinlichkeiten 117
10.3.2 Rechenaufwand 120
10.3.3 Zusammenfassung 121

11 Ein lernendes Modell 123
11.1 Bekannte Trainingsalgorithmen 123
11.2 Verfahren 125
11.2.1 Lernen eines Wertes 125
11.2.2 Zuordnung von Meßwerten zu Zuständen 127

12 Abschließende Betrachtungen 131
12.1 Alternativen 131
12.2 Abschließende Bewertung 132

Quellenverzeichnis 135

A Mathematische Betrachtung der Mobilfunkmeßdaten 141
A.1 Verbundverteilungsdichte für zwei Orte 141
A.2 Korrelationseingenschaften des Leistungssignals 147
A.3 Signaltheoretische Betrachtung 149
A.3.1 Statistische Betrachtungen zum Pegelverlauf 149
A.3.2 Eigenschaften der Pegelmeßwerte 151

B Abkürzungen 157

Nachwort 161

KAPITEL 1

Einleitung

1.1 Entwicklung der Mobilkommunikation

Heinrich Hertz hat durch seinen legendären Funkenversuch im Jahre 1880 den Grundstein für die drahtlose Nachrichtenübertragung mit Hilfe elektromagnetischer Wellen gelegt. Dieser Versuch war der Ausgangspunkt für Untersuchungen, deren Ergebnisse als reproduzierbarer Nachweis für die Gültigkeit der Maxwellschen Theorien herangezogen werden konnten. Doch erst durch Marconi, der 1897 sein erstes System der drahtlosen Telegrafie vorstellte und 1901 als erster eine Funkverbindung über den Atlantik aufbaute, wurden diese Erkenntnisse systematisch nutzbar. Bereits 1903 wurden die ersten Schiffe mit Funkgeräten ausgestattet, und zu Recht könnte man dies als den Beginn der Mobilkommunikation ansehen.
Im allgemeinen wird der Beginn der Mobilkommunikation allerdings eher auf den Zeitpunkt festgelegt, an dem erstmals ein *öffentliches* und *flächendeckendes* Mobilfunknetz in Betrieb ging. Dies geschah in Deutschland 1958 in Form des A-Netzes, dem 1972 das B-Netz und 1986 das C-Netz folgten.
Im Jahr 1991 trat dann die Deutsche Telekom unter der Bezeichnung D1 mit einem digitalen Mobilfunknetz nach dem europaweit einheitlichen GSM-Standard auf den Markt, sowie zeitgleich unter der Bezeichnung D2 die Firma Mannesmann Mobilfunk, die als erstes privates Unternehmen in Deutschland eine Lizenz zum Betrieb eines öffentlichen Telefonnetzes erhalten hatte.
Als derzeit letztes Mobilfunknetz ging das E1-Netz in Betrieb, das in der Variante DCS 1800 ebenfalls auf dem GSM-Standard beruht.
Die Entwicklung der Mobilkommunikation wurde von einer breiten Öffentlichkeit mit Interesse verfolgt und insbesondere seit der Einführung des digitalen D-Netzes haben diese Systeme sowohl im geschäftlichen wie im privaten Bereich große Verbreitung gefunden.
Während der Anwendungsbereich bei A-Netz und B-Netz noch ausschließlich auf Sprachdienste begrenzt war, traten in den folgenden Jahren immer neue Dienste hinzu. So wurde beim nachfolgenden C-Netz bereits der Versuch unternommen, Sprach- und Datendienste in *ein* System zu integrieren.

Parallel dazu traten Systeme auf den Markt, die jeweils auf einen speziellen Dienst ausgerichtet waren; darunter Mobile Datenfunksysteme (Modacom) und Bündelfunksysteme, die kommerziellen Anwendern in Form einer geschlossenen Benutzergruppe den Sprach- und Datenaustausch zum Zweck der Betriebsführung und Koordination ermöglichen sollten. Später etablierte sich eine Vielzahl von Funkrufsystemen (Paging-Diensten), und das schnurlose Telefon hielt seinen Einzug in viele private Haushalte. Bereits jetzt ist abzusehen, daß satellitengestützte Mobilfunksysteme eine immer größere Rolle spielen, wenn sie nicht sogar langfristig einen großen Teil der landgestützten Systeme ablösen werden. In Zusammenhang mit der weiter zunehmenden Ausstattung von Arbeitsplätzen mit Rechnern gewinnt die drahtlose Vernetzung immer mehr an Bedeutung, da sie den gemeinsamen Zugriff mehrerer Mitarbeiter auf gleiche Ressourcen bei gleichzeitiger Flexibilisierung von Arbeitsplätzen erlaubt.
Dieser kurze Überblick macht bereits deutlich, welchen Stellenwert die Mobilkommunikation heute einnimmt und wohin sie sich bewegt. Hauptziel ist eine größtmögliche Flexibilisierung bei gleichzeitiger Integration einer Vielzahl von Diensten. Ein solches umfassendes Netz ist angedacht und befindet sich bereits in der Entwicklung. Im europäischen Sprachgebrauch bezeichnet man es als Universal Mobile Telecommunication System (UMTS), bei der ITU wird es unter dem Begriff International Mobile Telecomunications 2000 (IMT) geführt, wobei die Zahl auf das vorgesehene Frequenzband hinweist. Es wird sich dabei noch um ein terrestrisches System handeln, dessen Einführung als erstes System der 3. Generation kurz nach der Jahrtausendwende geplant ist.
Aufgrund der Vielzahl von Systemen und einem unvermindert steigenden Verkehrsaufkommen ist die begrenzte Anzahl vorhandener Funkkanäle ein zentrales Problem der Mobilkommunikation. Zwar werden immer mehr Frequenzbereiche für neue Dienste reserviert, doch sind die Möglichkeiten aufgrund der Ausbreitungsbedingungen gering und viele Frequenzen belegt. Will man mit den zur Verfügung stehenden Frequenzen sparsam umgehen und in dem für einen Dienst zur Verfügung stehenden Frequenzband eine möglichst hohe Verfügbarkeit gewährleisten, stellt sich für jedes System die Frage nach der geeigneten Multiplextechnik.
Bei allen analogen Mobilfunksystemen - wenngleich diese nicht kompatibel waren - bedient man sich der gleichen Multiplextechnik. Sie basieren ausschließlich auf dem Frequenzmultiplexverfahren (Engl. Frequency Division Multiple Access FDMA), bei dem jeder Station ein Frequenzband als physikalischer Kanal zugewiesen wird, über den sie während der gesamten

Verbindung verfügen kann. Aufgrund der endlichen Flankensteilheit der im Sender vorhandenen Filter sind die verwendeten Bänder durch ein sogenanntes Schutzband getrennt.
Digitale Mobilfunksysteme bedienen sich zusätzlich des Zeitmultiplexverfahrens (Engl. time division multiple access TDMA), beziehungsweise des Codemultiplexverfahrens (Engl. Code Division Multiple Access CDMA). Bei ersterem werden ebenfalls mehrere Frequenzbänder genutzt, die Übertragung findet jedoch nicht kontinuierlich statt, sondern in sogenannten Zeitschlitzen, die einem Kanal entweder fest oder nach Bedarf zugeordnet werden. Dieses Übertragungsverfahren eignet sich z.B., wenn unter den gegebenen Bedingungen der Kanal nicht ständig belegt werden muß. Dies trifft auf büschelartigen Verkehr zu oder auf ein diskontinuierliches Signal (beispielsweise das Sprachsignal), das durch Sprechpausen gekennzeichnet ist. Diese Technik eignet sich darüberhinaus, wenn die Übertragungsbandbreite des Frequenzkanals eine wesentlich höhere Datenrate zuläßt und daher auf mehrere Kanäle aufgeteilt werden soll.
Im Codemultiplexverfahren werden mehrere schmalbandige Signale in einem breitbandigen Frequenzkanal übertragen. Mit Hilfe einer geeigneten Kodiervorschrift werden diese in ein breitbandiges Signal transformiert, wobei sich die Codes der im gleichen Frequenzband übertragenen Signale unterscheiden. Diese Bandbreitenerhöhung der Ursprungssignale wird als Signalspreizung bezeichnet.
Zellulare Systeme benutzen darüber hinaus für die Verbindung von der bzw. zur Mobilstation unterschiedliche Frequenzen. Man spricht in diesem Zusammenhang von FDD (frequency division duplex), während bei den schnurlosen Telefonsystemen bislang Zeitschlitze innerhalb des gleichen Übertragungskanals verwendet wurden (TDD time division duplex).
Gegenüber den Systemen der ersten Generation bieten die Mobilfunksysteme der zweiten Generation eine Reihe von Leistungsmerkmalen, die auch zukünftige Mobilfunksysteme charakterisieren werden. Dazu gehören u.a. die Mobilitätsverwaltung (mobility management), d.h. die Verwaltung der veränderlichen Standorte der Mobilstationen mit den dazu notwendigen Netzfunktionen, Sicherheitsaspekte in Form von geeigneten Verschlüsselungsmechanismen und die Kanalvergabe. All dies wird eine Rolle spielen, wenn bei den umfassenden Systemen der dritten Generation (personal communication networks PCN) gleiche Geräte für Nahbereichsanwendung (cordless) und weitflächige Anwendung (cellular) verwendet werden, die zudem als Terminal für unterschiedliche Dienste mit situationsspezifischer Übertragungsrate fungieren.

1.2 Einordnung und Merkmale des GSM-Systems

Das GSM-System - wohl das komplexeste System der zweiten Generation - realisiert die genannten Leistungsmerkmale durch umfangreiche Signalisierungsfunktionen. Eine automatische Anmeldung der Mobilstation im Netz - unter Berücksichtigung der Signalstärke der empfangenen Basisstationen und Verwaltung des Aufenthaltsortes im Festnetz - ermöglicht, die empfangsbereite Mobilstation im Versorgungsbereich jederzeit zu erreichen (Roaming).
Die Abkürzung GSM leitete sich ursprünglich von der Bezeichnung „Group Special Mobile“ ab, einer Arbeitsgruppe des Zusammenschlusses der Europäischen Fernmeldebehörden (CCITT), wird aber heute nach der Standardisierung in der Bedeutung „Globales System für Mobilkommunikation“ verwendet. Erstmals ging damit ein Mobilfunksystem in Betrieb, für das man sich auf eine einheitliche Funkschnittstelle und die komplette Festlegung aller mobilitätsbezogenen Netzdienste geeinigt hat und für das europaweit die gleichen Frequenzbereiche freigegeben wurden. Damit wurde es einerseits möglich, europaweit und mittlerweile sogar in vielen anderen Ländern das gleiche Gerät zu verwenden und erreichbar zu sein. Gleichzeitig erhöht sich aufgrund eines größeren homogenen Marktes zum Nutzen der Kunden die Vielfalt konkurrierender Produkte.
Außer dem für Systeme der zweiten Generation zentralen Merkmal der aufwendigen Mobility-Management-Funktionen bemühte man sich im Rahmen der GSM-Standardisierung um Kompatibilität mit leitungsgebundenen Netzen (ISDN, Telefonnetz, Datennetze) mittels standardisierter Schnittstellen, hoher Effizienz bei der Ausnutzung des Frequenzspektrums sowie einer Technik, die das System auch für die breite Masse preislich attraktiv macht. Zu diesem Zweck wurden Dienste und Dienstequalität, Zugriffs-, Modulations- und Codierungsverfahren, Signalisierungsprotokolle, Digitalisierungsverfahren für Sprache bei niedrigen Bitraten und die Implementierung von Datendiensten definiert und ferner Sicherheitsfragen wie Zugriffsicherheit, Verschlüsselung und Datenschutz untersucht und geregelt.

KAPITEL 2

Mobilfunknetze

2.1 Zellulare Netze

Innerhalb der technisch nutzbaren Frequenzbereiche drängt sich eine Vielzahl von Funkdiensten, wobei jedoch einige Frequenzen aufgrund ihrer Ausbreitungseigenschaften für bestimmte Anwendungsfälle nicht geeignet sind. Es ist daher erforderlich, die für einen Dienst zur Verfügung stehenden Funkfrequenzen in räumlichen Abständen wiederzuverwenden. Prinzipiell wird dazu das Frequenzband in eine bestimmte Anzahl N nichtüberlappender Kanalgruppen aufgeteilt. Jeweils eine dieser Kanalgruppen wird zur Versorgung eines Gebietes verwendet, einer sogenannten Funkzelle. Die Zuordnung der Frequenzgruppen zu den Funkzelle erfolgt stets so, daß niemals gleiche Frequenzen in benachbarten Zellen verwendet werden und der Abstand zwischen Gleichkanalzellen möglichst groß ist. Jeweils N benachbarte Zellen lassen sich zu einem sogenannten Cluster zusammenfassen, das keine zwei Zellen enthält, die sich des gleichen Frequenzbereiches bedienen. Aus geometrischen Gründen läßt sich eine Abdeckung der zu versorgenden Fläche mit einem regelmäßig wiederkehrenden Frequenzmuster nur bei bestimmten Clustergrößen realisieren. Dies gilt zum Beispiel für die Werte $N = 3$, 4, 7, 12 und 24. (Fall 1-3 siehe Abbildung 2.1). Zur Darstellung der Zellen verwendet man in der Regel ein Hexagon, da dies eine geometrische Form ist, die einerseits dem Kreis sehr nahe kommt, andererseits einen Gitteraufbau ohne Überlappungen und Lücken ermöglicht. Der Kreis kann dabei als Grenzlinie der Zelle in dem Sinne aufgefaßt werden, daß die Feldstärke einer rundstrahlenden Antenne im Mittelpunkt des Kreises dort soweit abgefallen ist, daß eine Funkverbindung nicht mehr aufrechterhalten werden kann.
Die Wahl der Clustergröße N beim Entwurf des Netzes hängt ab von den gegebenen Ausbreitungsbedingungen, der Verkehrsverteilung und den Kosten. Mit wachsender Zahl N vergrößert sich der sogenannte Wiederverwendungsabstand zwischen Gleichkanalzellen. Für die abgebildeten Clustergrößen ergibt sich das Verhältnis des Abstandes der nächsten Gleichkanalzelle zum

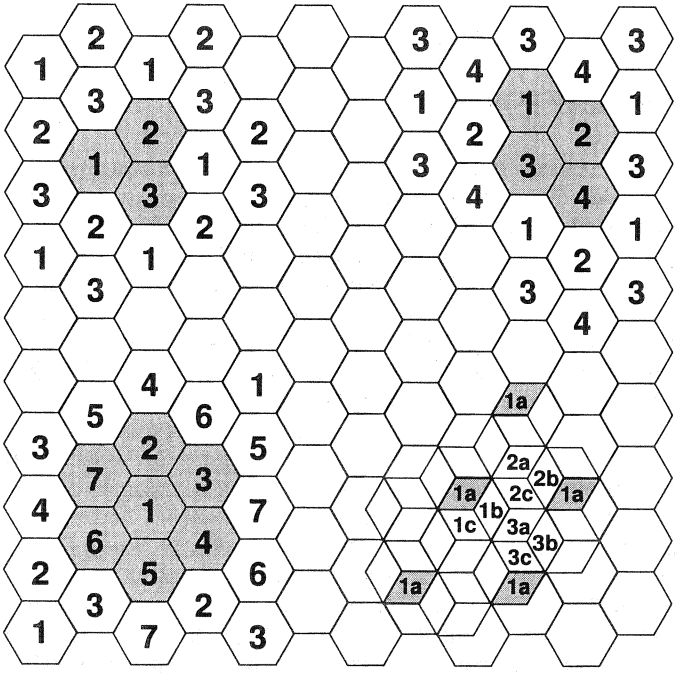


Bild 2.1: Zell-Cluster. Oben links: 3er-Cluster. Oben rechts: 4er-Cluster. Unten links: 7er-Cluster. Unten rechts: 3er-Cluster mit 120°-Sektorisierung

Zellradius zu

N	3	4	7
D/R	3	3,464	4,58

Gleichkanalstörungen - durch Benutzung der gleichen Frequenz in anderen Zellen entstandene Interferenzen - werden folglich durch Vergrößerung des Clusters verringert. Die Wahl der unteren Grenze von N ist daher eine Frage der Ausbreitungsbedingungen und der Fehleranfälligkeit des Systems, wobei letzteres wiederum von dem verwendeten Modulationsverfahren und der vorgesehenen Fehlerkorrektur abhängt.
Mit zunehmender Clustergröße N verringert sich die Anzahl der zur Verfügung stehenden Kanäle pro Zelle. Daher sollte N nicht größer als unbedingt erforderlich gewählt werden, um die (in Erlang/km^2) gemessene Verkehrslast, die von einer Zelle aufgenommen werden kann, nicht unnötig zu verringern.
Um nun die Versorgung einer vorgegebenen Teilnehmerdichte in einem Mobilfunknetz zu gewährleisten, ist bei bekanntem Verkehr, der von einer Zelle getragen werden kann, die Zellgröße als zweiter Parameter geeignet zu bestimmen. Aus Gründen der Kostenminimierung beim Aufbau der Netzinfrastruktur ist es einerseits zweckmäßig, die Zellradien so groß wie möglich zu halten. Andererseits verringert sich jedoch zugleich die Verkehrslast, die pro Flächeneinheit aufgenommen werden kann.
In den existierenden Netzen wurde daher eine Reihe von Maßnahmen ergriffen, um die Ausnutzung des Frequenzspektrums weiter zu erhöhen. So kann z.B. durch die Verwendung von Antennen mit einem Abstrahlwinkel von 120° oder weniger eine Sektorisierung der Zellen erreicht werden. Entsprechend lassen sich die Gleichkanalstörungen reduzieren, was einer Verringerung des Wiederverwendungsabstandes gleichkommt. Überdies werden derzeit Verfahren zur dynamischen Frequenzvergabe untersucht, mit denen es möglich sein soll, auf unterschiedliche Verkehrslastsituationen flexibel zu reagieren. Schließlich ist noch zu erwähnen, daß die Zellgröße aufgrund wechselnder Ausbreitungs- und Verkehrsbedingungen innerhalb der Mobilfunkumgebung im allgemeinen nicht konstant gewählt wird. Zuweilen werden auch Zellen unterschiedlicher Größe am gleichen Ort überlagert (hierarchische Zellstruktur), um in Mikrozellen eine hohe Kapazität für langsam bewegte Teilnehmer und in überlagerten Makrozellen kleiner Kapazität schnelle Teilnehmer mit hoher Dienstgüte versorgen zu können.

2.2 GSM

Im folgenden werden der Aufbau des GSM-Systems und die Komponenten der Protokollarchitektur beschrieben, soweit dies für das weitere Verständnis notwendig ist. Dabei wird insbesondere auf die „Systemaspekte der Teilnehmermobilität" (Mobility Management) und die „Verwaltung der Funkkanäle" (Radio Ressource Management) eingegangen, da der später vorgestellte Algorithmus in diese Bereiche eingreift.

2.2.1 Aufbau

2.2.1.1 Systemkomponenten

Der prinzipielle Aufbau des GSM-Systems ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Es läßt sich in die folgenden drei Teilsysteme unterteilen

- das Funk-Teilsystem (Base Station Subsystem BSS)
- das Vermittlungsteilsystem (Network und Switching Subsystem NSS)
- und das Betreiber-Teilsystem (Operation Subsystem)

Über das Funk-Teilsystem wird die Verbindung zwischen dem mobilen Teilnehmer und dem Festnetzteil aufgebaut. Das Funkteilsystem umfaßt die Mobilstation und das bereits zum Festnetz gehörende Basisstationssystem (Base Station Subsystem BSS).
Mobilstationen sind im Fahrzeug montierte Geräte, tragbare Geräte oder Handgeräte, über die die Funkverbindung zwischen Teilnehmer und Basisstation aufgebaut wird. Die teilnehmerspezifischen Daten des Benutzers, die zu seiner Identifizierung im Netz benötigt werden, sind auf einer Karte (Subscriber Identity Modul SIM) gespeichert, die in das Gerät eingesteckt wird. Auf diese Weise kann der Benutzer sein Gerät und den Netzbetreiber unabhängig voneinander wählen und wechseln.
Der festnetzseitige Teil der Funkschnittstelle teilt sich auf in die Basisstationen (Base Transceiver Station BTS), die ausschließlich der funktechnischen Übertragung dienen und keine weitere Verarbeitung der gesendeten und empfangenen Daten vornehmen, und die Feststationssteuerung (Base Station Controller BSC), an die zumeist mehrere Basisstationen angeschlossen sind. Sie übernimmt die Verwaltung der Funkfrequenzen. Das heißt, sie steuert Frequenzwechsel und Kanalzuteilung und übernimmt die Verbindungsumschaltung zu anderen Basisstationen, sofern diese ihrer Steuerung unterliegen. Ferner fungiert sie als Multiplexer für den Sprach- und Datenverkehr über die 64 kbit/s-Leitungen zwischen BSC und Vermittlung.

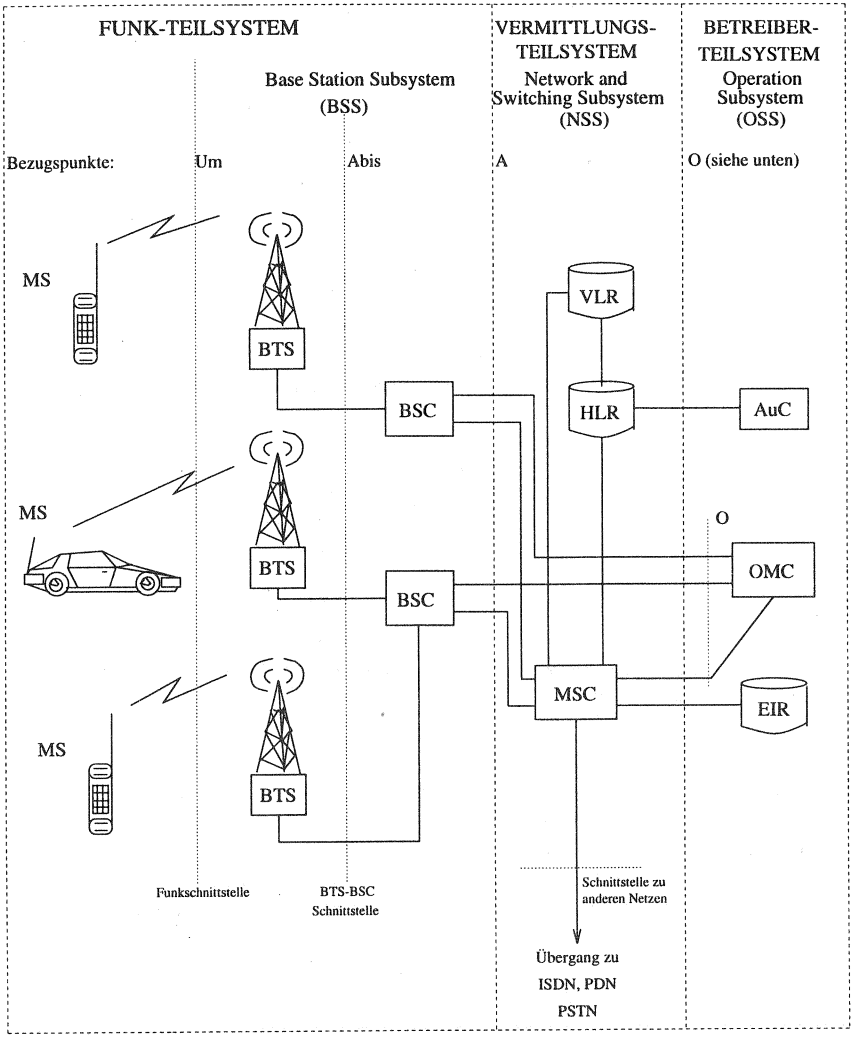


Bild 2.2: Aufbau des GSM-Mobilfunknetzes

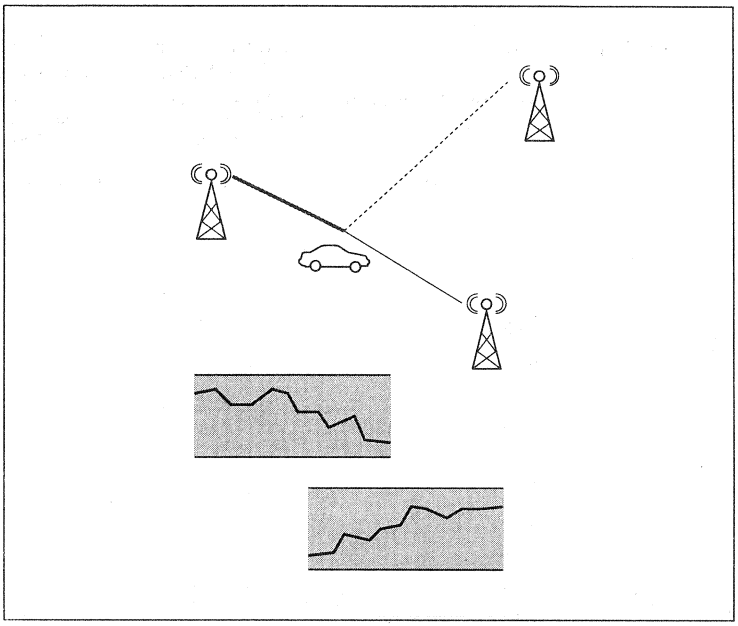


Bild 2.3: Notwendigkeit eines Handovers: abnehmende Verbindungsqualität in der gegenwärtigen Zelle und zunehmende Empfangsqualität einer benachbarten Basisstation.

Zentrales Element des Vermittlungsteilsystems ist die Mobilvermittlungsstelle (Mobile Switching Center MSC). Sie stellt Verbindungen im eigenen Netz, zu anderen Mobilfunknetzen und Festnetzen her. Die dazu notwendige Vernetzung mit anderen Mobilvermittlungsstellen und die Verbindungen zu anderen Netzen werden über die traditionelle Telekommunikationsinfrastruktur realisiert.
Außerdem werden alle festnetzinternen Vermittlungsvorgänge, die zum Aufbau, Abbau und zur Verwaltung der bestehenden Verbindungen benötigt werden, von der MSC übernommen. Dazu gehört auch die Zuteilung neuer Funkkanäle im Störungsfall und die Verbindungsumschaltung (Handover) zu einer anderen Zelle, wenn der Teilnehmer sich aus dem Versorgungsbereich des aktuellen BSC entfernt. Die Signalisierung erfolgt mit dem standardisierten Zeichengabesystem Nr. 7.

Jeder MSC ist zur Verwaltung der in ihrem Zuständigkeitsbereich befindlichen Teilnehmer eine Besucherdatei (Visitor Location Register VLR) zugeordnet, in der die teilnehmerspezifischen Daten neben den zur Verbindungssteuerung notwendigen Daten für die Dauer des Aufenthaltes gespeichert werden.
Um jedoch den Teilnehmer bei einem Ruf auffinden zu können, ist es erforderlich, seinen Standort an einem zentralen Ort zu hinterlegen. Diese Funktion übernimmt die Heimatdatei (Home Location Register HLR), in der auch die permanenten Daten des Teilnehmers wie Rufnummer, Identitätsnummer der Mobilstation, abonnierte Dienste und Authentifizierungsschlüssel gehalten werden. Diese Informationen werden bei der Anmeldung im Netz an die zuständige Besucherdatei übertragen, um die Heimatdatei von zu häufigem Zugriff zu entlasten. Wechselt die Mobilstation den Aufenthaltsbereich (Roaming) - und dabei den Zuständigkeitsbereich der aktuellen VLR - wird die Heimatdatei aktualisiert, ein entsprechender Eintrag im zuständigen VLR geschaffen und der alte Eintrag gelöscht.
Im Betreiber-Teilsystem werden die zur Gewährleistung der Benutzersicherheit notwendigen Aufgaben ebenso wie die zentrale Steuerung und Überwachung des Netzes wahrgenommen. Das Authentifizierungszentrum (Authentification Center AuC) enthält dazu die Verschlüsselungscodes und -algorithmen, auf die vom HLR bei Bedarf zugegriffen werden kann, und im Geräteindentifizierungsregister (Equipment Identity Register EIR) werden Listen der zugelassenen, gesperrten und gestörten Geräte geführt. Das Betriebs- und Wartungszentrum (Operation and Maintenance Center OMC) ist über X.25-Schnittstellen mit jedem Netzelement verbunden, so daß Betriebsstörungen dorthin gemeldet und Steuerungskommandos an die Netzelemente erteilt werden können. Weiterhin wird die Gebührenabrechnung, Teilnehmerverwaltung und die Erfassung von Netzstatistiken hier vorgenommen.

2.2.1.2 Funkkanalstruktur

Übertragungsfrequenzband im GSM 900-System Dem GSM-System sind zwei Frequenzbänder im UHF-Bereich von je 25 MHz Breite zugeordnet. Der Bereich von 890 bis 915 MHz ist der Mobilstation vorbehalten, d.h in diesem Bereich wird die Verbindung von der Mobil- zur Basisstation betrieben (Uplink). Der Bereich von 935 bis 960 MHz ist für die Verbindung von der Basisstation zur Mobilstation vorgesehen (Downlink). In Deutschland teilen sich dieses Band zwei Betreiber.

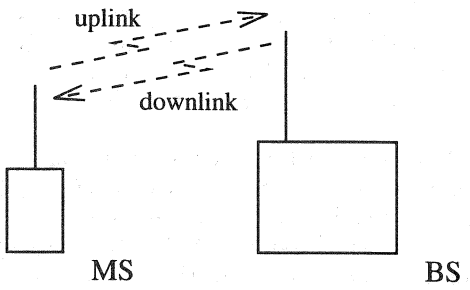


Bild 2.4: Übertragung auf der U_m-Schnittstelle

Pro Frequenzband stehen insgesamt 124 Trägerfrequenzpaare mit je 200 kHz Kanalabstand zur Verfügung, wobei der Duplexabstand eines Kanalpaares 45 MHz beträgt (siehe Abbildung 2.5. Die Trägerfrequenzen werden unter den Netzbetreibern eines Versorgungsgebietes aufgeteilt und jeder Netzbetreiber ordnet bei der Funknetzplanung Trägerfrequenzen aus seinem Kontingent den Mobilfunkzellen zu. Welche dieser Frequenzen für eine konkrete Verbindung verwendet wird beim Verbindungsaufbau vom BSC festgelegt.

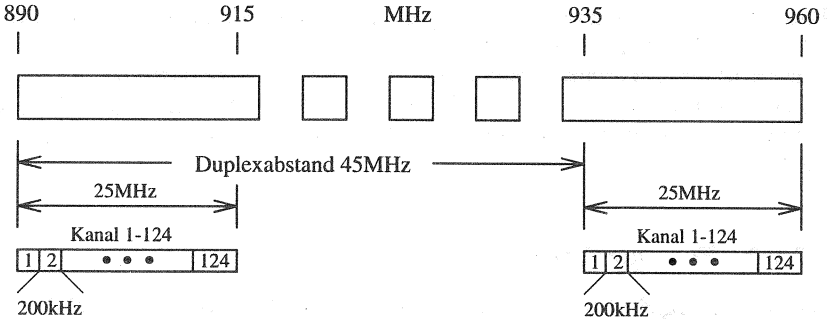


Bild 2.5: GSM-Frequenzband

Vielfachzugriffsverfahren im GSM-System Im GSM-System wird eine Kombination aus dem TDMA-Zugriffsverfahren (*Time Division Multiple*

Access) und dem FDMA-Verfahren (*Frequency Division Multiple Access*) verwendet. Abbildung 2.6 veranschaulicht diesen Sachverhalt.

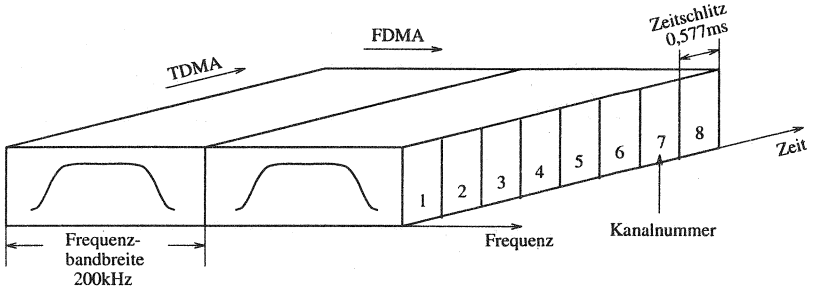


Bild 2.6: FDMA-TDMA-Verfahren

Der verfügbare Frequenzbereich wird dabei nach dem FDMA-Verfahren in Funkkanäle von jeweils 200 kHz Bandbreite unterteilt. Jeder Funkkanal wird durch Zeitmultiplex in periodische Zeitschlitze (*time slots*) aufgeteilt, die über den entsprechenden Pulsrahmen acht Verkehrskanäle (*traffic channels*) bilden. In Abbildung 2.7 ist ein Basis-TDMA-Pulsrahmen dargestellt.
Somit ergibt sich in dem bereitgestellten Frequenzband eine Gesamtzahl von 992 Verkehrskanälen. Die Zeitschlitze, die sich an der gleichen Stelle i ($0 \leq i \leq 7$) innerhalb der aufeinanderfolgenden TDMA-Rahmen befinden, stellen je einen physikalischen Basisverkehrskanal dar. Die Datenübertragung findet innerhalb eines Zeitschlitzes in Signalpaketen, den sogenannten *Bursts*, mit einer Länge von 15/26 ms $\approx 0,577$ ms statt. In dieser Zeitmaske wird ein Normalburst genanntes Bitmuster übertragen, das im unteren Teil der Abbildung 2.7 dargestellt ist:

26	Bit Trainingssequenz in der Mitte des Rahmens — sie dient der Schätzung der Kanalimpulsantwort
2 x 57	Bit Nutzinformation (verschlüsselt), symmetrisch an die Testsequenz anschließend
2 x 1	Controlbit als Anzeige für die folgende Signalisierung oder Verkehrsdaten
2 x 3	Tailbits (TB) als Abschluß- bzw. Startbit
8,25	Bit (Leitbit) sendefreie Schutzzeit symmetrisch aufgeteilt (GP : Guard Period $\approx 30,46\mu s$).

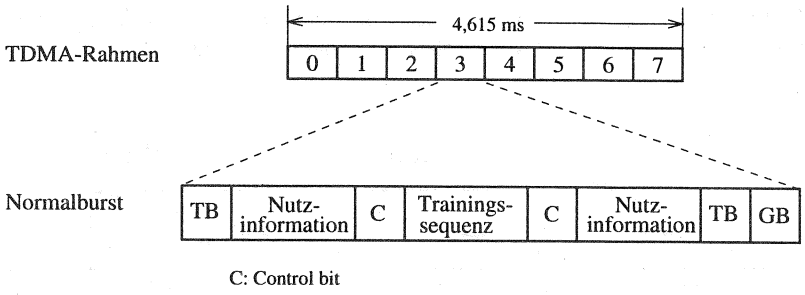


Bild 2.7: TDMA-Rahmen und Normalburst-Struktur

Neben dem Normalburst werden auch andere Bursts gleicher Länge (156,25 Bit) zur Frequenzkorrrektur, zur Synchronisation sowie zum Zugriff übertragen.
Die oben beschriebenen physikalischen Kanäle werden im GSM-System durch verschiedene logische Kanäle belegt, die im folgenden kurz erläutert werden.

Verkehrskanäle Über den bidirektionalen logischen Verkehrskanal TCH (*Traffic Channel*) werden die Nutzinformationen — Sprache und Daten — übertragen. Verkehrskanäle gibt es auch in einer Halbratenversion, d. h. zwei Halbratenkanäle teilen sich einen physikalischen Vollraten-(Verkehrs-)Kanal. Demzufolge erhöht sich dann die Zahl der Verkehrskanäle von 992 Vollratenkanälen (TCH/F : *full rate*) auf maximal 1984 Halbratenkanäle (TCH/H : *half rate*). Die Nettodatenrate (z.B. für die Sprachübertragung) auf der Luftschnittstelle reduziert sich dabei von 13 kbit/s auf 6,5 kbit/s.

Steuerkanäle Steuerkanäle im GSM-System werden für die Signalisierung und die Synchronisierung verwendet.

BCCH: *Broadcast Control Channel*
Hier sendet die Basisstation netz- und zellspezifische Informationen wie verfügbare Dienste, Synchronisierungsparameter, Zellkennung u.ä. an alle Mobilstationen. Diese Daten müssen permanent gesendet werden und dienen den Mobilstationen für die Funkzellenauswahl.

SACCH: *Slow Associated Control Channel*
Ein SACCH existiert für jeden Verkehrskanal (TCH). Er wird für Informationen wie Sendeleistungsanpassung, Kontrolldaten (*downlink*)

oder Daten für einen Handoverprozeß, wie Empfangsqualitätsmessungen (*uplink*), und Bezeichnung des geeigneten BCCHs benutzt.

SDCCH: *Standalone Dedicated Control Channel*
Der SDDCH ist ein eigenständiger Kanal, der zur Signalisierung während des Verbindungsaufbaus dient.

FACCH: *Fast Associated Control Channel*
Er wird zur Übertragung größerer Mengen verbindungsbezogener Signalisierungsinformation bei Bedarf eingerichtet - wie zum Beispiel im Augenblick eines Handovers - und verwendet dabei Rahmen des zugeordneten Verkehrskanals.

CCCH: *Common Control Channels*
Diese dienen der Übertragung von Signalisierungsinformation für die Initiierung eines Verbindungsaufbaus. Dazu gehört der Paging Channel (PCH), um das Rufsignal an eine Mobilstation zu übermitteln, der Random Access Channel (RACH), über den die Mobilstation eine Verbindungsanforderung absetzt und der Access Grant Channel (AGCH), über den der Mobilstation Funkressourcen zugeordnet werden.

2.2.2 GSM-Protokollarchitektur

Abbildung 2.8 zeigt die Architektur der Signalisierungsprotokolle im GSM-System. Sie basiert im wesentlichen auf dem von der CCITT standardisierten Zentralen Zeichengabesystem Nr. 7 (Signaling System No. 7), das jedoch um den Mobilfunk-Anwendungsteil (Mobile Application Part MAP) erweitert ist. Da in einem Mobilfunknetz eine Vielzahl unterschiedlicher Komponenten am Verbindungsaufbau beteiligt ist, muß das Signalisierprotokoll den Anforderungen unterschiedlicher Funktionalitäten Rechnung tragen. Daher finden an den einzelnen Schnittstellen (U_m, A_{bis}, A) unterschiedliche Modifikationen des Zeichengabeprotokolls Verwendung.
Ebenfalls für Mobilfunksysteme typisch ist, daß eine OSI-konforme hierarchische Gliederung des Protokolls nicht konsequent durchgehalten werden kann, da einige Verwaltungsaufgaben mehrere Protokollebenen betreffen. So hat gemäß OSI-Schichtenmodell die Schicht 3 (Netzebene) die Aufgabe, eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung zur Verfügung zu stellen. Auf welchem physikalischen Weg dies geschieht, wird dabei den untergeordneten Schichten überlassen. In einem Mobilfunksystem sind jedoch für die Auswahl der Verbindung auch die Empfangsfeldstärke und die Feldstärkemeßwerte relevant, die Merkmale der physikalischen Ebene (Schicht 1 des Modells) sind.

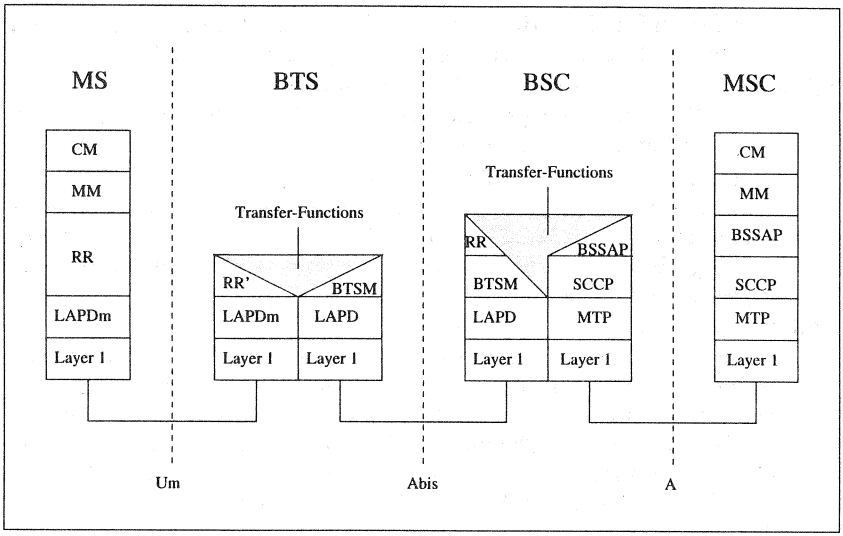


Bild 2.8: Die GSM-Protokollarchitektur

Für das weitere Verständnis dieser Arbeit sind nun insbesondere die Protokolle der Schicht 3 relevant. Diese Schicht teilt sich im GSM-System in drei Teilschichten auf, die deutlich voneinander abzugrenzende Aufgaben haben und funktional aufeinander aufsetzen. Es sind dies von unten nach oben

- das Radio Ressource (RR) Management, die Verwaltung der Ressourcen auf der Funkstrecke:
  Es dient dem Aufbau, Abbau und der Unterhaltung einer dedizierten Funkverbindung.
- das Mobility Management (MM), die Mobilitätsverwaltung:
  Sie dient der Registrierung, Authentifizierung und der Verwaltung der temporären Datenhaltung.
- das Connection Management (CM), Verbindungssteuerung:
  Die Aufgabe dieser Schicht ist der Aufbau, Abbau und die Unterhaltung eines leitungsvermittelten Rufes.

2.2.2.1 RR-Teilschicht

Die RR-Teilschicht wird nur an der Luftschnittstelle zwischen der Mobilstation und dem BSS benötigt. Die über diese Protokollschicht gesteuerten Systemfunktionen werden daher in der BSS verwaltet und belegen keine Kapazitäten im Vermittlungsteil des Netzes.
Besteht eine RR-Verbindung, so werden unter anderem die folgenden wichtigen Steuerungsaufgaben übernommen

- Aussetzen und Wiederaufnahme der Datenübertragung beim Kanalwechsel
- Aufbau und Auslösen eines Betriebsmodus auf Verkehrs- und Steuerkanälen
- die Wahl des Übertragungsmodus auf dem physikalischen Kanal, d.h. Codierungs- und Verschlüsselungsverfahren entsprechend dem gewählten Dienst
- Kanalwahl und Kanalwechsel innerhalb des Versorgungsbereiches der BSC.

Ausgelöst wird eine RR-Verbindung auch bei bestehender Verbindung, wenn die Mobilstation in den Versorgungsbereich einer anderen BSC wechselt.
Bei nicht bestehender Verbindung stellt darüber hinaus die RR-Teilschicht die Funktionen zur Übertragung von Nachrichten auf dem BCCH und den CCCHs zur Verfügung und überwacht Rufwünsche von Mobilteilnehmern.
Einige der Funktionen der RR-Schicht werden jedoch nicht eigenständig, sondern auf Veranlassung der MSC ausgeführt. Dazu gehören beispielsweise die Aufforderung zur Zuweisung eines Funkkanals und die Umschaltung beim Handover. Insofern erfordert die RR-Teilschicht eine korrespondierende Teilschicht für den Austausch zwischen dem BSS und der MSC. Diese Funktionalität wird von dem sogenannten BSS Management Application Process (BSSMAP) wahrgenommen.

2.2.2.2 MM-Teilschicht

Alle Funktionen, die den Besonderheiten durch die Mobilität des Endteilnehmers Rechnung tragen, sind wie bereits oben erwähnt in der MSC implementiert. Die zur Verwaltung dieser Funktionen erforderliche Signalisierung wird über die MM- Teilschicht zwischen der Mobilstation und der MSC abgewickelt. Diese Teilschicht ist daher festnetzseitig nicht über die MSC hinaus erforderlich. Zwischen der Mobilstation und der MSC werden die

Nachrichten über den DTAP (Direct Transfer Application Part) transparent übertragen.
Die Funktionen der MM-Teilschicht lassen sich wie folgt in drei Klassen aufteilen.
Die *verbindungsbezogenen* Prozeduren stellen die Dienste Aufbau, Abbau und Überwachung einer Verbindung unter der Berücksichtigung der Teilnehmermobilität zur Verfügung, so daß der übergeordneten Verbindungssteuerungsteilschicht (CM) vom Teilnehmerstandort und dem Mobilitätsverhalten unabhängige Verbindungen angeboten werden. Entsprechend der Dienstanforderung der CM-Schicht werden hier eine oder mehrere MM-Verbindungen gleichzeitig verwaltet und Verschlüsselung und Authentifizierung mit Hilfe der allgemeinen Prozeduren selbständig durchgeführt.
Die *spezifischen* Prozeduren umfassen die Aktualisierung des Aufenthaltsortes (Location Area) und die IMSI-Attach-Prozedur, über die eine Mobilstation im Netz als erreichbar gekennzeichnet wird. Die IMSI (International Mobile Station Identification IMSI) ist eine eindeutige Identifikationsnummer des Mobilteilnehmers, die ihm zusätzlich zu seiner ISDN-Rufnummer zugeordnet wird. Die beiden spezischen Prozeduren können nie gleichzeitig ausgeführt werden und auch nur dann, wenn keine verbindungsbezogene MM-Prozedur aktiv ist.
Die Aktualisierung des Aufenthaltsortes wird entweder durch die Mobilstation initiiert, sofern diese feststellt, daß die von der Basisstation auf dem BCCH ausgesendete Ortsinformation nicht mehr mit der gespeicherten übereinstimmt, oder durch das Netz, wenn bei dem Versuch eines Verbindungsaufbaus festgestellt wird, daß die Mobilstation nicht im VLR verzeichnet ist. Bei jeder Aktualisierung des Aufenthaltsortes wird dem Teilnehmer eine neue vorübergehende Teilnehmernummer (TMSI) zugeteilt, die chiffriert auf dem Funkweg übertragen und in der Mobilstation gespeichert wird. Auf diese Weise kann die Identität des Teilnehmers durch Abhören des Funkkanals nicht ermittelt werden.
Die allgemeinen MM-Prozeduren werden immer bei bestehender Funkverbindung zwischen Mobilstation und Netz ausgeführt. Sie umfassen die Kennzeichnung der Nichterreichbarkeit (IMSI-Detach), die Zuweisung einer neuen vorübergehenden Teilnehmernummer (TMSI), die beim Verlassen des Versorgungsbereiches einer MSC durchgeführt werden muß, sowie die Authentifizierung und Identifizierung der Mobilstation.

2.2.2.3 CM-Teilschicht

Die Verbindungssteuerungsteilschicht endet wie die MM-Teilschicht an der MSC und bietet auf der Basis von MM-Verbindungen den Aufbau und Abbau von Verbindungen einschließlich der Änderung von Parametern oder Diensten während eines Rufes an (Rufsteuerungs-Instanz, CC-Entity). Ferner ist unabhängig davon ein GSM-eigener verbindungsloser Kurznachrichtendienst mit bis zu 140-Byte-Nachrichten realisiert (Short Message Service, SMS) sowie der Supplementary Service (SS), der Rufweiterleitung und Gebührenabrechnung als rufgebundene oder rufungebundene Dienste anbietet.

2.3 Handover und Leistungssteuerung

Nachdem die erforderlichen Begriffe eingeführt wurden, soll in diesem Abschnitt der Handover als eine der zentralen Funktionen der Mobilitätsverwaltung beschrieben und die damit verbundenen Probleme dargestellt werden. In den vorangehenden Abschnitten wurde bei der Beschreibung der Systemkomponenten und der Protokolle die Thematik des Handovers bereits angesprochen. Die Entscheidung, einen Handover einzuleiten und die Auswahl der Zielzelle hängt indes von einer Reihe von Parametern ab, und es gibt unterschiedliche Gründe für die Auslösung eines Handovers.
Das grundlegende Ziel bei einem Handover besteht darin, den Verlust der Verbindung zu vermeiden, wenn die Mobilstation den Versorgungsbereich der Basisstation verläßt. Ebenso störend wie ein Verbindungsverlust ist für den Benutzer jedoch auch der sogenannte Ping-Pong-Handover, der infolge stark schwankender Feldstärke am Zellrand zu einem mehrfachen Hinundherschalten zwischen zwei Zellen führt, was die Verbindungsqualität ebenfalls empfindlich stört.
Ein weiterer Grund für einen Handover kann auch die Verringerung der Gleichkanalstörungen sein. Je nach Ausbreitungssituation besteht möglicherweise keine Gefahr eines Verbindungsverlustes, doch kann gegebenenfalls über eine Verbindung mit einer anderen Basisstation die erforderliche Sendeleistung verringert werden. Für diesen Zweck ist im GSM-System ebenfalls eine Funktion zur Anpassung der Sendeleistung realisiert worden, die sich auf dieselben Parameter stützt wie die Handoveralgorithmen.
Es kann auch sinnvoll sein, bei Überlastung einer Zelle einen Teil des Verkehrs in eine benachbarte Zelle auszulagern. Da sich die Mobilstation dabei aber stets am Rande des Versorgungsbereiches der anderen Zelle befinden dürfte, widerspricht dies zumeist dem Ziel der Verringerung der Gleichka-

nalstörungen. In Ausnahmesituationen jedoch bietet sich auf diese Weise die Möglichkeit, extreme Lasten trotz begrenzter Kapazität aufzunehmen. Je nachdem, aus welchem Grund der Handover erfolgen soll, variieren die Kriterien; in jedem Fall ist sowohl bei der Entscheidung, ob ein Handover durchgeführt wird, als auch bei der Auswahl der Zielzelle stets eine Voraussage über die Verbindungsqualität mit bzw. ohne Handover erforderlich.
Bei den derzeit eingesetzten Handoveralgorithmen werden die im folgenden beschriebenen Kriterien zugrunde gelegt. Alle diese Kriterien werden im GSM-System durch Meßwerte repräsentiert, die entweder eigens für diesen Zweck vorgesehen wurden, oder bereits zur Steuerung anderer Systemfunktionen benötigt werden.
In erster Linie ist die Entscheidung über einen Handover abhängig von der Signalqualität, wie sie von der Mobil- und der Feststation wahrgenommen wird. Im Fall einer digitalen Übertragung ist die Bitfehlerrate ein geeigneter Indikator, über die Empfangsfeldstärke kann zudem auf den Pfadverlust geschlossen werden.
Außerdem läßt die Signallaufzeit, die bei TDMA-Systemen bereits für die Synchronisierung auf den richtigen Zeitschlitz benötigt wird, Schlüsse auf die Entfernung zwischen der Basis- und der Mobilstation zu. Allerdings erlaubt die Entfernung alleine allenfalls in flacher ländlicher Umgebung eine Aussage über einen geeigneten Handoverort, während ansonsten aufgrund topologischer und morphologischer Gegebenheiten die Funkausbreitung stark richtungsabhängig variiert.
Soll zur Minimierung der Sendeleistung eine geeignete Basisstation ausgewählt werden, so benötigt die Mobilstation auch Informationen über die Empfangsqualität benachbarter Basisstationen. Dies wird dadurch realisiert, daß jede Basisstation über den BCCH-Kanal kontinuierlich ein Signal konstanter Leistung aussendet und die Mobilstation die Empfangsfeldstärke von bis zu zwölf Basisstationen überwacht. Auf diese Weise sollen der Mobilsstation Alternativen für die Auswahl einer geeigneten Zielzelle angeboten werden, die im BSC ausgewertet und für eine HO-Entscheidung benutzt werden.

2.3.1 Meßwerte

Zur Unterstützung einer Handover-Entscheidung werden von der Mobilstation ununterbrochen verschiedene Messungen über den Zustand des Empfangskanals der ihr zugeordneten Basisstation durchgeführt. Diese Meßwerte werden im sogenannten *Measurement Report* zusammengefaßt und von der Mobilstation über den SACCH an die Basisstation übertragen. Bis zur

Übermittlung eines vollständigen SACCH-Blockes vergehen 104 TDMA-Rahmen. Somit stehen nach jeweils 480 ms (= $104 \cdot 4,615$ ms) die aktuellen Funkmeßdaten für eine Auswertung in der Basisstation zur Verfügung. Diese sendet den *Measurement Report* der Mobilstation sowie die von ihr gemessenen Werte an die Basisstationssteuerung. Folgende Meßwerte sind von Interesse:

- Signalpegel (RXLEV) auf dem Sende- und Empfangskanal *up- und downlink*
- Signalqualität (RXQUAL) auf dem *up- und downlink*
- Empfangspegel des BCCHs der Nachbarzellen
- *Timing Advance*

Empfangspegel des TCH Der Wert des Signalpegels ist der arithmetische Mittelwert der Empfangsleistung und wird in den GSM-Spezifikationen mit RXLEV bezeichnet. Für den Empfangspegel existieren zwei Werte:

- RXLEV_FULL (für alle TCH- und SACCH-TDMA-Rahmen)
- RXLEV_SUB (für 4 SACCH- und 8 SID-TDMA-Rahmen)

Bei dem RXLEV_FULL muß eine Mittelung über 100 TDMA-Rahmen erfolgen. Die restlichen vier Rahmen sind im Voll-Raten-Code *idle*. Im Halb-Raten-Code wird dementsprechend über 52 Rahmen gemittelt. Die Mittelung erfolgt dabei im zugehörigen Zeitschlitz. Im DTX-Übertragunsmodus (*Discontinuos Transmission*) werden lediglich vier SACCH- und zusätzlich acht SID-TDMA-Rahmen (*Silence Descriptor*) empfangen. Die Meßwerte aus diesen 12 Rahmen beschreibt der RXLEV_SUB. Zur digitalen Verarbeitung wird der RXLEV-Wert mit 6 Bit, das entspricht 64 Stufen quantisiert.

RXLEV	Empfangspegel [dBm]
0	< -110
1	-110
..	..
..	..
62	-49
63	> -48

Empfangsqualität Die Empfangsqualität des TCH sowie die der BCCH der Nachbarzellen werden auf ähnliche Weise wie der Empfangspegel bestimmt. Dabei wird die Bitfehlerrate BER vor der Kanaldecodierung durch

den Wert von RXQUAL beschrieben, der mit 3 Bit gemäß der folgenden Tabelle codiert wird:

RXQUAL	BER
0	< 0,2 %
1	0,2% bis 0,4%
2	0,4% bis 0,8%
3	0,8% bis 1,6%
4	1,6% bis 3,2%
5	3,2% bis 6,4%
6	6,4% bis 12,8%
7	> 12,8%

Empfangspegel der BCCH Zusätzlich zu dem Empfangspegel der ihr zugeordneten Basisstation mißt die Mobilstation den Empfangspegel der benachbarten Basisstationen über deren BCCH-Träger. Die Anzahl der Pegelmessungen für jede Basisstation hängt dabei von der Anzahl der empfangenen Nachbarstationen ab. Bei z. B. sechs empfangenen Stationen gehen jeweils 16 Meßwerte in den Mittelungsprozeß zur Bestimmung des RXLEV-Wertes ein, bei 32 empfangenen Nachbarstationen reduziert sich diese Anzahl auf drei Meßwerte. Die Mobilstation übermittelt jedoch nur die sechs stärksten Empfangspegel als RXLEV_NCELL an die Mobilstation. Zudem werden noch deren BSICs (*Base Station Identity Codes*) und die Trägerfrequenzen BCCH_FREQ_NCELL gesendet. (N_CELL ist die Nummer der entsprechenden Zelle.)

Timing Advance Um zu verhindern, daß sich eine Mobilstation im Fall von Überreichweiten zu weit von ihrer Basisstation entfernt, wird im GSM-System der ungefähre Abstand zwischen Mobil- und Basisstation bestimmt. Weil es für das TDMA-Verfahren erforderlich ist, daß der Signalburst der Mobilstation mit der Zeitschlitzstruktur bei der Basistation synchronisiert ist, muß die Mobilstation ihre Daten in Abhängigkeit von der Signallaufzeit bereits zu einem früheren Zeitpunkt senden als sie durch eigene Beobachtung ermitteln kann. Zu diesem Zweck mißt die Basisstation mittels eines Synchronisationsbursts die Signallaufzeit zur Mobilstation. Daraufhin sendet sie ihr die Anzahl der Bitstellen zurück, um welche die Mobilstation die Übertragung ihrer Datenbursts früher starten muß, damit ihre Signale zum Synchronisationszeitpunkt des entsprechenden Zeitschlitzes an der Basisstation ankommen.
Die Größe diese Bitversatzes wird als *Timing Advance* bezeichnet. Da bei einer Übertragungsrate von 270 kbit/s die Bitdauer 0,0037 ms beträgt, entspricht die Übertragungsdauer eines Bits einer räumliche Ausdehnung von

ca. 1,1 km. Die Bereiche gleicher Timing-Advance-Werte bilden somit konzentrische Kreisringe mit einer Breite von ca. 1,1 km um die Basisstation. Somit kann die Entfernung zwischen Basis- und Mobilstation mit einer Genauigkeit von ca. 1 km bestimmt werden. Die Übergänge zwischen diesen sogenannten Timing-Advance-Zonen sind jedoch fließend, da das verwendete Meßverfahren eine gewisse Ungenauigkeit aufweist.

2.3.2 Handover nach GSM-Empfehlung

Die GSM-Empfehlungen beschreiben einen Handoveralgorithmus, doch es bleibt jedem Netzbetreiber die Implementierung eines individuellen Algorithmus überlassen. Ihm liegen die im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Meßwerte zugrunde, die mit bestimmten Schwellwerten verglichen werden. Gleichzeitig soll das Leistungsbudget maximiert werden. Daher wird zunächst für jede benachbarte Zelle aufgrund der Gleichung

$$\text{RXLEV_NCELL}(n) > \text{RXLEV_MIN}(n) + \max(0,\text{Pa}) \quad (2.1)$$
$$\text{mit} \quad \text{Pa} = \text{MS_TXPWR_MAX}(n)\text{-p}.$$

geprüft, ob sie für einen Handover in Frage kommt. Dabei bedeutet

p	maximal mögliche Sendeleistung
HO_MARGIN(n)	Hysteresewert für den Handover zur Zelle n
RXLEV_MIN(n)	min. Leistung, die von der Feststation in Zelle n für einen Handover empfangen werden muß
MS_TXPWR_MAX(n)	maximal in Zelle n erlaubte Sendeleistung
MS_TXPWR_MAX	maximal in aktueller Zelle erlaubte Sendeleistung

Es muß also die von der Feststation empfangene Leistung größer als ein Mindestwert zuzüglich eines mobilstationspezifischen Wertes sein, der nur dann von 0 verschieden ist, wenn die Mobilstation die erlaubte Leistung nicht ausnutzen kann, etwa ein Handgerät. Erfüllen mehrere Basisstationen die Gleichung (2.1), so ist diejenige Zelle am ehesten geeignet, für die

$$\begin{aligned} w(n) \;=\; & [\min(\text{MS_TXPWR_MAX},\text{p}) - \text{RXLEV_DL}] \\ & -[\min(\text{MX_TXPWR_MAX}(n),\text{p}) - \text{RXLEV_NCELL}(n)] \\ & -\text{HO_MARGIN}(n) \end{aligned} \quad (2.2)$$

den maximalen Wert aufweist.

Entfernt sich nun eine Mobilstation aus dem Versorgungsbereich einer Zelle, so wird ein Handover erst eingleitet, wenn der Empfangspegel der neuen Station den der alten Station um einen bestimmten Wert (HO_MARGIN) übersteigt. Durch diese Hysterese soll sichergestellt werden, daß ab dem betreffenden Zeitpunkt eine gesicherte Versorgung durch die neue Zelle gewährleistet ist. Bei ungünstigen geographischen Gegebenheiten kann dies dennoch zu einem mehrfachen Hin-und-Herschalten zwischen Zellen führen. Wird indes der Wert für HO_MARGIN zu groß gewählt, erhöht sich wiederum die Gefahr von Gleichkanalstörungen.
Aus dem Gesagten wird deutlich, daß alle Bemühungen, den Handover zu einem geeigneten Zeitpunkt einzuleiten, darauf hinauslaufen, aufgrund der zur Verfügung stehenden Meßdaten das Erreichen der Zellgrenze festzustellen. Wäre der Aufenthaltsort der Mobilstation bekannt, so könnte der Handover an einem in voraus aufgrund von Messungen oder Simulationen bestimmten Ort stattfinden, so daß eine Optimierung der Netzfunktionalität möglich wäre. In der vorliegenden Arbeit soll eine mögliche Lösung dazu aufgezeigt werden.

KAPITEL 3

Funkwellenausbreitung

Die Eigenschaften der Funkwellenausbreitung ([1]) hängen entscheidend von der Frequenz ab. Zwar war der Grund, das GSM-System im 900-MHz-Band und das DCS1800 im 1800-MHz-Band anzusiedeln, daß dies die einzigen Bereiche waren, die europaweit für diesen Zweck zur Verfügung standen. Der UHF (Ultra high frequency)-Bereich wurde jedoch bewußt aufgrund der dort vorzufindenden Eigenschaften der Funkwellenausbreitung ausgewählt. Ab etwa 30 MHz erfolgt die Wellenausbreitung quasioptisch. Dies bedeutet, daß die Verbindung zwischen Sender und Empfänger im wesentlichen über den direkten Pfad und die reflektierten Ausbreitunspfade zustande kommt. Die Ausbreitungsreichweite ist daher durch den Radiohorizont begrenzt, so daß es möglich ist, Frequenzen in bestimmten räumlichen Abständen wiederzuverwenden. Dies ist eine elementare Voraussetzung für den Aufbau eines Mobilfunknetzes, da nur auf diese Weise eine flächendeckende Versorgung der gewünschten Teilnehmerdichte bei gleichzeitig begrenzt zur Verfügung stehender Bandbreite erreicht werden kann.
Höhere Frequenzen über etwa 3 GHz werden für Mobilfunksysteme wie GSM nicht verwendet, da diese Frequenzen eine Sichtlinienverbindung erfordern. Verluste durch Reflexion und Eindringen in feste Materie sind dort so hoch, daß eine Versorgung sowohl außerhalb als auch innerhalb von Gebäuden nicht mehr durch dieselbe Basisstation gewährleistet werden kann. Innnerhalb städtischer Umgebung, wo im UHF-Bereich die Verbindung häufig über indirekte Pfade hergestellt wird, müßte die Dichte der Basisstationen stark erhöht werden, um jederzeit eine Sichtverbindung von der Mobil- zu einer Basisstation zu garantieren. Außerdem müßten auch die Innenräume von Gebäuden mit Basisstationen ausgestattet werden.
Ein weiterer Grund für die Auswahl dieses Frequenzbandes ist die Tatsache, daß die Antennen mit optimalem Wirkungsgrad von einer Größe sind, die sie für mobile Anwendung (u.a. auch für tragbare Geräte) sehr geeignet erscheinen läßt. Die Antennen der Basisstationen können je nach gewünschter Reichweite entweder in der Höhe von einigen Metern, auf Masten und Häusern in der Höhe von einigen zehn Metern oder auf Geländeerhebungen in der Höhe von einigen hundert Metern installiert werden.

Um nun eine Vorstellung davon zu erhalten, welche Einflüsse auf die Feldstärke am Ort eines Empfängers wirken, ist es sinnvoll, die topografischen und morphologischen Gegebenheiten entlang des Großkreises zwischen Sender und Empfänger zu betrachten [2].
Würde es sich um eine reine Freiraumausbreitung handeln, so ließe sich das Verhältnis zwischen empfangener und gesendeter Leistung durch die Gleichung

$$\frac{P_e}{P_s} = G_s G_e \left(\frac{\lambda}{4\pi d}\right)^2$$

beschreiben, wobei G_s und G_e den Antennengewinn von Sende- bzw. Empfangsantenne beschreiben. Dieser Wert wird in der Praxis zumeist logarithmisch in Dezibel ausgedrückt und als Pfadverlust bezeichnet.
Durch den Pfadverlust sollen jedoch im allgemeinen nur die Einflüsse zwischen Sender und Empfänger zum Ausdruck gebracht werden, nicht aber der Einfluß der jeweils verwendeten Antenne. Es ist gebräuchlich, den Pfadverlust zwischen isotropen Antennen zu verwenden, der durch die Gleichung

$$\frac{L}{\mathrm{dB}} = 32.44 + 20\log_{10}\frac{f}{\mathrm{MHz}} + 20\log_{10}\frac{d}{\mathrm{km}}$$

gegeben ist. Dabei wurde λ durch c/f ausgedrückt.
Bei der Ausbreitung in der Nähe der Erdoberfläche kommen jedoch eine Reihe weiterer Einflüsse zum Tragen, die zu einer Erhöhung des Pfadverlustes gegenüber der Freiraumausbreitung führen.
Zunächst ist zu berücksichtigen, daß neben dem direkten Pfad zwischen Sender und Empfänger häufig ein indirekter Pfad durch Reflexion an der Erdoberfläche existiert. Nähert man die Erdoberfläche durch eine Ebene an, was bei einer Entfernung bis zu einigen zehn Kilometern möglich ist, und geht man davon aus, daß die Entfernung zwischen Sender und Empfänger groß gegenüber der Höhe von Sende- und Empfangsantenne ist, so daß man streifenden Einfall und einen Reflexionsfaktor von $\rho = -1$ voraussetzen kann, so erhält man einen Pfadverlust zwischen isotropen Antennen von

$$L = -20\log_{10} h_s - 20\log_{10} h_e + 40\log_{10} d \qquad (3.1)$$

Unter den genannten Einschränkungen nimmt die Empfangsleistung mit der vierten Potenz der Entfernung ab.
Allerdings kann je nach Beschaffenheit der Oberfläche nicht immer von einem Reflexionsfaktor von $\rho = -1$ ausgegangen werden. Während bis zu einer Frequenz von etwa 30 MHz die Leitfähigkeit ausschlaggebend ist, werden die Reflexionseigenschaften bei darüberliegenden Frequenzen durch die

Rauhigkeit der Oberfläche bestimmt. Eine Oberfläche wird dann als rauh bezeichnet, wenn sie zu einer maßgeblichen Phasenverschiebung innerhalb einer auftreffenden Wellenfront führt. Dies ist selbstverständlich von der Wellenlänge und dem Auftreffwinkel abhängig. In einer typischen Mobilfunkumgebung, beispielsweise bei einem Einfallswinkel von 1° und einer Frequenz von 900 MHz, wäre eine Oberfläche mit Höhenunterschieden von 15 m als rauh zu bezeichnen, wie etwa eine mit Bäumen bewachsene Landschaft.

Häufig führen Hindernisse im Ausbreitungspfad zu einer weiteren Beeinflussung der Empfangsfeldstärke. Dabei können sowohl der direkte Pfad wie auch reflektierte Pfade betroffen sein. Sofern es sich jedoch nicht um ein weiträumiges Hindernis von beträchtlicher Höhe handelt, wird dies nicht zu einem vollkommenen Verschwinden der Feldstärke am Ort des Empfängers führen. Die Ursache liegt darin, daß die Wellenfront an der Kante des Hindernisses gebeugt wird und daher auch in den abgeschatteten Bereich hinter dem Hindernis eindringt. Physikalisch beruht dies auf dem Huygenschen Prinzip, nach dem von jedem Ort einer Wellenfront eine Elementarwelle in alle Richtungen ausgeht und der Raum hinter dem Hindernis daher durch Elementarwellen aus dem nicht abgeschatteten Teil der Wellenfront erreicht wird.

Betrachtet man eine Verbindung zwischen zwei Punkten, so erfolgt der Energietransport keineswegs nur entlang der Verbindungslinie zwischen den Punkten, sondern ist räumlich um diese Verbindungslinie herum ausgedehnt. Daher erhebt sich die Frage, welche Beeinflussung der Übertragung zu erwarten ist, wenn ein Hindernis in diesen Bereich hineinragt.

Die Pfade zwischen Sender und Empfänger, auf denen die Weglänge um den gleichen Betrag von der kürzesten Verbindungslinie abweicht, lassen sich geometrisch zu einem Rotationsellipsoid zusammenfassen. Das Volumen innerhalb des Rotationsellipsoids mit dem Weglängenunterschied $n \cdot \lambda/2$ gegenüber der direkten Verbindungslinie bezeichnet man als n-te Fresnelzone. Bei der Planung von Funkverbindungen geht man im allgemeinen von einer ungestörten Verbindung aus, wenn die erste Fresnelzone frei von Hindernissen ist. Wie sich theoretisch leicht berechnen läßt, trifft diese Annahme sogar für den extremen Fall einer Halbebene zu, die bis an die erste Fresnelzone heranreicht. Während bei Richtfunkstrecken die Forderung nach einer nicht durch Hindernisse gestörten Verbindung meist erfüllt wird, ist bei Mobilfunkverbindungen eher der umgekehrte Fall die Regel.

Über die zuvor erwähnten Effekte hinaus spielen unter Umständen atmosphärische Störungen und Veränderungen des Brechungsindex der Luft eine

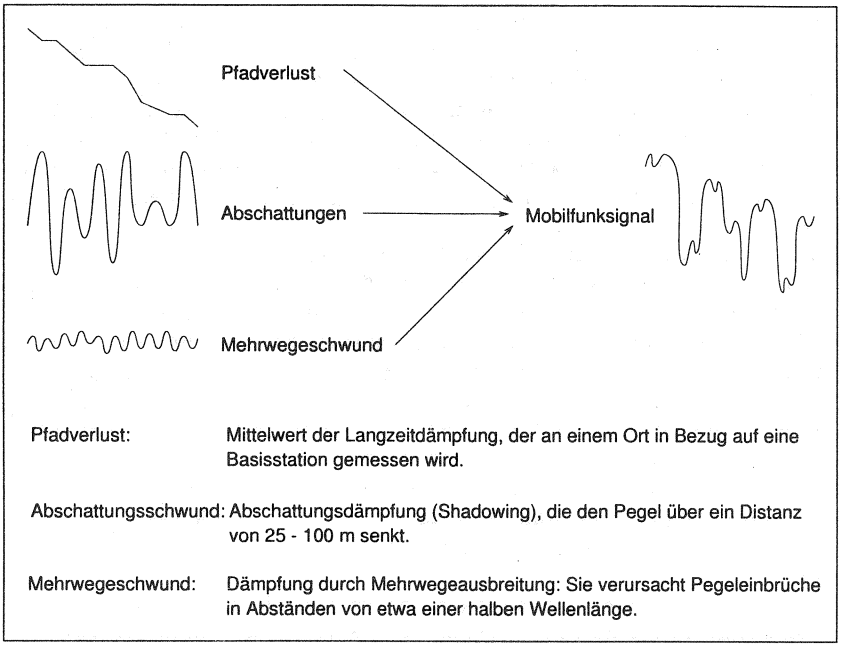


Bild 3.1: Schematische Darstellung der Faktoren, die ein Mobilfunksignal beeinflussen

Rolle bei der Funkwellenausbreitung.

3.1 Langzeitschwund

Während sich die Mobilstation bewegt, ist sie einer ständig wechselnden Empfangsituation ausgesetzt (z. B. [3, 4, 5, 2]). Diese kann man sich als Überlagerung zweier Einflußgrößen vorstellen.
In einem ersten Schritt wird eine großräumige Betrachtung der Ausbreitungsbedingungen zwischen Basis- und Mobilstation vorgenommen. Dabei ist danach zu fragen, welche Landschaftsform und Oberflächenbeschaffenheit vorliegt und wie Bebauung und Bewuchs sind. Der dabei ermittelte Pfadverlust kann dann in einer gewissen Umgebung als Mittelwert ange-

nommen werden.
Darüber hinaus ist die Mobilstation jedoch auch Abschattungen (engl. Shadowing) infolge der lokalen Topografie unterworfen. Dies können einzelne Hindernisse wie Häuser und Bäume sein, die für lokale Abweichungen vom Mittelwert verantwortlich sind. Untersuchungen haben ergeben, daß sich die Empfangsleistung statistisch recht genau durch eine logarithmische Normalverteilung beschreiben läßt und der Empfangspegel in dB dementsprechend einer Normalverteilung gehorcht.
Zur Vorhersage und Simulation des an einem Ort zu erwartenden Pfadverlustes wurde eine Vielzahl von Modellen entwickelt, die teilweise auf theoretischen Überlegungen und teilweise auf empirischen Werten beruhen. Eine der bekanntesten empirischen Methoden ist ein von Okumura [6] aufgrund von Messungen in der Umgebung von Tokio entwickeltes Verfahren, das von Hata mathematisch formuliert wurde. Der von ihm angegebene Ausdruck, der jedoch nur für einen begrenzten Bereich von Eingangsparametern und für quasiebene Landschaftsformen Gültigkeit besitzt, lautet für städtische Gebiete

$$\begin{aligned} L_p &= 69,55 + 26,16\log_{10}(f) - 13,82\log_{10}(h_s) - A(h_e) + \\ &\quad (44,9 - 6,55 \cdot \log_{10}(h_s)) \cdot \log_{10}(d)\text{dB}, \end{aligned}$$

wobei $A(h_e)$ ein Korrekturfaktor für die Antennenhöhe der Mobilstation ist. Entsprechende Formeln wurden für Vorstadt und offene Gebiete angegeben. Durch Ergänzung von zusätzlichen Korrekturtermen, die sowohl Morphostruktur als auch Topographie eines Gebietes berücksichtigen, läßt sich dieses Modell noch verfeinern.
Die sich infolge der morphologischen und topographischen Gegebenheiten ausbildenden Funkschattenzonen erstrecken sich typischerweise in einer Größenordnung von bis zu einigen zehn Metern. Von einer in Bewegung befindlichen Mobilstation werden diese Abschattungen durch Einbrüche (engl. fades) in der Empfangsfeldstärke wahrgenommen, die (im Gegensatz zu dem im nächsten Abschnitt beschriebenen Phänomen) als Langzeitschwund (Long-Term-Fading) bezeichnet werden.

3.2 Kurzzeitschwund

In städtischer Umgebung führen Reflexionen und Beugung an Gebäuden in der Regel dazu, daß die Verbindung nicht nur über einen Pfad zustandekommt (sogenannte Mehrwegeausbreitung). Dabei ist zu unterscheiden, ob die Verbindung ausschließlich über indirekte Pfade zustande kommt oder

ob zusätzlich eine Sichtlinienverbindung zwischen Basisstation und Mobilstation besteht.
Durch die Überlagerung der reflektierten Wellenzüge bildet sich ein Interferenzmuster aus, das zu Feldstärkeeinbrüchen, etwa im Abstand einer halben Wellenlänge führt. Im 900-MHz-Band entspricht dies einer Strecke von etwa 15 cm. Diese Einbrüche liegen in der Regel unter 20 dB, jedoch sind auch 30 dB keine Seltenheit. Da die Einbrüche durch Mehrwegeausbreitung von einer in Bewegung befindlichen Mobilstation in wesentlich kürzeren Abständen wahrgenommen werden als die im vorigen Abschnitt erwähnten, durch Abschattung bedingten Einbrüche, werden sie als Kurzzeitschwund (Shortterm-Fading) bezeichnet.

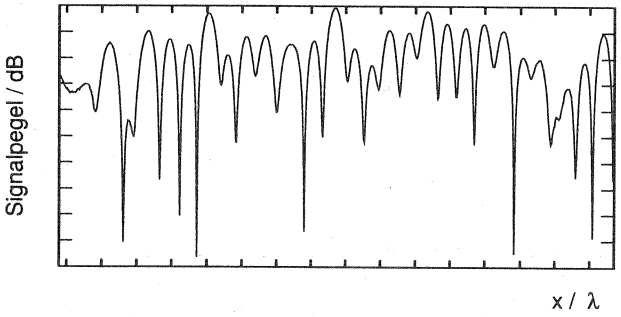


Bild 3.2: Empfangspegel in dB

Theoretische Überlegungen von Clarke [7] haben ergeben, daß die Einhüllende der Feldstärke im Fall der Verbindung ohne direkten Pfad durch eine Rayleighverteilung beschrieben werden kann. Die Überlegungen beruhen auf der Annahme einer großen Anzahl von Wellenzügen mit statistisch verteilter Amplitude und Phase. Das Signal kann daher als Bandpaßprozeß betrachtet werden, dessen Inphase- und Quadraturkomponente jeweils Gaußsche Zufallsprozesse sind, so daß die Einhüllende des resultierenden Signals nach Rice [8, 9] Rayleigh-verteilt ist. Diese Annahme konnte durch Messungen in realen Mobilfunkumgebungen bestätigt werden. Es gilt also für die Einhüllende

$$p(r) = \begin{cases} \frac{r}{b} e^{-r^2/2b} & r \geq 0 \\ 0 & r < 0 \end{cases} \tag{3.2}$$

mit dem Mittelwert $\overline{r} = \sqrt{\frac{\pi}{2}b}$ und der Standardabweichung $(2 - \frac{\pi}{2})b$.
Der Parameter b beschreibt die augenblickliche Ausbreitungssituation, die von der Anzahl der Pfade und den Pfadverlusten der einzelnen Wellenzüge abhängt und daher auch mit dem Ort variiert. Wie man durch eine geeignete Variablentransformation leicht zeigen kann, läßt sich die ortsabhängige Amplitude der Einhüllenden $r(x)$ alternativ durch das Produkt

$$r(x) = m(x) \cdot r_0(x) \tag{3.3}$$

darstellen, wobei $r_0(x)$ eine Rayleighverteilung mit Mittelwert 1 und $m(x)$ der ortsabhängige Mittelwert von $r(x)$ ist.
Im Hinblickauf das in Kapitel 5.1 vorgestellte Verfahren erhebt sich die Frage, welchen Einfluß diese statistischen Schwankungen auf die Ermittlung des GSM-Feldstärkemeßwertes haben. Dazu muß zunächst die Verteilungsdichtefunktion der Feldstärke in dB berechnet werden. Wird mit s_{dB} die Signalamplitude in dB beschrieben, das heißt

$$s_{\mathrm{dB}} = k \cdot \ln(\frac{s}{s_0}) \tag{3.4}$$

mit $k = 10/\ln 10$, so ergibt sich ausgehend von Gleichung (3.2)

$$p_{\mathrm{dB}}(s_{\mathrm{dB}}) = \frac{s_0}{2kb} e^{\frac{s_{\mathrm{dB}}}{k}} e^{-\frac{s_0}{2b} e^{\frac{s_{\mathrm{dB}}}{k}}}. \tag{3.5}$$

Ihr Mittelwert berechnet sich nach:

$$\overline{s_{\mathrm{dB}}} = -k \cdot \gamma - k \cdot \ln \frac{s_0}{2b} \tag{3.6}$$

mit der Euler-Konstante $\gamma \approx 0,577$. Die Varianz beträgt, unabhängig vom gegenwärtigen Signal:

$$\sigma^2_{s_{\mathrm{dB}}} = (1.97811991 - \gamma^2)k^2, \tag{3.7}$$

Der GSM-Standard [10] verlangt, daß innerhalb eines Intervalls von $480ms$ die Meßwerte für den Empfangspegel über mindestens 12 TDMA Rahmen (4 SACCH und 8 TCH-Rahmen) innerhalb von 480 ms gemittelt werden. Wenn während eines Gesprächs nicht nur der *Silence Descriptor* SID übertragen wird, ist eine Mittelwertbildung über 100 TDMA- Rahmen möglich. Bei Vernachlässigung der Korrelation des Shortterm-Fadings und unter der Annahme, daß der Signalpegel innerhalb eines Zeitschlitzes konstant ist, ergibt sich die Standardabweichung des gemittelten Signals aus Gleichung (3.7):

$$\sigma^2_{s_{\mathrm{dB},av}} = \frac{(1.97811991 - \gamma^2)k^2}{f} \tag{3.8}$$

wobei f die Anzahl der Rahmen bezeichnet, die zur Mittelung herangezogen werden. Für $f = 12$ ergibt sich $\sigma_{\mathrm{dB}} = 3.2$ dB. Im Gegensatz dazu variiert der Mittelwert $m(t)$ in typischen Umgebungen bis zu 15 dB. Die Meßwerte enthalten demzufolge charakteristische Informationen über die Umgebung und sind somit für eine Mustererkennung geeignet.
Zudem stellt eine rayleigh-verteilte Einhüllende der Feldstärke den ungünstigsten Fall einer Einhüllenden dar. Je stärker der Einfluß des direkten Empfangspfades ist, desto kleiner ist auch das Verhältnis der Varianz zum Mittelwert des Signals.
Die Annahme konstanter Feldstärke innerhalb eines Zeitschlitzes läßt sich mit Hilfe einer kurzen Rechnung belegen. Nach [7] kann die Autokorrelationsfunktion einer auf den Mittelwert 1 normierten Rayleighverteilung $r_0(t)$ durch

$$R_{r_0}(y) \approx 1 + \frac{1}{4} J_0^2(\frac{2\pi y}{\lambda})$$

angenähert werden. Die zugehörige Autokovarianzfunktion ist dementsprechend durch

$$C_{r_0}(y) \approx \frac{1}{4} J_0^2(\frac{2\pi y}{\lambda}) \tag{3.9}$$

gegeben.
Im GSM-System beträgt die Dauer eines Zeitschlitzes $5.769 \cdot 10^{-4}$s. Geht man nun von einer vergleichsweise hohen Geschwindigkeit von 100 km/h aus, so legt die Mobilstation in diesem Zeitraum eine Strecke von nur 1.602 cm zurück. Nach Gleichung (3.9) fällt die Kovarianzfunktion innerhalb dieser Strecke nur um 5.5% ab, so daß man mit Recht davon ausgehen kann, daß die durch das Shortterm-Fading verursachten Signalpegelschwankungen innerhalb eines Zeitschlitzes vernachlässigt werden können. Bei niedrigeren Geschwindigkeiten gilt dies erst recht.

3.3 Einflüsse des Fadings auf die Systemfunktionen

In der Phase der Netzplanung werden die Standorte der Basisstationen so gewählt, daß eine flächendeckende Versorgung der gesamten Mobilfunkumgebung gewährleistet werden kann. Zu diesem Zweck werden Simulationswerkzeuge für die Funkwellenausbreitung verwendet und Vor-Ort-Messungen der Feldstärkeverteilung vorgenommen.

Zur Aufrechterhaltung der Verbindung ist in erster Linie dafür Sorge zu tragen, daß in dem vorgesehenen Empfangsbereich eine bestimmte Mindestfeldstärke nicht unterschritten wird und daß das durch Mehrwegeausbreitung gestörte Signal durch den im Empfänger integrierten Entzerrer bearbeitet werden kann. Die Auswahl der Standorte der Basistationen und der Sendeleistung wird daher so vorgenommen, daß trotz der umgebungsbedingten Abschattungssituationen die gegebenen Anforderungen erfüllt werden können. Solange sich die Mobilstation innerhalb des vorgesehenen Versorgungsgebietes einer Basisstation befindet, wird ein störungsfreier Betrieb möglich sein.
Entfernt sich nun die Mobilstation von der Basisstation, so wird infolge der Ausbreitungsdämpfung die Empfangsfeldstärke nachlassen und die Empfangsfeldstärke einer benachbarten Feststation zunehmen. Im Idealfall eines zellularen Mobilfunknetzes wird in dem Augenblick, in dem eine bessere Verbindung durch die neue Basisstation gewährleistet werden kann, der Handover-Vorgang eingeleitet.
In der Realität treten jedoch bei Realisierung des Handovers die folgenden Probleme auf. Aufgrund der oftmals komplizierten Ausbreitungssituation in der realen Mobilfunkumgebung nimmt im allgemeinen die Feldstärke beim Entfernen von der Basisstation nicht kontinuierlich ab, so daß die folgenden Überlegungen in den Entwurf eines Handover-Algorithmus miteinbezogen werden müssen:

- Die Entfernung von der Basisstation, die im GSM-System durch den Timing-Advance-Parameter erfaßt wird, kann nicht als einziges und ausschlaggebendes Kriterium für den Handover herangezogen werden.
- Falls eine Mindestempfangsleistung der neuen Basisstation bereits überschritten wurde, kann nicht garantiert werden, daß dies auch im weiteren Verlauf gewährleistet bleibt.
- Wird die Feldstärke als Kriterium verwendet, so besteht die Möglichkeit, daß nur zwischenzeitlich eine andere Basisstation mit besserer Qualität empfangen wird, die Empfangslage sich jedoch kurze Zeit später erneut ändert. In diesem Fall müßte ein weiterer Handover durchgeführt werden, der wiederum Signalisierungsaufwand im Festnetz verursacht, die Verbindungsqualität beeinträchtigt, oder - sofern die für Handover-Vorgänge vorgesehene Kapazität der Zelle nicht ausreicht - sogar zum Verbindungsabbruch führt.
- Zum Zeitpunkt der Auslösung des Handovers wird diejenige Basisstation ausgewählt, die aufgrund vorher festgelegter Kriterien die zuverlässigste Versorgung verspricht. Je nach Konstellation der Funk-

schatten und dem weiteren Verlauf der Route der Mobilstation kann es jedoch sein, daß die Auswahl einer anderen Basisstation vorteilhafter gewesen wäre, obwohl dies zum Handover-Zeitpunkt nicht unmittelbar erkennbar war.

Die derzeitigen Handover-Verfahren berücksichtigen dies wie folgt:

- Die Umschaltung erfolgt mit einer Hysterese. Das bedeutet, daß ein Handover erst dann eingeleitet wird, wenn die Feldstärke der neuen Zelle die der alten um einen bestimmen Wert überschreitet. Dieser kann aufgrund möglicher Gleichkanalstörungen jedoch nicht beliebig groß gewählt werden.
- Es werden Mittelwerte der Meßwerte verwendet, um Feldstärkeschwankungen, die sich über kurze Bereiche erstrecken, herauszumitteln. Allerdings darf auch die Anzahl der Werte, über die gemittelt wird, aufgrund der Reaktionszeit des Algorithmus nicht zu groß gewählt werden.

Wie die Untersuchungen von Mende [11] sowie praktische Untersuchungen von Mobilfunk-Netzbetreibern zeigen, kann das Problem mit den derzeitigen Handoveralgorithmen nicht zufriedenstellend gelöst werden, da die bisher ermittelten Kriterien keine ausreichende Aussage über die Verbindungsqualität beim Fortbestehen der Verbindung erlauben.
Dies hat verschiedene Auswirkungen auf die Dienstqualität und die Funktionen im Netz.

- Bei jedem unnötigen Handover werden Signalisierungsinformationen übertragen, die das Netz zusätzlich belasten.
- Für eventuelle Handover-Wünsche muß eine höhere Anzahl von Kanälen freigehalten werden. Dies verringert die Kapazität des Netzes.
- Ping-Pong-Handover vermindern die subjektiv empfundene Qualität durch Störgeräusche.
- In Einzelfällen kann eine Verbindung nicht fortbestehen, wenn kein freier Kanal in der Zielzelle zur Verfügung steht.
- Gleichkanalstörungen sind die Folge eines spät ausgelösten Handovers.

Eine ähnliche Problematik ergibt sich hinsichtlich der Steuerung der Sendeleistung. Es erhebt sich daher die Frage, wie die in der Systemarchitektur vorgesehenen Parameter optimal genutzt werden können, um eine möglichst zuverlässige Realisierung der Radio-Ressource-Management(RRM)-Funktionen sicherzustellen.

KAPITEL 4

Fahrzeuglokalisierung

Seit vielen Jahren ist die Fahrzeuglokalisierung Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Die unterschiedlichen Lösungsansätze gehen dabei von individuell verschiedenen Anwendungsgebieten und darauf abgestimmten technischen Systemen aus, die hier kurz vorgestellt werden sollen.

4.1 Verkehrsleitsysteme

Zu diesen Systemen gehören zunächst die im englischen Sprachraum unter dem Begriff IVHS (Intelligent vehicle/highway systems) bekannten Verkehrsleitsysteme, die eine Anpassung des Verkehrsflusses an die jeweiligen Verkehrsverhältnisse bewirken sollen, mit den Zielen: höhere Verkehrssicherheit, geringere Umweltbelastung, effizienter Energieeinsatz und ökonomische Verkehrsauslastung. Dies erfordert eine genaue Kenntnis der Fahrzeugposition, wenn die Intelligenz des Systems außerhalb des Fahrzeugs liegen soll. Neben den Diensten, die den Fahrer beim Planen und Finden der richtigen Route unterstützen, wird diese Art von Systemen u.a. bereits für automatische Gebührenerfassung verwendet. In jedem Fall muß die Information über den Standort des Fahrzeugs von außen zugänglich sein, um das Einfahren in einen gebührenpflichtigen Abschnitt erfassen zu können. In den Bereich der Fahrzeuglenkung gehört u.a. auch das Flottenmanagement, ein Dienst, der es dem Benutzer (z.B. ein Spediteur, Taxiunternehmer oder die Einsatzzentrale der Polizei) erlaubt, zu Dispositionszwecken den Standort der im Einsatz befindlichen Fahrzeuge abzufragen. Denkbar sind darüber hinaus Dienste wie ein automatischer Notruf.

4.2 Mobilfunksysteme

Auch für den Betrieb eines zellularen Mobilfunknetzes ist die Kenntnis der Position einer Mobilstation von Bedeutung. Dies betrifft vor allem die Funktionen, die mit der Vergabe und Verwaltung der zur Verfügung stehenden Funkkanäle in Zusammenhang stehen. Dies sind diejenigen Funktionen, die

den Aufbau und die Aufrechterhaltung einer stabilen Verbindung für die Dauer eines Gespräches oder einer Datenübertragung über die Funkschnittstelle ermöglichen. Zum Zeitpunkt des Verbindungsaufbaus wird zunächst eine Funkfrequenz und - wenn es sich um ein Zeitvielfachsystem (TDMA) handelt - auch ein Zeitschlitz zugewiesen. Wird eine hierarchische Zellstruktur verwendet, in der Zellen von unterschiedlicher Größe das gleiche Gebiet abdecken, so stellt sich bereits zu diesem Zeitpunkt die Frage, welcher Zellgröße die Mobilstation zugeordnet wird. Da die Auswahl der Zellgröße von der Geschwindigkeit abhängig ist, wäre die Kenntnis der aktuellen Fahrzeuggeschwindigkeit von Vorteil. Sie läßt sich leicht errechnen, wenn die Ortsinformation in bekannten zeitlichen Abständen ermittelt wird. Für jede bestehende Verbindung wird weiterhin aus Gründen der Störpegelreduktion die Sendeleistung von Basisstation und Mobilstation in Abhängigkeit ihres Abstandes geregelt. Zu diesem Zweck kann zwar der Zeitversatz-Parameter (Timing Advance Parameter) herangezogen werden, der im GSM-System regelmäßig ermittelt wird und die Bestimmung des Abstandes der Mobilstation von der Basisstation mit einer Genauigkeit von etwa 600m angibt. Auf diese Weise erhält man jedoch lediglich Angaben über den Abstand, nicht aber über die Richtung. Der Einfluß von Gleichkanalstörungen aus anderen Zellen ist auch von den jeweiligen geografischen Gegebenheiten sowie von Bebauung und Bewuchs abhängig. Somit erlaubt die Kenntnis des Aufenthaltsortes, die verwendete Sendeleistung besser abzustimmen und Gleichkanalstörungen weiter zu verringern.
Aus den in den Abschnitten 2.3 und 3.3 erläuterten Gründen ist die Kenntnis des Aufenthaltsortes für den Handover von besonderer Bedeutung. Die Zuverlässigkeit, mit der diese Funktion ausgeführt wird, ist entscheidend für die vom Benutzer empfundene Dienstqualität eines Mobilfunknetzes.

4.3 Bekannte Methoden

Einen Überblick über die traditionellen Methoden der Fahrzeuglokalisierung geben [12] und [13]. Im wesentlichen lassen sich die dort angeführten Methoden in drei Kategorien einteilen: Funkortungsmethoden, Koppelungsmethoden und Nahbereichsmethoden. Diese sollen im folgenden kurz beschrieben werden.
Bei allen Verfahren der *Funkortung* wird zur Positionsbestimmung ein Maß für die Entfernung zwischen dem Fahrzeug und einer Anzahl von Feststationen auf der Basis eines Funksignals verwendet. In der einfachsten Form ([14],[15]) wird für die Ausbreitungsdämpfung ein einfaches mathematisches

Gesetz angenommen und aufgrund des Verhältnisses der von den Feststationen empfangenen Feldstärke die Entfernung berechnet. Bei weiter fortgeschrittenen Methoden wird die Entfernungsbestimmung auf der Basis der Laufzeit eines Funksignals vorgenommen. In beiden Fällen ist eine Mindestanzahl von drei Feststationen erforderlich (Trilaterationsprinzip), deren Geometrie zueinander bekannt sein muß. Die Feststation kann nun die absolute Entfernung zum Fahrzeug bestimmen, indem ein von ihr ausgesandtes Signal vom Fahrzeug entweder unmittelbar oder nach einer bekannten Verzögerungszeit beantwortet wird. Die Position des Fahrzeugs ergibt sich dann als Schnittpunkt dreier Kreise, in deren Mittelpunkt sich jeweils eine Feststation befindet.
Alternativ kann auch die Differenz der Laufzeiten des Signals von jeweils zwei Feststationen betrachtet werden. Die Position des Fahrzeugs befindet sich dann im Schnittpunkt dreier Hyperbeln, deren beide Brennpunkte jeweils durch zwei Feststationen bestimmt sind. Dieses Verfahren wird, beschränkt auf zwei BTS, im C-Netz angewandt. Alternativ kann auch die Position im Fahrzeug selber bestimmt werden, wobei dann jedoch die Positionen der Feststationen zum Fahrzeug hin übertragen werden müssen. Als Maß für die Signallaufzeit dient in allen Fällen entweder die Phasenlage des Signals oder eine bekannte Pulssequenz. Die Veröffentlichung [16] enthält eine Untersuchung über die Genauigkeit solcher Methoden unter den Bedingungen der Mehrwegeausbreitung. Eine Lokalisierungstechnik, die speziell auf den in CDMA-Systemen zur Bandbreitenerweiterung verwendeten Sequenzen beruht, wird in [17] vorgestellt.
Eine Erweiterung des Multilaterationsprinzips stellt das in [18] vorgestellte Verfahren zur Zellgrenzenbestimmung dar. Hierzu werden Empfangsfeldstärkewerte von mehreren Basisstationen am Ort der Mobilstation zu einem Merkmalsvektor zusammengefaßt. Mit Hilfe eines Clusterungsverfahrens wird dieser Merkmalsvektor aufgrund vorher festgelegter Entscheidungskriterien einer der betrachteten Mobilfunkzellen zugeordnet.
In den Bereich der Funkortung gehört ebenfalls die in [19] vorstellte Methode. Sie beruht auf der Bestimmung des Einfallswinkels eines Mobilsfunksignals an der Feststation. Zu diesem Zweck werden die Feststationen mit Mehrstrahlantennen ausgerüstet, wobei die Hauptkeulen der einzelnen Erreger horizontal nebeneinanderliegende, überlappende Winkelbereiche abdecken. Ausgehend von dem Verhältnis der Signalstärke eines einfallenden Signals zu den Einzelerregern kann die Einfallsrichtung des Signals bestimmt werden. Aus den an zwei unterschiedlichen Feststationen ermittelten Winkeln wird danach die Position der Mobilstation berechnet.

Die *Koppelungsmethode* mißt ausgehend von einen bekannten Ausgangspunkt die zurückgelegte Strecke und die Bewegungsrichtung des Fahrzeugs. Das Fahrzeug muß zu diesem Zweck mit einem Odometer zur Bestimmung der Strecke, einem Kompaß zur Bestimmung des Azimuthalwinkels der Bewegung und ferner einer Elektronik, die diese Information in die Ortskoordinaten umsetzt, ausgestattet sein. Einflüsse wie Seitenwind oder veränderter Reifendruck führen bei diesen Systemen jedoch zu Fehlern, die sich aufgrund der Meßmethode akkumulieren. Um dem entgegenzuwirken muß die Ortsinformation in regelmäßigen Abständen korrigiert werden, was mit Nahbereichs-Kommunikationseinrichtungen am Straßenrand realisisiert werden kann. Außerdem besteht die Möglichkeit, auf der Basis dieser festen Marken Korekturfaktoren zu berechnen, um den systematischen Fehler auszugleichen.
Nahbereichssysteme sind in unterschiedlichen Bauformen bekannt. Ein gemeinsames Charakteristikum ist, daß der augenblickliche Standort des Fahrzeugs beim Passieren bestimmter strategisch ausgewählter Stellen mittels der dort installierten Vorrichtungen bestimmt werden kann. Je nach System variieren aktive oder passive Komponenten fahrzeug- bzw. straßenseitig. Bereits realisierte Umsetzungen dieses Verfahrens sind in die Fahrbahn integrierte magnetische Schleifen, Ultraschall- oder Infrarotsender sowie Nahbereichsmobilfunksysteme. Einen Überblick über die in der Entwicklung befindlichen Nahbereichsmobilsfunksysteme gibt z. B. [20].
In der entsprechenden Literatur finden sich zahlreiche Verfeinerungen und Abwandlungen dieser Techniken. Als einzige grundlegend neue Konzeption hat sich in den letzten Jahren die Lokalisierung mit Hilfe von Satelliten herauskristallisiert. Unter dem Namen GPS (Global Positioning System) wurde zunächst für militärische Zwecke ein System entwickelt, das mit Hilfe eigens für diesen Zweck stationierter Satelliten eine zentimetergenaue Positionsbestimmung erlaubt. Die Motivation für die Entwicklung dieses Systems liegt in den strategisch-taktischen Vorteilen, die in der genauen Kenntnis der Position eigener Truppenteile und Geräte liegt, insbesondere im Hinblick auf eine zuverlässige Freund-Feind-Erkennung. Dieses System wird von der Armee der Vereinigten Staaten von Amerika aufgebaut und betrieben. Da die von den Satelliten ausgesandten Signale natürlich von jedem empfangen werden können, es aber nicht im Interesse der USA liegt, das System für jedermann nutzbar zu machen, wurde die Nutzbarkeit bewußt eingeschränkt. Eine Ortsbestimmung ist daher in der beschriebenen Genauigkeit ohne Kenntnis eines Schlüssels nicht möglich. Dennoch ist eine zivile Nutzung mit eingeschränkter Genauigkeit realisierbar. Mit Hilfe einer ortsfesten

Bodenstation kann eine differentielle Ortsbestimmung mit einer Genauigkeit von wenigen Metern realisiert werden.

4.4 Notwendigkeit eines neuen Lokalisierungsverfahrens

Hier soll ein neuer Ansatz der Fahrzeuglokalisierung vorgestellt werden, der speziell auf die Verwendung in einem digitalen zellularen Mobilfunksystem ausgerichtet ist. Die Überlegungen wurden im Hinblick auf das GSM-System angestellt, sind jedoch mit entsprechenden Modifikationen leicht auf andere Systeme übertragbar.
Ziel ist es, innerhalb des standardisierten und bereits bestehenden Mobilfunksystems GSM eine Lokalisierung vorzunehmen, ohne daß der Benutzer ein zusätzliches Gerät anschaffen muß. Zudem soll eine Lokalisierungsgenauigkeit erreicht werden, die den Anforderungen der RRM-Funktionen entspricht.
Aus den im folgenden genannten Gründen eignen sich die im vorangehenden Abschnitt beschriebenen Verfahren dafür nicht:
Die *Nahbereichsmethoden* können bei strategisch günstiger Wahl der Standorte der straßenseitigen Installationen die notwendigen Ortsinformationen liefern. Sie erfordern allerdings umfangreichen technischen Aufwand straßenseitig, und darüber hinaus die Ausrüstung jedes Fahrzeugs mit einem geeigneten Empfänger. Zur Verwendung der Ortsinformation für RRM-Zwecke muß diese dann entweder von der Mobilstation oder den straßenseitigen Einrichtungen an die Festnetzseite übertragen werden. Da im allgemeinen der Betreiber des Mobilfunknetzes nicht zwangsläufig auch der Betreiber der Nahbereichsfunksysteme ist, würden Mehrkosten für diesen Dienst auf ihn zukommen.
Bei Anwendung der *Koppelungsmethoden* ist zumindest fahrzeugseitig eine geeignete technische Ausstattung vorzusehen. In den einfacheren Varianten muß die Ungenauigkeit durch das akkumulative Fehlerverhalten einkalkuliert werden. Abhilfe schafft die Installation fester Referenzpunkte im Gelände, die dann auch straßenseitig geeignete Vorrichtungen erfordern. In jedem Fall erfolgt die Ermittlung der Ortsinformation im Fahrzeug, so daß stets die Übertragung zum Festnetz nötig ist.
Im Gegensatz zu beiden Methoden liegt es in einem Mobilfunknetz nahe, sich der *Funkortung* zu bedienen, da einige Verbindungsparameter für Administrationszwecke ohnehin ermittelt werden. Aus Gründen der Genauigkeit kommen auf Feldstärkemeßwerten basierende Multilaterationsmethoden nicht in Frage (s.[14]).

Das GSM-System enthält bereits einen Mechanismus zur Entfernungsbestimmung. Da es sich um ein Zeitvielfachsystem (TDMA = time division multiple access) handelt, müssen die von der Mobilstation ausgesendeten Bursts (d.h. die während eines Zeitschlitzes gesendeten Pakete) genau innerhalb des dafür vorgesehenen Zeitschlitzes bei der Basisstation eintreffen. Der Laufzeitunterschied aufgrund des Abstandes von der Basisstation muß folglich kompensiert werden. Zu diesem Zweck wird der Übertragungszeitpunkt gegenüber dem Grundzeitraster der Mobilstation vorverlegt, das durch die von der Feststation eintreffenden Bursts festgelegt ist. Der notwendige Zeitversatz wird von der Basisstation durch Vergleich des Zeitrasters der eintreffenden Bursts mit dem eigenen ermittelt und alle 480 ms als sogenannter Timing-Advance-Parameter an die Mobilstation übertragen. Er wird mit der Genauigkeit der Übertragungsdauer eines Bits ermittelt. Aus den Vorgaben des GSM-Systems und der Lichtgeschwindigkeit läßt sich die örtliche Ungenauigkeit der Entfernungsbestimmung damit zu ± 300 m berechnen. Für viele Zwecke des RRM innerhalb dicht bebauter Gebiete ist dies zu hoch. Außerdem ist zu beachten, daß der TA-Parameter nur für bestehende Verkehrskanäle ermittelt wird und somit nur für *eine* Basisstation bekannt ist. Die Position der Mobilstation läßt sich infolgedessen nur mit der Genauigkeit eines Ringgebietes der Breite 600 m festlegen.
Aufgrund der systembedingten Einschränkungen kann diese Art der Funkortung lediglich als zusätzliche Hilfsfunktion eines genaueren Lokalisierungsverfahrens herangezogen werden.
Denkbar wäre beispielsweise die Ausrüstung der Basisstation mit Mehrstrahlantennen, um die in [19] vorgeschlagene Winkelbestimmung vorzunehmen. Aus zwei Gründen kommt diese Lösung hier jedoch nicht in Frage. Der finanzielle Aufwand steigt dadurch auf ein Mehrfaches, und die Lokalisierungsgenauigkeit ist mit einer Toleranz von $200 - 300$ m aufgrund der Mehrwegeausbreitung in bebauten Gebieten ebenfalls recht hoch.
Da die Ermittlung des TA-Parameters nach dem Prinzip der traditionellen Pulse-Ranging-Methoden funktioniert, würde es sich allenfalls anbieten, diesen Parameter an mehreren Basisstationen zu ermitteln. Eine Lösung wäre, eine Mobilfunkzelle durch drei Basisstationen abzudecken, die an gegenüberliegenden Seiten der Zelle installiert sind. Die Basisstationen könnten mit mehreren Antennen mit Richtcharakteristik ausgerüstet werden, die in die verschiedenen angrenzenden Zellen strahlen. Damit wäre zwar das Problem zu beseitigen, daß der Aufenthalt der Mobilstation nur auf ein Ringgebiet um eine Basisstation festgelegt werden kann, die Ungenauigkeit bei der Entfernungsbestimmung bliebe jedoch bestehen. Demgegenüber stände jedoch

ein deutlich erhöhter Signalisierungsverkehr im Netz.
Die Existenz eines satellitengestützten Systems wie GPS beweist, daß grundsätzlich adequate Technologien vorhanden sind, um die Anforderungen bei der Fahrzeuglokalisierung zu erfüllen, auch wenn das GPS in seiner jetzigen Form für die angestrebten Ziele nur begrenzt nutzbar ist. Bei einer Massenfertigung von GPS-Empfängern dürfte unter heutigen Bedingungen der Preis in einer Größenordnung von $50 liegen und ist damit für jeden Fahrzeugbesitzer erschwinglich. Es muß berücksichtigt werden, daß bei Verwendung des GPS die Ortsinformation zunächst fahrzeugseitig vorliegt und erst durch ein modifiziertes GSM-Protokoll nutzbar gemacht werden könnte.
Die vorliegende Arbeit verfolgt einen anderen Lösungsansatz, indem die charakteristischen Eigenschaften von Mobilfunkmeßdaten aus einem neuen Blickwinkel interpretiert und ihre Verwendbarkeit für die Lokalisierung von Mobilstationen nachgewiesen wird. Angestrebt wird die Entwicklung eines Lokalisierungsmechanismus, der weder an die Mobilstationen noch an die Basisstationen erhöhte Hardwareanforderungen stellt, sondern lediglich durch die entsprechende Modifikation bei der Auswertung der eingehenden Parameter realisiert werden kann.

KAPITEL 5

Lokalisierung auf der Basis von Feldstärkemustern

In Abschnitt 2.3 wurde die Bedeutung des Leistungsmerkmals Handover für moderne Mobilfunksysteme herausgestellt. Aus den dort beschriebenen Gründen ist die Leistungsfähigkeit eines Systems in hohem Maße von der Zuverläßigkeit der Handover-Entscheidung und der Sendeleistungssteuerung abhängig. In Abschnitt 3.3 wurde darstellt, inwieweit durch topologische und morphologische Faktoren bedingte Feldstärkeschwankungen die Handoversteuerung bei den derzeit verwendeten Algorithmen beeinträchtigen. Da die Kenntnis des Aufenthaltsortes der Mobilstation dieses Problem lösen würde, wurden im vorigen Kapitel einige Verfahren auf ihre Anwendbarkeit für die Lokalisierung von Mobilteilnehmern untersucht. Aus den beschriebenen Gründen eignen sie sich für diesen Zweck jedoch nur bedingt oder gar nicht.

5.1 Ansatz für ein alternatives Verfahren

Die bisher angestellten Betrachtungen zu dieser Thematik gehen durchgängig davon aus, daß sich die durch die Umgebung bedingten Feldstärkeschwankungen störend auf die Systemsteuerung auswirken und daher durch geeignete Maßnahmen (Mittelung der Meßwerte, Hysterese bei der Handover- und Leistungssteuerung) aus dem Bewertungsprozeß beseitigt werden müssen. Dabei wird allerdings nicht berücksichtigt, daß gerade die Schwankungen des Mobilfunksignals eine Information über die Charakteristik der Umgebung beinhalten.
Bild 5.1 zeigt schematisch, wie sich die geografischen Gegebenheiten auf das Mobilfunksignal auswirken und wie sie sich in den Mobilfunkmeßwerten widerspiegeln. Es ist zu erkennen, daß sich Strukturen der Umgebung in charakteristischen Schwankungen des Mobilfunksignals niederschlagen. Die über der gefahrenen Strecke aufgezeichnete Feldstärke besitzt demnach einen für die gegebene Geografie charakteristischen Verlauf. Dieser wird im folgenden mit dem technischen Begriff „Muster“ bezeichnet.

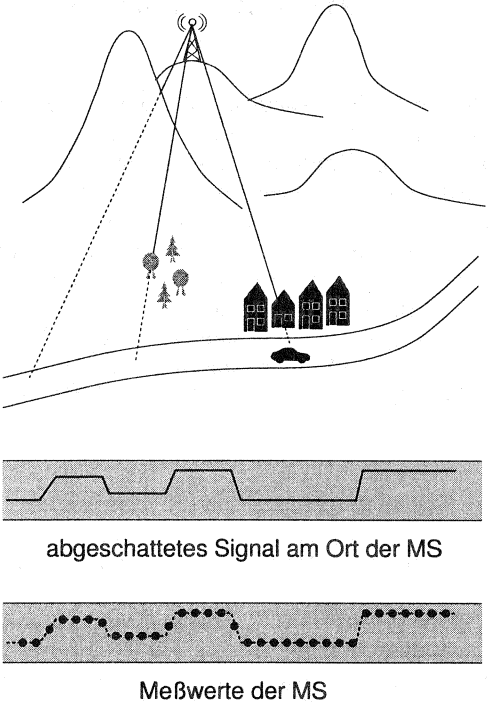


Bild 5.1: Entstehung von Feldstärkemustern

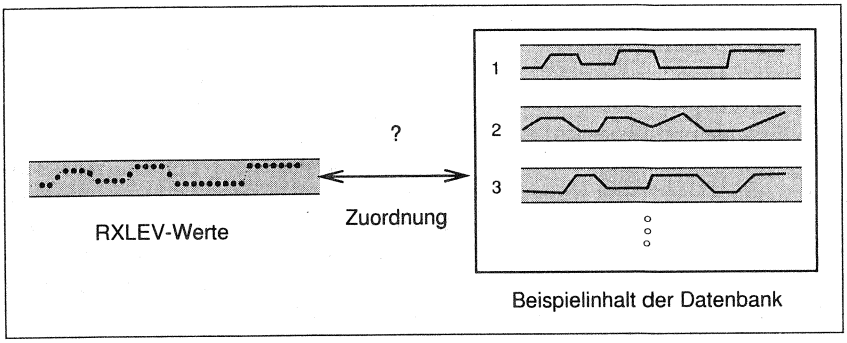


Bild 5.2: Auswertung der Feldstärkemuster

Das im Anschluß vorgestellte Verfahren zielt darauf ab, durch geeignete

Auswertung der Feldstärkemuster
Rückschlüsse auf die Umgebung zu ziehen,

durch die sich die Mobilstation bewegt hat.
Dies setzt voraus, daß das System eine Datenbank besitzt, in der die Feldstärkemuster zusammen mit einer Ortsinformation abgelegt sind, so daß durch Vergleich aktueller Feldstärkemuster mit der Referenzinformation in der Datenbank auf die Position der Mobilstation geschlossen werden kann. (Siehe Schema in Abbildung 5.2).
Wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, liefert das GSM-System alle 480 ms Meßwerte der Feldstärke für Verwaltungszwecke. Diese stellen ein diskretes Abbild der Feldstärkeverteilung auf dem Weg der Mobilstation dar. Das Verfahren, das hier vorgestellt werden soll, stützt sich auf diese Meßwerte, und es wird in den folgenden Kapiteln untersucht, welche Anzahl von Meßwerten erforderlich ist und welche Lokalisierungsgenauigkeit erreicht werden kann.

5.1.1 Praktische Umsetzung

Da im GSM-System die Ermittlung der notwendigen Meßwerte bereits im Standard vorgesehen ist, kann die Lokalisierung allein durch Installation eines Mustererkennungssystems im Festnetz realisiert werden. Es ist kein zusätzliches Gerät für den Teilnehmer erforderlich.
Sinnvollerweise erfolgt die Einrichtung im unmittelbaren Zugriffsbereich des BSC, da so nur die für die betreffende Zelle erforderliche Information ge-

halten werden muß. Für die Einleitung des Handovers muß die Information über die Zielzelle, die sich aus dem Aufenthaltsort unmittelbar vor dem Handover eindeutig ergibt, an die MSC übermittelt werden.
Eine grundlegende Frage in diesem Zusammenhang betrifft die Speicherung und Verwaltung der erforderlichen Feldstärkedaten. Wie in Abschnitt 7.3.3 hergeleitet wird, sollte für die räumliche Diskretisierung der Feldstärkedaten in der Datenbank ein Abstand von etwa $4m$ zugrunde gelegt werden. Geht man von einem maximalen Zellradius von $30km$ aus, so wären zur vollständigen Beschreibung dieses Gebietes ca. $176 \cdot 10^6$ Datensätze erforderlich. Aus zwei entscheidenden Gründen jedoch muß in der Praxis nicht auf diese umfangreiche Datenmenge zurückgegriffen werden.

- Zum einen ist es nicht beabsichtigt, das gesamte Gebiet flächendeckend zu beschreiben. Vielmehr sollen in der Datenbank nur feste Routen, auf denen sich die Mobilstationen bewegen können, abgebildet werden. Zwar kann es sich dabei je nach Umgebung um einige hundert Straßenzüge handeln. Doch ist zu berücksichtigen, daß in Gebieten mit hoher Teilnehmerdichte die Zellradien deutlich kleiner als $30km$ gewählt werden, während große Zellradien nur in ländlichen Gebieten gewählt werden, in denen die Dichte der Verkehrswege niedriger ist. Unter diesen Gesichtspunkten liegt die realistische Größe einer Datenbank bei einigen wenigen Megabyte pro Zelle.
- Bei der aktuellen Auswertung der Daten braucht nicht die gesamte Zelle betrachtet zu werden. Wie in Abschnitt 2.3.1 erläutert wurde, ist mit Hilfe des Timing-Advance-Paramters, der im GSM-System für jede bestehende Verbindung zur Verfügung steht, eine Eingrenzung des Aufenthaltsortes der Mobilstation auf ein Kreisringgebiet von ca. $600m$ Breite möglich. Dementsprechend verringert sich für eine konkrete Verbindung die im Einzelfall zu analysierende Datenmenge auf einen Bruchteil des Datenbestandes der Zelle. Eine weitere Reduktion des zu analysierenden Datenvolumens läßt sich durch Betrachtung der Nachbarzellen erreichen. Wenngleich auch keine genaue Standortbestimmung aufgrund der Empfangsfeldstärke der Nachbarbasisstationen möglich ist, so kann dennoch wegen der begrenzten Ausbreitung der Funkwellen eine Eingrenzung des Aufenthaltsortes auf ein Teilgebiet der Zelle vorgenommen werden. (Siehe hierzu auch [21]).

Diese Überlegungen lassen den Schluß zu, daß die für eine spezifische Verbindung zu betrachtende Datenmenge von der Dichte des Wegenetzes und dem augenblicklichen Abstand der Mobilstation von der Basisstation abhängt, da dieser die Größe des Kreisringgebietes bestimmt. Im Durchschnitt ist

von einigen hundert Kilobyte für das aktuell zu betrachtende Gebiet auszugehen, wobei sich der Umfang weiterhin reduziert, sobald die Mobilstation erstmals erfaßt wurde.
Da zur Auswahl des geeigneten Mustererkennungsverfahrens die Eigenschaften der Mobilfunkmeßdaten zu berücksichtigen sind, werden diese in den folgenden Abschnitten analysiert.

5.2 Eigenschaften der Mobilfunkmeßdaten

Wie in Kapitel 3 erläutert, wirken im wesentlichen drei Einflüsse auf die Feldstärke am Ort der Mobilstation ein

- der Pfadverlust aufgrund von Entfernung und Landschaft zwischen Basisstation und Mobilstation
- die Abschattungen durch Hindernisse in der Umgebung der Mobilstation
- das Shortterm-Fading infolge der Mehrwegeausbreitung.

Ferner wirken u.a. zeitlich veränderliche Faktoren, wie etwa in der Nähe der Mobilstation befindliche Fahrzeuge.
Die durch den Mehrwegeschwund verursachten Signaleinbrüche geben keinen Aufschluß über die konkrete Konstellation der sie verursachenden reflektierenden oder beugenden Hindernisse. Vielmehr kommen sie durch die Überlagerung einer Vielzahl von Wellenzügen zustande, so daß ein Rückschluß auf ein einzelnes dieser Hindernisse nicht möglich ist. Sie sollen daher hier so betrachtet werden, als würden sie einer statistischen Verteilung unterliegen, obschon sie deterministisch durch die Umgebung bestimmt werden.
Im Fall der durch Abschattungen bedingten Signalschwankungen läßt sich hingegen stets ein Hindernis oder eine Gruppe von Hindernissen im Ausbreitungspfad ausmachen, die als unmittelbare Ursache für die Signaleinbrüche identifiziert werden können. Die auf dem Weg der Mobilstation beobachtete Feldstärke ist folglich ein direktes Abbild der Landschaft und der Bebauungssituation in der Umgebung der Mobilstation.
Umgekehrt läßt sich nicht aus einem Feldstärkemeßwert an einem einzigen Ort auf die Topographie und Morphologie der Umgebung schließen. Die Gesamtkonstellation der Hindernisse ist jedoch einzigartig und für ein bestimmtes Gebiet charakteristisch.
Es liegt daher die Vermutung nahe, daß auch die durch Abschattungen bedingten Feldstärkeschwankungen charakteristisch sind, wenn sie in einer

hinreichend großen Umgebung betrachtet werden. Das bedeutet, daß bei Beobachtung der Feldstärke auf dem Weg einer in Bewegung befindlichen Mobilstation über eine hinreichend lange Strecke aufgrund der dort verzeichneten Feldstärkeschwankungen auf die Umgebung geschlossen werden kann.
Darüber hinaus gibt es eine Reihe weiterer Einflüsse auf die Funkverbindung zwischen Basisstation und Mobilstation. Dabei sind zu nennen

- die Richtcharakteristik der Antennen
- die Höhe der Empfangsantenne der Mobilstation
- Wettereinflüsse wie Regen, Nebel, Hagel und Schnee.

Die genannten Faktoren sind für die hier beabsichtigte Anwendung jedoch ohne Relevanz. Im allgemeinen besitzen die Antennen der Mobilstation in horizontaler Richtung keine Richtcharakteristik. Die elektrischen Eigenschaften der Antenne können daher durch einen konstanten Faktor berücksichtigt werden. Für die Basisstation werden entsprechend den geografischen Gegebenheiten und dem Standort der Basisstation zwar Antennen mit Richtwirkung verwendet; die sich dadurch ergebenden Änderungen der Feldstärke können jedoch wiederum als charakteristisch für das Gebiet betrachtet werden, in dem sich die Mobilstation bewegt.
Nach den Überlegungen in Zusammenhang mit dem Einfluß der Antennenhöhe in Abschnitt 3.1, basierend auf der Betrachtung eines direkten und eines grundreflektierten Pfades, ist die Empfangsleistung proportional zum Quadrat der Antennenhöhe. Da diese konstant ist, kann ihr Einfluß ebenfalls durch einen konstanten Faktor wiedergegeben werden. Es kann allerdings vorkommen, daß je nach Antennenhöhe unterschiedliche Abschattungen wahrgenommen werden. Dies ist im Einzelfall zu untersuchen und müßte durch eine Fallunterscheidung berücksichtigt werden.
Die erwähnten Wettereinflüsse verursachen eine zusätzliche entfernungsabhängige Ausbreitungsdämpfung. Allerdings kann diese bei den im Mobilfunkbereich verwendeten Frequenzen vernachlässigt werden. So liegt der Dämpfungskoeffizient für Regen mit einer Regenrate von $R = 150$ mm/h deutlich unter $\alpha_R = 10^{-2}$ dB/km, wobei diese Regenraten in Europa ohnedies nur selten erreicht werden.
Dies führt zu der Überlegung, auf der Basis der für ein Gebiet charakteristischen Feldstärkeschwankungen eine Lokalisierung der Mobilstation vorzunehmen. Aufgrund der im vorstehenden beschriebenen Einflüsse ist die Empfangsleistung jedoch nur bis auf einen konstanten Faktor durch die umgebungsbedingte Ausbreitungssituation bestimmt. Für das Lokalisierungsverfahren müssen daher die relativen Änderungen betrachtet werden. Auf

dB-Werte bezogen bedeutet die Berücksichtigung eines konstanten Faktors eine Verschiebung um einen konstanten Summanden, so daß eine Folge von Meßwerten durch eine geeignete Normierung in ein von der jeweiligen Mobilstation unabhängiges Muster überführt werden kann.

5.2.1 Einflüsse der Meßwerterfassung

In Abschnitt 3.2 wurde die Rayleighverteilung als Verteilungsfunktion der Einhüllenden eines Mobilfunksignals in Szenarien mit Mehrwegeausbreitung genannt. Daraus wurde die Verteilungsdichtefunktion des Signalpegels in dB hergeleitet, die in Abbildung 5.3 dargestellt ist.

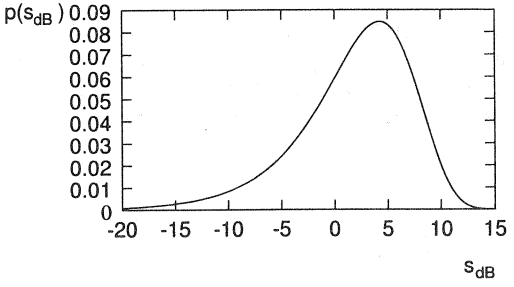


Bild 5.3: Verteilungsdichtefunktion des Empfangspegels

Da sich die Verteilungsdichtefunktion der Summe von Zufallsvariablen bei statistischer Unabhängigkeit durch Faltung der Verteilungsdichtefunktionen der einzelnen Zufallsvariablen ergibt, kann die Verteilungsdichte der Summe von f Werten mit gleicher Verteilung aus der gegebenen Verteilungsdichtefunktion durch f-fache Faltung dieser Funktion mit sich selber gewonnen werden. Die Verteilungsdichtefunktion des Mittelwertes dieser f Werte ergibt sich durch Faltung sowie anschließende Stauchung um und Multiplikation mit dem Faktor f. Im vorliegenden Fall weist die Verteilungsdichtefunktion des Signalpegels bereits gewisse Ähnlichkeit mit einer Gaußverteilung auf, so daß die sich durch Faltung ergebende Verteilungsdichtefunktion des Mittelwertes in sehr guter Näherung durch eine Normalverteilung beschrieben werden kann. Dies ist bereits bei einer Mittelung über die (im GSM-System) minimale Zahl von 12 Werten pro Rahmen der Fall und gilt umso mehr bei der Berücksichtigung der im Normalbetrieb vorliegenden 100

Meßwerte pro Rahmen. Diese Tatsache greift Kapitel 7.3.6 bei der Modellierung der Meßdaten auf. Die Parameter dieser Normalverteilung ergeben sich aus dem in Abschnitt 3.2 berechneten Mittelwert und der dort angegebenen Streuung. Es ist zu bemerken, daß die Streuung unabhängig von dem aktuellen Mittelwert ist. Charakteristisch für den jeweiligen Ort, an dem die Messung durchgeführt wird, ist daher nur der Mittelwert der Verteilung, und diese Mittelwerte müssen in der Datenbank zusammen mit der Ortsinformation gespeichert werden. Die Streuung ist, sofern sich die Mobilstation in einer Umgebung mit Mehrwegeausbreitung befindet, hingegen nahezu konstant.

5.2.2 Einflüsse des Mobilitätsverhaltens

Wie aus Abbildung 5.4 erkennbar ist, führt das individuelle Verhalten der Mobilstation zu einer Streckung oder Stauchung des betrachteten Musters. Führt man die Erkennung nun anhand von Meßwerten durch, die einer zeitlichen diskretisierten Darstellung entsprechen, müssen zwei Effekte berücksichtigt werden.

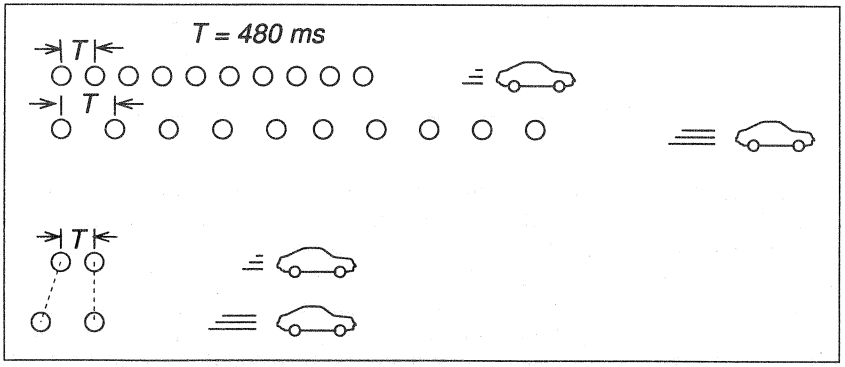


Bild 5.4: Einflüsse der Fahrzeuggeschwindigkeit auf die Meßwerte. Oben: erfaßte Strecke über eine Meßwertsequenz. Unten: Streckenabschnitt, der in einem Meßwert repräsentiert ist.

Zum einen wird man für eine Erkennung eine konstante Anzahl von Meßwerten heranziehen müssen. Das bedeutet, daß entsprechend der jeweiligen

Geschwindigkeit der Mobilstation während des Zeitraumes, in dessen Verlauf die Meßwerte erfaßt werden, eine unterschiedliche Strecke durchfahren wird. Die Orte, an denen sich die Mobilstationen zu den Zeitpunkten der Erfassung der Meßwerte befinden, werden dann individuell verschieden sein, auch wenn sie sich zu Beginn am gleichen Ort befunden haben (Abbildung 5.4 oben). Entsprechend werden die Pegelmeßwerte unterschiedliche Abschattungen der Umgebung repräsentieren. Dies bedeutet, daß Sequenzen von Meßwerten, die unterschiedliche Teilbereiche des in der Umgebung vorzufindenden Feldstärkemusters wiedergeben, den gleichen Aufenthaltsort der Mobilstation repräsentieren können.
Zum anderen muß berücksichtigt werden, daß innerhalb des Zeitintervalls von 480 ms je nach Geschwindigkeit eine unterschiedliche Strecke durchfahren wird. Auch wenn die Meßintervalle zweier Mobilstationen mit unterschiedlicher Geschwindigkeit am gleichen Ort enden, wird die Mittelung folglich über eine geringfügig unterschiedliche Strecke erfolgen (Abbildung 5.4 unten). Diese Unterschiede sind allerdings bei geringfügig unterschiedlichen Geschwindigkeiten ebenfalls gering. Typische abschattungsbedingte Schwankungen der Feldstärke erstrecken sich in der Regel über einen Bereich von zehn bis zu einigen zehn Metern. Im Vergleich dazu beträgt die von einer Mobilstation mit der Geschwindigkeit 50 km/h im betrachteten Intervall durchfahrene Strecke etwa 6,5 m und liegt damit unter der Entfernung, in der charakteristische Änderungen zu erwarten sind. Die durch diesen Effekt verursachten Variationen der Meßwerte an einem bestimmten Ort sind folglich geringfügig und sollen durch eine statistische Verteilung berücksichtigt werden.

5.3 Auswahl eines Mustererkennungsverfahrens

5.3.1 Grundlagen der Mustererkennung

Mustererkennung bedeutet die Zuordnung eines Objektes zu einer Klasse aufgrund charakteristischer Merkmale. Der Vorgang der Mustererkennung stellt daher einen zweistufigen Prozeß dar:
Der erste Schritt besteht in der formalen Beschreibung des Objektes mit Hilfe einer Anzahl charakteristischer Merkmale in Form eines Merkmalsvektors. Die Auswahl der Merkmale wird im Vorfeld getroffen und muß so erfolgen, daß die Unterscheidbarkeit der Objekte gewährleistet ist. Das bedeutet, daß einerseits kein zur Unterscheidung benötigtes Merkmal unberücksichtigt bleibt, gleichzeitig soll jedoch eine Reduktion auf die wesentlichen Unter-

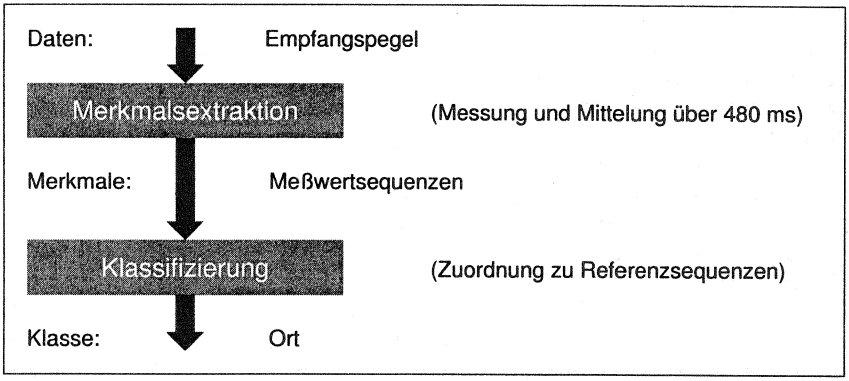


Bild 5.5: Prinzip der Fahrzeuglokalisiserung mit Hilfe eines Mustererkennungsverfahrens

scheidungskriterien erfolgen. Dieser Vorgang wird als Merkmalsextraktion bezeichnet.
Im vorliegenden Fall ist dieser Schritt leicht zu realisieren. In Form der Pegelmeßwerte liegt bereits ein diskretisiertes Abbild der Ausbreitungssituation in der Umgebung vor, durch die sich die Mobilstation bewegt. Insofern kann der Vorgang der Meßdatenerfassung, wie sie im GSM-System realisiert ist, als Merkmalsextraktionsschritt betrachtet werden. Eine Folge von Meßwerten stellt daher einen Merkmalsvektor im Sinne der Mustererkennung dar. Zu untersuchen ist, welche Anzahl von Meßwerten erforderlich ist, um ein hinreichend charakteristisches Abbild eines durchfahrenen Streckenabschnittes zu geben. Ziel ist, die Anzahl der Merkmale, die hier den einzelnen Meßwerten entsprechen, möglichst gering zu halten.
Im zweiten Schritt wird ein gegebener Merkmalsvektor einer Klasse zugeordnet. Man nennt dies Klassifikation. Mathematisch ausgedrückt stellen die Klassen Unterräume eines Merkmalsraumes von der Dimension der Merkmalsvektoren dar und es gilt, ein geeignetes Abstandsmaß in dem Merkmalsraum zu finden, dessen Minimierung der Zuordnung zu der richtigen Klasse entspricht.
Dafür ist es erforderlich, die Eigenschaften der zu erkennenden Muster zu betrachten. Für die aus Pegelmeßwerten bestehenden Muster wurden diese bereits in den vorangehenden Abschnitten ausführlich erläutert.

Grundlegend und entscheidend bei der Auswahl eines geeigneten Mustererkennungsverfahrens für die hier vorliegende Problemstellung ist, daß die zu erkennenden Muster in jeder beliebigen Streckung und Stauchung auftreten können und diese wiederum auch nicht konstant sein müssen. Dies steht im Gegensatz zu Mustern, wie sie etwa bei der Schriftzeichenerkennung [22, 23] auftreten, die skalierbar sind; das heißt, sie können auf eine genormte Größe gebracht werden. Auf der Basis der normierten Muster kann dort anschließend die Mermalsextraktion vorgenommen werden. Die einzelnen Merkmale, also hier die Pegelmeßwerte an einem Ort, weisen überdies eine gewisse Streuung auf. Bei näherer Betrachtung dieser Eigenschaften stellt man Ähnlichkeiten mit der Problemstellung der Spracherkennung fest. Diese Parallelen sollen im folgenden Abschnitt untersucht werden.

5.3.2 Verwandtschaft zur Spracherkennung

Die grundlegende Aufgabe der Spracherkennung besteht darin, einzelne, aus einer Abfolge von Phonemen bestehende Wörter wiederzuerkennen. Sie sind durch die folgenden Eigenschaften gekennzeichnet:

- Die Abfolge der Phoneme ist relevant. Eine andere Abfolge kann unter Umständen einem anderen Wort mit einer anderen Bedeutung entsprechen, oder sie korrespondiert mit keinem bekannten Wort.
- Einzelne Phoneme werden von manchen Sprechern ausgelassen.
- Die Aussprache der Phoneme variiert.
- Die Sprechgeschwindigkeit ist je nach Sprecher unterschiedlich
- Die Dauer der einzelnen Phoneme innerhalb einer Phonemgruppe (d. h. eines Wortes), insbesondere bei Selbstlauten, ist sprecherindividuell.
- Möglicherweise werden gleiche Phoneme unterschiedlich geschrieben bzw. Wörter mit gleicher Phonemfolge werden unterschiedlich geschrieben. In diesem Fall kann der Sinn nur aus dem Kontext ermittelt werden.

Diese Grundmerkmale der Sprache korrespondieren mit folgenden Eigenschaften der Mobilfunkdaten:

- Die Pegelmeßwerte bilden die Mobilfunkumgebung ab, während die Mobilstation die Umgebung durchfährt. Die Reihenfolge der Meßwerte ist daher relevant.
- Je nach Fahrzeuggeschwindigkeit deckt die Meßwertsequenz eine kürzere oder längere Strecke ab, so daß bei niedrigeren Geschwindigkeiten nur ein kleinerer Ausschnitt der Landschaft repräsentiert

ist. Meßwerte, die bei höherer Geschwindigkeit der Mobilstation auftreten, fallen also weg.

- Die Meßwerte variieren infolge des Mehrwegeschwundes, infolge von Meßungenauigkeiten und der abhängig von der Geschwindigkeit durchfahrenen Strecke in einem Meßintervall.
- Die realen Feldstärkeschwankungen der Umgebung werden mit unterschiedlicher Geschwindigkeit durchlaufen.
- Die Mobilstationen halten sich unterschiedlich lange im Bereich einer Abschattung auf.
- In Bereichen mit wenig charakteristischen Mustern, vorwiegend in flacher ländlicher Umgebung, treten häufig ähnliche Meßwertsequenzen auf. In diesen Fällen muß die Länge der Sequenzen erhöht werden.

Aufgrund dieser Ähnlichkeit der Problemstellung liegt es nahe, für die Mustererkennung ein Verfahren zu verwenden, das in der Sprachverarbeitung bereits mit Erfolg eingesetzt wird. Während in älteren Veröffentlichungen für diesen Anwendungsbereich oft Verfahren auf der Basis dynamischer Programmierung verwendet wurden (siehe z. B. [37, 38, 39]), werden in neuerer Zeit ausschließlich Verfahren angewendet, die auf Hidden-Markov-Modellen basieren. Die Anwendbarkeit eines solchen Verfahrens für die hier vorliegende Fragestellung wird daher im folgenden untersucht.
Bereits an dieser Stelle sei gesagt, daß Methoden auf der Basis von Hidden-Markov-Modellen sich für die beiden verwandten Problemstellungen hervorragend eignen, da diese Modelle eine zutreffende mathematische Beschreibung der zu erkennenden Muster erlauben. Der eigentliche Erkennungsvorgang beruht auf der Berechnung der Wahrscheinlichkeit, daß ein konkretes Muster mit dem Modell übereinstimmt.
In der Terminologie der Mustererkennung entspricht diese Wahrscheinlichkeit dem gesuchten Abstandsmaß.

KAPITEL 6

Hidden-Markov-Modelle (HMM)

6.1 Grundlagen

Einige natürliche Vorgänge sind nicht in einer Weise durch physikalische Gesetze beschreibbar, daß ihr Verhalten zu einem bestimmten Zeitpunkt sich deterministisch aus den bisherigen Beobachtungen folgern läßt. Solche Vorgänge bezeichnet man als stochastische Prozesse.
Da derartige Vorgänge für weite Bereiche der Naturwissenschaften, aber auch in den Wirtschafts- und Sozialwissenschaften von außerordentlicher Bedeutung sind, hat sich als eigenständiger Zweig der Mathematik die Wahrscheinlichkeitstheorie entwickelt, die sich mit der Beschreibung und Modellierung solcher Vorgänge beschäftigt. Ein physikalischer Vorgang wird dabei als Zufallsexperiment aufgefaßt und die Menge aller möglichen Ergebnisse ω als Ergebnisraum Ω bezeichnet. Ein Ereignis A, $A \subseteq \Omega$ tritt ein, wenn das Elementarereignis ω Element der Menge A ist. Jedem Ereignis A wird der Wert $P(A)$, mit $0 \leq P(A) \leq 1$, als Wahrscheinlichkeitsmaß des Ereignisses zugeordnet.
Ferner wird als Zufallsvariable X eine Funktion bezeichnet, die jedem Ergebnis ω einen Wert $X(\omega)$ aus einer Menge E zuordnet. Handelt es sich bei der Menge E um eine endliche oder eine abzählbar unendliche Menge, so spricht man von einer diskreten Zufallsvariablen.
Nach der Begriffsvorstellung der Wahrscheinlichkeitstheorie ist ein stochastischer Prozeß mit dem Zustandsraum E nun eine Menge $\{X_t; t \in T\}$ von Zufallsvariablen X_t mit Parameter t. Ist die Menge T zählbar, so handelt es sich um einen Prozeß mit diskretem Parameter, anderenfalls spricht man von einem kontinuierlichen Parameter. Gewöhnlich steht das Parameter t fur die Zeit; X_t beschreibt den Zustand des Systems zum Zeitpunkt t.

6.1.1 Markov-Prozeß

Der spezielle Fall eines Zufallsprozesses $\{X_n; t \in N\}$ mit abzählbarem Zustandsraum E und diskretem Parameter t wird als *diskreter Markovprozeß erster Ordnung* bezeichnet, sofern der Wert der Zufallsvariable X_{t+1} nur

von X_t abhängt, d.h. wenn gilt

$$P(X_{t+1} = S_i | X_0, \ldots, X_t) = P(X_{t+1} = S_i | X_t) \tag{6.1}$$

Gewöhnlich sagt man in diesem Fall, der Prozeß befindet sich zur Zeit t im Zustand S_i. Das System wird demgemäß zu diskreten Zeitpunkten durch seinen Zustand X_t beschrieben.
Da das Folgeverhalten des Prozesses nur von seinem augenblicklichen Zustand X_t abhängt, läßt dieser sich in Form einer sogenannten Markov-Kette (siehe Abbildung 6.1) visualisieren. Die Pfeile deuten dabei an, daß jeweils zu diskreten Zeitpunkten t ein Übergang in einen neuen Zustand stattfindet.

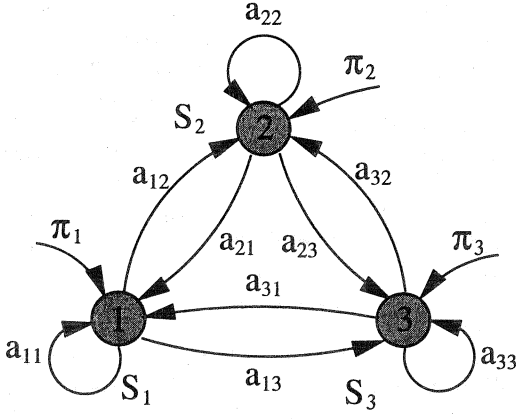


Bild 6.1: Markov-Kette

Für jeden Zustand S_i können die bedingten Wahrscheinlichkeiten

$$a_{ij} = P[q_t = S_j | q_{t-1} = S_i], \qquad 1 \leq i, j \leq N \tag{6.2}$$

mit

$$a_{ij} \geq 0 \tag{6.3}$$

und

$$\sum_{j=1}^{N} a_{ij} \stackrel{!}{=} 1 \tag{6.4}$$

angegeben werden, mit der sich der Prozeß zum Zeitpunkt $t+1$ im Zustand S_j befindet. Diese Werte werden als Übergangswahrscheinlichkeiten bezeichnet.
Die Wahrscheinlichkeit $p_i(d)$ des diskreten Markov-Prozesses, daß das System d Zeittakte im Zustand i verweilt, läßt sich aus der Übergangswahrscheinlichkeit a_{ii} auf einfache Weise berechnen. Sie ist gleich der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Zustandsfolge

$$O = \{\underset{0}{S_i}, \underset{1}{S_i}, \underset{2}{S_i}, \cdots, \underset{d-1}{S_i}, \underset{d}{S_j \neq S_i}\}$$

und wird daher wie folgt berechnet

$$\begin{aligned} P(O|X_t = S_i) &= P(X_{t+d} \neq S_i | X_{t+d-1} = S_i) \cdot \\ &\quad \cdot \prod_{n=0}^{d-2} P(X_{t+n+1} = S_i | X_{t+n} = S_i) \\ &= a_{ii}^{d-1}(1 - a_{ii}) = p_i(d) \end{aligned} \tag{6.5}$$

Sofern es sich nicht um einen stationären Prozeß handelt, ist zur vollständigen Beschreibung eine Angabe erforderlich, in welchem Zustand sich der Prozeß zum Zeitpunkt $t = 0$ befindet. Dies kann in Form der sogenannten Anfangswahrscheinlichkeiten π_i geschehen, wobei gilt

$$\pi_i = P[X_0 = S_i], \qquad 1 \leq i \leq N \tag{6.6}$$

Auch hier gilt die Vollständigkeitsbedingung

$$\sum_{i=0}^{N} \pi_i \stackrel{!}{=} 1 \tag{6.7}$$

6.1.2 Hidden-Markov-Prozeß

Der im vorangehenden Abschnitt beschriebene stochastische Prozeß wird *beobachtbarer Markov-Prozeß* genannt, sofern sich die Zustände des Systems entweder unmittelbar beobachten lassen, oder es eine Funktion $f(X(\omega))$ gibt, die jedem X eindeutig einen Wert zuweist. Diese Annahme ist jedoch für einige Anwendungen zu restriktiv. Bei einigen Prozessen nämlich können

- ein und demselben Zustand unterschiedliche Beobachtungswerte zugeordnet werden, deren Auftreten wiederum einer Zufallsverteilung unterliegt

- gleiche Beobachtungswerte in unterschiedlichen Zuständen auftreten.

In diesen Fällen ist eine eindeutige Zuordnung zwischen einem Beobachtungswert und dem Zustand des Prozesses nicht möglich. Von einem Beobachtungswert kann daher nicht auf den Zustand des zugrundeliegenden Prozesses geschlossen werden. Der zugrundeliegende Markov-Prozeß ist folglich nicht beobachtbar. Aus diesem Grund werden solche Prozesse als *Hidden-Markov-Prozesse* bezeichnet.
Man kann sich dies am Beispiel mehrerer Urnen verdeutlichen, die jeweils Kugeln unterschiedlicher Farbe beinhalten. Einem Beobachter, dem eine willkürlich gezogene Kugel präsentiert wird, ist es nicht möglich, auf die Urne zurückzuschließen, aus der die Kugel entnommen wurde, sofern Kugeln dieser Farbe in mehreren Urnen vorhanden sind.
Zusätzlich zu den Parametern des zugrundeliegenden Markov-Prozesses ist bei Hidden-Markov-Prozessen für jeden Zustand eine Verteilungsfunktion für die möglichen Beobachtungswerte anzugeben. Ein Hidden-Markov-Prozeß läßt sich demgemäß durch die folgenden drei Sätze von Parametern beschreiben:

1. Die Matrix der *Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten* $A = \{a_{ij}\}$ des zugrundeliegenden Markov-Prozesses, wobei für die einzelnen a_{ij} Gleichung 6.2 gilt.
2. Die Matrix der *Ausprägungswahrscheinlichkeiten* $B = \{b_j(k)\}$. $b_j(k)$ beschreibt hierbei die Wahrscheinlichkeit, mit der das Symbol v_k dem Zustand j zugeordnet wird.
3. Die Matrix der *Anfangswahrscheinlichkeiten* $\pi = \{\pi_i\}$, wobei die einzelnen π_i die Wahrscheinlichkeit beschreiben, daß diese sich zu Beginn der Beobachtungssequenz in einem Zustand i befinden und entsprechend der Gleichung 6.6 angewendet werden.

6.2 Mögliche Strukturen

Primäres Ziel bei der Nachbildung natürlicher Vorgänge ist die Auswahl eines Modells, das die Eigenschaften des Prozesses sowohl *vollständig* als auch möglichst *einfach* wiedergibt. Im Fall von Hidden-Markov-Modellen (im folgenden Text abgekürzt HMM) besteht durch die nachfolgend beschriebene Wahl der Parameter die Möglichkeit, das Modell dem modellierten Prozeß anzupassen.
Das in Abbildung 6.1 skizzierte Modell erlaubt den Übergang von jedem Zustand S_i in jeden anderen Zustand S_j erlaubt. Durch die Vorgabe, daß

geeignete Übergangswahrscheinlichkeiten verschwinden, läßt sich ein System modellieren, das nicht von jedem beliebigen Zustand in jeden anderen übergehen kann. Von weiterem Interesse soll der spezielle Fall sein, in dem gilt

$$a_{ij} = \begin{cases} 0 & \text{für} \quad j < i \\ \text{beliebig} & \text{sonst} \end{cases} \tag{6.8}$$

$$\text{mit} \qquad \sum_{j=0}^{N} a_{ij} = 1. \quad 0 \leq a_{ij} \leq 1$$

Da sich ein derartiger Prozeß so darstellen läßt, daß ein Übergang lediglich in denselben Zustand oder einen Zustand, der rechts von dem betrachteten Zustande liegt, wurde hierfür der Begriff *Links-Rechts-Modell* geprägt. Abbildung 6.2 zeigt ein Links-Rechts-Modell.

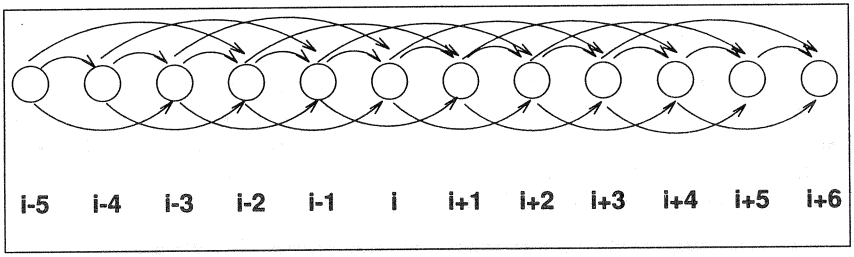


Bild 6.2: Links-Rechts-Modell

Ein weiterer Freiheitsgrad besteht in der Wahl der Ausprägungswahrscheinlichkeiten $b_j(k)$. Je nach Fragestellung können diese entweder stetige Funktionen oder diskrete Funktionen sein. Beide MÖglichkeiten wurden in der entsprechenden Fachliteratur untersucht (siehe z. B. [24, 25, 26]).
Da im vorliegenden Fall die *Mobilfunkmeßdaten* durch das Modell zu beschreiben sind und diese in diskretisierter Form übergeben werden, ist die Wahl diskreter Funktionen für die Ausprägungswahrscheinlichkeiten zweckmäßig. Kapitel 7 wird sich dieser Fragestellung eingehend widmen.
Im Anschluß soll anhand eines einfachen Beispiels die Verwendbarkeit von HMM zur Mustererkennung untersucht und daraus Rückschlüsse auf ihren Einsatz bei der Lokalisierung von Mobilfunkteilnehmern gezogen werden.

6.3 Hidden-Markov-Modelle zur Mustererkennung

Bei der Spracherkennung, deren Verwandtschaft zur Erkennung von Feldstärke-Meßwertsequenzen in Abschnitt 5.3.2 deutlich gemacht wurde, wird jedes zur Erkennung vorgesehene Wort durch ein Modell repräsentiert und in einer Datenbank abgelegt. Die Phoneme eines jeden Wortes stellen die Beobachtungswerte im Sinne der Mustererkennung dar.
Die Erkennung eines in der Datenbank als Modell vorliegende Wortes erfolgt durch Berechnung der Wahrscheinlichkeit, mit der dieses Modell die Sequenz von Phonemen des zu erkennenden Wortes repräsentiert. Dasjenige Modell, das bei gegebener Phonemsequenz den maximalen Wahrscheinlichkeitswert ergibt, repräsentiert das vorgegebene Wort. Weitere Ausführungen zum Verfahren werden auch im nachfolgenden Kapitel 7 angestellt.
Trotz der Übereinstimmungen zwischen der Spracherkennung und der Lokalisierung von Mobilteilnehmern läßt sich der Einsatz der Hidden-Markov-Modelle jedoch nicht ohne weiteres übertragen.
Um Verhalten und Anwendbarkeit von HMM bei der Musterkennung aufzuzeigen, folgt eine Darstellung der Ergebnisse bei der Erkennung dreier einfacher Kurvenformen (Sinus, Rechteck und Dreieck) mit Hilfe von HMM. Es wurden allgemeine Bedingungen zugrunde gelegt und daher zunächst keine Einschränkung bezüglich der Zustandsübergänge vorgenommen. Zur Bestimmung der Übergangs- und der Ausprägungswahrscheinlichkeiten wurden die in [26] vorgestellten Trainingsalgorithmen verwendet.
Bei dem Versuch wurde wie folgt vorgegangen:

- Test- und Trainingssequenzen bestanden aus 11 Werten.
- Trainiert wurde eine Folge von Sinuswerten,
  $F(n) = \sin\left(\frac{2\pi}{10} \cdot n\right), \quad n = 0 \ldots 10$
  sowie Dreieck- und Rechteckfunktionen gleicher Periodenlänge.
- Die Ausprägungen der Beobachtungswerte (von +1 bis -1) in jedem Zustand wurden in 11 Stufen quantisiert, wobei für die Quantisierungstufen galt $y_i = 0,2 \cdot (i - 5), i = 0 \ldots 10$.
- Jeder Wert wurde mit einem normalverteilten Zufallswert verrauscht ($\sigma = 0.1, \mu = 0$).
- Nach jeder Sequenz wurde trainiert.
- Der Trainingsalgorithmus wurde mit Zufallswerten vorbesetzt, die den für die Modellparameter geltenden Bedingungen (6.4),(6.7) und (6.8) gehorchten.
- Die Erkennung wurde mit Sequenzen aus 11 Werten getestet, die sich von der trainierten Funktion durch unterschiedliche Streckung unter-

schieden (z.B. $\sin(x_i)$ mit $x_i = 0.1 \cdot i, i = 0 \ldots 10$).

Anhand der Ergebnisse aus diesen ersten Trainingsversuchen wurde deutlich, daß es bei dem beschriebenen Trainingsalgorithmus zu Problemen kommt, falls ein Beobachtungswert in der Trainingssequenz nicht vorliegt. In diesem Fall wird die entsprechende Ausprägungswahrscheinlichkeit zu null. Daraufhin wurde ein leicht modifizierter Trainingsalgorithmus angewendet, bei dem alle neuen Parameter als Linearkombination aus den zuerst gewählten und den modifizierten Parametern berechnet wurden.

$$x_{neu} = x_{alt} + (1 - \alpha) \cdot x_{Training} \tag{6.9}$$

Für α wurde der Wert 0.5 als geeignet gefunden.
Die nach diesem Verfahren trainierten Modelle erzielten bereits zufriedenstellende Erkennungsresultate. Tabelle 6.1 zeigt die Ergebnisse eines Versu-

Testmuster	Häufigkeit	Fehler
Sinus	173	2
Dreieck	165	3
Rechteck	162	1

Tabelle 6.1: Fehlerhäufigkeiten beim Test der HMMe

ches, bei dem nun Modelle für die Muster Sinus, Dreieck und Rechteck trainiert und anschließend 500 Erkennungsversuche mit statistisch ausgewählten Testmustern vorgenommen wurden. Wie bei der Spracherkennung allgemein üblich, wurde jeweils das Muster als erkannt betrachtet, dessen Modellierung die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der gegebenen Testsequenz maximiert. Die Fehlerhäufigkeit bei diesem Versuch ist in der Tabelle angegeben.
Die mit dem Trainingsalgorithmus ermittelten Übergangswahrscheinlichkeiten zeigt exemplarisch für die Sinusfunktion Tabelle 6.2. Die Struktur des (nach dem Training) resultierenden Modells ist zusätzlich noch einmal in Abbildung 6.3 veranschaulicht. Obwohl es sich bei der Trainingssequenz um eine geordnete Abfolge von Werten handelt, führt die Anwendung des Trainingsalgorithmus abhängig von den Startwerten nicht notwendigerweise zu einem Links-Rechts-Modell. Daß teilweise Übergänge zu mehreren Zuständen existieren (gestrichelt gekennzeichnet), liegt darin begründet, daß an mehreren Stellen der Trainingssequenz gleiche Werte vorlagen, die eine Entscheidung bezüglich der Übergänge unmöglich machten.

i \ j	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	0	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0.284	0	0	0	0	0.716
3	0	1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	1.0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0
8	0.115	0	0	0	0	0.519	0	0	0	0	0.365
9	0	0	0	0	0	0	1.0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	1.0	0	0

Tabelle 6.2: Übergangswahrscheinlichkeiten nach dem Training

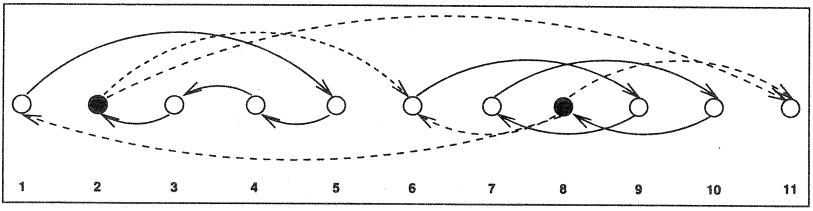


Bild 6.3: HMM nach dem Training

Als Ergebnis im Hinblick auf die Anwendung zur Lokalisierung von Mobilstationen muß daher festgehalten werden, daß bei der Verwendung der bekannten Trainingsalgorithmen nicht gewährleistet werden kann, daß die Reihenfolge der Trainingswerte sich in der Reihenfolge der Modellzustände wiederspiegelt. Insbesondere wird auch die Zuordnung eines Meßwertes und somit eines Modellzustandes zu einem Ort in der Mobilfunkumgebung nicht möglich sein. Die Erkennung einer Meßwertsequenz in der gleichen Weise wie die Erkennung einer Phonemsequenz bei der Spracherkennung ist zwar mit diesem Verfahren prinzipiell denkbar, so daß die Mobilstation beim Durchqueren eines modellierten Streckenabschnitts erfaßt werden kann. Im Hinblick auf eine kontinuierliche Verfolgung der Mobilstation ist jedoch eine genaue räumliche Zuordnung der Modellzustände erwünscht.
Im nächsten Kapitel wird gezeigt, daß durch geeignete Vorgaben bezüglich Modellstruktur und Parametern die durch den Trainingsprozeß bedingten Nachteile vermieden werden können.

KAPITEL 7

Fahrzeuglokalisierung mit Hidden-Markov-Modellen

7.1 Verfahren

In Abschnitt 5.3.2 wurde die unbekannte Geschwindigkeit der Mobilstation als charakteristisch für das Problem der Fahrzeuglokalisierung herausgehoben. Ergänzend wurde in Abschnitt 5.2 der Einfluß des Mobilitätsverhaltens auf die Feldstärkemeßwerte aufgezeigt. Dort wurde bereits erläutert, daß aufgrund der Komplexität seiner Ursachen das Short-Term-Fading lediglich in statistischer Weise beschrieben werden soll.
Diese Überlegungen legen den Schluß nah, den Prozeß der Meßwerterfassung als stochastischen Prozeß in der Weise zu betrachten, daß

- der unbekannte Aufenthaltsort der Mobilstation den Zustand eines nicht beobachtbaren Prozesses darstellt.
- die Meßwerte die einer statistischen Verteilung unterliegenden Beobachtungswerte in dem unbekannten Zustand sind.

Unter diesen Voraussetzungen ist eine Modellierung der Mobilfunkmeßdaten mit Hilfe von HMM möglich und es ergeben sich die folgenden Zuordnungen zwischen Modell und physikalischer Realität:

- *Zustände* des Modells repräsentieren diskrete Orte in der Mobilfunkumgebung (hier im folgenden als Bezugsort bezeichnet).
- Die *Bewegung* der Mobilstation entspricht im Modell dem Übergang zwischen zwei Zuständen. Ein solcher Zustandswechsel erfolgt jeweils bei Ermittlung eines neuen Meßwertes, im GSM-System in diskreten Zeitabständen von 480 ms.
- Wird zunächst vorausgesetzt, daß die Bewegung der Mobilstation ausschließlich auf festen Routen, das heißt Straßen oder Wegen, erfolgt, können die im Modell wiedergegebenen Orte entlang dem Verlauf der Route gewählt werden. Auf diese Weise ist die Auswahl des folgenden Modellzustands ausschließlich durch die Fahrzeuggeschwindigkeit bestimmt, und die Zustände können nur in einer möglichen Reihenfolge

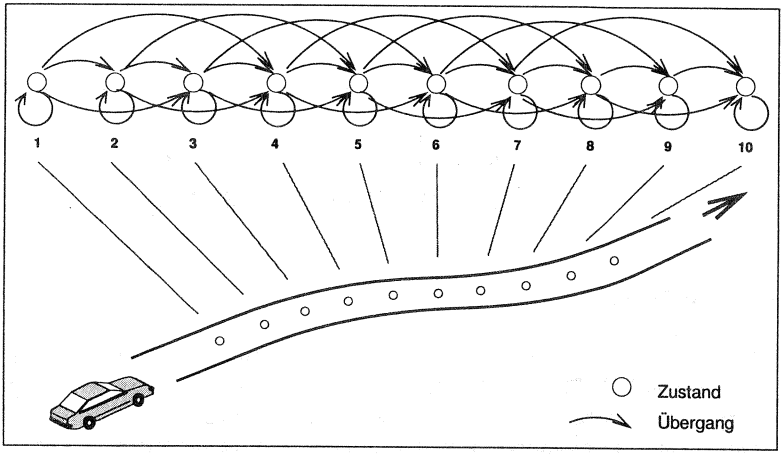


Bild 7.1: Wiedergabe eines Straßenabschnittes durch ein HMM

durchlaufen werden. Geeignet ist daher das in Abschnitt 6.2 beschriebene Links-Rechts-Modell, für das die Einschränkung 6.8 gilt.

- Ein *Meßwert* wird als *Beobachtungswert* in dem Zustand aufgefaßt, der dem augenblicklichen Aufenthaltsort der Mobilstation entspricht. Die Verteilungsfunktion der Beobachtungswerte in einem Zustand entspricht daher den Meßwerten, die aufgrund der statistischen Schwankungen am zugeordneten Ort aufgenommen werden.
- Die Modellparameter sind charakteristisch für ein durch das Modell beschriebenes Teilstück der Route. Dabei modellieren die Übergangswahrscheinlichkeiten das Mobilitätsverhalten und die Ausprägungswahrscheinlichkeiten die Feldstärkeverteilung auf der beschriebenen Strecke.

  Ein Referenzmuster kann daher in Form der Parameter des Hidden-Markov-Modells, das den betreffenden Streckenabschnitt beschreibt, in der Datenbank hinterlegt werden.

Diese Zuordnung eines HMM zu einem Streckenabschnitt ist in Abbildung 7.1 graphisch dargestellt.
Bei dem zuvor beschriebenen Verfahren werden isolierte Teilstücke des Straßennetzes durch ein HMM beschrieben. Eine Lokalisierung ist dabei jeweils dann möglich, wenn eine Mobilstation ein solches Teilstück passiert. Für

den bereits erwähnten Anwendungsfall der Handover-Steuerung ist dieses Verfahren bereits ausreichend. Dazu sind jeweils für die Stellen des Straßennetzes HMM vorzusehen, an denen der geplante Handover stattfinden soll. Diese können zuvor aufgrund von Berechnungen oder Simulationen der Funkausbreitung geeignet bestimmt werden.
In diesem Kapitel sollen zunächst die Grundlagen der Lokalisierung von Mobilstationen mit Hilfe von HMM und der spezielle Fall der Lokalisierung an isolierten Stellen beschrieben werden. Der Übergang zu kontinuierlicher Erfassung erfolgt in Kapitel 8.

7.2 Auswertung

Sind die Parameter $\lambda = (A, B, \pi)$ eines HMM bekannt, so kann eine Wahrscheinlichkeit $P(O|\lambda)$ berechnet werden, mit der eine Sequenz von Beobachtungswerten $O = O_1 O_2 \ldots O_M$ durch das Modell repräsentiert wird. Diese Wahrscheinlichkeit soll hier als Beobachtungswahrscheinlichkeit bezeichnet werden.
Die Berechnung dieser Beobachtungswahrscheinlichkeiten erfolgt, indem für jede mögliche Zustandsfolge die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Beobachtungssequenz zu bestimmen ist.
Bei zunächst fester Zustandsfolge $Q = q_1 q_2 \cdots q_M$ ergibt sich die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Beobachtungssequenz zu

$$P(O|Q,\lambda) = \prod_{i=1}^{M} P(O_i|q_i,\lambda) = \prod_{i=1}^{M} b_{q_i}(O_i),$$

und die Wahrscheinlichkeit $P(Q|\lambda)$ für das Auftreten der Zustandsfolge Q unter Berücksichtigung der Anfangswahrscheinlichkeit π_{q_1} zu

$$P(Q|\lambda) = \pi_{q_1} \cdot \prod_{i=1}^{M-1} a_{q_i q_{i+1}}.$$

Die Verbundverteilung für das Auftreten der Beobachtungssequenz O und der Zustandsfolge Q erhält man als Produkt dieser beiden Wahrscheinlichkeiten

$$P(O,Q|\lambda) = P(O|Q,\lambda)P(Q|\lambda)$$

Zur Berechnung der gesuchten Wahrscheinlichkeit $P(O|\lambda)$ ist diese über alle möglichen Zustandsfolgen Q zu summieren. Es ist daher

$$P(O|\lambda) = \sum_{\text{alle } Q} P(O|Q,\lambda)P(Q|\lambda). \tag{7.1}$$

Die Auswertung dieses Ausdrucks würde bei N Zuständen und T Beobachtungswerten zur Berechnung einer einzigen Beobachtungswahrscheinlichkeit $(2T-1)N^T$ Multiplikationen und N^T-1 Additionen erfordern. Bei für die Erkennung der Meßwertsequenzen geeigneter Wahl der Parameter N und T ist die Anzahl erforderlicher Operationen jedoch von derzeitigen Rechnern nicht in angemessener Zeit durchzuführen.
Eine effizientere Berechnung ist mit Hilfe des in [27, 28] vorgestellten Verfahrens möglich und beruht darauf, die für einen rekursiven Algorithmus geeigneten Zwischenwerte so zu wählen, daß Produktterme, die mehrere Summanden des Ausdrucks 7.1 gemeinsam haben, nur einmal berechnet werden müssen. Das Prinzip ist durch den Viterbi-Algorithmus in der Nachrichtentechnik sehr bekannt und kann durch ein sogenanntes Trellis-Diagramm veranschaulicht werden (siehe z.B. [29, 30])
Als geeigneter Zwischenwert wird die Größe

$$\alpha_t(i) = P(O_1O_2\cdots O_t, q_t = S_i|\lambda) \tag{7.2}$$

definiert. $\alpha_t(i)$ beschreibt die Wahrscheinlichkeit, die partielle Beobachtungssequenz $O_1O_2\cdots O_t$ bis zum Zeitpunkt t gesehen zu haben *und* sich im Zustand i zu befinden.
Für den Zeitpunkt $t=1$ kann der Wert von 7.2 als Produkt aus der Wahrscheinlichkeit π_i und der Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Beobachtungswertes O_1 berechnet werden.

$$\alpha_1(i) = \pi_i\, b_i(O_1), \qquad 1 \le i \le N \tag{7.3}$$

Rekursiv kann aus $\alpha_t(i)$ der Wert $\alpha_{t+1}(j)$ berechnet werden. Es gilt

$$\alpha_{t+1}(j) = \left[\sum_{i=1}^{N} \alpha_t(i)\, a_{ij}\right] b_j(O_{t+1}), \qquad \begin{matrix} 1 \le & t & \le T-1 \\ 1 \le & j & \le N \end{matrix} \tag{7.4}$$

Die Beobachtungswahrscheinlichkeit nach T Beobachtungswerten berechnet sich durch Summation der $\alpha_T(i)$ über alle Zustände:

$$P(O|\lambda) = \sum_{i=1}^{N} \alpha_T(i) \tag{7.5}$$

Bei Verwendung dieser Berechnungsvorschrift kann die Anzahl der Rechenoperationen auf $N(N+1)(T-1)+N$ Multiplikationen und $N(N-1)(T-1)$ Additionen reduziert werden. Die Anzahl der Rechenoperationen steigt demgemäß nicht mehr exponentiell, sondern nur noch linear mit der Anzahl der Beobachtungswerte und quadratisch mit der Anzahl der Zustände des Modells.
Analog zu $\alpha_t(i)$ kann eine Größe

$$\beta_t(i) = P(O_{t+1}O_{t+2}\cdots O_T, q_t = S_i|\lambda) \tag{7.6}$$

definiert werden, bei der stets die Teilsequenz von $t+1$ bis T betrachtet wird und die Induktion in Richtung abnehmender Werte für t vorgenommen wird. $\beta_t(i)$ wird daher als Rückwärtsvariable bezeichnet, während für $\alpha_t(i)$ die Bezeichnung Vorwärtsvariable verwendet wird, da bei der rekursiven Berechnung die Beobachtungssequenz von vorne nach hinten durchlaufen wird. Zusammen sind diese beiden Berechnungsvorschriften unter der nach dem Ablauf der Induktion benannten Forward-Backward-Prozedur bekannt. Die Berechnung von $\alpha_t(i)$ und $\beta_t(i)$ stellt die Basis für die Ermittlung weiterer Größen dar, die im Zusammenhang mit der Berechnung von HMM von Bedeutung sind.
Bei der Berechnung der Beobachtungswahrscheinlichkeiten mit Hilfe des beschriebenen Algorithmus sind ausschließlich Additionen und Multiplikationen notwendig. Daher treten bei der numerischen Auswertung, die stets eine begrenzte Genauigkeit mit sich bringt, keine Probleme durch den Verlust signifikanter Stellen auf. Allerdings nehmen bei langen Sequenzen die $\alpha_t(i)$ so kleine Werte an, daß eine Darstellung im Rechner mit den üblichen Zahlenformaten nicht möglich ist. Eine Lösung dieses Problems besteht darin, in jedem Induktionsschritt eine Normierung der $\alpha_t(i)$ über alle i vorzunehmen und einen konstanten Faktor separat abzuspeichern. Die gesuchte Wahrscheinlichkeit $P(O|\lambda)$ ergibt sich am Ende durch Multiplikation mit diesem Faktor.

7.3 Bestimmung der Parameter

Wie bei allen Verfahren der künstlichen Intelligenz können auch bei der Mustererkennung die Ergebnisse verbessert werden, wenn eine möglichst große Menge bekannter Information über den betrachteten Prozeß in den Algorithmus eingebracht wird.
Bei dem vorliegenden Problem ist das Ziel, die Modellparameter so zu bestimmen, daß sie den abzubildenden Teil der Mobilfunkumgebung möglichst

zutreffend beschreiben. Hierzu sind in erster Linie die durch die physikalischen Gegebenheiten des betrachteten Streckenabschnitts bestimmten Größen heranzuziehen. Darüberhinaus können aufgrund theoretischer Überlegungen, die bereits in den vorangehenden Kapiteln angestellt wurden, weitere Aussagen über die gesuchten Parameter gemacht werden.

7.3.1 Länge der Beobachtungssequenz

Die Länge der Beobachtungssequenz ist abhängig von der Zuverlässigkeit, die für die Erkennung angestrebt wird. Je länger die Beobachtungssequenz gewählt wird, desto geringer ist die Fehlerwahrscheinlichkeit. Diese wird im wesentlichen dadurch bestimmt, wie charakteristisch in der betrachteten Umgebung die Muster ausgeprägt sind. Je weniger charakteristisch die Muster sind, desto länger muß die Beobachtungssequenz für ein gegebenes Sicherheitsniveau gewählt werden. Da dies eine zentrale Fragestellung bei der Analyse des vorgestellten Verfahrens ist, wird diese Problematik eingehender in Abschnitt 7.4 betrachtet.

7.3.2 Länge des Hidden-Markov-Modells

Die Länge des Hidden-Markov-Modells ist bestimmt durch die Länge der Beobachtungssequenz und die maximale Geschwindigkeit, bei der ein Mobilfunkteilnehmer noch lokalisiert werden soll. Die Strecke, die ein Mobilfunkteilnehmer während der gesamten Beobachtungssequenz zurücklegt, muß kleiner oder gleich der Länge des Markov-Modells sein. Da das Zeitintervall zwischen den Mobilfunkmeßwerten festliegt, folgt daraus:

$$v_{Mobil} \cdot T_{Senden} \cdot k_{Beob} \leq L_{HMM} \tag{7.7}$$

$$\Rightarrow L_{HMM} = v_{Mobil\,max} \cdot T_{Senden} \cdot k_{Beob} \tag{7.8}$$

mit

v_{Mobil}: Geschwindigkeit des Mobilfunkteilnehmers
T_{Senden}: Dauer zwischen zwei Meßwerten (480ms)
L_{HMM}: Länge des Markov-Modells
k_{Beob}: Anzahl der gewünschten Beobachtungen

Aufgrund dieser Werten kann die Länge des Hidden-Markov-Modells festgelegt werden.

7.3.3 Räumliche Diskretisierung

Aus Untersuchungen in realistischen Mobilfunkumgebungen ist bekannt, daß typische Schwankungen durch den Abschattungsschwund sich über Distanzen von 20 - 30 m erstrecken (s.a. Abschnitt 3.1). Diese Schwankungen liegen in der Größenordnung von 6 – 12 dB. Da die Meßwerte im GSM-System nur mit einer Genauigkeit von 1 dB erfaßt werden, ist es nicht erforderlich, den Abstand zwischen zwei Orten, die durch einen Modellzustand repräsentiert werden, kleiner zu wählen als die Strecke, in der sich die Feldstärke um mehr als 1 dB verändert. Dies ist umso wichtiger, da die zur Auswertung erforderliche Rechenzeit quadratisch mit der Zustandszahl wächst. Die gesuchte Strecke erhält man durch einfache Division:

$$D_{Zustand} = \frac{25\text{m}}{12\text{dB}} \approx 2\frac{\text{m}}{\text{dB}} \tag{7.9}$$

Da die Schwankungen jedoch zumeist weniger als 12 dB betragen, stellt diese Abschätzung eine untere Grenze dar. In der Praxis hat sich ein Abstand von 4 m noch als ausreichend erwiesen.

7.3.4 Normierung der Leistungswerte

Für die Auswertung der GSM-Meßwerte können nicht die absoluten Größen herangezogen werden, da die Meßwerte in Abhängigkeit von der Wetterlage, der Antennenart und der Höhe der Antenne der jeweiligen Mobilstation variieren. Diese Einflüsse wirken sich nach Abschnitt 5.2 durch einen konstanten Faktor auf die Leistung des Mobilfunksignals aus. Bei der Darstellung in dB geht dieser Faktor in einen konstanten Summanden über.
Um eine Erkennung unabhängig von den genannten Einflüssen zu ermöglichen, sind sowohl die aktuellen Meßdaten wie auch die Referenzdaten einer *Normierung* zu unterziehen. Eine geeignete Möglichkeit, bei der die charakteristischen Signalschwankungen erhalten bleiben, besteht in der Subtraktion des Mittelwertes.
Die Normierung führt zu der folgenden Problematik, die in Bild 7.2 veranschaulicht ist:

- In Abhängigkeit von der Strecke, die eine Mobilstation während der Aufzeichnung der Meßwertsequenz zurücklegt, können sich je nach örtlicher Ausbreitungssituation deutlich voneinander abweichende Mittelwerte ergeben.

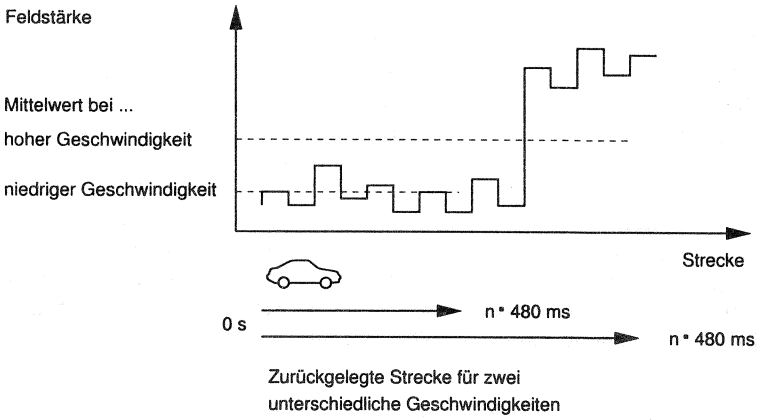


Bild 7.2: Normierungsproblematik

- Die für die Normierung der Referenzwerte gewählte Strecke trifft exakt nur für eine einzige Geschwindigkeit zu, während sich für alle anderen Mobilstationen mehr oder weniger große Abweichungen ergeben.

Normierungsbedingte Differenzen zwischen den Meßwerten und den Referenzwerten äußern sich in einer Verringerung der berechneten Beobachtungswahrscheinlichkeit der Meßwertsequenz und können somit zu einer Verminderung der Erkennungswahrscheinlichkeit führen.
Die Differenzen sind jedoch systembedingt und könnten nur vermieden werden, wenn bei der Bestimmung des Mittelwertes die gesamte Mobilfunkumgebung zugrunde gelegt würde. Dies ist aber wegen der endlichen Verbindungsdauer nicht möglich.
Bei den Untersuchungen hier wurde stattdessen die Mittelung über die *gesamte Meßwertsequenz* und bei den Referenzwerten über die *gesamte Modellänge* vorgenommen, um jeweils die maximal mögliche Anzahl von Werten einzubeziehen, ohne jedoch bei der Normierung auf Daten zurückzugreifen, die bei der Berechnung von $P(O|\lambda)$ nicht zu berücksichtigen sind.
Folgende Alternativen wären aber ebenfalls denkbar:

- Bei der Normierung der Referenzwerte könnte die zugrundegelegte Strecke so gewählt werden, daß sie der im Mittel von den Mobilstationen zurückgelegten Strecke entspricht,

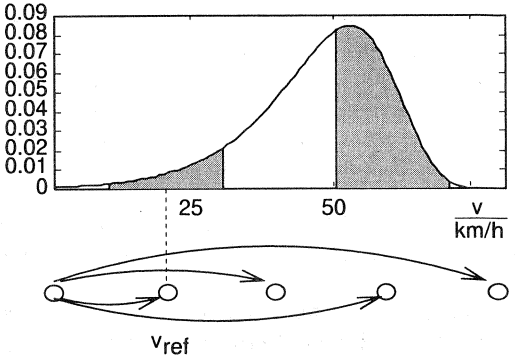


Bild 7.3: Bestimmung der Übergangswahrscheinlichkeiten

- Bei der Mittelung der Meßwerte könnten auch weiter zurückliegende Werte einbezogen werden.
- Aktuelle Meßwerte werden jeweils auf der Basis der zurückliegenden Meßwertsequenz normiert, während bei der Normierung der Referenzwerte jeweils ein Streckenabschnitt zugrundegelegt wird, der von den Mobilstationen im Mittel während der Meßdauer zurückgelegt wird.

Um bei dem hier gewählt Vorgehen eine möglichst hohe Erkennungssicherheit zu gewährleisten, sollte nach den oben dargestellten Überlegungen der Ort des Modells – sofern dies realisierbar ist – so festgelegt werden, daß der Mittelwert der Meßwertsequenzen dort nur wenig in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit der Mobilstation varriiert.

7.3.5 Übergangswahrscheinlichkeiten

Die Zustandsübergänge im Modell geben die Bewegung der Mobilstation im Zeitraum T zwischen der Erfassung zweier Meßwerte wieder. Zur Bestimmung der Übergangswahrscheinlichkeit a_{ij} ist daher danach zu fragen, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Mobilstation nach dem nächsten Meßwert dem Zustand j zugeordnet wird, sofern sie augenblicklich dem Zustand i zugeordnet ist.
Da die Geschwindigkeit einer konkreten Mobilstation nicht bekannt ist, kann dieser Wert nur aus einer statistischen Betrachtung des Mobilitätsverhaltens aller Mobilstationen auf dem entsprechenden Streckenabschnitt herge-

leitet werden. Dieses Mobilitätsverhalten kann durch eine Geschwindigkeits-Verteilungsdichtefunktion $p_v(v)$ beschrieben werden.
Ist eine solche Verteilungsdichtefunktion bekannt, so können daraus die gesuchten Übergangswahrscheinlichkeiten wie folgt berechnet werden: Es wird zunächst die Festlegung getroffen, die Diskretisierung der Position der Mobilstation in der Weise vorzunehmen, daß sie jeweils dem Zustand zugeordnet wird, dessen Bezugsort ihr in der realen Umgebung am nächsten liegt. Die Route wird dadurch in Streckenintervalle aufgeteilt, die symmetrisch zu den Bezugsorten liegen. Mit D soll ferner der Abstand zwischen zwei Bezugsorten bezeichnet werden.
Befindet sich nun eine Mobilstation genau am Bezugsort des Zustands i, so liegt ihr Aufenthaltsort nach dem Zeitintervall T in dem Streckenabschnitt, der dem Zustand $j > i$ zugeordnet ist, wenn für ihre Geschwindigkeit gilt

$$(j - i - \frac{1}{2})\frac{D}{T} < v < (j - i + \frac{1}{2})\frac{D}{T} \tag{7.10}$$

Die Wahrscheinlichkeit dafür ist identisch mit der Wahrscheinlichkeit für den Übergang von Zustand i nach j. Mit der Abkürzung

$$v_{ref} = \frac{D}{T} \tag{7.11}$$

läßt sich diese mit Hilfe des Ausdrucks

$$a_{ij} = \int_{(j-i-\frac{1}{2})\,v_{ref}}^{(j-i+\frac{1}{2})\,v_{ref}} p_v(v)\,dv \tag{7.12}$$

berechnen.
Bei dieser Berechnung handelt es sich um eine Näherung, da die Aufenthaltsorte der Mobilstation vor dem Zustandsübergang sich auf die gesamte dem Zustand i zugeordnete Strecke verteilen. Da es dabei keine Präferenzen für einen bestimmten Ort gibt, kann hierfür eine Gleichverteilung angenommen werden. Eine Auswertung des exakten Ausdrucks ist jedoch bei der gewählten örtlichen Diskretisierung nicht notwendig, zumal das Geschwindigkeitsverhalten ohnehin meist nur näherungsweise bekannt ist.
Die Verteilungsdichtefunktion $p_v(v)$ kann durch Messungen auf dem modellierten Streckenabschnitt bestimmt werden. Da das Fahrzeugverhalten jedoch in Gebieten vergleichbaren Landschaftstyps mit gleichen Geschwindigkeitsvorschriften nicht signifikant voneinander abweicht, ist eine Übertragung auf diese Gebiete ohne erneute Messung der Geschwindigkeits-Verteilungsdichtefunktionen möglich.

7.3.6 Ausprägungswahrscheinlichkeiten

Wie in Abschnitt 5.2.1 beschrieben, können die Meßwerte durch eine Gaußverteilung beschrieben werden. Unter der Annahme, daß die Einhüllende der Signalstärke rayleighverteilt ist und daß über 12 TDMA-Rahmen gemittelt wird, läßt sich aus Gleichung (3.8) eine Standardabweichung von ungefähr $\sigma_{\mathrm{dB}} = 3,2$ dB für den Signalpegel in dB berechnen. Der Mittelwert der Gauß-Verteilung ist durch den Pfadverlust sowie die Abschattung am Ort der Mobilstation bestimmt und kann daher nur durch Messungen in der realen Mobilfunkumgebung gewonnen werden. Die Erfassung dieser Daten sollte mit Hilfe einer möglichst genau arbeitenden Meßstation erfolgen, deren Geschwindigkeit so gering sein muß, daß sich die Ausbreitungssituation innerhalb des Meßintervalls T nicht signifikant ändert.
Die Verteilungsfunktion der Meßwerte in jedem Zustand wird vollständig durch ihren Erwartungswert und die Standardabweichung der Normalverteilung beschrieben. Da die RXLEV-Werte in 6bit-Format (entsprechend 64 Werte in 1 dBm-Schritten) vorliegen, kann die Verteilungsdichte der Beobachtungswerte ebenfalls in 64 Schritten von 1 dBm diskretisiert werden. Es ergibt sich folgende Berechnungsvorschrift:

$$\frac{b_j(k)}{\mathrm{dB}} = \int_{k-111.5}^{k-110.5} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\mathrm{dB},av}} e^{-\frac{(x-\mu_j)^2}{2\sigma^2_{\mathrm{dB},av}}}\, dx \tag{7.13}$$

Hierbei wird der Erwartungswert der Meßwerte im Zustand j mit μ_j bezeichnet.

7.3.7 Anfangszustandswahrscheinlichkeiten

Die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Mobilstation mit dem Zustand i beginnend das Modell durchläuft soll als Anfangswahrscheinlichkeit π_i des Zustandes i bezeichnet werden. Die Berechnung von π wird in Abbildung 7.4 illustriert.
Wird mit s_1 der Bezugsort des ersten Modellzustandes bezeichnet, so befindet sich eine Mobilstation der Geschwindigkeit v, die innerhalb des folgenden Meßintervalls die modellierte Teilstrecke erreicht, innerhalb des Steckenabschnitts

$$s_1 - v \cdot T < s < s_1$$

Der Aufenthaltsort ergibt sich aus der zufälligen Bewegung der Mobilstation und kann daher als gleichverteilt innerhalb des Intervalls angenommen

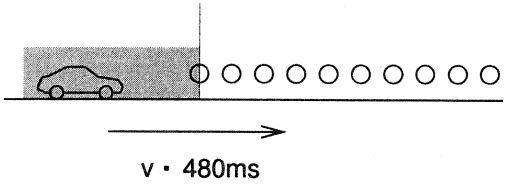


Bild 7.4: Berechnung der Anfangswahrscheinlichkeiten. Grau unterlegt ist der Bereich, in dem sich die Mobilstation vor dem Erreichen des Bereiches befinden kann, der durch das Modell beschrieben wird.

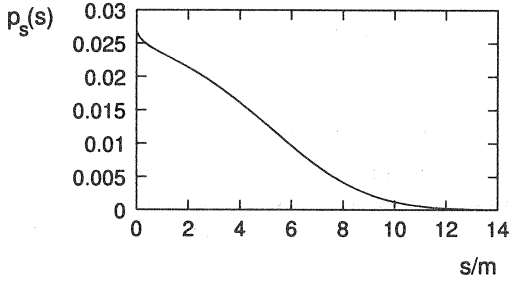


Bild 7.5: Verteilungsdichte $p_s(s)$ des Aufenthaltsortes beim Eintritt in das Modell

werden. Nach dem folgenden Meßintervall T kann der Aufenthaltsort dann als gleichverteilt im Streckenabschnitt

$$s_1 < s < s_1 + v \cdot T$$

betrachtet werden. Wird ohne Beschränkung der Allgemeinheit $s_1 = 0$ gesetzt, so gilt für eine Mobilstation der Geschwindigkeit v

$$p_s(s|v) = \frac{1}{vT} \operatorname{rect} \frac{s - vT/2}{vT} \tag{7.14}$$

Die von der Geschwindigkeit unabhängige Wahrscheinlichkeitsdichte $p_s(s)$ für den Aufenthaltsort einer Mobilstation unmittelbar nach Erreichen des Modells erhält man durch Gewichtung mit der Geschwindigkeits-Verteilungsdichte und anschließender Integration über alle Geschwindigkeiten:

$$\begin{aligned} p_s(s) &= \int_{\tilde{v}=0}^{\infty} p_v(\tilde{v}) p_s(s|\tilde{v}) d\tilde{v} \\ &= \int_{\tilde{v}=0}^{\infty} p_v(\tilde{v}) \frac{1}{\tilde{v}T} \operatorname{rect} \frac{s - \tilde{v}T/2}{\tilde{v}T} d\tilde{v} \end{aligned} \tag{7.15}$$

Daß die so formulierte Wahrscheinlichkeitsdichte die Vollständigkeitsbedingung erfüllt, kann auf einfache Weise gezeigt werden. Es gilt zunächst

$$\int_{s=0}^{\infty} p_s(s|\tilde{v}) ds = 1 \neq f(\tilde{v})$$

und

$$\int_{\tilde{v}=0}^{\infty} p_v(\tilde{v}) d\tilde{v} = 1.$$

Da

$$\int_{\tilde{v}=0}^{\infty} \int_{s=0}^{\infty} p_v(\tilde{v}) p_s(s|\tilde{v}) ds d\tilde{v} = \int_{\tilde{v}=0}^{\infty} p_v(\tilde{v}) \underbrace{\int_{s=0}^{\infty} p_s(s|\tilde{v}) ds}_{=1} d\tilde{v} = 1$$

folgt durch Änderung der Integrationsreihenfolge unmittelbar

$$\int_{s=0}^{\infty} p_s(s) ds = 1$$

Aus der Ortsverteilungsfunktion $p_s(s)$ nach Eintritt in das Modell können die Anfangswahrscheinlichkeiten π_i nun aufgrund der Zuordnung der Streckenabschnitte zu Modellzuständen einfach berechnet werden. Es gilt

$$\pi_i = \begin{cases} \int_0^{\frac{1}{2}\cdot D} p_s(\tilde{s})d\tilde{s} & \text{für} \quad i = 0 \\ \int_{(i-\frac{1}{2})\cdot D}^{(i+\frac{1}{2})\cdot D} p_s(\tilde{s})d\tilde{s} & \text{sonst} \end{cases} \tag{7.16}$$

7.4 Lokalisierung als Schwellwertentscheidung

In Abschnitt 6.3 wurde beschrieben, daß im Fall der Spracherkennung für alle in der Datenbank hinterlegten Modelle die Beobachtungswahrscheinlichkeit ermittelt und dasjenige Modell m ausgewählt wird, für das O die größte Auftrittswahrscheinlichkeit $P(O|\lambda_m)$ besitzt.
Die Ortung des Mobilfunkteilnehmers würde idealerweise so erfolgen, daß das gesamte Straßennetz einer Funkzelle in Form einzelner HMM in der Datenbank hinterlegt ist. Es würde eine ständige Auswertung aller dieser Modelle vorgenommen und als Aufenthaltsort derjenige Ort bestimmt, für den das zugeordnetes Modell den Wahrscheinlichkeitswert maximiert. Rechentechnisch bedeutete dies jedoch für den Netzbetreiber einen praktisch nicht zu vertretenden Aufwand.
Es wurde daher als Alternative untersucht, ob eine zuverlässige

Erkennung durch Vergleich der Beobachtungswahrscheinlichkeit $P(O|\lambda_m)$ mit einem geeignet gewählten Schwellwert W

möglich ist.
Diese Methode birgt die folgenden Risiken in sich: Wird der Schwellwert zu hoch gewählt, wird eine Meßwertsequenz, die am Ort des Modells m aufgezeichnet wird, nicht als dem Modell m zugehörig betrachtet. Wird er zu niedrig gewählt, werden dem Modell m auch Sequenzen zugeordnet, die an anderen Lokationen entstanden sind.
Die folgenden Betrachtungen haben die Wahl eines geeigneten Schwellwertes und eines Wertes für die Länge der Beobachtungssequenz zum Ziel.
Abbildung 7.6 zeigt das Histogramm der Verteilung der Beobachtungswahrscheinlichkeit $P(O|\lambda_m)$ für ein Modell m aus einer Simulation. Die Abszisse

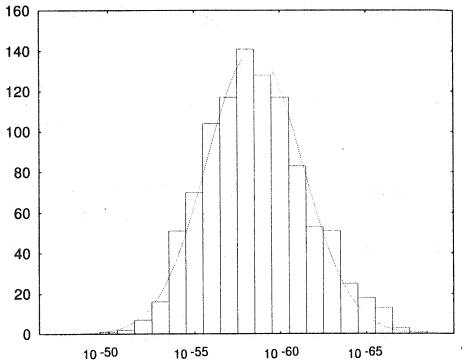


Bild 7.6: Histogramm für die Werte von $P(O|\lambda)$ aus einer Simulation mit konstanter Geschwindigkeit.

ist logarithmisch skaliert, da die Werte von $P(O|\lambda_m)$ über mehrere Zehnerpotenzen streuen. Die Größenordnung der Werte erklärt sich aus der Vielzahl möglicher Zustandsfolgen und Beobachtungswerte. Es ist zu erkennen, daß in der logarithmischen Darstellung die Werte für $P(O|\lambda_m)$ annähernd normalverteilt sind.
Gelingt es, den Mittelwert und die Streuung dieser Verteilungsfunktion abzuschätzen, kann daraus der Anteil der Mobilstationen berechnet werden, für die $P(O|\lambda_m)$ eine gegebene Schwelle übersteigt.

7.4.1 Erwartungswerte

Die Berechnung des Erwartungswertes für die Beobachtungswahrscheinlichkeit kann analog zu der Berechnung der Wahrscheinlichkeitswerte für das HMM durchgeführt werden. Es gilt demgemäß:

$$E(P(O|\lambda_l)) = \sum_{i=1}^{N} E(\alpha_T(i)) \tag{7.17}$$

Damit ergibt sich für die Rekursionsformel:

$$E(\alpha_{t+1}(j)) = E\left(\left[\sum_{i=1}^{N} \alpha_t(i)\, a_{ij}\right] b_j(O_{t+1})\right), \qquad 1 \le j \le N \tag{7.18}$$

und da die beiden Faktoren stochastisch unabhängig voneinander sind

$$E(\alpha_{t+1}(j)) = E\left(\left[\sum_{i=1}^{N} \alpha_t(i) a_{ij}\right]\right) \underbrace{E\left(b_j(O_{t+1})\right)}_{B} \tag{7.19}$$

Der Faktor B kann näherungsweise durch Aufsummieren der Auftrittswahrscheinlichkeiten jedes Beobachtungswertes v_k im Zustand j, $b_j(k)$, gewichtet mit der Wahrscheinlichkeit, daß dieser Wert als Meßwert tatsächlich auftritt.

$$E\left(b_j(O_{t+1})\right) = \sum_{k=1}^{M} b_j(k) \cdot b'(k) \tag{7.20}$$

Näherungsweise ist

$$b'(k) = b_j(k), \tag{7.21}$$

da erwartungsgemäß die Verteilung der tatsächlichen Meßwerte mit der modellierten Verteilung übereinstimmt.
Die Berechnung des Mittelwertes $\mu_{log} = E(\log_{10} P(O|\lambda_m))$ ist unter allgemeinen Bedingungen nicht möglich. Wird allerdings eine Normalverteilung für $P(O|\lambda_m)$ vorausgesetzt, kann dieser aus dem Erwartungswert $\mu = E(P(O|\lambda_l))$, der aus Gleichung (7.19) unter der Annahme (7.21) mit Hilfe des Forward-Backward-Algorithmus berechnet werden kann, hergeleitet werden: Mit dem Ansatz

$$p_{log}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{log}^2}} e^{-\frac{(x-\mu_{log})^2}{2\sigma_{log}^2}} \tag{7.22}$$

und der Transformation

$$y = 10^x \quad \Leftrightarrow \quad x = \log_{10}(y) = \frac{\ln(y)}{\ln(10)} \tag{7.23}$$

erhält man mit Hilfe der Transformationsvorschrift für Funktionen von Verteilungsdichten

$$p(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{log}^2}} \frac{1}{y \cdot \ln(10)} e^{-\frac{(\frac{\ln(y)}{\ln(10)} - \mu_{log})^2}{2\sigma_{log}^2}} \tag{7.24}$$

Dies ist die Verteilungsdichtefunktion für $P(O|\lambda_m)$, für deren Erwartungswert gilt

$$\begin{aligned} E(P(O|\lambda_m)) &= \int_0^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{log}^2}} \frac{1}{\cdot \ln(10)} e^{-\frac{(\frac{\ln(y)}{\ln(10)} - \mu_{log})^2}{2\sigma_{log}^2}} dy \qquad (7.25) \\ &= e^{-\left(\frac{\sigma_{log}^2 \ln^2(10)}{2} + \mu_{log} \cdot \ln(10)\right)} \\ &= \mu \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich

$$\mu_{log} = \frac{\ln(\mu)}{\ln(10)} - \frac{\sigma_{log}^2 \cdot \ln(10)}{2} \qquad (7.26)$$

7.4.2 Streuung der logarithmischen Verteilung

Für eine grobe Abschätzung der Standardabweichung σ_{log} von $P(O|\lambda_m)$ wird angenommen, daß ausschließlich diejenige Zustandsfolge Q_{real}, die der tatsächlichen Bewegung der Mobilstation entspricht, einen signifikanten Beitrag zu $P(O|\lambda_m)$ leistet. Diese Annahme kann näherungsweise getroffen werden, da für die anderen Zustandsfolgen die modellierten Beobachtungswahrscheinlichkeiten $b_j(k)$ nur sehr begrenzt mit den tatsächlich gelieferten Meßwerten übereinstimmen und diese Zustandsfolgen daher um einige Größenordnungen kleinere Beiträge zur Gesamtwahrscheinlichkeit leisten als Q_{real}. Unter dieser Annahme ist $P(O|\lambda_l)$ nur durch das Kurzzeitschwund und die Ungenauigkeiten bei der Meßwerterfassung sowie durch die Länge der Sequenz bestimmt. Die Streuung der Funktion $P(O|\lambda_l)$ wird daher bei dieser Betrachtung nur durch die in den Verteilungsdichtefunktionen für die Meßwerte $b_j(k)$ berücksichtigten Faktoren beeinflußt.
Den Maximalwert für $b_j(k)$ in jedem Zustand und somit den Maximalwert von $P(O|\lambda_m)$ erhält man, wenn die tatsächlichen Beobachtungswerte O_t mit dem Erwartungswert m_{q_t} übereinstimmen. Für $O_t \neq m_{q_t}$ ist $b_{q_t}(O_t) < b_{q_t}(m_{q_t})$. Der Faktor

$$r_t = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{dB,av}^2}} e^{-\frac{(O_t - m_{q_t})^2}{2\sigma_{dB,av}^2}}}{\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{dB,av}^2}} e^{-\frac{(O_t - m_{q_t})^2|_{O_t = m_{q_t}}}{2\sigma_{dB,av}^2}}} = e^{-\frac{(O_t - m_{q_t})^2}{2\sigma_{dB,av}^2}} \qquad (7.27)$$

drückt das Verhältnis zwischen dem Maximalwert $b_{q_t}(m_{q_t})$ und dem tatsächlichen Wert $b_{q_t}(O_t)$ aus. Für die gesamte Beobachtungssequenz gilt

$$r(A) = \prod_{t=1}^{T} r_t = e^{\frac{-\sum a_t^2}{2\sigma_{dB,av}^2}} \tag{7.28}$$

wobei a_t hier als Abkürzung für die Differenz zwischen O_t und m_{q_t} eingeführt wurde. Betrachtet man a_t als Koordinaten eines Punktes A in einem T-dimensionalen Raum, so wird offensichtlich, daß der Faktor r nur von dem Abstand $|a|$ des Punktes A vom Ursprung des Koordinatensystems abhängt. Unter den oben beschriebenen Vereinfachungen kann $P(O|\lambda)$ durch eine T-dimensionale Normalverteilung beschrieben werden, die zur Wiedergabe der Übergangswahrscheinlichkeiten und der Anfangswahrscheinlichkeit mit einem konstanten Faktor c zu multiplizieren ist.
Da $r(A)$ nur von $|a|$ abhängt, kann die Wahrscheinlichkeit, daß

$$1 > r(\tilde{A}) > e^{-\frac{a^2}{2\sigma_{dB,av}^2}}$$

ist, durch das Integral

$$P(a) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{dB,av}^2}} \underbrace{\int \cdots \int}_{\sum \tilde{a}_t^2 \leq a} e^{\frac{-\sum \tilde{a}_t^2}{2\sigma_{dB,av}^2}} dx_1 \cdots dx_n \tag{7.29}$$

ausgedrückt werden. Dies läßt sich zu

$$P(a) = \int_0^a 2\frac{\sqrt{\pi^T}}{\Gamma(\frac{T}{2})} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{dB,av}^2}} r^{T-1} e^{-\frac{r^2}{2\sigma_{dB,av}^2}} dr. \tag{7.30}$$

vereinfachen. Aus diesem Ausdruck kann a für eine gegebene Wahrscheinlichkeit numerisch berechnet werden.
Wählt man nun willkürlich etwa $P = 10\%$ und $P = 90\%$ so lassen sich zwei Werte a_{10} und a_{90} berechnen, so daß für 80 % aller Beobachtungssequenzen $P(O|\lambda)/P_{max}(O|\lambda)$ die Bedingung

$$e^{-\frac{a_{10}^2}{2\sigma_{dB,av}^2}} > r > e^{-\frac{a_{90}^2}{2\sigma_{dB,av}^2}}$$

erfüllt ist. Zwischen den Grenzen dieses Intervalls liegt der Faktor

$$e^{-\frac{a_{90}^2-a_{10}^2}{2\sigma_{dB,av}^2}},$$

so daß es sich in logarithmischer Darstellung über

$$I_{10,90} = \log_{10} e^{-\frac{a_{90}^2-a_{10}^2}{2\sigma_{dB,av}^2}} = \log_{10} e \cdot \frac{a_{10}^2 - a_{90}^2}{2\sigma_{dB,av}^2}$$

erstreckt. Andererseit gilt, da der Logarithmus von $P(O|\lambda)$ näherungsweise normalverteilt ist,

$$\int_{\mu_{log}-\frac{I_{10,90}}{2}}^{\mu_{log}+\frac{I_{10,90}}{2}} p_{log}(x)\,dx = \mathrm{erf}\left(\log_{10} e \cdot \frac{a_{10}^2 - a_{90}^2}{\sqrt{32}\sigma_{log}\sigma_{dB,av}^2}\right) \stackrel{!}{=} 0.8 \qquad (7.31)$$

Aus dieser Beziehung kann die Standardabweichung σ_{log} der logarithmischen Verteilung berechnet werden.
Die so berechneten Werte für μ_{log} und σ_{log} konnten in Simulationen mit guter Übereinstimmung bestätigt werden. Mit Hilfe dieser beiden Werte kann nun abhängig von einer gegebenen Fehlerrate eine geeignete Schwelle festgelegt werden.

7.5 Fehlerbetrachtung

Die vorstehend beschriebene Auswertung auf der Basis einer Schwellwertentscheidung kann auf zwei unterschiedliche Weisen zu einem Fehler führen. In Anlehnung an den Sprachgebrauch der Fehlerrechnung sollen hier die Begriffe α-Fehler (Fehler 1. Art) und β-Fehler (Fehler 2. Art) verwendet werden. Übertragen auf das vorliegende Problem bedeutet

- der Fehler erster Art, daß die Mobilstation sich im Bereich des HMM befunden hat, aber nicht erkannt wurde, da die ermittelte Beobachtungswahrscheinlichkeit die Schwelle nicht überschritt. Dies ist der Fall, wenn statistische Schwankung zu einer signifikanten Abweichung des Signals vom Modell führen.
- der Fehler zweiter Art, daß eine Meßwertsequenz einem Modell m zugeordnet wird, obwohl sie nicht beim Durchfahren der modellierten Strecke aufgezeichnet wurde.

7.5.1 Fehler 1. Art

Der Fehler 1. Art kann als Quotient aus der Anzahl der nicht Erkannten und der Gesamtzahl der Mobilstationen, die den modellierten Streckenabschnitt durchfahren haben, definiert werden:

$$F_\alpha = \frac{N_{n.erk}}{N_{ges}} \tag{7.32}$$

Eine Abschätzung von F_α kann analog zum Vorgehen bei der Ermittlung der Schwelle im vorangehenden Abschnitt vorgenommen werden. Sie entspricht der Fläche unter der Verteilungsdichtefunktion $p_{log}(x)$ für $x < W$

$$F_\alpha = \int_{-\infty}^{W} p_{log}(x)dx \tag{7.33}$$

7.5.2 Fehler 2. Art

Als Fehler zweiter Art wurde das Verhältnis der fehlerhaft Erkannten zu den insgesamt Erkannten festgelegt:

$$F_\alpha = \frac{N_{fehl}}{N_{erk}} \tag{7.34}$$

Um eine verläßliche Aussage über den Fehler zweiter Art zu treffen, ist eine Information über die Feldstärkeverteilung in der gesamten betrachteten Umgebung erforderlich, denn die Wahrscheinlichkeit für einen Fehler zweiter Art ist abhängig von der Ähnlichkeit der anderen Feldstärkemuster. Zwar läßt sich die Unterscheidbarkeit der Muster durch die Wahl einer größeren Sequenzlänge erhöhen, doch ist im Sinne einer Optimierung des Algorithmus eine untere Grenze für die Sequenzlänge von Interesse.

7.5.2.1 Wahrscheinlichkeit der Fehlzuordnung

Mit Hilfe einer statistischen Betrachtung kann eine Abschätzung der Wahrscheinlichkeit für eine Fehlzuordnung einer Meßwertsequenz zu einem Modell vorgenommen werden.
Zur Vereinfachung werden die folgenden Annahmen getroffen:

- zwei aufeinanderfolgende Beobachtungswerte sind statistisch unabhängig

- die Geschwindigkeit ist konstant, so daß die Übergangswahrscheinlichkeiten keinen Einfluß haben.
- wie bereits in Abschnitt 7.4.2 sollen Zustandsfolgen, die nicht der tatsächlichen Bewegung der Mobilstation entsprechen, vernachlässigt werden.

Unter diesen Voraussetzungen kann die Wahrscheinlichkeitsdichte bei n Beobachtungswerten als n-faches Produkt unabhängiger Gaußverteilungen formuliert werden. Zur Vereinfachung der Rechnung wird die erste Verteilungsfunktion als im Ursprung liegend angenommen und lediglich die Differenz der Mittelwerte der einzelnen Normalverteilungen betrachtet. Es können dann die beiden Verteilungsdichten als

$$f_1 = \prod_{i=1}^{n} \frac{e^{-\frac{x_i^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}$$

und

$$f_2 = \prod_{i=1}^{n} \frac{e^{-\frac{(x_i-\mu_i)^2}{2\sigma^2}}}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}$$

angegeben werden.
Es kann nun gezeigt werden, daß eine sukzessive Reduktion der Anzahl der Dimensionen möglich ist. Betrachtet wird zunächst der Fall n=2 (siehe Bild 7.7). Als Entscheidungkriterium für die Zuordnung wird herangezogen, welche der beiden Wahrscheinlichkeitsdichten für den Beobachtungswert den größeren Wert liefert. Zur Ermittlung der Wahrscheinlichkeit, daß ein Wert, der der Verteilung f_1 entstammt, irrtümlich der Verteilung f_2 zugeordnet wird, ist dann die Funktion f_1 über die gesamte Halbebene zu integrieren, die rechts von einer Geraden liegt, die die Verbindunglinie der Mittelpunkte der Gaußkurven halbiert und senkrecht auf dieser steht. Zur Vereinfachung dieser Integration wird folgende Variablentransformation durchgeführt.

$$\alpha = -\arctan\frac{\mu_2}{\mu_1} \tag{7.35}$$

$$T = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \tag{7.36}$$

und

$$\vec{y} = T \cdot \vec{x} \tag{7.37}$$

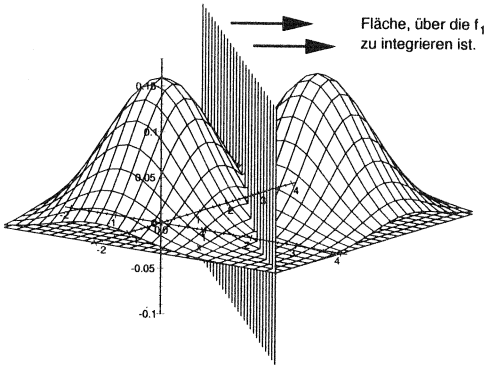


Bild 7.7: Zur Berechnung des Fehlers 2. Art

Es ergeben sich daraus die Funktionen

$$f_1^* = \frac{e^{-\frac{y_1^2+y_2^2}{2\sigma^2}}}{2\pi\sigma^2}$$

$$f_2^* = \frac{e^{-\frac{(y_1-\sqrt{\mu_1^2+\mu_2^2})^2+y_2^2}{2\sigma^2}}}{2\pi\sigma^2}$$

und es ist dann zur Ermittlung der gesuchten Wahrscheinlichkeit die Funktion f_1^* über die Halbebene rechts von $y_1 = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2}/2$ zu integrieren. Führt man nun die Integration über die Koordinate y_2 aus, so reduziert sich Problem auf das zweier eindimensionaler Gaußverteilungen mit gleicher Streuung wie die ursprünglich betrachteten Einzelverteilungen. Nun wird

$$x_1^* = y_1 \qquad \text{und} \qquad \mu_1^* = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2}$$

gesetzt, sowie nunmehr zur Berücksichtigung der nächsthöheren Dimension

$$x_2* = x_3 \qquad \text{und} \qquad \mu_2^* = \mu_3$$

und erneut die Transformationsschritte (7.35) bis (7.37) ausgeführt. Dieses Verfahren läßt sich nun sukzessive fortführen, wobei im i-ten Iterationsschritt

$$x_1^* = y_1 \qquad \text{und} \qquad \mu_1^* = \sqrt{\sum_{j=1}^{i} \mu_i^2}$$

sowie

$$x_2* = x_{i+1} \qquad \text{und} \qquad \mu_2^* = \mu_{i+1}$$

gesetzt wird, bis schließlich nur noch das Integral

$$F_\beta = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \int_{\frac{\sqrt{\sum \mu_i^2}}{2}}^{\infty} e^{-\frac{y_1}{2\sigma^2}} dy_1 \tag{7.38}$$

auszuführen ist. F_β stellt die Wahrscheinlichkeit für eine Fehlzuordnung einer Meßsequenz, die einem Modell $m = 2$ an der Stelle 2 in der Mobilfunkumgebung zuzuordnen wäre, zu dem Modell $m = 1$ dar, wenn die Mittelwerte der Beobachtungswahrscheinlichkeiten in den Zuständen q_i um μ_i voneinander abweichen.
Da in der Datenbank die Feldstärkeverteilung der gesamten Mobilfunkzelle abgebildet ist, kann Gleichung (7.38) dazu herangezogen werden, für einen gegebenen Streckenabschnitt den Fehler 2. Art zu berechnen, indem F_β für die gesamte Umgebung aufsummiert wird.

7.6 Ergebnisse

7.6.1 Simulation der Funkwellenausbreitung

Die Gewinnung der Modellparameter und die nachfolgende Simulation der Lokalisierung von Mobilstationen wurde auf der Basis von Feldstärkewerten vorgenommen, die für eine fiktive Umgebung berechnet wurden.
Das für die Simulation der Ausbreitungsbedingungen verwendete Werkzeug basiert auf dem Modell von Okumura und Hata [6], dem einige aus der Literatur bekannte Erweiterungen hinzugefügt wurden (s. z. B. [31]), die auch in kommerziellen Funknetzplanungswerkzeugen eingesetzt werden (z. B. [32]). Eine detailierte Beschreibung des eingesetzten Simulators wird in [21] gegeben.

Das Okumura-Hata-Modell charakterisiert die Umgebung durch zwei Merkmale, den *Geländetyp* und den *Morphologietyp*.
Beim Geländetyp unterscheidet Okumura

- ebenes Gelände mit maximal 20 m Höhenunterschied (*quasi-smooth terrain*)
- unregelmäßige Geländeformen (*irregular terrain*)
  Diese werden weiter unterteilt in
  - hügelige Gebiete (*rolling hilly terrain*)
  - einzelne Berge (*isolated mountain*)
  - Gelände mit Gefälle (*general sloping terrain*)
  - Mischungen aus Land- und Wasserflächen (*mixed land-sea path*)

Als Morphologietypen werden bei Okumura die folgenden Gebiete unterschieden:

- offene Gebiete ohne deutliche Hindernisse (z. B. Ackerflächen) (*open area*)
- Gebiete mit aufgelockerter Bebauung (*suburban area*)
- Großstadtumgebung mit Hochhäusern und mindestends zweistöckigen Gebäuden (*urban*)

Diese wurden um die Klassen

- Waldgebiet (*forest*)
- halboffene Gebiete mit wenigen Häusern und Bäumen (*quasi-open*)
- Wasserflächen (*sea*)

erweitert, um eine spezifischere Beschreibung der betrachteten Umgebung zu ermöglichen und so eine größere Übereinstimmung der Simulation mit der Realität zu erreichen.
Das Prinzip des Verfahrens von Okumura besteht darin, entsprechend den Gelände- und Morphologietypen, die auf dem Ausbreitungspfad zwischen der Basisstation und der Mobilstation vorgefunden werden, einen geeigneten Faktor zu bestimmen, um den der Pfadverlust bei unbeeinflußter Ausbreitung korrigiert werden muß. In seiner Veröffentlichung gibt er Diagramme an, aus denen die Korrekturfaktoren in Abhängigkeit von der Frequenz ermittelt werden können.
Außerdem können bei Kenntnis der Morphologie die statistischen Eigenschaften der Mehrwegeausbreitung bestimmt werden, die in der Simulation durch Zufallswerte mit den entsprechenden Parametern wiedergegeben wird. Die für die vorliegenden Ergebnisse betrachtete Umgebung ist in Abbildung 7.8 dargestellt. Eingetragen sind dort auch die Standorte der Basisstationen.

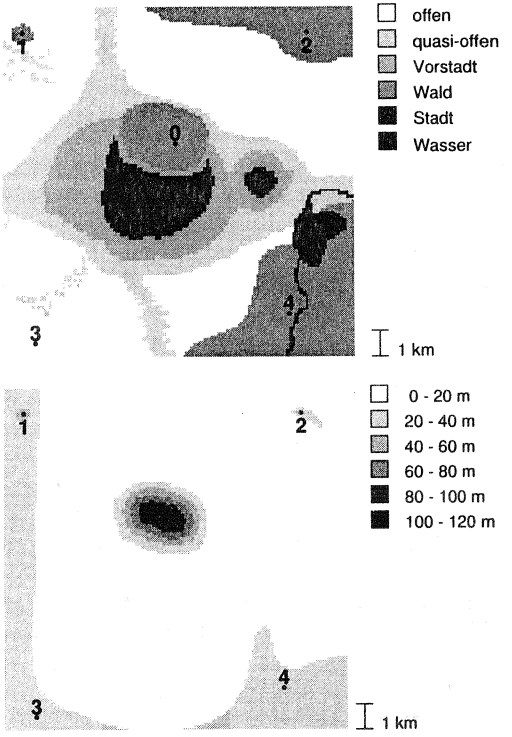


Bild 7.8: Simulationsumgebung: Oberflächenstruktur (oben) und Geländeerhebung (unten)

7.6.2 Simulation der Lokalisierung

Die im folgenden dargestellten Ergebnisse wurden in der beschriebenen simulierten Mobilfunkumgebung erzielt. Dieser Weg wurde der Verwendung von Meßdaten aus einem realen Mobilfunknetz vorgezogen, um die prinzipielle Eignung des Verfahrens unter typischen Ausbreitungsbedingungen aufzeigen zu können.
Zur Veranschaulichung der Problematik der Schwellenwahl ist in Abbildung 7.9 die Beobachtungswahrscheinlichkeit über der zurückgelegten Strecke aufgetragen. Die Länge der Meßwertsequenz betrug nur 15 Werte. Dennoch bildete sich auf dem Streckenabschnitt, der durch das Modell beschrieben war, der deutlich höchste Peak aus, während an anderen Stellen, die ähnliche Feldstärkemuster aufwiesen, nicht dieser Maximalwert von $P(O|\lambda)$ erreicht wurde. Die Abbildung legt daher den Schluß nah, daß eine geeignete Schwelle so gewählt werden kann, daß für die zu erkennende Meßwertsequenz eine Schwelle W überschritten wird, während dieser Wert von anderen nicht erreicht wird.
Um auch sicherzustellen, daß Fahrzeuge, die stärker vom Mittelwert der modellierten Geschwindigkeit abweichen noch mit hinreichender Zuverlässigkeit erkannt werden können, sollte die Schwelle niedriger als nach dem in Abschnitt 7.5.1 berechneten Wert gewählt werden, da dort das Mobilitätsverhalten nicht mitberücksichtigt wurde. Dies ist in Abildung 7.10 veranschaulicht. Es ist dort die ermittelte Beobachtungswahrscheinlichkeit über der Geschwindigkeit aufgetragen. Die Geschwindigkeitsverteilung wurde als Gaußverteilung mit dem Mittelwert 50 km/h und der Standardabweichung 20 km/h gewählt.
Abbildung 7.11 zeigt den Anteil nicht lokalisierter Mobilstationen in Abhängigkeit vom Abstand der Bezugsorte. Es ist zu erkennen, daß eine Verringerung dieses Abstandes über den in Abschnitt 7.3.3 berechneten Wert hinaus keine deutlichen Verbesserungen bringt.
Schließlich zeigt Abbildung 7.12 beide Fehlerwahrscheinlichkeiten über der Schwelle am Beispiel von Meßwertsequenzen der Länge 40 und 60 . Es ist zu erkennen, daß es bei genügend langer Beobachtungssequenz eine geeignete Schwelle gibt, für die beide Fehlerwahrscheinlichkeiten so klein werden, daß das Verfahren für eine Erkennung geeignet ist und daß durch eine Verlängerung der Beobachtungssequenz in jedem Fall eine Verringerung der Fehlerwahrscheinlichkeit erreicht werden kann.

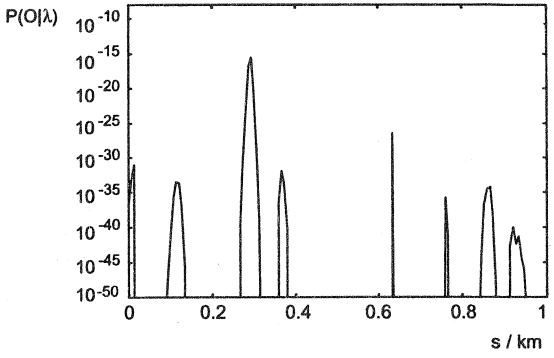


Bild 7.9: Beobachtungswahrscheinlichkeit über der zurückgelegten Strecke

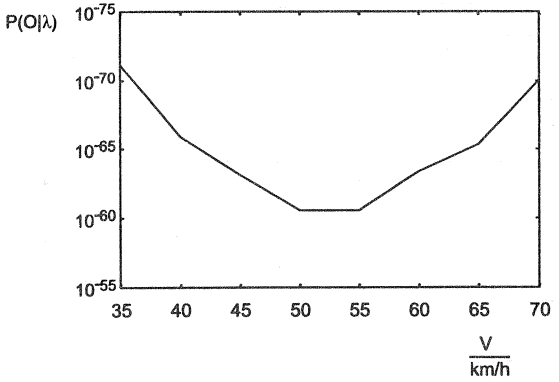


Bild 7.10: Mittelwert der Beobachtungswahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit

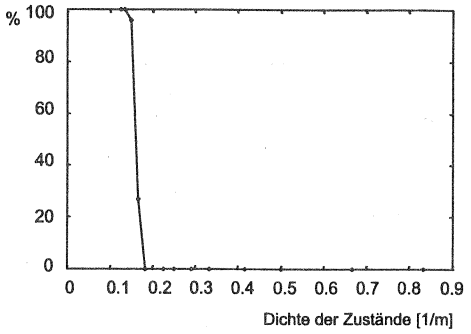


Bild 7.11: Anteil nicht erkannter Mobilstationen in Abhängigkeit von der Zustandsdichte

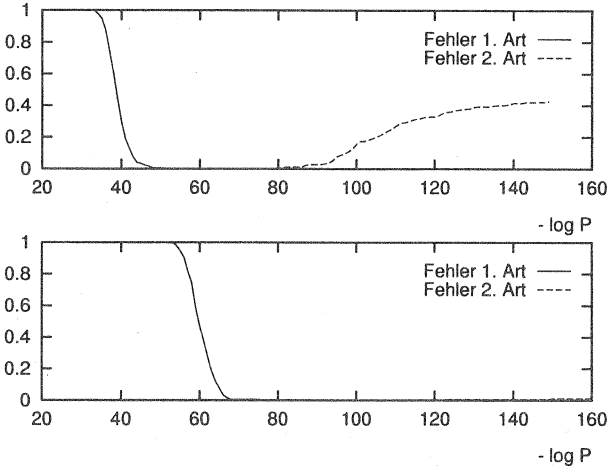


Bild 7.12: Fehlerwahrscheinlichkeit gegenüber der Schwelle für 40 (oben) und 60 (unten) Beobachtungswerte

KAPITEL 8

Kontinuierliche Erkennung

8.1 Verfahren

Bei der Mustererkennung mit dem in Kapitel 7 beschriebenen isolierten HMM repräsentiert jedes Modell einen kurzen Abschnitt des Straßennetzes und erlaubt die Lokalisierung beim Passieren dieses Streckenabschnitts. Dort erfolgte die Erkennung in Form einer Schwellenentscheidung, und die Zuverlässigkeit dieser Entscheidung hing maßgeblich von der Länge der betrachteten Meßwertsequenz ab.
In diesem Kapitel wird ein Verfahren vorgestellt, daß eine Verbesserung in zwei Punkten erlaubt. Zum einen kann eine Reduktion des Rechenaufwandes erreicht werden, so daß bei gleichbleibender Fehlerwahrscheinlichkeit eine höhere Anzahl von Modellen ausgewertet werden kann. Zum anderen stellt es die Basis für die kontinuierliche Lokalisierung des Mobilstation dar.
Grundlage des Verfahrens ist die Zerlegung der HMM in kürzere Teilmodelle und eine schrittweise Auswertung der Beobachtungssequenz.

8.2 Schrittweise Auswertung der Modelle

Im Gegensatz zu dem in Kapitel 7 beschriebenen Vorgehen wird hierbei im ersten Schritt nur eine verkürzte Teilsequenz $O_1, \ldots O_{T_I}$ der Meßwertsequenz ausgewertet. Da sich die Strecke, die die Mobilstation in diesem Zeitraum maximal zurücklegt, aufgrund der endlichen Maximalgeschwindigkeit um den gleichen Faktor reduziert, kann dazu ein ebenfalls verkürztes HMM herangezogen werden, ohne daß sich die Berechnung der Wahrscheinlichkeiten $\alpha_{T_I}(i)$ bis zu diesem Zeitpunkt ändert. Durch geeignete Wahl der Schwellenwahrscheinlichkeiten können dann bereits einige Modelle ausgeschlossen werden. Dieses Verfahren wird bei ständiger Verlängerung der Modelle so lange wiederholt, bis eine zuverlässige Erkennung gewährleistet ist. Auf diese Weise verringert sich die Anzahl der Modelle, für die die gesamte Beobachtungssequenz ausgewertet werden muß.
Auch an Verzweigungen des Straßennetzes ist dieses Verfahren von Vorteil, da auf dieses Weise für gemeinsame Streckenabschnitte die Auswertung nur

einmal erfolgen muß und die Berechnung lediglich für die unterschiedlichen Teilabschnitte separat fortgesetzt werden muß.

8.3 Berechnung der Wahrscheinlichkeiten

Aus den Ausführungen in Kapitel 7 geht hervor, daß die Modellierung sowohl der Übergangs- als auch der Ausprägungswahrscheinlichkeiten unabhängig vom Anfang und Ende eines Modells ist. Bei der Zerlegung eines HMMs in Teilmodelle müssen daher lediglich die Anfangswahrscheinlichkeiten des Folgemodells neu berechnet werden.
Die Berechnung kann auf die Vorwärts-Wahrscheinlichkeiten $\alpha_T(i)$ (siehe 7.2 zurückgeführt werden, die angeben, mit welcher Wahrscheinlichkeit sich das Modell zum Zeitpunkt T im Zustand i befindet und die Beobachtungssequenz $O_1, \ldots O_T$ aufgetreten ist.
Im folgenden wird mit dem Index I das Anfangsteilmodell eines HMM oder einer Anzahl von Modellen, die miteinander verknüpft werden sollen, gekennzeichnet. Das Verhältnis

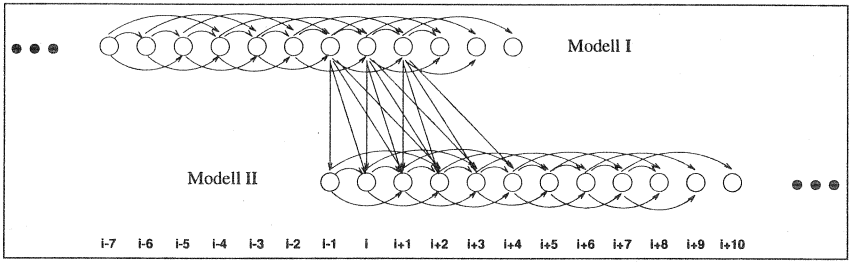


Bild 8.1: Berechnung eines Nachfolgemodells

$$\frac{P_I(O_1 O_2 \cdots O_{T_I}, q_{T_I} = S_i|\lambda_I)}{P_I(O_1 O_2 \cdots O_T|\lambda_I)} = P_I(q_{T_I}|O_1 O_2 \cdots O_T, \lambda_I) \tag{8.1}$$

gibt die Wahrscheinlichkeit an, daß sich nach einer Teilbeobachtungssequenz der Länge T_I das Anfansmodell im Zustand S_i befindet. Diese Größe läßt sich entsprechend der Definition nach Gleichung (7.2) auch durch die

Vorwärtsvariable $\alpha_t(i)$ ausdrücken:

$$P_I(q_{T_I}|O_1O_2\cdots O_T,\lambda_I)=\frac{\alpha_{T_I}(i)}{\sum_{i=1}^{N}\alpha_{T_I}(i)} \tag{8.2}$$

Die Wahrscheinlichkeit, daß das Modell beim nächsten Meßwert, d. h. 480 ms später, in den Zustand j übergeht, ist:

$$P_I(q_{T+1}=S_j|O_1O_2\cdots O_T)=\sum_{i=1}^{N}a_{ij}P_I(q_T=S_i|O_1O_2\cdots O_T,\lambda_I) \tag{8.3}$$

Wird gemäß Abbildung 8.1 diese Wahrscheinlichkeit als Anfangszustandswahrscheinlichkeit des Nachfolgemodells II gewählt, d. h.

$$P_{II}(q_{II,1}=S_j)=P_I(q_{T+1}=S_j|O_1O_2\cdots O_T) \tag{8.4}$$

so gilt mit (6.6) und (8.3) für das Nachfolgemodell II

$$\pi_{II,j}=\frac{\sum_{i=1}^{N}a_{ij}\alpha_{I,T_I}(i)}{\sum_{i=1}^{N}\alpha_{I,T_I}(i)} \tag{8.5}$$

Der Wert

$$\alpha_{II,T_I+1}(j)=\pi_{II,j}\cdot b_j(O_{T_I+1}) \tag{8.6}$$

im Zeitpunkt T_I+1 für den ersten Beobachtungswert des Nachfolgemodells unterscheidet sich von dem Wert

$$\alpha_{I,T_I+1}(j)=\left[\sum_{i=1}^{N}\alpha_{I,T_I}(i)a_{ij}\right]b_j(O_{T_I+1}), \tag{8.7}$$

der sich bei weiterer Auswertung des Modells I nach Gleichung (7.4) ergäbe, nur durch den konstanten Normierungsfaktor

$$\sum_{i=1}^{N}\alpha_{I,T_I}(i)=P_I(O_1O_2\cdots O_{T_I}|\lambda_I)$$

Dieser kann bei schrittweiser Auswertung eines Modells durch einfache Multiplikation berücksichtigt werden. Für die im folgenden Abschnitt beschriebene kontinuierlichen Erkennung ist er jedoch ohne Relevanz.

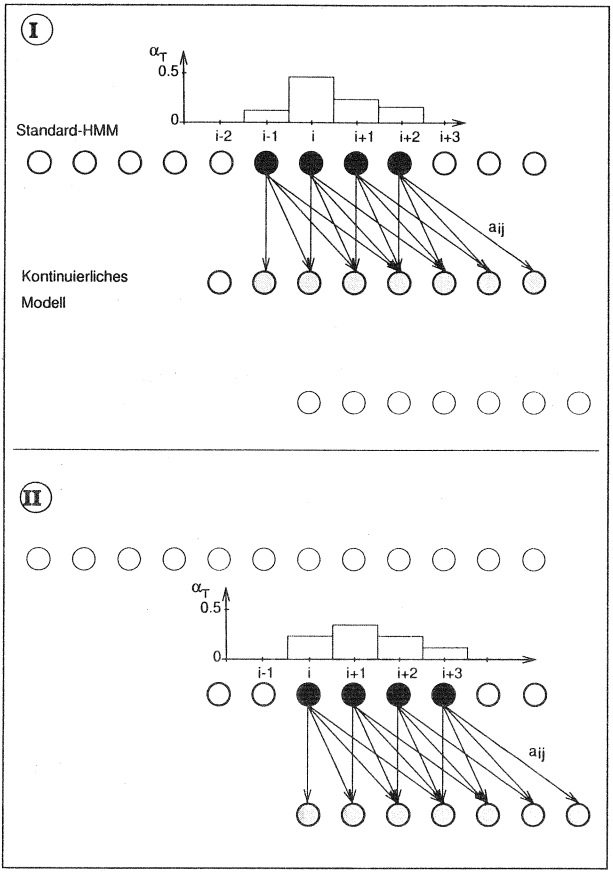


Bild 8.2: Berechnung von π_i für ein Folgemodell

8.4 Ein kontinuierliches Modell zur Verfolgung eines Mobilfunkteilnehmers

Die zuvor beschriebenen Berechnungen bilden den Ausgangspunkt für die kontinuierliche Lokalisierung der Mobilstation. Voraussetzung dafür ist, daß die Mobilstation zunächst nach dem in Kapitel 7 beschriebenen Verfahren

beim Durchqueren des modellierten Streckenabschnitts erfaßt worden ist, d.h. $P(O|\lambda)$ die festgelegte Schwelle Überschritten hat. Ab diesem Zeitpunkt ist dann eine kontinuierliche Verfolgung dadurch möglich, daß das Modell entsprechend der Bewegung der Mobilstation kontinuierlich erweitert wird. Abbildung 8.2 zeigt links die normierten Werte $\alpha_{I,T_I}(i)/\sum_{i=1}^{N}\alpha_{I,T_I}(i)$ für das Modell I. Sie stellen die Wahrscheinlichkeiten für den Aufenthalt der Mobilstation zum Zeitpunkt T_I dar. In der Praxis liegen die Werte der $\alpha_{T_I}(i)$ für einige benachbarte i signifikant über den anderen (in Abbildung 8.2 schwarz dargestellt). Dies entspricht der Tatsache, daß sich der höchste Wahrscheinlichkeitswert in der Nähe des Aufenthaltsortes der Mobilstation ergibt, letzterer sich aber aufgrund der statistischen Auswertungsmethode und in Abhängigkeit von der Charakteristik der Feldstärkemuster im allgemeinen nicht auf einen einzelnen Zustand eingrenzen läßt. Die übrigen Werte, die außerhalb dieses Bereiches liegen und gegenüber dem Maximum signifikant kleiner sind, können für die folgenden Schritte zu null angenommen werden.
Aufgrund der endlichen Maximalgeschwindigkeit der Mobilstation sind zudem die Werte von a_{ij} nur für eine geringe Zahl von j verschieden von null. Im Fall einer maximalen Geschwindigkeit von 180 km/h und einer Wahl von 0,25 Modellzuständen pro Meter sind dies lediglich 7 Zustände.
Aufgrund der Berechnungsvorschrift (8.5) führen diese beiden Faktoren zusammen dazu, daß auch die Anzahl der Zustände des Nachfolgemodells gering bleibt, die eine Anfangswahrscheinlichkeit $\pi_{II,j}$ ungleich null aufweisen. (Diese Zustände sind in Abbildung 8.2 durch Schraffur hervorgehoben.) Auf diese Weise wird eine Verlängerung des Modells vermieden, während es gleichzeitig der Bewegung der Mobilstation kontinuierlich folgt.

8.5 Anwendung und Ergebnisse

Für das Ergebnis in Bild 8.3 wurde nach jedem Takt, d. h. alle 480 ms ein neues Modell berechnet, d. h. die Länge der Beobachtungssequenz während des kontinuierlichen Erkennungsprozesses war konstant eins. Die Abbildung zeigt das Ergebnis einer kontinuierlichen Verfolgung eines Mobilfunkteilnehmers. Als Aufenthaltsort wurde stets der Bezugsort desjenigen Zustandes angenommen, an dem $\alpha_T(i)$ zum Zeitpunkt T den maximalen Wert annahm. Aufgetragen ist die Abweichung des aus dem Modell berechneten Aufenthaltsortes von dem tatsächlichen Aufenthaltsort in städtischem Gebiet über der Fahrtstrecke der Mobilstation. Es wird anschaulich, daß eine Mobilstation bis auf wenige Meter genau verfolgt werden kann.

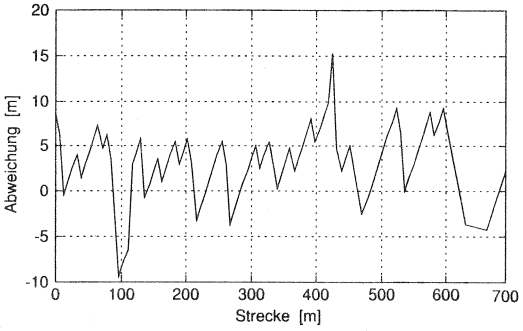


Bild 8.3: Abweichung des Lokalisierungsergebnisses vom tatsächlichen Aufenthaltsort

KAPITEL 9

Nichtkontinuierliche Bewegung der Mobilstation

In fließendem Verkehr kann man davon ausgehen, daß die Geschwindigkeit der Fahrzeuge sich in einem relativ engen Bereich bewegt, der wesentlich von der vorgeschriebenen Geschwindigkeit abhängt. Die auftretenden Fahrzeuggeschwindigkeiten lassen sich durch eine Verteilungsfunktion beschreiben, aus der sich problemlos die Übergangs- und Anfangswahrscheinlichkeiten berechnen lassen.
In nichtfließendem Verkehr hingegen, wie er typischerweise an Ampeln, Straßenkreuzungen oder Bahnübergängen auftritt, kann das Mobilitätsverhalten jedoch nicht mehr ausreichend durch eine Verteilung beschrieben werden.

9.1 Wiedergabe des Mobilitätsverhaltens im Modell

Die Mustererkennung mit Hilfe von Hidden-Markov-Modellen basiert auf der Berechnung der Wahrscheinlichkeit, daß eine gegebene Beobachtungssequenz durch das Modell beschrieben wird. Die Erkennung erfolgt daher um so zuverlässiger, je genauer das Modell das zu erkennende Muster repräsentiert, denn je besser das Modell die zu erkennende Sequenz wiedergibt, desto deutlicher ist die Abgrenzung gegenüber anderen Mustern. Daraus folgt, daß die Erkennungsleistung des Verfahrens umso höher ist, je kleiner die Varianz der auftretenden Verteilungsfunktionen ist. Bei hoher Varianz, bei der andere Muster mit annähernd gleicher Wahrscheinlichkeit durch das Modell repräsentiert werden, verringert sich dementsprechend die Möglichkeit der Abgrenzung gegenüber diesen.
Da in der Umgebung von Ampeln etc. mit ständiger Verzögerung und Beschleunigung gerechnet werden muß, variiert die Geschwindigkeit der Mobilstationen innerhalb weiter Grenzen. Ein Modell müßte daher alle diese Geschwindigkeiten in gleicher Weise berücksichtigen. Aus dem oben Erläuterten geht jedoch hervor, daß dies die Erkennungswahrscheinlichkeit beträchtlich herabsetzt.

Eine mögliche Lösung besteht nun darin, nur diejenigen Geschwindigkeiten zu berücksichtigen, die für eine Mobilstation tatsächlich in Betracht kommen. Zu diesem Zweck läßt sich die Tatsache ausnutzen, daß die augenblickliche Geschwindigkeit sich aus der wahrscheinlichsten Zustandsfolge des Hidden-Markov-Modells abschätzen läßt.
Um eine Vorstellung davon zu vermitteln, welche Gründe zur Wahl des vorliegenden Ansatzes geführt haben, folgt an dieser Stelle die Betrachtung des möglichen Verhaltens der Mobilstation in der Nähe einer Ampel.

- Zeigt die Ampel Rot, wird die Mobilstation ihre Geschwindigkeit verringern, ansonsten wird sie mit fast gleichbleibender Geschwindigkeit weiterfahren.
- Hat die Mobilstation bei roter Ampel ihre Geschwindigkeit verringert, wird sie wieder beschleunigen, sobald die Ampel auf Grün springt.
- Wenn die Mobilstation angehalten hat, wird sie beschleunigen, sobald die Ampel wieder Grün zeigt, bis sie die zulässige Geschwindigkeit erreicht. Der Ort, an dem sie anhält, variiert abhängig von der Anzahl anderer wartender Fahrzeuge.

Dieses Verhalten ist vor allem in der Nähe von Ampeln und Bahnübergängen zu erwarten, obwohl Beschleunigen und Verzögern natürlich auch an jeder anderen Stelle möglich ist.
In Kapitel 8 wurde dargestellt, wie eine kontinuierliche Lokalisierung ab dem Zeitpunkt möglich ist, zu dem die Mobilstation erstmalig geortet wurde. Dies geschieht durch schrittweise Erweiterung des Modells in Bewegungsrichtung der Mobilstation. Wenn die augenblickliche Position der Mobilstation bekannt ist, wird dazu ein Nachfolgemodel berechnet, das denjenigen Abschnitt der Straße beschreibt, der von der Mobilstation innerhalb des nächsten Schrittes erreicht werden kann. Als Schrittweite kommt damit *ein* Intervall von 480 ms oder auch eine kurze Sequenz von Meßwerten in Betracht.
Bild 9.1 zeigt, wie das Fahrzeugverhalten in den beschriebenen Szenarien für das Mustererkennungsverfahren berücksichtigt wird. Vorausgesetzt wird, daß die Mobilstation durch das kontinuierliche Lokalisierungsverfahren erfaßt wurde, bis sie in den Bereich eintritt, in dem die Mobilität nicht mehr nur durch *ein* Modell beschrieben werden kann. Von dieser Stelle an wird ein adaptives Modell angewendet, bestehend aus drei Teilen, von denen jeder ein mögliches Verhalten beschreibt:

- Weiterfahrt mit nahezu konstanter Geschwindigkeit wie in fließendem Verkehr

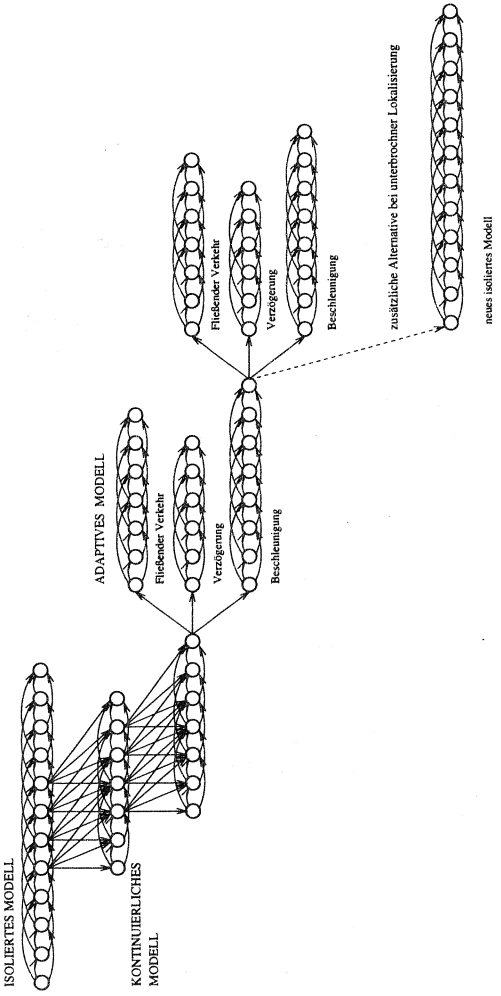


Bild 9.1: Modellierung des Mobilitätsverhaltens in der Nähe von Ampeln, Bahnübergängen und Straßenkreuzungen.

- Beschleunigung
- Verzögerung.

Während für fließenden Verkehr nur ein Modell in jedem Schritt neu berechnet wird, werden nunmehr drei Modelle verwendet. Dabei wird jeweils dasjenige ausgewählt, das die aktuelle Meßwertsequenz mit der höchsten Wahrscheinlichkeit wiedergibt. Auf der Basis des ausgewählten Modells werden daraufhin Ort und Geschwindigkeit der Mobilstation bestimmt.

9.2 Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten

Gesetzt den Fall, daß das Mobilitätsverhalten nicht mehr durch nur ein Modell wiedergegeben werden kann, werden die Übergangswahrscheinlichkeiten gemäß dem nachfolgend beschriebenen Verfahren berechnet.
Die Beschleunigung für eine Mobilstation wird als konstant angenommen, sie kann allerdings unter den Mobilstationen variieren. Geschwindigkeit und Ort der Mobilstation nach der Zeit t können durch

$$v(t) = v_i + a \cdot t \tag{9.1}$$

und

$$s(t) = v_i t + a\frac{t^2}{2} \tag{9.2}$$

beschrieben werden, wobei v_i und a Zufallsvariablen sind.
Die Übergangswahrscheinlichkeit a_{ij} ist die Wahrscheinlichkeit, von Zustand i in Zustand j innerhalb des Zeitintervalls T zu gelangen. Daher benötigen wir die Strecke $s(T)$, die die Mobilstation innerhalb des Intervalls T zurücklegt. Da v_i und a Zufallsvariablen sind, ist auch $s(T)$ eine Zufallsvariable. Zur Ermittlung der Übergangswahrscheinlichkeiten ist zunächst die Verteilung für $s(T)$ zu berechnen. Diese erhält man durch Integration von $p(v_i, a)$ über v_i und a, mit der Bedingung $s < S$. Setzt man der Einfachheit halber Normalverteilungen an und setzt v_i und a stets unabhängig voraus, so folgt

$$\begin{aligned} P(s < S) &= \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\frac{2}{T^2}(S - v_i T)} p(v_i, a)\, da\, dv_i \\ &= \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\frac{2}{T^2}(S - v_i T)} N(v_i, v_{im}, \sigma_{v_i}) \cdot N(a, a_m, \sigma_a)\, da\, dv_i \end{aligned}$$

$$= \int_0^{\infty} \int_{-\infty}^{\frac{2}{T^2}(S-v_iT)} \frac{1}{2\pi\sigma_{v_i}\sigma_a} e^{-\frac{(v_i-v_{im})^2}{2\sigma_{v_i}^2}} e^{-\frac{(a-a_m)^2}{2\sigma_a^2}} da\, dv_i \quad (9.3)$$

Die Dichtefunktion des Ortes ergibt sich entsprechend zu

$$\begin{aligned} p_s(s) &= \frac{\partial}{\partial S}(P(s \le S))\Big|_{S=s} \\ &= \frac{1}{\pi\sigma_{v_i}\sigma_a T^2} \int_0^{\infty} e^{-\frac{(v_i-v_{im})^2}{2\sigma_{v_i}^2}} e^{-\frac{(\frac{2}{T^2}(S-v_iT)-a_m)^2}{2\sigma_a^2}} dv_i \end{aligned} \quad (9.4)$$

Daraus lassen sich die Übergangswahrscheinlichkeiten durch Integration von $p_s(s)$ über den Streckenabschnitt s, der jedem Zustand zugeordnet ist, berechnen.
Dies erfordert jedoch die Kenntnis der Geschwindigkeitsverteilung im Ausgangszustand i. Bei der Betrachtung der beschleunigten Bewegungen stellt sich heraus, daß diese nicht mehr für jeden Zustand gleich ist. Für die Ermittlung der Geschwindigkeitsverteilung muß daher berücksichtigt werden, daß jeder Zustand von jeweils unterschiedlichen Zuständen in unterschiedlicher Zeit, d.h. innerhalb einer beliebigen Schrittanzahl, erreicht werden kann. Zur Berechnung der Geschwindigkeitsverteilung müßte jeder Zustand, von dem aus der Zustand i erreicht werden kann und der auf diese Weise zu der Geschwindigkeitsverteilung beiträgt, entsprechend seiner Übergangswahrscheinlichkeit berücksichtigt werden, was aufgrund der Vielzahl der Kombinationsmöglichkeiten rechentechnisch unmöglich ist.
Für die beabsichtigte Anwendung ist die Zeit t (vom Beginn des Modells in einen bestimmten Zustand) nicht relevant. Sie wird daher aus den Gleichungen (9.1) und (9.2) eliminiert wird, und es ergibt sich

$$v = \sqrt{v_i^2 + 2sa} \quad (9.5)$$

Zur Bestimmung der Verteilungsfunktion von v integrieren wir über alle (v_i, a) mit der Bedingung $V \ge \sqrt{v_i^2 + 2sa}$ bzw.

$$a \le \frac{V^2 - v_i^2}{2s}, \quad (9.6)$$

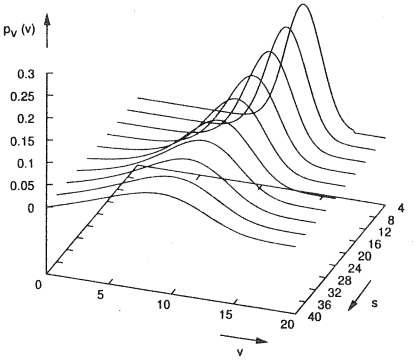


Bild 9.2: Verteilungsdichtefunktion der Geschwindigkeit für Zustände $s = i \cdot 4$ m vom Anfang des Modells. Anfängliche Geschwindigkeit 50 km/h.

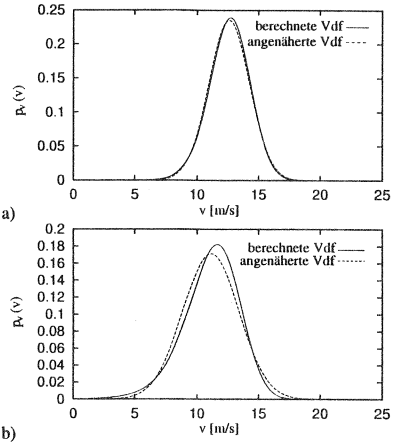


Bild 9.3: Verteilungsdichtefunktion der Geschwindigkeit in einer Entfernung von 8 m (oben) und 16 m (unten) von der Stelle, an der die Verzögerung eintritt.

wobei s nunmehr ein fester Parameter ist. Zusätzlich ist die Bedingung $a \geq \frac{v_i^2}{2s}$ einzuhalten. Die Verteilung von v ergibt sich zu

$$P(v < V) = \int_0^{\infty} \int_{\frac{v_i^2}{2s}}^{\frac{V^2 - v_i^2}{2s}} p(v_i, a)\, da\, dv_i \tag{9.7}$$

und durch Ableitung nach V erhält man

$$\begin{aligned} p_v(v) &= \frac{\partial}{\partial V}(P(v < V))\Big|_{V=v} \\ &= \int_0^{\infty} \frac{v}{s} \cdot p(v_i, \frac{v^2 - {v_i}^2}{2\,s})\, dv_i \end{aligned}$$

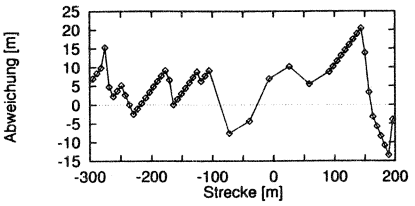


Bild 9.4: Kontinuierliche Lokalisierung vor und nach einer grünen Ampel

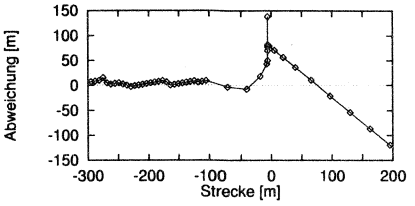


Bild 9.5: Kontinuierliche Lokalisierung in der Umgebung einer Ampel. Die Mobilstation hält bei Rot an und nimmt ihre Fahrt bei Grün wieder auf.

$$= \int_0^\infty \frac{v}{s} \cdot N(v_i, v_{im}, \sigma_{v_i}) \cdot N(\frac{v^2 - {v_i}^2}{2\,s}, a_m, \sigma_a)\; dv_i$$

$$= \int_0^\infty \frac{v}{s} \cdot \frac{1}{2\pi\sigma_{v_i}\sigma_a}\, e^{-\frac{(v_i - v_{im})^2}{2\sigma_{v_i}^2}}\, e^{-\frac{(\frac{v^2 - v_i^2}{2s} - a_m)^2}{2\sigma_a^2}}\; dv_i. \qquad (9.8)$$

Bild 9.2 zeigt $p_v(v)$ für $s = i \cdot 4\text{m}$, $i = 1, 2, 3, \ldots$.
Wie im Bild 9.3 deutlich zu erkennen ist, kann die Verteilungsdichtfunktion der Geschwindigkeit hinreichend genau durch eine Normalverteilung angenähert werden. Daher können die Übergangswahrscheinlichkeiten für ein Modell, das beschleunigte Bewegung berücksichtigt, mit Hilfe der oben hergeleiteten Formel (9.4) ermittelt werden.

9.3 Simulationsergebnisse

Das adaptive Modell soll eine kontinuierliche Lokalisierung in der Umgebung von Ampeln, Bahnübergängen und ähnlichen Verkehrssituation ermöglichen, bei denen nicht von fließendem Verkehr ausgegangen werden kann. Ein geeignetes Maß für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit des Erkennungsalgorithmus ist die Abweichung der vom Algorithmus ermittelten Position von der tatsächlichen. Die Abbildungen 9.4 und 9.5 zeigen Ergebnisse der Lokalisierung in der Nähe einer Ampel in städtischer Umgebung.
Die Ampel befindet sich bei der Koordinate 0 auf der Abszisse, und das adaptive Modell wird in einer Umgebung von jeweils 100 m vor und hinter

der Ampel verwendet. Als am besten geeignet hat sich eine Sequenzlänge von 5 Werten als Schrittweite für die Neuberechnung des Modells erwiesen. Bei längeren Sequenzen kann sich der Algorithmus nicht schnell genug an ein verändertes Fahrverhalten anpassen, bei kürzeren Sequenzen liegen die Wahrscheinlichkeiten der drei alternativen Modelle zu nahe beieinander, so daß eine Unterscheidung nicht zuverlässig genug getroffen werden kann.
Abbildung 9.4 zeigt den Fall einer durchgehend grünen Ampel. Es ist zu erkennen, daß innerhalb und außerhalb des Bereiches, in dem das adaptive Modell verwendet wird, die gleiche Genauigkeit gewährleistet werden kann.
In Abbildung 9.5 zeigt die Ampel Rot. Die Mobilstation hält für kurze Zeit und fährt dann weiter. Die Abweichung zwischen der geschätzten und der tatsächlichen Position der Mobilstation an der Ampel wird zunehmend größer und auch hinter der Ampel ist eine deutliche Abweichung zu erkennen. Dies liegt darin begründet, daß für die Berechnung des Nachfolgemodells die Geschwindigkeit der Mobilstation aus der wahrscheinlichsten Zustandsfolge geschätzt wird. Da es sich dabei um eine stochastische Entscheidung handelt, sind können Abweichungen von der tatsächlichen Geschwindigkeit nicht ausgeschlossen werden. Darüberhinaus führt die räumliche Diskretisierung der zu einer Streuung bei der Ermittlung der Geschwindigkeit. In dem vorliegenden Fall hat dies dazu geführt, daß keines der drei Teilmodells die Geschwindigkeit $v = 0$ repräsentiert.
Hat der kontinuierliche Erkennungsprozeß die Mobilstation einmal verloren, muß der Erkennungsprozeß an einer definierten Stelle wieder aufgenommen werden. Dies ist in Abbildung 9.1 als zusätzliche Alternative gekennzeichnet.
Diese Ergebnisse zeigen, daß sich der hier vorgestellte Ansatz in dem Fall eignet, wenn das Mobilitätsverhalten der Mobilstation nicht auf fließenden Verkehr beschränkt ist. Die Aufspaltung in drei separate Modelle, die fließenden Verkehr, Beschleunigung und Verzögerung beschreiben, scheint daher ein geeigneter Lösungsweg für das Problem des unbekannten Mobilitätsverhaltens zu sein.

KAPITEL 10

Ein zustandsreduziertes Modell

Bei dem in den vorangehenden Kapiteln beschriebenen Verfahren zur Lokalisierung mit Hidden-Markov-Modellen wurden die den Modellzuständen zugeordneten Orte (Bezugsorte) in äquidistanten Abständen gewählt. In städtischer Umgebung ist dies aufgrund der örtlichen Frequenz der Pegelschwankungen sicher sinnvoll. Demgegenüber findet man in ländlicher, insbesondere flacher Umgebung jedoch keine in gleicher Weise ausgeprägten Signalschwankungen vor. Änderungen des Signalpegels erfolgen dort kontinuierlicher, charakteristische Einbrüche liegen oft weiter auseinander.
Es wurde daher die Überlegung angestellt, die Wiedergabe der Feldstärke im Modell in diesen Bereichen zu modifizieren und lediglich die Orte in das Modell einzubeziehen, an denen eine charakteristische Änderung der Feldstärke vorliegt. Dies könnte insbesondere dann genutzt werden, wenn sich dadurch der notwendige Rechenaufwand verringern ließe.
Mit Hilfe der hier betrachteten Methode, bei der Zustände des Modells nur an Orten charakteristischer Signalschwankungen vorgesehen wurden und die Aufenthaltsdauer in jedem Modellzustand explizit modelliert wurde, kann jedoch mit Hilfe der bekannten Auswertungsverfahren dieser Vorteil nicht erzielt werden. Die diesbezüglich gemachten Überlegungen sollen hier dennoch dargestellt werden, da sie auch für das Vorgehen mit äquidistanten Zuständen relevante Aspekte beinhalten und die hier erzielten Ergebnissen eine Aussage über die grundsätzliche Anwendbarkeit der Lokalisierung mit HMM erlauben.

10.1 Definition eines charakteristischen Musters

Abbildung 10.1 zeigt den typischen Verlauf des Feldstärkepegels für eine Strecke in offenem Gelände nach Mittelung durch die Mobilstation. Für die Modellbildung wird der Feldstärkepegel an den Bezugsorten der Zustände gemessen.
Die Reduktion der Anzahl der Zustände des Modells soll dadurch erreicht werden, daß nur für die Orte in der realen Umgebung ein Zustand S_i festgelegt wird, an dem der Erwartungswert der Meßwerte m_i sich mindestens um

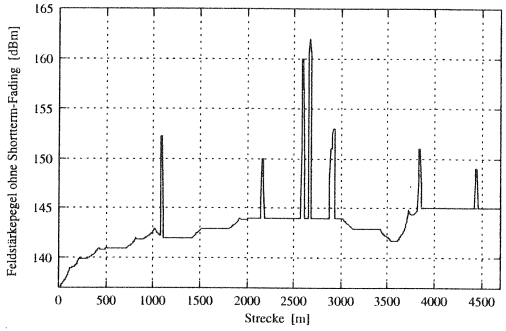


Bild 10.1: Feldstärkepegel in offenem Gelände

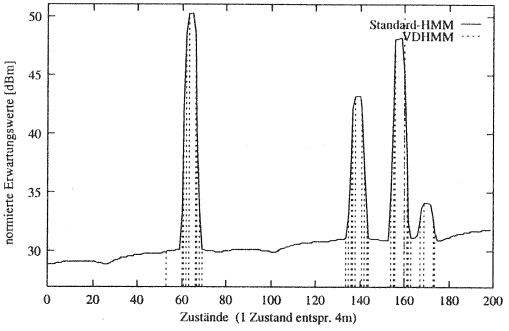


Bild 10.2: Erwartungswerte der Zustände des Standard-Modells und des VHMMs

den Betrag von 1 dBm von dem des letzten Bezugsortes unterscheidet. Dies scheint gerechtfertigt, da die Darstellung der Meßwerte im Meßwert-Report ebenfalls nur mit der Auflösung von 1dBm erfolgt. Abbildung 10.2 verdeutlicht, daß bei dieser Definition die charakteristische Information über den Signalpegelverlauf in jedem Fall erfaßt wird. Es sind dort diejenigen Zustände gekennzeichnet, die nach der oben beschriebenen Reduktion in die Berechnung des Modells einbezogen werden. Das Modell mit äquidistanten Bezugsorten besaß in diesem Fall 200 Zustände. Trotz der Reduktion auf 30 Zustände werden die charakteristischen Signalschwankungen vollständig wiedergegeben. Die Aufhebung der Äquidistanz der Zustände macht jedoch eine neue Modellierung der Übergangswahrscheinlichkeiten des Modells erforderlich. Dies wird im folgenden erläutert.

10.2 Modellierung der Aufenthalts- und Übergangswahrscheinlichkeiten

10.2.1 Explizite Modellierung der Aufenthaltsdauer

Für das bisherige äquidistante Modell galt die für Markov-Modelle charakteristische, exponentiell verteilte Wahrscheinlichkeitsfunktion der Aufenthaltsdauer $p_i(d)$ in einem Zustand S_i aus Abschnitt 6.1.1:

$$p_i(d) = a_{ii}^{d-1} \cdot (1 - a_{ii}) \tag{10.1}$$

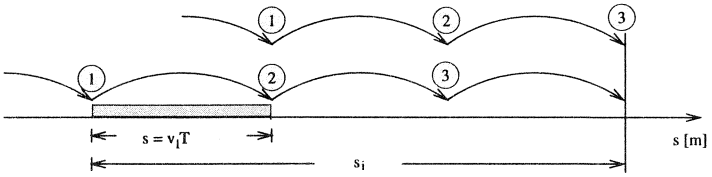
Dabei stellt $p_i(d)$ die Wahrscheinlichkeit dar, daß d aufeinanderfolgende Meßwerte aus dem Streckenabschnitt stammen, der dem Zustand i zugeordnet ist.
Bei der Dichte der Bezugsorte, die bisher gewählte wurde, kann auf diese Weie das Bewegungsverhalten der Mobilstation mit hinreichender Genauigkeit nachgebildet werden. Die Wahrscheinlichkeit a_{ii}, in denselben Zustand zu gelangen, ist dabei sehr gering.
Durch die Verminderung der Anzahl der Zustände vergrößert sich der den einzelnen Zuständen zugeordnete Streckenabschnitt. Je nach Umgebung können solche Streckenabschnitte bis zu einigen hundert Metern lang sein. Die maximale Entfernung, die von einer Mobilstation innerhalb des Meßintervalls $T = 480$ ms zurückgelegt werden kann, beträgt demgegenüber etwa $v_{max} \cdot T = 180$ km/h$\cdot T = 24$ m. Die Wahrscheinlichkeit, innerhalb des Zeitraums T in einen anderen Zustand zu gelangen, ist daher in einem solchen Fall null. Dies widerspricht der Wahrscheinlichkeitsfunktion aus Gleichung (10.1), so daß bei nicht äquidistanten Zuständen die Annahme einer expo-

nentiell verteilten Wahrscheinlichkeitsfunktion der Aufenthaltsdauer nicht mehr zulässig ist.
Für das weitere Vorgehen ist infolgedessen die Bestimmung der korrekten Wahrscheinlichkeitsfunktion der Aufenthaltsdauer erforderlich, bevor die Parameter des modifizierten Modells berechnet werden können. Dieses modifizierte Modell wird aufgrund der expliziten Modellierung der Aufenthaltsdauer im folgenden auch als VHMM bezeichnet, wobei das „V" die variable Verweilzeit in einem Zustand andeuten soll.

10.2.2 Wahrscheinlichkeit der Aufenthaltsdauer

Die Aufenthaltsdauerwahrscheinlichkeit $p_i(d)$ drückt die Wahrscheinlichkeit für d aufeinanderfolgende Beobachtungen in einem Zustand S_i aus, dem ein Streckenabschnitt der Länge s_i aus der Mobilfunkumgebung zugeordnet ist. Die Herleitung der Wahrscheinlichkeitsfunktion der Aufenthaltsdauer soll zum besseren Verständnis anhand konkreter Zahlenwerte verdeutlicht werden. Abbildung 10.3 zeigt den Einfluß der Länge s_i des betrachteten Zustands i sowie den Einfluß der Geschwindigkeitsverteilungsdichtefunktion.

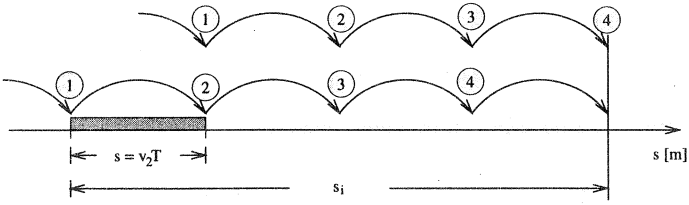
Die Startpunkte der Fahrzeuge mit der Geschwindigkeit v_i sind vor dem Beginn der Bezugsstrecke des Zustandes i gleichverteilt. Es existiert keine Präferenz für bestimmte Anfangspunkte, solange lokale Einflußfaktoren wie Ampeln, Bahnübergänge oder Verkehrsstaus, in denen sich die Geschwindigkeitsverteilungsdichte ändert, außer Betracht gelassen werden.
Die Mobilstationen können in der Zeitspanne $T = 480$ ms lediglich eine Strecke von $s = v\,T$ zurücklegen. Dies bedeutet, daß nur die Fahrzeuge, die maximal $v\,T$ vom Beginn der Bezugsstrecke des Zustands entfernt sind, innerhalb eines Taktes diesen Zustand erreichen können. Im Bereich $s = v\,T$ ab Beginn des Zustandes sind die Fahrzeuge demnach gleichverteilt.
Die Abbildungen 10.3 a) und b) zeigen zwei Beispiele, in denen die Länge s_i der Bezugsstrecke des Zustands i ein ganzzahliges Vielfaches der Strecke $v_j\,T$ beträgt. Ein Fahrzeug, welches bei $s = 0$ in den Zustand gelangt, macht ebenso wie ein Fahrzeug, welches bei $s = v_j\,T$ in den Zustand gelangt, genau $d = s_i/(v_j\,T)$ Beobachtungen. Für Mobilstationen, deren erster Beobachtungswert innerhalb dieses Streckenabschnittes liegt, ist dies immer erfüllt. Daraus resultiert, daß für 100% aller Mobilstationen der Geschwindigkeit v_j die oben beschriebenen d Beobachtungen im Zustand i registriert werden.
Der Fall, daß s_i kein ganzzahliges Vielfaches von vT ist, soll am Beispiel $v_3 = s_i/(3\frac{1}{3}\,T)$ erläutert werden (Abbildung 10.3 c). Die Fahrzeuge, die in den Bereich $0 \leq s < \frac{1}{3}\,v_3\,T$ gelangen, verzeichnen vier Beobachtungen im



d = 3 Beobachtungen im Zustand i der Länge s_i

$$v_1 = \frac{s_i}{3\,T}$$

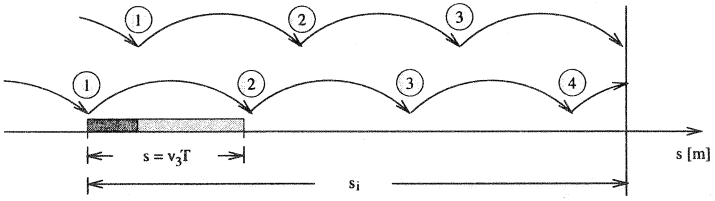
a)



d = 4 Beobachtungen im Zustand i

$$v_2 = \frac{s_i}{4\,T}$$

b)



d = 3 und d = 4 Beobachtungen im Zustand i

$$v_3 = \frac{s_i}{3\frac{1}{2}T}$$

c)

Bild 10.3: Zur Herleitung der Wahrscheinlichkeitsfunktion der Aufenthaltsdauer

Zustand i. Sie sind in diesem Bereich gleichverteilt, so daß $\frac{1}{3}$ aller Fahrzeuge, die sich mit der Geschwindigkeit v_3 fortbewegen, zur Wahrscheinlichkeit $p_i(4)$ beitragen. Die restlichen $\frac{2}{3}$ der Fahrzeuge dieser Geschwindigkeit gelangen während ihrer ersten Beobachtung in den Bereich $\frac{1}{3}\, v_3\, T \leq s \leq v_3\, T$ und tragen somit mit drei Beobachtungen zur Wahrscheinlichkeit $p_i(3)$ bei. Der Beitrag zur Wahrscheinlichkeit $p_i(4)$ läßt sich daher wie folgt ausdrücken:

$$(\frac{s_i}{v_3 T} - d)\, p_v(v_3)\, dv = \frac{1}{3}\, p_v(v_3)\, dv$$

Der Beitrag zu $p_i(3)$ beläuft sich auf:

$$(1 - (\frac{s_i}{v_3 T} - d))\, p_v(v_3)\, dv = \frac{2}{3}\, p_v(v_3)\, dv$$

Unter Einbeziehung aller Fahrzeuggeschwindigkeiten gilt:

$$\begin{aligned} p_i(d) &= c \int_{\frac{s_i}{(d+1)T}}^{\frac{s_i}{dT}} (1 - (\frac{s_i}{vT} - d))\, p_v(v)\, dv + c \int_{\frac{s_i}{dT}}^{\frac{s_i}{(d-1)T}} (\frac{s_i}{vT} - (d-1))\, p_v(v)\, dv \\ &= c \int_{\frac{s_i}{(d+1)T}}^{\frac{s_i}{dT}} (1 + d - \frac{s_i}{vT})\, p_v(v)\, dv + c \int_{\frac{s_i}{dT}}^{\frac{s_i}{(d-1)T}} (\frac{s_i}{vT} - d + 1)\, p_v(v)\, dv \end{aligned} \tag{10.2}$$

$p_i(d)$ ist die Wahrscheinlichkeit für d aufeinanderfolgende Beobachtungen im Zustand i. Die Normalisierungskonstante c wurde zur Gewährleistung der Vollständigkeitsbedingung eingeführt.
Abbildung 10.4 zeigt die aus Gleichung 10.2 berechneten Wahrscheinlichkeitsfunktionen der Aufenthaltsdauer d in Abhängigkeit der Länge s eines Zustandes. Die Funktion für $s = 4$ m zeigt große Ähnlichkeit mit einer exponentiellen Verteilung. Daraus kann gefolgert werden, daß bei kurzen Distanzen zwischen den Bezugsorten, die bei dem Modell mit äquidistanten Zuständen zutreffen, die Annahme einer exponentiell verteilten Aufenthaltsdauerwahrscheinlichkeit zulässig ist.

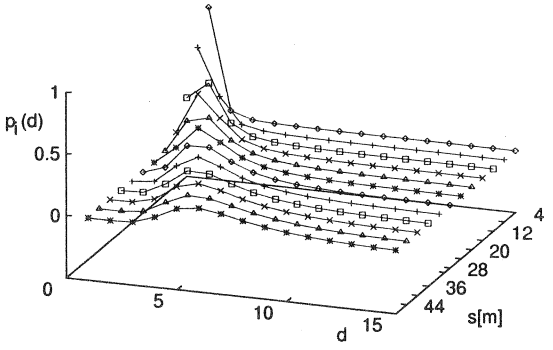


Bild 10.4: Wahrscheinlichkeit der Aufenthaltsdauer d in Abhängigkeit von der Länge s eines Zustandes

10.2.3 Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten

10.2.3.1 Einfluß der explizit modellierten Aufenthaltsdauer auf die Übergangswahrscheinlichkeiten

Wird die Zustandsaufenthaltsdauer $p_i(d)$ explizit modelliert, so sind nunmehr nur noch die Übergangswahrscheinlichkeiten a_{ij} für $j \neq i$ anzugeben. Abbildung 10.5 verdeutlicht diesen Unterschied. Bei der expliziten Modellierung gilt daher jetzt für die Übergänge in denselben Zustand:

$$a_{ii} = 0 \qquad \text{für } i = 1 \ldots N$$

für alle Zustände S_i. Stattdessen wird die Wahrscheinlichkeit für d aufeinanderfolgende Beobachtungen im Zustand S_i berechnet. Erst nach d Beobachtungen findet ein Übergang in einen anderen Zustand $j \neq i$ statt.

10.2.3.2 Zugeordneter Streckenabschnitt

Abbildung 10.6 zeigt die bei der Verminderung der Zustandsanzahl verbleibenden Zustände $j-1$, j, $j+1$. Die ehemaligen Zustände sind gestrichelt

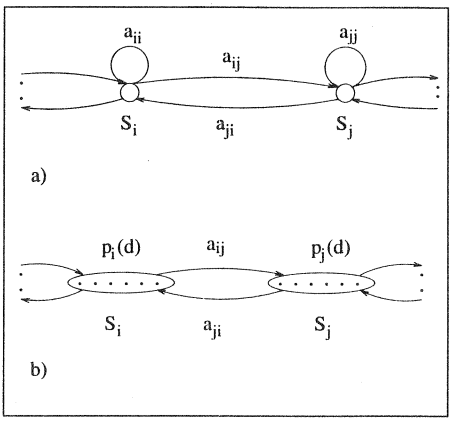


Bild 10.5: Zustandsübergänge beim HMM mit exponentiell verteilter Verweildauer (a) und bei expliziter Modellierung der Aufenthaltsdauer (b)

dargestellt. Die Strecke s_j, die dem Zustands S_j zugeordnet ist, wurde bislang symmetrisch zum Bezugsort gewählt. Die Hälfte der Distanz zwischen den Zuständen S_{j-1} und S_j sowie der Hälfte der Distanz zwischen den Zuständen S_j und S_{j+1} wurde dem Zustand S_j zugeordnet. Bei der Übertragung dieser Definition auf das zustandsreduzierte Modell würde die in Abbildung 10.6 mit $s_{j,sym}$ bezeichnete Strecke dem Zustand S_j zugeordenet. Diese Definition ist jedoch aufgrund des Vorgehens bei der Auswahl der Zustände für das modifizierte Modell ungeeignet.
In Abschnitt 10.1 wurde festgelegt, daß nur für diejenigen Bezugsorte ein Zustand vorgesehen werden soll, für die eine Abweichung des erwarteten Beobachtungswertes um mehr als 1 dBm von dem letzten im Modell wiedergegebenen Wert vorliegt. Geht man nun von dem ehemaligen, nicht zustandsreduzierten Modell aus, so sollte die explizite Modellierung der Aufenthaltsdauer dem Aufenthalt in den nachfolgenden Zuständen mit annähernd gleichem Feldstärkepegel entsprechen. Es ist daher sinnvoll, den Streckenabschnitt, der dem Zustand j zugeordnet wird, so zu wählen, daß er genau den Bereich umfäßt, der zuvor durch die nachfolgenden Zustände mit gleichem Feldstärkepegel abgedeckte wurde. Diese Zuordnung ist in Abbildung 10.6 mit $s_{j,gl.Pegel}$ bezeichnet.
Bei der zuerst beschriebenen Variante mit Wahl des Streckenabschnitts

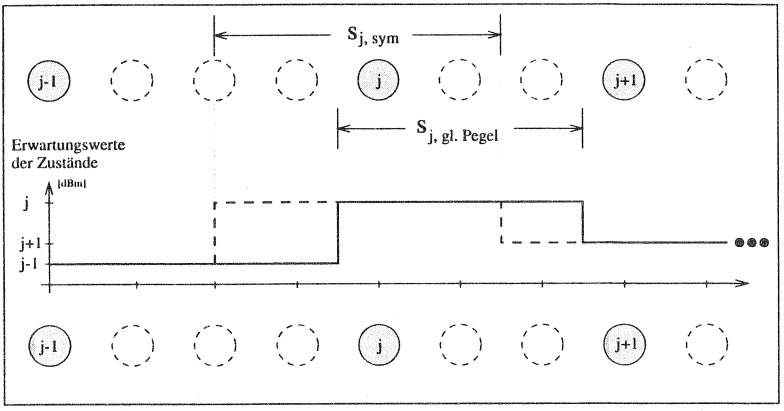


Bild 10.6: Definition der Zustandslänge beim zustandsreduzierten HMM

symmetrisch zum Bezugsort, käme es stets zu deutlichen Abweichungen zwischen den tatsächlich zu erwartenden Meßswerten und dem Modell im Bereich

$$x_j - \frac{s_{j,sym}}{2} < s < x_j - \frac{D}{2}$$

wobei D die Distanz zwischen zwei Bezugsorten des ehemaligen äquidistanten Modells ist und x_j den Bezugsort des Zustandes S_j bezeichnet. Im Gegensatz dazu würden die Meßwerte, die eine Mobilstation in diesem Bereich liefert, von dem Erwartungswert im Zustand $j-1$ nur wenig abweichen.

Berechnungsvorschrift

Für die Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeit a_{ij} kann vorausgesetzt werden, daß der Zustand S_i verlassen wird, da die Übergangswahrscheinlichkeiten a_{ii} durch die explizite Modellierung der Aufenthaltsdauer wegfallen. Die zur Bestimmung der Übergangswahrscheinlichkeit herangezogene Geschwindigkeitsverteilung darf, wie in Abbildung 10.7 verdeutlicht, erst am Ende der Bezugsstrecke des Zustands S_i angesetzt werden.
Die durch Schraffur gekennzeichneten Flächen veranschaulichen die unterschiedlichen Übergangswahrscheinlichkeiten des konventionellen Modells sowie des VDMMs. Für das zustandsreduzierte Modell lassen sich jetzt

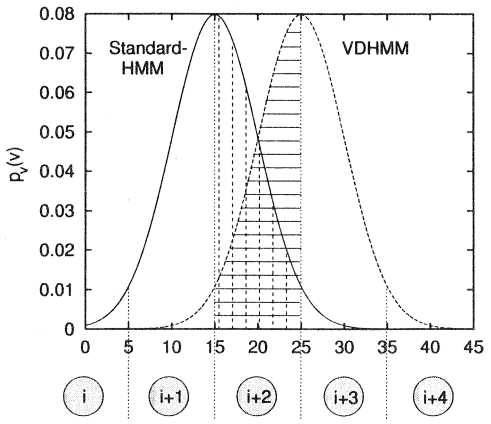


Bild 10.7: Zur Berechnung der Übergangswahrscheinlichkeiten

die Übergangswahrscheinlichkeiten unter der gleichen Näherung wie in Abschnitt 7.3.5 angeben:

$$a_{ij} = c \cdot \int_{\frac{D}{T}\sum_{k=i}^{k=j-1} n_k}^{\frac{D}{T}\sum_{k=i}^{k=j} n_k} p_v(v)\, dv \qquad (10.3)$$

wobei n_k die Anzahl der zum Zustand k zählenden Zustände des nicht zustandsreduzierten Modells bezeichnet.
Die Normalisierungskonstante ist so zu wählen, daß

$$\sum_{j=i+1}^{\infty} a_{ij} = 1$$

da nun die Übergangswahrscheinlichkeit a_{ii} nicht mehr zu berücksichtigen ist.

10.2.4 Berechnung der Beobachtungswahrscheinlichkeit

Basierend auf Abbildung 10.5 läßt sich die Abfolge innerhalb eines VHMMs wie folgt beschreiben:

1. Das Modell befindet sich zum Zeitpunkt $t = 1$ im Anfangszustand $q_1 = S_i$ gemäß den Anfangswahrscheinlichkeiten π_i.
2. Entsprechend der Wahrscheinlichkeitsfunktion der Aufenthaltsdauer $p_{q_1}(d_1)$ treten d_1 Beobachtungen in diesem Zustand auf. Zur Verringerung des Rechenaufwands wird die maximal in einem Zustand mögliche Anzahl von Beobachtungen auf D beschränkt.
3. Die Beobachtungen $O_1\, O_2 \cdots O_{d_1}$ werden entsprechend der Verbundwahrscheinlichkeit $b_{q_1}(O_1\, O_2 \cdots O_{d_1})$ in diesem Zustand registriert. Bei Annahme der Unabhängigkeit dieser Beobachtungen vereinfacht sich diese zu $b_{q_1}(O_1\, O_2 \cdots O_{d_1}) = \sum_{t=1}^{d_1} b_{q_1}(O_t)$.
4. Der nächste Zustand $q_2 = S_j$ wird gemäß der Übergangswahrscheinlichkeit a_{q_1,q_2} erreicht. Dabei ist ein Übergang in den vorherigen Zustand *nicht* erlaubt.

Es wird deutlich, daß die Beschreibung eines konventionellen HMMs äquivalent zu der eines VDHMMs ist, wenn die für konventionelle HMMs typische, exponentielle Wahrscheinlichkeitsfunktion in $p_i(d)$ eingesetzt wird. Eine Änderung der Definition der Vorwärts- und Rückwärts-Variablen ist jedoch erforderlich, um die Aufenthaltsdauer bei der Berechnung der Beobachtungswahrscheinlichkeit zu berücksichtigen.
Mit $\alpha_t(j)$ wird jetzt die Wahrscheinlichkeit bezeichnet, die Beobachtungssequenz $O_1 O_2 \cdots O_t$ bis zum Zeitpunkt t gesehen *und* den Zustand S_j im nächsten Zeitpunkt verlassen zu haben. Dies bedeutet:

$$\alpha_t(j) = P(O_1 O_2 \cdots O_t, S_j \text{ endet in } t \,|\, \lambda) \tag{10.4}$$

Unter der Annahme, daß r Zustände während der ersten t Beobachtungen belegt wurden und daß in den Zuständen $q_1, q_2, \cdots, q_r$ je $d_1, d_2, \cdots, d_r$ Beobachtungen gemacht wurden, läßt sich Gleichung 10.4 wie folgt schreiben:

$$\begin{aligned} \alpha_t(j) \;=\; & \sum_{q} \sum_{d} \pi_{q_1} \cdot p_{q_1}(d_1) \cdot P(O_1\, O_2 \cdots O_{d_1} | q_1) \\ & \cdot a_{q_1 q_2} p_{q_2}(d_2) P(O_{d_1+1}\, O_{d_1+2} \cdots O_{d_1+d_2} | q_2) \cdots \\ & \cdot a_{q_{r-1} q_r} p_{q_r}(d_r) P(O_{d_1+d_2+\cdots+d_{r-1}+1} \cdots O_r | q_r) \end{aligned} \tag{10.5}$$

Die Summation erfolgt über alle möglichen Beobachtungen sowie über alle möglichen Zustandsfolgen. Durch Induktion kann $\alpha_t(j)$ wie folgt dargestellt werden:

$$\alpha_t(j) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{d=1}^{D} \alpha_{t-d}(i)\, a_{ij}\, p_j(d) \cdot \prod_{s=t-d+1}^{t} b_j(O_s) \tag{10.6}$$

Die Berechnung der $\alpha_t(j)$ geschieht in zwei Schritten.

1. Für $1 < t \leq D$ erfolgt die Initialisierung der $\alpha_t(i)$s:

$$\begin{aligned}
\alpha_1(j) &= \pi_j p_j(1) \cdot b_j(O_1) \\
\alpha_2(j) &= \pi_j p_j(2) \cdot \prod_{s=1}^{2} b_j(O_s) + \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^{N} \alpha_1(i)\, a_{ij}\, p_j(1)\, b_j(O_2) \\
\alpha_3(j) &= \pi_j p_j(3) \cdot \prod_{s=1}^{3} b_j(O_s) + \sum_{d=1}^{2} \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^{N} \alpha_{3-d}(i) a_{ij} p_j(d) \cdot \prod_{s=4-d}^{3} b_j(O_s) \\
&\vdots \\
\alpha_D(j) &= \pi_j p_j(D) \cdot \prod_{s=1}^{D} b_j(O_s) \\
&\quad + \sum_{d=1}^{D-1} \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq i}}^{N} \alpha_{D-d}(i) a_{ij} p_j(d) \cdot \prod_{s=D-d+1}^{D} b_j(O_s)
\end{aligned} \tag{10.7}$$

2. Für $D < t \leq T$ gilt:

$$\alpha_t(j) = \sum_{i=1}^{N} \sum_{d=1}^{D} \alpha_{t-d}(i) a_{ij} p_j(d) \cdot \prod_{s=t-d+1}^{t} b_j(O_s) \tag{10.8}$$

Wie schon in Abschnitt 7.2 erläutert, berechnet sich die Beobachtungswahrscheinlichkeit $P(O|\lambda)$ rekursiv aus $\alpha_t(j)$ zu:

$$P(O|\lambda) = \sum_{j=1}^{N} \alpha_T(j) \tag{10.9}$$

10.3 Vergleich konventionelles Modell – VHMM

10.3.1 Erkennungs- und Fehlerwahrscheinlichkeiten

In Abschnitt 7.5 wurde bereits die Nichterkennung als Fehler 1. Art und die fehlerhafte Zuordnung einer Meßwertsequenz zu einem Modell als Fehler 2. Art eingeführt.
Zum Vergleich der Leistungsfähigkeit des zustandsreduzierten Modells und des konventionellen Modells wurden hier unter gleichen Bedingungen Fehler 1. und 2. Art für beide Modelle bestimmt und gegenübergestellt, wobei auch für das zustandsreduzierten Modell wiederum die Erkennung als Schwellenentscheidung im Sinne von Abschnitt 7.4 durchgeführt wurde.
In den Abbildungen 10.8 bis 10.11 sind die Fehler erster und zweiter Art bei variierender Schwellenwahrscheinlichkeit aufgetragen. Es handelt sich um Versuche in quasioffenem und städtischem Gebiet.
Die Abbildungen 10.8 vergleicht die Fehlerwahrscheinlichkeiten eines zustandsreduzierten sowie eines Standard-Modells in offener Landschaft. Diese stellt die Umgebung dar, in der das zustandsreduzierte Modell primär eingesetzt werden soll. Die Beobachtungslänge beträgt 40 Werte.
Die Erkennungswahrscheinlichkeit steigt mit fallender Schwellenwahrscheinlichkeit, da auch die Durchfahrten, die zu einer geringeren Beobachtungswahrscheinlichkeit führen, durch das Modell korrekt erfaßt werden. Infolgedessen sinkt der α-Fehler. Mit fallender Schwellenwahrscheinlichkeit steigt jedoch auch die Anzahl der Falscherkennungen und damit der β-Fehler, da die oben erwähnten relativ hohen Beobachtungswahrscheinlichkeiten außerhalb der Modelle über der Schwelle liegen und somit die Teilnehmer erfaßt werden.
Aus der Abbildungen 10.8 sowie aus allen folgenden wird dieses Verhalten ersichtlich. Zudem läßt sich feststellen, daß die beiden Modelle bezüglich ihrer Fehlerwahrscheinlichkeiten in dem betrachteten Fall nahezu identisch sind.
Bei 60 Beobachtungswerten ergeben sich die in Abbildung 10.9 graphisch dargestellten Fehlerwahrscheinlichkeiten. Die Schwellenwahrscheinlichkeiten liegen aufgrund der größeren Beobachtungswahrscheinlichkeiten in einem niedrigeren Bereich als in der Abbildung 10.8.
Auch bei 60 Beobachtungswerten gibt es keine Schwellenwahrscheinlichkeit, bei der weder Fehler erster noch zweiter Art auftreten. Dies bedeutet, daß unabhängig von der gewählten Entscheidungsschwelle Fehler bei der Erkennung auftreten. Es läßt sich zudem feststellen, daß die auftretenden Fehler bei dem zustandsreduzierten Modell höher als bei dem Standard-Modell

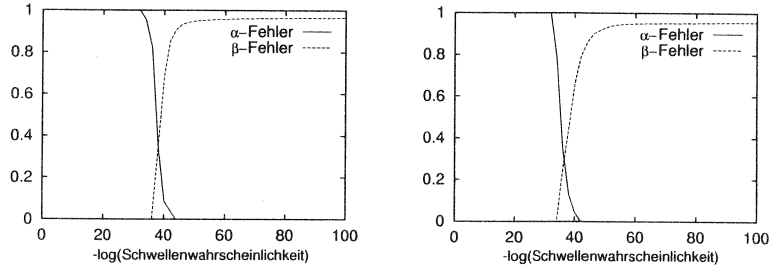


Bild 10.8: Fehlerwahrscheinlichkeiten eines zustandsreduzierten Modells (links) und eines Standard-Modells (rechts) in quasioffenem Gelände; 40 Beobachtungswerte

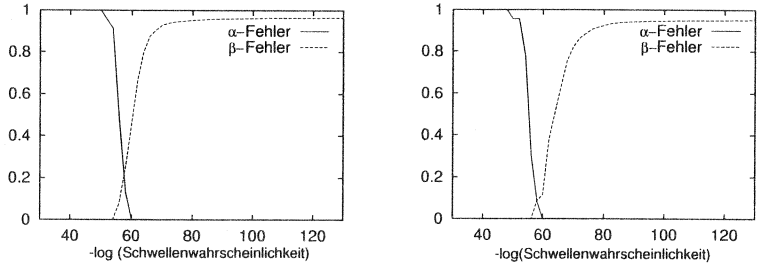


Bild 10.9: Fehlerwahrscheinlichkeiten eines zustandsreduzierten Modells (links) und eines Standard-Modells (rechts) in quasioffenem Gelände; 60 Beobachtungswerte

sind. Bei beiden Modellen müßte die Beobachtungssequenz noch länger sein, um Fehler auszuschließen.
In den Abbildungen 10.10 und 10.11 wurde städtisches Gebiet zugrundegelegt, wobei die Länge der Beobachtungssequenzen in Abbildung 10.10 40 Meßwerte betrug und in Abbildung 10.11 60 Meßwerte.
Bei 40 Beobachtungswerten ergeben sich bei beiden Modellen keine Schwellenwahrscheinlichkeiten, die weder zu Fehlern erster noch zweiter Art führen. Erst bei 60 Beobachtungswerten treten solche Schwellenwahrscheinlichkeiten auf. In Abbildung 10.11 (rechts) ist der Bereich der Schwellenwahrscheinlichkeit von 10^{-76} bis 10^{-62} auffällig, in dem das Standard-Modell weder Fehler erster noch Fehler zweiter Art aufweist. Dieser Bereich ist bei der Festsetzung einer Schwelle für die praktische Anwendung von Bedeu-

tung, da für jedes Modell ein Erwartungswert existieren muß, bei dem die möglichen Fehler minimal sind.
Das zustandsreduzierte Modell weist bei der gleichen Beobachtungslänge schlechtere Ergebnisse als das Standard-Modell auf. Um eine gleiche Fehlerwahrscheinlichkeit zu erzielen, müßte die Beobachtungslänge mehr Beobachtungswerte einschließen. Dies ist jedoch aus Gründen des Rechenaufwands, wie in Kapitel 10.3.2 erläutert wird, nicht zu vertreten.

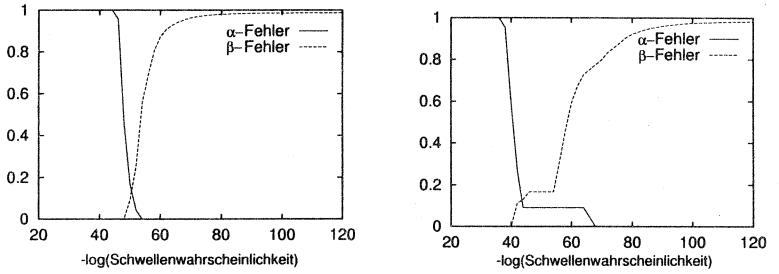


Bild 10.10: Fehlerwahrscheinlichkeiten eines zustandsreduzierten Modells (links) und eines Standard-Modells (rechts) in städtischer Umgebung; 40 Beobachtungswerte

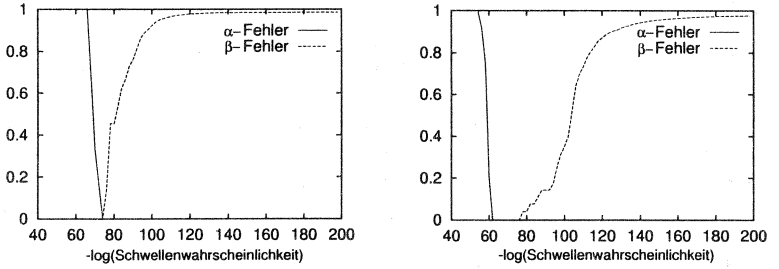


Bild 10.11: Fehlerwahrscheinlichkeiten eines zustandsreduzierten Modells (links) und eines Standard-Modells (rechts) in städtischer Umgebung; 60 Beobachtungswerte

Aus allen Abbildungen dieses Abschnitts ist der Einfluß der Beobachtungslänge, unabhängig vom betrachteten Modell, auf die Fehler- bzw. Erkennungswahrscheinlichkeiten klar ersichtlich. Je mehr Beobachtungswerte in einer Beobachtungssequenz vorliegen, desto charakteristischer wird diese.

Außerhalb des Modells treten demzufolge weniger Pegelverläufe auf, die eine große Ähnlichkeit mit den vom Modell erwarteten Verläufen aufweisen. Somit verringern sich bei längeren Beobachtungssequenzen die Beobachtungswahrscheinlichkeiten außerhalb des Modells und der Bereich, in dem eine Schwelle liegen kann, ohne Fehler zu verursachen, wird breiter.

10.3.2 Rechenaufwand

Der Rechenaufwand für die beiden Modelle unterscheidet sich deutlich. Bei dem Standard-Modell ist der Aufwand von der Länge der Beobachtungssequenz sowie von der Geschwindigkeitsverteilungsdichtefunktion der betreffenden Straße abhängig. Der Rechenaufwand bei dem zustandsreduzierten Modell richtet sich nach der Beobachtungslänge und, aufgrund der Charakteristik der Pegelschwankungen, nach der Umgebung der Fahrtroute der Mobilstation. Bei dem Vergleich des Rechenaufwands der beiden Modelle muß jedoch berücksichtigt werden, daß bei dem Standard-Modell eine Reduzierung des Rechenaufwands bei der Berechnung der Modellparameter erfolgt. In dem Standard-Modell sind die Übergangswahrscheinlichkeiten für alle Zustände gleich, da für diese die gleiche Geschwindigkeitsverteilung gültig ist. Demzufolge ist die Anzahl der Übergangswahrscheinlichkeiten, die einen Wert ungleich Null aufweisen, für das ganze Modell gleich und aufgrund der endlichen, maximal möglichen Geschwindigkeiten der Fahrzeuge beschränkt. Bei der Berechnung der Beobachtungswahrscheinlichkeit werden daher lediglich die Übergangswahrscheinlichkeiten, die ungleich Null sind, in die Berechnung mit einbezogen.
Bei dem zustandsreduzierten Modell ist durch die explizite Modellierung der Aufenthaltsdauer in den Zuständen eine andere Berechnung der Beobachtungswahrscheinlichkeit als in dem Standard-Modell erforderlich.
In den folgenden Tabellen sind die in dem Standard- sowie dem zustandsreduzierten Modell zur Berechnung einer einzigen Beobachtungswahrscheinlichkeit benötigten Additionen und Multiplikationen dargestellt. Dabei wird auf die in Kapitel 10.3.1 durchgeführten Simulationen Bezug genommen.
Der Rechenaufwand für das Standard-Modell ist in der folgenden Tabelle eingetragen.

Gebiet	Sequ.-Länge	Zustände	Additionen	Multiplikationen
quasioffen	40	200	60.996	68.804
quasioffen	60	300	139.476	157.184
Stadt	40	200	60.996	68.804
Stadt	60	300	139.476	157.184

Für das zustandsreduzierte Modell ergeben sich folgende Ergebnisse:

Gebiet	Sequ.-Länge	Zustände	Additionen	Multiplikationen
quasioffen	40	36	321.840	2.654.892
quasioffen	60	43	749.232	6.830.077
Stadt	40	64	1.023.744	8.440.000
Stadt	60	90	3.310.920	30.183.390

Aus den oben stehenden Tabellen wird ersichtlich, daß das zustandsreduzierte Modell einen erheblich größeren Rechenaufwand als das Standard-Modell erfordert. In offener Landschaft (QuasiOpen im Simulator) ist bei 40 Beobachtungswerten die Anzahl der Zustände von im Standard-Modell 200 äquidistanten auf 36 nicht äquidistante Zustände reduziert worden. Jedoch ist der Rechenaufwand bezüglich der durchgeführten Additionen um das Fünffache und bezüglich der Multiplikationen um das 39-fache gestiegen. In städtischer Umgebung (Urban) ist bei gleicher Beobachtungslänge aufgrund der charakteristischeren Pegelverläufe die Anzahl der reduzierten Zustände nahezu doppelt so groß wie in offener Landschaft. Dabei verdreifacht sich ungefähr die Anzahl der durchgeführten Rechenoperationen, während sie bei dem Standard-Modell wegen der gleichen Geschwindigkeitsverteilungsdichtefunktion konstant bleibt.

10.3.3 Zusammenfassung

Aus den beiden vorangegangenen Unterkapiteln wird ersichtlich, daß das zustandsreduzierte Modell im Vergleich zu dem konventionellen Modell in offener Landschaft ungefähr gleiche Ergebnisse bezüglich der Fehlerwahrscheinlichkeiten und damit auch der Erkennungswahrscheinlichkeiten aufweist. Der Rechenaufwand bei dem zustandsreduzierten Modell ist jedoch um ein Vielfaches höher als bei dem Standard-Modell.
In städtischer Umgebung liefert das Standard-Modell jedoch bessere Ergebnisse bei gleicher Beobachtungslänge und erheblich kleinerem Rechenaufwand als das zustandsreduzierte Modell. Für eine dem Standard-Modell vergleichbare Lokalisierung in städtischer Umgebung müßte die Beobachtungslänge bei dem zustandsreduzierten Modell sogar noch vergrößert werden.
Die Zustandsreduzierung geht aufgrund der erforderlichen, expliziten Modellierung der Aufenthaltsdauer in den Zuständen erheblich zu Lasten des Rechenaufwands, so daß die Anwendung des zustandsreduzierten Modells in seiner jetzigen Form nicht von Vorteil ist. Der große Rechenaufwand wird

besonders in Umgebungen mit charakteristischen Pegelschwankungen deutlich, da dort die Anzahl der reduzierten Zustände immer noch relativ hoch ist.

KAPITEL 11

Ein lernendes Modell

Bisher wurde in dieser Arbeit davon ausgegangen, daß die für die Referenzdatenbank erforderlichen Daten über die Pegelverteilung in der Mobilfunkzelle im voraus bekannt sind. Dies setzt voraus, daß die Funkausbreitung in der gesamte Mobilfunkzelle vor dem Einsatz des Mustererkennungsalgorithmus mit Hilfe einer Meßstation erfaßt wurde, zumindest für die Routen, auf denen eine Erkennung erfolgen soll. Jedoch ist der Aufwand zum Anlegen der Datenbank je nach Verzweigung des Straßennetzes um Teil beachtlich. Von Bedeutung ist insbesondere, daß die in der Datenbank vorliegenden Referenzdaten des Pegels den für den Ort spezifischen Mittelwerten entsprechen und nicht durch Shortterm-Fading oder temporäre Abweichungen beeinflußt sind. Einen adequaten Lösungsansatz will die folgenden Darstellung geben, die zeigt, auf welche Weise die Datenbank mit Hilfe der im laufenden System ermittelten Pegelmeßwerte aufgebaut werden kann. Zumindest für einige wenige Streckenabschnitte innerhalb der Zelle müssen allerdings bereits Meßwerte vorliegen.

11.1 Bekannte Trainingsalgorithmen

In der Literatur (siehe z. B. [26]) werden Trainingsalgorithmen für Hidden-Markov-Modelle vorgestellt, die im wesentlichen auf dem EM-Algorithmus beruhen, der in [33] beschrieben ist (zur Erläuterung der Bezeichnungsweise siehe dort) und sich auf die Vorarbeiten von Baum [34, 35] stützt. Diese Algorithmen dienen der Berechnung der optimalen Modellparameter aus einer vorgegebenen Beobachtungssequenz. Optimal bedeutet in diesem Zusammenhang, daß die als Referenzsequenz verwendeten Beobachtungswerte die aus dem Modell berechnete Auftrittswahrscheinlichkeit maximieren. Während sich die Auftrittwahrscheinlichkeit einer Sequenz aus den Modellparametern berechnen lassen, gibt es keine adequate analytische Methode zur Berechnung des optimalen Parametersatzes. In den zuvor erwähnten Veröffentlichungen wird diesbezüglich ein iterativer Algorithmus vorgestellt, mit dem eine Folge von Parametersätzen bestimmt werden kann, die mo-

noton gegen ein lokales Maximum der Wahrscheinlichkeitsfunktion konvergiert.
Ursprünglich wurde diese Methode zur Berechnung der Parameter aus einer einzigen Beobachtungssequenz entworfen. Diese Methode läßt sich beliebig erweitern, indem anstelle einer einzigen Wahrscheinlichkeit die Verbundwahrscheinlichkeit aller Referenzsequenzen bei der Parameteroptimierung zugrundegelegt wird. In der Rekursionsformel spiegelt sich dies in einer gewichteten Summation der Beiträge der unterschiedlichen Sequenzen wieder.
Für die angestrebte Zielsetzung ist es aus zwei Gründen notwendig, eine größere Anzahl von Trainingsdaten zu verwenden. Zum einen unterliegen die Meßdaten Schwankungen, die im wesentlichen auf das Shortterm-Fading zurückzuführen sind. Es ist daher eine ausreichende Meßdatenmenge erforderlich, um den Mittelwert der Meßwerte an einem Ort mit der entsprechenden Genauigkeit schätzen zu können. Zweitens stimmt der räumliche Abstand der Referenzorte in der Datenbank im Normalfall nicht mit dem Abstand der Orte überein, an denen Meßwerte im Realbetrieb geliefert werden, sondern ist meist kleiner. Die Modellparameterermittlung muß sich demnach auf eine umfangreiche Meßdatenerhebung stützen, um Referenzwerte für jeden Ort sicherzustellen.
Gegen die Verwendung dieser bekannten Trainingsalgorithmen gibt es jedoch entscheidende Einwände. Ein denkbarer Ansatz wäre, für einige voneinander entfernt liegende Stellen in der Mobilfunkumgebung, an denen jeweils ein Markov-Modell definiert ist, die Parameter mit Hilfe von Meßdaten zu berechnen. Als problematisch erweist sich dabei jedoch, daß dem Algorithmus nur diejenigen Trainingssequenzen angeboten werden können, die zur Berechnung des Parametersatzes herangezogen werden sollen. Nun ist es aber nicht möglich, aus der kontinuierlichen Folge von Meßwerten einer MS diejenige Teilfolge herauszulösen, die entlang der durch ein Modell abgedeckten Strecke aufgezeichnet wird.
Praktikabel kann daher nur ein Vorgehen sein, bei dem die Datenbasis schrittweise erweitert wird und zwar ausgehend von einem Bereich, für den Referenzdaten bekannt sind. Bei dem Versuch, nach einer erfolgreich durchgeführten Lokalisierung ein Nachfolgemodell für eine größere Sequenzlänge zu ermitteln, stellt sich eine neue Schwierigkeit. Die Parameteroptimierung mit Hilfe des Trainingsalgorithmus beschränkt sich darauf, die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der Trainingssequenzen zu maximieren. Sie stellt nicht sicher, daß die Referenzwerte in der richtigen Reihenfolge im Modell angeordnet und folglich dem richtigen Zustand zugeordnet werden. Dies

aber ist erforderlich, da man bestrebt ist, die Werte für die Parameterberechnung aufeinanderfolgender Modelle gemeinsam zu verwenden.
Nicht unberücksichtigt bleiben darf ferner die Tatsache, daß die Berechnung eines Parametersatzes aus einer Vielzahl von Lernsequenzen mit einem ungeheuren Rechenaufwand verbunden ist, der sich erhöht, je länger die betrachteten Sequenzlängen sind.

11.2 Verfahren

Es liegt daher nahe, entsprechend dem Verfahren der kontinuierlichen Erkennung vorzugehen und die Referenzdatenbank schrittweise zu erweitern. Ausgehend von den Zuständen mit bereits bekannten Referenzwerten könnten mit Hilfe des Trainingsalgorithmus die Parameter für diejenigen Zustände ermittelt werden, die innerhalb eines Zeitintervalls erreicht werden können. Da die Struktur des Modells so gewählt werden kann, daß dieses nur die tatsächlich möglichen Bewegungen der MS wiedergibt, ließe sich in Übereinstimmung mit den theoretischen Ansätzen, die dem Trainingsalgorithmus' darin eine geeignete Berechnungsmöglichkeit der Parameter sehen. Dies trifft jedoch auch in diesem Fall lediglich für die statistische Betrachtung zu. Tatsächlich ist nicht bekannt, welcher Zustand nach Ablauf eines Zeitintervalls erreicht wurde. Unter Einbezug der Information über die aus der optimalen Zustandsfolge berechneten Geschwindigkeit läßt sich dieses Problem lösen.
Unter der Prämisse, daß sich die Geschwindigkeit innerhalb des Zeitraums von 480 ms nicht bzw. nur geringfügig ändert, kann das folgende Verfahren angewendet werden. Die Mobilstation wird mittels kontinuierlichem Erkennungsalgorithmus erfaßt, bis die Grenze des Bereiches errreicht ist, für den Referenzdaten vorliegen. An dieser Stelle kann kein Nachfolgemodell mehr berechnet werden. Ausgehend von dem letzten Zustand der Mobilstation kann ihr Aufenthaltsort nach einem Zeitraum von 480 ms extrapoliert werden. Der daraus resultierende Meßwert liefert den Trainingswert für den zu berechnenden neuen Aufenthaltsort.

11.2.1 Lernen eines Wertes

Wie eingangs erwähnt, gehen theoretische Überlegungen davon aus, daß die Meßwerte an einem Ort durch eine Gaußverteilung beschrieben werden können, deren Streuung ebenfalls bekannt ist. Über die ermittelten Meßwerte ist demnach lediglich der Mittelwert der Gaußverteilung zu bestimmen.

Vorausgesetzt, der für einen Meßwert richtige, zugehörige Ort beziehungsweise Modellzustand wurde ermittelt, kann dieser Wert zur Bestimmung des entsprechenden Modellparameters herangezogen werden. Wie der unbekannte Mittelwertes m der Gaußverteilung ermittelt werden kann und wieviele Meßwerte für jeden Modellzustand zu einer verläßlichen Bestimmung erforderlich sind, wird im Anschluß dargestellt.
Ein gängiges Verfahren zur Bestimmung eines unbekannten Parameters einer Verteilung aus einer Stichprobe ist die Maximum-Likelihood-Methode, bei der als Schätzung für den Parameter jeweils der Wert gewählt wird, für den die sogenannte Likelihood-Funktion ihr Maximum annimmt. Im hier vorliegenden Fall der Gaußverteilung, deren Parameter aus einer Stichprobe vom Umfang n ermittelt werden soll, lautet diese

$$L(x_1, \ldots, x_n; m, \sigma) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \right) e^{-\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^{n} (x_k - m)^2} \tag{11.1}$$

Durch Ableitung nach dem unbekannten Parameter

$$\frac{\partial \ln L}{\partial m} = \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial m} = \frac{1}{\sigma^2} \sum_{k=1}^{n} (x_k - m) \stackrel{!}{=} 0 \tag{11.2}$$

erhält man als Schätzwert für den Parameter m erwartungsgemäß

$$\hat{m} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} x_k \quad , \tag{11.3}$$

den Mittelwert der Stichprobe.
Zur Berechnung der nötigen Anzahl von Meßwerten wird nun eine Konfidenzschätzung von m bei zunächst unbekanntem σ vorgenommen. Unter den gegebenen Annahmen genügt die Größe

$$\frac{\bar{x} - m}{S} \sqrt{n}$$

mit

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n} (x_k - \bar{x})^2$$

einer t-Verteilung mit $n - 1$ Freiheitsgraden. Es läßt sich dann die Wahrscheinlichkeit

$$P(-t_{\alpha,n-1} < \frac{\bar{x} - m}{S} \sqrt{n} < t_{\alpha,n-1}) =$$

$$= P\left(\bar{x} - \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\alpha,n-1} < m < \bar{x} + \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\alpha,n-1}\right)$$
$$= 1 - \alpha = \gamma \tag{11.4}$$

berechnen, daß der korrekte Wert von m in das Intervall

$$I = \left(\bar{x} - \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\alpha,n-1}, \bar{x} + \frac{S}{\sqrt{n}} t_{\alpha,n-1}\right) \tag{11.5}$$

fällt, und man bezeichnet I als Konfidenzintervall von m zum Konfidenzniveau $1 - \alpha$.
Da die Meßwerte mit einer Genauigkeit von 1 dB erfaßt werden und es daher nahe liegt, die Referenzwerte mit einer Genauigkeit von 1 dB zu speichern, ist bei der Ermittlung der Referenzdaten eine Abweichung von maximal 0.5 db zuläßig. Bild 11.1 zeigt das entsprechende Konfidenzniveau gegenüber dem Stichprobenumfang unter Zugrundelegung einer Standardabweichung der Gaußverteilung von 3 dB. Wie man sieht, ist für ein Konfidenzniveau

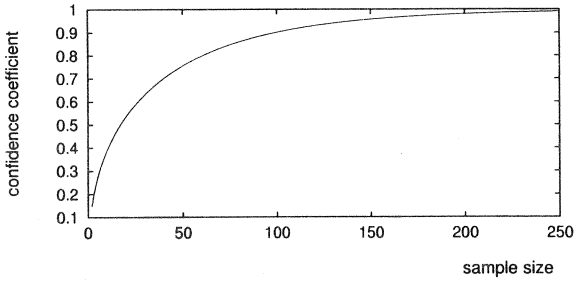


Bild 11.1: Konfidenzniveau über dem Stichprobenumfang

von 95% eine Stichprobe von etwa 140 Werten erforderlich.

11.2.2 Zuordnung von Meßwerten zu Zuständen

Im vorigen Abschnitt wurde der Mittelwert aus der Verteilung der Meßwerte in *einem* Zustand bestimmt. Dies setzt voraus, daß die zur Berechnung dieses Mittelwertes verwendeten Meßwerte bereits dem richtigen Zustand zugeordnet sind. Davon kann im Realfall jedoch nicht immer ausgegangen werden. Die Bestimmung des Ortes unterliegt folgenden unsicheren Einflüssen:

- Aufgrund der örtlichen Diskretisierung ist die Ortsbestimmung ungenau
- Die durch Regression ermittelte Geschwindigkeit weicht von der augenblicklichen Geschwindigkeit ab, da die Geschwindigkeit zum Zeitraum der Berechnung Schwankungen unterlag.
- Über die Einflüsse durch Shortterm-Fading und andere Signalschwankungen hinaus treten Ungenauigkeiten bei der präzisen Positionsbestimmung auf, wenn sich der abschattungsbedingte Pegelverlauf über eine räumliche Ausdehnung von mehreren Modellzuständen nicht ändert (siehe Bild). In diesem Fall kann ein Meßwert nicht eindeutig einem dieser Zustände zugeordnet werden, so daß die Auswahl eines konkreten Zustandes lediglich nach dem Prinzip der größtmöglichen Wahrscheinlichkeit erfolgt.
- Die aus der durchlaufenen Zustandsfolge ermittelte Geschwindigkeit ändert sich möglicherweise geringfügig innerhalb des Intervalls von 480 ms. Geht man aber beispielsweise von einem Abstand von 4 m für die Zustände aus, so würde erst eine Beschleunigung von $62,5$ km/h/s eine Abweichung von mehr als einem halben Zustand verursachen und somit zu einer falschen Zuordnung des Meßwertes führen.

Es ist daher sinnvoll, der Möglichkeit einer fehlerhaften Ortsbestimmung explizit durch eine Wahrscheinlichkeitsbetrachtung Rechnung zu tragen.
Nachfolgend soll mit l der Zustand bezeichnet werden, den die Ortsbestimmung nach dem beschriebenen Verfahren ergeben hat, und mit k der Zustand, dem der Wert tatsächlich zugeordnet werden müßte. $x_{l,k,i}$ beschreibt den i-ten Meßwert, der zwar am Ort k gemessen, aber dem Ort l zugeordnet wurde, und $n_{l,k}$ die Anzahl dieser Werte.
Zur Aufstellung eines geeigneten Gleichungssystem werden zunächst die dem Ort l zugeordneten Werte aufsummiert:

$$X_l = \sum_{\text{all states } k} \sum_{i=1}^{n_{l,k}} x_{l,k,i} \tag{11.6}$$

Geht man von einer ausreichenden Anzahl betrachteter Meßwerte aus, so kann die Summe

$$\sum_{i=1}^{n_{l,k}} x_{l,k,i} = n_{l,k} m_k \tag{11.7}$$

über alle Werte, die am Ort k gemessen, aber dem Ort l zugeordnet wurden, durch den tatsächlichen Mittelwert am Ort k m_k, multipliziert mit der Anzahl der betreffenden Werte $n_{l,k}$, angenähert werden. Gleichung 11.6 kann

dann in der Form

$$X_l = \sum_{\text{all states } k} n_{l,k} m_k \tag{11.8}$$

geschrieben werden.
Die Zahlen $n_{l,k}$ sind jedoch im realen Fall nicht bekannt. Gegeben ist lediglich die Gesamtanzahl der dem Zustand l zugeordneten Werte n_l, mit

$$n_l = \sum_{\text{all states } k} n_{l,k} \tag{11.9}$$

Läßt sich jedoch mit Hilfe zusätzlicher Information eine Aussage darüber machen, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Meßwert dem richtigen Zustand zugeordnet wird, beziehungsweise einem der vorangehenden oder nachfolgenden Zustände, und bezeichnet man diese Wahrscheinlichkeitswerte mit $\ldots, s_{-1}, s_0, s_1, \ldots$, so können die unbekannten Werte $n_{l,k}$ nach der Gleichung

$$n_{l,k} = s_{l-k} \cdot n_k \tag{11.10}$$

geschätzt werden.
Gleichung 11.8 geht dann über in

$$X_l = \sum_{\text{all states } k} s_{l-k} n_k m_k \tag{11.11}$$

Im allgemeinen verursacht die Extrapolation des Aufenthaltsortes mit Hilfe der Regression nur eine geringfügige Abweichung, so daß $s_i = 0$ für $|i| > 2$ oder sogar $|i| > 1$ sein wird. Beispielhaft wird hier das Gleichungssystem für den letzteren Fall dargestell, wobei jeweils Beiträge zur Summe X_l vom gleichen Ort k untereinander angeordnet sind.

$$\begin{aligned}
X_0 &= s_{-1}\, n_1 m_1 \\
X_1 &= s_0\, n_1 m_1 + s_{-1}\, n_2 m_2 \\
X_2 &= s_1\, n_1 m_1 + s_0\, n_2 m_2 + s_{-1}\, n_3 m_3 \\
X_3 &= s_1\, n_2 m_2 + s_0\, n_3 m_3 + s_{-1}\, n_4 m_4 \\
X_4 &= s_1\, n_3 m_3 + s_0\, n_4 m_4 + s_{-1}\, n_5 m_5 \\
&\vdots
\end{aligned}$$

Wie aus dieser Darstellung erkennbar wird, können unter den genannten Voraussetzung für s_i die gesuchten Werte m_l schrittweise, ausgehend von dem letzten bekannten Wert, berechnet werden.

KAPITEL 12

Abschließende Betrachtungen

12.1 Alternativen

Alternativ zu dem Verfahren mit HMM wurde ein Verfahren auf der Basis dynamischer Programmierung untersucht (siehe z.B. [36, 37, 38, 39]). Dies ist eine mögliche Vorgehensweise zur Lösung von Optimierungsproblemen, in dem das Problem in Teilschritte zerlegt und nach jedem Teilschritt nur mit dem optimalen Teilergebnis weitergerechnet wird. Dies hält zwar den Rechen- und Speicheraufwand bei numerischer Auswertung sehr gering, je nach Fragestellung wird jedoch nicht die optimale Lösung des Gesamtproblems erzielt. Dies ist zum Beispiel dann der Fall, wenn die optimale Lösung eines Teilschrittes nicht Teilmenge der Gesamtlösung ist. Dem kann entgegengewirkt werden, indem für jeden Teilschritt nicht allein die optimale Lösung, sondern zusätzlich die zweit- oder sogar drittbeste Lösung bei der Auswertung im nächsten Teilschritt herangezogen wird.
Im allgemeinen Fall der Mustererkennung ist für jedes zu betrachtende Referenzobjekt das Optimierungsproblem

$$D = \sum_{t=1}^{T} ||m_t - r_{w(t)}|| \stackrel{!}{=} min \tag{12.1}$$

zu lösen. Dabei bezeichnet $||\cdot||$ ein geeignetes Abstandsmaß zwischen dem Meßwert m_t und dem Referenzwert $r_{w(t)}$. Dies können beispielsweise die Betragsfunktion oder der euklidische Abstand sein. Zur Lösung muß eine geeignete Funktion $w(t)$ gefunden werden, die die Meßwertsequenz geeignet auf die Referenzwerte abbildet. Die Steigung dieser Funktion ist ein Maß für die Streckung bzw. Stauchung des aktuellen Musters gegenüber dem Referenzmuster. Da es sich bei dem Parameter t hier um die Zeit handelt, wird diese Abbildung auch als *Dynamic Time Warping* (Zeitkrümmung) bezeichnet.
Die Lösung mittels dynamischer Programmierung besteht darin, schrittweise für $t = 1, \ldots, T$ die genannte Optmierung vorzunehmen. In jedem Schritt $w(t)$ wird so bestimmt, daß der Abstand zwischen Meßwert und Referenz-

wert minimiert wird. Als Randbedingung gilt hier entsprechend zum HMM, daß eine Bewegung nur in einer Richtung erfolgen kann, d.h. $w(t+1) \geq w(t)$ und daß $w(t+1) - w(t)$ durch die maximale Geschwindigkeit der Mobilstation begrenzt ist.
Obwohl dieses Verfahren bereits mit einigem Erfolg für die Spracherkennung eingesetzt wurde, kann hier bisher kein zufriedenstellendes Ergebnis erzielt werden. Dies ist im wesentlichen auf zwei Faktoren zurückzuführen:

- Eine Störung durch Shorttermfading kann zu einer Fehlzuordnung führen, die aufgrund der Tatsache, daß nur die optimale Lösung (oder die besten n Lösungen) beibehalten wird, nicht mehr korrigiert werden kann.
- Es fehlt bei diesem Verfahren jegliche Darstellung der Mobilität. Dadurch kann in Fällen schlechter Übereinstimmung zwischen Meß- und Referenzwert nicht auf die statistische Modellierung der Bewegung der Mobilstation zurückgegriffen werden.

12.2 Abschließende Bewertung

Mit dem Ziel, Handover und Leistungssteuerung in zellularen Mobilfunksystemen durch die Bestimmung der genauen Position des Teilnehmers zu verbessern, wurde in der vorliegenden Arbeit ein Verfahren zur Teilnehmerlokalisierung vorgestellt, das auf der Erkennung von Feldstärkemustern beruht. Nach der in Kapitel 7 beschriebenen Vorgehensweise kann mit vergleichsweise geringem Rechenaufwand das Durchfahren festgelegter Streckenabschnitte in einem für die Handover- und Leistungssteuerung ausreichendem Rahmen festgelegt werden. Da dieses Verfahren im Test erfolgreich war, entstand als logische Fortsetzung der Wunsch nach einer Erweiterung hinsichtlich einer kontinuierlichen Verfolgung der Mobilstation. Aus prinzipiellen Gründen kann die Bestimmung der Position aber niemals mit höherer Auflösung als der Entfernung erfolgen, die zwischen charakteristischen Schwankungen des Longtermfadings liegt. Je nach ausbreitungsbedingten Umständen kann diese Strecke bis zu 30 m betragen. In dieser Situation können die Zustandsübergänge im Modell nicht mehr in Abhängigkeit von den Meßwerten bestimmt werden. Da die Modellierung des Prozesses der Meßdatenerfassung aber auch das Mobilitätsverhalten der Mobilstation umfaßt, findet eine Abbildung der Bewegung weiterhin auf der Basis der statistisch bestimmten Übergangswahrscheinlichkeiten statt. Die Ergebnisse sind umso genauer, je besser das Fahrzeugverhalten mit dem Modell übereinstimmt. Aus diesem Grund wurd eine Anpassung des Modells an die

betrachtete Mobilstation angestrebt (siehe Kapitel 9). Um den Rechenaufwand bei kontinuierlicher Erkennung so gering wie möglich zu halten, wurden kurze Modellängen gewählt, die für eine anfängliche Erkennung nicht ausreichen. Es wurde daher vorgeschlagen, zunächst eine Erkennung an einer isolierten Position (Kapitel 7) vorzunehmen und anschließend auf die kontinuierliche Erkennung überzugehen.
In Ausnahmesituationen, die durch unvorhergesehene, meist kurzzeitig wirksame Abschattungen oder Reflexionen oder durch größere Abweichungen des Fahrzeugverhaltens vom Modell bedingt sein können, kann es zu so großen Abweichungen zwischen der berechneten und der tatsächlichen Position der Mobilstation kommen, daß eine Fortsetzung der Positionsbestimmung nicht möglich ist. Dieser Fall liegt vor, wenn die korrekte Fahrzeugposition im Folgemodell nicht mehr repräsentiert ist. Die Berechnung aller folgenden Modelle führt jedoch zu sehr niedrigen Wahrscheinlichkeitswerten, so daß damit zumindest ein Kriterium zur Feststellung dieses Fehlers existiert. Der Lokalisierungsvorgang muß in jedem Fall erneut initialisiert werden.
Auch im Fall von Geschwindigkeitsveränderungen, d.h. bei einem Fahrzeug, das mit der üblichen Verzögerung zum Stehen kommt, konnte ein Verfahren vorgestellt werden, das mit der gleicher Zuverlässigkeit arbeitet wie das in Kapitel 8 beschriebene Verfahren, wenngleich mit einem deutlich höheren Rechenaufwand. Nicht zufriedenstellend gelöst werden konnte das Lokalisierungsproblem bei Fahrzeugen mit sehr niedriger Geschwindigkeit sowie bei der Wiederaufnahme der Lokalisierung nach dem Stillstand des Fahrzeugs. Dies liegt daran, daß die Fahrzeuggeschwindigkeit aufgrund der räumlichen Diskretisierung der Zustände nicht genau genug bestimmt werden kann, so daß prinzipbedingt eine Differenz zwischen dem Modell und der tatsächlichen Fahrzeuggeschwindigkeit zu erwarten ist. Bei an einer Ampel oder einem Bahnübergang anhaltenden Fahrzeugen läßt sich dieses Problem wie beschrieben durch eine Neuinitialisierung des Erkennungsalgorithmus umgehen.
Es ergibt sich weiterhin, daß das Verfahren nicht für solche Mobilteilnehmer geeignet ist, die sich prinzipiell mit niedriger Geschwindigkeit bewegen, insbesondere Fußgänger. In diesem Fall kann man das Problem auch nicht durch eine Verringerung des Abstandes zwischen den Bezugsorten des Modells und somit einer höheren Dichte der Modellzustände beseitigen, da sich dadurch nach den Überlegungen in Abschnitt 7.3.3 die im Modell repräsentierte Information über die Umgebung nicht erhöhen läßt. Für die Handoversteuerung ist dies allerdings nicht relevant, da Teilnehmer mit niedriger Geschwindigkeit ohnehin seltener in eine Handoversituation kommen, sich

die Notwendigkeit eines Handovers rechtzeitig ankündigt und da geografische Gegebenheiten, die durch schnellen Wechsel der Ausbreitungssituation einen Ping-Pong-Handover auslösen, deutlich weniger wahrgenommen werden.
Bei Mobilfunksystemen, die bei höheren Trägerfrequenzen betrieben werden, wie DCS 1800 (1,8 GHz), DECT (1,9 GHz), UMTS (2,0 GHz), und zukünftigen drahtlosen ATM-Breitbandsystemen (3,5 GHz, 5 GHz, 17 GHz, 40 GHz und 60 GHz) ist aufgrund der mit steigender Frequenz abnehmenden Beugung der Funkwellen und der daher verstärkt optischen Ausbreitungseigenschaften mit örtlich häufiger auftretenden und deutlicher erkennbaren Abschattungen zu rechnen, so daß die angegebenen Verfahren dann auch für langsamer bewegte Mobilstationen angewandt werden können.
Abschließend sei noch die Frage nach der Verwendung der sensiblen Information über den Aufenthaltsort des Teilnehmers angesprochen. Hier steht der Anspruch nach einer höheren Dienstgüte dem Wunsch der Teilnehmer nach Schutz vor Mißbrauch dieser Daten entgegen. Wie schon im Bereich der Authentifizierung und Codierung ist es möglich, ein Lokalisierungssystem so zu integrieren, daß allein der Netzbetreiber Zugriff auf diese Daten hat. Unmittelbar nach Beendigung der Verbindung können sie wieder gelöscht werden, bleiben also nur so lange im System gespeichert, wie eine technische Notwendigkeit für ihre Aufbewahrung besteht. Die Befürchtung, daß für den Teilnehmer letztlich dennoch nicht transparent ist, wofür die Information tatsächlich verwendet wird, ist weitverbreitet. Dazu ist zu bemerken, daß das Abhören von Verbindungen zu Ermittlungszwecken über den Netzbetreiber zwar möglich ist, generell jedoch sämtliche persönliche Daten dem Datenschutz unterliegen. Ein Zugriff auf die sensible Ortsinformation kann daher nur auf richterliche Anordnung hin erfolgen. Dies veranlaßt zu der Frage, ob jemand sich möglicherweise nur deshalb des Mobiltelefons bedient, um seinen Aufenthaltsort zu verschleiern. Im Zeitalter der digitalen Vermittlung ließe sich sein Aufenthaltsort nämlich ebenfalls in Sekundenbruchteilen bestimmen, wenn er ein Telefon im Festnetz verwendet.

QUELLENVERZEICHNIS

[1] H. H. Meinke und F.-W. Gundlach, *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik.* Berlin, Heidelberg, New York usw.: Springer Verlag, 5. ed., 1992.

[2] J. D. Parsons, *The Mobile Radio Propagation Channel.* London: Pentech Press Publishers, 1992.

[3] D. O. Reudink, "Properties of Mobile Radio Propagation Above 400 MHz," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Band 23, S. 143 – 159, November 1974.

[4] D. O. Reudink, "Large-Scale Variations of the Average Signal," in *Microwave Mobile Communication* (W. C. Jakes, ed.), Kap. 2, New York, etc.: John Wiley & Sons, 1974.

[5] S. Gupta, R. Viswanathan und R. Muammar, "Land Mobile Radio Systems – a Tutorial Exposition," *IEEE Communications Magazine*, Band 23, S. 34 – 45, Juni 1985.

[6] Y. Okumura, E. Ohmori, J. Kawano und K. Fukuda, "Field Strength and its Variability in VHF and UHF Land Mobile Radio Service," *Review of Electrical Communication Laboratories*, Band 16, Nr. 9, S. 825 – 873, 1968.

[7] R. H. Clarke, "A Statistical Theory of Mobile-Radio Reception," *Bell System Technical Journal*, Band 47, S. 957 – 1000, Jul./Aug. 1968.

[8] S. O. Rice, "Mathematical Analysis of Random Noise," *Bell System Technical Journal*, Band 23, S. 282 – 332, Juli 1944.

[9] S. O. Rice, "Mathematical Analysis of Random Noise (Part III/IV)," *Bell System Technical Journal*, Band 24, S. 46 – 156, Januar 1945.

[10] ETSI - European Telecommunications Standardization Institute, *GSM Recommendation 05.08.*

[11] W. Mende, *Bewertung ausgewählter Leistungsmerkmale von zellularen Mobilfunksystemen.* Dissertation, FernUniversität Hagen, Hagen, 1991.

[12] S. Riter und J. McCoy, "Automatic Vehicle Location — An Overview," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Band 26, S. 7 – 11, Februar 1977.

[13] S. H. Roth, "History of Automatic Vehicle Monitoring (AVM)," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Band 26, S. 2 – 6, Februar 1977.

[14] W. G. Figel, N. H. Shepherd und W. F. Trammell, "Vehicle Location by Signal Attenuation Method," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Band 18, S. 105 – 109, November 1969.

[15] M. Hata und T. Nagatsu, "Mobile Location Using Signal Strength Measurements in Cellular Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Band 29, S. 245 – 252, Mai 1980.

[16] H. Staras und S. N. Honickman, "The Accuracy of Vehicle Location by Trilateration in a Dense Urban Environment," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Band 21, S. 38 – 43, Februar 1972.

[17] Goud, Sesay und Fattouche, "A Spread Spectrum Radiolocation Technique and its Application to Channel Assignment in Digital Cellular Radio," in *Proc. of the IEEE Pacific Rim Conference on Communicaton, Computers, and Signal Processing*, S. 661 – 664, 1991.

[18] H. Maturino-Lozoya, D. Muñoz-Rodríguez und H. Tawfik, "Pattern Recognition Techniques in Handoff and Service Area Determination," in *Proc. 44th IEEE Vehicular Technology Conference*, (Stockholm), S. 96 – 100, Juni 1994.

[19] S. Sakagami, S. Aoyama, K. Kuboi, S. Shirota und A. Akeyama, "Vehicle Position Estimates by Multibeam Antennas in Multipath Environments," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Band 41, S. 63 – 68, Februar 1992.

[20] B. Walke und C.-H. Rokitansky, "Short-Range Mobile Radio Networks for Road Transport Informatics," in *ETSI Mobile Radio Conference (MRC) '91*, (Nice, France), S. 183 – 192, November 1991.

[21] M. Junius, *Leistungsbewertung intelligenter Handover-Verfahren für zellulare Mobilfunksysteme.* Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen, 1995.

[22] R. Ott, *Über zweistufige quadratische Klassifikatoren.* Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, 1977.

[23] J. Schürmann, *Polynomklassifikatoren für die Zeichenerkennung.* München: R. Oldenbourg Verlag, 1977.

[24] L. A. Liporace, "Maximum Likelihood Estimation for Multivariate Observations of Markov Sources," *IEEE Transactions on Information Theory*, Band 28, S. 729 –734, September 1982.

[25] B.-H. Juang, "Maximum-Likelihood Estimation for Mixture Multivariate Stochastic Observation of Markov Chains," *AT&T Technical Journal*, Band 64, S. 1235 – 1249, Jul./Aug. 1985.

[26] L. R. Rabiner, "A Tutorial on Hidden Markov Models and Selected Applications in Speech Recognition," *Proceedings of the IEEE*, Band 77, S. 257 – 286, Februar 1989.

[27] L. E. Baum und J. A. Eagon, "An Inequality with Applications to Statistical Estimation for Propabilistic Functions of Markov Processes and to a Model for Ecology," *Bulletin of the American Mathematical Society*, Band 73, S. 360 – 363, 1967.

[28] L. E. Baum und G. R. Sell, "Growth functions for transformations on manifolds," *Pacific Journal of Mathematics*, Band 27, Nr. 2, S. 211 – 227, 1968.

[29] A. J. Viterbi, "Error bounds for convolutional codes and an asymptotically optimal decoding algorithm," *IEEE Transactions on Information Theory*, Band 13, S. 260 – 269, April 1967.

[30] G. D. Forney, "The Viterbi Algorithm," *Proceedings of the IEEE*, Band 61, S. 268 – 278, März 1973.

[31] K. Löw, "Feldstärkeprognose im Mobilfunk mit Hilfe der topographischen Datenbank," tech. rep., DBP, Hannover, Februar 1982.

[32] "Network Planning and Optimization, Services and Tools," tech. rep., Alcatel Mobile Communications, Stuttgart, Germany, Juli 1994.

[33] A. P. Dempster, N. M. Laird und D. B. Rubin, "Maximum Likelihood from Incomplete Data via the *EM* Algorithm," *Journal of the Royal Statistical Society – Series B*, Band 39, Nr. 1, S. 1 – 38, 1977.

[34] L. E. Baum, "An Inequality and Associated Maximization Technique in Statistical Estimation of Propabilistic Functions of Markov Processes," in *Inequalities. Proc. of a Symposium* (O. Shisha, ed.), Band 3, (New York), S. 1 – 8, Academic Press, 1972.

[35] L. E. Baum, T. Petrie, G. Soules und N. Weiss, "A Maximization Technique Occuring in the Statistical Analysis of Propabilistic Functions of Markov Chains," *Annals of Mathematical Statistics*, Band 41, S. 164 – 171, Februar 1970.

[36] R. E. Bellman, *Dynamic Programming.* Princeton, NJ: Princeton University Press, 1957.

[37] H. Sakoe und S. Chiba, "A Dynamic Programming Approach to Continuous Speech Recognition," in *Proc. of the 7th Int. Congress on Acoustics*, Band 3, (Budapest), S. 65 – 68, 1971.

[38] H. Sakoe und S. Chiba, "Dynamic Programming Algorithm Optimization for Spoken Word Recognition," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Band 26, S. 43 – 49, 1978.

[39] H. Sakoe, "Two Level DP-Matching — A Dynamic Programming Based Pattern Matching Algorithm for connected word recognition," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Band 27, S. 588 – 595, 1979.

[40] R. E. Bellman und R. Karush, "Dynamic Programming: A Bibliography of Theory and Application," Memorandum RM-3951-1-PR, The Rand Corporation, Santa Monica, CA, August 1964.

[41] O. Kennemann, "Mustererkennungsverfahren zur Verbesserung von Handover-Entscheidungen in zellularen Mobilfunknetzen," in *Aachener Informatik-Berichte 93-7*, S. 109 – 126, Graduiertenkolleg "Informatik und Technik", 1993.

[42] O. Kennemann, "Pattern Recognition by Hidden Markov Models for Supporting Handover Decisions in the GSM System," in *Proc. of the Sixth Nordic Seminar on Digital Mobile Radio Communications (DMR VI)*, (Stockholm), S. 195 – 202, Juni 1994.

[43] O. Kennemann, "Continuous Location of Moving GSM Mobile Stations by Pattern Recognition Techniques," in *Proc. Fifth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'94)*, (The Hague), S. 630 – 634, September 1994.

[44] O. Kennemann, "Mobile Location in Cellular Radio Systems Based on Pattern Recognition Techniques Using a Learning and Adapting Data Base," in *Proc. of the IFIP TC6 workshop for personal wireless communication*, (Prague), S. 63 – 71, April 1995.

[45] O. Kennemann, "Lokalisierung von Mobilstationen in nichtfließendem Verkehr," in *ITG-Fachbericht, 2. ITG-Fachtagung Mobile Kommunikation*, (Neu-Ulm), September 1995.

[46] O. Kennemann, "Mobile Location in Non-Flowing Traffic," in *Proc. Sixth IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'95)*, (Toronto), S. 274 – 278, September 1995.

[47] M. Junius und O. Kennemann, "New Methods for Processing GSM Radio Measurement Data: Applications for Locating, Handover, and Network Management," in *Proc. 44th IEEE Vehicular Technology Conference*, (Stockholm), S. 338 – 342, Juni 1994.

[48] M. Junius und O. Kennemann, "Intelligent Techniques for the GSM Handover Process," in *Proc. of the Int'l Workshop on Application of Neural Networks to Telecommunications*, (Stockholm), S. 41 – 48, Mai 1994.

[49] M. Scheibenbogen, "Mustererkennungsverfahren zur Teilnehmerlokalisierung in zellularen Mobilfunknetzen," Diplomarbeit, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Lehrst. f. Kommunikationsnetze, 1994.

[50] S. Müller-Herrig, "Modellierung von Mobilfunkmeßdaten und Mustererkennung mit Hidden-Markov-Modellen zur Lokalisierung von Mobilfunkteilnehmern," Diplomarbeit, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Lehrst. f. Kommunikationsnetze, 1995.

[51] M. Mouly und M.-B. Pautet, *The GSM System for Mobile Communications*. Palaiseau: M. Mouly et M.-B. Pautet, 1992.

[52] W. C. Y. Lee und Y. S. Yeh, "On the Estimation of the Second-order Statistics of Log Normal Fading in Mobile Radio Environment," *IEEE Transactions on Communications*, Band 22, S. 869 – 873, Juni 1974.

ANHANG A

Mathematische Betrachtung der Mobilfunkmeßdaten

A.1 Verbundverteilungsdichte des Mobilfunksignals für zwei Orte

In diesem Abschnitt wird die Verbundverteilungsdichtefunktion des in dB ausgegebenen Mobilfunktsignals an zwei Orten 0 und 1 berechnet und gezeigt, daß deren statistische Eigenschaften näherungsweise mit denen der Leistungswerte übereinstimmen.
Nach [7] lassen sich die statistischen Eigenschaften des Mobilfunksignals ableiten, indem man seine Inphase- und seine Quadraturkomponente betrachtet und diese jeweils als gaußverteilt annimmt. Die Leistung des Mobilfunksignals ergibt sich als Summe der Quadrate dieser beiden Größen, die Einhüllende als die Wurzel daraus. Die Inphase- und Quadraturkomponente sind jeweils statistisch unabhängig voneinander, während die Inphasekomponenten und Quadraturkomponenten an zwei unterschiedlichen Orten jeweils miteinander korreliert sind. (Kann man zeigen)
Allgemein gilt für zwei korrelierte gaußverteilte Prozesse die Verbundverteilung

$$p_{x_1,x_2}(x_1,x_2) = \frac{1}{2\pi \det \mu} e^{-\frac{1}{2}(x-m)^T \mu^{-1}(x-m)}, \tag{A.1}$$

wobei

$$\mu = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \rho \\ \rho & \sigma_2^2 \end{pmatrix} \qquad \text{und} \qquad m = \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \end{pmatrix}$$

die Kovarianzmatrix bzw. den Vektor der Mittelwerte beschreiben. σ_i sind die Standartabweichungen der Gaußprozesse, ρ der nicht normierte Korrelationskoeffizient. Die Korrelation der beiden Größen x_1 und x_2 ist durch das Integral

$$\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} x_1 \cdot x_2 \cdot p(x_1,x_2) dx_1 dx_2 = \rho$$

gegeben. Weiterhin gilt

$$\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} x_1^2 \cdot x_2^2 \cdot p(x_1, x_2)dx_1dx_2 = \sigma_1^2\sigma_2^2 + 2\rho^2 \qquad \text{(A.2)}$$

Für das Mobilfunksignal gilt nun zunächst, wobei x jeweils die Inphasekomponente und y jeweils die Quadraturkomponente repräsentiert:

$$E(P) = E(x_0^2 + y_0^2) = E(x_1^2 + y_1^2) = \sigma_x^2 + \sigma_y^2$$

und wegen $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$

$$E(P) = 2\sigma^2$$

Weiterhin ist die Korrelation der Leistungswerte

$$\begin{aligned} E(P_0P_1) &= E((x_0^2 + y_0^2)(x_1^2 + y_1^2)) \\ &= E(x_0^2x_1^2) + E(y_0^2y_1^2) + E(x_0^2)E(y_1^2) + E(y_0^2)E(x_1^2) \\ &= E(x_0^2x_1^2) + E(y_0^2y_1^2) + 2\sigma_x^2\sigma_y^2 \\ &= E(x_0^2x_1^2) + E(y_0^2y_1^2) + 2\sigma^4 \end{aligned}$$

Da außerdem Inphase- und Quadraturkomponente die gleichen statistischen Eigenschaften aufweisen folgt daraus

$$E(P_0P_1) = 2E(x_0^2x_1^2) + 2\sigma^4$$

Wie an anderer Stelle gezeigt wurde, läßt sich die Korrelation des Leistungssignals zu

$$R_{P_0P_1} = E(P_0P_1) = 4\sigma^4\left(1 + J_0^2(k\xi)\right)$$

berechnen [1]. Daher ist

$$E(x_0^2x_1^2) = \sigma^4 + 2\sigma^4\, J_0^2(k\xi)$$

Nach Gleichung (A.2) ist aber auch

$$E(x_0^2x_1^2) = \sigma_0^2\sigma_1^2 + 2\rho^2 = \sigma^4 + 2\rho^2$$

---

[1]

$$E(P) = YE^2N = 2\sigma^2$$

$$R_{P_0P_1} = Y^2E^4N^2\left(1 + J_0^2(k\xi)\right) = 4\sigma^4\left(1 + J_0^2(k\xi)\right)$$

Somit ist

$$\rho = \sigma^2 J_0(k\xi)$$

Durch Bestimmung der Parameter σ und ρ ist die Verbundverteilung nunmehr eindeutig festgelegt.
Die Verbundverteilung für die Größen x_0, x_1, y_0, y_1 läßt sich nun mit Hilfe der Gleichung (A.1) angeben:

$$p_{x_1,x_2}(x_0, x_1) \cdot p_{x_1,x_2}(y_0, y_1) \tag{A.3}$$

Wie daraus die Verbundverteilung für die Leistung zu errechnet werden kann, wird im folgenden gezeigt.
Gegeben sei die Verbundverteilung $p_{x,y}(x, y)$. Gesucht sei die Verteilung der Funktion $z = \sqrt{x^2 + y^2}$. Ausgehend von $p_{x,y}(x, y)$ wird nun zunächst die Verbundverteilung $p_{u,v}(u, v)$ bestimmt, mit $u = x^2$ und $v = y^2$. Die zu dieser Variablentransformation gehörige Jakobimatrix lautet

$$J = \begin{vmatrix} \frac{1}{2\sqrt{u}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2\sqrt{v}} \end{vmatrix}$$

Darüberhinaus ist zu berücksichtigen, daß sowohl positive wie negative Werte für x und y die Transformationsgleichung erfüllen. Für die Wahrscheinlichkeit müssen also die Lösungen für alle Quadranten des x,y-Koordinatensystems aufaddiert werden. Daher ist

$$p_{u,v}(u, v) = \frac{1}{4\sqrt{uv}} \cdot \begin{array}{l} [p_{x,y}(\sqrt{u}, \sqrt{v}) + p_{x,y}(-\sqrt{u}, \sqrt{v}) + \\ p_{x,y}(-\sqrt{u}, -\sqrt{v}) + p_{x,y}(\sqrt{u}, -\sqrt{v})] \end{array}$$

Zur Bestimmung der Summenvariablen $w = z^2$ ist das Integral

$$\int_0^\infty p_{u,v}(u, w-u)du = \int_0^w p_{u,v}(u, w-u)du =$$
$$\int_0^w \frac{1}{4\sqrt{u(w-u)}} \cdot \begin{array}{l} [p_{x,y}(\sqrt{u}, \sqrt{w-u}) + p_{x,y}(-\sqrt{u}, \sqrt{w-u}) + \\ p_{x,y}(-\sqrt{u}, -\sqrt{w-u}) + p_{x,y}(\sqrt{u}, -\sqrt{w-u})]\, du \end{array}$$

auszuführen. Wählt man zu diesem Zweck die Transformation

$$u = w \cdot \cos^2(\phi), \quad du = -2w \cdot \cos(\phi)\sin(\phi),$$

so geht das Integral über in die Form

$$\begin{aligned} p_w(w) &= \int_{\pi/2}^{0} \frac{-2w \cdot \cos(\phi)\sin(\phi)}{4\sqrt{w\cos^2(\phi)(w - w\cos^2(\phi))}} \cdot \\ &\quad \cdot \Big[\; p_{x,y}(\sqrt{w\cos^2(\phi)}, \sqrt{w - w\cos^2(\phi)}) + \\ &\qquad p_{x,y}(-\sqrt{w\cos^2(\phi)}, \sqrt{w - w\cos^2(\phi)}) + \\ &\qquad p_{x,y}(-\sqrt{w\cos^2(\phi)}, -\sqrt{w - w\cos^2(\phi)}) + \\ &\qquad p_{x,y}(\sqrt{w\cos^2(\phi)}, -\sqrt{w - w\cos^2(\phi)}) \Big] \, d\phi \\ &= \frac{1}{2} \cdot \int_0^{\pi/2} [\,\cdot\,] \, d\phi \end{aligned}$$

Betrachtet man nunmehr das wechselnde Vorzeichen der Sinus- und Cosinusfunktion, wenn der Winkel eine Periode überstreicht, so läßt sich weiter schreiben:

$$\begin{aligned} p_w(z^2) &= \frac{1}{2} \Bigg[\int_0^{\pi/2} p_{x,y}(z\cos(\phi), z\sin(\phi)) + \int_{\pi/2}^{\pi} p_{x,y}(z\cos(\phi), z\sin(\phi)) + \\ &\quad + \int_{\pi}^{\frac{3}{2}\pi} p_{x,y}(z\cos(\phi), z\sin(\phi)) + \int_{\frac{3}{2}\pi}^{2\pi} p_{x,y}(z\cos(\phi), z\sin(\phi)) \Bigg] \, d\phi \\ &= \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} p_{x,y}(z\cos(\phi), z\sin(\phi)) \end{aligned}$$

Schließlich erhält man mit $z = \sqrt{w}$ und $dz = 1/2\sqrt{w} = 1/2z$

$$p_z(z) = z \int_0^{2\pi} p_{x,y}(z\cos(\phi), z\sin(\phi)) \, d\phi$$

Soll nun aus der Verbundverteilung nach Gleichung A.3

$$\frac{1}{4\pi^2(\sigma^4 - \rho^2)} e^{-\frac{1}{2}\frac{\sigma^2 x_0^2 - 2x_0x_1\rho + \sigma^2 x_1^2 + \sigma^2 y_0^2 - 2y_0y_1\rho + \sigma^2 y_1^2}{\sigma^4 - \rho^2}}$$

die Verbundverteilung der Leistungen an den Orten 0 und 1 ermittelt werden, so ergibt sich mit den vorangehenden Ergebnissen und $P_0 = x_0^2 + y_0^2$

sowie $P_1 = x_1^2 + y_1^2$

$$
\begin{aligned}
& p_{P_0,P_1}(P_0, P_1) = \\
&= \frac{1}{16\pi^2(\sigma^4 - \rho^2)} \int_0^{2\pi}\int_0^{2\pi} e^{-\frac{1}{2}\frac{N}{Z}} d\phi_0 d\phi_1 \\
&\quad \text{mit} \quad \frac{N}{Z} = \frac{\sigma^2 P_0 + \sigma^2 P_1 - 2\sqrt{P_0 P_1}\rho\cos(\phi_0)\cos(\phi_1) - 2\sqrt{P_0 P_1}\rho\sin(\phi_0)\sin(\phi_1)}{\sigma^4 - \rho^2} \\
&= \frac{1}{16\pi^2(\sigma^4 - \rho^2)} \int_0^{2\pi}\int_0^{2\pi} e^{-\frac{1}{2}\frac{\sigma^2 P_0 + \sigma^2 P_1 - 2\sqrt{P_0 P_1}\rho\cos(\phi_0 - \phi_1)}{\sigma^4 - \rho^2}} d\phi_0 d\phi_1 \\
&= \frac{1}{4(\sigma^4 - \rho^2)} e^{-\frac{1}{2}\frac{\sigma^2 P_0 + \sigma^2 P_1}{\sigma^4 - \rho^2}} I_0\left(\frac{\sqrt{P_0 P_1}\rho}{\sigma^4 - \rho^2}\right)
\end{aligned}
$$

Wie man durch Vergleich mit der eindimensionalen Rice-Verteilung erkennen kann, gilt:

$$\int_0^\infty \frac{r}{s^2} I_0(rcs^2) e^{-\frac{r^2 + c^2}{2s^2}} dr = 1$$

bzw.

$$\int_0^\infty \frac{1}{2s^2} I_0(\sqrt{t}cs^2) e^{-\frac{t + c^2}{2s^2}} dt = 1$$

Setzt man nun

$$s^2 = \frac{\sigma^4 - \rho^2}{\sigma^2}$$

und

$$c = \frac{\sqrt{P_0}\rho}{\sigma^2}$$

so erhält man durch Bildung des Integrals über P_1

$$
\begin{aligned}
& \int_0^\infty p_{P_0,P_1}(P_0, P_1) dP_1 = \\
&= \int_0^\infty \frac{1}{4(\sigma^4 - \rho^2)} \cdot e^{-\frac{\sigma^2}{2(\sigma^4 - \rho^2)} P_0} \cdot e^{-\frac{\sigma^2}{2(\sigma^4 - \rho^2)} P_1} \cdot I_0\left(\frac{\sqrt{P_0 P_1}\rho}{\sigma^4 - \rho^2}\right) dP1
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
&= \int_0^\infty \frac{1}{4(\sigma^4-\rho^2)} \cdot e^{-\frac{\sigma^2}{2(\sigma^4-\rho^2)}P_0} \cdot \\
&\quad \underbrace{\cdot e^{\frac{\rho^2}{2\sigma^2(\sigma^4-\rho^2)}P_0} \cdot e^{-\frac{\rho^2}{2\sigma^2(\sigma^4-\rho^2)}P_0}}_{=1} \cdot e^{-\frac{\sigma^2}{2(\sigma^4-\rho^2)}P_1} \cdot I_0\left(\frac{\sqrt{P_0P_1}\rho}{\sigma^4-\rho^2}\right) dP1 \\
&= \frac{1}{2\sigma^2} e^{-\frac{\sigma^2}{2(\sigma^4-\rho^2)}P_0} \cdot e^{\frac{\rho^2}{2\sigma^2(\sigma^4-\rho^2)}P_0} \cdot \\
&\quad \underbrace{\cdot \int_0^\infty \frac{\sigma^2}{2(\sigma^4-\rho^2)} \cdot e^{-\frac{\rho^2}{2\sigma^2(\sigma^4-\rho^2)}P_0} \cdot e^{-\frac{\sigma^2}{2(\sigma^4-\rho^2)}P_1} I_0\left(\frac{\sqrt{P_0P_1}\rho}{\sigma^4-\rho^2}\right) dP1}_{=1} \\
&= \frac{1}{2\sigma^2} e^{-\frac{P_0}{2\sigma^2}}
\end{aligned}
$$

die erwartete Verteilungsdichtefunktion der Leistung am Ort 0.
Mit Hilfe der Verbundverteilungsfunktion der Leistungswerte kann die Autokorrelationsfunktion der Leistungswerte in dB, d. h. der logarithmierten Leistungswerte angegeben werden. Sie lautet in Abhängigkeit von der vorgegebenen Korrelation

$$
\int_0^\infty \int_0^\infty \log P_0 \log P_1 \frac{1}{4(\sigma^4-\rho^2)} e^{-\frac{1}{2}\frac{\sigma^2P_0+\sigma^2P_1}{\sigma^4-\rho^2}} I_0\left(\frac{\sqrt{P_0P_1}\rho}{\sigma^4-\rho^2}\right) dP_0 dP_1
$$

Diese Funktion kann in der Nähe von 0 durch folgende Reihenentwicklung approximiert werden:

$$
\begin{aligned}
&1/4(\gamma - \log\sigma^2)^2 + \\
&+\frac{1/8 + 3/4 * (\gamma - \log\sigma^2) - 3/8 * (\gamma - \log\sigma^2)^2}{2} \left(\frac{\rho}{\sigma^2}\right)^2 + \\
&+\frac{75/32 - 9/8 * (\gamma - \log\sigma^2) - 9/8 * (\gamma - \log\sigma^2)^2}{24} \left(\frac{\rho}{\sigma^2}\right)^4 + \\
&+\frac{2585/64 - 945/16 * (\gamma - \log\sigma^2) - 135/16 * (\gamma - \log\sigma^2)^2}{720} \left(\frac{\rho}{\sigma^2}\right)^6 + \ldots
\end{aligned}
$$

Sie ist mit dieser Anzahl von Gliedern im Wertebereich von ρ zwischen 0 und 1 bereits hinreichend genau. Es ist zu erkennen, daß die Funktion in guter Näherung auch schon durch eine quadratische Parabel beschrieben

werden kann. Dies bedeutet, daß das Korrelationsverhalten der logarithmierten Werte in guter Näherung dem der Abweichung der Leistungswerte von ihrem Mittelwert entspricht. Somit können die dort angestellten Überlegungen bezüglich des Frequenzverhaltens auf die logarithmierten Werte übertragen werden.

A.2 Korrelationseingenschaften des Leistungssignals

Die Korrelationseigenschaften der Leistung des Mobilfunksignals an zwei Orten 0 und 1 können in Analogie zu der Berechnung für die Einhüllende in [7] berechnet werden.
Gegeben seien die Wellenfronten i, die unter dem Winkel α_i einfallen. Die Feldstärke der einfallenden Wellenfronten werde mit E_i bezeichnet.
An der Stelle 0 herrscht die Empfangsfeldstärke

$$\underline{E}_{i0} = E_i e^{j\varphi_i},$$

an der Stelle 1

$$\underline{E}_{i1} = E_i e^{j(\varphi_i + k\xi\cos\alpha_i)}.$$

Dadurch ergibt sich die Gesamtfeldstärke an der Stelle 0 zu

$$\underline{E}_0 = \sum_1^N E_i e^{j\varphi_i},$$

an der Stelle 1

$$\underline{E}_1 = \sum_1^N E_i e^{j(\varphi_i + k\xi\cos\alpha_i)}.$$

Stellt Y die Admittanz des Empfängers dar, so ist $Y\underline{E}_0\underline{E}_0^*$ die an der Stelle 0 empfangene Leistung. Entsprechendes gilt für 1.
Die Korrelation der Leistung zwischen den Stellen 0 und 1 ergibt sich als Erwartungswert des Produktes der Leistung an den beiden Stellen, d. h.

$$\begin{aligned} R_{PP} &= Y^2 < \underline{E}_0\underline{E}_0^*\underline{E}_1\underline{E}_1^* > \\ &= Y^2E^4 < \sum_i\sum_j\sum_m\sum_n e^{j(\varphi_i-\varphi_j+\varphi_m-\varphi_n)} e^{jk\xi(\cos\alpha_m-\cos\alpha_n)} > \end{aligned}$$

Da die Winkel φ von den Winkeln α unabhängig sind, können die Erwartungswerte separat berechnet werden.

$$R_{PP} = Y^2E^4 \sum_i\sum_j\sum_m\sum_n < e^{j(\varphi_i-\varphi_j+\varphi_m-\varphi_n)} >< e^{jk\xi(\cos\alpha_m-\cos\alpha_n)} >$$

Der Erwartungswert $< e^{j(\varphi_i-\varphi_j+\varphi_m-\varphi_n)} >$ ist nur von null verschieden, wenn entweder

$$\begin{aligned} & (i=j \wedge m=n) \\ \vee \quad & (i=n \wedge m=j) \ . \end{aligned}$$

Unter dieser Bedingung gilt

$$< e^{j(\varphi_i-\varphi_j+\varphi_m-\varphi_n)} >= 1 \ .$$

Daher ist

$$\begin{aligned} R_{PP} &= Y^2E^4 \sum_i \sum_m < e^{jk\xi(\cos\alpha_m - cos\alpha_m)} > + \\ &\quad + Y^2E^4 \sum_i \sum_{m\neq i} < e^{jk\xi(\cos\alpha_m - cos\alpha_i)} > \\ &= Y^2E^4 \sum_i \sum_m < e^{jk\xi(\cos\alpha_m - cos\alpha_m)} > + \\ &\quad + Y^2E^4 \sum_i \sum_{m\neq i} < e^{jk\xi\cos\alpha_m} >< e^{-jk\xi\cos\alpha_i} > \end{aligned}$$

Unter der Voraussetzung, daß es bezüglich des Welleneinfalls keine Vorzugsrichung gibt, wenn also gilt

$$p(\alpha_i) = \frac{1}{2\pi}$$

so ist

$$< e^{jk\xi\cos\alpha_i} >= \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} e^{jk\xi\cos\alpha_i} d\alpha_i = \frac{2\pi}{2\pi}\int_0^1 e^{jk\xi\cos 2\pi\beta} d\beta = J_0(k\xi)$$

daher

$$\begin{aligned} R_{PP} &= Y^2E^4\left(N^2 + N(N-1)J_0^2(k\xi)\right) \\ &= Y^2E^4N^2\left(1 + (1-\frac{1}{N})J_0^2(k\xi)\right) \\ &\overset{N\gg 1}{\approx} Y^2E^4N^2\left(1 + J_0^2(k\xi)\right) \end{aligned}$$

A.3 Betrachtung der Mobilfunkmeßwerte unter signaltheoretischem Gesichtspunkt

In diesem Abschnitt werden einige charakteristische Kenngrößen des Mobilfunksignals abgeleitet, um die Eignung der Pegelmeßwerte für ein Mustererkennungsverfahren abzuschätzen. Vorangestellt wird eine kurze Beschreibung der Faktoren, die für den typischen Pegelverlauf eines Mobilfunksignals verantwortlich sind.

A.3.1 Statistische Betrachtungen zum Pegelverlauf

Auf den Pegelverlauf eines Mobilfunksignals werden neben der Ausbreitungsdämpfung und wetterbedingten Faktoren zwei Einflüsse wirksam. Dies sind zum einen die durch Topographie, sowie Bebauung und Bewuchs bedingten Pegelschwankungen, auf die sich das hier vorgestellte Verfahren stütz. Nach [4] gehorchen sie einer log-normal-Verteilung, d. h. die logarithmierten Daten unterliegen einer Normalverteilung. Die Schwankungen finden in der Größenordnung von 100 m statt und werden als Long-Term-Fading bezeichnet.
Demgegenüber unterliegt das Mobilfunksignal auch Schwankungen, die in der Größenordnung der halben Wellenlänge der Trägerfrequenz liegen, im 900-MHz-Band also eine Strecke von etwa 15 cm. Da sich diese Signaleinbrüche für eine in Bewegung befindliche Mobilstation in sehr kurzen Intervallen wiederholen, wird dieser Effekt als Short-Time-Fading bezeichnet. Er ist auf die durch Reflektion und Streuung bedingte Mehrwegeausbreitung zurückzuführen, die sich in der Mobilfunkumgebung durch ein Interferenzmuster der angegebenen Größe äußert. In städtischer Umgebung ist zumeist der direkte Pfad vom Sender zum Empfänger unterbrochen, so daß die Verbindung ausschließlich über indirekte Pfade zustande kommt. Daher ist eine Betrachtung für den Mobilfunk von großer Bedeutung. Ausführliche theoretische Überlegungen zu diesem Effekt wurden von Clarke [7] veröffentlicht. Ausgehend von der Annahme einer großen Anzahl von Wellen statistischer Amplitude und Phase kann das am Ort der Mobilstation registrierte Signal als Bandpaßprozeß betrachtet werden, dessen Inphase-Komponente und dessen Quadraturkomponente jeweils gaußsche Zufallsprozesse sind. Nach Rice ist dann die Einhüllende des Empfangssignals rayleighverteilt, d.h. es gilt

$$p(r) = \begin{cases} \frac{2r}{\sigma^2} \cdot \exp\left(-\frac{r^2}{\sigma^2}\right) & r \geq 0 \\ 0 & r < 0 \end{cases}$$

Für die Ermittlung der GSM-Qualitätsparameter wird die Leistung des Mobilfunksignals herangezogen. Dieses entspricht dem Quadrat $s = r^2$ seiner Einhüllenden. Der Mittelwert der Leistung errechnet sich dann zu

$$E(s) = \sigma^2,$$

ihre Varianz zu

$$E(s^2) - E^2(s) = \sigma^4.$$

Für die Anwendung eines Mustererkennungsverfahrens stellt der Mittelwert das Nutzsignal, die Streuung das Störsignal dar.
Darüberhinaus wird in [7] unter der Annahme, daß die Winkel unter denen die Wellenfronten bei der Mobilstation eintreffen, gleichverteilt sind, die örtliche Autokorrelationsfunktion der Leistung des Mobilfunksignals ermittelt. Normiert auf den Wert 1 für $x = 0$ lautet sie

$$\varphi_{ss}(x) = E\left(s(\tilde{x})s(\tilde{x}+x)\right) = \frac{1}{2}\left[1 + J_0^2(2\pi x/\lambda)\right],$$

wobei J_0 die Besselfunktion erster Art nullter Ordnung ist und λ die Wellenlänge der Trägerfrequenz. Für die normierte Autokorrelationsfunktion der Abweichung des Mobilfunksignals von seinem Mittelwert gilt entsprechend

$$\varphi_{(s-\overline{s})(s-\overline{s})}(x) = J_0^2(2\pi x/\lambda)\ .$$

Die vorstehenden Ausführungen sind jedoch nur gültig, sofern es sich um einen stationären Zufallsprozeß handelt, d.h. die Parameter der Zufallsverteilung konstant bleiben. Dies ist hier nicht der Fall und gerade dieses Phänomen soll für den Mustererkennungsprozeß ausgenutzt werden. Dividiert man jedoch die Zufallsvariable r des Rayleighprozesses durch die Streuung σ, so erhält man einen stationären Zufallsprozeß, so daß man die Einhüllende des Mobilfunksignals als Produkt eines langsam veränderlichen Mittelwertes und eines stationären Rayleigh-Zufallsprozesses darstellen kann:

$$r(x) = m(x)r_0(x).$$

Der lokale Mittelwert $m(x)$ ist für die hier betrachtete Anwendung die maßgeblich interessierende Größe. In [52] wird daher berechnet, inwieweit die Mittelung des Signals über eine Distanz L vom lokalen Mittelwert abweicht. Betrachtet man für den vorliegenden Anwendungsfall exemplarisch die Strecke, die ein mit 50 km/h fahrendes Fahrzeug in dem hier interessierenden Zeitraum von 480 ms zurücklegt und die etwa der zwanzigfachen

Wellenlänge entspricht, so läßt sich den Untersuchungsergebnissen entnehmen, daß sowohl die Streuungsbreite um den tatsächlichen Mittelwert als auch die Abweichung der aus den gemittelten Werten gebildeten Verteilungsfunktion von der log-normal-Verteilung für die geplante Anwendung hinreichend klein sind.
Unglücklicherweise ist jedoch bei dem als TDMA-System ausgelegten GSM-System die Bildung des Mittelwertes komplizierter. Dies wird im nächsten Abschnitt betrachtet.
Während in städtischen Umgebungen der Empfang nahezu ausschließlich über indirekte Pfade möglich ist, spielt in flacheren unbebauten Bereichen auch der direkte Ausbreitungsweg eine Rolle, zu dem eine geringere Anzahl reflexionsbedingter Ausbreitungswege tritt. In diesem Fall gehorcht die Einhüllende nicht einer Rayleigh-Verteilung, sondern einer Rice-Verteilung. Dann verbessert sich bei konstantem Mittelwert das Verhältnis von Streuung und Mittelwert, je größer der Anteil des direkten Signals ist.

A.3.2 Eigenschaften der Pegelmeßwerte

Möchte man nun einen Eindruck von den Korrelationseigenschaften der Pegelmeßwerte erhalten, so kann man die oben angegebene Autokorrelationsfunktion des Mobilfunksignals zugrundelegen. Nach der Wiener-Lee-Beziehung gilt für die Autokorrelationsfunktion eines Zufallssignals $s(t)$, das über ein lineares und zeitinvariantes System mit der Stoßantwort $h(t)$ übertragen wird

$$\varphi_{gg}(t) = \varphi_{ss}(t) * \varphi^{E}_{hh}(t) \; .$$

Betrachtet man nun zunächst entsprechend dem Vorgehen von Lee ein Mobilfunksignal, das über einen Zeitraum von $T = 480ms$ gemittelt wurde, zum Zeitpunkt t, so entspricht dies in signaltheoretischer Schreibweise einer Faltung mit der Funktion

$$h(t) = \mathrm{rect}\left(\frac{t - \frac{T}{2}}{T}\right), \qquad \text{mit} \quad \mathrm{rect}(x) = \begin{cases} 1 & : \; -\frac{1}{2} < x < \frac{1}{2} \\ 0 & : \; \text{sonst} \end{cases}$$

denn

$$s(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\tilde{t}) h(t - \tilde{t}) d\tilde{t} = \int_{t-T}^{t} s(\tilde{t}) d\tilde{t} \; .$$

Die Autokorrelationsfunktion des resultierenden integrierten Signals erhält man daher mit

$$\varphi_{hh}(t) = T\Lambda(\frac{t}{T})$$

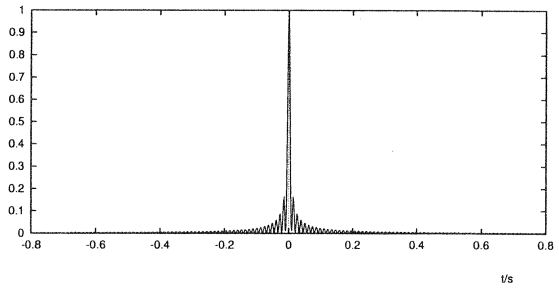


Bild A.1: Autokorrelationsfunktion der Abweichung des Mobilfunksignals von seinem Mittelwert $\varphi_{(s-\overline{s})(s-\overline{s})}(t)$

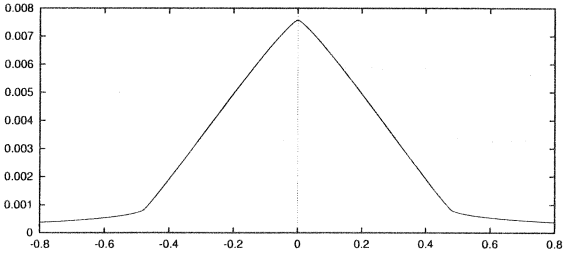


Bild A.2: Autokorrelationsfunktion aus obiger Abbildung nach Intgration über 480 ms

zu

$$\varphi_{gg}(t) = \varphi_{ss}(t) * T\Lambda(\frac{t}{T}) \tag{A.4}$$

mit

$$\Lambda(x) = \begin{cases} 1 - |x| & : \quad -1 < x < 1 \\ 0 & : \quad \text{sonst} \end{cases}$$

Die Autokorrelationsfunktion der Abweichung des Mobilfunksignals vom Mittelwert nach der Integration ist in Abbildung A.2 für eine Geschwindigkeit des Mobilfunkteilnehmers von 50 km/h bei 900 MHz dargestellt.

Es ist zu erkennen, daß der Einfluß der Granularität durch das Short-Term-Fading fast vollständig verschwindet. Dies bestätigt die Untersuchungen von Lee.

Diese Überlegungen entsprechen jedoch nicht den Gegebenheiten im GSM-System, da eine Mittelung des Mobilfunksignals über das gesamte Intervall aufgrund der Konstruktion als TDMA-System nicht möglich ist. Innerhalb eines Multiframes, d.h. innerhalb des Zeitraums von 480 ms, werden 104 TDMA-Rahmen übertragen, von denen nur $N = 12$ für die Ermittlung der Pegelwerte herangezogen werden.
Benutzt man auch hier den oben gemachten Ansatz, wobei man hier für T die Länge des Zeitschlitzes T_F einsetzen muß, so erhält man die Korrelation für die gemessenen Signalpegel untereinander, wenn man die Werte dieser Funktion an den Stellen $i \cdot \frac{480ms}{N} = i \cdot 40ms$ betrachtet. Da es sich sowohl bei $\varphi_{(s-\overline{s})(s-\overline{s})}$ als auch bei φ_{hh} um Funktionen handelt, deren Funktionswerte größer null sind, liegt zwischen den Abweichungen der Abtastwerte vom Mittelwert stets eine positive Korrelation vor. Aufgrund dieser Tatsache läßt sich die Varianz des Summensignals nicht einfach durch Addition der einzelnen Varianzen ermitteln. Vielmehr ist mit einer deutlich höheren Varianz zu rechnen.
Möchte man die Varianz der Summe dieser 12 miteinander korrelierten Werte ermitteln, so ergibt sich mit der Abkürzung $x_i = s_i - \overline{s}$

$$E\left((\sum_{0}^{N-1} x_i)^2\right) = \sum_{i=0}^{N-1} E\left(x_i^2\right) + 2 \cdot \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j>i}^{N-1} E(x_i x_j).$$

Da man den Prozeß innerhalb der hier getroffenen Annahmen als stationär betrachten kann und daher die Werte $E(x_i^2)$ für alle i gleich groß sind und die Werte $E(x_i x_j)$ nur von der Differenz $j - i$ abhängen, vereinfacht sich die Gleichung zu

$$E\left((\sum_{0}^{N-1} x_i)^2\right) = NE(x_0^2) + 2\sum_{i=1}^{N-1}(N-i)E(x_0 x_i)\ .$$

Beachtet man nunmehr, daß für eine mit der Geschwindigkeit v fahrende Mobilstation $\varphi_{(s-\overline{s})(s-\overline{s})} = J_0^2(\frac{2\pi}{\lambda}vt)$ ist und weiterhin die Einhüllende der Besselfunktion näherungsweise mit $\sqrt{2/(\pi x)}$ abfällt, ihr Quadrat also mit $2/(\pi x)$, so ergeben sich im ungünstigsten Fall Abtastwerte, deren Korrelation mit dem Kehrwert des Abstandes fällt. Damit ergibt sich für $N = 12$

$$E\left((\sum_{0}^{N-1} x_i)^2\right) = 12\sigma^4 + \frac{466408}{385\pi kv}\frac{1}{480ms}\sigma^4\ . \qquad \text{(A.5)}$$

Da zur Bildung des Mittelwertes die Zufallsvariable s durch N geteilt wird, reduziert sich die Varianz um den Faktor N^2. Dann läßt sich aus der obenstehenden Gleichung ermitteln, daß für alle Geschwindigkeiten $v > 1.16\text{km/h}$ die Streuung kleiner ist als die Streuung des Signals ohne Bildung des Mittelwertes und somit die als Störsignal zu betrachtende Granularität kleiner als das Nutzsignal.
Um nunmehr eine Information über die Korrelationseigenschaften aufeinanderfolgender Abtastwerte und das Frequenzverhalten der alle 480 ms übermittelten Pegelmeßwerte zu erhalten, wobei weiterhin Stationarität des Zufallsprozesses vorausgesetzt wird, wird im folgenden die Autokorrelationsfunktion der Abweichung der Pegelmeßwerte von ihrem Mittelwert berechnet.
Da es sich um ein statistisches und nicht um ein deterministisches Signal handelt, ergibt sich die Autokorrelationsfunktion des abgetasteten Signals durch Abtastung der Autokorrelationsfunktion des kontinuierlichen Signals. Man erhält daher unter Berücksichtigung der Integration über einen TDMA-Zeitschlitz der Länge T_F

$$\varphi_{gg} = \varphi_{(s-\bar{s})(s-\bar{s})}(t) * T_F \Lambda(\frac{t}{T_F})$$

analog zu Gleichung (A.4) und weiterhin unter Berücksichtigung der Abtastung im Abstand $T_a = 480ms/N$

$$\varphi_{g_a g_a}(t) = \varphi_{gg}(t) \cdot \frac{1}{T_a} \text{Ш}(\frac{t}{T_a}), \qquad \text{wobei} \qquad \text{Ш}(t) = \sum_{-\infty}^{\infty} \delta(t-n) \qquad \text{ist.}$$

Durch eine Integration des über den Zeitschlitz integrierten und im Abstand T_a abgetasteten Mobilfunksignals, nunmehr über den Zeitraum von 480 ms, und anschließende Division durch N erhält man den Mittelwert der zur Pegelermittlung herangezogenen Abtastwerte. Diese Funktion ist jeweils in Intervallen von 480 ms zu betrachten. Für die Autokorrelationsfunktion bedeutet dies eine Faltung mit der Dreieckfunktion $480ms \cdot 1/N^2 \cdot \Lambda(t/480ms)$ und anschließend eine Abtastung in Intervallen von 480 ms. Daher läßt sich die Autokorrelationsfunktion der Abweichung des alle 480 ms übermittelten Mobilfunksignals von seinem Mittelwert, φ_{mm}, ermitteln zu

$$\varphi_{mm}(t) = \left[\varphi_{g_a g_a}(t) * \frac{480ms}{N^2} \Lambda\left(\frac{t}{480ms}\right)\right] \cdot \frac{1}{480ms} \text{Ш}\left(\frac{t}{480ms}\right)$$

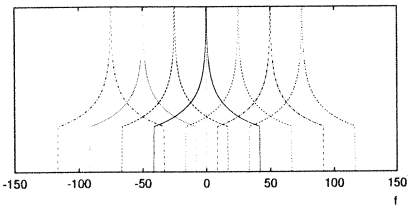


Bild A.3: Transformierte der Autokorrelationsfunktion des über T_F integrierten Mobilfunksignals

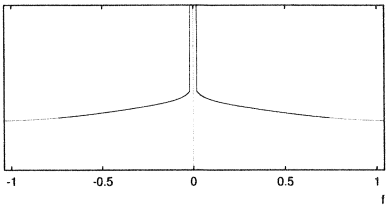


Bild A.4: Transformierte der Autokorrelationsfunktion der Mobilfunkmeßdaten

$$= \frac{1}{N^2}\frac{T_F}{T_a}\left[\left[\left(\varphi_{ss} * \Lambda\left(\frac{t}{T_F}\right)\right)\cdot \text{Ш}\left(\frac{t}{T_a}\right)\right] * \Lambda\left(\frac{t}{480ms}\right)\right]\cdot \cdot\text{Ш}\left(\frac{t}{480ms}\right) \tag{A.6}$$

Um nun einen Eindruck von der spektralen Verteilung des Signals zu erhalten, wird es in den Frequenzbereich transformiert. Man erhält dann für das Leistungsdichtespektrum

$$\Phi_{mm}(f) = \frac{(480ms)^2 T_F^2}{N^2}\left[\left[\left(\Phi_{ss}\cdot \text{si}^2\left(\pi T_F f\right)\right) * \text{Ш}\left(T_a f\right)\right]\text{si}^2\left(\pi 480ms\cdot f\right)\right] * *\text{Ш}\left(480ms\cdot f\right)$$

Das Leistungsdichtespektrum eines Zufallssignals, dessen Autokorrelationsfunktion dem Quadrat der Besselfunktion entspricht, erhält man nach einiger Rechnung zu

$$\varphi_{J_0^2 J_0^2}(x) \quad \circ\!\!-\!\!\bullet \quad \Phi_{J_0^2 J_0^2}(f) = \frac{4/\pi}{1+\pi f}\cdot K\left(\frac{1-\pi f}{1+\pi f}\right)\text{rect}\left(\frac{f}{1/\pi}\right) ,$$

wobei $K(x)$ das vollständige elliptische Integral erster Gattung ist.
Mit Hilfe dieser Gleichung kann nun das Leistungsdichtespektrum berechnet werden. In Abbildung A.3 ist zunächst das Produkt $\Phi_{J_0^2 J_0^2}\cdot \text{si}^2\left(\pi T_F f\right)$ dargestellt. Bei der Faltung mit $\text{Ш}(T_a f)$ wird diese Kurve jeweils um $i\cdot 1/T_a$ verschoben überlagert. Es ist dabei deutlich zu erkennen, daß die Abtastung

mit der Rate $1/T_a$ eine Unterabtastung darstellt, da das dem Short-Term-Fading unterliegende Empfangssignal Frequenzen enthält, die sich beim abgetasteten Signal überlagern (Aliasing). Abbildung A.4 zeigt das Signal nach der anschließenden Multiplikation mit $\mathrm{si}^2(\pi 480ms \cdot f)$ und der Faltung mit $\amalg(480ms \cdot f)$. Das Signal ist periodisch mit $\Delta f = \frac{1}{480ms}$. Es ist zu erkennen, daß das Signal keine charakteristischen Frequenzen enthält, die auf die augenblickliche Fahrzeuggeschwindigkeit schließen lassen.
Die folgenden Überlegungen zeigen, daß eine Erkennung des Musters dennoch möglich ist. Betrachtet man zunächst den Fall einer rayleighverteilten Einhüllenden, so ist der Mittelwert der Signalleistung $E(s) = \sigma^2$, seine Streuung ebensogroß. Für die hier angestellten Betrachtungen ist der Mittelwert von Bedeutung. Er stellt also hier das Nutzsignal dar. Anhand von Gleichung (A.5) ist zu erkennen, daß sich die Streuung durch die Mittelung über die 12 Abtastwerte verringert, da die Korrelation der betrachteten Werte stets kleiner als eins ist, so daß die Streuung, also die Störleistung, stets kleiner als die Nutzleistung ist. Daher ist aus signaltheoretischer Sicht eine Erkennung des Signals möglich.
Wie bereits weiter oben erwähnt, nimmt bei Mobilfunksignalen, bei denen auch der direkte Ausbreitungspfad eine Rolle spielt und deren Einhüllende daher der Rice-Verteilung gehorcht, die Streuung bei konstantem Mittelwert ab, je stärker der Einfluß des direkten Pfades ist. Für die Mustererkennung bedeutet dies, daß der Anteil des Störsignals dann weiter zurückgeht.
Schließlich ist anzumerken, daß die vorstehenden Betrachtung für den Fall gelten, daß zur Mittelung unmittelbar die Leistungswerte herangezogen werden. Tatsächlich wird jedoch die Leistung gemessen in dB zugrunde gelegt. Die Meßdaten entsprechen also den logarithmierten Leistungswerten. Die vorstehenden Ausführungen können dennoch nach A.1 einen ungefähren Eindruck für die Meßdaten geben.

ANHANG B

Abkürzungen

AGC	*Access Grant Channel* Zuteilungskanal für Verbindungsaufbau
AUC	*Authentication Centre* Authentifizierungszentrale
BCCH	*Broadcast Control Channel* Verteilsteuerkanal für Orientierungsinformation
BS	Basisstation
BSC	*Base Station Controller* Basisstations-Steuereinheit
BSS	*Base Station Subsystem* Basisstations-Teilsystem, bestehend aus einem BSC und mehreren BTSs
BTS	*Base Transceiver Station* Sende-/Empfangseinrichtung einer Basisstation
CCH	*Control Channel* Steuerkanal zur Übertragung von Signalisierdaten
CEPT	*Conférence Européenne des Postes et Télécommunications* Standardisierungsgremium der europäischen Postverwaltungen, Vorläufer der ETSI
CM	*Call Management* Verbindungsverwaltung: Verbindungssteuerung, Zusatzdienste, Kurznachrichten
C-Netz	Analoges deutsches Mobilfunknetz
D1-Netz	Deutsches GSM 900-Netz der Telekom
D2-Netz	Deutsches GSM 900-Netz der Mannesmann Mobilfunk GmbH

DCS 1800 *Digital Cellular System at 1800 MHz*, der GSM-Standard im 1800 MHz-Frequenzbereich

DECT *Digital European Cordless Telephone* Europäischer Standard für schnurloses Telefon

DTX *Discontinuous Transmission* Zeitliche Unterbrechung des Senders bei Sprachübertragung

E1-Netz Deutsches DCS 1800-Netz der E-Plus Mobilfunk GmbH

EIR *Equipment Identity Register* Datenbank mit Gerätekennungen

ETSI *European Telecommunications Standard Institute* Europäische Standardisierungsorganisation für Telekommunikation

FACCH *Fast Associated Control Channel* Schneller Steuerkanal zur Handover-Signalisierung während einer Verbindung, „stiehlt" Übertragungskapazität vom TCH

FCCH *Frequency Correction Channel* Frequenzkorrektur-Steuerkanal

FDM *Frequency Division Multiplexing* Frequenzvielfach

FDMA *Frequency Division Multiple Access* Frequenzvielfach-Zugriffsverfahren

GMSC *Gateway MSC* Mobilvermittlung, Schnittstelle zum Festnetz

GPS *Global Positioning System* Satellitengestütztes Navigationssystem

GMSK *Gaussian Minimum Shift Keying* Modulationsverfahren im GSM

GSM *Global System for Mobile Communications* Europäischer Mobilfunkstandard der ETSI, ursprüngliche Bedeutung der Abkürzung: *Groupe Spécial Mobile*

GSM 900 Der GSM-Standard im 900 MHz-Frequenzbereich

HLR *Home Location Register*
Heimatdatenbank mit den Benutzerdaten

HMM *Hidden Markov Model*
Markov-Modell, bei dem keine eindeutige Zuordnung der Modellzustände zu den Beobachtungswerten möglich ist und bei dem daher der zugrundeliegende Markovprozeß nicht beobachtbar ist

HO_MARGIN Power Budget-Hysterese für Handover-Entscheidung nach GSM 05.08

ISDN *Integrated Services Digital Network*
Integriertes Sprach- und Datennetz

IWF *Interworking Functions*
Schnittstellenfunktionen zur Kopplung verschiedener Dienste (Sprache, Daten) zwischen Fest- und Mobilfunknetz

MM *Mobility Management*
Mobilitätsverwaltung: Aufenthaltsbereiche, Sicherheitsfunktionen

MS Mobilstation

MSC *Mobile Services Switching Centre*
Mobilvermittlung

NMT *Nordic Mobile Telecommunications*
Analoges Mobilfunknetz in Skandinavien

OMC *Operation and Maintenance Centre*
Betriebs- und Wartungszentrale

PCH *Paging Channel*
Aufrufkanal für Verbindungsaufbau Festnetz → Mobilstation

PLMN *Public Land Mobile Network*
Öffentliches Mobilfunknetz

PSDN *Public Switched Data Network*
Öffentliches Datennetz

PSTN *Public Switched Telephone Network*
Öffentliches Telefonnetz

RACH *Random Access Channel*
Zufallszugriffkanal für Verbindungsaufbau

RRM *Radio Resource Management*
Funkbetriebsmittelverwaltung: Kanalzuweisung, Paging, Verschlüsselung, Handover, Leistungssteuerung, Meßwertreporte

RXLEV Empfangspegeleinheit, 0 RXLEV = −111 dBm

RXQUAL Empfangsqualität, kodierte Bitfehlerrate

SACCH *Slow Associated Control Channel*
Steuerkanal zur Übertragung von Steuerinformation und Meßdaten während einer Verbindung, jedem TCH ist ein SACCH beigeordnet

SCH *Synchronisation Channel*
Synchronisierungs-Steuerkanal

SDCCH *Stand-alone Dedicated Control Channel*
Steuerkanal für den Verbindungsaufbau

SIM *Subscriber Identity Module*
Chipkarte zur Personalisierung einer Mobilstation

SS7 *Signalling System No. 7*
Signalisierungsstandard für Telekommunikationsnetze

TCH *Traffic Channel*
Verkehrskanal zur Übertragung von Sprache und Daten

TDM *Time Division Multiplexing*
Zeitvielfach

TDMA *Time Division Multiple Access*
Zeitvielfach-Zugriffsverfahren

TA *Timing Advance*
Zeitlicher Versatz der Mobilstation beim Senden, damit der zugeordnete Zeitschlitz eingehalten wird

VLR *Visitor Location Register*
Besucherdatenbank mit den Benutzerdaten

NACHWORT

Die vorliegende Arbeit entstand in meiner dreieinhalbjährigen Tätigkeit am Lehrstuhl für Kommunikationsnetze der RWTH-Aachen.
Danken möchte ich vor allem Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernhard Walke für die Anregung zu dieser Arbeit, die Betreuung und die jederzeit gewährte Unterstützung.
Weiterhin möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans Dieter Lüke danken, der die Arbeit von Anfang an mit Interesse verfolgt hat und freundlicherweise das Korreferat übernommen hat.
Ein besonderer Dank gilt meinen Diplomanden Markus Scheibenbogen und Sigrid Müller-Herrig, ohne deren Ideen und Einsatz die Arbeit nicht in dieser Zeit hätte gelingen können, und Heike Lorey für alle kritischen Anmerkungen zum Text und ihre Mithilfe beim Erstellen des Manuskripts.
Schließlich möchte ich mich bei allen Kollegen für die angenehme Atmosphäre am Lehrstuhl bedanken.
Gefördert und finanziert wurde dieses Forschungsvorhaben vom „Graduiertenkolleg Informatik und Technik". Dem Sprecher des Graduiertenkollegs, Prof. Otto Spaniol, möchte ich an dieser Stelle für seine Mühen zur Sicherung des Fortbestands des Kollegs in den Zeiten knapper werdender Forschungsmittel danken, sowie dafür, daß er es mir ermöglicht hat, meine Ergebnisse auf mehreren Konferenzen einem interessierten Publikum vorzustellen.

Aachen, im Frühjahr 1997 Olrik Kennemann

AACHENER BEITRÄGE ZUR MOBIL- UND TELEKOMMUNIKATION

ABMT Band 1

Herrmann, C.
Stochastische Modelle für ATM-Konzepte,
1. Auflage 1995, 138 Seiten;
ISBN 3-86073-380-X

ABMT Band 2

Lawniczak, D. R.
Modellierung und Bewertung der Datenverwaltungskonzepte in UMTS,
1. Auflage 1995, 230 Seiten;
ISBN 3-86073-381-8

ABMT Band 3

Junius, M.
Leistungsbewertung intelligenter Handover-Verfahren für zellulare Mobilfunksysteme,
1. Auflage 1995, 208 Seiten;
ISBN 3-86073-382-6

ABMT Band 4

Steffan, H.
Stochastische Modelle für den Funkkanal und deren Anwendung,
1. Auflage 1996, 164 Seiten;
ISBN 3-86073-383-4

ABMT Band 5

Böhmer, S.
Entwurf eines ATM-basierten Funknetzes und Software-Entwurfsmethodik zur Implementierung,
1. Auflage 1996, 172 Seiten;
ISBN 3-86073-384-2

ABMT Band 6

Guntermann, M.
Universelle Benutzermobilität auf der Basis des Intelligenten Netzes - Entwurf, Bewertung und Implementierung -,
1. Auflage 1996, 164 Seiten;
ISBN 3-86073-385-0

ABMT Band 7

Kleier, S.
Neue Konzepte zur Unterstützung von Mobilität in Telekommunikationsnetzen,
1. Auflage 1996, 204 Seiten;
ISBN 3-86073-386-9

ABMT Band 8

Decker, P.
Entwurf und Leistungsbewertung hybrider Fehlersicherungsprotokolle für paketierte Sprach- und Datendienste im GSM-Mobilfunksystem,
1. Auflage 1997, 232 Seiten;
ISBN 3-86073-387-7

ABMT Band 9

Hußmann, H.
Algorithmen zur Kapazitätsoptimierung schnurloser Mobilfunksysteme nach DECT-Standard,
1. Auflage 1997, 180 Seiten;
ISBN 3-86073-388-5

ABMT Band 10

Plenge, C.
Leistungsbewertung öffentlicher DECT-Systeme,
1. Auflage 1997, 258 Seiten;
ISBN 3-86073-389-3

ABMT Band 11

Kennemann, O.
Lokalisierung von Mobilstationen anhand ihrer Funkmeßdaten,
1. Auflage 1997, 162 Seiten;
ISBN 3-86073-620-5